

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการสั่นสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดี่ยว

The Study of Vibration in a Single Cylinder Compressor



นายภูษิต สมุทรกิตติศักดิ์  
นายภราดร บิลอะหดี

ร/พ.  
๓๖๙๖  
๑๕๕๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

71952

- 6 ส.ย. 2550

b. 117b0825  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการสั่นสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดี่ยว  
The Study of Vibration in a Single Cylinder Compressor



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการสันสถานะของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดี่ยว

ผู้จัดทำ

1. นายภูมิต สมุทรกิตติศักดิ์ รหัสประจำตัว 47015368
2. นายภราดร บิลอะหลี รหัสประจำตัว 47015400



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาการสันสะเทือนของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดียว

นายภูษิต สมุทรกิตติศักดิ์ 47015368

นายภราดร บิลอะหลี 47015400

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาการสันสะเทือนในแนวคิ่งของคอมเพรสเซอร์แบบลูกสูบเดียว โดยแรงที่เป็นตัวกระตุ้นการสันสะเทือนคือแรงอินเนื่องมาจากความไม่สมดุลของกลไก ไม่พิจารณาแรงดันในกระบอกสูบ ในการศึกษาจะกระทำโดยการจำลองระบบคอมเพรสเซอร์เป็นระบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อคำนวณหาการสันสะเทือน จากนั้นจะทำการศึกษาการสันสะเทือนโดยการทดลองเพื่อวัดหาค่าความเร่ง ความเร็ว และการขจัด ซึ่งจะแปลงให้อยู่ในรูปค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทางทฤษฎี ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยทางทฤษฎีจะมีค่าสูงกว่าทางปฏิบัติ และเกิดการสันสะเทือนสูงสุดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 573 รอบต่อนาที หรือเท่ากับ 60.4 เฮิรท์ ซึ่งเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## The Study of Vibration in a Single Cylinder Compressor

Phoosit Samutkittisak 47015368

Paradorn Bin-ah-lee 47015400

Asst.Prof.Dr. Monsak Pimsam Adviser

### Abstract

This project is aimed to study the vertical vibration of a single cylinder compressor. The compressor has been vibrated by unbalance excitation forces, neglecting a time-varying force due to compression inside a cylinder. In this project, a particle dynamic model of the compressor is formulated in order to numerically predict the vibration level. The predicted vibration values, displacement, velocity, and acceleration, are later compared with the experimental values. In this project, a root mean square average is used to evaluate the vibration level. From the results, it is found that the theoretical vibrations levels are higher than the measured vibrations. Moreover, the maximum vibration level is found at 573 rpm or 60.4 Hz which is a natural frequency of the system.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่กล่าวถึงเพราะเป็นผู้ที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คืออาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือเสมอมา ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณพี่เบียร์ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณเจตที่ช่วยให้งานเป็นรูปธรรมขึ้นมา ขอขอบคุณพี่เซียง นักศึกษาปริญญาโท ตลอดจนเพื่อนร่วมห้องที่เป็นกำลังใจให้กันเสมอมา ขอขอบคุณห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักหอสมุดกลาง ที่เป็นแหล่งความรู้และเอกสารอ้างอิง ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนงบประมาณในการทำโครงการรวมทั้งบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนร่วมให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ลืมไม่ได้ที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งคอยเลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี ให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายภูษิต สมุทรกิตติศักดิ์  
นายภราดร บิลละหลี

## สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 พื้นฐานการสันสะเทือนทางวิศวกรรม	2
2.2 การวิเคราะห์การสันสะเทือนทางวิศวกรรม	3
2.2.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ	3
2.2.2 การหาสมการการเคลื่อนที่	4
2.2.3 การหาผลเฉลยสมการการเคลื่อนที่	4
2.2.4 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์	4
2.2.5 สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีลำดับชั้นความอิสระเท่ากับหนึ่ง	8
2.2.6 ผลตอบสนองของระบบไม่มีความหน่วงภายใต้แรงกระทำฮาร์โมนิกส์	10
2.3 สปริง	
2.3.1 ค่าเทียบเท่าค่าคงที่สปริง	19
2.3.2 การต่อสปริงอย่างขนาน	19
2.3.3 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง	21
2.3.4 ความเค้นในสปริงขดรับแรงกด	22
2.3.5 ความแข็งตึงของสปริง	24
2.3.6 จำนวนขดทำการ	24
2.3.7 ระบุยูนิตที่ใช้งาน	25

บทที่ 3	การออกแบบ การคำนวณและอุปกรณ์การทดลอง	
3.1	ชุดทดลอง	28
3.1.1	ลูกสูบ ก้านสูบ และเพลาค้อเหวี่ยง	28
3.1.2	เสื่อสูบ	28
3.1.3	มอเตอร์กระแสตรง	29
3.1.4	ล้อเลื่อน	29
3.1.5	สปริง	30
3.1.6	ฐานรองรับ	30
3.1.7	อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง	31
3.1.8	อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	31
3.1.9	อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลการสั่งสะท้อน	32
3.2	การติดตั้งชุดทดลองและอุปกรณ์	33
3.2.1	ประกอบชุดทดลอง	33
3.2.2	ประกอบชุดทดลองเข้ากับฐานรองรับ	34
3.2.3	ต่ออุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรงและติดตั้งเซ็นเซอร์	34
3.3	การคำนวณ	35
3.3.1	มวลของลูกสูบ ก้านสูบ และเพลาค้อเหวี่ยง	35
3.3.2	พิจารณาก้านสูบ	36
3.3.3	การคำนวณหาความถี่ธรรมชาติ	37
บทที่ 4	วิธีการทดลอง	
4.1	ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	38
4.2	เขียนแบบจำลอง	38
4.3	สร้างชุดทดลอง	38
4.4	วัดค่ามวลชุดทดลอง ความถี่ธรรมชาติ และค่าคงที่สปริง	39
4.5	ทำการทดลองเก็บผลการทดลองและเปรียบเทียบผล	39
4.5.1	การทดลองทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม Matlab	39
4.5.2	การทดลองทางปฏิบัติ	39
บทที่ 5	ผลการทดลอง	
ตาราง 5-1	เปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	41
ตาราง 5-2	เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	42
ตาราง 5-3	เปรียบเทียบการกระจัดเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	43
บทที่ 6	สรุป และวิจารณ์ผลการทดลอง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1	สรุปผลการทดลอง	44
6.2	ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา	45
6.3	ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	45

ภาคผนวก ก.

ภาคผนวก ข.

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนที่ที่มุมเฟสที่แตกต่างกัน	6
2.2 การรวมการสั่นสะเทือน	7
2.3 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ไม่มีความหน่วง	8
2.4 การตอบสนองภายใต้แรงกระทำ	14
2.5 การเพิ่มขึ้นของช่วงกว้างการสั่น เมื่อเกิดการสั่นพ้อง	17
2.6 ผลตอบสนองของระบบตามสมการ (2.41) และ (2.42)	18
2.7 การบีบตัวของสปริง	19
2.8 การต่อสปริงแบบขนาน	20
2.9 สปริงชุด	22
2.10 ปลายสปริงขตรับแรงกด	25
2.11 ระบุขบค้วของสปริงชุด	25
3.1 แบบชุดทดลอง	27
3.2 ชุดลูกสูบ	28
3.3 เลื่อยสูบ	28
3.4 มอเตอร์กระแสตรง	29
3.5 ล้อเลื่อน	29
3.6 สปริง	30
3.7 ฐานรองรับ	30
3.8 อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง	31
3.9 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	31
3.10 อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลการสั่นสะเทือน	32
3.11 เซ็นเซอร์ (Sensor)	32
3.12 ชุดลูกสูบ	33
3.13 การติดตั้งชุดทดลองเข้ากับฐาน	34
3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	34
3.15 เฟลาข้อเหวี่ยง	35
3.16 แสดงการเปลี่ยนก้านสูบด้วยมวลเทียบเท่าเชิงจลน์กระทำที่สลักสูบ B และสลักแกนข้อเหวี่ยง A และ โมเมนต์เฉื่อย $J_{AB}$	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 ความหน่วงของสปริงที่ได้จากการทดลอง	37
5.1 รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	41
5.2 รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	42
5.3 รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบการขจัดเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง	43



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5-1 เปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย ระหว่างจากทางทฤษฎีและการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ	41
5-2 เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ย ระหว่างจากทางทฤษฎีและการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ	42
5-3 เปรียบเทียบการจัดเฉลี่ย ระหว่างจากทางทฤษฎีและการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ	43



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบปรับอากาศทำหน้าที่ในการอัดไอส่งไปยังคอนเดนเซอร์ ซึ่งมีการสันตะเทียนและเสียงเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ โดยที่ไม่สามารถที่จะทำให้การสันเหล่านี้หมดไปได้โดยสิ้นเชิง พื้นฐานการออกแบบโดยทั่วไปคือการทำให้การสันตะเทียนและเสียงลดลงได้มากที่สุด โดยพื้นฐานจำเป็นต้องศึกษาการสันตะเทียนของคอมพิวเตอร์เป็นขั้นแรก

การทำโครงการนี้เป็นเรื่องการศึกษาการสันตะเทียนในแนวคิดของคอมพิวเตอร์แบบสูบเดี่ยวโดยไม่พิจารณาความดันในกระบอกสูบ เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการสันตะเทียนจากการทดลองทางทฤษฎีและทางปฏิบัติที่เกิดขึ้นในคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการศึกษาการสันตะเทียนในคอมพิวเตอร์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการสันตะเทียนที่เกิดขึ้นระหว่างการหมุนอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของวัตถุ

1.2.2 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากทางทฤษฎีและทางการทดลอง

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 พิจารณาวัตถุเคลื่อนที่ในแนวระนาบและวัตถุเป็นอนุภาค

1.3.2 พิจารณาแรงกระทำในแนวแกนตั้งเพียงแกนเดียวและไม่พิจารณาความดันในกระบอกสูบ

1.3.3 ติดตั้งอุปกรณ์รับสัญญาณเซ็นเซอร์(Sensor) ภายนอกชุดทดลอง บริเวณใกล้เคียงจุดศูนย์กลาง

1.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรากกำลังสองของ การขจัด ความเร็ว และความเร่ง ทางทฤษฎีและการทดลอง

### 1.4 วิธีการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาโปรแกรม Matlab

1.4.2 สร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์

1.4.3 สร้างชุดทดลองคอมพิวเตอร์

1.4.4 ทำการทดลองทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ

1.4.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พื้นฐานการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม

การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบๆจุดสมดุลในห้วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะการเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบซ้ำตัวเองหรือไม่ก็ตามเราจะเรียกการเคลื่อนที่นั้นว่า **การสั่น (Vibration)** หรือ **การแกว่ง (Oscillation)** ตัวอย่างเช่น การแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกา การโยกตัวของเสาสูง หรือการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดอยู่บนสปริง เป็นต้น โดยเหล่านี้เป็นตัวอย่างง่ายๆของการสั่น

การสั่นของวัตถุต่างๆ เป็นสิ่งหนึ่งที่เกิดขึ้นมาพร้อมกับการถือกำเนิดของโลกนี้ การสั่นของวัตถุต่างๆที่เกิดขึ้นมีทั้งสิ่งที่ก่อให้เกิดประโยชน์และเป็นที่ต้องการ เช่นการสั่นของเส้นเสียดในการออกเสียงของมนุษย์และสัตว์สำหรับการติดต่อ หรือการสั่นของเครื่องดนตรีประเภทเครื่องสายหรือกลอง เป็นต้น ขณะเดียวกันจะมีการสั่นบางอย่างที่ทำให้เกิดโทษและไม่เป็นที่ต้องการ เช่นการสั่นของโครงสร้างเนื่องจากแรงลม หรือการสั่นอย่างรุนแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียหายได้

การศึกษาเรื่องการสั่นทางวิศวกรรม เป็นการศึกษาเพื่อให้วิศวกรมีความเข้าใจถึงการสั่นที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของ โครงสร้างหรือของเครื่องจักรว่ามีคุณลักษณะเฉพาะเป็นอย่างไร วิธีการหลีกเลี่ยงหรือป้องกันการสั่นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสียหายว่ามีวิธีการอย่างไรบ้าง รวมถึงการวัดและการควบคุมการสั่นที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างหรือเครื่องจักรด้วย

เนื่องจากการศึกษาในเรื่องการสั่นทางวิศวกรรมถือได้ว่าเป็นการศึกษากการเคลื่อนที่ของวัตถุชั้นสูง ดังนั้นผู้ศึกษาเรื่องนี้ควรมีพื้นฐานทางด้าน พลศาสตร์ทางวิศวกรรม รวมถึงคณิตศาสตร์พื้นฐานเช่นการแก้สมการอนุพันธ์อยู่ก่อนแล้ว และทำให้ในการจัดทำเอกสารชุดนี้ผู้เรียบเรียงได้จัดทำขึ้นในลักษณะที่คาดว่าผู้อ่านคงจะมีความเข้าใจพื้นฐานในเรื่องดังกล่าวแล้วเป็นอย่างดี และอาจจะมีการข้ามรายละเอียดบางส่วนที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาวิชานั้นๆไปบ้าง เพื่อให้การศึกษาในเรื่องการสั่นทางวิศวกรรมเกิดความกระชับมากยิ่งขึ้น การสั่นทางวิศวกรรมที่จะศึกษาในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ซ้ำตัวเองของวัตถุรวมถึงการพิจารณาแรงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือของระบบ ระบบที่เราจะทำการพิจารณาว่าเกิดการสั่นทางวิศวกรรมมักจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญสามส่วนดังนี้

1. อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานศักย์ เช่น สปริง หรือวัสดุที่มีความความยืดหยุ่นในรูปแบบอื่น
2. อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานจลน์ เช่น มวล หรือความเฉื่อยอื่นๆ ของระบบ
3. อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เช่น ตัวหน่วง (Damper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม

ในโครงการนี้เราจะกล่าวถึงส่วนประกอบพื้นฐานที่จะนำมาใช้ในการจำลองระบบที่มีการสั่นด้วยสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งส่วนประกอบหลักๆ ของการสั่นเชิงกลก็จะประกอบด้วย

1. มวลซึ่งจะเป็นส่วนที่มีหน้าที่สะสมพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่หรือพลังงานจลน์หรือสะสมแรงเฉื่อยที่ใช้ในการเคลื่อนที่
2. สปริงซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ในการสะสมพลังงานศักย์

สำหรับการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของระบบที่คกอยู่ภายใต้แรงกระทำหรือการสั่น โดยอิสระก็ตามจะต้องมีการรบกวนระบบซึ่งเป็นค่าอินพุต (Input) ที่ให้กับระบบและจะมีการสนองตอบ (Response) เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งปริมาณทั้งสองนี้จะเป็นปริมาณที่ขึ้นกับเวลา สำหรับการตอบสนองของระบบที่เกิดการสั่นจะขึ้นอยู่กับทั้งสภาพเริ่มต้นของการสั่นและค่าที่ให้กับระบบเมื่อเกิดการสั่นสะเทือน โดยทั่วไปแล้วระบบที่เกิดการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมมักจะเป็นระบบที่ยู่ยาก และมักจะไม่สามารถพิจารณาองค์ประกอบของการสั่นทั้งหมดได้ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ แต่เราอาจจะหาคำตอบในบางลักษณะของการสั่นหรือในบางลักษณะของสภาพการเริ่มต้นของการสั่นได้ รวมถึงเราอาจจะหาได้ค่าที่เกี่ยวข้องกับการสั่นเพียงบางค่าเท่านั้น ไม่ใช่ค่าทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการสั่นของระบบในการศึกษาเรื่องการสั่นทางวิศวกรรมในเบื้องต้นนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling) ซึ่งขั้นตอนการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จำลองระบบทางกลหรือโครงสร้างสำหรับการสั่นทางวิศวกรรม มีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างสมมุติฐานเบื้องต้นของระบบที่เกิดการสั่น โดยเราจะแทนสิ่งที่มีจริงด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เช่น แทนแหล่งสะสมพลังงานศักย์ทุกแบบในระบบด้วยสปริง เป็นต้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ควรจะสมารถแทนทุกส่วนของระบบจริงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อให้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแทนการสั่นสะเทือนของระบบได้อย่างถูกต้อง การกำหนดระบบด้วยแบบจำลองทางธรรมชาติถือว่าเป็นสิ่งสำคัญ และขึ้นอยู่กับดุลพินิจหรือข้อจำกัดของการออกแบบว่าควรจะจำลองระบบด้วยแบบจำลองที่มีความแม่นยำเพียงใด อย่างเช่นการจำลองแบบจำลองของวัตถุอันหนึ่งเราอาจจะพิจารณาจำลองวัตถุนั้นเป็นมวลลักษณะเป็นจุดหรืออาจจะจำลองเป็นวัตถุเกร็งก็ได้ แต่ความถูกต้องของแบบจำลองก็ขึ้นอยู่กับสภาพการเคลื่อนที่จริงว่าวัตถุนั้นมีการเคลื่อนที่อย่างไร หรือเราอาจจะจำลองระบบว่าเป็นระบบเชิงเส้นหรือระบบไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ แต่ในท้ายที่สุดความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับว่าผลที่ได้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากน้อยเพียงใดนั่นเอง

### 2.2.2 การหาสมการการเคลื่อนที่

หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาก็คือแทนสมการการเคลื่อนที่ของระบบเข้ากับแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น สมการเคลื่อนที่ของระบบอาจได้มาด้วยวิธีต่างๆหลายวิธี เช่น การใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน การใช้กฎของการอนุรักษ์พลังงาน หรือกฎการเคลื่อนที่อื่นๆ ก็ได้ ซึ่งการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ มักจะสิ้นสุดด้วยสมการการเคลื่อนที่ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์สำหรับวิธีการหาสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางกายภาพด้วยวิธีการต่างๆ

### 2.2.3 การหาผลเฉลยสมการเคลื่อนที่

หลังจากได้สมการเคลื่อนที่แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือการหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ ซึ่งอาจจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่เราศึกษามาในขั้นพื้นฐานได้ก็ได้เช่นวิธีการแก้สมการอนุพันธ์ปกติ หรือวิธีการเปลี่ยนรูปของลาปลาซ (Laplace's transform) เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากว่าสมการอนุพันธ์มีความยุ่งยากมาก เช่นเป็นระบบสมการที่มีสมการอยู่หลายสมการหรือเป็นสมการไม่เชิงเส้นเราอาจต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาสำหรับในปัจจุบันซึ่งคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง ในขั้นตอนนี้จึงสามารถนำคอมพิวเตอร์มาช่วยแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขได้เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขไม่ว่าจะไม่มีข้อจำกัดในการใช้ ข้อจำกัดของการแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลขคือไม่สามารถบอกลักษณะของคำตอบออกมาในรูปทั่วไปได้ในทุกกรณี นั่นคือเราจะต้องแทนค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในสมการเป็นค่าตัวเลข ดังนั้นเมื่อคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเราอาจจะต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหาใหม่ทั้งหมด ในขณะที่ผลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ปกติมักจะให้คำตอบออกมาในรูปของฟังก์ชัน ซึ่งการเปลี่ยนคุณสมบัติบางค่าของระบบอาจสามารถกระทำในขั้นของคำตอบได้โดยตรง

### 2.2.4 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์

การเคลื่อนที่โดยทั่วไป สามารถที่จะเป็นการเคลื่อนที่ในรูปแบบใดก็ได้ ไม่มีข้อจำกัดที่แน่นอน แต่ในการสั้น วัตถุที่เกิดการสั้นมักจะมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ในรูปแบบต่างๆ สำหรับการเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำตัวเองที่ง่ายต่อการพิจารณาและนำมาสร้างแบบจำลองมากที่สุดคือการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ (Harmonics motion) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะพบมากในชิ้นส่วนทางกลต่างๆ และการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเป็นวงกลมรอบจุดคงที่จุดหนึ่ง

โครงการนี้จะกล่าวถึงนิยามและส่วนประกอบต่างๆ ที่เป็นพื้นฐานของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ รวมถึงการศึกษาถึงวิธีทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ หรือการศึกษา Fourier's Series ทั้งในรูปแบบปกติ และที่เป็นจำนวนเชิงซ้อนด้วย

นิยามที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ การเคลื่อนที่แบบเป็นคาบ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์จะเป็นการเคลื่อนที่ที่เราจะศึกษาอย่างละเอียดในการศึกษาการสั้นทาง

วิศวกรรมในขั้นพื้นฐานนี้ ดังนั้นในส่วนนี้จะอธิบายถึงนิยามต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ ซึ่งมีนิยามที่สำคัญดังนี้

