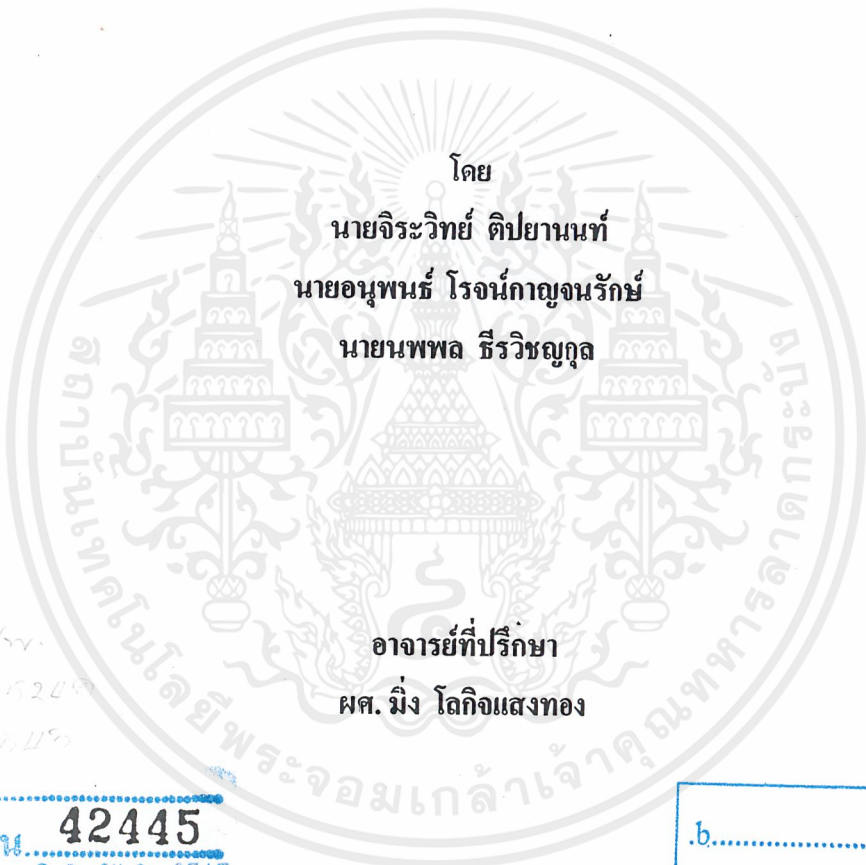




เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนขนาดย่อม
Medium Size Vibration Tester



โดย
นายจิระวิทย์ ดิปลานนท์
นายอนุพนธ์ โรจน์กาญจนรักษ์
นายนพพล ธีรวิญญกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. มิ่ง โลกิจแสงทอง

ม.พ.
จ. 5245
2043

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42445
วัน, เดือน, ปี..... 23 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

MEDIUM SIZE VIBRATION TESTER



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

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2543
เครื่องตรวจสอบการสันเสทือนขนาดย่อม

โดย

นายจิระวิทย์ ตีปานนท์
นายอนุพนธ์ โรจนกาญจนรักษ์
นายนพพล ธีรวิญญกุล

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. มิ่ง โลกิจแสงทอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนขนาดย่อม
นักศึกษา	จิระวิทย์ ติทยานนท์ 40010135
	อนุพนธ์ โรจน์กาญจนรักษ์ 40010179
	นพพล ชีรวิญญกุล 40010360
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. มิ่ง โลกิจแสงทอง

บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เรียบเรียงขึ้นจากผลงานที่ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบการทำงานของเครื่องสั่นสะเทือน ซึ่งมีจุดประสงค์ที่จะจำลองการสั่นสะเทือนของแบบบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการขนส่งของรถโดยสารจริง โดยนำค่าความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนทางทฤษฎีสำหรับยานพาหนะจริง ไปคำนวณหาขนาดต่างๆในการสร้างอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องเช่น ขนาดของสปริง, ขนาดของมอเตอร์ ซึ่งจะใช้มอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับหมุนมวลเยื้องศูนย์กลางทำให้เกิดการหมุนที่ไม่สมดุล และสามารถปรับความเร็วรอบเพื่อเปลี่ยนค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนจากเครื่องวาริแอดได้ แล้ววัดค่าการสั่นสะเทือนโดยทดลองค่าความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงดันไฟฟ้า กับขนาดของของความเร็วรอบมอเตอร์, แอมพลิจูด และค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น รวมถึงทำการเปรียบเทียบลักษณะผลของความถี่และแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นกับผลทางทฤษฎี จากภาระขนาดต่างๆด้วยเครื่องมือวัดทางกล ซึ่งสามารถทำให้ค่าถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นโดยใช้เครื่องมือ วัดค่าการสั่นสะเทือนนี้เช่น เครื่องวัดการสั่นสะเทือน (Vibrometer), เครื่องมือวัดความเร็ว (Velometer) และเครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer) ดังนั้นเครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนนี้จึงสร้างขึ้นโดยสอดคล้องกับความต้องการ ชีดความสามารถ และราคาอุปกรณ์ที่เหมาะสม เพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคตต่อไป

Thesis Title	Medium Size Vibration Tester	
Student	Jirawit Tippayanon	40010135
	Anupon Rojkarnjanarak	40010179
	Noppol Teeravichayakul	40010360
Level of Study	Bachelor of Engineering in Mechanical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	
Year	2000	
Thesis Advisor	Mr. Ming Lokisangthong	

Abstract

This pre-thesis concerns about the designing and creating of the Vibration operating system. The objective is to simulate the vibration of packaging that has an effect on the item during the transportation on a passenger car by to lead frequency and amplitude of theory vibration for real vehicle to calculate size in creation of accessory such as size of spring, size of motor that use alternating current motor in order to rotate the mass center and cause the unbalance rotation. The speed is adjustable in order to change the variable of vibration by means of the Variac. We measure the result of the item vibration by experiment of relation between voltage with velocity circle of motor, amplitude and frequency in vibration that add to compare result of amplitude and frequency in theory from variable size of load by mechanical measurement. It can accurate more than by use those measurement such as Vibrometer, Velometer and Accelerometer. So that Vibration tester is developed as relate with requirement, capability and a low cost for advantageous in future.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. มิ่ง โลกิจ
แสงทอง และอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง ตลอดจนวิธีการแก้ไขปัญหาให้สำเร็จลุล่วงไป
ด้วยดี ขอขอบคุณที่มณฑา เทียมเมือง และพี่โก้ ที่ให้คำแนะนำด้าน mechanic และขอขอบคุณที่ปัญญา
แดงวิไลลักษณ์ ที่ให้คำปรึกษาด้านคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ที่ให้คำปรึกษา และมีส่วนร่วมทำให้การทำโครงการนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปได้ด้วยดี



จิระวิทย์ คิทยานนท์
อนุพนธ์ โรจน์กาญจนรักษ์
นพพล ชีรวิษณุกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ	8
2.1 การสันสะเทือนของระบบเครื่องจักรกล	8
2.2 สปริง	15
2.3 อุปกรณ์การวัดค่าการสันสะเทือน	22
2.4 การแยกการสันสะเทือน	24
บทที่ 3 การออกแบบชุดอุปกรณ์	25
3.1 การศึกษาถึงพฤติกรรมการสันสะเทือนของยานพาหนะจริง	25
3.2 รูปแบบของเครื่อง	25
3.3 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์	29
3.4 การคำนวณหาขนาดสปริง	30
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
4.1 การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง	34
4.2 ผลการทดลอง	35
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
5.1 สรุป	42
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	42
เอกสารอ้างอิง	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก	หน้า
ภาคผนวก ก. วัสดุบางชนิดที่ใช้ทำสปริง	46
ภาคผนวก ข. ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของลวดสปริง	47
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับสปริงขดรับแรงดึงและรับแรงกด	48
ภาคผนวก ง. ตารางแสดงค่าประมาณของความยาวอิสระและความยาวแข็งตัว	49
ภาคผนวก จ. ตารางแสดงคุณสมบัติของลวดสปริง ทดสอบค่าความ	50
ภาคผนวก ฉ. ข้อมูลการสันสะเทือนของยานพาหนะจริง	51
ภาคผนวก ช. แสดงการเขียนโปรแกรม MATLAB	53
ภาคผนวก ซ. กราฟความสัมพันธ์ $\frac{MX}{me}$ และ $\frac{\omega}{\omega_n}$	55
ภาคผนวก ฎ. แสดงขนาดต่างๆ ของแบบชุดเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือนขนาดย่อม	56
	57

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือนแบบ VT-T	2
1.2	ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือนแบบ HVT-T	2
1.3	ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือนแบบ VT-H	3
1.4	ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือนแบบ VT-H (Trunnion)	3
1.5	ระบบโต๊ะสั่นกับ 6 ระดับอิสระ	4
1.6	การตรวจสอบเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ซับซ้อน	4
1.7	การตรวจสอบการสันสะเทือนของร่างกายสิ่งมีชีวิต	5
1.8	การจำลองเกี่ยวกับการทดสอบแผ่นดินไหว	5
1.9	การจำลองถนน	6
1.10	ระบบการวัดพื้นฐานยานพาหนะ	6
1.11	การตรวจสอบสำหรับระบบส่วนตัวถัง	7
2.1	ระบบการสันสะเทือน	9
2.2	ลักษณะของแรงกระทำและการเคลื่อนที่	12
2.3	ลักษณะของการเคลื่อนที่และเวลา	13
2.4	ระบบการเสียสมดุลในการหมุน	13
2.5	สปริงชด	16
2.6	ปลายสปริงชดรับแรงกด	18
2.7	ระยะยุบตัวของสปริงชด	19
2.8	แผนภาพการออกแบบสปริงชดภายใต้แรงเปลี่ยนแปลง	20
2.9	รูปแบบแผ่นสามเหลี่ยม (wedge) ทดสอบแอมพลิจูด	22
2.10	รูปแบบการทดสอบค่าความถี่	23
3.1	ภาพจริงและแบบโดยรวมของเครื่องตรวจสอบการสันสะเทือน ขนาดย่อม	25
3.2	ภาพจริงของส่วนที่เกิดการสันสะเทือน	26
3.3	ภาพจริงแสดงชุดสปริงชดและชุดจานหมุน	26
3.4	ภาพจริงแสดงชุดทดสอบค่าแอมพลิจูดการสันสะเทือน	27
3.5	ภาพจริงแสดงชุดทดสอบค่าความถี่การสันสะเทือน	27
3.6	ภาพจริงแสดงชุดปรับความเร็วรอบและชุดวัดความเร็วรอบ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า ζ กับ $\frac{MX}{me}$	31
5.1	กราฟแสดงผลการทดลองระหว่างค่า $\frac{MX}{me}$ กับ $\frac{\omega}{\omega_n}$ กรณีไม่มีภาระ	43
5.2	กราฟแสดงผลการทดลองระหว่างค่า $\frac{MX}{me}$ กับ $\frac{\omega}{\omega_n}$ กรณีมีภาระ 4 kg.	44



บทที่ 1

บทนำ

โครงการนี้จัดทำเพื่อจำลองการสั่นสะเทือนของแบบบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการขนส่งของรถโดยสารจริงโดยทำการออกแบบและและสร้างระบบการทำงานของเครื่องสั่นสะเทือน โดยใช้ชื่อว่า “เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนขนาดย่อม” โดยอาศัยหลักการของการเสียสมดุลในการหมุน(Rotating Unbalance)ซึ่งความไม่สมดุลในอุปกรณ์ที่มีการหมุนจะเป็นต้นเหตุให้เกิดการสั่นสะเทือน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมและด้านการพัฒนาวิจัยต่อไป

ภายในรายงานฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาในส่วนของทฤษฎีต่างๆที่ได้ศึกษาค้นคว้ามาใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบ ทั้งในด้านของรูปแบบ หลักการของชุดอุปกรณ์ หลักวิชาการ ความรู้ในการเลือกใช้และติดตั้งเครื่องมือการวัดและอื่นๆ ในส่วนของการออกแบบเป็นการแสดงภาพของชุดอุปกรณ์ที่ได้สร้างสำเร็จแล้ว พร้อมทั้งอธิบายการทำงานและจุดประสงค์ในการออกแบบหลังจากนั้นเป็นส่วนของการทดลองและผลการทดลอง ตลอดจนทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี เพื่อนำไปประยุกต์ให้อุปกรณ์ชุดนี้สามารถนำไปทดสอบได้โดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ทางกลุ่มผู้จัดทำโครงการหวังว่ารายงานเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ค้นคว้า ทั้งเพื่อการศึกษาหรือเพื่อการพัฒนาชุดอุปกรณ์นี้ให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องหรือประโยชน์อื่นใดให้สูงขึ้น

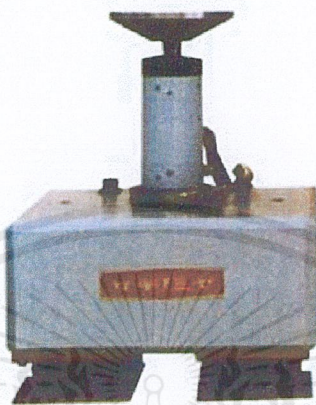
การออกแบบนี้ใช้มอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับหมุนมวลเยื้องศูนย์กลางทำให้เกิดการหมุนที่ไม่สมดุล และสามารถปรับความเร็วรอบเพื่อเปลี่ยนค่าความถี่ในการสั่นสะเทือนจากเครื่องวาริแอดได้แล้ววัดค่าการสั่นสะเทือนของผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจสอบผลด้วยเครื่องมือวัดทางกล

วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบการสั่นสะเทือนคือตรวจสอบเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถคงสภาพการสั่นสะเทือนในช่วงการขนส่งโดยปราศจากการแตกหักหรือเสียหายและผลิตภัณฑ์มีอายุยาวนานยิ่งขึ้นซึ่งสามารถแบ่งการตรวจสอบเป็นด้านต่างๆได้แก่

1. การตรวจสอบสำหรับการพัฒนาและการปรับปรุงให้ดีขึ้น
2. การตรวจสอบเกี่ยวกับด้านสิ่งแวดล้อม
3. การตรวจสอบด้านการควบคุมคุณภาพ
4. การตรวจสอบด้านการขนส่ง
5. การตรวจสอบสำหรับการป้องกันส่วนที่ได้อ่อนไหว

ในขณะเดียวกัน วิวัฒนาการของเครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนในปัจจุบันมีความก้าวหน้าและมีการใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อนมากขึ้น มีรูปแบบต่างๆมากมายได้แก่

ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนแบบ VT-T เป็นเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนอย่าง
พิเศษสำหรับทิศทางในแนวตั้งตรง ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนแบบ VT-T

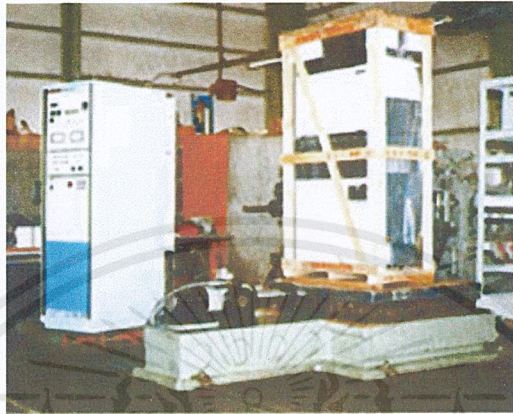
ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนแบบ HVT-V เป็นเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนความถี่
สูงใช้หัวลวดควบคุมแบบ VSH ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ระบบเครื่องตรวจสอบการสันสะท้อนแบบ HVT-V

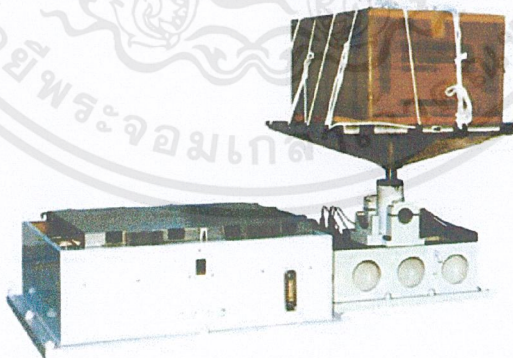
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบเครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบ VT-H เป็นเครื่องมือพิเศษที่ใช้การสั่นสะเทือนตาม
แนวนอน ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบเครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบ VT-H

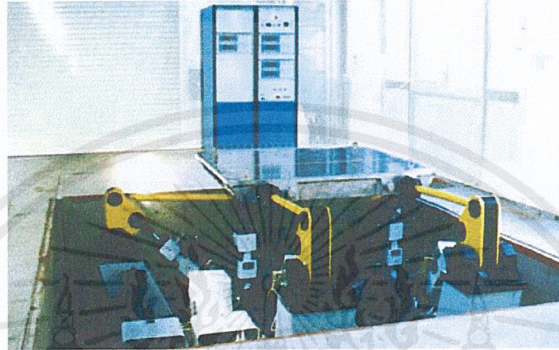
ระบบการตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบ VT-H ดังรูปที่ 1.4 เป็นแบบทรูเนียน(Trunnion) การ
ตรวจสอบการสั่นสะเทือนได้ใช้ทิศทางทั้งแนวตั้งและแนวนอน



รูปที่ 1.4 ระบบการตรวจสอบการสั่นสะเทือนแบบ VT-H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

