

การปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง

Rigid Rotor's Balancing



ปฏิญญาพันธนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

พ.ศ.
ร. ๓๐๒.๗
๓๖๕๖

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50164

วัน,เดือน,ปี 2 1 เม.ย. 2547

Library stamp box with fields .b..... and .i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง

Rigid Rotor's Balancing



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง

Rigid Rotor's Balancing

ผู้จัดทำ

1. นายรัฐพล ทรงพัฒนะโยธิน รหัสประจำตัว 42010542

2. นายปรกรณ์ พรเดิม รหัสประจำตัว 42010549



 อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.อนันต์ พิม โสภณ)

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับสมดุลของวัดอุทุมพรเกร็ง

นายรัฐพล ทรงพัฒนะโยธิน 42010542

นายปกรณ์ พรเติม 42010549

ดร.อุन्नัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นโครงการการศึกษาทฤษฎีการหมุนของวัดอุทุมพรเกร็ง ที่มีการหมุนอย่างไม่สมดุล อันเนื่องมาจากการแผ่กระจายมวลอย่างไม่สม่ำเสมอและทำการแก้ไขโดยวิธีการปรับสมดุลโดยใช้วิธีคำนวณจากเวกเตอร์ของการสั่นสะเทือน โดยได้ทำการออกแบบชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุน เพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบผลทางปฏิบัติกับผลทางทฤษฎี เพื่อหาขนาดและตำแหน่งของความไม่สมดุล โดยพิจารณาจากการสั่นสะเทือนในขณะที่หมุนด้วยความเร็วคงที่ของวัดอุทุมพรเกร็ง ชุดจำลองการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นจุดสาริตในการศึกษาการปรับสมดุลของวัดอุทุมพรได้

Rigid Rotor's Balancing

Nuttapon Songphanayothin

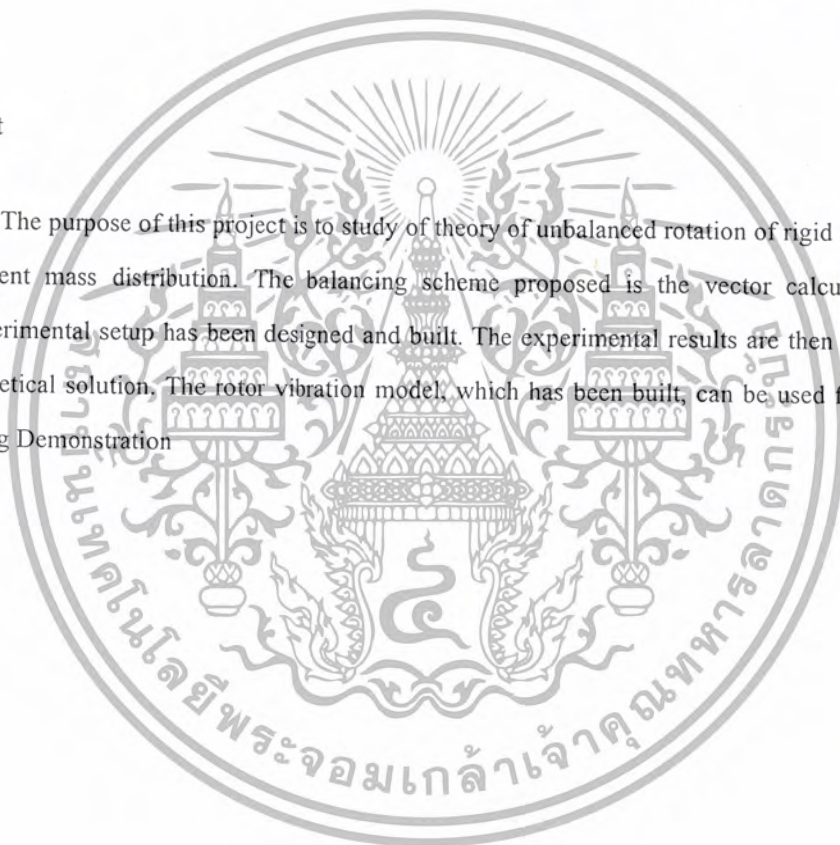
Pakorn Pornterm

Dr. Unnat Pinsopon Advisor

Monsak Pimsarn Advisor

Abstract

The purpose of this project is to study of theory of unbalanced rotation of rigid rotor due to the inconsistent mass distribution. The balancing scheme proposed is the vector calculation method. The experimental setup has been designed and built. The experimental results are then compared with the theoretical solution. The rotor vibration model, which has been built, can be used for Rigid Rotor Balancing Demonstration



กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกันลำดับแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้เสร็จลงได้ก็คืออาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรทั้งสองท่านคือ ดร.อุนนต์ พิณ โสภณ และ อ.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือเสมอมาซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก ขอขอบพระคุณอาจารย์เอกพจน์ ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานด้านคอนโทรลและอิเล็กทรอนิกส์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักหอสมุดกลาง ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางตำราและเอกสารอ้างอิง ตลอดจนเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกทุก ๆ เรื่อง โดยเฉพาะ โจ้และคาร์ม สำหรับยานพาหนะรับส่งถึงที่ตอนดึก ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำโครงการรวมทั้งบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ ที่มีส่วนร่วมให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ลืมไม่ได้คือบุคคลที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

รัฐพล ทรงพัฒนะโยธิน
ปกรณ์ พรเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

| | |
|---|-----|
| บทคัดย่อ | I |
| Abstract | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูป | VI |
| สารบัญตาราง | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตโครงการ | 1 |
| 1.4 การดำเนินงานและรายละเอียดปฏิยานุภาพ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานการสันตะเทือน | |
| 2.1 การสันตะเทือนของระบบ | 3 |
| 2.2 การสันตะเทือนทางกล | 7 |
| 2.3 การสันตะเทือนเนื่องจากการหมุนรอบแกนของมวลไม่สมดุล | 8 |
| 2.4 การเคลื่อนที่เป็นคาบ | 9 |
| บทที่ 3 การปรับสมดุลวัตถุหมุน | |
| 3.1 พื้นฐานและคำจำกัดความ | 13 |
| 3.1.1 ความไม่สมดุล | 13 |
| 3.1.2 การปรับความไม่สมดุล | 13 |
| 3.1.3 Field Balancing | 13 |
| 3.1.4 ประเภทความไม่สมดุล | 13 |
| 3.1.5 ประเภทของวัตถุหมุน | 16 |
| 3.1.6 ความถี่การสันตะเทือน | 16 |
| 3.1.7 การกระจัดของการสันตะเทือน | 16 |
| 3.1.8 ความเร็วและความเร่งของการสันตะเทือน | 17 |
| 3.1.9 มุมเฟสของการสันตะเทือน | 18 |
| 3.2 การวิเคราะห์การสันตะเทือน | 18 |
| 3.2.1 การวิเคราะห์ความถี่ของการสันตะเทือน | 18 |
| 3.2.2 การวิเคราะห์ขนาดของการสันตะเทือน(การกระจัด ความเร็ว ความเร่ง) | 18 |
| 3.2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของการสันตะเทือน | 18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของเจ้าของเอกสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|----|
| 3.3 การปรับความสมดุล | 26 |
| 3.3.1 หลักการปรับความสมดุล | 26 |
| 3.3.2 ขั้นตอนเบื้องต้นในการปรับสมดุล | 26 |
| 3.3.3 การปรับสมดุลแบบสถิตยศาสตร์ระนาบเดียว | 33 |
| 3.3.4 การปรับสมดุลแบบพลศาสตร์สองระนาบ | 34 |
| 3.3.5 การปรับความสมดุลกรณีพิเศษ | 34 |
| 3.4 วิธีการคำนวณค่าความไม่สมดุล | 36 |
| 3.4.1 วิธีเวกเตอร์สำหรับการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว | 37 |
| 3.4.2 วิธีเวกเตอร์สำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 39 |