รอบ (Cycle) การเคลื่อนที่ของวัตถุจากสภาพสมดุลหรือจากจุดสมดุลเริ่มต้นหนึ่ง ไปในทิศทางหนึ่งจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดหรือไกลที่สุดในทิศทางการเคลื่อนที่นั้น แล้วย้อนกลับมาผ่านจุดสมดุลและเคลื่อนที่ต่อไปในทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศทางแรกจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดหรือไกลที่สุดในทิศทางนั้น แล้วกลับมาที่จุดสมดุลอีกครั้งหนึ่ง การเคลื่อนที่ที่ครบวงรอบดังที่กล่าวมานี้ เราจะเรียกว่าวัฏจักรนั้นเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ (Cycle) ของการสั่นหรือรอบของการเคลื่อนที่

ช่วงกว้าง (Amplitude) ระยะเวลาขจัดที่วัดจากจุดสมดุลถึงจุดสูงสุดหรือไกลจากจุดสมดุลที่สุดในการเคลื่อนที่ เราเรียกระยะนั้นว่า ช่วงกว้าง (Amplitude) ของการสั่น

คาบการสั่น (Period) คือช่วงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบการเคลื่อนที่ ซึ่งสัญลักษณ์ที่จะใช้ในที่นี้คือ  $\tau$

ความถี่ (Frequency) ความถี่ของการสั่นคือจำนวนรอบการสั่นที่วัตถุเคลื่อนที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นความถี่  $f$  จะมีความสัมพันธ์กับคาบการสั่นคือ

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (2.1)$$

และหน่วยของความถี่จะเป็นส่วนกลับของเวลา แต่ที่เรานิยมใช้คือส่วนกลับของวินาที หรือ Hertz ,Hz สำหรับความถี่เชิงมุมหรือความเร็วเชิงมุม (Angular frequency หรือ Angular velocity) จะเป็นมุมที่วัตถุเคลื่อนที่รอบจุดศูนย์กลางในหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งความถี่เชิงมุมนี้จะมี ความสัมพันธ์กับความถี่คือ

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

และความถี่เชิงมุมนี้จะมีหน่วยเป็น  $rad/sec$

อย่างไรก็ตามแม้ว่านิยามของความถี่และความถี่เชิงมุมจะต่างกัน แต่ความแตกต่างนี้จะไม่ค่อยได้รับความสนใจในการสั่นทางวิศวกรรมมากนักอาจเป็นเพราะว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองค่าอยู่แล้วก็ โดยในการพิจารณาเรื่องการสั่นทางวิศวกรรม เมื่อกกล่าวถึงความถี่เราอาจหมายถึงได้ทั้งความถี่  $f$  และความถี่เชิงมุม  $\omega$  ซึ่งการที่จะบอกให้แน่ชัดว่าเป็นค่าใดนั้นจะใช้สังเกตจากหน่วยของปริมาณนั้น นอกจากนั้นแล้วเมื่อกกล่าวถึงความถี่ มักจะหมายถึงความถี่เชิงมุม  $\omega$  มากกว่าค่า  $f$

มุมเฟส (Phase angle) หากเราพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เป็นอิสระต่อกัน 2 วัตถุ โดยทั้งสองมีสมการการเคลื่อนที่

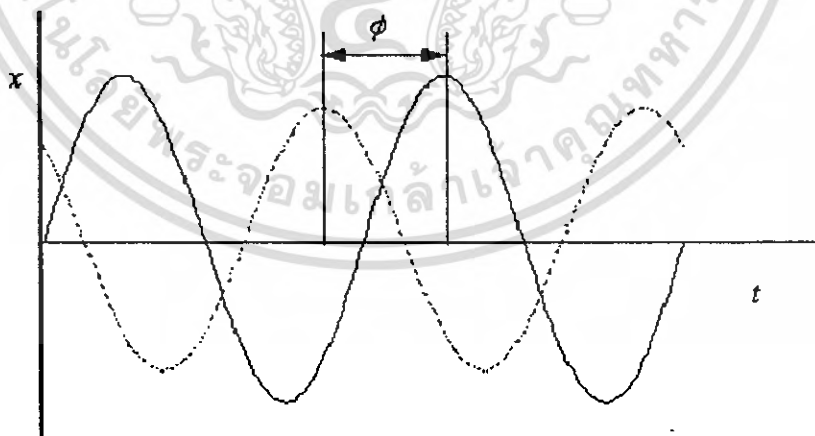
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_1 = A_1 \sin \omega t \quad (2.3)$$

และ

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi) \quad (2.4)$$

ซึ่งกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุทั้งสองนี้แสดงในรูปที่ 2.1 จากสมการการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ เราสามารถกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุทั้งสองนี้สอดคล้องกัน (Synchronous) เพราะทั้งคู่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยความถี่  $\omega$  ที่เท่ากัน ซึ่งการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกันนี้ไม่จำเป็นต้องมีช่วงกว้างเท่ากัน อีกทั้งยังไม่มีค่าเป็นที่วัตถุทั้งสองจะถึงจุดการเคลื่อนที่สูงสุดพร้อมกัน และมุมเฟสคือมุมที่วัตถุสองชิ้น เคลื่อนที่ถึงจุดสูงสุดแตกต่างกัน โดยวัตถุทั้งสองชิ้นต้องเคลื่อนที่สอดคล้องกัน จากรูปที่ 2.1 เราจะพบว่ากราฟ  $x_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi)$  จะถึงจุดสูงสุดก่อนที่กราฟ  $x_1 = A_1 \sin \omega t$  จะถึงจุดสูงสุด ซึ่งเราสามารถกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการเคลื่อนที่ทั้งสองมีเฟสแตกต่างกันเท่ากับ  $\phi$  โดยการเคลื่อนที่ของ  $x_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi)$  จะนำ (Lead) คือขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อน วัตถุ  $x_1 = A_1 \sin \omega t$  ในการเคลื่อนที่ในรอบเดียวกันอยู่เท่ากับ  $\phi$



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ที่มีมุมเฟสที่แตกต่างกัน

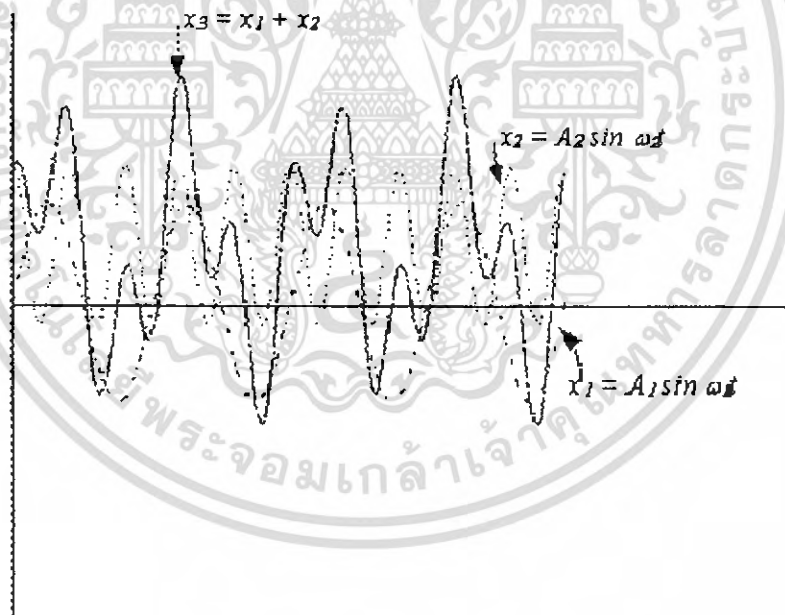
การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายนี้ ถ้าเราพิจารณาอีกลักษณะหนึ่งเราก็อาจจะมองได้เหมือนกับการเคลื่อนที่ของคลื่นได้เช่นกันเช่นการเคลื่อนที่  $x_1 = A_1 \sin(\omega t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $x_2 = A_2 \sin(\omega_2 t)$  หากเรานำการเคลื่อนที่ทั้งสองมารวมกัน เราก็จะ ได้การเคลื่อนที่ที่เป็นลักษณะ ฮาร์โมนิกส์อีกแบบหนึ่ง นั่นคือถ้า  $x_3 = x_1 + x_2$  เราจะได้การเคลื่อนที่ที่เป็น

$$x_3 = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) \quad (2.5)$$

ซึ่งกราฟแสดง  $x_1, x_2$  และ  $x_3$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ซึ่งการรวมการเคลื่อนที่นี้จะเห็นว่าจะคล้ายกับการรวมคลื่น การรวมการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่ระบบมีลำดับชั้นความเป็นอิสระที่มากกว่าหนึ่ง แล้วมวลในระบบเกิดการสั่นขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระ  $n$  จะมีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ  $n$  ค่า การที่ระบบทั้งระบบสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติความถี่ใดความถี่หนึ่งเราเรียกว่าระบบเกิดการสั่นใน โหมดปกติ ( Normal Mode) อย่างไรก็ตามระบบสามารถที่จะสั่นในความถี่ธรรมชาติหลายๆความถี่ได้พร้อมกัน ซึ่งลักษณะก็จะเป็นการสั่นที่รวมความถี่ธรรมชาติหลายความถี่เข้าด้วยกัน



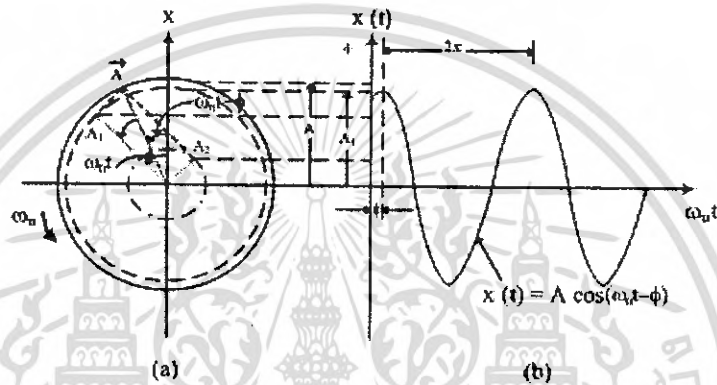
รูปที่ 2.2 การรวมการสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ที่ได้จากการรวมการเคลื่อนที่สองส่วนเข้าด้วยกัน เราจะพบว่า ทั้งช่วงกว้างการสั่นและความถี่ไม่จำเป็นที่จะต้องเท่ากับการเคลื่อนที่ค่าใดค่าหนึ่ง ในการรวมการเคลื่อนที่ หรือคลื่นเข้าด้วยกัน จะเกิดปรากฏการณ์ที่น่าสนใจปรากฏการณ์หนึ่งคือ ถ้าการเคลื่อนที่ทั้งสองมีความถี่ใกล้เคียงกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 สมการการเคลื่อนที่ของระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับหนึ่ง

การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์สามารถเขียนแทนด้วยกราฟในรูปที่ 2.3 ถ้า  $\vec{A}$  แทนเวกเตอร์ของช่วงกว้างการสั่น  $A$  ซึ่งทำมุม  $\omega_n t - \phi$  กับแนวตั้ง หรือแทน  $x$  ดังนั้นจะเห็นได้จากการฉายเวกเตอร์  $\vec{A}$  ลงบนแกน  $x$  เนื่องจากมุม  $\omega_n t - \phi$  เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของเวลาโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชัน ดังนั้นจะเกิดการซ้ำตัวเองของการเคลื่อนที่ ดังที่แสดงในรูปเมื่อเวลาผ่านไปครบ 1 คาบการสั่นหรือ  $2\pi$



รูปที่ 2.3 การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ไม่มีความหน่วง

สำหรับการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ของระบบมวล-สปริง ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 เราสามารถสรุปลักษณะการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

1. เมื่อระบบสั่นภายใต้การสั่นแบบอิสระความถี่ของการสั่นนี้จะเรียกความถี่ธรรมชาติ  $\omega_n$  (Natural Frequency) ซึ่งเป็นค่าคงที่ของระบบ โดย

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.6)$$

แม้ว่าในความเป็นจริง  $\omega_n$  จะเป็นความถี่เชิงมุมแต่เรานิยมเรียกสั้นๆ ว่าความถี่ธรรมชาติ สำหรับความถี่ของการสั่น จะมีค่าเป็น

$$f_n = 2\pi\omega_n \quad (2.7)$$

และคาบของการสั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{1}{f_n} \quad (2.8)$$

ตามที่กล่าวมาแล้วว่า  $f_n$  จะเป็นความถี่ของการเคลื่อนที่ส่วน  $\omega_n$  จะเป็นความถี่เชิงมุมของการเคลื่อนที่แต่ละครั้งเราจะเรียก  $\omega_n$  สั้นๆ ว่า ความถี่ธรรมชาติ เหมือนกับค่า  $f_n$  ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความถี่ธรรมชาติ จะหมายความว่า  $\omega_n$  และ  $f_n$  ซึ่งจะเป็นค่าใดมกจะไม่ใช้เรื่องสำคัญเพราะเรามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองอยู่แล้วคือ  $f_n = 2\pi\omega_n$  เพียงแต่ต้องกำหนดหน่วยให้ชัดเจนนั่นเอง

2. สำหรับการเคลื่อนที่ของระบบในแนวตั้งการยึดตัวของสปริงจากระยะก่อนที่จะนำมวลมาแขวนถึงจุดสมดุลของระบบ หรือระยะขูดตัวสถิต  $\delta_n$  ระยะนี้สามารถนำมาใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบได้ โดยจาก

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

3. ความเร็วและความเร่งของมวลเมื่อเวลาใดๆ สามารถหาได้จากสมการการขจัดคือจาก

$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi) \quad (2.10)$$

ทำให้ความเร็วจะมีค่าเท่ากับ

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = -\omega_n A \sin(\omega_n t - \phi) \quad (2.10a)$$

หรือจัดรูปใหม่จะได้

$$\dot{x}(t) = \omega_n A \cos(\omega_n t - \phi + \frac{\pi}{2}) \quad (2.10b)$$

และความเร่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_n^2 A \cos(\omega_n t - \phi) \quad (2.11a)$$

หรือจัดรูปใหม่จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ddot{x}(t) = \omega_n^2 A \cos(\omega_n t - \phi + \pi) \quad (2.11b)$$

จากสมการ (4.28) และ (4.29) จะพบว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์นี้ ความเร็วจะนำหน้าการขจัดอยู่  $\frac{\pi}{2}$  และความเร่งจะนำหน้าการขจัดอยู่  $\pi$

4. ถ้าการขจัดเริ่มต้นก่อนการสั่นเท่ากับศูนย์ หรือ  $x_0 = 0$  เราจะได้

$$x(t) = \frac{x_0}{\omega_n} \sin \omega_n t \quad (2.12)$$

และถ้าหากความเร็วเริ่มต้นของการสั่นเป็นศูนย์ หรือ  $\dot{x}_0 = 0$  เราจะได้

$$x(t) = x_0 \cos \omega_n t \quad (2.13)$$

ซึ่งในทั้งสองกรณีนี้ การสั่นจะอยู่ในเฟสเดียวกับไซน์หรือโคไซน์ตามลำดับ

### 2.2.6 ผลตอบสนองของระบบไม่มีความหน่วงภายใต้แรงกระทำฮาร์โมนิกส์

ในขั้นแรกนี้เราจะศึกษาถึงระบบที่มีลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับหนึ่งที่ไม่มีความหน่วง โดยเริ่มจากการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (2.14)$$

ในกรณีที่ระบบไม่มีความหน่วง,  $c = 0$  สมการการเคลื่อนที่ที่ลดรูปลงเป็น

$$m\ddot{x} + kx = F \quad (2.15)$$

จากนั้นเรากำหนดให้แรงกระทำเป็นแรงกระทำแบบฮาร์โมนิกส์ โดยให้

$$F = F_0 \cos \omega t \quad (2.16)$$

ซึ่งจะทำให้สมการการเคลื่อนที่ในกรณีนี้อยู่ในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การกำหนดลักษณะแรงกระทำเช่นนี้จะมีวิธีการแก้ปัญหาเหมือนกับที่เรากำหนดแรงให้อยู่ในรูปของ  $F = F_0 \cos \omega t$  ดังนั้นเราจะไม่กล่าวถึงแรงกรณี  $F = F_0 \cos \omega t$  อีกเพราะจะมีขั้นตอนที่เหมือนกันและผลที่ได้สามารถนำมาเทียบเคียงกันได้

สำหรับผลเฉลยของสมการ (2.17) นี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกคือผลเฉลยเอกพันธ์ ซึ่งเราได้กล่าวถึงมาแล้ว คือ

$$x_h = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t \quad (2.18)$$

เมื่อ ความถี่ธรรมชาติ  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  และค่า  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าคงที่ซึ่งต้องหาจากสภาพเริ่มต้นการสั่น ผลเฉลยของสมการส่วนที่สองคือส่วนปริพันธ์เฉพาะ จะมีวิธีการหาโดยพิจารณาจากฟังก์ชันของแรง และเนื่องจากแรงมีลักษณะเป็น  $F = F_0 \cos \omega t$  ดังนั้นเราจะมองหาผลเฉลยในลักษณะทำนองเดียวกัน นั่นคือมองหาคำตอบในรูป

$$x_p = X \cos \omega t \quad (2.19)$$

เมื่อ  $X$  เป็นค่าคงที่ จากนั้นแทนค่านี้ลงในสมการการเคลื่อนที่ (2.17) เราจะได้

$$-mX\omega^2 \cos \omega t + kX \cos \omega t = F_0 \cos \omega t \quad (2.20)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ของเทอม  $\cos \omega t$  จะได้

$$-mX\omega^2 + kX = F_0 \quad (2.21)$$

หรือ

$$X = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2.22)$$

ดังนั้นเราจะได้ผลเฉลยของส่วนนี้เป็น

$$x_p = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2.23)$$

ซึ่งเป็นผลเฉลยของสมการในส่วนที่สอง และเนื่องจากสมการการเคลื่อนที่เป็นสมการเชิงเส้นทำให้ผลเฉลยอย่างสมบูรณ์ของสมการการเคลื่อนที่ (2.17) จะเป็นผลรวมของผลเฉลยทั้งสองส่วน นั่นคือ

$$x = x_h = x_p \quad (2.24)$$

ซึ่งทำให้ผลการตอบสนองของระบบภายใต้การกระทำของแรงนี้อยู่ในรูป

$$x = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2.25)$$

เพื่อที่จะหาค่าที่แน่นอนของผลตอบสนองเฉพาะการสั่นแต่ละแบบ เราต้องกำหนดสภาพเริ่มต้นการสั่น ตัวอย่างเช่นหากเรากำหนดสภาพเริ่มต้นการสั่นให้การขจัดเริ่มต้นเป็น  $x(0) = x_0$  และให้ความเร็วเริ่มต้นเป็น  $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$  จะทำให้เราได้ค่าคงที่ทั้งสองตามสมการ (2.25) เป็น

$$C_1 = x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2.26)$$

$$C_2 = \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \quad (2.27)$$

ดังนั้นเราจะได้ผลตอบสนองของสมการในรูป

$$x = \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2}\right) \cos \omega_n t + \frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \sin \omega_n t + \frac{F_0}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (2.28)$$

จากที่เราได้ศึกษาเรื่องการสั่นอิสระของระบบที่ไม่มีความหน่วงมาแล้วในบทที่ผ่านมา เราพบว่าเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ เพราะพลังงานของระบบจะมีค่าคงที่ ดังนั้นการพิจารณาการตอบสนองของระบบที่ไม่มีความหน่วงเราจำเป็นต้องพิจารณาทั้งผลการตอบสนองทั้งสองส่วนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากผลเฉลยเฉลยเอกพันธ์และผลเฉลยปริพันธ์เฉพาะ เนื่องจากการตอบสนองทั้งสองส่วนนี้เป็นการตอบสนองอย่างคงตัวทั้งสิ้น

อย่างไรก็ตามในส่วนแรกนี้เราจะลองพิจารณากระดุมมวล  $m$  เกิดการเคลื่อนที่ห่างออกจากสมดุลเนื่องจากการกระทำของแรงภายนอก  $F_0 \cos \omega t$  นี้โดยการขจัดหรือการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงกระทำสูงสุดนี้จะสามารถหาได้จากค่าสูงสุดของสมการ (2.23) นั่นคือ

$$X = \frac{F_0}{k - m\omega^2} \quad (2.29)$$

หรือเราสามารถจัดได้ในรูป

$$X = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 \left( \frac{m}{k} \right)} \quad (2.30)$$

นั่นคือ

$$\frac{X}{\left( \frac{F_0}{k} \right)} = \frac{1}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.31)$$

เพื่อสามารถที่จะเปรียบเทียบได้ว่าการตอบสนองของของระบบภายใต้แรงกระทำ 2 แบบคือแรงกระทำแบบพลวัตและแรงกระทำแบบสถิตที่มีขนาดเท่ากันจะให้ผลการตอบสนองแตกต่างกันเพียงใด เรานิยาม การขจัดสถิต (Static Displacement หรือ Static Deflection) ว่าคือการขจัดของระบบถ้าหากว่าแรงกระทำเป็นแรงสถิตที่มีขนาดเท่ากับแรงพลวัตที่กระทำอยู่กับระบบ นั่นคือ