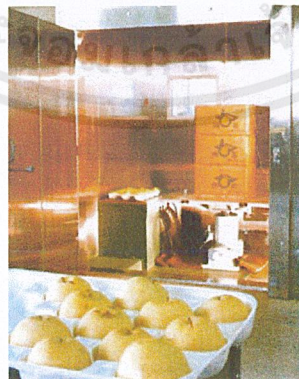
ระบบโต๊ะสั่นกับ 6 ระดับอิสระ สำหรับการจำลองซึ่งสามารถสั่นได้ 3 ทิศทาง และได้ผลคลื่น
 เชียสมิก(Seismic)กับไฮดรอลิก 6 ตัวซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ระบบมีโครงสร้างเชิงกลสามารถสั่นทิศ
 ทางใดก็ได้ที่เหมาะสมมากสำหรับหลายๆรูปแบบของการตรวจสอบการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ระบบโต๊ะสั่นกับ 6 ระดับอิสระ

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนไปใช้ในด้านต่างๆ ได้แก่

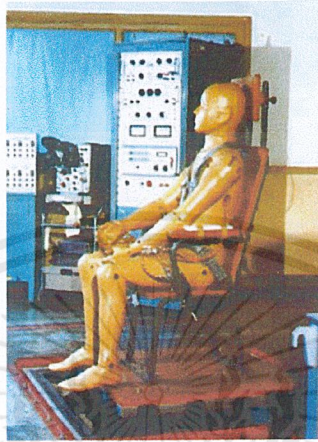
-การตรวจสอบเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ซับซ้อน อุปกรณ์ตรวจสอบได้ถูกใช้ในการตรวจสอบนี้
 สำหรับศึกษาผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อพืชและผลไม้ต่างๆภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมกับ
 อุณหภูมิต่างๆกัน ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การตรวจสอบเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การตรวจสอบการสั่นสะเทือนของร่างกายสิ่งมีชีวิต การทดสอบนี้สำหรับตรวจสอบผลกระทบของการเร่งบนร่างกายสิ่งมีชีวิตและความสามารถในการป้องกันจากความเสียหายที่ถูกกระทบ ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 การตรวจสอบการสั่นสะเทือนของร่างกายสิ่งมีชีวิต

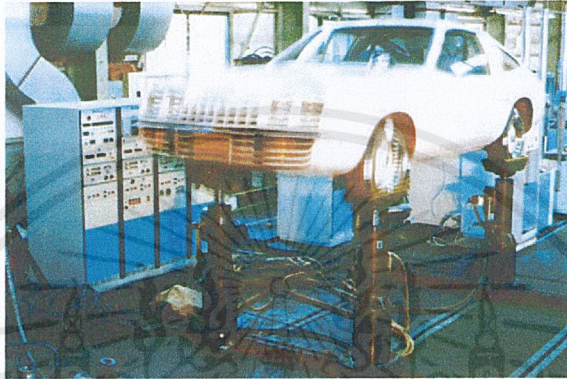
-การจำลองเกี่ยวกับการทดลองแผ่นดินไหว นี่คือการทดลองการสั่นสะเทือนสำหรับการจำลองเกี่ยวกับการทดลองแผ่นดินไหวซึ่งสามารถทดลองแผ่นดินไหวจริงกับการตรวจสอบนี้ได้เสมือนดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 การจำลองเกี่ยวกับการทดลองแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การจำลองถนน การตรวจสอบที่สำคัญที่สุดระหว่างหลายๆตัวอย่างการประยุกต์ของการจำลองถนนคือการตรวจสอบความทนทาน เครื่องมือนี้ถูกใช้ในการตรวจสอบของยานพาหนะและศึกษาถึงเสียงที่ดังและตัวประกอบการสั่นสะเทือน ดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 การจำลองถนน

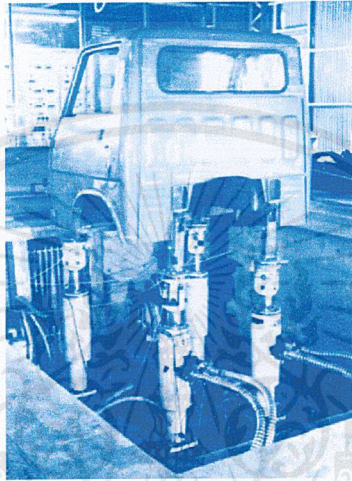
-ระบบการวัดพื้นฐานยานพาหนะ ตัวตรวจสอบประเมินความคงที่ของรถที่กำลังวิ่งบนทางด่วนและถนนที่ขรุขระ ที่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกขณะวิ่ง ดังรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ระบบการวัดพื้นฐานยานพาหนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ตรวจสอบระบบสำหรับระบบส่วนตัวถัง การตรวจสอบนี้ถูกปฏิบัติกับระบบที่ไม่มีล้อและกับการ
สันตะเทือนที่ทำให้ตำแหน่งเลื่อน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการออกแบบและความแข็งแรงของ
ส่วนตัวถัง ดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 การตรวจสอบสำหรับระบบส่วนตัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบ

2.1 การสั่นสะเทือนของระบบเครื่องจักรกล

ก่อนที่จะศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของระบบเครื่องจักรกล ควรจะต้องทราบคำจำกัดความ, หลักการพื้นฐาน และธรรมชาติทั่ว ๆ ไปของการสั่นสะเทือน และควรมีความรู้พื้นฐานในวิชากลศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านพลศาสตร์

2.1.1 ธรรมชาติของการสั่นสะเทือน

การเคลื่อนที่ไป - มาของระบบเช่นเครื่องจักรกล จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนการเคลื่อนที่ดังกล่าว อาจจะมีลักษณะรูปร่างที่แน่นอน (regular form) หรืออาจจะไม่แน่นอน (irregular or random) โดยทั่วไป จะแบ่งการสั่นสะเทือนออกเป็นสองกรณีคือ การสั่นสะเทือนเสรี (free vibration) , การสั่นสะเทือนแบบ บังคับ (forced vibration) การสั่นสะเทือนเสรี จะเกิดขึ้นในขณะที่ระบบเคลื่อนที่ไป - มาโดยที่ไม่มีแรง กระทำที่ระบบ, ความถี่ของการเคลื่อนที่ไป - มาหรือการสั่นสะเทือนดังกล่าว จะเรียกว่า “ ความถี่ธรรมชาติ” (natural frequency) ซึ่งอาจจะมีค่าเดียว หรือหลายค่าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของ ระบบการสั่นสะเทือน

ซึ่งในโครงการศึกษานี้ เป็นการสั่นสะเทือนแบบบังคับ กล่าวคือ เกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่มีแรง ภายนอกมากระทำที่ระบบและทำให้ระบบเคลื่อนที่ไป - มา เช่นเดียวกับแรงที่กระทำ หรือมีความถี่เท่ากับ ความถี่ของแรง ถ้าความถี่ของแรงที่มากระทำมีค่าเท่ากับ ความถี่ธรรมชาติของระบบ เราจะเรียกว่า ระบบ อยู่ในสภาพการสั่นพ้อง (resonance) คือ จะมีการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงและเป็นอันตรายต่อระบบอย่างมาก การชำรุดเสียหายของโครงสร้าง เช่น ปีกเครื่องบิน, สะพาน หรือตึก อาจจะมีสาเหตุมาจากสภาพการ สั่นพ้อง ดังนั้นในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจึงจำเป็นต้องทราบ ความถี่ธรรมชาติของระบบ

โดยปกติเครื่องจักรกล หรือโครงสร้างจะมีตัวหน่วง (damper) อยู่ในระบบด้วยเสมอ เช่น การเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน การเสียดทานในเนื้อวัสดุในขณะที่วัตถุยืด - หดตัว หรือการเสียดทาน หรือต้านทานการเคลื่อนที่อื่น ๆ เป็นต้น ในการหาความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น เราจะสมมติว่าตัวหน่วง มีค่าน้อยมาก หรือไม่มีตัวหน่วงในระบบเลย อย่างไรก็ตามตัวหน่วงจะมีผลต่อแอมพลิจูดของการสั่น สะเทือนในสภาพการสั่นพ้องเป็นอย่างมาก

2.1.2 ระบบการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced Vibration System)

ระบบการสั่นสะเทือนทั่ว ๆ ไปจะมีแรงภายนอกกระทำอยู่ด้วย แรงที่กระทำจะเป็นฟังก์ชันกับเวลา ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันของแรง หรือ ฟังก์ชันขับ แรงที่กระทำอาจจะอยู่ในแบบต่าง ๆ เช่น ฮาร์มอนิก, ไม่ฮาร์มอนิก แต่กระทำเป็นจังหวะมีลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม เป็นต้น หรือแรงอาจจะอยู่ในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้ให้หนังสือหรือเอกสารฉบับนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสุ่ม (random) ในบางครั้งแรงที่กระทำเป็น แรงกระแทก (impact) การกระทำของแรงชนิดต่าง ๆ ตามที่กล่าวมามีผลทำให้เกิดการตอบสนอง (response) ของระบบขึ้น ซึ่งพิจารณาต่อไป

เราจะพิจารณาเฉพาะการตอบสนองของระบบระดับขั้นเดียวที่ถูกบังคับด้วยแบบฮาร์มอนิก แรงดังกล่าวจะเขียนในรูป

$$F = F_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.1)$$

ซึ่ง F_0 = แอมพลิจูดของแรง F

ω = ความถี่ของแรงกระทำ

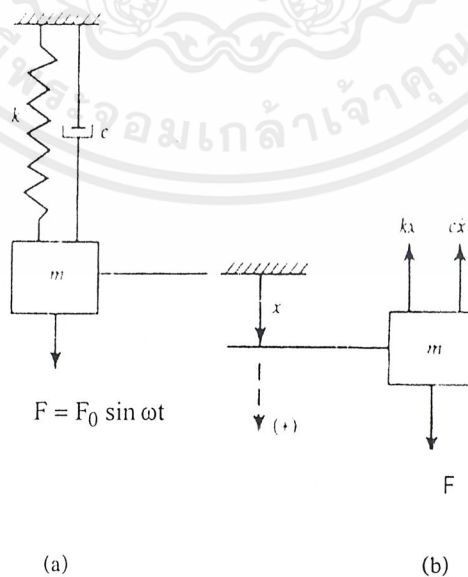
ϕ = มุมเฟสซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเบื้องต้นของแรงที่กระทำ

โดยทั่วไปจะสมมติให้แรงเป็นแบบฮาร์มอนิกเช่น $F = F_0 \sin \omega t$ หรือ $F = F_0 \cos \omega t$

ระบบการสั่นสะเทือนทั่ว ๆ ไปจะมีตัวหน่วงรวมอยู่ด้วย แต่เพื่อความสะดวก ในโครงการนี้จะไม่มีการใช้ตัวหน่วง แต่จากดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1 ถึงแม้จะไม่มีการใช้ตัวหน่วง ในระบบก็ยังคงมีการหน่วงซึ่งเปรียบเสมือนมีตัวหน่วงเกิดขึ้นจาก แรงเสียดทานต่าง ๆ เป็นต้น

2.1.2.1 การสั่นสะเทือนแบบบังคับที่ประกอบด้วยตัวหน่วง

ระบบการสั่นสะเทือนดังรูปที่ 2.1 ถ้าให้ x เป็นการกระจัดและแรง F มีค่าเป็นบวก ถ้ามีทิศทางลงจากรูปที่ 2.1b สมการการเคลื่อนที่ของระบบคือ



รูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m\ddot{x} = kx - c\dot{x} - F$$

หรือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.2)$$

สมมติให้ผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ประกอบด้วย x_a และ x_b ดังนั้น

$$x = x_a + x_b \quad (2.3)$$

ซึ่ง x_a = ฟังก์ชันเดิมเต็ม

x_b = ผลเฉลยเฉพาะราย

ถ้าสมมติให้ค่าคงตัวการหน่วงมีค่าน้อย ค่า x_a หาได้จากสมการ

$$x_a = X'e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi) \quad (2.4)$$

ซึ่ง $\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega =$ ความถี่เชิงวงกลมแบบหน่วง

ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของระบบการสั่นสะเทือนแบบเสรีและแอมพลิจูดจะลดลงเป็นศูนย์ ถ้าเวลาเพิ่มมากขึ้น การเคลื่อนที่ของระบบในช่วงนี้เรียกว่า ภาวะชั่วคราว (transient state) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงแรก ๆ ของการเคลื่อนที่เท่านั้น หลังจากนั้นระบบจะเคลื่อนที่ที่ตกลงลักษณะของแรงภายนอกที่กระทำ

ส่วนค่า x_b นั้นเป็นการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในขณะที่แรง F กระทำ การเคลื่อนที่ของระบบในช่วงนี้เรียกว่า ภาวะคงที่ (steady state)

เนื่องจากแรงที่กระทำอยู่ในแบบของไซน์ ดังนั้นค่า x_b ควรจะสมมติให้อยู่ในแบบของไซน์ และโคไซน์ เช่น

$$x_b = M \sin \omega t + N \cos \omega t \quad (2.5)$$

ซึ่ง M และ N เป็นค่าคงตัวที่จะต้องหาค่าต่อไป ดังนี้คือ แทนค่า $x_b, \dot{x}_b, \ddot{x}_b$ ลงในสมการ (2.2) ผลที่ได้รับคือ

$$-m\omega_n^2(M \sin \omega t + N \cos \omega t) + c\omega(M \cos \omega t - N \sin \omega t) + k(M \sin \omega t + N \cos \omega t) = F_0 \sin \omega t$$

โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ในพจน์ของไซน์และโคไซน์ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(k - m\omega^2)M - c\omega N = F_0 \quad \text{และ} \quad c\omega M + (k - m\omega^2)N = 0 \quad (2.6)$$

หาค่า M และ N โดยใช้กฎของครีเมอร์ คือ

$$M = \frac{(k - m\omega^2)F_0}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad \text{และ} \quad N = \frac{-c\omega F_0}{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad (2.7)$$

เนื่องจากสมการ (2.5) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$x_b = \sqrt{M^2 + N^2} \sin(\omega t - \phi) \quad (2.8)$$

ซึ่ง

$$\tan \phi = \frac{-N}{M} \quad (2.9)$$

แทนสมการ (2.7) ลงใน (2.8) และ (2.9) ดังนั้น

$$x_b = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (2.10)$$

และ

$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \quad (2.11)$$

เนื่องจาก

$$\frac{1}{k} (k - m\omega^2) = 1 - \frac{\omega^2}{\frac{k}{m}} = 1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} = 1 - r^2 \quad (2.12)$$

และ

$$\frac{1}{k} (c\omega) = \left(\frac{2c}{2\sqrt{mk}} \right) \left(\frac{\omega}{\sqrt{k/m}} \right) = 2 \left(\frac{c}{c_c} \right) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) = 2\zeta r \quad (2.13)$$

โดยที่

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad , \quad c_c = 2m\omega_n \quad , \quad \zeta = \frac{c}{c_c}$$

ค่า x_b ในสมการ (2.8) สามารถเขียนในรูปของ

$$x_b = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} = \frac{F_0/k}{\sqrt{\left(\frac{k - m\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} = \frac{X_0}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.15)$$

และ
$$\tan \phi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \frac{c\omega/k}{k - m\omega^2/k} = \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \quad (2.16)$$

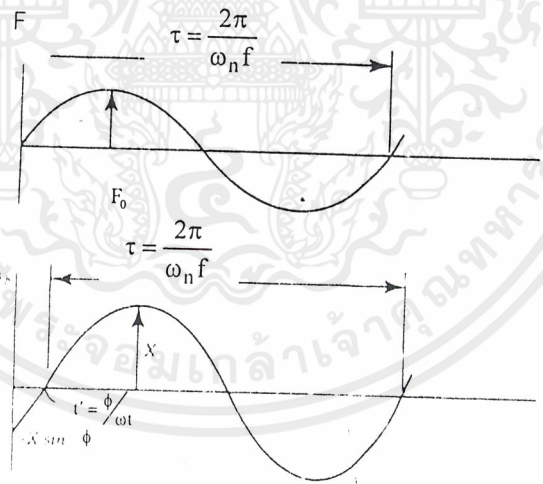
ซึ่ง

X = แอมพลิจูดของ x_b

$X_0 = \frac{F_0}{k}$ = การกระจัดสถิตของสปริงอันเนื่องจาก F_0

$r = \frac{\omega}{\omega_n}$ = อัตราส่วนความถี่ของแรงต่อความถี่ธรรมชาติ

ค่าของ x_b ในสมการ (2.14) แทนการเคลื่อนที่ในภาวะคงที่ของระบบมีแอมพลิจูดเท่ากับ X และมีความถี่เท่ากับค่าความถี่ของแรงที่กระทำ แต่การเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นหลังจากแรง F กระทำเท่ากับมุมเฟส ϕ หรือเท่ากับเวลา t' โดย $t' = \frac{\phi}{\omega}$ ลักษณะของแรงกระทำและการเคลื่อนที่ x_b และ t' ดังเหตุได้จากรูปที่ 2.2



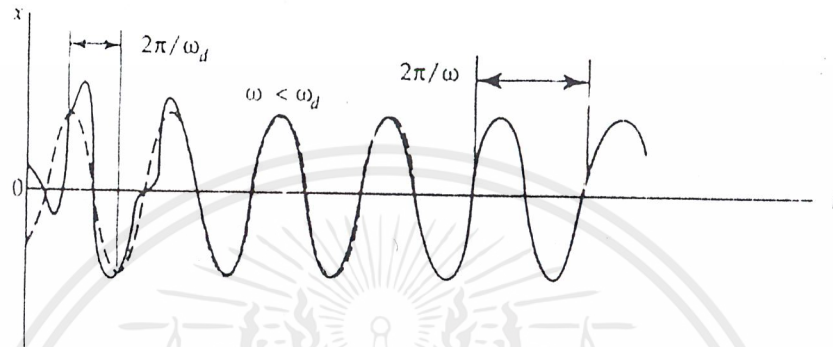
รูปที่ 2.2

แอมพลิจูด X และมุมเฟส ϕ ขึ้นอยู่กับ ζ และอัตราส่วนความถี่ r จากสมการ (2.4) และ (2.14) ผลเฉลยสมบูรณ์ของระบบคือ

$$x = X'e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \psi) + X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