| บทที่ 4 อุปกรณ์และเครื่องมือ ที่ใช้ในการทดลอง และการออกแบบชุดทดลอง | 42 |
| 4.1 แบบจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร | 42 |
| 4.2 ชุดควบคุมการทำงาน | 43 |
| 4.3 ชุดจ่ายไฟ | 46 |
| 4.4 หัวจับสัญญาณการสั่นสะเทือน แบบหัวจับสัญญาณความเร่ง(Accelerometer) | 46 |
| 4.5 ชุดอุปกรณ์วัดสัญญาณการสั่นสะเทือน DAWE-3010 | 47 |
| 4.6 การประกอบชุดทดลอง | 47 |
| 4.7 โปรแกรมวิเคราะห์ผลสัญญาณการสั่นสะเทือน | 48 |
| 4.8 โปรแกรมคำนวณหาความถี่ไม่สมดุล | 51 |
| บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง | |
| 5.1 หลักการขั้นตอนการทำงาน | 53 |
| 5.2 การทดลองในการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ | 53 |
| 5.3 การทดลองในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 55 |
| 5.4 ผลการทดลอง | 56 |
| บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง | 66 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง | 66 |
| 6.2 สรุปผลและวิจารณ์โครงการ | 67 |
| 6.3 ปัญหาในการทำโครงการ | 67 |
| 6.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา | 67 |
| 6.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ | 67 |
| ภาคผนวก | |
| ก. โปรแกรมคำนวณการค่าความไม่สมดุล | |
| ข. รายละเอียดแบบจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล | |
| เอกสารอ้างอิง | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ระบบการจำลองการสั่นสะเทือนอย่างง่าย | 3 |
| รูปที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่าย | 4 |
| รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นรอบ | 5 |
| รูปที่ 2.4 การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม(random) | 5 |
| รูปที่ 2.5 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระแทก(impact) | 5 |
| รูปที่ 2.6 การสั่นสะเทือนของระบบที่มีตัวหน่วง | 6 |
| รูปที่ 2.7 ระบบจำลองการหมุนของมวลที่ไม่สมดุลในวัตถุหมุน | 8 |
| รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่เป็นคาบด้วยคาบคงที่ | 10 |
| รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันคู่และฟังก์ชันคี่ | 11 |
| รูปที่ 3.1 ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์ | 14 |
| รูปที่ 3.2 ความไม่สมดุลแบบค้ำเปิด | 15 |
| รูปที่ 3.3 ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์และความไม่สมดุลแบบค้ำเปิด | 15 |
| รูปที่ 3.4 ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ | 16 |
| รูปที่ 3.5 คาบของการสั่นสะเทือน | 17 |
| รูปที่ 3.6 ความเร็วของการสั่นสะเทือน | 17 |
| รูปที่ 3.7 ความเร่งของการสั่นสะเทือน | 17 |
| รูปที่ 3.8 การสั่นที่ in phase กัน | 18 |
| รูปที่ 3.9 การสั่นที่ Out of phase กัน | 18 |
| รูปที่ 3.11 แสดงผลรวมความถี่ของการสั่นสะเทือน | 19 |
| รูปที่ 3.12 Displacement/ Velocity severity chart | 20 |
| รูปที่ 3.13 Acceleration /Velocity severity chart | 21 |
| รูปที่ 3.14 ลักษณะของการไม่ไต่ระดับเดียวกัน(Misalignment) | 22 |
| รูปที่ 3.15 ผลของ angular misalignment | 23 |
| รูปที่ 3.16 ผลของ offset misalignment | 23 |