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k} \quad (2.32)$$

ดังนั้น

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยค่า  $\frac{X}{\delta_{st}}$  นี้เราเรียกว่า อัตราส่วนการขยาย หรืออัตราส่วนช่วงกว้าง (Amplification Ratio หรือ Amplitude Ratio)

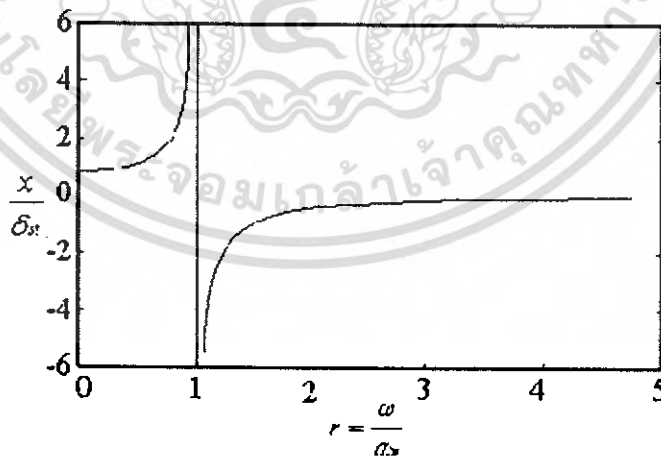
จากนั้นเรานิยาม อัตราส่วนความถี่ (Frequency Ratio,  $r$ ) ซึ่งคือ อัตราส่วนของความถี่ของแรงกระทำต่อด้วยความถี่ธรรมชาติของระบบ

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.34)$$

ดังนั้นสมการ (2.33) จะสามารถเขียนได้ในรูป

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{1-r^2} \quad (2.35)$$

กราฟแสดงผลการตอบสนองของระบบตามสมการ (2.35) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปไม่มีมิติ ระหว่าง  $\frac{1}{1-r^2}$  และ  $\frac{X}{\delta_{st}}$  จะเป็นไปตามรูปที่ 2.5 ซึ่งตามรูปที่ 2.5 นี้เราสามารถแบ่งผลตอบสนองได้ 4 ลักษณะตามค่าที่ช่วงต่างๆของอัตราส่วนความถี่



รูปที่ 2.4 การตอบสนองภายใต้แรงกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองใน 4 ลักษณะนั้นมีดังต่อไปนี้คือ

ในกรณีที่  $r=0$  ซึ่งหมายถึง  $\omega=0$  ก็คือแรงกระทำนี้เป็นแรงสถิต ดังนั้นระยะการขจัดของระบบนี้จะเท่ากับการขจัดสถิต และจากสมการ (2.35) เราจะได้

$$\frac{X}{\delta_r} = 1 \quad , 0 < r < 1$$

ในกรณีที่ จากรูปที่ 2.4 เราจะพบว่า หมายความว่าผลตอบสนองจะมีเฟสเดียวกันกับแรงที่กระทำจากภายนอก นั่นคือเมื่อแรงกระทำได้กระทำต่อระบบในทิศทางบวก (หรือลบ) มวลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางบวก (หรือลบ) ด้วยเช่นกัน

ในกรณีที่  $r > 1$  จากรูปที่ 2.4 เราจะพบว่า  $\frac{X}{\delta_r} < 0$  หมายความว่าผลตอบสนองของระบบจะแตกต่างเฟสกับแรงที่มากระทำอยู่  $180^\circ$  นั่นคือถ้าแรงกระทำในทิศทางบวก (หรือลบ) การเคลื่อนที่ของมวลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางลบ (หรือบวก) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่กระทำในขณะนั้นนั่นเอง

นอกจากนั้นเมื่ออัตราส่วนความถี่มีค่าสูงมากๆ คือ  $r \rightarrow \infty$  หรือหมายถึงความถี่ของแรงกระทำจะสูงกว่าความถี่ธรรมชาติของระบบมากๆ ( $\omega \gg \omega_n$ ) จากรูปที่ 2.4 เราจะพบว่าผลตอบสนองของระบบจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ( $X \rightarrow 0$ ) นั่นคือถ้าความถี่ของแรงกระทำมีค่าสูงกว่าค่าความถี่ธรรมชาติของระบบมากๆ ระบบจะเกิดการสั่นน้อยมากนั่นเอง

ในกรณีที่  $r=1$  หรือความถี่ของแรงที่กระทำพ้องเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบพอดี จากสมการ (2.35) หรือจากรูปที่ 2.4 เราจะพบว่าค่าอัตราส่วนการขยายจะมีค่าเข้าสู่อันต์,  $\frac{X}{\delta_r} \rightarrow 0$  ซึ่งก็จะหมายความว่าผลการตอบสนองของระบบมีค่าสูงมาก หรือระบบจะเกิดการสั่นอย่างมากนั่นเอง การสั่นในลักษณะเช่นนี้เราเรียก การสั่นพ้อง (Resonance)

แม้ว่าจะทราบว่าขนาดของการสั่นจะสูงมากเมื่อการสั่นเป็นการสั่นพ้อง แต่สมการของผลตอบสนองที่เราได้ตามสมการ (2.28) ไม่สามารถนำมาใช้ในกรณีนี้ได้ เนื่องจากในกรณีนี้ผลเฉลยเอกพันธ์จะเท่ากับปริพันธ์เฉพาะ ซึ่งตามหลักคณิตศาสตร์แล้วไม่สามารถมองหาผลเฉลยปริพันธ์เฉพาะที่มีรูปแบบเดียวกับผลเฉลยเอกพันธ์ได้ ดังนั้นในกรณีนี้จำเป็นต้องมองหาผลเฉลยปริพันธ์เฉพาะใหม่แทนที่จะเป็นตามสมการ (2.23) ที่เราใช้ในกรณีทั่วไป ซึ่งรายละเอียดการหาผลเฉลยมีดังต่อไปนี้

สำหรับผลเฉลยปริพันธ์เฉพาะของสมการการเคลื่อนที่เมื่อ  $\omega = \omega_n$  จะต้องมองหาจากสมการการเคลื่อนที่ ในเมื่อเราได้ผลเฉลยเอกพันธ์เป็น

$$x_h = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t \quad (2.36)$$

ใน  $\omega = \omega_n$  เราไม่สามารถจะมองหาผลเฉลยในส่วนของปริพันธ์เฉพาะในรูป ตามสมการ (2.23) ได้ เพราะจะเป็นการหาผลเฉลยซ้ำกับผลเฉลยเอกพันธ์ ดังนั้นเราต้องมองหาผลเฉลยของ  $x_p$  ในรูป  $x_p = X \cos \omega t$

$$x_p = X_1 t \cos \omega t + X_2 t \sin \omega t \quad (2.37)$$

เมื่อ  $x = X_1 t \cos \omega t + X_2 t \sin \omega t$  จึงสามารถหาความเร็วได้เป็น

$$\dot{x} = -\omega X_1 \sin \omega t + X_1 \cos \omega t + \omega X_2 t \cos \omega t + X_2 \sin \omega t \quad (2.38)$$

และความเร่งจะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -\omega^2 X_1 t \cos \omega t - \omega X_1 \sin \omega t - \omega^2 X_2 t \sin \omega t + 2\omega X_2 \cos \omega t \\ &= -\omega^2 X_1 t \cos \omega t - 2\omega X_1 \sin \omega t - \omega^2 X_2 t \sin \omega t + 2\omega X_2 \cos \omega t \end{aligned}$$

หรือ

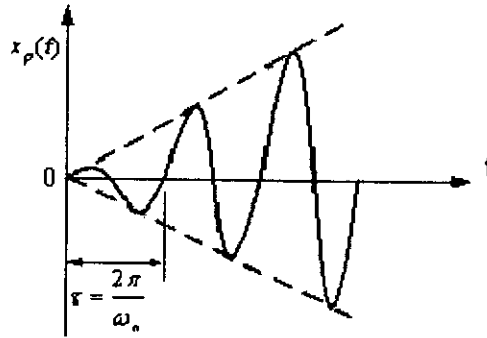
$$\ddot{x} = (2\omega X_2 - \omega^2 X_1 t) \cos \omega t - (2\omega X_1 + \omega^2 t X_2) \sin \omega t \quad (2.39)$$

ผลเฉลยอย่างสมบูรณ์ของการสั่นที่การสั่นพ้องเป็น

$$x = x_0 \cos \omega_n t + \frac{x_0}{\omega_n} \sin \omega_n t + \frac{\delta_{st} \omega_n t}{2} \sin \omega_n t \quad (2.40)$$

สมการ (2.40) นี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของผลตอบสนองของระบบเมื่อเวลาผ่านไป โดยสองเทอมแรกของสมการนี้จะทำให้เกิดการสั่นอย่างคงที่ แต่เทอมสุดท้ายจะเป็นผลคูณของเวลา ซึ่งทำให้ช่วงกว้างการสั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น ค่าของเทอมสุดท้ายในสมการ (2.40) ได้แสดงเป็นกราฟในรูปที่ 2.5 เราสามารถสังเกตได้ว่าการเพิ่มขึ้นของขนาดการสั่นจะเป็นเชิงเส้นกับเวลาที่ผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเพิ่มขึ้นของช่วงกว้างการสั่น เมื่อเกิดการสั่นพ้อง

ดังนั้นสามารถสรุปการสั่นของระบบหนึ่งถ้าดัชนีความเป็นอิสระที่ไม่มีความหน่วง ภายใต้แรงกระทำ  $F_0 \cos \omega t$  ได้ว่าโดยทั่วไปจะมีผลตอบสนองตามสมการ (2.28) ยกเว้นในกรณีของการสั่นพ้อง จะต้องใช้ผลเฉลยตามสมการ (2.40)

นอกเหนือจากการเขียนผลเฉลยในรูปของสมการ (2.28) แล้ว เรายังสามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปอื่นได้คือ

$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi) + \frac{\delta_{st}}{1-r^2} \cos \omega t$$

เมื่อ

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} < 1$$

(2.41)

และ

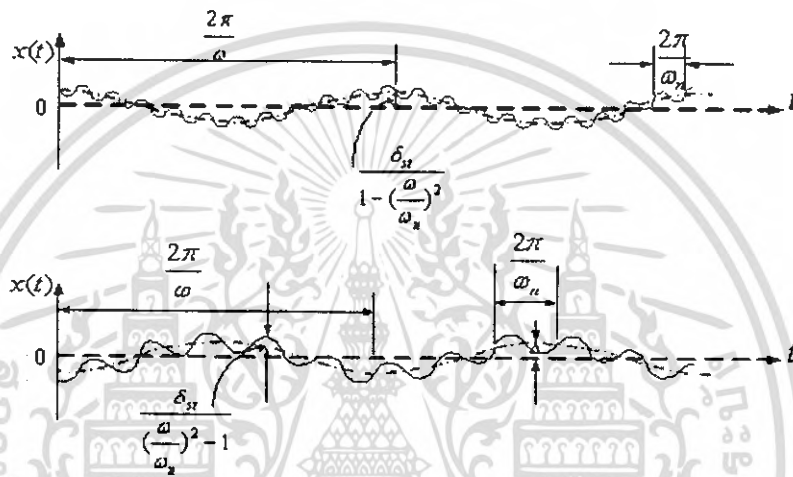
$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi) - \frac{\delta_{st}}{1-r^2} \cos \omega t$$

เมื่อ

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} > 1$$

(2.42)

เมื่อ  $A$  และ  $f$  เป็นค่าคงที่และสามารถคำนวณหา ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนผลเฉลยของการเคลื่อนที่นี้ได้ในรูปของผลรวมของเส้น โคไซน์ที่มีความถี่ต่างกันสองเส้น สำหรับสมการ (2.41) จะใช้ในกรณีที่มีความถี่ของแรงกระทำน้อยกว่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ส่วนสมการ (2.42) จะใช้ในกรณีที่มีความถี่ธรรมชาติมีค่าน้อยกว่าความถี่ของแรงกระทำ สำหรับการตอบสนองในทั้งสองกรณีนี้ได้แสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งรูปที่ 2.6(a) ได้แสดงกรณีที่ และรูปที่ 2.6(b) ได้แสดงดังรูป



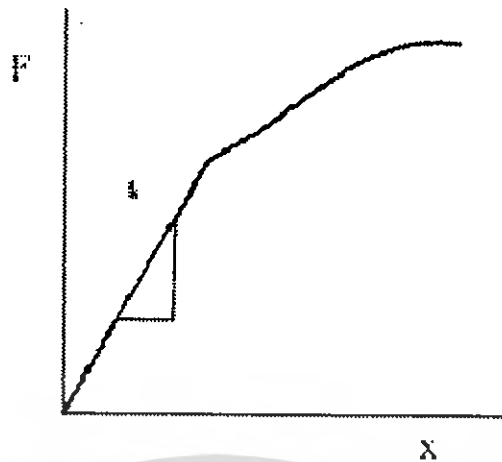
รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองของระบบตามสมการ (2.41) และ (2.42)

### 2.3 สปริง (Spring)

ในการแก้ปัญหาของระบบที่เกิดการสั่นตามที่ได้อธิบายถึงในหัวข้อที่ผ่านมา นั้น ขั้นแรกเราจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบขึ้นมาก่อน และโดยทั่วไปแล้วระบบจำลองการสั่นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ สปริง - มวล - ตัวหน่วง ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการสะสมพลังงานศักย์ของการเคลื่อนที่ให้ดียิ่งขึ้น ในหัวข้อนี้เราจะเป็นการกล่าวถึงลักษณะเฉพาะของสปริง เพื่อให้เกิดความเข้าใจอุปกรณ์นี้ให้มากยิ่งขึ้น

ในการสร้างแบบจำลอง เรามักจะใช้สปริงแทนอุปกรณ์ใดๆในระบบที่มีจุดมุ่งหมายที่ใช้เพื่อการสะสมพลังงานศักย์ของระบบ และเนื่องจากในเอกสารนี้เราจะเน้นถึงการสั่นของระบบเชิงเส้น ดังนั้นในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงสปริงเชิงเส้นเป็นการเฉพาะ สำหรับวัสดุที่มีการยืดหยุ่น โดยทั่วไปจากการทดลองเราพบว่าวัตถุที่มีสภาพยืดหยุ่นได้เช่นสปริงเมื่อคอกอยู่ภายใต้แรงกระทำไม่ว่าจะเป็นแรงดึงหรือแรงกด แรงที่กระทำต่อสปริงนั้นจะเป็นสัดส่วนกับระยะการยืดตัวหรือยุบตัวของสปริง ตามรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การยืดตัวของสปริง

ซึ่งเราจะพบว่าสปริงในช่วงการยืดหยุ่นทั่วไปนั้นขนาดของแรงที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามระยะการยืดตัวของสปริง ซึ่งเราสามารถกล่าวได้ว่าแรงกระทำเป็นฟังก์ชันของระยะการยืดตัวของสปริง หรือสามารถแทนด้วยสมการคณิตศาสตร์เป็น

$$x = x_0, F = F(x) \quad (2.43)$$

และถ้าหากว่าเราวัดระยะ  $x$  จากสภาวะสมดุลของสปริงที่ และกำหนดให้เมื่อไม่มี แรงมากระทำกับสปริงระยะยืดตัว  $x = x_0 = 0$  ของสปริงจะเท่ากับศูนย์ หรือกำหนดให้สปริงเป็นชิ้นส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งมีโซ่อยู่ในเครื่องจักรกลทั่วไป

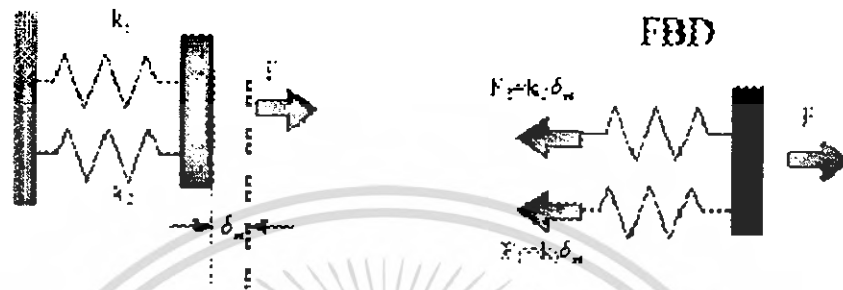
### 2.3.1 ค่าเทียบเท่าค่าคงที่สปริง

สำหรับการหาค่าคงที่ของสปริง  $k$  ในทางปฏิบัติ เรานิยามที่ทำการวัดโดยการแขวนน้ำหนักที่ทราบค่า  $W$  กับสปริงที่ต้องทดสอบการหาค่า  $k$  แล้ววัดระยะยืดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำ ระยะยืดตัวกับแรงคงที่นิยามเรียก ระยะยืดตัวสถิต  $\delta_{st}$  (Static deflection) ดังนั้นค่าคงที่สปริงจะหาได้จาก

$$k = \frac{W}{\delta_{st}} \quad (2.44)$$

### 2.3.2 การต่อสปริงอย่างขนาน

จะมีการต่อของสปริงเป็นไปตามรูปที่ 2.1 ซึ่งการต่อของสปริงในลักษณะนี้เมื่อมีแรง  $F$  มากระทำจะทำให้สปริงทั้งสองจะเกิดการยืดตัวในปริมาณที่เท่ากัน แต่แรงที่กระทำในสปริงทั้งสองอาจไม่เท่ากันก็ได้



รูปที่ 2.8 การต่อสปริงแบบขนาน

สปริงทั้งสองมีค่าคงที่สปริง  $k_1$  และ  $k_2$  ตามลำดับ เมื่อได้รับแรงกระทำ  $F$  ดึงให้เกิดการยืดตัวเป็นระยะ  $\delta_{st}$  เท่าๆ กัน จากแผนภาพจากแผนภาพวัตถุอิสระในรูปที่ 2.8 จะได้

$$F = k_1 \delta_{st} + k_2 \delta_{st} \quad (2.45)$$

หรือ

$$F = (k_1 + k_2) \delta_{st} \quad (2.46)$$

ซึ่งถ้าเรารวมสปริงทั้งสองเข้าเป็นระบบเดียวกัน เราจะได้ว่าค่าเทียบเท่าค่าคงที่ที่สปริง  $k_{eq}$  ได้เป็น

$$F = k_{eq} \delta_{st} \quad (2.47)$$

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ จะได้ว่าค่าเทียบเท่าค่าคงที่สปริงของระบบนี้มีค่าเป็น

$$k_{eq} = k_1 + k_2 \quad (2.48)$$

ทำนองเดียวกันเราสามารถจะพิสูจน์เพื่อหาค่า  $k_{eq}$  ของระบบสปริงที่ต่อกัน  $n$  ตัวอย่าง

ขนานจะมีค่าเทียบเท่าค่าคงที่สปริงเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \quad (2.49)$$

ซึ่งเราจะพบว่าการต่อสปริงเข้าด้วยกันเช่นนี้ ค่าเทียบเท่าค่าคงที่สปริงของระบบมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าคงที่ของสปริงแต่ละตัวในระบบ ซึ่งทำให้ระบบมีค่าคงที่สปริงสูงขึ้น หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือระบบสปริงจะมีความแข็งแรงมากขึ้นนั่นเอง

### 2.3.3 คุณสมบัติทางกลของลวดสปริง

ค่าความต้านแรงของวัสดุที่ใช้ทำลวดสปริงจะเปลี่ยนไปตามขนาดของลวดสปริง ดังนั้นจึงอาจเขียนในรูปสมการที่ใช้หาค่าความต้านแรงของวัสดุลวดสปริงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ ได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_u = \frac{A}{d^x} \quad (2.50)$$

$$\tau = \frac{B}{d^y} \quad (2.51)$$

โดยที่  $\sigma_u$  = ความต้านแรงดึงค่าสุด =  $\frac{\tau_y}{0.6}$   
 $\tau_n$  = ความต้านแรงเฉือนทนทาน  
 $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดสปริงเป็นมิลลิเมตร (mm)  
 $A, B, x, y$  = ค่าคงที่

ค่าคงที่โดยประมาณของสมการที่ (2.50) และ (2.51) แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ค่าความต้านแรงหน่วยเป็น  $\frac{N}{mm^2}$

สำหรับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและ โมดูลัสเฉือนของวัสดุ ให้ใช้ค่าประมาณดังนี้ (ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิม)

$$E = 200 \frac{kN}{mm^2} \quad , \quad G = 80 \frac{kN}{mm^2} \quad (2.52)$$

สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม

$$E = 180 \frac{kN}{mm^2} \quad , \quad G = 70 \frac{kN}{mm^2} \quad (2.53)$$

ค่าต่างๆ ที่ได้แสดงในภาคผนวก ข. เป็นเพียงแต่ค่าโดยประมาณเพื่อใช้ประกอบในการคำนวณเกี่ยวกับสปริงชนิด ในการทำงานจริงผู้ออกแบบจะต้องสอบถามค่าที่แน่นอนจากผู้ผลิตโดยตรง