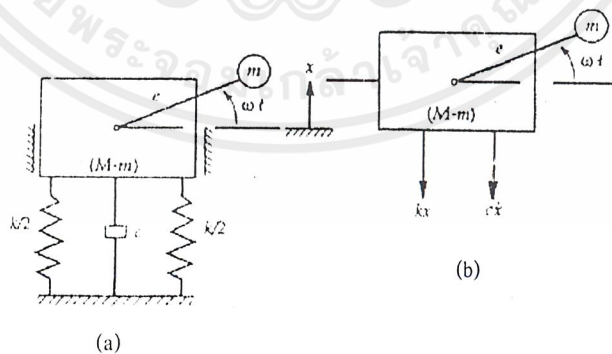
ค่าของ X และ ϕ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของ X แรงที่กระทำ ส่วน X' และ ϕ นั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการเคลื่อนที่และความเร็ว ลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะเห็นได้จากรูปที่ 2.3 โดยสมมติให้ความถี่ของแรงมีค่าน้อยกว่าความถี่หน่วงธรรมชาติของระบบ



รูปที่ 2.3

2.1.2.2 การเสียสมดุลในการหมุน (Rotating Unbalance)

การหมุนรอบแกนของมวลที่ไม่สมดุลจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เช่น การหมุนของเพลาข้อเหวี่ยงที่ไม่สมดุล การหมุนของเพลาที่มีลิ้มหรือมีสกรูยึดติดอยู่ เป็นต้น สมมติมวลดังกล่าวแทนด้วย m ดังรูปที่ 2.4 และให้ M เท่ากับมวลรวมของระบบ ดังนั้นมวลของเครื่องจักรกลจริง ๆ เท่ากับ $(M-m)$, e เป็นระยะเยื้องศูนย์กลางของมวล m ถ้ามวล m เคลื่อนที่รอบแกนด้วยความเร็วเชิงมุม ω เรเดียน / วินาที ดังนั้นตำแหน่งของมวลที่เวลา t ใดๆ ก็คือ ωt (ดังรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4

ถ้าให้มวล $(M-m)$ เคลื่อนที่ได้เฉพาะขึ้น - ลง (แกน Y) เท่านั้น และถ้าเคลื่อนที่ขึ้นจะมีค่าเป็นบวก

ดังนั้นการกระจัดในแนวตั้งของมวล $m = \Delta$ คือ $(x + e \sin \omega t)$ และสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(M - m) \frac{d^2}{dt^2} x + m \frac{d^2}{dt^2} (x + e \sin \omega t) = -kx - c \frac{d}{dt} x \quad (2.18)$$

หรือ

$$M \frac{d^2}{dt^2} x + c \frac{d}{dt} x + kx = me\omega^2 \sin \omega t \quad (2.19)$$

รูปแบบของสมการ (2.19) คล้ายกับสมการ (2.2) การเคลื่อนที่ในภาวะคงที่ของระบบหาได้เช่นเดียวกับสมการ (2.14) คือ

ซึ่ง

$$x = X \sin(\omega t - \phi) \quad (2.20)$$

$$X = \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (2.21)$$

$$= \frac{\frac{me}{M} \omega^2 \frac{M}{k}}{\sqrt{\left(\frac{k - M\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} = \frac{me}{M} \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.22)$$

ดังนั้น

$$\frac{MX}{me} = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.23)$$

และ

$$\tan \phi = \frac{2\zeta r}{1 - r^2} \quad (2.24)$$

เราจะได้สมการสำเร็จคือ

$$x(t) = X_1 e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t + \phi_1) + \frac{me\omega^2}{\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi) \quad (2.25)$$

ส่วนความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ และ x คือการกระจัดของมวลหลัก ($M - m$) ส่วนมุมเฟส ϕ จะเป็นมุมของแกนมวลเอียงศูนย์ m เทียบกับมุม ωt หรือเป็นมุมที่แกนของมวลเคลื่อนที่ล่วงหน้ามวลหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในช่วงภาวะคงที่ (steady state) สามารถจะเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{MX}{me}$ และ $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ ดัง *ภาคผนวก ข.* ส่วนค่าแอมพลิจูดสูงสุดและต่ำสุดหาได้โดยให้ $\frac{d}{dr}\left(\frac{MX}{me}\right) = 0$ ผลที่ได้รับคือ $\frac{MX}{me} = 0$ ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ $r = 0$ และ $\frac{MX}{me}$ มีค่าเข้าใกล้ 1 ถ้า r มีค่ามาก และจุดที่ $\frac{MX}{me}$ มีค่าสูงสุดคือ

$$r = \frac{1}{\sqrt{1-2\zeta^2}} > 1 \quad (2.26)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแอมพลิจูดสูงสุดของการสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นที่จุด r มากกว่า 1 เสมอ เช่น ถ้า $\zeta = 0.707$ แอมพลิจูดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ $r \rightarrow \infty$ และจะมีค่าเท่ากับ 1 จากรูป *ภาคผนวก ข.* จะเห็นว่าแอมพลิจูดจะมีค่าน้อยมากถ้า ωt มีค่าน้อย

2.2 สปริง (Spring)

สปริงเป็นชิ้นส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งมีใช้อยู่ในเครื่องจักรกลทั่วไป

2.2.1 วัสดุที่ใช้ทำลวดสปริง

ดูรายละเอียดได้จาก *ภาคผนวก ก.*

2.2.2 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ค่าความต้านแรงของวัสดุที่ใช้ทำลวดสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของลวดสปริง ดังนั้นจึงอาจเขียนในรูปสมการที่ใช้หาค่าความต้านแรงของวัสดุลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ ได้ดังนี้คือ

$$\sigma_u = \frac{A}{d^x} \quad (2.27)$$

$$\tau_n = \frac{B}{d^y} \quad (2.28)$$

โดยที่ $\sigma_u =$ ความต้านแรงดึงต่ำสุด $= \frac{\tau_y}{0.6}$

$\tau_n =$ ความต้านแรงเฉือนทนทาน

$d =$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเป็น mm

$A, B, x, y =$ ค่าคงที่

ค่าคงที่โดยประมาณของสมการที่ (2.27) และ (2.28) แสดงไว้ใน *ภาคผนวก ข.* ค่าความต้านแรง

มีหน่วยเป็น $\frac{N}{mm^2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนของวัสดุ ให้ใช้ค่าประมาณดังนี้ (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิม)

$$E = 200 \text{ kN/mm}^2, \quad G = 80 \text{ kN/mm}^2$$

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

$$E = 180 \text{ kN/mm}^2, \quad G = 70 \text{ kN/mm}^2$$

ค่าต่าง ๆ ที่ได้แสดงใน ภาคผนวก ข. เป็นเพียงแต่ค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบในการคำนวณเกี่ยวกับสปริงชนิด ในการทำงานจริงผู้ออกแบบจะต้องสอบถามค่าที่แน่นอนจากผู้ผลิตโดยตรง สำหรับค่าความต้านแรงเฉือนครากจะใช้ค่าประมาณ

$$\begin{aligned} \tau_y &= 0.60\sigma_u && \text{สำหรับวัสดุทั่วไป} \\ \tau_y &= 0.47\sigma_u && \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม} \end{aligned}$$

2.2.3 ความเค้นในสปริงขดรับแรงกด

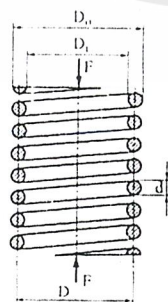
พิจารณาสปริงขดซึ่งรับแรงกด F ในแนวแกนของสปริงดังรูปที่ 2.5 และให้

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดสปริง

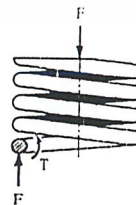
D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดสปริง

$D = (D_0 + D_i)/2$ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของขดสปริง

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสปริง



(a) แรงกดกระทำในแนวแกนของสปริง



(b) แผนภาพวัตถุอิสระแสดงให้เห็นว่าลวด

อยู่ภายใต้แรงเฉือนและ โมเมนต์ดัด

รูปที่ 2.5 สปริงขด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ตัดส่วนหนึ่งของสปริงออกมาพิจารณาจะเห็นว่า ลวดสปริงอยู่ภายใต้แรงภายใน F และ โมเมนต์บิด T ดังรูปที่ 2.5b ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในลวดสปริงคือ

$$\tau = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \quad (2.29a)$$

แต่

$$T = \frac{FD}{2}$$

และ

$$\frac{J}{r} = \frac{\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)}{d/2} = \frac{\pi d^3}{16}$$

และ

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.29a) ใหม่ได้เป็น

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2.29b)$$

ถ้าให้ $C = D/d$ ซึ่งเรียกว่า “ดัชนีสปริง” (spring index) สมการที่ (2.29b) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2.29c)$$

โดยที่ $K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$

ค่า K_s นี้เรียกว่า “ตัวประกอบความเค้นเฉือน” (shear stress correction factor) ซึ่งเป็นค่าทำให้ความเค้นเฉือนในสปริงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนตรง F/A

ในการคำนวณที่ผ่านมาได้ใช้สูตรความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด Tr/J ซึ่งเป็นสูตรสำหรับการบิดชิ้นส่วนตรง เช่น เพลา แต่ในสปริง เส้นลวดบิดวนไปตามความโค้งของสปริงทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณด้านในของสปริงขด จึงได้มีการเสนอให้มีการแก้ไขสมการ (2.29c) โดยเพิ่มตัวประกอบความโค้ง (curvature correction factor) K_c เข้าไปในสมการ ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} K &= K_c K_s \\ &= \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \end{aligned} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า K นี้เรียกว่า “ตัวประกอบของวาล์ (Wahl’s factor) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการคำนวณจากสมการที่ (2.30) หรืออ่านค่าได้จาก *ภาคผนวก ค*. ดังนั้นความเค้นเฉือนในสมการที่ (2.30) จึงเป็น

$$\begin{aligned}\tau &= K \frac{8FD}{\pi d^3} \\ &= K \frac{8FC}{\pi d^2}\end{aligned}\quad (2.31)$$

2.2.4 ความแข็งตึงของสปริง

ความแข็งตึงของสปริง (spring stiffness) หมายถึงปริมาณของแรงที่ใช้ในการทำให้สปริงยืด หรือหดหนึ่งหน่วยความยาวในแนวแกนของสปริง ถ้าให้ δ เป็นระยะยุบตัวของสปริงภายใต้แรงกด F ค่าความแข็งตึงของสปริง คือ

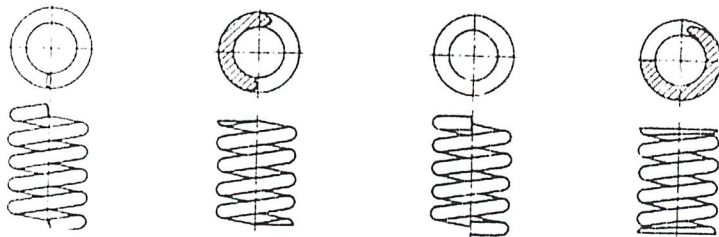
$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{Gd}{8C^3n} \quad (2.32)$$

$$\text{โดยที่ } \delta = \frac{8FD^3n}{Gd^4} = \frac{8FC^3n}{Gd} \quad (2.33)$$

และ n = จำนวนขด

2.2.5 จำนวนขดทำการ

สปริงรับแรงกดที่ใช้งานกันอยู่ทั่ว ๆ ไปจะมีปลายทั้งสองในลักษณะดังรูปที่ 2.6 โดยปกติแล้วต้องการให้ปลายสปริงสัมผัสกับสิ่งที่สปริงกดอยู่ให้มากที่สุด ในบางกรณีสปริงตั้งอยู่ในช่องซึ่งมีพื้นที่กดที่เรียบแบน ดังนั้นจึงนิยมตัดปลายสปริงชนิดนี้ให้เรียบเป็นฐานตั้ง เนื่องจากขดส่วนที่ตัดปลายไปจะสูญเสียผลในการเป็นสปริงไปมาก ฉะนั้นการคำนวณจึงให้หักเอาจำนวนขดเหล่านี้ออก จำนวนขดที่เหลืออยู่ทั้งหมด เรียกว่า “ขดทำการ” ซึ่งก็เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ถ้าให้ n_t เป็นจำนวนขดทั้งหมดของสปริงขด ก็จะใช้คำนวณขดทำการได้ดังนี้คือ



(a) ปลายกลม (b) ปลายกลมและเจียรไน (c) ปลายตรง (d) ปลายตรงและเจียรไน

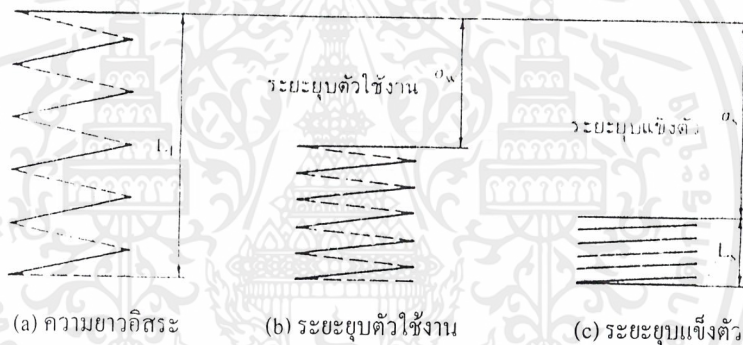
รูปที่ 2.6 ปลายสปริงขดรับแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลายธรรมดา (plain ends)	$n = n_t$	
ปลายธรรมดาและเจียรระไน (ground ends)	$n = n_t - 1$	
ปลายตรง (square ends)	$n = n_t - 1.5$	
ปลายตรงและเจียรระไน	$n = n_t - 2$	(2.34)

2.2.6 ระยะยวบตัวใช้งาน

ความยาวของสปริงชนิดในขณะที่ยังไม่มีแรงภายนอกกระทำเรียกว่า “ความยาวอิสระ” (L_f) ดังรูปที่ 2.7a เมื่อมีแรงภายนอกกดสปริงชนิดนี้ให้ทุกขดติดกันพอดีดังรูปที่ 2.7c ความยาวของสปริงชนิดนี้เรียกว่า “ความยาวแข็งตัว” (solid height : L_s) แรงและความเค้นขณะนี้เรียกว่า “แรงแข็งตัว” (solid force) และ “ความเค้นแข็งตัว” (solid stress) ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 ระยะยวบตัวของสปริงชนิด

สำหรับการออกแบบสปริงให้รับแรง F สูงสุดขณะใช้งาน โดยที่สปริงจะยวบตัวลงไป δ_w ค่า δ_w นี้จะเรียกว่า “ระยะยวบตัวใช้งาน” ดังรูปที่ 2.8b ถ้าให้ระยะยวบแข็งตัว (solid deflection) δ_s เป็นผลต่างระหว่างความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวจะได้ว่า

$$\delta_s = L_f - L_s$$

ก็จะทำให้สามารถเพื่อการยวบตัวของสปริงให้มีการยวบตัวมากกว่าระยะยวบตัวใช้งานได้อย่างมีหลักเกณฑ์พอสมควร โดยใช้ค่าความเผื่อการกดติด (clash allowance : r_c) ซึ่งมีนิยามว่า

$$r_c = \frac{\delta_s - \delta_w}{\delta_w} \tag{2.35}$$

ค่าความเผื่อการกดติดนี้เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของระยะยวบตัว ที่อาจจะมิได้เกินกว่าระยะยวบตัวใช้งาน โดยทำหน้าที่ให้ความปลอดภัยแก่การใช้งานยิ่งหนักขึ้นไปอีก ค่า r_c นี้แนะนำให้ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

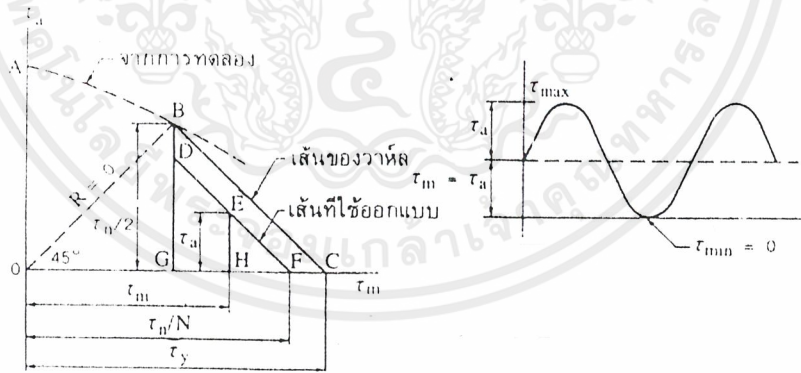
ประมาณ 0.20 ซึ่งก็หมายความว่าสามารถใช้สปริงรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าแรงที่ใช้ออกแบบอีก 20% สปริงทุกชนิดจึงจะติดกันหมด จึงเป็นการป้องกันมิให้ผิวหน้าของสปริงเสียหายเนื่องจากการสัมผัสและเสียดสีกันระหว่างขดได้ อีกประการหนึ่งถ้าสปริงยุบตัวจนถึงความยาวแข็งตัว สปริงก็จะหมดคุณสมบัติในการใช้งานรับแรงสั่นสะเทือนหรือ อื่น ๆ ตามต้องการต่อไป