| รูปที่ 3.17 สัญญาณความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจาก misalignment | 24 |
| รูปที่ 3.18, 3.19 แสดงลักษณะของ misalignment | 24 |
| รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการเอียงศูนย์ | 25 |
| รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากเบร็งเสื่อมสภาพ | 26 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.22 รูปแบบในการวัดสัญญาณ | 27 |
| รูปที่ 3.23 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนก่อนการปรับแต่งและหลังการปรับแต่ง | 28 |
| รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของรูปแบบการวัด | 29 |
| รูปที่ 3.25 วัตถุหมุนที่มีการกระจายมวลไม่เท่ากัน | 32 |
| รูปที่ 3.26 การกำหนดทิศทางของมวลที่แก้ไข | 33 |
| รูปที่ 3.27 การติดตั้งน้ำหนักที่แก้ไขที่มีต่างกันกับขนาดรัศมีของน้ำหนักทดสอบที่คิดไว้ | 35 |
| รูปที่ 3.28 วิธีการใช้กราฟเพื่อตรวจสอบความไม่สมดุลโดยใช้มิเตอร์วัดการสั่นสะเทือนเท่านั้น | 37 |
| รูปที่ 3.29 เวกเตอร์ซึ่งใช้บอกระดับการสั่นสะเทือน (a และ b) ค่าที่วัด(c,d,e) เป็นค่าจากการคำนวณ | 38 |
| รูปที่ 3.30 แสดงการเลือกระนาบหัวและท้ายในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 40 |
| รูปที่ 4.1 ชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร | 42 |
| รูปที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของชุดควบคุมการทำงาน | 43 |
| รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงการทำงานของชุดควบคุมการทำงาน | 44 |
| รูปที่ 4.4 วงจรควบคุมความถี่กระแสไฟฟ้า | 44 |
| รูปที่ 4.5 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ | 45 |
| รูปที่ 4.6 วงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อวัดสัญญาณเฟส | 45 |
| รูปที่ 4.7 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 24 โวลต์ | 46 |
| รูปที่ 4.8 โครงสร้างของหัวจับสัญญาณความเร่ง | 46 |
| รูปที่ 4.8 ชุดเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน DAWE-3010 | 47 |
| รูปที่ 4.8 การประกอบชุดทดลอง | 47 |
| รูปที่ 4.9 แผนผังแสดงการทำงานของชุดทดลอง | 48 |
| รูปที่ 4.10 แผนผังลำดับการวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว | 49 |
| รูปที่ 4.11 LayOut Window ของการปรับสมดุลแบบ1ระนาบ | 50 |
| รูปที่ 4.12 แผนผังลำดับการวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 50 |
| รูปที่ 4.13 LayOut Window ของการปรับสมดุลแบบ2ระนาบ | 51 |
| รูปที่ 4.14 แผนผังงาน(Flowchart) ของโปรแกรมคำนวณค่าความไม่สมดุล | 52 |
| รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ | 53 |
| รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 55 |
| รูปที่ 5.3 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนของวัตถุหนึ่งระนาบ | 56 |
| รูปที่ 5.4 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ขนาด 4 กรัม | |
| ที่ตำแหน่ง 0 องศา ก่อนปรับสมดุล ในการทดลองปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ | 59 |
| รูปที่ 5.5 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ขนาด 4 กรัม | |
| ที่ตำแหน่ง 0 องศา หลังปรับสมดุล ในการทดลองปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ | 59 |