สำหรับค่าความต้านแรงเฉือนครากจะใช้ค่าประมาณ

$$\tau_y = 0.60 \sigma_u \quad \text{สำหรับวัสดุทั่วไป}$$

$$\tau_y = 0.47 \sigma_u \quad \text{สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิม}$$

2.3.4 ความต้านในสปริงชนิดรับแรงกด

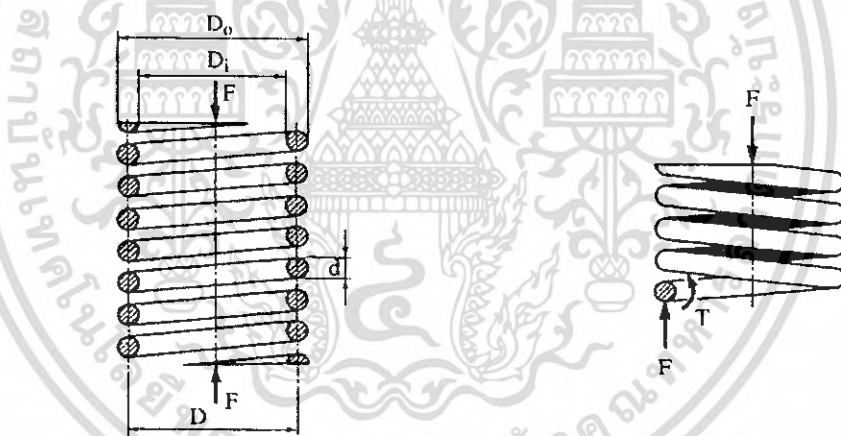
พิจารณาสปริงชนิดรับแรงกด F ในแนวแกนของสปริงดังรูปที่ 2.5 และให้

$D_0$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของขดสปริง

$D_i$  = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของขดสปริง

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

$d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสปริง



(ก) แรงกดกระทำในแนวแกนสปริง

(ข) แผนภาพวัตถุอิสระแสดงให้เห็นว่าลวดอยู่ภายใต้แรงเฉือนและโมเมนต์

รูปที่ 2.9 สปริงชนิด

ให้ตัดส่วนหนึ่งของสปริงออกมาพิจารณาจะเห็นได้ว่า ลวดสปริงอยู่ภายใต้แรงภายใน F และเมนต์บิด T ดังรูปที่ 2.9 ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในลวดสปริงคือ

$$\tau = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \tag{2.54}$$

แต่ 
$$T = \frac{FD}{2} \quad (2.55)$$

และ 
$$\frac{J}{r} = \frac{\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)}{\left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{\pi d^3}{16} \quad (2.56)$$

และ 
$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.57)$$

ดังนั้นจึงเขียนสมการที่ (2.54) ใหม่ได้เป็น

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2.58)$$

ถ้าให้  $C=D/d$  ซึ่งเรียกว่า “ดัชนีสปริง” (Spring index) สมการที่ (2.58) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2.59)$$

โดยที่ 
$$K_s = 1 + \frac{0.5}{C}$$

ค่า  $K_s$  นี้เรียกว่า “ตัวประกอบความเค้นเฉือน” (Shear stress correction factor) ซึ่งเป็นค่าทำให้ความเค้นเฉือนในสปริงเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือนตรง  $F/A$

ในการคำนวณที่ผ่านมาได้ใช้สูตรความเค้นเฉือนเนื่องจากโมเมนต์บิด  $T/r$  ซึ่งเป็นสูตรสำหรับการบิดชิ้นส่วนตรง เช่น เพลา แต่ในสปริง เส้นลวดบิดวนไปตามความโค้งของสปริงทำให้เกิดความเค้นหนาแน่นสูงสุดบริเวณด้านในของสปริงขด จึงได้มีการเสนอให้มีการแก้ไขสมการ (2.59) โดยเพิ่มตัวประกอบความโค้ง (Curvature correction factor)  $K_c$  เข้าไปในสมการ ค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K = K_c K_s \quad (2.60)$$

$$= \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า  $K$  นี้เรียกว่า “ตัวประกอบของวาล์ว” (Wahl's factor) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยการคำนวณจากสมการที่ (2.61) หรืออ่านค่าได้จาก ภาคผนวกค. ดังนั้น ความเค้นเฉือนในสมการที่ (2.61) จึงเป็น

$$\begin{aligned}\tau &= K \frac{8FD}{\pi d^3} \\ &= K \frac{8FC}{\pi d^2}\end{aligned}\quad (2.62)$$

### 2.3.5 ความแข็งตึงของสปริง

ความแข็งตึงของสปริง (Spring stiffness) หมายถึงปริมาณของแรงที่ใช้ในการทำให้สปริงยืดหรือหดหนึ่งหน่วยความยาวในแนวแกนของสปริง ถ้าให้  $\delta$  เป็นระยะขยุบตัวของสปริงภายใต้แรงกด  $F$  ค่าความแข็งตึงของสปริง คือ

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{Gd}{8C^3n} \quad (2.63)$$

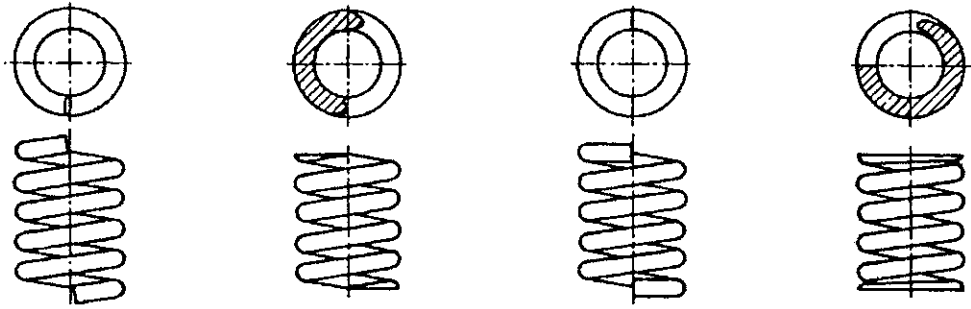
โดยที่

$$\delta = \frac{8FD^3n}{Gd^4} = \frac{8FC^3n}{Gd} \quad (2.64)$$

และ  $n$  = จำนวนขด

### 2.3.6 จำนวนขดทำการ

สปริงรับแรงกดที่ใช้งานกันอยู่ทั่ว ๆ ไปจะมีปลายทั้งสองในลักษณะดังรูปที่ 2.10 โดยปกติแล้ว ต้องการให้ปลายสปริงสัมผัสกับสิ่งที่สปริงกดอยู่ให้มากที่สุด ในบางกรณีสปริงตั้งอยู่ในช่องซึ่งมีพื้นที่กคที่เรียบแบน ดังนั้นจึงนิยมตัดปลายสปริงชนิดนี้ให้เรียบเป็นฐานตั้ง เนื่องจากขดส่วนที่ตัดปลายไปจะสูญเสียผลในการเป็นสปริง ไปมาก ฉะนั้นการคำนวณจึงให้หักเอาจำนวนขดเหล่านี้ออก จำนวนขดที่เหลืออยู่ทั้งหมดเรียกว่า “ขดทำการ” ซึ่งก็เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ถ้าให้  $n$  เป็นจำนวนขดทั้งหมดของสปริงขด ก็จะคิดจำนวนขดทำการ ได้ดังนี้คือ



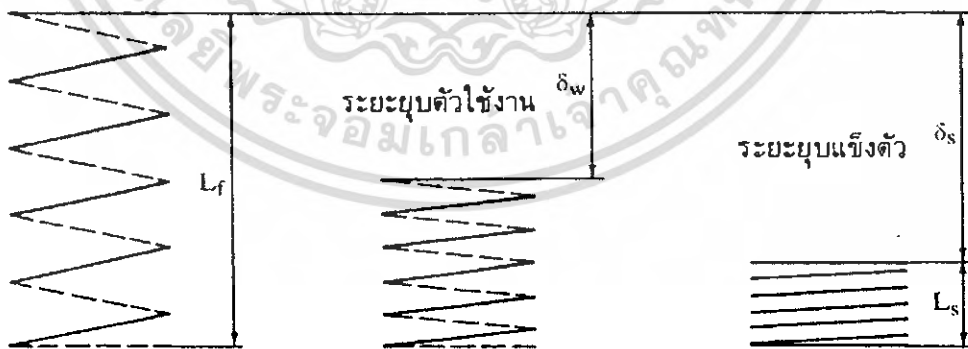
(ก) ปลายธรรมดา (ข) ปลายธรรมดาและเจียรระไน (ค) ปลายตรง (ง) ปลายตรงและเจียรระไน

รูปที่ 2.10 ปลายสปริงขจัดแรงกด

ปลายธรรมดา (Plain ends)	$n = n_t$	
ปลายธรรมดาและเจียรระไน (Ground ends)	$n = n_t - 1$	
ปลายตรง (Square ends)	$n = n_t - 1.5$	
ปลายตรงและเจียรระไน	$n = n_t - 2$	(2.65)

2.3.7 ระยะยวบตัวใช้งาน

ความยาวของสปริงขจัดในขณะที่ยังไม่มีแรงภายนอกมากกระทำ เรียกว่า “ความยาวอิสระ” ( $L_f$ ) ดังรูปที่ (2.11ก) เมื่อมีแรงภายนอกมากกดสปริงขจัดนี้ให้ทุกขดติดกันพอดีดังรูปที่ (2.11ค) ความยาวของสปริงขจัดขณะนี้ เรียกว่า “ความยาวแข็งตัว” (solid height :  $L_s$ ) แรงและความเค้นขณะนี้ เรียกว่า “แรงแข็งตัว” (solid force) และ “ความเค้นแข็งตัว” (solid stress) ตามลำดับ



(ก) ความยาวอิสระ (ข) ระยะยวบตัวใช้งาน (ค) ระยะยวบแข็งตัว

รูปที่ 2.11 ระยะยวบตัวของสปริงขจัด

สำหรับการออกแบบสปริงให้รับแรง  $F$  สูงสุดขณะใช้งาน โดยที่สปริงจะยุบตัวลงไป  $\delta_w$  ค่า  $\delta_w$  นี้จะเรียกว่า “ระยะยุบตัวใช้งาน” ดังรูปที่ (2.11ข) ถ้าให้ระยะยุบแข็งตัว (Solid deflection)  $\delta_s$  เป็นผลต่างระหว่างความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวจะได้ว่า

$$\delta_s = L_f - L_s \quad (2.66)$$

ก็จะทำให้สามารถเผื่อการยุบตัวของสปริงให้มีการยุบตัวมากกว่าระยะยุบตัวใช้งานได้อย่างมีหลักเกณฑ์พอสมควร โดยใช้ค่าความเผื่อการกดติด (Clash allowance:  $r_c$ ) ซึ่งมีนิยามว่า

$$r_c = \frac{\delta_s - \delta_w}{\delta_w} \quad (2.67)$$

ค่าความเผื่อการกดติดนี้เป็นอัตราส่วนที่แสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของระยะยุบตัว ที่อาจจะมีได้เกินกว่าระยะยุบตัวใช้งาน โดยทำหน้าที่ให้ความปลอดภัยแก่การใช้งานยิ่งหนักขึ้นไปอีก ค่า  $r_c$  นี้แนะนำให้ใช้ประมาณ 0.20 ซึ่งก็หมายความว่าสามารถใช้สปริงรับแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าแรงที่ใช้ออกแบบอีก 20% สปริงทุกชนิดจึงจะคิดกันหมด จึงเป็นการป้องกันมิให้ผิวหน้าของสปริงเสียหายเนื่องจากการสัมผัสและเสียดสีกันระหว่างขดได้ อีกประการหนึ่งถ้าสปริงยุบตัวจนถึงความยาวแข็งตัว สปริงก็จะหมดคุณสมบัติในการใช้งานรับแรงสั้น สะเทือนหรืออื่น ๆ ตามต้องการต่อไป

ค่าความยาวอิสระและความยาวแข็งตัวของสปริงขึ้นอยู่กับลักษณะของปลายสปริงชนิด ซึ่งอาจจะหาค่าโดยประมาณได้จาก ภาคผนวก ง.

### บทที่ 3

## การออกแบบ การคำนวณและอุปกรณ์การทดลอง



(ก) ภาพไอโซเมตริกของชุดทดลอง

(ข) ภาพด้านข้างของชุดทดลอง

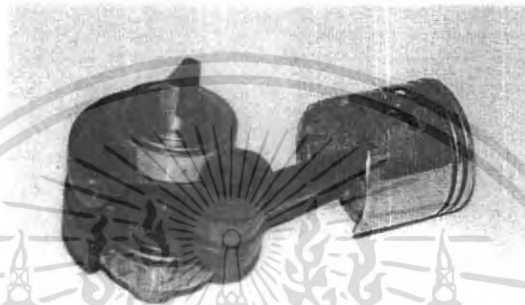
**รูปที่ 3.1** แบบชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 ชุดทดลอง

#### 3.1.1 ชุดลูกสูบ

จะประกอบไปด้วยชุดลูกสูบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร สูง 30 มิลลิเมตร เป็นชุดลูกสูบที่ได้มาจากเครื่องยนต์เล็กทางการเกษตร(เครื่องตัดหญ้ารุ่น G2D) ทำด้วยอลูมิเนียม ก้านขนาดความยาว 66.1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 14.6 และ 10.8 มิลลิเมตร เพลาข้อเหวี่ยงขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร รัศมี 21.91 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ชุดลูกสูบ

#### 3.1.2 เสือสูบ

วัสดุทำด้วยอะคริลิกขนาดกว้าง 170 มิลลิเมตร ยาว 225 มิลลิเมตร หนา 25 มิลลิเมตร จำนวน 4 ชิ้นส่วนนำมาประกอบกันเพื่อง่ายต่อการประกอบ การกลิ้งชิ้นงานและสามารถมองเห็น การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนภายใน



รูปที่ 3.3 เสือสูบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 มอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์กระแสตรง 24 V ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนไกลูกสูบภายในซึ่งถูกประกอบรวมเป็นชุดเดียวกับชุดทดลองมีขนาดเพลาขับ 6 มิลลิเมตรเชื่อมต่อกับปลั๊ก



รูปที่ 3.4 มอเตอร์

### 3.1.4 ล้อเลื่อน

จำนวน 2 ตัวเพื่อบังคับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเพียงแนวเดียว



รูปที่ 3.5 ล้อเลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 สปริง

ขนาดความยาว 25 มิลลิเมตร ค่าคงที่ตัวละ 5000 N/m ค่าคงที่รวมทั้งสี่ตัวเท่ากับ 20000 N/m โดยหาได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.6 สปริง

### 3.1.6 ฐานรองรับ

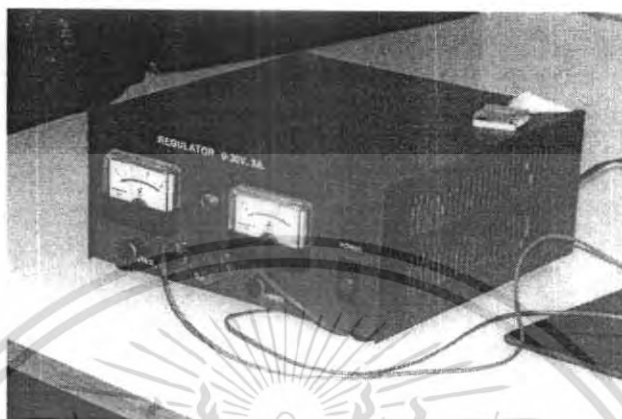
ทำด้วยเหล็กเพื่อรองรับและบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของชุดทดลอง

รูปที่ 3.7 ฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

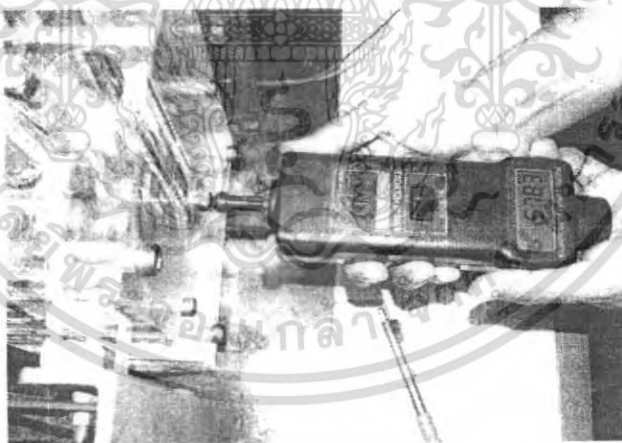
### 3.1.7 อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง

อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง (Regulator) ขนาดแรงเคลื่อน 0-30 V กระแสตรง 3 A สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ ตามแรงเคลื่อนที่ปรับแต่ง



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง

### 3.1.8 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Digicon DT-250TP)

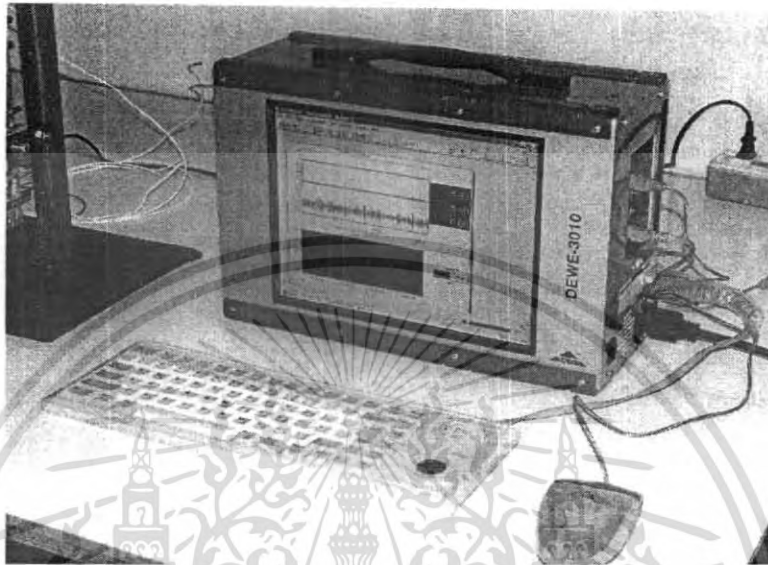


รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.9 อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลการสั่นสะเทือน

ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ DEWE-3010 โปรแกรม DASyLab เวอร์ชัน 5.6.1.10 ใช้งานระบบปฏิบัติการ Window 98 และ Piezoelectric acceleration sensors



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลการสั่นสะเทือน

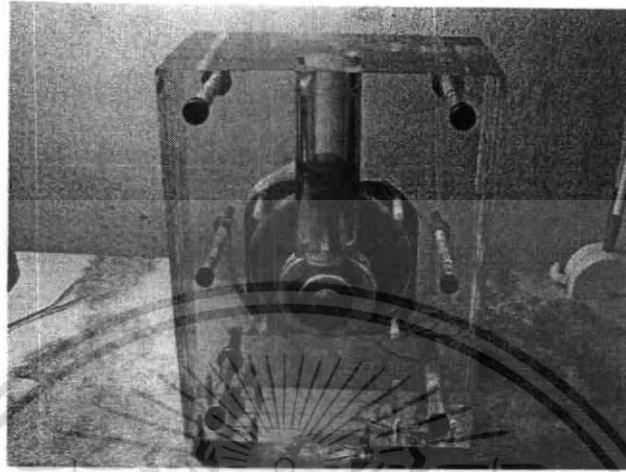


รูปที่ 3.11 เซ็นเซอร์ (Sensor)

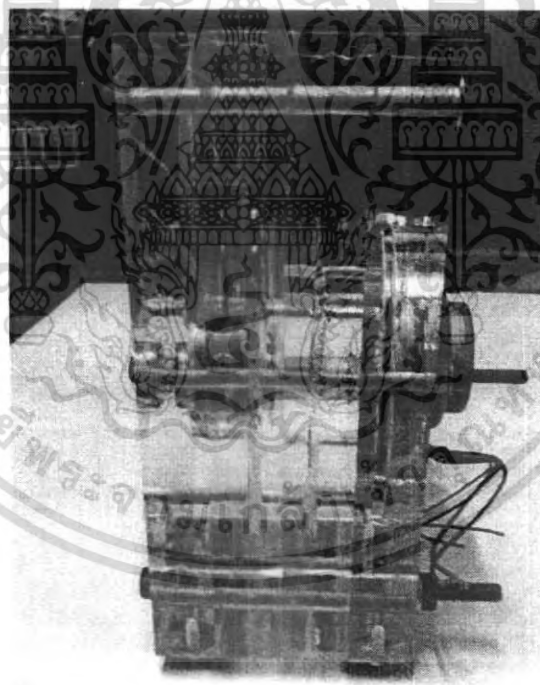
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การติดตั้งชุดทดลอง และอุปกรณ์