ค่าความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวของสปริงขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายสปริงขด ซึ่งอาจจะหาค่าโดยประมาณได้จาก *ภาคผนวก ง.*

2.2.7 การออกแบบสปริงขดภายใต้แรงเปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาโครงการนี้ สปริงจะถูกแรงเปลี่ยนแปลงกระทำ กล่าวคือ สปริงจะรับแรงที่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าต่ำสุดไปยังค่าสูงสุดเป็นวัฏจักร ดังนั้นสปริงประเภทนี้จึงมักจะเสียหายเนื่องจากการล้า ถ้าแรงที่มากกระทำตลอดอายุการใช้งานของสปริงมีจำนวนครั้งนับไม่ถ้วน (มีค่ามากกว่า 10^6 ครั้งขึ้นไป) สปริงมักจะออกแบบให้มีอายุการใช้งานไม่จำกัด

วิธีการออกแบบที่นำมาใช้นั้น ดัดแปลงมาจากวิธีของโคเตอร์เบอร์กทั้งนี้เพราะสปริงขดที่ใช้งานอยู่ทั่วไปจะไม่ใช้รับแรงกระทำซ้ำสองทิศทาง แต่จะรับแรงที่กระทำซ้ำทิศทางเดียวดังรูปที่ 2.8b วาห์ลจึงได้เสนอเส้นที่แสดงการเสียหายของสปริงบนแผนภาพ $\tau_a - \tau_m$ ดังรูปที่ 2.8a เส้น AB เป็นเส้นที่แสดงการเสียหายของสปริงที่ได้จากการทดลองถ้าคิดให้แรงที่กระทำต่อสปริงขดเริ่มจากศูนย์



(a) แผนภาพแสดงเส้นที่ใช้ออกแบบสปริงของวาห์ล

(b) แรงกระทำซ้ำทิศทางเดียว

รูปที่ 2.8

$$R = \frac{\tau_{min}}{\tau_{max}} = 0$$

ดังนั้น

$$\tau_m = \tau_a = \frac{\tau_{max}}{2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือเส้น OB เป็นเส้นที่จำกัดขอบเขตของความเค้นในสปริงขด วาห์ลได้กำหนดเส้นแสดงการเสียหายของสปริงโดยประมาณคือ ลากเส้นจากจุด B มายังจุด C ดังในรูปที่ 2.8a ถ้าความเค้นสูงสุดในสปริงเท่ากับความต้านแรงเฉือนทนทาน τ_n ความสูง BG จะเท่ากับ $\tau_n/2$ ในการออกแบบจะต้องใช้ค่าความปลอดภัยด้วย ดังนั้นเส้นที่ใช้ในการออกแบบก็คือ เส้น DF ค่าความปลอดภัยนี้แนะนำให้ใช้ไม่ต่ำกว่า 1.15 ถ้าจุด E เป็นจุดที่ความเค้นเฉือนเกิดขึ้นในสปริงขด สมการที่ใช้ในการออกแบบจะหาได้จากการพิจารณาสามเหลี่ยมคล้าย EFH และ BCG ดังนี้คือ

$$\frac{HF}{GC} = \frac{EH}{BG}$$

$$\frac{(\tau_y/N) - \tau_m}{\tau_y - (\tau_n/2)} = \frac{\tau_a}{(\tau_n/2)}$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{N} = \frac{\tau_m - \tau_a}{\tau_y} + \frac{2\tau_a}{\tau_n} \quad (2.36)$$

โดยที่ $N = \text{Safety Factor}$: ซึ่งในโครงการนี้ใช้ค่า $N = 1.25$

ความเค้นเฉือน τ_a และ τ_m จะคำนวณได้โดยการใช้สมการที่ (2.31) จากประสบการณ์ของผู้ออกแบบที่ผ่านมามีพบว่า ไม่มีความจำเป็นที่จะใช้ค่าตัวประกอบความโค้ง K_c ในการคำนวณหาความเค้นเฉือนเฉลี่ย τ_m ดังนั้นความเค้นเฉือน τ_a และ τ_m จึงคำนวณได้จากสมการ

$$\tau_a = K \frac{8F_a D}{\pi d^3} = K \frac{8F_a C}{\pi d^2} \quad (2.37a)$$

$$\tau_m = K_s \frac{8F_m D}{\pi d^3} = K_s \frac{8F_m C}{\pi d^2} \quad (2.37b)$$

$$\text{โดยที่ } F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} = \text{แรงส่วนเปลี่ยน}$$

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} = \text{แรงเฉลี่ย}$$

บ่อยครั้งที่สปริงที่ใช้งานจะถูกกดเอาไว้ก่อนแล้ว เช่น สปริงสำหรับวาล์วในเครื่องยนต์ ดังนั้นแรงที่สปริงจึงเริ่มจากค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุด ในกรณีเช่นนี้ τ_{\min} ไม่เท่ากับศูนย์ การหาสมการสำหรับการออกแบบก็ทำได้ในทำนองเดียวกันกับรูปที่ 2.8a โดยลากเส้น R ไม่เท่ากับศูนย์ไปตัดเส้น BC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

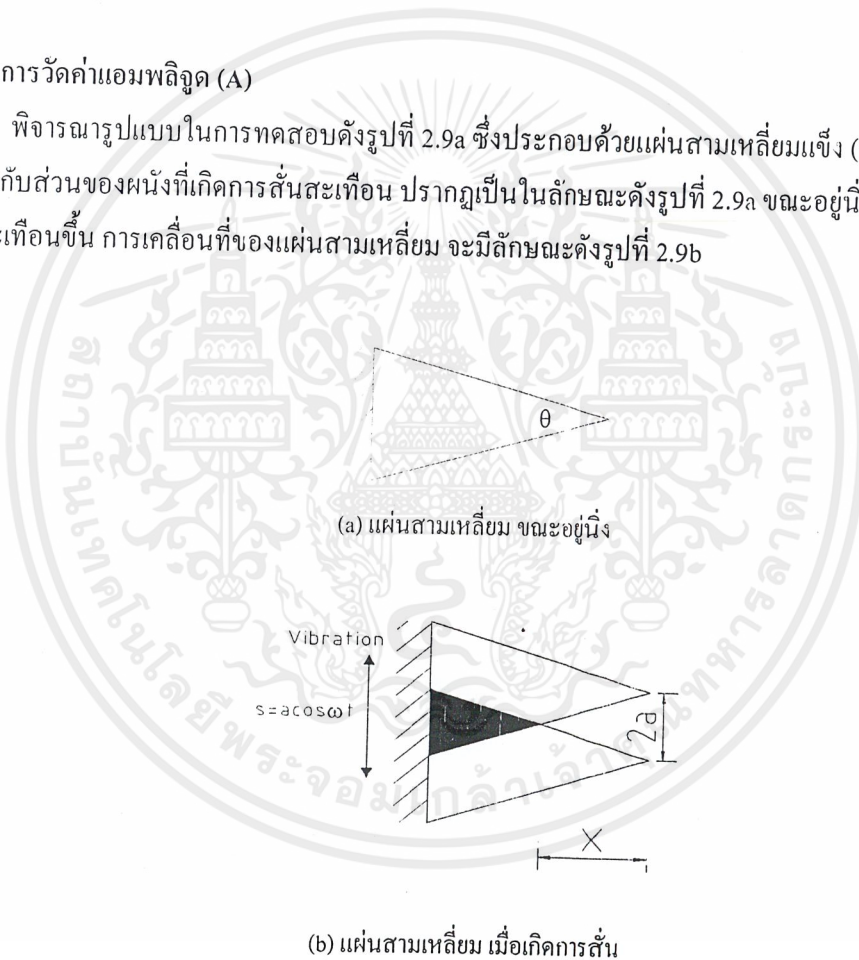
อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติผู้ออกแบบมักจะใช้สมการที่ (2.36) ในการออกแบบแทน ซึ่งก็จะได้ขนาดของสปริงขดที่ปลอดภัยยิ่งขึ้นไปอีก

2.3 อุปกรณ์การวัดค่าการสั่นสะเทือน

ในการศึกษาโครงการนี้ได้ทำการวัดค่าความสั่นสะเทือน ซึ่งได้แบ่งเป็นข้อมูล 2 ประเภท คือ ค่าความถี่ (ω) และแอมพลิจูด (A) ของเครื่องทดสอบ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่าความต่างศักย์ (voltage) จากเครื่องวาริแอก

2.3.1 การวัดค่าแอมพลิจูด (A)

พิจารณารูปแบบในการทดสอบดังรูปที่ 2.9a ซึ่งประกอบด้วยแผ่นสามเหลี่ยมแข็ง (wedge) จะถูกยึดติดกับส่วนของผนังที่เกิดการสั่นสะเทือน ปรากฏเป็นในลักษณะดังรูปที่ 2.9a ขณะอยู่นิ่ง เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น การเคลื่อนที่ของแผ่นสามเหลี่ยม จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9b



รูปที่ 2.9 รูปแบบแผ่นสามเหลี่ยม (wedge) ทดสอบแอมพลิจูด

จากการสังเกต จะทำให้สามารถวัดค่าความยาว x ได้ดังรูปที่ 2.9b เราสามารถหาค่าแอมพลิจูดได้จากความสัมพันธ์

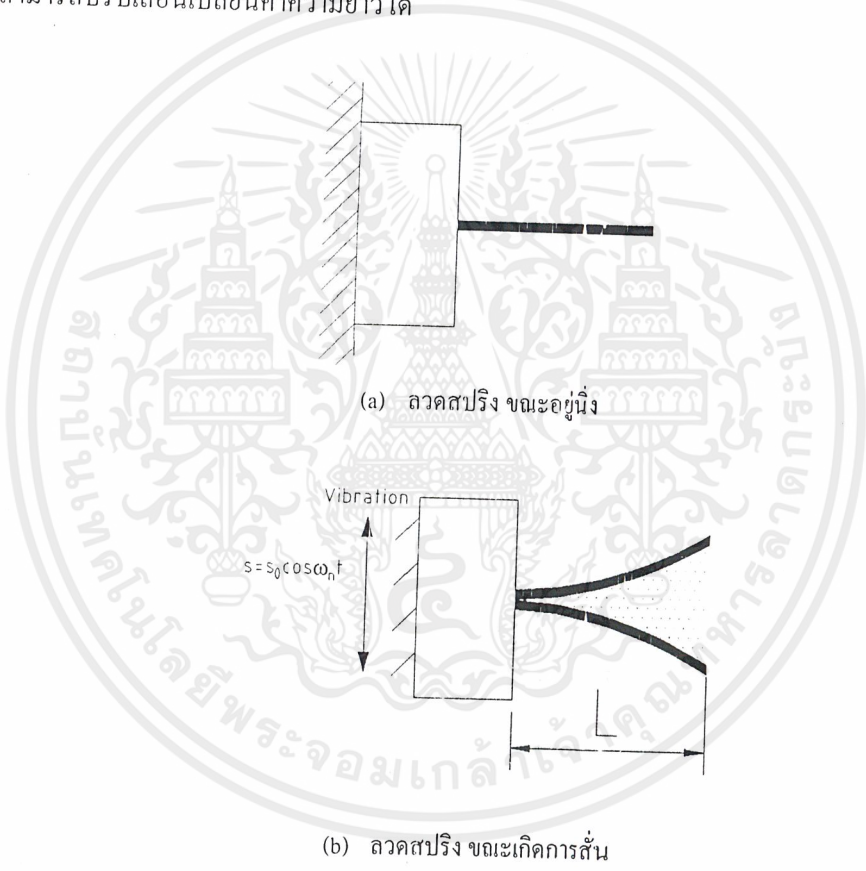
$$A = x \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- A = แอมพลิจูด (mm.)
 - x = ระยะจากปลาย wedge ถึงจุดตัดเมื่อสั้น (mm.)
 - θ = มุมของ wedge (degree) = 20° (กำหนดให้)

2.3.2 การวัดค่าความถี่

พิจารณารูปแบบในการทดสอบดังรูปที่ 2.10a ลวดสปริง (Small Cantilever Beam) ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ลวดขนาด $\phi = 1.05$ mm. ถูกยึดติดกับน็อตที่ติดกับส่วนของเครื่องสั่นสะเทือน ซึ่งความยาว (L) สามารถปรับเปลี่ยนเปลี่ยนค่าความยาวได้



รูปที่ 2.10 รูปแบบการทดสอบค่าความถี่

หลักการมีอยู่ว่า เมื่อเครื่องเกิดการสั่นสะเทือน ค่าความยาวของลวดที่ถูกปรับไปนั้น ทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของลวด (ω_n) มีค่าเท่ากับค่าความถี่ของตัวเครื่อง (ω) มีผลให้ลวดเกิดการ resonance ขึ้นที่ความยาวค่านั้น เราสามารถหาค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนได้จากความสัมพันธ์

$$\omega = \omega_n = C_n \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \tag{2.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ ω = ความถี่ของตัวเครื่อง (Hz)
- ω_n = ความถี่ธรรมชาติของลวดสปริง (Hz)
- E = Young 's Modulus ของลวดสปริง (N/m^2): ภาคนวม ก.
- I = โมเมนต์ความเฉื่อยของลวดสปริงเมื่อแกน centroidal อยู่ในทิศทาง deflection (m^4): ภาคนวม ก.
- m = มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาว (kg/m) = 0.0072 kg/m
- L = ความยาวลวดที่ยื่นออกมา (m)
- $C_n = 0.55$

2.4 การแยกการสั่นสะเทือน (Isolation)

จากรูปแบบของเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนดังรูปที่ จะเห็นได้ว่า ตัวเครื่องวางอยู่บนพื้น ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นดิน มีผลกระทบต่อระบบทดสอบในรูปการสะท้อนกลับ ทำให้ค่าความถี่และแอมพลิจูดที่ทดสอบได้จริงเปลี่ยนแปลงไป เป็นผลให้การตรวจสอบผลการสั่นสะเทือนคลาดเคลื่อนไป ดังนั้นการแก้ปัญหาจุดนี้ สามารถใช้ตัว Isolator ซึ่งมีคุณสมบัติในการแยกระบบออกจากพื้นดิน เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านถึงกัน ทำให้ค่าการทดสอบที่ได้นั้น ถูกต้องมากขึ้น ในการศึกษาโครงการนี้ เลือกใช้ยางเป็น Isolator เพราะมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นในแนวเฉือนต่ำ, หาได้ง่ายและมีราคาถูก

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การศึกษาถึงพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของยานพาหนะจริง

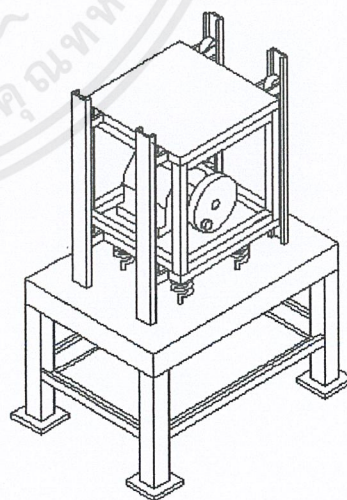
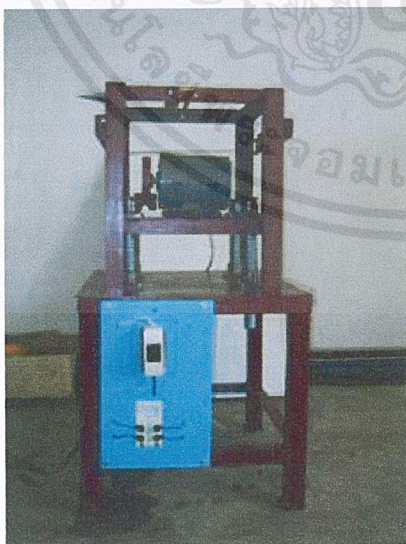
ในการทำโครงการนี้จะต้องจำลองการสั่นสะเทือนของยานพาหนะจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงต้องศึกษาถึงข้อมูลการสั่นสะเทือนของยานพาหนะจริง ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จาก ภาคผนวก ฉ.

จากการศึกษาถึงข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของยานพาหนะจริง จะได้ว่า โดยปกติแล้วความถี่ธรรมชาติของรถโดยสารจริงมีค่าประมาณ 4 – 12 cps. (1 cps. = 2π rad/s) และแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนของรถมีค่าประมาณ 0.12 นิ้ว ดังนั้น เราจึงเลือกใช้ข้อมูลช่วงความถี่ในการสั่นสะเทือนที่ต้องการทดสอบประมาณ 1 – 15 cps. (6 - 95 rad/s) และพิจารณาแอมพลิจูดที่ 0.15 นิ้ว หรือ 3.81 mm. ในการออกแบบการสร้างต่อไป

3.2 รูปแบบของเครื่อง

หลังจากได้มีการคิดแปลงและแก้ไขแบบที่ได้วางไว้ตอนต้น เราได้ชุดอุปกรณ์สุดท้ายดังต่อไปนี้ (ขนาดต่างๆ ของแบบดูที่ ภาคผนวก ฉ.)