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 5.7 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนของวัดพระนารายณ์ 62
- รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ที่ระนาบด้านซ้ายขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 45 องศา และที่ระนาบด้านขวาขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 180 ก่อนปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบสองระนาบ 64
- รูปที่ 5.9 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ที่ระนาบด้านซ้ายขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 45 องศา และที่ระนาบด้านขวาขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 180 หลังปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบสองระนาบ 65



สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|-----------|--|----|
| ตาราง 3.1 | ข้อกำหนดความไม่สมดุล ตามระดับคุณภาพความสมดุลและความเร็วโรเตอร์ที่ใช้งานสูงสุด | 31 |
| ตาราง 3.2 | แนวทางปฏิบัติหลังจากที่วัดค่าได้แล้ว | 32 |
| ตาราง 5.1 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 0 องศา | 57 |
| ตาราง 5.2 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 90 องศา | 57 |
| ตาราง 5.3 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 135 องศา | 57 |
| ตาราง 5.4 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 180 องศา | 58 |
| ตาราง 5.5 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุลหรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 225 องศา | 58 |
| ตาราง 5.6 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 270 องศา | 58 |
| ตาราง 5.7 | แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 315 องศา | 59 |
| ตาราง 5.8 | แสดงผลของการทดสอบระดับการสั่นสะเทือนก่อนและหลังปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ | 61 |
| ตาราง 5.9 | แสดงการสั่นสะเทือนเริ่มต้นและขนาดพร้อมกับตำแหน่งมวลที่ต้องใช้ถ่วง สำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ | 63 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน กล่าวว่า เมื่อวัตถุเคลื่อนที่มีความเร่งจะเกิดแรงเฉื่อย (Inertia Force) เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับมวลของวัตถุและความเร่ง เมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับเครื่องจักรกลหมุนซึ่งมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็วคงที่ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการหมุนจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางและกำลังสองของความเร็วเชิงมุม ดังนั้นเครื่องจักรกลหมุนที่มีการแผ่เกลี่ยของมวลไม่กระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไป จะเกิดแรงไม่สมดุลขึ้นได้ จากแรงเฉื่อยอันเกิดจากความไม่สมดุลนี้จะเป็นผลให้เกิดการแกว่งหรือการสั่นสะเทือนใน โครงสร้างของเครื่องและแผ่กระจายไปที่ฐานราก นอกจากนี้อาจเกิดเสียงดังอีกด้วย มีโอกาสในการสึกหรอของแบริ่งสูง เป็นผลทำให้เกิดการเสียหายและใช้งานไม่ได้ในที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีความถี่ของการสั่นเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ ของโครงสร้างก็จะยิ่งเกิดความเสียหายเร็วขึ้นอีก การปรับสมดุลเครื่องจักรกลหมุนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำ เพื่อลดแรงเฉื่อย ซึ่งทำให้เกิดการสั่น ให้คติน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ หรือเท่าที่พอจะรับได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการหมุน อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของวัตถุหมุนที่มีการแผ่เกลี่ยของมวลไม่สม่ำเสมอ

1.2.2 เพื่อศึกษาวิธีการปรับสมดุลเพื่อลดการสั่นสะเทือนของวัตถุหมุนแบบสถิตยศาสตร์และแบบพลศาสตร์

1.2.3 ออกแบบชุดการทดลอง เพื่อหาขนาดและตำแหน่งการเสียสมดุลของวัตถุหมุนชนิดเกร็ง

1.2.4 ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลทางทฤษฎี ปรับปรุงชุดการทดลองให้มีความละเอียดถูกต้อง เพื่อใช้เป็นชุดจำลองเครื่องจักรในการศึกษาการปรับสมดุลวัตถุ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ทำการสร้างชุดจำลองความไม่สมดุลของวัตถุ ทั้งแบบระนาบเดียวและแบบสองระนาบเพื่อใช้เป็นชุดทดลองและเพื่อการศึกษาวิธีการและหลักการของการปรับสมดุลวัตถุ ก่อนที่จะนำไปปฏิบัติจริงกับวัตถุหมุนหรือเครื่องจักรจริง ๆ โดยในโครงการนี้ศึกษาเฉพาะวัตถุหมุนชนิดเกร็งเท่านั้น

2. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ามวลที่ไม่สมดุลและตำแหน่งของความไม่สมดุล โดยป้อนข้อมูลค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้อ่านจากเครื่องมือวัดสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เขียน โปรแกรมเพื่อประมวลผลและแสดงผลหาค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนและมุมเฟสการสั่นสะเทือน โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป DASLab 5.6 ผ่านชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผลสัญญาณ DAWE-3010

4. ทำการทดลองและปรับปรุงชุดการทดลองให้สามารถสาธิตวิธีการปรับสมดุลแบบระนาบเดียวและแบบสองระนาบได้