### 3.2.1 ประกอบชุดทดลอง



(ก)

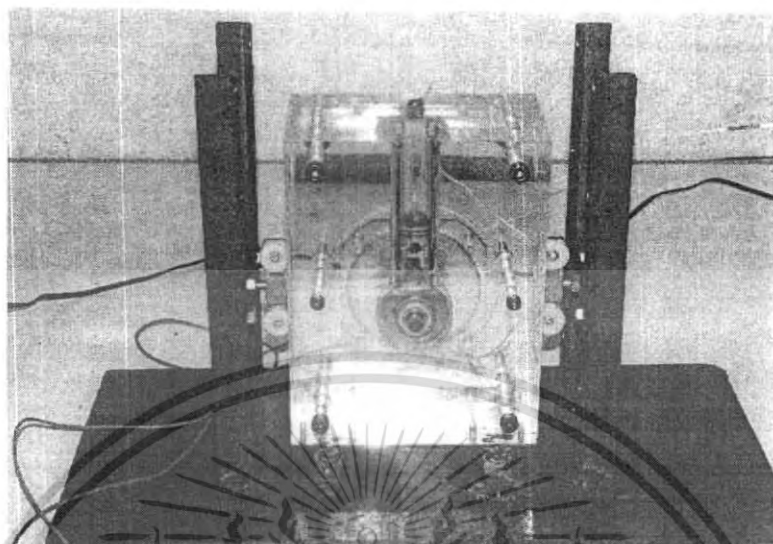


(ข)

รูปที่ 3.12 ชุดทดลอง

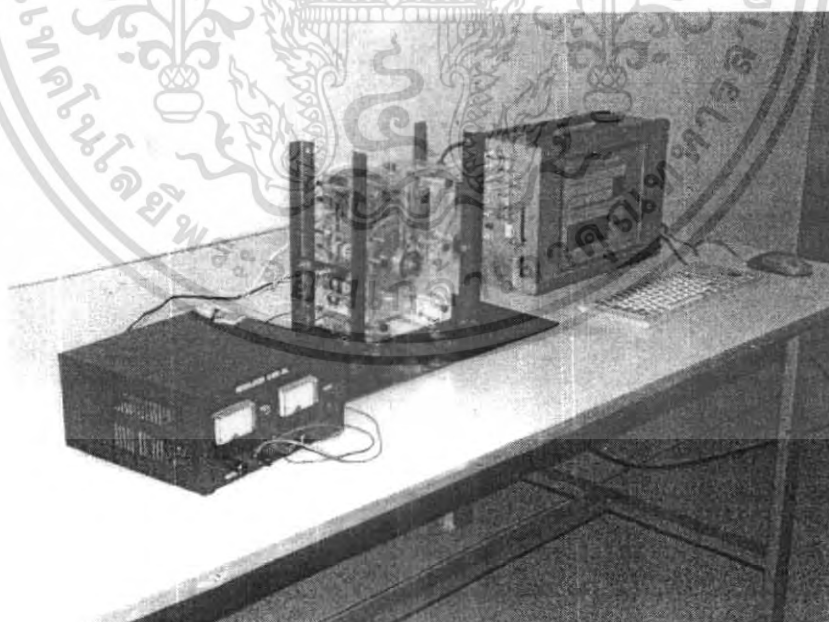
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ประกอบชุดทดลองเข้ากับฐานรองรับ



รูปที่ 3.13 การติดตั้งชุดทดลองเข้ากับฐาน

### 3.2.3 ต่ออุปกรณ์จ่ายไฟกระแสตรง (Regulator) และติดตั้งเซ็นเซอร์(Sensor)



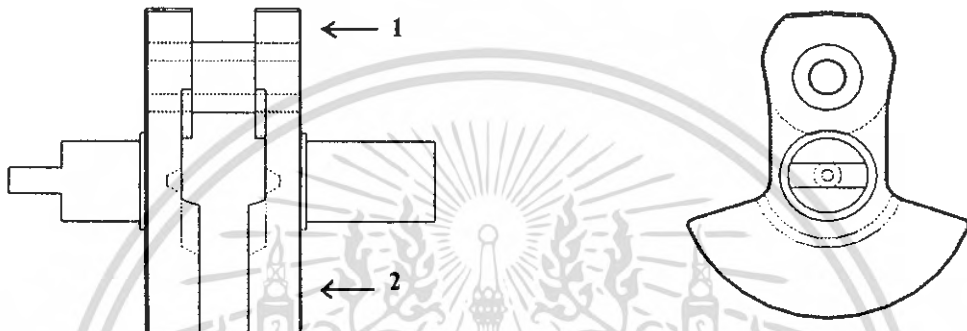
รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การคำนวณ

#### 3.3.1 มวลของลูกสูบ ก้านสูบ และเพลาค้อเหวี่ยง

1. มวลของลูกสูบรวมกับสลัก และเบริงซังได้เท่ากับ 0.02 กิโลกรัม
2. มวลของก้านสูบซังได้เท่ากับ 0.013 กิโลกรัม
3. มวลของเพลาค้อเหวี่ยงและแขนยึดก้านสูบ เนื่องจากไม่สามารถนำซังโดยตรงได้จึงจำเป็นต้องหามวลทั้งสองส่วนนี้ ตามรูป



รูปที่ 3.15 เพลาค้อเหวี่ยง

หามวลโดยนำมวลทั้งก้อนไปซัง ได้มวล แล้วนำมวลไปถ่วงน้ำหนักหาปริมาตรน้ำสันจากนั้นหาความหนาแน่นของเพลาค้อเหวี่ยงจากสมการ (3.1)

$$\rho = \frac{m}{v} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.1)$$

หาปริมาตรของเพลาค้อเหวี่ยงที่ จุด 1 และ จุด 2 ทั้งสองด้าน

ได้ปริมาตรที่จุด 1 เท่ากับ  $3.26 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

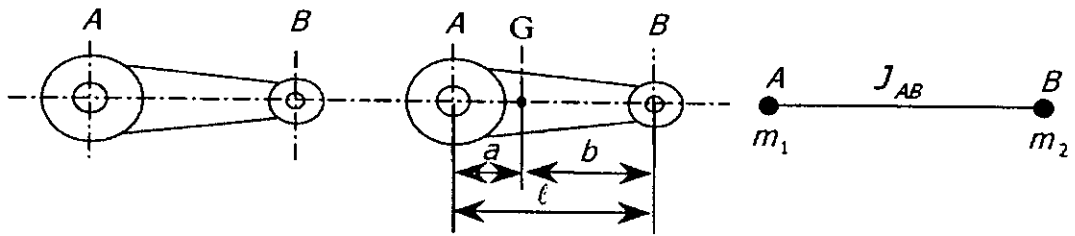
ได้ปริมาตรที่จุด 2 เท่ากับ  $13.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

จะได้

มวลที่จุด 1 เท่ากับ  $3.26 \times 10^{-6} \times 7800 = 0.025 \text{ kg}$

มวลที่จุด 2 เท่ากับ  $10.25 \times 10^{-6} \times 7800 = 0.08 \text{ kg}$

## 3.3.2 พิจารณาก้านสูบ



รูปที่ 3.16 แสดงการเปลี่ยนก้านสูบด้วยมวลเทียบเท่าเชิงจลน์กระทำที่สลักสูบ B และสลักแขนข้อเหวี่ยง A และโมเมนต์เฉื่อย  $J_{AB}$

จากมวลของก้านสูบที่ได้ ผลรวมของมวลระบบจะต้องเท่ากับมวลเดิมนั้นคือ

$$m_1 + m_2 = m_G \quad (3.2)$$

จุดศูนย์กลางถ่วงของระบบจะต้องอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงมวลเดิม หมายความว่าจุด c จะอยู่บนเส้นเชื่อมระหว่างมวลทั้งสอง เป็นผลให้ผลรวมของโมเมนต์รอบจุด c จะต้องมิต่ำเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$m_1 a - m_2 b = 0 \quad (3.3)$$

$$m_1 = m_G \frac{b}{l} \quad (3.4)$$

$$m_2 = m_G \frac{a}{l} \quad (3.5)$$

จะได้ว่า

จากมวลของก้านสูบเท่ากับ	$m_G = 0.013$	kg
ระยะ A-B เท่ากับ	$l = 49.2$	mm
ระยะ A-G เท่ากับ	$a = 23.4$	mm
ระยะ G-B เท่ากับ	$b = 25.8$	mm

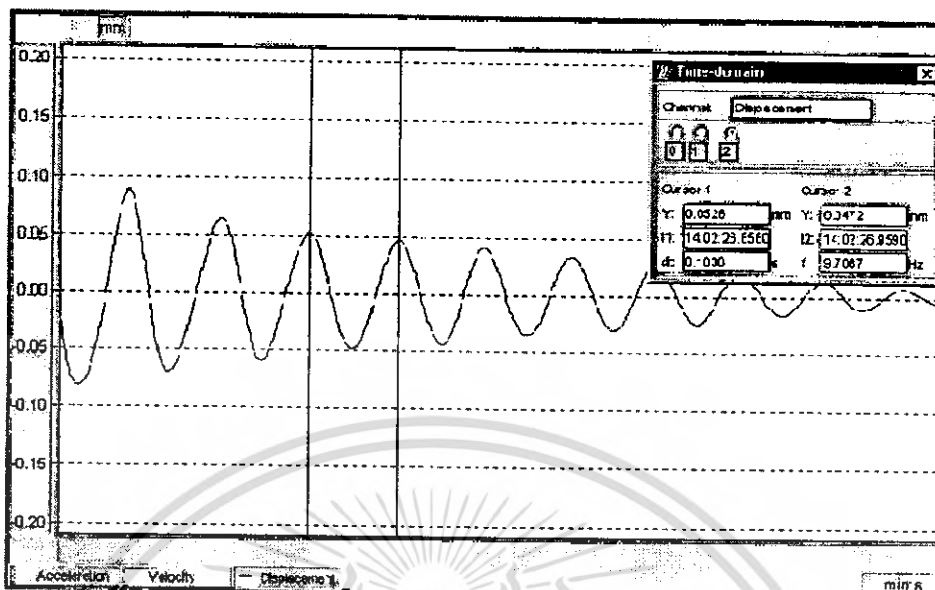
จากสมการ (3.4)

$$m_1 = 0.013 \times \frac{25.8}{49.2} = 0.0068 \text{ kg}$$

จากสมการ (3.5)

$$m_2 = 0.013 \times \frac{23.4}{49.2} = 0.0061 \text{ kg}$$

### 3.3.3 การคำนวณหาความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 3.17 ความหน่วงของสปริงที่ได้จากการทดลอง

วัดการขจัด ที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  ได้ 0.0528 และ 0.0472 mm ตามลำดับ

$$\delta = \ln \frac{x(t)}{x(t-T)} \quad (3.6)$$

$$= \ln \left( \frac{0.0528}{0.0472} \right)$$

$$\delta = 0.1121$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (3.7)$$

$$= 0.0178$$

$$\omega_n = \frac{\delta}{\zeta(T)} \quad (3.8)$$

$$= \frac{0.1121}{0.0178(0.1042)}$$

$$= 60.4 \quad \text{Hz}$$

$$= 573 \quad \text{rpm}$$

ซึ่งจากการที่เราหาความถี่ธรรมชาติได้แล้วเราจะได้ว่าความถี่ธรรมชาติจะต้องอยู่ในช่วง 573 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีการทดลอง

การทดลองประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ

1. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง
2. เขียนแบบจำลองทางกายภาพ
3. สร้างชุดทดลอง
4. วัดค่ามวลชุดลูกสูบ หาความถี่ธรรมชาติและค่าคงที่ของสปริง
5. ทำการทดลองเก็บผลการทดลองและเปรียบเทียบผล

#### 4.1 ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้นำโปรแกรม Matlab มาใช้ สมการที่นำมาเขียนโปรแกรมนำมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบหรือชุดทดลองที่สร้างขึ้น การเขียนโปรแกรมขึ้นมาก็เพื่อหาค่าความเร็ว ความเร่ง และการขจัด โดยค่าตัวแปรต่างๆที่จะนำมาพิจารณาในโปรแกรมคือ มวลลูกสูบ มวลก้านสูบ มวลเพลลาข้อเหวี่ยง มวลชุดลูกสูบ ค่าคงที่และค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ได้จากการทดลองในทางคณิตศาสตร์ ทางสถิติศาสตร์ และจากการทดลอง ทั้งหมดก็เพื่อให้ได้ค่าต่างๆออกมาเพื่อป้อนค่าในการคำนวณทางโปรแกรม

#### 4.2 เขียนแบบจำลอง

ใช้โปรแกรม Solid work ทำการออกแบบชิ้นส่วน (รูปที่ 3.1) กำหนดขนาดชิ้นส่วนเพื่อสร้างชุดทดลองในขั้นตอนต่อไป

#### 4.3 สร้างชุดทดลอง

หลังจากสร้างแบบจำลองจะทำการสร้างชุดทดลอง (รูปที่ 3.12) โดยการสร้างและต้องให้ขนาดตรงตามแบบที่จำลองไว้โดยมีรายละเอียดดังนี้

เพลลาข้อเหวี่ยงเรานำมาตัดแกนเพลลาเพื่อได้ขนาด โดยด้านหนึ่งต้องกำนึ่งถึงการใช้อุปกรณ์วัดความเร็วรอบจำเป็นต้องตัดให้เพลลาขึ้นออกมาเพื่อวัดรอบได้สะดวก

ชุดเสื่อสูบใช้วัสดุประเภทอะคริลิกเพื่อง่ายต่อการกลิ้งขึ้นรูปและเพื่อสามารถมองเห็นชิ้นส่วนเคลื่อนไหวภายใน

มอเตอร์แรงดัน 24 โวลต์ สามารถทำงานที่ความเร็วรอบสูงสุด 1600 รอบต่อนาที เพื่อทดลองที่ความเร็วรอบ 500 ,600 ,700 , 800 ,900และ1000 รอบต่อนาทีหรือสูงกว่า (ไม่เกิน 1600 รอบต่อนาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างฐานรองรับด้วยโลหะ เว้นระยะห่างในการติดตั้งสปริงรองรับและเชื่อมต่อเสา 4 เสาในแนวตั้ง เพื่อติดตั้งล้อเลื่อนเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ (ให้ชุดลูกสูบเคลื่อนที่เฉพาะในดิ่ง)

#### 4.4 วัดค่ามวลชุดทดลอง ความถี่ธรรมชาติและค่าคงที่ของสปริง

ทำการหามวลลูกสูบ โดยอุปกรณ์ชั่งมวลอิเล็กทรอนิกส์ได้ค่ามวล 0.021 kg

ทำการหามวลก้านสูบ โดยประยุกต์ใช้คณิตศาสตร์หาค่าปริมาตรก้านสูบ(รูปที่ 3.16) จากนั้นแทนสมการมวลเท่ากับความถ่วงจำเพาะคูณปริมาตรจะได้ค่ามวล 0.013 kg

ทำการหามวลตุ้มถ่วง เช่นเดียวกันกับการหามวลก้านสูบ และเพลาค้อเหวี่ยง(รูปที่ 3.15) โดยค่าความถ่วงจำเพาะเป็นค่าเดียวกับเพลาค้อเหวี่ยงเพราะทำจากวัสดุประเภทเดียวกันและสามารถหาค่ามวลได้ 0.08 kg

ทำการหามวลของชุดทดลอง(ชุดที่ถูกรองรับโดยสปริงตามรูปที่ 3.12) โดยการชั่งมวลหลังจากการประกอบเป็นชุดเดียวกันแล้ว ได้ค่ามวล 5.5 kg

ความถี่ธรรมชาติหาได้จากการทดลองได้ค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดลองเท่ากับ 60.4 Hz (หัวข้อ 3.3.3) และได้ค่าคงที่สปริงรวมทั้งสี่ตัวเท่ากับ 20000 N/m

#### 4.5 ทำการทดลองเก็บผลการทดลองและเปรียบเทียบผล

การทดลองและเก็บค่าเพื่อนำมาเปรียบเทียบผลการทดลองเราทำการทดลอง 2 วิธีคือ

##### 4.5.1 การทดลองทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม Matlab

นำค่ามวลลูกสูบ ก้านสูบ เพลาค้อเหวี่ยง ค่าคงที่สปริง ค่าความถี่ธรรมชาติ และความเร็วรอบมาพิจารณาเขียนสมการการกระจัด ความเร็ว ความเร่งเพื่อป้อนค่าให้กับ โปรแกรม Matlab จากนั้นเก็บค่าการประมวลผลที่แต่ละความเร็วรอบการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทางปฏิบัติ

##### 4.5.2 การทดลองทางปฏิบัติ

เขียนโปรแกรมในการวิเคราะห์สัญญาณให้กับเครื่องวัดสัญญาณและประมวลผลการสั่นสะเทือน (ภาคผนวก ข.) ขึ้นตอนถัดมาทำการปรับความเร็วรอบเพลาค้อเหวี่ยงที่แต่ละรอบการทดลอง จากนั้นเก็บค่าข้อมูลและกราฟการกระจัด ความเร็ว ความเร่งเพื่อนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองทางทฤษฎีโดยโปรแกรม Matlab และจากผลการทดลองโดยอุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลจากโปรแกรม DASYLab สามารถนำค่าความเร่งเฉลี่ย ความเร็วเฉลี่ย การขจัดเฉลี่ย และ ค่าความผิดพลาด (Error) ที่ได้มาเปรียบเทียบผลและหาค่ามวลถ่วงที่เหมาะสมได้ดังนี้

1. การวิจัยที่ต้องวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง (ทิศทางตั้งฉากกับฐาน) แต่เนื่องจากการสั่นสะเทือนจะเป็นฟังก์ชันคาบของมุมเพลลาข้อเหวี่ยง เป็นผลให้ขนาดการสั่นสะเทือนจะมีค่าทั้งบวกและลบ และมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา การวัดขนาดการสั่นสะเทือนจึงนิยมบอกในลักษณะของขนาดค่าโดยรวม (Overall value) ซึ่งจะเลือกใช้ค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square value) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการนำสัญญาณที่วัดได้ในโดเมนเวลาที่เกิดในช่วงเวลา  $[0, T]$  มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบ และถอดรากที่สอง สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

การขจัดรากเฉลี่ยกำลังสอง 
$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (5.1ก)$$

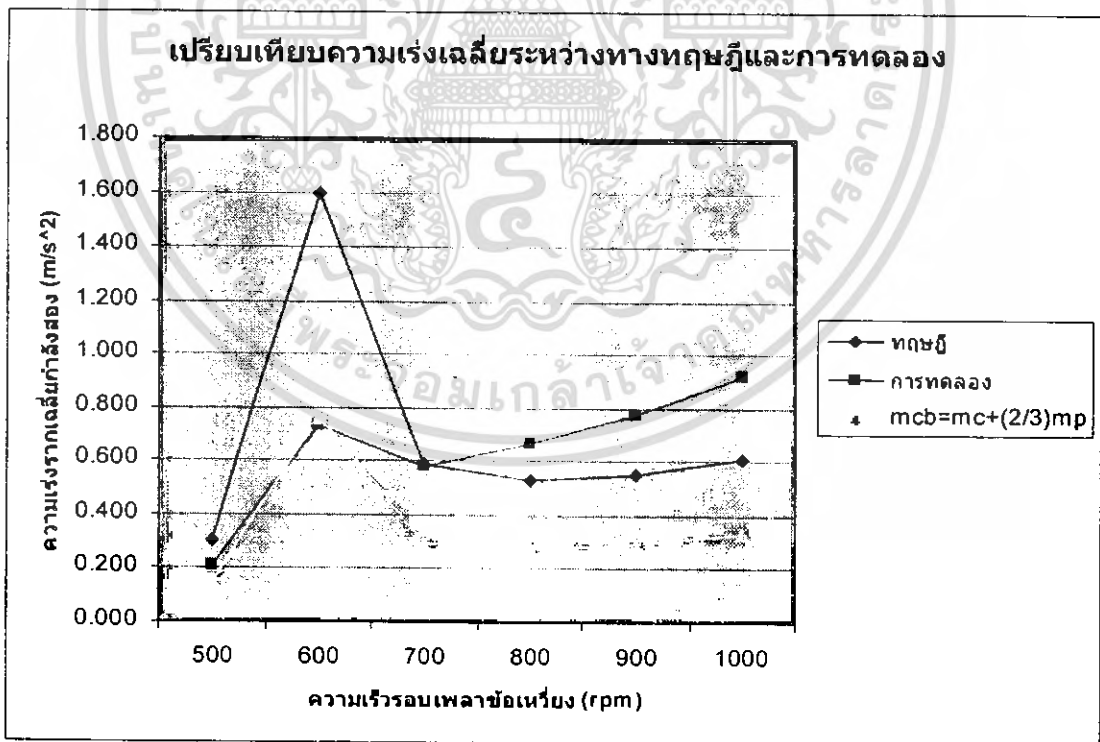
ความเร็วรากเฉลี่ยกำลังสอง 
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}^2(t) dt} \quad (5.1ข)$$

ความเร่งรากเฉลี่ยกำลังสอง 
$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \ddot{x}^2(t) dt} \quad (5.1ค)$$

2. การหาค่าเฉลี่ยจากการทดลองโดยใช้โปรแกรม Matlab ในภาคผนวก ข.