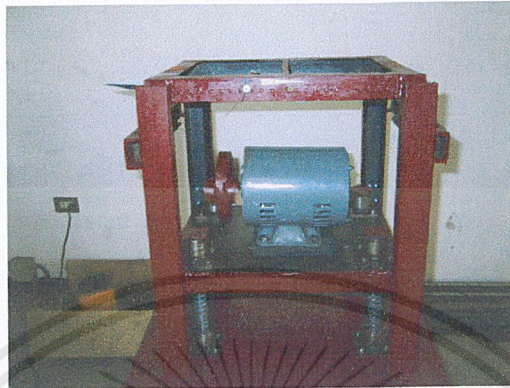
3.2.1 ภาพแบบโดยรวมของชุดเครื่องสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.1 ภาพจริงและแบบโดยรวมของเครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนขนาดย่อม

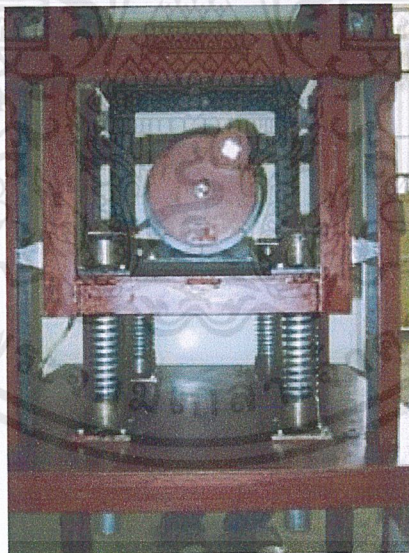
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ส่วนเครื่องที่เกิดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.2 ภาพจริงของส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือน

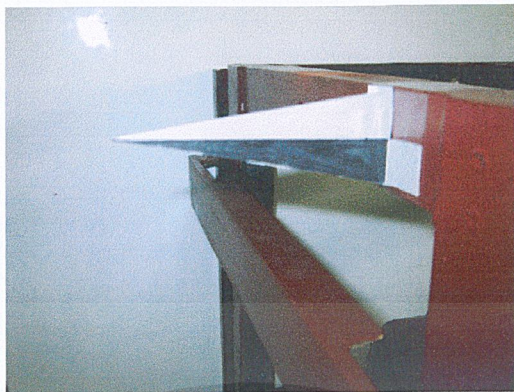
3.2.3 ชุดสปริงและชุดจานหมุน



รูปที่ 3.3 ภาพจริงแสดงชุดสปริงและชุดจานหมุน

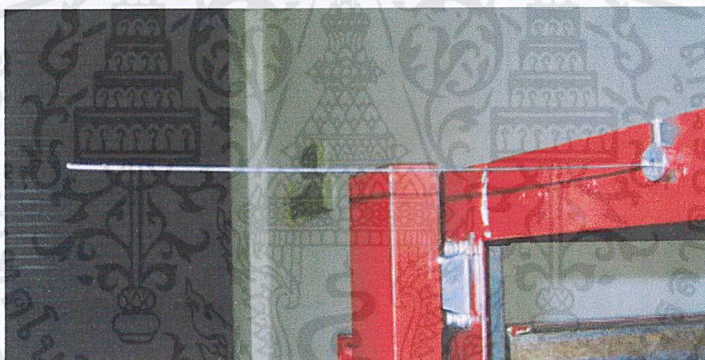
3.2.4 ชุดทดสอบค่าแอมพลิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



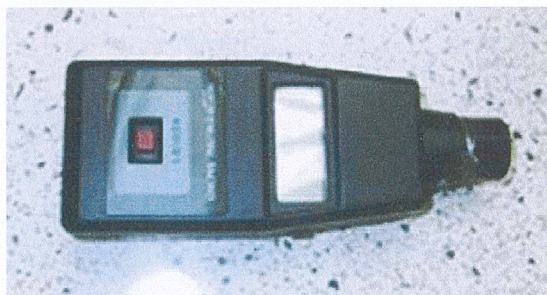
รูปที่ 3.4 ภาพจริงแสดงชุดทดสอบค่าแอมพลิจูดการสั่นสะเทือน

3.2.5 ชุดทดสอบค่าความถี่



รูปที่ 3.5 ภาพจริงแสดงชุดทดสอบค่าความถี่การสั่นสะเทือน

3.2.6 เครื่องวารีแอก และ เครื่องวัดความเร็วรอบมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 3.6 ภาพจริงชุดปรับความเร็วรอบ และ ชุดวัดความเร็วรอบ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 อุปกรณ์และวัสดุต่างๆ ที่ใช้สร้างเครื่อง

1) มอเตอร์ ขนาด 0.5 แรงม้า	1 เครื่อง
2) สปริง	4 ตัว
3) เครื่องวาริแอก ขนาด 220 โวลต์ 8 แอมแปร์	1 เครื่อง
4) คัดเอาต์	1 ตัว
5) สายไฟ	1 ชุด
6) ขางแผ่น	1 ชุด
7) ล้อยาง	8 ล้อ
8) เหล็กชนิดต่างๆ	1 ชุด
9) ทองเหลือง	1 เส้น
10) ขางที่ฐานขาตั้ง ขนาด 2"-2"	2 แผ่น
11) ไม้แผ่น	1 แผ่น
12) น็อตและเกลียว	1 ชุด
13) เชือกยึดสำหรับผูกมัดผลิตภัณฑ์	1 เส้น

3.2.2 ขั้นตอนการสร้าง

3.2.2.1 การสร้าง โຕ้ะฐาน

- 1) นำเหล็กฉากมาตัดให้ได้ความยาวขนาดต่างๆแล้วนำมาเชื่อมตามที่ออกแบบไว้
- 2) นำเหล็กแผ่นตัดให้ได้ขนาดแล้วเชื่อมติดกับโครงเหล็กฉากเป็นฐานบน แล้วเจาะรูที่แผ่นเหล็ก 4 รูเพื่อติดยึดกับบุชสำหรับเป็นแกนการเคลื่อนที่ของสปริง
- 3) นำขางที่ฐานขาตั้ง ขนาด 2"-2" มาสวมกับขาตั้งของโຕ้ะเป็นฐานล่าง

3.2.2.2 การทำส่วนของเครื่องสั่นสะเทือน

- 1) นำเหล็กฉากมาตัดให้ได้ความยาวขนาดต่างๆแล้วนำมาเชื่อมตามที่ออกแบบไว้ให้เป็นโครง รวมทั้งเชื่อมเหล็กแผ่นที่ฐานล่างของโครง แล้วเจาะรูที่แผ่นเหล็ก 4 รูเพื่อติดยึดกับบุชให้มีขนาดเดียวกับรูที่แผ่นเหล็กบนโຕ้ะฐาน
- 2) ติดตั้งล้อยางทั้ง 8 ตัวบนโครง เพื่อให้โครงของเครื่องสั่นสะเทือนในแกน y เท่านั้น
- 3) ติดตั้งมอเตอร์บนฐานของโครงเครื่องโดยใช้ขางแผ่นรองระหว่างกลาง เพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนที่รุนแรงเกินไปของเครื่อง
- 4) ทำส่วนของจานหมุนโดยนำเหล็กแผ่นที่หนา มาตัดเป็นวงกลมแล้วเชื่อมกับเหล็กตันที่ใช้ทำมวลเยื้องศูนย์กลางติดกัน นำมาสวมกับเพลลาของมอเตอร์โดยคว้านรูของจานหมุนให้มีขนาดเดียวกับเพลลาของมอเตอร์

3.2.2.3 การติดตั้งสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) นำเหล็กติดกับทองเหลืองมากลึง กัด และเชื่อมจะได้บูชโดยใช้เหล็กกลวงสวมเข้าไปเป็นแกนของสปริง

2) นำสปริงมาสวมตามแนวแกนของบูช แล้วนำมาติดตั้งระหว่างโครงของเครื่องกับ โต๊ะฐาน โดยใช้ น้ำมันเป็นตัวหล่อลื่นระหว่างบูชกับสปริง (ไม่มีการติดตั้ง Damper)

3.2.2.4 การติดตั้งเสา

1) นำเหล็กตัวยูมาตัดเป็นเสาให้ได้ความยาวที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของโครงเครื่อง โดยให้ล้อย่าง 8 ตัววิ่งบนเหล็กตัวยู เพื่อบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงเครื่องให้เคลื่อนที่ตามแกน y

2) นำเหล็กตัวยูมาตัดเป็นเสามาเชื่อมกับแผ่นเหล็กบนโต๊ะ ฐาน

3) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของเสาเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือน โดยนำแท่นเหล็กมาเชื่อมระหว่างเสาทั้ง 4 ต้น

3.2.2.5 การต่อวงจรไฟฟ้า

1) นำขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์มาต่ออนุกรมกับขั้วไฟฟ้าของเครื่องวาริแอก

2) ติดตั้งคัตเอาต์ระหว่างปลั๊กไฟบ้านกับเครื่องวาริแอก เพื่อเป็นตัวตัด-ต่อไฟ

3) นำคัตเอาต์และเครื่องวาริแอกมาประกอบเข้ากับไม้แผ่นติดกับ โต๊ะฐาน เพื่อความเป็นระเบียบ

3.2.2.6 ติดตั้งฐานวางผลิตภัณฑ์ที่จะทดสอบซึ่งทำมาจากแผ่นเหล็ก โดยเชื่อมกับฐานบนของโครงเครื่อง และมีเชือกยึดสำหรับผูกมัดผลิตภัณฑ์

3.2.2.7 ทาสีกันสนิม และตกแต่งตัวเครื่องให้มีความสวยงาม

3.3 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์

จากข้อมูลการสั่นสะเทือนในหัวข้อที่ 3.1 จะได้ว่าช่วงความถี่ในการสั่นสะเทือนที่ต้องการทดสอบจะมีค่าประมาณ 1 – 15 cps. (6 - 95 rad/s) ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ 1450 rpm. (153 rad/s)

ส่วนกำลังของมอเตอร์นั้น หาได้จาก เมื่อกำหนดให้การหมุนของจานหมุนจากมอเตอร์เป็นแบบความเร็วเชิงมุม (ω) มีค่าคงที่ซึ่งเท่ากับ 153 rad/s โดยพิจารณาที่มวลเชิงศูนย์กลาง (m) และไม่พิจารณามวลของจานเชิงศูนย์กลางจากรูปที่ จะได้ว่า

$$\sum F_y = 0 \quad ; \quad F = mg \quad (3.1)$$

จาก

$$\text{Torque (T)} = F \cdot r \quad (3.2)$$

แทนค่า สมการ (3.1) ใน (3.2) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Torque (T)} = mg \cdot r \quad (3.3)$$

จากข้อมูลอุปกรณ์และขนาดต่างๆ ของเครื่อง จะได้ว่า

$$m = 0.63 \text{ kg.}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$r = e = 0.063 \text{ m.}$$

แทนค่าลงใน (3.3) จะได้

$$\text{Torque (T)} = (0.63)(9.81)(0.063) = 0.39 \text{ N} \cdot \text{m}$$

จาก

$$\text{Power (P)} = T \omega \quad (3.4)$$

จากข้อมูลจะได้ $\omega = 153 \text{ rad/s}$

นำผลคำนวณ T ที่ได้และค่า ω แทนใน (3.4) จะได้

$$\text{Power (P)} = (0.39)(153) = 59.67 \text{ W} = 0.08 \text{ hp.}$$

แต่ในความเป็นจริงแล้ว มวลของจานหมุนจะมีผลต่อกำลังขับของมอเตอร์ด้วย อีกทั้งในการใช้เครื่อง Variac เป็นตัวปรับความเร็วรอบจะทำให้กำลังของมอเตอร์ตกลง ซึ่งอาจจะมีผลทำให้มอเตอร์หยุดทำงานได้ที่ความเร็วรอบต่ำ ดังนั้นจึงเลือกมอเตอร์ขนาด 0.5 hp. เป็นตัวชดเชยเพื่อให้สามารถทดสอบได้ที่รอบต่ำ (ปัญหานี้สามารถใช้ Inverter แทน Variac ในการทดสอบที่ความเร็วรอบต่ำได้)

3.4 การคำนวณหาขนาดสปริง

ในการคำนวณหาขนาดของสปริงนั้น เราจะต้องพิจารณาข้อมูลจากค่าแอมพลิจูดในการสั่นสะเทือน (X) มีค่าต่ำสุด (เราต้องการให้เครื่องสั่นตามขนาดแอมพลิจูดนี้) จากหัวข้อ (3.1) แอมพลิจูดที่มีค่าต่ำสุดที่ถูกพิจารณา มีค่าประมาณ 0.15 นิ้ว (0.00381 m.)

ดังนั้น จากสมการที่ (2.23) โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆ มีดังนี้

$$M = 40 \text{ kg. (พิจารณาที่ภาระสูงสุด)}$$

$$X = 0.00381 \text{ m.}$$

$$m = 0.63 \text{ kg.}$$

$$e = 0.063 \text{ m.}$$

แทนค่าตัวแปรเหล่านี้ในสมการ (2.23) จะได้

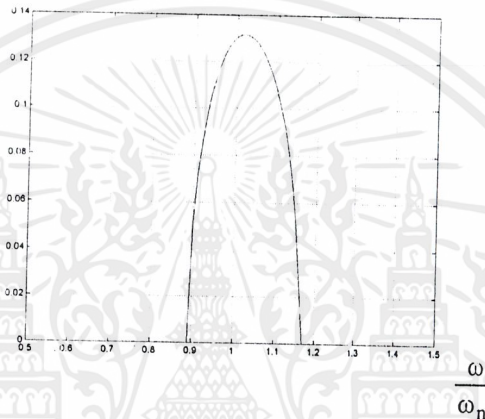
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{(40)(0.00381)}{(0.63)(0.063)} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}}$$

แก้สมการโดยใช้โปรแกรม MATLAB (ภาคผนวก ข.) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ζ กับ

$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ ดังรูปที่ 3.7

ζ



รูปที่ 3.7 ภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่า ζ กับ $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่า ค่าความสัมพันธ์ของ ζ หนึ่งค่าจะมีค่า $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ ได้ถึงสองค่า ยกเว้นจุดสูงสุดของกราฟเท่านั้นที่ ค่าความสัมพันธ์มีเพียงค่าเดียว ในการคำนวณหาค่า k ของสปริงนั้น จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่ว่า

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.5)$$

ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งเราจะกำหนดให้ ω มีค่าคงที่ กล่าวคือ จะสั้นที่ค่าความถี่ค่าเดียวตลอดการทดสอบ ดังนั้นค่า k จะขึ้นอยู่กับค่า ω_n เท่านั้น ซึ่งทำให้เลือกใช้ค่าความสัมพันธ์ที่จุดสูงสุดเท่านั้น เพราะที่จุดนี้ค่า ω_n มีเพียงค่าเดียว อีกทั้งเมื่อระบบมีค่า $\omega = \omega_n$ จะทำให้ระบบเกิดการรีโซแนนซ์ ซึ่งเป็นผลเสียต่อระบบมาก ดังนั้นความสัมพันธ์ที่จุดอื่นนั้น จะมีโอกาสเกิดการรีโซแนนซ์ถึงสองเท่าของจุดสูงสุด เราจึงเลือกใช้ความสัมพันธ์ที่จุดสูงสุดเท่านั้น

ความสัมพันธ์ที่จุดสูงสุด จากรูปที่ 3.7 สามารถหาได้จากการ

$$\frac{d}{d\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \zeta = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้ค่าความสัมพันธ์ที่จุดสูงสุดคือ (1.02, 0.131)
 ดังนั้นจะได้ว่า

$$\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) = 1.02$$

แทนค่าข้อมูล $\omega = 95 \text{ rad/s}$ จะได้

$$\left(\frac{95}{\omega_n}\right) = 1.02$$

$$\omega_n = 93.137 \text{ rad/s}$$

แทนค่าในสมการ (3.5) (พิจารณาที่ภาวะสูงสุด คือ $M = 40 \text{ kg.}$) จะได้

$$93.137 = \sqrt{\frac{k}{40}}$$

$$k = 346,980 \text{ N/m}$$

คิดต่อสปริง 1 ตัวจะได้

$$k = \frac{346980}{4} = 86,745 \text{ N/m}$$

เมื่อพิจารณาระบบ แรงที่กระทำต่อระบบจะมีค่าดังนี้

$$F_{\min} = mg = (40)(9.81) = 392.4 \text{ N}$$

คิดต่อ สปริง 1 ตัว จะได้

$$F_{\min} = \frac{392.4}{4} = 98.1 \text{ N}$$

และเมื่อพิจารณา F_{\max} จะได้ว่าเป็นแรงที่เกิดจากการหมุนส่งของมวลเชิงศูนย์กลาง
 ดังนั้น จากสมการ (2.15) จะได้

$$\begin{aligned} F_{\max} &= X\sqrt{(k - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \\ &= (0.00381)\sqrt{[86,745 - (10 \cdot 95^2)]^2 + [976.08 \cdot 95]^2} \\ &= 353.54 \text{ N} \end{aligned}$$

เมื่อ $c =$ ค่าความหน่วง $= 2M\omega_n \zeta = 2(40)(93.137)(0.131) = 976.08 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

จากข้อมูล $F_{\min} = 98.1 \text{ N}$ และ $F_{\max} = 357.31 \text{ N}$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_a = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} = \frac{353.54 - 98.1}{2} = 127.72 \text{ N}$$

$$F_m = \frac{F_{\max} + F_{\min}}{2} = \frac{353.54 + 98.1}{2} = 225.82 \text{ N}$$

แทนค่าในสมการ (2.37a) และ (2.37b) จะได้

$$\tau_m = \frac{(1.08)(8)(225.82)(6)}{\pi d^2} = \frac{3726.29}{d^2}$$

$$\tau_a = \frac{(1.25)(8)(127.72)(6)}{\pi d^2} = \frac{2439.27}{d^2}$$

เมื่อเลือกใช้ $K_s = 1.08$, $K = 1.25$, $C = 6$

จากสมการ (2.27) และ (2.28) จะได้

$$\sigma_u = \frac{1855}{d^{0.19}}$$

$$\tau_y = 0.6\sigma_u = (0.6)\left(\frac{1855}{d^{0.19}}\right) = \frac{1113}{d^{0.19}}$$