1.4 วิธีการดำเนินงานและรายละเอียดปริญญานิพนธ์

โครงการนี้จะเริ่มด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ซึ่งก็มีเรื่องหลัก ๆ อยู่ 2 เรื่องด้วยกัน คือ ทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร และ หลักการปรับความสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง ซึ่งมีรายละเอียดดังในบทที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นก็จะนำเอาความรู้ที่ได้ศึกษาทั้งหมดมาออกแบบสร้างชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล และเขียน โปรแกรมการคำนวณเพื่อความสะดวกรวดเร็ว โดยใช้หลักวิธีการเวกเตอร์ ดังรายละเอียดในบทที่ 4

สำหรับบทที่ 5 ก็จะเป็นการทดสอบระบบรวมทั้งหมด โดยการทดสอบจะประกอบชุดทดลองทั้งหมดคือ ชุดจำลองการสั่นสะเทือน ชุดประมวลผลสัญญาณ ชุดจับสัญญาณ เข้าด้วยกันและทำการทดสอบที่สภาวะความไม่สมดุลที่เราทราบค่าแล้วเปรียบเทียบกับผลจากชุดทดลองที่สร้างขึ้น ส่วนบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายก็จะเป็นการสรุปการทำงาน ผลที่ได้รับจากโครงการนี้ แนวทางในการพัฒนางานโครงการนี้เพิ่มเติม และแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป



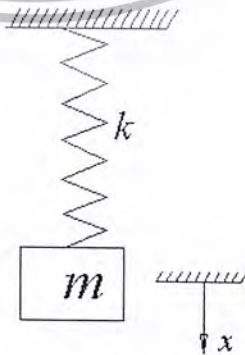
บทที่ 2

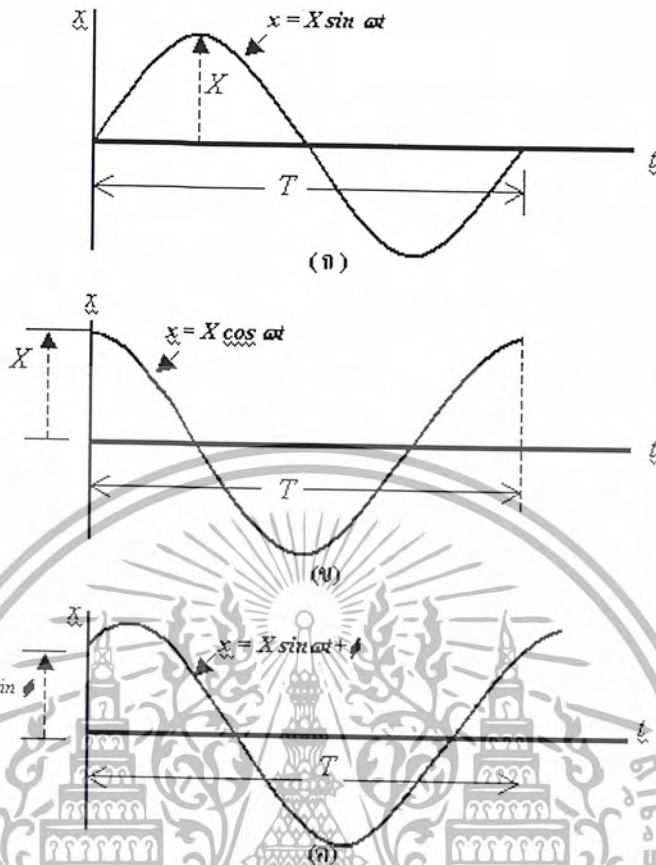
ทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือน

ระบบการสั่นสะเทือนทั่ว ๆ ไปจะมีแรงภายนอกกระทำอยู่ด้วย แรงที่กระทำจะเป็นฟังก์ชันของแรงหรือฟังก์ชันขับ แรงที่กระทำอาจจะอยู่ในรูปต่าง ๆ เช่น ฮาร์โมนิก, ไมฮาร์โมนิก แต่กระทำเป็นจังหวะ มีลักษณะเป็นคลื่นสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม เป็นต้น หรือ หรือแรงอาจจะอยู่ในรูปของแรนดอม (random) ในบางครั้งที่กระทำเป็น แรงกระแทก (impact) การกระทำของแรงชนิดต่างๆ ทำให้เกิดการตอบสนอง (response) ของระบบขึ้น ซึ่งจะพิจารณาต่อไป