ตาราง 5-1 เปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎีโดยใช้ และการทดลองที่รอบต่าง ๆ

ความเร็วรอบ เพลาช้อเหวี่ยง	ความเร่งเฉลี่ยที่มวลถ่วงเท่ากับ 0.08 kg			ความเร่งเฉลี่ยที่มวลถ่วง เหมาะสม $mcb=0.053kg$	
	ทฤษฎี $m/s^2$	การทดลอง $m/s^2$	Error %	ทฤษฎี $m/s^2$	ความเร่ง ลดลง %
500	0.302	0.211	30.05	0.155	48.77
600	1.598	0.836	47.66	0.763	52.23
700	0.591	0.580	1.89	0.295	50.15
800	0.528	0.667	26.35	0.274	48.01
900	0.552	0.774	40.27	0.296	46.38
1000	0.608	0.921	51.63	0.333	45.21

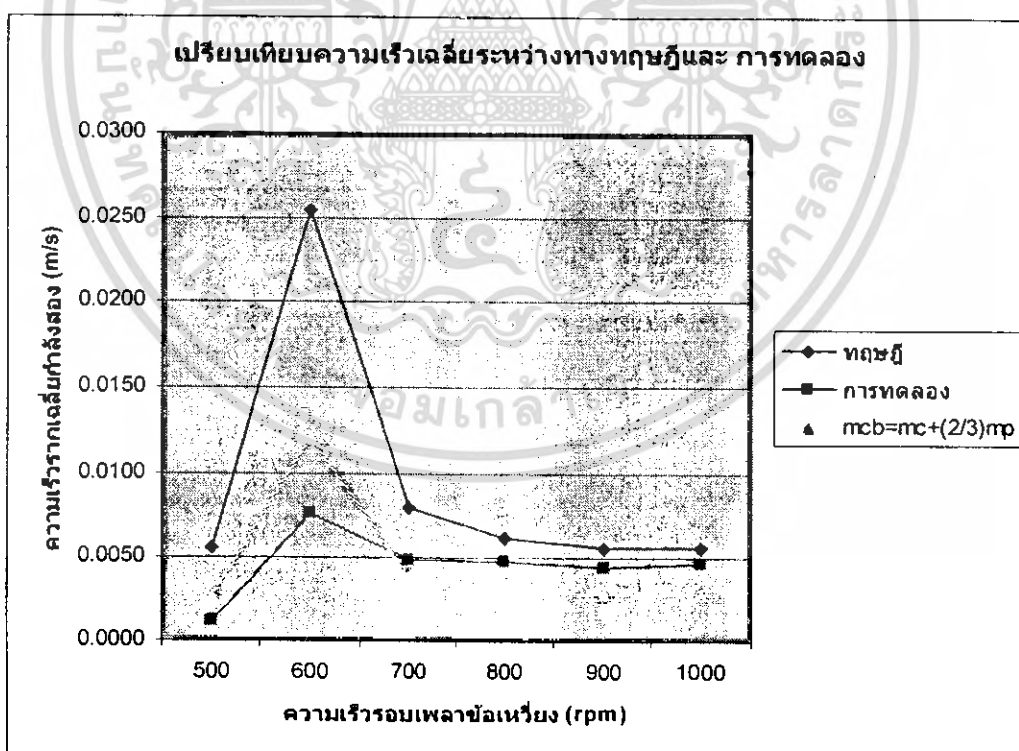


รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบความเร่งเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5-2 เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎี และการทดลอง ที่รอบต่าง ๆ

ความเร็วรอบ เพลาช้อเหวี่ยง	ความเร็วเฉลี่ยที่มวลถ่วงเท่ากับ 0.08 kg			ความเร็วเฉลี่ยที่มวลถ่วง เหมาะสม $mcb=0.053kg$	
	ทฤษฎี	การทดลอง	Error	ทฤษฎี	ความเร็ว ลดลง
rpm	m/s	m/s	%	m/s	%
500	0.0057	0.0011	79.880	0.0027	51.45
600	0.0255	0.0076	70.250	0.0121	52.39
700	0.0080	0.0050	37.780	0.0038	51.85
800	0.0062	0.0048	21.680	0.0030	51.25
900	0.0057	0.0045	21.100	0.0028	50.77
1000	0.0056	0.0046	17.070	0.0028	50.39

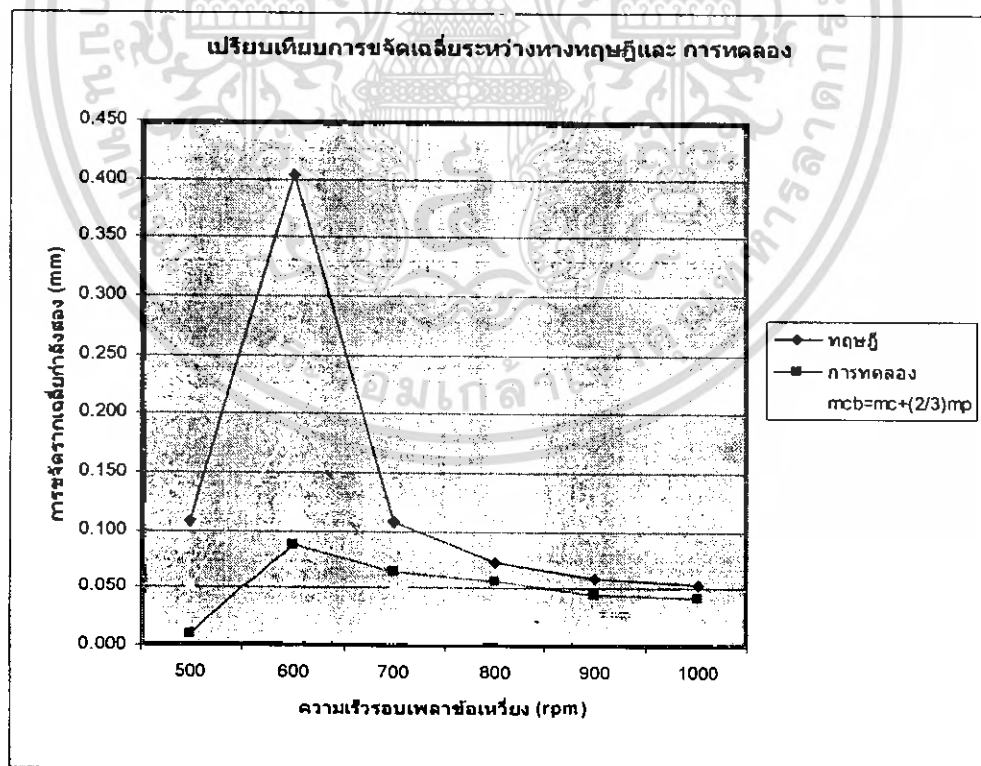


รูปที่ 5.2 กราฟเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5-3 เปรียบเทียบการขจัดเฉลี่ย ระหว่างทางทฤษฎี และการทดลอง ที่รอบต่าง ๆ

ความเร็วรอบ เพลาช้อเหวียง	การขจัดเฉลี่ยที่มวลถ่วงเท่ากับ 0.08 kg			การขจัดเฉลี่ยที่มวลถ่วง เหมาะสม $mcb=0.053kg$	
	ทฤษฎี mm	การทดลอง mm	Error %	ทฤษฎี mm	การขจัด ลดลง %
500	0.108	0.010	90.640	0.052	52.18
600	0.404	0.088	78.170	0.192	52.44
700	0.108	0.064	40.670	0.052	52.31
800	0.073	0.056	24.010	0.035	52.16
900	0.060	0.045	24.370	0.029	52.03
1000	0.053	0.041	21.830	0.025	51.93



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบการขจัดเฉลี่ยระหว่างทางทฤษฎีและการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองหาค่าเฉลี่ยของความเร่ง ความเร็ว และการขจัด ดังตารางที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ ค่าผลต่างหรือค่าความผิดพลาด ที่ได้ค่าจะค่อนข้างสูงในช่วงความเร็วรอบค่า 600 rpm และค่าความผิดพลาด จะน้อยลงเมื่อให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เพราะที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ นั้นมีแรงกระตุ้นน้อยที่จะเอาชนะแรงเสียดทานที่เกิดจากล้อเลื่อนของชุดทดลอง และที่ความเร็วรอบสูงจะสามารถเอาชนะแรงเสียดทานได้มากกว่า

จะเห็นได้ว่าการทดลองทางทฤษฎีจะมีค่าสูงกว่าทางปฏิบัติ เนื่องจากการทำงานของชุดทดลองจะเกิดสภาวะหลายกรณีด้วยกัน คือ การกดตัวของล้อเลื่อนทำให้เกิดความเสียดทาน การทำงานของคอมเพรสเซอร์ที่เกิดรอบทิศทางทำให้เกิดการติดขัด และทำให้แรงในแนวตั้งไม่สามารถขึ้นลงได้โดยตรง และผิวหน้าสัมผัสของสปริงน้อย สปริงจึงตั้งเอียง ทำให้ขณะทดลองคอมเพรสเซอร์เกิดการแกว่ง ดังนั้นการตรวจวัดสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางเกิดการเคลื่อนที่ตลอด และไม่สามารถวางเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางได้โดยตรงจึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดดังผลการทดลอง

ผลการทดลองได้ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 60.4 เฮิรท์ หรือที่ความเร็วรอบเท่ากับ 573 รอบต่อนาที ดังนั้นในการเลือกใช้ความเร็วรอบจึงไม่ควรเลือกใช้ในช่วงนี้ เพราะอยู่ในช่วงที่ความถี่ของระบบเท่ากับความถี่ธรรมชาติ จึงจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การสั่นพ้อง หรือการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง จะทำให้เกิดการเสียหายแก่ระบบ

จากการศึกษาระบบจำลองคอมเพรสเซอร์นี้ กลไกของระบบยังไม่สมดุลพอจะเห็นได้จากการทดลองก็คือ มวลถ่วงที่ได้จากชุดทดลองได้ค่ามวลถ่วงเท่ากับ 0.08 กก. ดังนั้นในการศึกษาโครงการนี้ในทางทฤษฎีจะได้ค่ามวลถ่วงที่เหมาะสมเท่ากับ 0.053 กก. สามารถลดแรงจากแรงกระตุ้นได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ที่ 98 องศาของการเกิดแรงกระตุ้นสูงสุด และลดการสั่นสะเทือนจากการขจัด ความเร็ว และความเร่งได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

## 6.2 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา

จากการทดลองมีค่าที่คลาดเคลื่อนกับ โปรแกรม เพื่อลดค่าความผิดพลาดจึงขอแนะนำ ดังนี้

1. ในการติดตั้งชุดทดลองควรให้สปริงมีผิวหน้ารองรับมาก และติดตั้งสปริงให้ตรงมากที่สุด
2. ควรทดลองในสภาพแวดล้อมที่ไม่ถูกรบกวนจากภายนอก
3. ในการทดลองควรลดความเสียดทานในส่วนที่มีการเคลื่อนที่ให้ได้มากที่สุด
4. การติดตั้งเซ็นเซอร์ ที่ดีควรติดตั้งตรงจุดศูนย์กลางถ่วงมวลหรือให้ใกล้เคียงที่สุด

## 6.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักพื้นฐานของการสันสะท้อนว่าควรเลือกความถี่ของระบบกับความถี่ธรรมชาติไม่ให้ตรงกันหรือการออกแบบที่อัตราส่วนความถี่ต่อธรรมชาติที่มากกว่า 1
2. ความแตกต่างของการทดลองจากทางทฤษฎีและจากการทดลอง
3. การใช้งานอุปกรณ์รับสัญญาณและประมวลผลการสันสะท้อน

## บรรณานุกรม

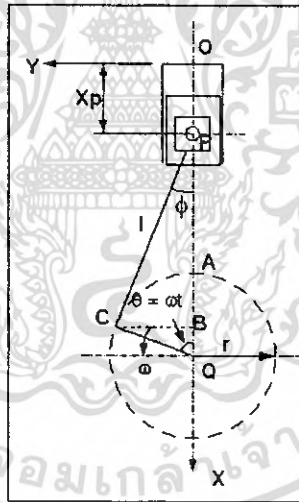
- [1] Daniel Inman J.Engineering Vibration. Pretice-Hall International Inc, 2001
- [2] J.P. Sadler and E.C. Wilson, Kinematics and Dynamics of Machinery, Harpercollins College, New York, 1993
- [3] H.M. Hamilton and F.R. Charles, Mechanism and Dynamics of Machinery, John Wiley & Sons, New York,1980
- [4] J.A. Snyman, P.S. ,Heyns, and P.J. Vermeulen, “ Vibration Isolation of a Mounted Engine Through Optimization”, Mech. Mach. Theory, Vol.30, No. 1, 1995, pp.109-118
- [5] วุฒิชัย กปิลกาญจน์. กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์ เซ็นเตอร์, 2533
- [6] วรวิทย์ อิงภากรณ์ และชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 2. กรุงเทพฯ:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2536, หน้า 255-264
- [7] มนตรี พิรุณเกษตร. วิศวกรรมการต้นสะเทือน. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2542
- [8] มงคล วงศ์โรจ และ วลีพรรณ กันเนื่อง, “การถ่วงดุลของ เครื่องยนต์สันดาปภายในชนิด หนึ่งสูบ”, วารสารวิศวกรรมพระจอมเกล้าลาดกระบัง, Vol. 6, No. 4, December 1999.

ภาคผนวก ก.

สมการการเคลื่อนที่

แรงลัพธ์ที่กระทำกับ ตัวเรือน พิจารณาจากรูปที่ (ก-1) แสดงเพลลาข้อเหวี่ยง (ความยาว  $r$ ) ก้านลูกสูบ (ความยาว  $l$ ) และลูกสูบของคอมเพรสเซอร์ สมมติว่าเพลลาข้อเหวี่ยง หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา และมีความเร็วเชิงมุมคงที่ ถ้าเราพิจารณาที่จุดกำเนิดของแกน X (จุด O) เป็นตำแหน่งที่สูงที่สุดของลูกสูบ ระยะกระจัดของสูบขึ้นอยู่กับกระจัดเชิงมุมเพลลาข้อเหวี่ยง จากตำแหน่งสูงสุด (จุดกำเนิด O) โดยทั่วไป  $\frac{r}{l} < \frac{1}{4}$  และใช้ความสัมพันธ์ในการกระจาย

$$X_p = r\left(1 + \frac{r}{4l}\right) - r\left(\cos \omega t + \frac{r}{4l} \cos 2\omega t\right) \tag{ก.1}$$



รูปที่ ก-1 แสดงชิ้นส่วนที่สำคัญของคอมเพรสเซอร์ที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมาคือลูกสูบ ก้านลูกสูบ (ความยาว  $l$ ) และ Crank (ความยาว  $r$ )

สมการ (ก.2) สามารถหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาคือความเร็วและความเร่งของลูกสูบ

$$X_p = r\omega\left(\sin \omega t + \frac{r}{2l} \sin 2\omega t\right) \tag{ก.2}$$

$$\ddot{X}_p = r\omega^2 (\cos \omega t + \frac{r}{l} \cos 2\omega t) \quad (ก.3)$$

พิจารณาตามแกน X ดังแสดงในรูปที่ (ก-1) การกระจัดทางแนวตั้งและแนวนอนของ crankpin (C) คือ

$$X_c = l + r(1 - \cos \omega t) \quad (ก.4)$$

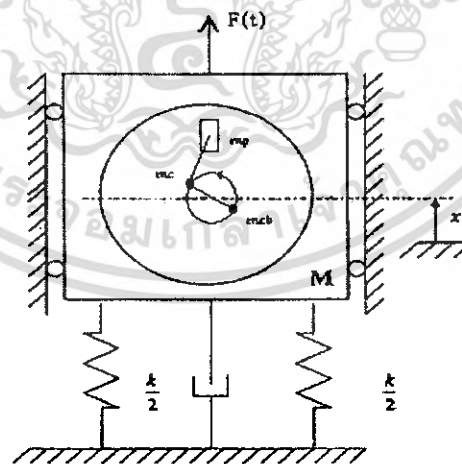
Differential สมการ (ก.4) เทียบกับเวลาได้ความเร็วและความเร่งของของ crankpin (C) คือ

$$\dot{X}_c = r\omega \sin \omega t \quad (ก.6)$$

$$\ddot{X}_c = r\omega^2 \cos \omega t \quad (ก.8)$$

มวลของก้านลูกสูบกระจายตลอดช่วงความยาว โดยทั่วไปจะคิดเสมือนว่า Link ไม่มีมวล คือพิจารณาเป็นมวลสองก้อนที่จุดปลายทั้งสองของ Link คือที่ถูกสูบ (P) และ Crankpin (จุด C) จากสมการ (3) และ (8) สำหรับความเร่งของ P และ C ได้แรงเฉื่อยในแนวตั้ง ( $F_x$ ) สำหรับระบบสูบเดี่ยวคือ

$$F_x = (m_p + m_c)r\omega^2 \cos \omega t + m_p \frac{r^2 \omega^2}{l} \cos 2\omega t \quad (ก.9)$$



รูปก-2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ

พิจารณาสมการที่ใช้เขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาสมการการเคลื่อนที่  
กำหนดให้

$$m_{rec} = m_c \cdot m_{rot} = m_p - m_{cb}$$

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = (m_{rot} + m_{rec})r\omega^2 \cos \omega t + \frac{m_{rec}}{l}(r\omega)^2 \cos 2\omega t \quad (ก.10)$$

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = A_0 \cos \omega t + B_0 \cos 2\omega t$$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = a_0 \cos \omega t + b_0 \cos 2\omega t \quad (ก.11)$$

$$\text{เมื่อ } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \zeta = \frac{c}{2m\omega_n}, \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{m}\right)^2}$$

$$\text{ทว่า } x_p = a_0 \cos \omega t + b_0 \cos 2\omega t$$

พิจารณา Particular Solution

$$x_p = A \cos \omega t + B \sin \omega t + C \cos 2\omega t + D \sin 2\omega t \quad (ก.12)$$

$$\dot{x}_p = -\omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t - 2\omega C \sin 2\omega t + 2\omega D \cos 2\omega t \quad (ก.13)$$

$$\ddot{x}_p = -\omega^2 A \cos \omega t - \omega^2 B \sin \omega t - 4\omega^2 C \cos 2\omega t - 4\omega^2 D \sin 2\omega t \quad (ก.14)$$

แทนค่าในสมการ (ก.11)

$$\begin{aligned} & -\omega^2 A \cos \omega t - \omega^2 B \sin \omega t - 4\omega^2 C \cos 2\omega t - 4\omega^2 D \sin 2\omega t \\ & + 2\zeta\omega_n [-\omega A \sin \omega t + \omega B \cos \omega t - 2\omega C \sin 2\omega t + 2\omega D \cos 2\omega t] \\ & + \omega_n^2 [A \cos \omega t + B \sin \omega t + C \cos 2\omega t + D \sin 2\omega t] = a_0 \cos \omega t + b_0 \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (ก.15)$$

เทียบสัมประสิทธิ์

$$-\omega^2 A + 2\zeta\omega_n \omega B + \omega_n^2 A = a_0 \quad (ก.15a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-4\omega^2 D + 4\zeta\omega_n\omega C + \omega_n^2 D = b_0 \quad (\text{ก.15b})$$

$$-\omega^2 B - 2\zeta\omega_n\omega A + \omega_n^2 B = 0 \quad (\text{ก.15c})$$

$$-4\omega^2 C - 4\zeta\omega_n\omega D + \omega_n^2 C = 0 \quad (\text{ก.15d})$$

จะได้ค่าตัวแปร

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{a_0(\omega_n^2 - \omega^2)}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}, B = \frac{a_0(2\zeta\omega_n\omega)}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \\ C &= \frac{b_0(4\zeta\omega_n\omega)}{(\omega_n^2 - 4\omega^2)^2 + (4\zeta\omega_n\omega)^2}, D = \frac{b_0(\omega_n^2 - 4\omega^2)}{(\omega_n^2 - 4\omega^2)^2 + (4\zeta\omega_n\omega)^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.15e})$$