และ

$$\tau_n = \frac{560}{d^{0.34}}$$

เมื่อเลือกใช้วัสดุผลิตสปริงคือ Oil tempered wire (ASTM A.229) และ ค่า $N = 1.25$

แทนค่า ตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (2.36) จะได้

$$\frac{1}{1.25} = \frac{\left(\frac{3726.29}{d^2} - \frac{2439.27}{d^2}\right)}{\frac{1113}{d^{0.19}}} + \frac{2\left(\frac{2439.27}{d^2}\right)}{\frac{560}{d^{0.34}}}$$

$$0.8 = 1.156d^{-1.81} + 8.712d^{-1.66}$$

ทำการ Iteration จะได้ขนาดของสปริงคือ

$$d \approx 4.4 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนของบทนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การออกแบบวิธีการทำการทดลอง และ ผลการทดลอง

4.1 การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง

4.1.1 เริ่มต้นด้วยการจัดชุดอุปกรณ์ กล่าวคือ ต่อดึงไฟจากคัทเอาท์ (cut out) ผ่านเครื่องวาริแอกเข้ากับมอเตอร์ แล้วทำการจัดชุดทดสอบผลการทดลองทั้ง ลวดสปริง และ แผ่นสามเหลี่ยม (wedge)

4.1.2 เสียบปลั๊ก เปิดสวิตช์คัทเอาท์

4.1.3 ใส่ขนาดภาระที่ต้องการ (หรือไม่ใส่- no load) แล้วยึดภาระที่ต้องการทดสอบให้แน่นด้วยยางรัดกับส่วนของเครื่องที่เกิดการสั่นสะเทือน

4.1.4 ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ กับ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเข้ามอเตอร์ จากการปรับด้วยเครื่องวาริแอก

4.1.5 ปรับหมุนวาริแอกไปตามขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการทดสอบ ที่แรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งแล้วบันทึกผลความเร็วรอบมอเตอร์

4.1.6 ทำการทดสอบค่าแอมพลิจูด โดยการสังเกตค่า x และทำการบันทึกผลค่า x จากแผ่นสามเหลี่ยมที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าค่านั้น ๆ

4.1.7 ทำการทดสอบค่าความถี่ โดยการปรับค่าความยาวลวดสปริงที่ยื่นออกมา ให้เกิดการ resonance ที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าค่านั้น ๆ แล้วทำการบันทึกผลค่าความยาว L

4.1.8 เมื่อทำการทดลองที่ขนาดแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่งๆ เสร็จแล้วหมุนวาริแอกกลับที่ตำแหน่งศูนย์

4.1.9 ทำการปรับเปลี่ยนขนาดภาระใหม่ แล้วปฏิบัติตามขั้นตอน 4.1.4 –4.1.8 ซ้ำ

4.1.10 จะได้ผลการทดลองค่า x และค่าความยาว L ในแต่ละขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามอเตอร์

4.1.11 นำผลการทดลองในข้อ 4.1.10 ไปคำนวณหาค่าแอมพลิจูด และ ค่าความถี่ของเครื่องทดสอบต่อไป

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ ความเร็วรอบมอเตอร์

4.2.1.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.1

Voltage	ความเร็วรอบมอเตอร์ (Hz)
0	0
15	3.5
20	3.81
25	5.18
30	5.41
35	7.03
40	12.31
45	13.00
50	13.51

4.2.1.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.2

Voltage	ความเร็วรอบมอเตอร์ (Hz)
0	0
15	3.53
20	3.8
25	5.18
30	5.47
35	7.08
40	12.3
45	13.08
50	13.53

4.2.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ ค่า x

4.2.2.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.3

Voltage	x(mm.)
0	0
15	0
20	-
25	-
30	-
35	-
40	7
45	6
50	5

4.2.2.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.4

Voltage	x(mm.)
0	0
15	0
20	-
25	-
30	-
35	-
40	7
45	6
50	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ ค่า (-) ในตารางทั้งสองไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจาก ไม่เกิดสามเหลี่ยมซ้อนกันสองรูป จากการมองเห็นด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการวัดโดยอ่านค่าโดยตรง

4.2.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และ ค่าความความยาว L

4.2.3.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.5

Voltage	L (cm.)
0	0
15	0
20	43
25	36
30	33
35	31
40	28
45	27
50	25

4.2.3.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.6

Voltage	L (cm.)
0	0
15	0
20	44
25	38
30	34
35	31
40	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45	27
50	25

4.2.4 ผลการคำนวณค่าแอมพลิจูด A จากค่า x ด้วยสมการ (2.38)

4.2.4.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.7

Voltage	x(mm.)	A (mm.)
0	0	0
15	0	0
20	-	2
25	-	2
30	-	2.5
35	-	1.5
40	7	1.23
45	6	1.06
50	5	0.78

4.2.4.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.8

Voltage	x(mm.)	A (mm.)
0	0	0
15	0	0
20	-	2
25	-	2
30	-	2.5
35	-	1.5
40	7	1.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45	6	1.06
50	5	0.78

4.2.5 ผลการคำนวณค่าความถี่การสั่น ω จากค่าความยาว L ด้วยสมการ (2.39)

4.2.5.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.9

Voltage	L (cm.)	ω
0	0	0
15	0	0
20	43	0.85
25	36	1.21
30	33	1.44
35	31	1.63
40	28	2
45	27	2.15
50	25	2.51

4.2.5.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.10

Voltage	L (cm.)	ω
0	0	0
15	0	0
20	44	0.81
25	38	1.04
30	34	1.36
35	31	1.63
40	30	1.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

45	27	2.15
50	25	2.51

4.2.6 ผลความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถี่ของแรงกระทำ และ ค่าความถี่ของการสั่น

4.2.6.1 ขณะไม่มีภาระ (No Load)

ตารางที่ 4.11

ความเร็วรอบมอเตอร์ (Hz)	ω
0	0
3.5	0
3.81	0.85
5.18	1.21
5.41	1.44
7.03	1.63
12.31	2
13.00	2.15
13.51	2.51

4.2.6.2 ขณะมีภาระขนาด 4 kg. (Load = 4 kg.)

ตารางที่ 4.12

ความเร็วรอบมอเตอร์ (Hz)	ω
0	0
3.53	0
3.8	0.81
5.18	1.04
5.47	1.36
7.08	1.63
12.3	1.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.08	2.15
13.53	2.51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุป

เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนขนาดย่อมที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น จะถูกนำไปทดสอบเพื่อหาค่า แอมพลิจูด และค่าความถี่ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อตรวจสอบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น มีความถี่อยู่ในช่วงใช้งาน ตรงตามที่ได้ออกแบบ

จากผลการทดลองที่ได้ออกมาแอมพลิจูด ที่วัดได้จากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับที่ต้องการ ซึ่งสาเหตุที่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นบ้างคือ มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในแนวตั้งตามที่ได้ออกแบบไว้ เฉพาะที่ความถี่ของการสั่นต่ำ แต่ถ้าเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่สูงกว่านี้จะเป็นการสั่นสะเทือนที่มากกว่า 1 แกน อาจแก้ด้วยการสร้างโครงบังคับการเคลื่อนที่ให้แข็งแรงกว่านี้ และวางล้อวิ่งควรสร้างแบบปรับได้เพื่อที่จะไม่ให้บิบล้อมากเกินไปหรือหลวมเกินไป

ส่วนความถี่ที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 0 – 16 rad/s ซึ่งอยู่ในช่วงแรกของความถี่ใช้งาน (6 – 95 rad/s) ซึ่งเกิดจากการที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้แค่ 0 – 50 Volt เท่านั้น ถ้าปรับแรงดันไฟฟ้าให้มากกว่านี้ จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกับฐานของตัวเครื่อง กล่าวคือ โดยปกติฐานของตัวเครื่องจะอยู่กับที่ แต่ในกรณีนี้จะ มีการเคลื่อนที่ตามการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจแก้ด้วยการสร้างโครงสร้างให้แข็งแรงขึ้นกว่าเดิม และที่สำคัญฐานของเครื่องต้องทำการยึดติดให้แน่นหนาหรือยึดติดกับที่ไปเลย

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. จากการทดลองเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่มากขึ้นและมีเสียงดังเกิดขึ้น ซึ่งความถี่ขั้นนี้จะเป็นเช่นเดียวกัน ทั้งกรณีที่ไม่มี load และมี load ขนาด 4 kg.
2. จากค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จากการทดลอง เราสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ รวมทั้งหาค่าตัวหน่วง (C) ที่เกิดขึ้นจากการเสียดทานต่างๆ หรือ การต้านทานการเคลื่อนที่อื่นๆ ซึ่งทำให้เราทราบสมการความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดได้

เราจะพิจารณาจากค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุดที่ได้จากการทดลอง โดยที่ค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุด จะเกิดขึ้นที่สภาพการสั่นท้อ (Resonance) จากนั้นเราก็จะหาค่าความถี่ธรรมชาติจากความสัมพันธ์ที่ว่า “ความถี่ของแรงที่มากที่สุด (ความเร็วรอบมอเตอร์) มีค่าเท่ากับ ความถี่ธรรมชาติของระบบ” ดังนั้น

$$\omega_n = 34.03 \text{ rad/s} \text{ สำหรับกรณีไม่มีภาระ (No Load)}$$

$$\omega_n = 34.37 \text{ rad/s} \text{ สำหรับกรณีมีภาระ 4 kg.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อจากนั้นเราจะแปลงค่าแอมพลิจูดด้วยการคูณ $\frac{M}{me}$ เพื่อนำไปพิจารณาร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{MX}{me}$ และ $\frac{\omega}{\omega_n}$ ซึ่งอยู่ใน ภาคผนวก ฉ.

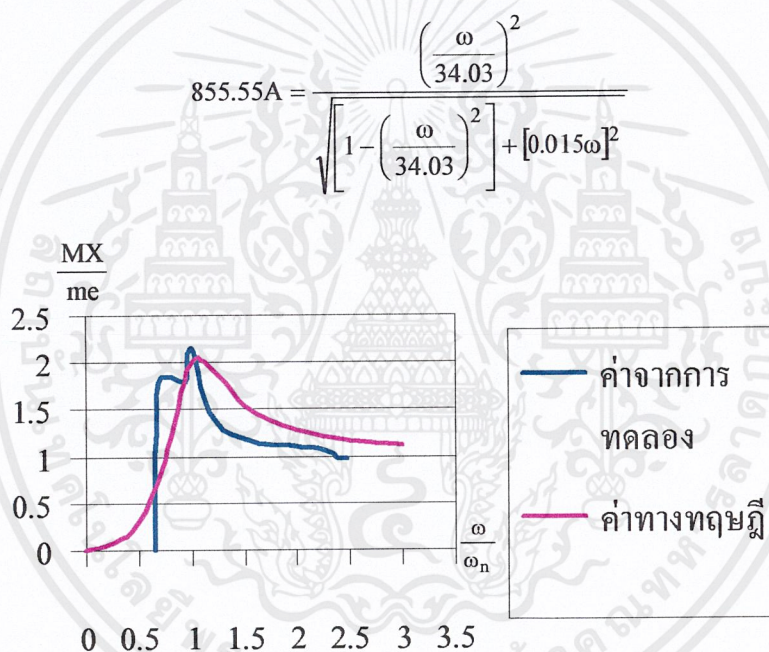
ซึ่งเราจะได้ค่า Factor การหน่วง (ζ) ดังนี้

$\zeta \approx 0.25$ สำหรับกรณีไม่มีภาระ (No Load)

$\zeta \approx 0.20$ สำหรับกรณีที่มีภาระ 4 kg. (Load 4 kg.)

ดังนั้นเราจะได้สมการความสัมพันธ์ของ A (X) จากการแทนค่าลงในสมการ (2.23)

กรณีไม่มีภาระ (No Load)

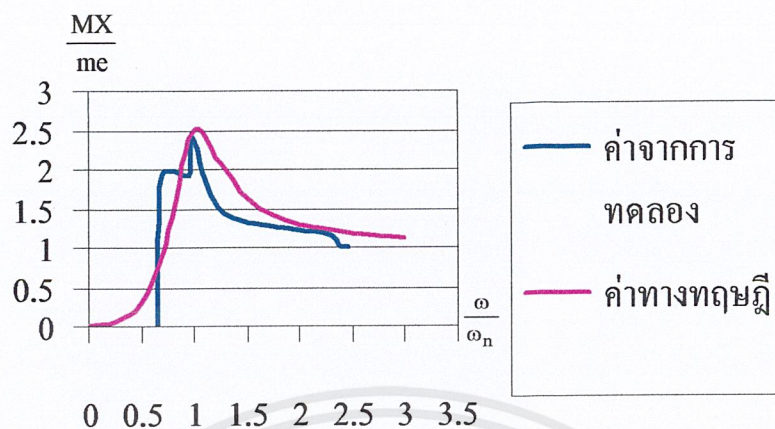


รูปที่ 5.1

กรณีมีภาระขนาด 4 kg.

$$855.55A = \frac{\left(\frac{\omega}{34.37}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{34.37}\right)^2\right]^2 + [0.012\omega]^2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2

ต่อไปก็หาค่าตัวหน่วง

หาค่าตัวหน่วงวิกฤต (C_c) จากสมการ $C_c = 2m\omega_n$

แทนค่า

$$C_c = 2(34 \text{ kg.})(34.03) = 2,314.04 \text{ N}\cdot\text{s/m} \text{ สำหรับกรณีไม่มีภาระ}$$

$$C_c = 2(38 \text{ kg.})(34.37) = 2,612.12 \text{ N}\cdot\text{s/m} \text{ สำหรับกรณีมีภาระ 4 kg.}$$

แล้วหาค่าตัวหน่วงจากสมการ $C = C_c \cdot \zeta$

แทนค่า

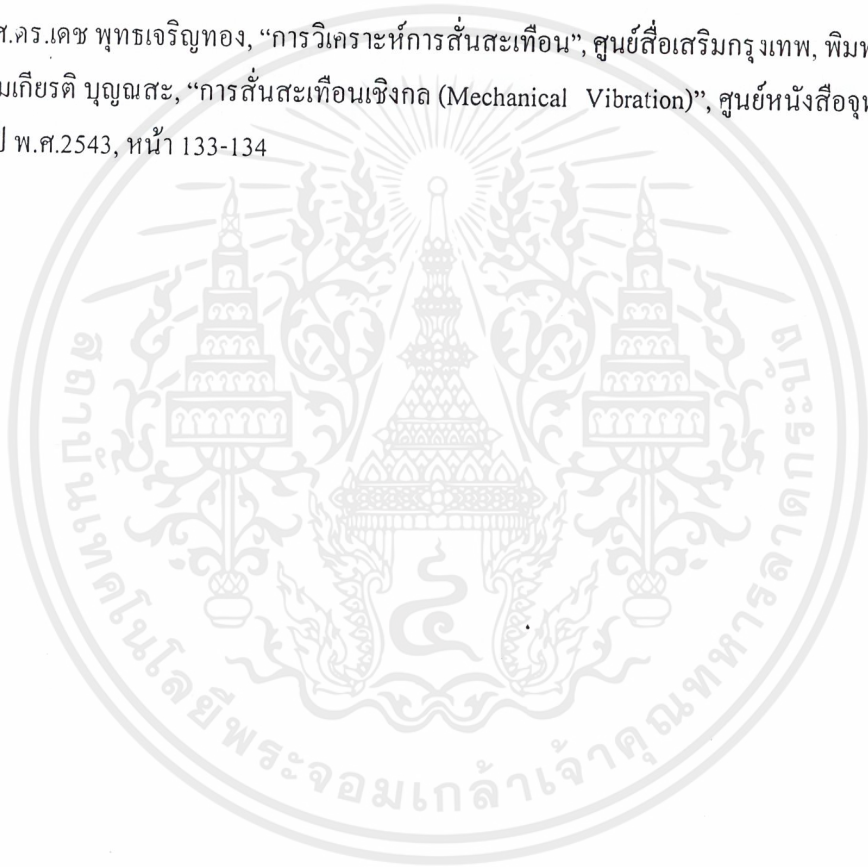
$$C = (2,314.04)(0.25) = 578.51 \text{ N}\cdot\text{s/m} \text{ สำหรับกรณีไม่มีภาระ}$$

$$C = (2,612.12)(0.20) = 522.42 \text{ N}\cdot\text{s/m} \text{ สำหรับกรณีมีภาระ 4 kg.}$$

- วิธีที่ใช้วัดค่าแอมพลิจูด และความถี่ของการสั่นสะเทือนในการทดลองนั้นให้ค่าที่ไม่ค่อยเที่ยงตรงตามทฤษฎี ดังนั้นเพื่อจะให้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น เราสามารถใช้เครื่องมือวัดค่าเหล่านี้ได้ คือ เครื่องวัดการสั่นสะเทือน (Vibrometer), เครื่องมือวัดความเร็ว (Velocity Meter หรือ Velometer) และ เครื่องมือวัดความเร่ง (Accelerometer)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.P. HOLMAN, “Experimental Methods For Engineering” pp.462-465
- [2] William T. Thomson, Marie Dillion Dahleh, “Theory of Vibration with Applications”, Practice-Hall International Inc., Fifth Edition, 1993., pp.53-55
- [3] C.M. Harris, C.E. Crede, “Shock & Vibration Handbook. Vol.2 (Data Analysis, Testing and Methods of Control)”, Mc Graw-Hill, 1961.
- [4] รศ.ดร.เดช พุทธเจริญทอง, “การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน”, ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, พิมพ์ครั้งที่ 5 1996.
- [5] สมเกียรติ บุญธนะ, “การสั่นสะเทือนเชิงกล (Mechanical Vibration)”, ศูนย์หนังสือจุฬาฯ, พิมพ์ครั้งที่ 1, ปี พ.ศ.2543, หน้า 133-134