2.1 การสั่นสะเทือนของระบบ

สมมุติให้ระบบเครื่องจักรกลประกอบด้วยส่วนที่เป็นมวล m และส่วนที่เป็นอิลาสติกหรือสปริง k เช่นในรูป 2.1 การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นถ้ามีการสะสมพลังงานในระบบ โดยปกติมวล m จะสะสมพลังงานจลน์ สปริงหรือส่วนที่เป็นอิลาสติกจะสะสมพลังงานศักย์ สมมุติให้มวล m เคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้เฉพาะในแนวตั้ง จากตำแหน่งสมดุล ถ้าดึงมวล m ลงในแนวตั้งแล้วปล่อย มวล m จะเคลื่อนที่ขึ้น-ลง , ถ้าการเคลื่อนที่ดังกล่าวเคลื่อนที่ขึ้น-ลงๆ ซ้ำๆ กัน ในเวลาที่เท่ากันจะเรียกการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ว่า “การเคลื่อนที่เป็นรอบ” (Cycle หรือ periodic) ถ้าสปริงมีค่าคงที่ (แรง/หน่วยยัดตัว) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเคลื่อนที่ (Displacement) และเวลาจะเป็นลักษณะ sine หรือ cosine และเรียกว่าเป็นการเคลื่อนที่แบบ “ฮาร์โมนิก” ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่ง x คือระยะเคลื่อนที่ และ t คือเวลา ความแตกต่างระหว่างรูป ก, ข และ ค จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นการเคลื่อนที่ (initial conditions of displacement and velocity) ขนาดสูงสุดของระยะเคลื่อนที่ (x) เรียกว่าขนาด (Amplitude) ส่วนเฟสหรือหรือมุมเฟสจะแทนด้วย ϕ และเรียก ω ว่า “ความถี่รอบ” (circular frequency) หรือ “ความถี่”



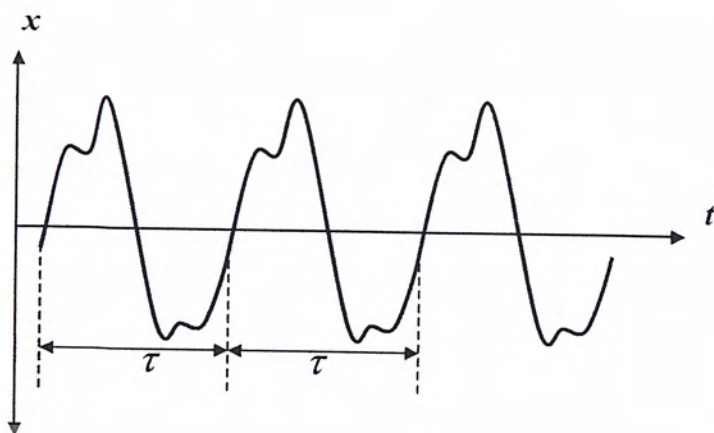


รูป 2.2 การเคลื่อนที่ของระบบอย่างง่าย

ในบางครั้งเงื่อนไขการเคลื่อนที่อาจทำให้ระบบเคลื่อนที่ต่างจากแบบฮาร์โมนิกแต่ยังมีลักษณะเป็นรอบ ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ในรูป 2.3 การเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งถึงอีกจุดหนึ่งที่มีระยะการเคลื่อนที่ (x) เท่ากันในหนึ่งรอบเรียกว่า “รอบการเคลื่อนที่” หรือ “รอบ” (cycle) และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งรอบเรียกว่า “คาบ” ซึ่งแทนด้วย τ มีหน่วยเป็นวินาที จำนวนรอบการเคลื่อนที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่า “ความถี่” ซึ่งแทนด้วย f โดยทั่วไปจะมีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือใช้ตัวย่อ cps. ดังนั้น

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{หรือ} \quad T = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