หาค่า  $x_c(t)$

จาก

$$x_c(t) + 2\zeta\omega_n x_c(t) + \omega_n^2 x_c(t) = 0$$

จะได้

$$x_c(t) = e^{-\zeta\omega_n t} (d_1 \cos \omega_d t + d_2 \sin \omega_d t)$$

เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} Ac_1 &= (-\omega^2 A + 2\zeta\omega_n\omega B + \omega_n^2 A) \\ Ac_2 &= (-4\omega^2 D + 4\zeta\omega_n\omega C + \omega_n^2 D) \\ Bc_1 &= (-\omega^2 B - 2\zeta\omega_n\omega A + \omega_n^2 B) \\ Bc_2 &= (-4\omega^2 C - 4\zeta\omega_n\omega D + \omega_n^2 C) \end{aligned} \right\} \quad (\text{ก.16a})$$

จาก  $x(t) = x_c(t) + x_p(t)$

จะได้

$$\begin{aligned} x(t) &= e^{-\zeta\omega_n t} (d_1 \cos \omega_d t + d_2 \sin \omega_d t) + Ac_1 \cos \omega t \\ &\quad + Bc_1 \sin \omega t + Ac_2 \cos 2\omega t + Bc_2 \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (\text{ก.16})$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= e^{-\zeta\omega_n t} ((d_2\omega_d - d_1\zeta\omega_n)\cos \omega_d t - (d_2\zeta\omega_n + d_1\omega_d)\sin \omega_d t) \\ &\quad + Ac_1\omega(-\sin \omega t) + Bc_1\omega \cos \omega t + 2Ac_2\omega(-\sin 2\omega t) + 2Bc_2\omega \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (\text{ก.17})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) = & (d_2\omega_d - d_1\zeta\omega_n)(-\zeta\omega_n \cos\omega_d t - \omega_d \sin\omega_d t)e^{-\zeta\omega_n t} \\ & -(d_2\zeta\omega_n + d_1\omega_d)(\omega_d \cos\omega_d t - \zeta\omega_n \sin\omega_d t)e^{-\zeta\omega_n t} \\ & -Ac_1\omega^2 \cos\omega t - Bc_1\omega^2 \sin\omega t \\ & -4Ac_2\omega^2 \cos 2\omega t - 4Bc_2\omega^2 \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (ก.18)$$

หา  $d_1, d_2$  จากสมการ (ก.16) และ (ก.17)

$$x(0) = d_1 + A_{c_1} + A_{c_2}$$

$$\dot{x}(0) = d_2\omega_d + d_1\zeta\omega_n \quad \text{เมื่อ} \quad \dot{x}(0) = V_0$$

จะได้

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= x(0) - A_{c_1} + A_{c_2} \\ d_2 &= \frac{V_0 + d_1\zeta\omega_n}{\omega_d} \end{aligned} \right\} \quad (ก.19)$$

นำสมการ (ก.16), (ก.17) และ (ก.18) เขียนโปรแกรมหา ความเร็ว ความเร่ง และการกระจัด



ตาราง ก-1 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 500 rpm

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
0.002	-0.0405	-0.0001	-0.0001	0.049	-0.044	-0.0003	-0.0008
0.003	0.0489	0	-0.0001	0.05	0.1104	-0.0002	-0.0006
0.004	-0.0629	-0.0001	-0.0001	0.051	-0.1375	-0.0003	-0.0005
0.005	0.0368	0	-0.0001	0.052	-0.0292	-0.0003	-0.0004
0.006	0.0684	0.0001	0	0.053	-0.0619	-0.0003	-0.0002
0.007	-0.0495	0	0.0001	0.054	-0.0512	-0.0002	0
0.008	-0.2597	-0.0002	-0.0001	0.055	-0.0799	-0.0002	0.0001
0.009	0.4316	0.0002	0.0001	0.056	-0.0651	-0.0002	0.0003
0.01	-0.0804	0.0001	0.0002	0.057	-0.0557	-0.0002	0.0004
0.011	0.0565	0.0001	0.0003	0.058	-0.0842	-0.0002	0.0006
0.012	0.0433	0.0002	0.0003	0.059	0.0336	-0.0001	0.0008
0.013	-0.1039	0	0.0003	0.06	-0.0293	0	0.001
0.014	0.1433	0.0001	0.0003	0.061	-0.1415	-0.0001	0.001
0.015	-0.0732	0	0.0002	0.062	-0.0755	-0.0001	0.0011
0.016	-0.0103	0	0.0001	0.063	-0.063	-0.0001	0.0011
0.017	-0.0691	-0.0001	-0.0001	0.064	-0.0526	0	0.0011
0.018	-0.002	-0.0001	-0.0002	0.065	-0.0099	0.0001	0.0011
0.019	0.0098	0	-0.0002	0.066	-0.151	0	0.0011
0.02	-0.1176	-0.0001	-0.0004	0.067	0.0013	0.0001	0.001
0.021	0.0769	-0.0001	-0.0004	0.068	-0.0991	0.0001	0.001
0.022	-0.0335	-0.0001	-0.0004	0.069	-0.1242	0.0001	0.0008
0.023	-0.1038	-0.0002	-0.0004	0.07	-0.028	0.0001	0.0007
0.024	0.0612	-0.0001	-0.0004	0.071	-0.0588	0.0002	0.0006
0.025	0.4408	0.0003	0	0.072	-0.0359	0.0002	0.0005
0.026	-0.1465	0.0001	0.0001	0.073	-0.1127	0.0002	0.0003
0.027	-0.1247	0	0.0001	0.074	0.0213	0.0003	0.0003
0.028	-0.271	-0.0003	-0.0002	0.075	0.2214	0.0005	0.0003
0.029	0.0908	-0.0001	-0.0002	0.076	-0.055	0.0005	0.0003
0.03	-0.0089	-0.0001	-0.0002	0.077	0.2146	0.0007	0.0003
0.031	0.0629	0	-0.0001	0.078	0.1217	0.0008	0.0003
0.032	0.1092	0.0001	0	0.079	-0.005	0.0007	0.0001
0.033	-0.0683	0	0.0001	0.08	0.1259	0.0007	0
0.034	0.4623	0.0004	0.0005	0.081	-0.019	0.0006	-0.0004
0.035	-0.0934	0.0002	0.0006	0.082	0.136	0.0007	-0.0006
0.036	0.0808	0.0002	0.0006	0.083	0.2793	0.0008	-0.0008
0.037	-0.1147	0.0001	0.0005	0.084	0.337	0.001	-0.0009
0.038	0.1662	0.0002	0.0005	0.085	0.2644	0.001	-0.001
0.039	-0.0319	0.0001	0.0003	0.086	-0.1289	0.0006	-0.0014
0.04	-0.1998	-0.0001	0	0.087	0.2711	0.0007	-0.0017
0.041	0.2735	0.0001	0	0.088	-0.0427	0.0004	-0.0022
0.042	-0.1425	-0.0001	-0.0002	0.089	0.202	0.0004	-0.0025
0.043	0.024	-0.0001	-0.0003	0.09	0.026	0.0003	-0.0029
0.044	-0.0064	-0.0001	-0.0004	0.091	0.663	0.0007	-0.0028
0.045	-0.0992	-0.0002	-0.0006	0.092	-0.1975	0.0002	-0.003
0.046	0.0769	-0.0001	-0.0006	0.093	0.128	0.0001	-0.0032
0.047	-0.2224	-0.0003	-0.0007	0.094	0.5491	0.0004	-0.003
0.048	-0.075	-0.0004	-0.0008	0.095	0.1914	0.0003	-0.0028

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 600 rpm

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
0.001	0	0	0	0.048	-0.371	-0.0003	-0.0048
0.002	0.2708	0.0002	0.0002	0.049	0.8664	0.0004	-0.0044
0.003	0.162	0.0003	0.0004	0.05	-0.072	0.0001	-0.0043
0.004	0.2783	0.0005	0.0007	0.051	0.0306	0	-0.0041
0.005	0.2304	0.0006	0.0009	0.052	-0.09	-0.0003	-0.0041
0.006	-0.5024	0	0.0004	0.053	0.8001	0.0003	-0.0034
0.007	0.4202	0.0003	0.0004	0.054	0.2404	0.0003	-0.0027
0.008	0.0535	0.0002	0.0002	0.055	0.3006	0.0003	-0.0021
0.009	-0.5114	-0.0003	-0.0004	0.056	-0.0093	0	-0.0018
0.01	-0.1551	-0.0005	-0.0009	0.057	0.0278	-0.0002	-0.0016
0.011	0.3224	-0.0001	-0.001	0.058	-0.112	-0.0006	-0.0016
0.012	-0.2352	-0.0004	-0.0012	0.059	0.6208	-0.0002	-0.001
0.013	-0.2312	-0.0005	-0.0015	0.06	-0.1786	-0.0006	-0.0008
0.014	-0.4596	-0.0009	-0.0018	0.061	0.6533	-0.0002	-0.0001
0.015	0.1557	-0.0006	-0.0018	0.062	-0.1217	-0.0005	0.0002
0.016	-0.0582	-0.0005	-0.0015	0.063	-0.2319	-0.0009	0.0003
0.017	-0.2719	-0.0007	-0.0014	0.064	0.2454	-0.0008	0.0006
0.018	0.139	-0.0004	-0.0009	0.065	0.1684	-0.0008	0.001
0.019	-0.2775	-0.0005	-0.0006	0.066	0.1619	-0.0008	0.0015
0.02	-0.8473	-0.0011	-0.0008	0.067	-0.0378	-0.001	0.0018
0.021	0.3511	-0.0005	-0.0003	0.068	-0.1535	-0.0012	0.002
0.022	-0.2891	-0.0006	0.0001	0.069	0.0294	-0.0012	0.0023
0.023	0.3542	0	0.0009	0.07	0.0254	-0.0012	0.0027
0.024	-0.3182	-0.0002	0.0014	0.071	-0.0394	-0.0013	0.003
0.025	0.2726	0.0002	0.0021	0.072	-0.4148	-0.0016	0.0031
0.026	-0.3603	0	0.0023	0.073	-0.3657	-0.0018	0.0031
0.027	0.0251	0.0002	0.0026	0.074	0.0655	-0.0016	0.0034
0.028	0.1211	0.0004	0.003	0.075	-0.2604	-0.0016	0.0037
0.029	0.1192	0.0006	0.0032	0.076	-0.3297	-0.0017	0.0039
0.03	0.1199	0.0007	0.0034	0.077	-1.6459	-0.0029	0.0032
0.031	0.1561	0.0009	0.0035	0.078	-0.5566	-0.0028	0.0028
0.032	0.0445	0.0009	0.0033	0.079	0.1811	-0.002	0.0034
0.033	0.1125	0.0009	0.0031	0.08	-0.0097	-0.0015	0.0043
0.034	0.1274	0.0009	0.0027	0.081	-0.2376	-0.0012	0.0052
0.035	0.2074	0.001	0.0023	0.082	-0.308	-0.001	0.0059
0.036	-0.1145	0.0008	0.0016	0.083	-0.3707	-0.0009	0.0065
0.037	-0.1758	0.0005	0.0007	0.084	-0.3566	-0.0007	0.0069
0.038	0.2149	0.0007	-0.0001	0.085	-0.5965	-0.0007	0.0069
0.039	0.1724	0.0007	-0.0007	0.086	-0.5152	-0.0006	0.0067
0.04	0.3165	0.0009	-0.0011	0.087	-0.4252	-0.0004	0.0065
0.041	0.0674	0.0008	-0.0016	0.088	-0.4349	-0.0002	0.0062
0.042	0.0789	0.0006	-0.0022	0.089	-0.5089	-0.0001	0.0057
0.043	0.0952	0.0006	-0.0027	0.09	-0.4829	0.0001	0.0051
0.044	0.148	0.0005	-0.0031	0.091	-0.4564	0.0003	0.0045
0.045	-0.0151	0.0003	-0.0036	0.092	-0.4955	0.0005	0.0037
0.046	0.027	0.0002	-0.0041	0.093	-0.5046	0.0006	0.0029
0.047	0.1709	0.0002	-0.0043	0.094	-0.319	0.001	0.0021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 700 rpm

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
0.3	-0.7067	0.0037	-0.0563	0.347	0.9948	-0.0071	0.0573
0.301	-0.8191	0.0039	-0.0535	0.348	1.6369	-0.006	0.0571
0.302	-0.5966	0.0044	-0.0503	0.349	-0.3059	-0.0069	0.0554
0.303	-0.9382	0.0044	-0.0469	0.35	-0.4041	-0.0076	0.0525
0.304	-0.5452	0.0049	-0.0431	0.351	0.0968	-0.0077	0.0491
0.305	-0.4247	0.0054	-0.039	0.352	-0.1181	-0.0079	0.0453
0.306	0.1876	0.0063	-0.0341	0.353	-0.5286	-0.0084	0.0407
0.307	-1.5832	0.0054	-0.0302	0.354	0.1428	-0.0081	0.0363
0.308	0.1864	0.0063	-0.0256	0.355	0.2749	-0.0076	0.0319
0.309	-0.6575	0.0062	-0.0211	0.356	0.2703	-0.0071	0.0275
0.31	0.5686	0.0072	-0.016	0.357	-0.7784	-0.0076	0.0221
0.311	-0.2819	0.0072	-0.0111	0.358	0.3863	-0.0068	0.017
0.312	0.3473	0.0077	-0.0062	0.359	-0.1607	-0.0065	0.0116
0.313	0.3047	0.008	-0.0013	0.36	0.0404	-0.006	0.0062
0.314	0.5287	0.0083	0.0035	0.361	-0.1207	-0.0057	0.0004
0.315	0.2071	0.0082	0.0077	0.362	0.2271	-0.005	-0.0052
0.316	0.4244	0.0081	0.0118	0.363	-0.2296	-0.0047	-0.0111
0.317	0.3139	0.0078	0.0154	0.364	-0.2519	-0.0045	-0.0173
0.318	1.1113	0.0082	0.0192	0.365	-0.4254	-0.0043	-0.0238
0.319	0.8048	0.0081	0.0228	0.366	-0.3529	-0.004	-0.0302
0.32	0.1161	0.0072	0.0255	0.367	-0.2925	-0.0035	-0.0365
0.321	0.5055	0.0067	0.028	0.368	-0.383	-0.0032	-0.0426
0.322	0.3416	0.0059	0.0301	0.369	-0.335	-0.0027	-0.0485
0.323	0.9718	0.0058	0.0325	0.37	-0.6411	-0.0025	-0.0543
0.324	0.84	0.0054	0.0349	0.371	-0.7605	-0.0024	-0.0599
0.325	0.8148	0.0049	0.0372	0.372	-0.7816	-0.0022	-0.0652
0.326	0.5568	0.0041	0.0392	0.373	-0.5326	-0.0016	-0.0699
0.327	0.9048	0.0036	0.0413	0.374	-0.9329	-0.0015	-0.0743
0.328	0.6531	0.0028	0.0432	0.375	-0.9629	-0.0012	-0.0783
0.329	0.6926	0.0021	0.045	0.376	-0.7076	-0.0007	-0.0814
0.33	0.9579	0.0016	0.047	0.377	-0.8189	-0.0003	-0.084
0.331	0.7793	0.0009	0.0488	0.378	-1.0321	0	-0.0861
0.332	0.8883	0.0003	0.0507	0.379	-0.8231	0.0005	-0.0874
0.333	0.9766	-0.0002	0.0525	0.38	-0.9181	0.001	-0.0882
0.334	-0.0419	-0.0016	0.0536	0.381	-0.6998	0.0016	-0.0882
0.335	1.685	-0.0013	0.0554	0.382	-0.9269	0.002	-0.0877
0.336	0.1889	-0.0025	0.0565	0.383	-0.7909	0.0026	-0.0866
0.337	0.0826	-0.0037	0.0571	0.384	-0.8571	0.003	-0.085
0.338	0.441	-0.0044	0.0576	0.385	-0.6777	0.0036	-0.0829
0.339	0.4439	-0.0049	0.0581	0.386	-0.6802	0.0041	-0.0803
0.34	0.2074	-0.0056	0.0584	0.387	-0.665	0.0046	-0.0772
0.341	0.4689	-0.006	0.0588	0.388	-0.6345	0.0051	-0.0738
0.342	0.267	-0.0065	0.0589	0.389	-0.591	0.0055	-0.0701
0.343	0.4103	-0.0068	0.059	0.39	-0.6384	0.0059	-0.0661
0.344	0.2322	-0.0071	0.0589	0.391	-0.433	0.0063	-0.0617
0.345	0.6618	-0.007	0.0587	0.392	-0.0328	0.0071	-0.0568
0.346	-0.1917	-0.0077	0.0578	0.393	-0.4391	0.0073	-0.0519

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-4 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 800 rpm

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
0.3	0.8272	0.0024	0.015	0.347	-0.25	0.004	-0.0523
0.301	1.3061	0.0025	0.0214	0.348	-0.0086	0.0044	-0.0585
0.302	0.6715	0.002	0.0271	0.349	-0.0192	0.0048	-0.0642
0.303	0.4458	0.0012	0.0323	0.35	-0.2308	0.0049	-0.0696
0.304	1.0148	0.001	0.0373	0.351	-0.4251	0.0048	-0.0748
0.305	0.7543	0.0005	0.0419	0.352	-0.0155	0.005	-0.0791
0.306	0.8305	0	0.0462	0.353	-0.0035	0.0052	-0.0828
0.307	0.8849	-0.0004	0.0501	0.354	-0.324	0.005	-0.0859
0.308	0.7453	-0.0009	0.0537	0.355	-0.2664	0.0049	-0.0884
0.309	0.6815	-0.0014	0.0567	0.356	0.0797	0.005	-0.0899
0.31	0.5982	-0.002	0.0594	0.357	-0.1107	0.0049	-0.0907
0.311	-0.2101	-0.0033	0.061	0.358	0.3379	0.0052	-0.0904
0.312	0.239	-0.004	0.0624	0.359	0.2735	0.0053	-0.0893
0.313	0.3131	-0.0044	0.0637	0.36	-0.0608	0.0051	-0.0877
0.314	0.5665	-0.0046	0.0651	0.361	0.1947	0.005	-0.0854
0.315	-0.2006	-0.0054	0.0658	0.362	0.3243	0.005	-0.0823
0.316	0.0539	-0.0059	0.0664	0.363	0.3636	0.0049	-0.0786
0.317	-0.0437	-0.0063	0.0668	0.364	0.2066	0.0047	-0.0745
0.318	-0.1376	-0.0066	0.0669	0.365	-0.5425	0.0037	-0.0704
0.319	-0.2265	-0.0069	0.0667	0.366	0.7383	0.004	-0.0653
0.32	-0.2418	-0.0072	0.0663	0.367	1.1653	0.0045	-0.059
0.321	-0.5145	-0.0075	0.0655	0.368	0.9227	0.0047	-0.0523
0.322	-0.4017	-0.0076	0.0645	0.369	0.9554	0.0047	-0.0453
0.323	-0.6151	-0.0077	0.0631	0.37	0.3211	0.004	-0.0387
0.324	-0.4921	-0.0076	0.0616	0.371	0.7372	0.0037	-0.0319
0.325	-0.4911	-0.0074	0.0598	0.372	0.8472	0.0035	-0.0251
0.326	-0.742	-0.0074	0.0576	0.373	0.8104	0.0031	-0.0182
0.327	-0.6033	-0.0071	0.0552	0.374	0.9454	0.0028	-0.0113
0.328	-0.5169	-0.0066	0.0525	0.375	0.7424	0.0023	-0.0046
0.329	-0.7083	-0.0063	0.0494	0.376	0.6609	0.0017	0.0018
0.33	-1.2417	-0.0064	0.0456	0.377	0.5271	0.001	0.008
0.331	-1.2538	-0.0063	0.0412	0.378	0.872	0.0007	0.0143
0.332	-1.1464	-0.006	0.0364	0.379	0.4607	-0.0001	0.0202
0.333	0.8353	-0.0038	0.033	0.38	0.5814	-0.0007	0.0259
0.334	-0.4281	-0.003	0.0291	0.381	0.9448	-0.0009	0.0318
0.335	-0.8731	-0.0027	0.0243	0.382	0.4921	-0.0015	0.0374
0.336	-1.1107	-0.0026	0.0186	0.383	0.4303	-0.0022	0.0426
0.337	-0.8828	-0.0021	0.0125	0.384	-0.5557	-0.0036	0.0468
0.338	0.359	-0.0005	0.0071	0.385	0.7474	-0.0036	0.0514
0.339	-0.273	0.0003	0.0014	0.386	0.3792	-0.004	0.056
0.34	0.0478	0.0013	-0.0044	0.387	-0.3795	-0.0049	0.0598
0.341	0.0705	0.0021	-0.0104	0.388	0.5097	-0.0049	0.0638
0.342	-0.7189	0.0022	-0.0173	0.389	0.0695	-0.0053	0.0675
0.343	-0.4746	0.0025	-0.0244	0.39	0.1505	-0.0055	0.0709
0.344	-0.2275	0.003	-0.0316	0.391	0.1298	-0.0056	0.074
0.345	-0.3648	0.0033	-0.0387	0.392	-0.7081	-0.0064	0.0761
0.346	-0.24	0.0037	-0.0456	0.393	-0.1106	-0.0065	0.078

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตาราง ก-5 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 900 rpm**