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

วัสดุบางชนิดที่ใช้ทำลวดสปริง

1. Hard-drawn wire (ASTM A227) เป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 mm จนถึง 16 mm ขดขณะเย็นได้ มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.45 % ถึง 0.75 % คุณภาพผิวต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น ดังนั้นไม่ควรใช้กับชิ้นงานที่ต้องการอายุการทำงานยาวนานมาก และในชิ้นงานที่ต้องการความแม่นยำในการทำงานมาก อุณหภูมิขณะใช้งานไม่ควรสูงกว่า 120 °C หรือต่ำกว่า 0 °C
2. Music wire (ASTM A228) ทำโดยวิธี hard-drawn แต่ใช้เหล็กกล้าที่มีคุณภาพสูง คุณภาพผิวดีเป็นพิเศษ มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.70 % ถึง 1.00 % ขดขณะเย็นได้ ลวดชนิดนี้เป็นลวดที่มีการใช้กันมากที่สุดในจำพวกสปริงขนาดเล็ก มีความแข็งแรงสูง และสามารถทนแรงที่กระทำซ้ำกันได้ดีมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.10 mm ถึง 6.35 mm แต่มีให้นำไปใช้งานในที่ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่า 120 °C หรือต่ำกว่า 0 °C
3. Oil-tempered wire (ASTM A229) ผลิตโดยวิธีรีดเย็น แล้วจึงชุบแข็งและอบเหนียว (tempered) มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.55 % ถึง 0.75 % มักใช้วิธีขดขณะเย็นแล้วอบคลายความเค้นที่อุณหภูมิประมาณ 230 °C ผิวไม่สู้จะดีนักแต่ก็ดีกว่า Hard-drawn wire ลวดสปริงชนิดนี้ก็มีใช้กันแพร่หลายทั่วไป เพราะราคาถูกกว่า music wire มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 mm ถึง 16 mm แต่ก็สามารถหาขนาดใหญ่หรือเล็กกว่านี้ได้ อุณหภูมิที่ใช้งานอยู่ระหว่าง 0 – 180 °C
4. Valve spring quality carbon steel (ASTM 230) เป็น oil-tempered wire ที่มีคุณภาพสูงสุด มีคาร์บอนผสมอยู่ระหว่าง 0.60 % ถึง 0.75 % มีผิวดีเป็นพิเศษเทียบเท่า music wire จึงเหมาะสำหรับใช้กับงานที่อาจจะเสียหายเนื่องจากความล้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1.50 – 6.25 mm
5. Chrome vanadium steel (ASTM 231) เป็นโลหะผสมที่นิยมใช้กันมากเมื่อโลหะอื่น ๆ ไม่สามารถที่จะทนความเค้นสูง ๆ ได้ เหมาะสำหรับรับแรงที่กระทำซ้ำกันเป็นอย่างยิ่ง รับแรงกระแทกได้ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.50 – 12.50 mm มักใช้ทำสปริงสำหรับวาล์วเครื่องยนต์ของเครื่องบิน ใช้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 230 °C
6. Chrome silicon steel (ASTM A401) เป็นโลหะผสมที่สามารถรับแรงได้สูง และมีคุณสมบัติในการรับแรงกระแทกได้ดี ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 250 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 0.80 – 12 mm
7. Stainless steel (chrome nickel ASTM A313 หรือ AISI 302) เป็นโลหะที่มีราคาแพง รับแรงได้สูง และสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดี เหมาะสำหรับรับแรงกระแทก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.20 – 12.50 mm ในการผลิตจะใช้วิธีรีดเย็นแล้วคลายความเค้นที่อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

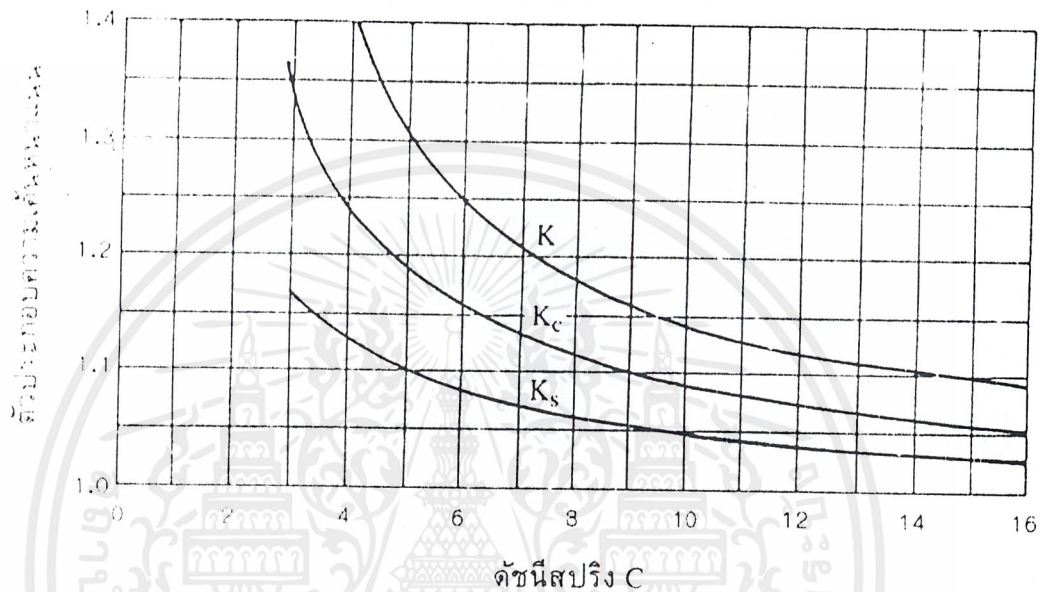
ตารางแสดงคุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ชนิดของวัสดุ	ขนาดลวด (mm)	x	y	A	B
Hard drawn wire (ASTM A227)	0.50-16.00	0.190	0.340	1780	560
Music wire (ASTM A228)	0.10-6.35	0.154	0.154	2150	565
Oil tempered wire (ASTM A229)	0.50-16.00	0.190	0.340	1855	560
Valve spring steel (ASTM 230)	1.50-6.25	0.100	0.150	1730	515
Cr-V steel (ASTM 231)	0.50-12.50	0.166	0.150	1976	515
Cr-Si steel (ASTM A401)	0.80-12.00	0.107	0.150	1965	515
Stainless steel (ASTM A313)	0.20-12.50	0.140	0.170	1840	360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นสำหรับสปริงขดรับแรงดึงและรับแรงกด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ตารางแสดงค่าประมาณของความยาวอิสระและความยาวเชิงตัว

ลักษณะของปลายสปริงขด	ความยาวอิสระ (L_f)	n_t	ความยาวเชิงตัว (L_s)
ปลายจรรวมตา	$Pn + d$	n	$d(n + 1)$
ปลายจรรวมตาและเจียรระใน	$Pn + d$	$n + 1$	$d(n + 1)$
ปลายตรง	$Pn + 2.5d$	$n + 1.5$	$d(n + 2.5)$
ปลายตรงและเจียรระใน	$Pn + 2d$	$n + 2$	$d(n + 2)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

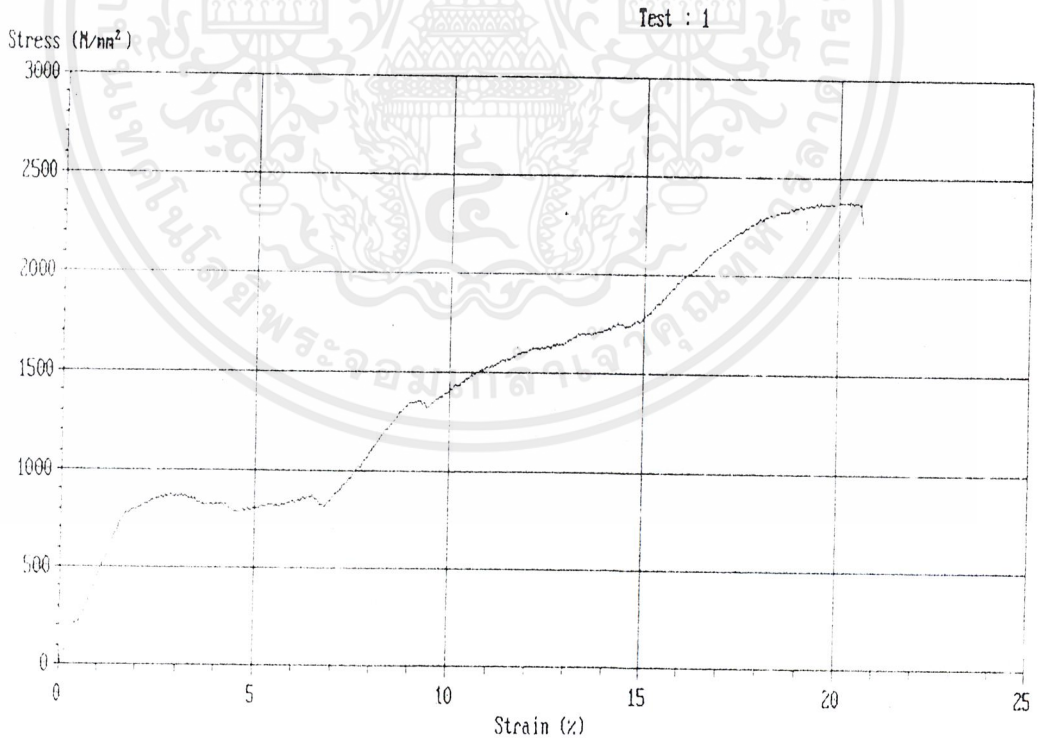
ตาราง จ.1 แสดงคุณสมบัติของลวดสปริง ทดสอบค่าความถี่ ขนาด 1.05 mm

Test No	Diameter mm	Load # Peak kN	Elong. # Peak mm	Stress # Peak N/mm ²	Strain # Peak %	Load # Yield kN	Elong. # Yield mm	Stress # Yield N/mm ²	Strain # Yield %	Youngs Modulus N/mm ²
1	0.500	2.0630	10.293	2082.5	20.182	0.6930	0.9600	800.32	1.8824	9826.9

Ref. 2 :
Ref. 3 :
Ref. 4 :

Test : material laboratory KMITL
Test Type : Tensile
Date : 15-02-01
Test Speed : 010.00 mm/min
Sample Length : 051.0 mm
Sample Type : CIRCULAR
Pre-Tension : OFF

Test No	Diameter mm	Load # Peak kN	Elong. # Peak mm	Stress # Peak N/mm ²	Strain # Peak %	Load # Yield kN	Elong. # Yield mm	Stress # Yield N/mm ²	Strain # Yield %	Youngs Modulus N/mm ²
1	1.0500	2.0630	10.293	2082.5	20.182	0.6930	0.9600	800.32	1.8824	9826.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

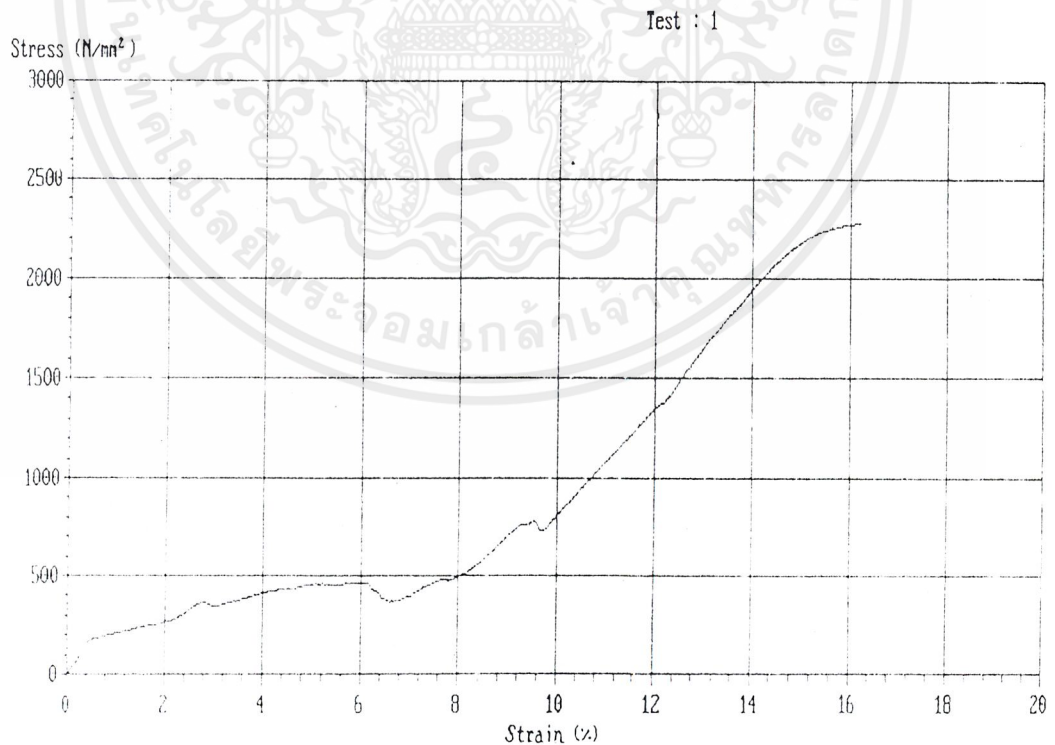
ตาราง จ.2 แสดงคุณสมบัติของลวดสปริง ทดสอบค่าความถี่ ขนาด 1.80 mm

Ref. 2 : Test : material laboratory KMITL
 Ref. 3 : Test Type : Tensile
 Ref. 4 : Date : 15-02-01
 Test Speed : 010.00 mm/min
 Sample Length : 089.5 mm
 Sample Type : CIRCULAR
 Pre-Tension : OFF

Test No.	Diameter mm	Load # Peak kN	Elong. # Peak mm	Stress # Peak N/mm ²	Strain # Peak %	Load # Yield kN	Elong. # Yield mm	Stress # Yield N/mm ²	Strain # Yield %	Youngs Modulus N/mm ²
1	1.8000	3.7340	14.317	2276.9	15.220	1.1660	4.5290	458.21	5.0603	19743

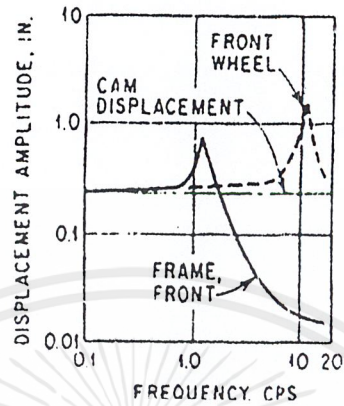
Ref. 2 : Test : material laboratory KMITL
 Ref. 3 : Test Type : Tensile
 Ref. 4 : Date : 15-02-01
 Test Speed : 010.00 mm/min
 Sample Length : 089.5 mm
 Sample Type : CIRCULAR
 Pre-Tension : OFF

Test No.	Diameter mm	Load # Peak kN	Elong. # Peak mm	Stress # Peak N/mm ²	Strain # Peak %	Load # Yield kN	Elong. # Yield mm	Stress # Yield N/mm ²	Strain # Yield %	Youngs Modulus N/mm ²
1	1.8000	3.7340	14.317	2276.9	15.220	1.1660	4.5290	458.21	5.0603	19743



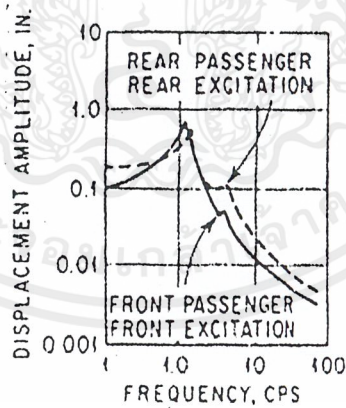
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.



รูปที่ ฉ.1

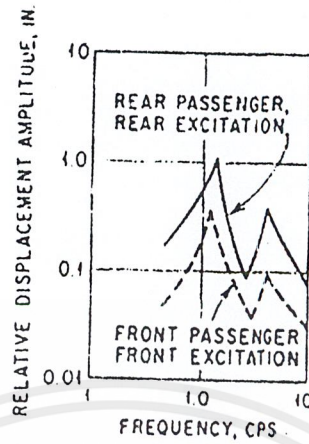
ในรูปที่ ฉ.1. แสดงถึงผลตอบสนองของพาหนะที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนโดยการปรับค่าความถี่บนแท่นทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 75 hp เป็นตัวขับเคลื่อนที่ความเร็ว 105 mph. (168 km/hr) ซึ่งเทียบได้กับการวิ่งบนพื้นถนนที่ไม่ราบเรียบ



รูปที่ ฉ.2

ในรูปที่ ฉ.2 แสดงถึงแอมพลิจูดของการขจัดของผู้โดยสารที่ด้านหน้าและด้านหลังของรถ ที่การสั่นสะเทือนเดียวกับการทดสอบในรูปที่ ฉ.1. ซึ่งค่าประมาณแอมพลิจูดการขจัดของการสั่นสะเทือนมีค่าประมาณ 0.12 นิ้ว (3 mm) ทั้ง 2 กรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๓

ในรูปที่ ๓.๓ แสดงถึงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนไหวระหว่างผู้โดยสารกับรถ เมื่อรถมีแอมพลิจูดในการสั่นเท่ากับ 0.12 นิ้ว (3 mm) ที่ล้อหน้าและหลัง และการทดสอบนั้นมีสถานะเดียวกับรูปที่ ๓.๑ และ ๓.๒ ซึ่งจะได้อัตราความสัมพันธ์สูงสุดที่ความถี่ธรรมชาติของผู้โดยสารบนที่นั่ง ประมาณ 3 cps. และของตัวรถ ที่ประมาณ 1.3 cps.

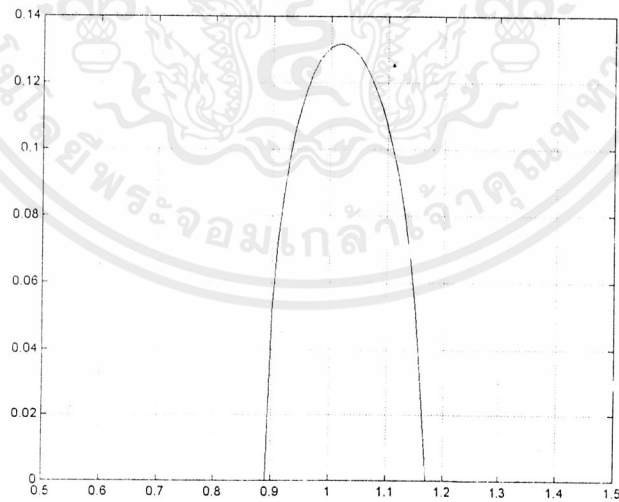
ภาคผนวก ข.

แสดงการเขียนโปรแกรม MATLAB

```
x = 0.5 : 0.01 : 2.5 ;
y = 0 : 0.05 : 20 ;
y = ((-0.25*x.^(-2))-(-0.233*x.^2)+0.5).^(1/2) ;
plot(x , y),...
grid
```

(เมื่อ x คือ $\frac{\omega}{\omega_n}$ และ y คือ ζ)

กราฟความสัมพันธ์

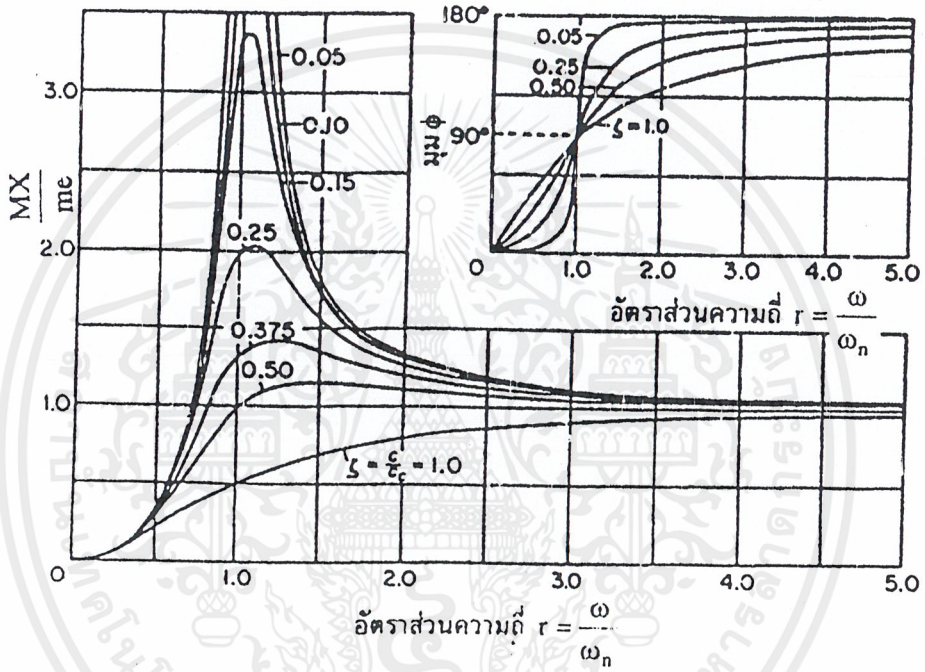


$\frac{\omega}{\omega_n}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

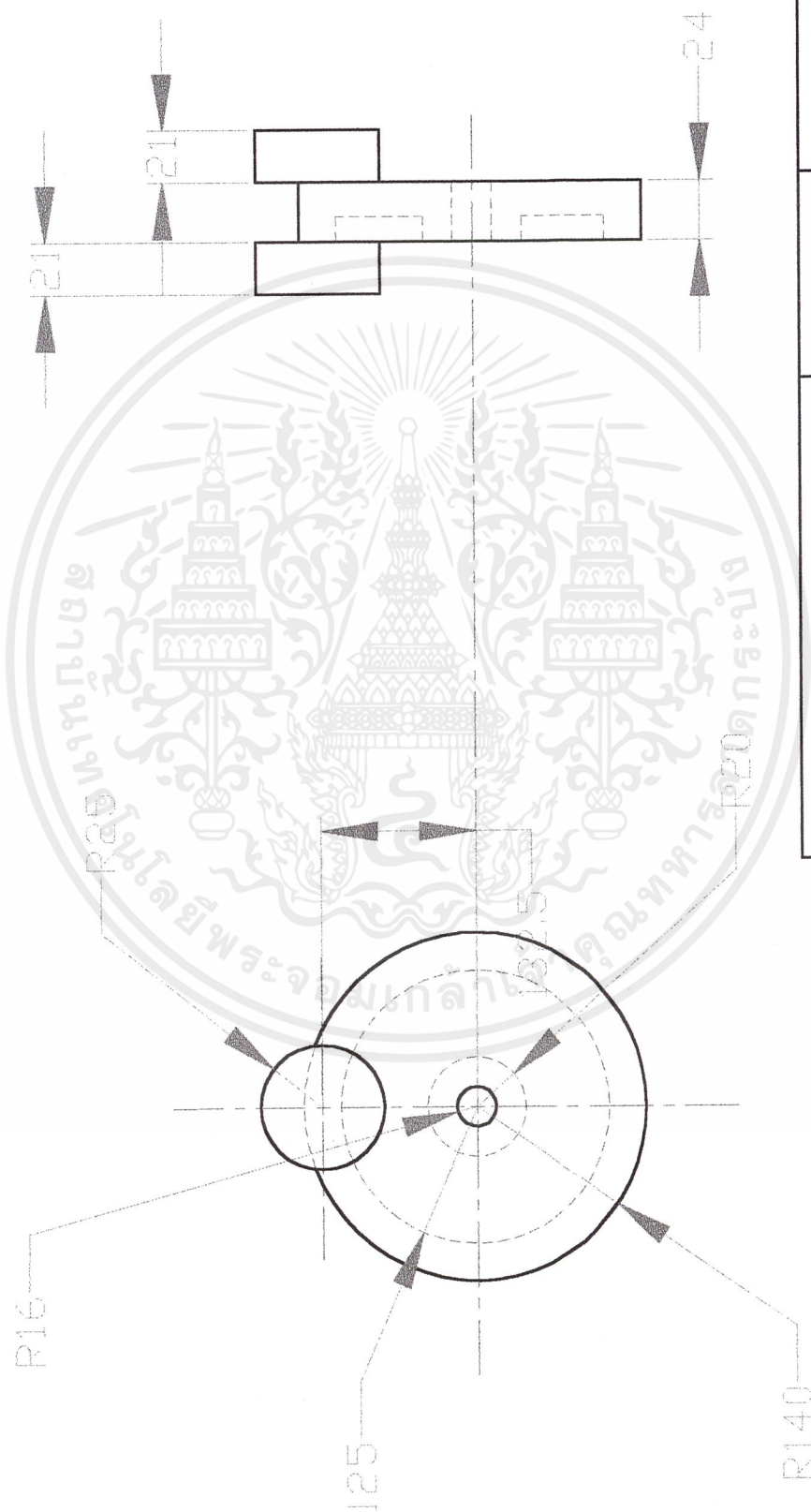
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{MX}{me}$ และ $\frac{\omega}{\omega_n}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



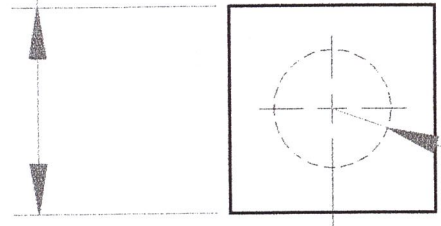
DATE	MARCH 2001
FIRST ANGLE PROJECTION	
ALL DIMENSIONS IN MM	

KMITL

UNBALANCE MASS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50



R32.57



300

310

KMITL		DATE	MARCH 2001
SHAFT		FIRST ANGLE PROJECTION	
		ALL DIMENSIONS IN MM	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50



DATE MARCH 2001

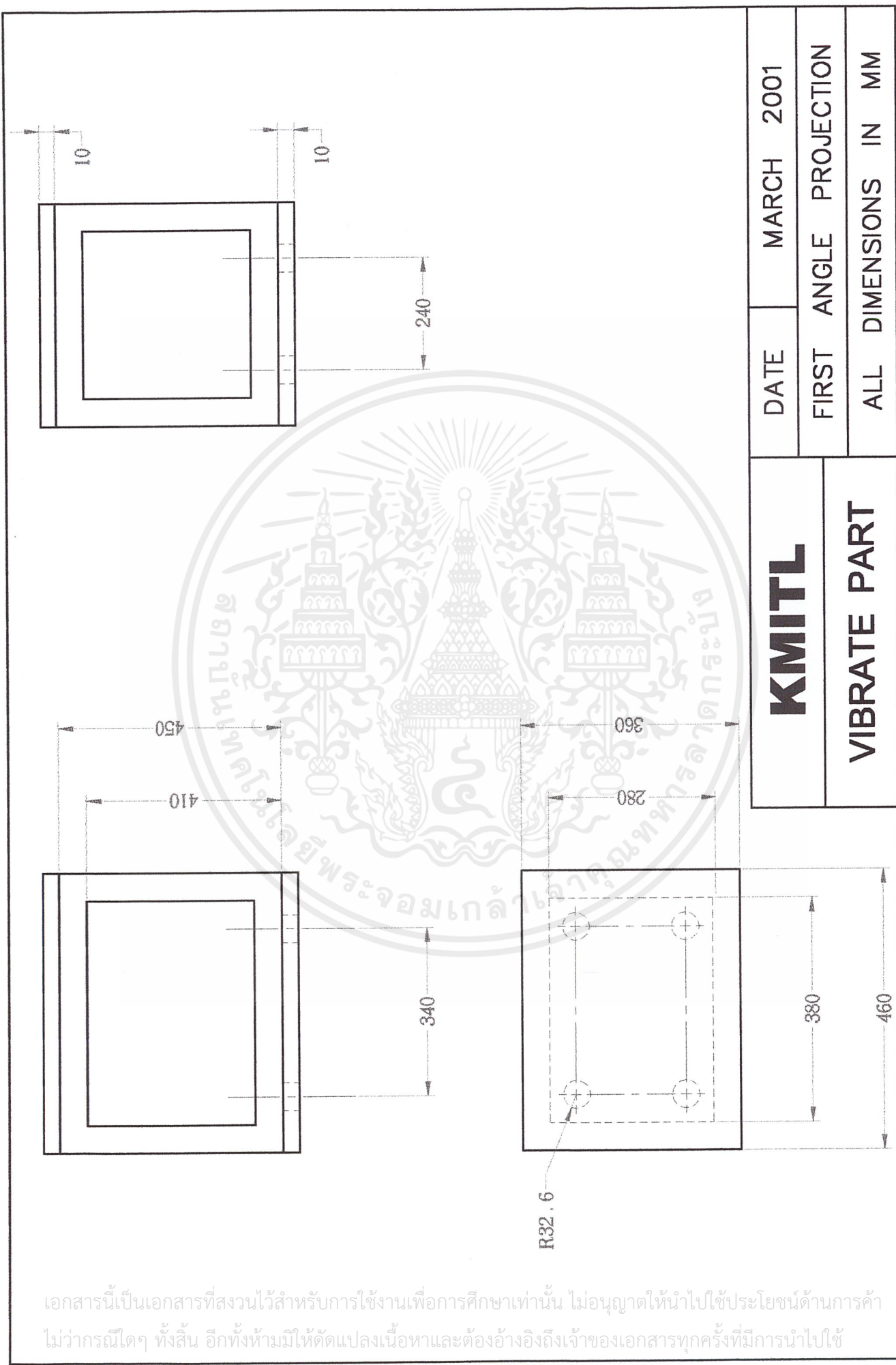
FIRST ANGLE PROJECTION

ALL DIMENSIONS IN MM

KMITL

BOOTH

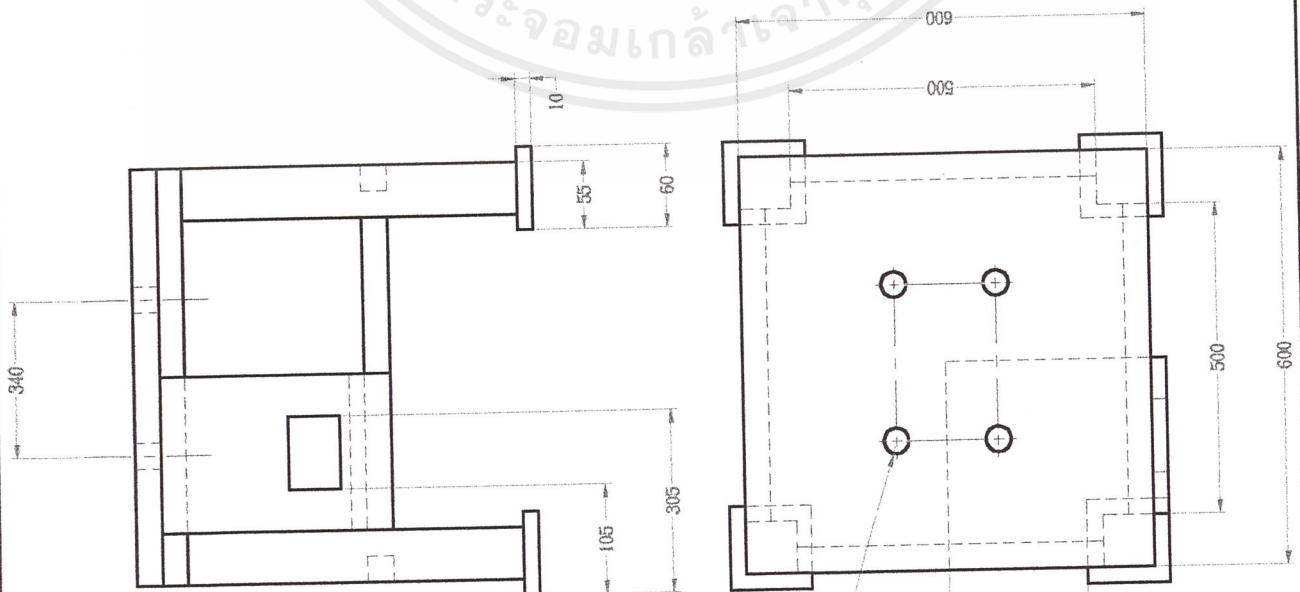
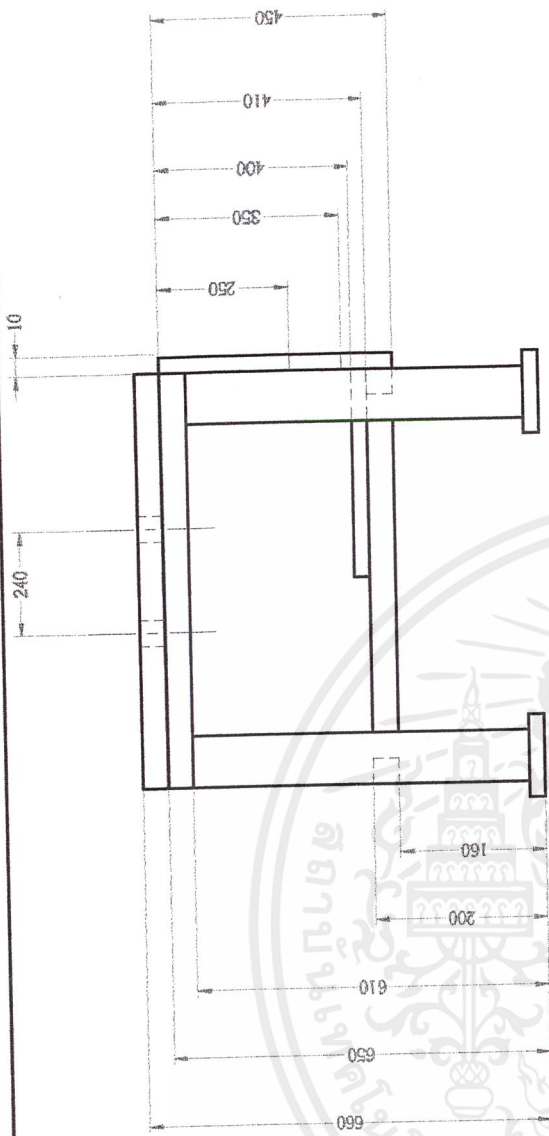
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DATE	MARCH 2001
FIRST ANGLE PROJECTION	
ALL DIMENSIONS IN MM	

KMITL
VIBRATE PART

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



KMITL	DATE	MARCH 2001
	FIRST ANGLE PROJECTION	
	ALL DIMENSIONS IN MM	
BASE		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้