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
0.3	0.7875	0.0021	-0.0579	0.347	0.138	0.0037	-0.0366
0.301	0.5931	0.0013	-0.0529	0.348	1.2542	0.0051	-0.0397
0.302	0.8586	0.0007	-0.0473	0.349	0.7057	0.0056	-0.0424
0.303	-0.2527	-0.0008	-0.042	0.35	0.2265	0.0055	-0.0453
0.304	-0.4228	-0.0022	-0.0366	0.351	0.3671	0.0055	-0.0481
0.305	-0.1211	-0.0032	-0.0308	0.352	-0.4053	0.0047	-0.0514
0.306	-0.0656	-0.0039	-0.0243	0.353	-0.0066	0.0044	-0.0545
0.307	-0.0791	-0.0045	-0.0172	0.354	0.716	0.0047	-0.0566
0.308	-0.2082	-0.005	-0.0096	0.355	0.831	0.005	-0.058
0.309	-0.442	-0.0057	-0.0018	0.356	0.6995	0.005	-0.0589
0.31	-0.1556	-0.0059	0.0065	0.357	0.4099	0.0046	-0.0596
0.311	-0.1502	-0.006	0.015	0.358	0.9812	0.0047	-0.0595
0.312	-0.5049	-0.0064	0.0234	0.359	1.2091	0.0049	-0.0588
0.313	-0.7054	-0.0068	0.0315	0.36	0.7802	0.0046	-0.0579
0.314	-0.2464	-0.0066	0.0397	0.361	0.8151	0.0042	-0.0568
0.315	0.2858	-0.0059	0.0481	0.362	0.6459	0.0036	-0.0555
0.316	-0.7292	-0.0062	0.0555	0.363	0.7536	0.0031	-0.0539
0.317	0.0276	-0.0056	0.0627	0.364	0.7304	0.0026	-0.0519
0.318	-1.4319	-0.0064	0.0683	0.365	0.5482	0.0019	-0.0498
0.319	-0.0443	-0.0056	0.0737	0.366	0.3346	0.0011	-0.0474
0.32	0.3162	-0.0046	0.0789	0.367	-0.8713	-0.0008	-0.0456
0.321	-1.4606	-0.0053	0.0822	0.368	0.9631	-0.0007	-0.0424
0.322	-0.7574	-0.0051	0.0846	0.369	1.1222	-0.0005	-0.0381
0.323	-0.1271	-0.0043	0.0866	0.37	0.8171	-0.0007	-0.0331
0.324	-0.026	-0.0034	0.0881	0.371	0.4828	-0.0012	-0.0281
0.325	-1.3369	-0.0038	0.0878	0.372	0.0077	-0.0021	-0.0232
0.326	0.1872	-0.0026	0.0874	0.373	-0.1288	-0.003	-0.0184
0.327	0.1256	-0.0017	0.0864	0.374	0.137	-0.0035	-0.0134
0.328	0.2222	-0.0008	0.0847	0.375	-0.4999	-0.0045	-0.0086
0.329	-0.804	-0.0009	0.0814	0.376	0.3301	-0.0045	-0.0032
0.33	-0.11	-0.0003	0.0774	0.377	-0.5564	-0.0053	0.002
0.331	-0.1708	0.0002	0.0726	0.378	-0.7082	-0.006	0.007
0.332	-0.4627	0.0004	0.0669	0.379	-0.2891	-0.0061	0.0123
0.333	-0.5503	0.0005	0.0603	0.38	-0.4631	-0.0063	0.0176
0.334	-0.459	0.0007	0.0533	0.381	-0.0416	-0.0061	0.0232
0.335	-0.2846	0.0011	0.046	0.382	-0.6728	-0.0063	0.0284
0.336	-0.7071	0.001	0.0383	0.383	-0.072	-0.0059	0.0338
0.337	-0.0418	0.0016	0.0307	0.384	-1.1245	-0.0064	0.0382
0.338	-0.1788	0.002	0.0232	0.385	-1.4521	-0.007	0.0417
0.339	-0.5043	0.002	0.0155	0.386	0.732	-0.0054	0.0462
0.34	-0.2878	0.0023	0.008	0.387	-1.4713	-0.006	0.0494
0.341	-0.3281	0.0025	0.0005	0.388	-0.4389	-0.0054	0.0524
0.342	0.0078	0.0029	-0.0064	0.389	0.1236	-0.0043	0.0553
0.343	-2.3688	0.0012	-0.0147	0.39	-0.4111	-0.0038	0.0576
0.344	0.2101	0.0021	-0.0215	0.391	-1.1378	-0.004	0.0585
0.345	0.0571	0.0027	-0.0273	0.392	0.2264	-0.0028	0.0594
0.346	0.0865	0.0033	-0.0323	0.393	0.7354	-0.0013	0.0603

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

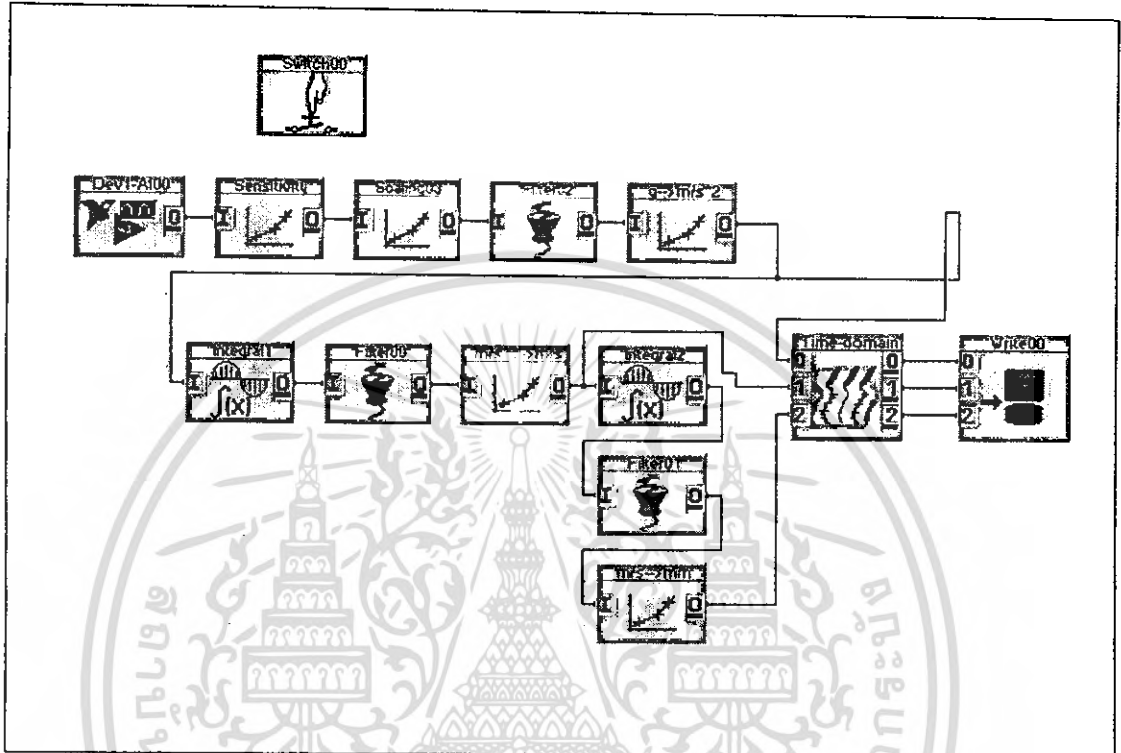
ตาราง ก-6 ข้อมูลการทดลองที่ความเร็วรอบ 1000 rpm

Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm	Time (s)	Acceleration m/s <sup>2</sup>	Velocity m/s	Displacement mm
3	1.14	0.006	-0.0405	3.047	-0.0848	0.006	0.0172
3.001	1.2342	0.0062	-0.0422	3.048	0.6523	0.0067	0.009
3.002	1.6518	0.0065	-0.0433	3.049	0.0897	0.0067	0.0005
3.003	2.6905	0.0076	-0.0433	3.05	-0.559	0.006	-0.0085
3.004	0.9807	0.0067	-0.044	3.051	0.5787	0.0065	-0.0168
3.005	0.6117	0.0055	-0.0453	3.052	-0.0691	0.0061	-0.025
3.006	0.7186	0.0045	-0.0468	3.053	-0.6803	0.0053	-0.0333
3.007	-2.3209	0.0008	-0.0504	3.054	-0.0659	0.0051	-0.0407
3.008	0.8671	0.0006	-0.0521	3.055	1.3723	0.0061	-0.0463
3.009	2.1628	0.0015	-0.0513	3.056	1.0682	0.0066	-0.0506
3.01	1.7896	0.0018	-0.0491	3.057	1.3418	0.0071	-0.0539
3.011	1.4238	0.0016	-0.0461	3.058	1.1	0.0071	-0.0566
3.012	0.834	0.0008	-0.0431	3.059	1.4393	0.0073	-0.0586
3.013	-0.0493	-0.0008	-0.0405	3.06	1.1242	0.0071	-0.0603
3.014	0.1401	-0.0019	-0.0377	3.061	1.4354	0.007	-0.0614
3.015	0.386	-0.0027	-0.0344	3.062	1.3259	0.0066	-0.062
3.016	0.1376	-0.0036	-0.0306	3.063	1.2045	0.006	-0.0624
3.017	-0.3325	-0.0047	-0.0267	3.064	1.2778	0.0054	-0.0623
3.018	-0.8583	-0.0061	-0.0228	3.065	-0.6652	0.0031	-0.0632
3.019	-1.2874	-0.0076	-0.0188	3.066	0.7731	0.0023	-0.0631
3.02	0.0035	-0.0075	-0.0135	3.067	1.8066	0.0026	-0.0612
3.021	-0.0791	-0.0075	-0.0073	3.068	1.4406	0.0022	-0.0583
3.022	-2.6395	-0.0097	-0.0023	3.069	-0.09	0.0005	-0.0558
3.023	0.1537	-0.0088	0.0043	3.07	-0.0047	-0.0009	-0.053
3.024	-0.5234	-0.0085	0.0115	3.071	1.1877	-0.0011	-0.0487
3.025	-0.0304	-0.0078	0.0192	3.072	0.3257	-0.0021	-0.044
3.026	-3.3953	-0.01	0.0246	3.073	-0.0707	-0.0033	-0.0391
3.027	-1.2916	-0.0098	0.0302	3.074	0.1016	-0.0041	-0.0336
3.028	-0.2565	-0.0084	0.0368	3.075	-0.6487	-0.0055	-0.028
3.029	-1.4246	-0.0083	0.0428	3.076	-0.6499	-0.0066	-0.0221
3.03	-1.1093	-0.0076	0.0483	3.077	-1.301	-0.008	-0.0162
3.031	-1.5073	-0.0073	0.0531	3.078	1.0441	-0.0069	-0.0082
3.032	-0.1134	-0.0056	0.0581	3.079	-1.231	-0.0081	-0.0007
3.033	-0.7895	-0.0047	0.0623	3.08	-0.3932	-0.0082	0.0073
3.034	-0.8064	-0.0038	0.0654	3.081	-1.3519	-0.009	0.0148
3.035	-0.4426	-0.0026	0.0677	3.082	-0.8412	-0.009	0.0225
3.036	-0.2833	-0.0014	0.0691	3.083	-0.7646	-0.0089	0.0302
3.037	-1.0126	-0.001	0.0689	3.084	-1.2526	-0.0091	0.0376
3.038	0.2567	0.0006	0.0682	3.085	-0.7957	-0.0086	0.0448
3.039	-0.6349	0.0012	0.0659	3.086	-0.9844	-0.0083	0.0516
3.04	-0.3376	0.002	0.0626	3.087	-0.6069	-0.0075	0.0581
3.041	0.4374	0.0033	0.0587	3.088	-0.718	-0.0069	0.0641
3.042	0.2303	0.0043	0.054	3.089	0.3437	-0.0052	0.07
3.043	-0.8912	0.004	0.0476	3.09	-0.5552	-0.0046	0.0746
3.044	0.2989	0.0049	0.0407	3.091	-0.9481	-0.0043	0.0777
3.045	0.1197	0.0055	0.0334	3.092	-0.1937	-0.0032	0.0799
3.046	0.1891	0.0059	0.0255	3.093	-0.1741	-0.0023	0.081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

## โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ



รูปที่ ข-1 แผนผังของโปรแกรม DASYLab สำหรับรับสัญญาณและวิเคราะห์ผล Module ที่ใช้ในแผนผังโปรแกรม DASYLab

1. A/D module ทำหน้าที่รับสัญญาณมาจาก sensor โดยแปลงสัญญาณจาก analog เป็น digital
2. Sensitivity module ทำหน้าที่ปรับค่าสัญญาณและแปลงหน่วยของสัญญาณให้ถูกต้อง
3. Scaling module ทำหน้าที่ปรับค่าสัญญาณให้แสดงอยู่ในรูปกราฟเส้นตรง
4. Filter module ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนออก
5. Integration module ทำหน้าที่ integrate สัญญาณ
6. FFT module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain
7. Y/T module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นกราฟ
8. Recorder module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นกราฟหน้าจอแบบ oscilloscope
9. Meter module ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้ออกมาเป็นตัวเลขการทำงานของ

โปรแกรม DASYLab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การทำงานของโปรแกรม DASyLab

1. A/D module รับสัญญาณมาจาก sensor ในหน่วย volt
2. แล้วนำค่าสัญญาณมาปรับค่า sensitivity ของ sensor ที่ Sensitivity module
3. นำค่าสัญญาณที่ได้มาผ่าน Scaling module เพื่อแปลงหน่วยจาก volt เป็นหน่วย g และทำให้กราฟเป็นเส้นตรง
4. นำค่าสัญญาณที่ได้มาผ่าน Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้
5. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาแปลงหน่วย g เป็นหน่วย  $m/s^2$  ใน Scaling module
6. นำสัญญาณส่วนหนึ่งมาเข้า FFT module เพื่อแปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain
7. แล้วนำสัญญาณที่ได้มาเข้า Scaling module เพื่อแปลงหน่วยและปรับกราฟให้อยู่ในรูปเส้นตรงแล้วนำสัญญาณที่ได้มาแสดงผลใน Y/T module
8. สัญญาณที่ได้จากข้อ 5 นำมาเข้า Integration module เพื่อ integrate สัญญาณจากความเร่งเป็นความเร็ว
9. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้อีกครั้งหนึ่ง
10. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาแปลงจากหน่วย m/s เป็น mm/s ใน Scaling module
11. นำสัญญาณส่วนหนึ่งมาเข้า FFT module เพื่อแปลงสัญญาณจาก time domain เป็น frequency domain ในช่วงของความเร็วกับความถี่โดยแสดงผลออกมาเป็นกราฟใน Y/T module
12. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 11 มาเข้า Recorder module เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา แล้วนำสัญญาณมาเข้า Meter module เพื่อให้แสดงออกมาเป็นตัวเลข
13. นำสัญญาณที่ได้จากข้อ 11 มาเข้า Integration module เพื่อ integrate สัญญาณจากความเร็วเป็นการกระจัด
14. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Filter module เพื่อกรองสัญญาณรบกวนออกโดยตั้งความถี่ที่สูงกว่า 10 Hz สามารถผ่านได้อีกครั้ง
15. หลังจากสัญญาณที่ผ่าน Filter module นำมาเพื่อปรับกราฟให้อยู่ในรูปเส้นตรงใน Scaling module
16. แล้วนำสัญญาณมาเข้า Recorder module เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา แล้วนำสัญญาณมาเข้า Meter module เพื่อแสดงออกมาเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมหาค่าเฉลี่ยจากข้อมูลการทดลองโดยเครื่องวัดสัญญาณ

```
clc
clear all
close all
%Example import Data
A=load('650.txt');
B=abs(A);
C=mean(B);
fprintf('Displacement average value is %3.5f mm \n',C(4));
fprintf('Velocity average value is %3.4f m/s \n',C(3))
fprintf('Acceleration average value is %3.4f m \n',C(2))
figure(1)
plot(B(:,1),B(:,4),'r');
xlabel('time(sec)')
ylabel('Displacement(m)')
title('Displacement of Single Cylinder Compressor')
figure(2)
plot(B(:,1),B(:,3),'g');
xlabel('time(sec)')
ylabel('Velocity(m/s)')
title('Velocity of Single Cylinder Compressor')
figure(3)
plot(B(:,1),B(:,2),'b');
xlabel('time(sec)')
ylabel('Acceleration(m/s^2)')
title('Acceleration of Single Cylinder Compressor')
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมหาผลการทดลองทางทฤษฎี และหาค่าเฉื่อย

```

l = 0.049;          %% Connecting rod length (m)
g = 9.81;          %% Gravitational acceleration (m/sec*2)
mc = 0.317/g;      %%(N)
mp = 0.26/g;       %%(N)
r = 0.015;         %% Crank length (m)
mcb = 0.08;        %% Counter Weight(kg)
%% Initial Condition %%%
X0 = 0;            %%% initial X displacement
Xd0 = 0;           %%% initial X velocity
t0 = 0.5;          %%% Initial Time
tf = 1;            %%% Final Time
% Factor
m = 54/g;          %% Mass of Compressor (kg)
Keq = 25000;       %% Eql.stiffness(N/m)
N = 650;           %% Crank rotation (rpm)
w = N*2*pi/60;     %% Crank rotation in (rad/s)
zeta = 0.11;
A0 = (mp+mc-mcb)*r*w^2;
B0 = (mp*(r*w)^2)/l;
a0 = A0/m;
b0 = B0/m;
wn = sqrt(Keq/m);
wd = wn*sqrt(1-zeta^2); %Particular Solution
a = (wn^2-w^2);
b = 2*zeta*wn*w;
c = -b;
d = a;
Ac1 = (d/(a*d-b*c))*a0;
Bc1 = (-c/(a*d-b*c))*a0;

```

```

%cos2wt
a=(wn^2-(2*w)^2);
b=2*zeta*wn*(2*w);
c=-b;
d=a;
Ac2=(d/(a*d-b*c))*b0;
Bc2=(-c/(a*d-b*c))*b0;
d1=X0-Ac1-Ac2;
d2=(Xd0+(d1*zeta*wn))/wd;
p1=(d2*wd-d1*zeta*wn);
p2=(d2*zeta*wn-d1*wd);
t=t0:0.001:tf;
T=tf-t0;
n=length(t);
for i=1:n,
x(i) = (exp(-zeta*wn*t(i)))*(d1*cos(wd*t(i))+d2*sin(wd*t(i)))...
+Ac1*cos(w*t(i))+Bc1*sin(w*t(i))...
+Ac2*cos(2*w*t(i))+Bc2*sin(2*w*t(i));
xd(i) = (exp(-zeta*wn*t(i)))*(d1*wd*(-sin(wd*t(i)))+d2*wd*cos(wd*t(i)))+...
+(d1*cos(wd*t(i))+d2*sin(wd*t(i)))*(-zeta*wn)*(exp(-zeta*wn*t(i)))...
+Ac1*w*(-sin(w*t(i)))+Bc1*w*cos(w*t(i))...
+Ac2*(2*w)*(-sin(2*w*t(i)))+Bc2*(2*w)*cos(2*w*t(i));
xdd(i) = (exp(-zeta*wn*t(i))*p1*(-zeta*wn*cos(wd*t(i))-wd*sin(wd*t(i)))...
-(exp(-zeta*wn*t(i))*p2*(wd*cos(wd*t(i))-zeta*wn*sin(wd*t(i)))...
+Ac1*w^2*(-cos(w*t(i)))+Bc1*w^2*(-sin(w*t(i)))...
+Ac2*(2*w)^2*(-cos(2*w*t(i)))+Bc2*(2*w)^2*(-sin(2*w*t(i)));
end
x1=abs(x);
x2=mean(x1);
x3=(x).^2;
x4 = trapz(t,x3)/T;
x5 = sqrt(x4);

```

```

fprintf('Displacement Root mean square value is %3.7f m \n',x5);
xd1=abs(xd);
xd2=mean (xd1);
xd3=(xd).^2;
xd4 = trapz(t,xd3)/T;
xd5 = sqrt(xd4);
fprintf('Velocity Root mean square value is %3.4f m/s \n',xd5);
xdd1=abs(xdd);
xdd2=mean(xdd1);
xdd3=(xdd).^2;
xdd4 = trapz(t,xdd3)/T;
xdd5 = sqrt(xdd4);
fprintf('Acceleration Root mean square value is %3.4f m/s^2 \n',xdd5);
figure (1)
plot(t,x,'r');          %%% Plot X Displacement
title('Displacement of Compressor');
ylabel('Displacement(m)');
figure(2)
plot(t,xd,'g');          %%% Plot X Velocity
title('Velocity of Compressor');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Velocity(m/s)');
figure(3)
plot(t,xdd,'b');
title('Acceleration of Compressor');
xlabel('Time(s)');
ylabel('Acceleration(m/s^2)');

```