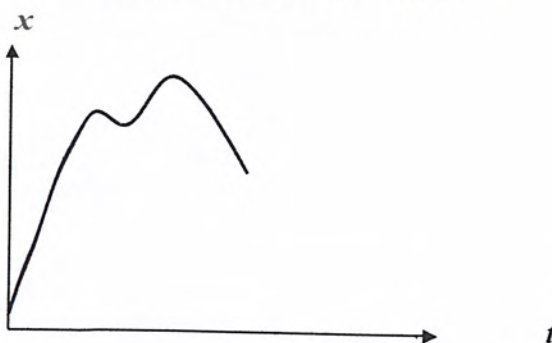


รูป 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่เป็นรอบ

การสั่นสะเทือนอาจมีรูปร่างลักษณะไม่แน่นอน เช่น ในรูป 2.4 การเคลื่อนที่จะไม่มีส่วนที่ซ้ำกัน จะเรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบ “เร็นคอม” ซึ่งอาจเกิดจากแรงที่มีขนาดไม่แน่นอนกระทำต่อระบบ ส่วนการสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระแทก(impact) การตอบสนองของระบบจะใช้เวลาด้านเช่น ในรูป 2.5



รูป 2.4 การสั่นสะเทือนแบบสุ่ม(random)



รูป 2.5 การสั่นสะเทือนที่เกิดจากแรงกระแทก(impact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการสั่นสะเทือนที่มีตัวหน่วงการเคลื่อนที่ เช่น การต้านการเคลื่อนที่ของอากาศ, ซอคแอบซอร์เบอร์ เป็นต้น ลักษณะการเคลื่อนที่จะคล้ายรูป 2.6 ในรูป 2.6 ก. เราสามารถหาค่าการเคลื่อนที่ได้ แต่รูป 2.6 ข จะไม่มีคาบการเคลื่อนที่และเรียกเคลื่อนที่ในรูป 2.6 ข ว่า “การเคลื่อนที่ไม่เป็นรอบ” (non periodic หรือ aperiodic)



รูป 2.6 การสั่นสะเทือนของระบบที่มีตัวหน่วง

การบอกตำแหน่งหรือรูปร่างการเคลื่อนที่ของระบบอาจจำเป็นต้องใช้แกนอิสระหลายแกน จำนวนแกนอิสระเหล่านั้นจะเป็นตัวกำหนดจำนวนดักิริอิสระของระบบ เช่น ในรูป 2.1 จำนวนแกนอิสระเพียงแกนเดียวสามารถบอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของระบบได้ ดังนั้นจึงเป็นระบบที่มีดักิริอิสระเดียว ระบบที่มีดักิริอิสระมากกว่า 2 ดักิริขึ้นไปเรามักจะเรียกว่า ระบบหลายดักิริอิสระ สำหรับระบบที่มีมวลและส่วนอีลาสติคกระจายสม่ำเสมอและต่อเนื่อง เช่น ระบบคาน ระบบเพลลา จะมีจำนวนดักิริอิสระจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะ ระบบคาน ระบบเพลลา ประกอบด้วย อิลิเมนต์ของมวลและส่วนอีลาสติคจำนวนมากนั่นเอง สำหรับระบบหลายดักิริอิสระเงื่อนไขเริ่มต้นการเคลื่อนที่อาจทำให้การเคลื่อนที่ของระบบของระบบในแต่ละแกนอิสระเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก และเรียกลักษณะรูปร่างของการเคลื่อนที่ดังกล่าว “นอร์มอลโหมด หรือ โหมดหลัก” (normal mode หรือ principle mode) ของการสั่นสะเทือนและจำนวนโหมดของการเคลื่อนที่จะเท่ากับจำนวนดักิริอิสระของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปไม่ประสงค์จะให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เพราะการสั่นสะเทือนอาจจะทำให้เครื่องจักรกลหรือโครงสร้างชำรุดเสียหาย แรงอันเนื่องจากการสั่นสะเทือนอาจส่งผ่านฐานเครื่องหรือชิ้นส่วนที่อยู่ใกล้เคียงและถ้าขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่ามากก็อาจจะมีผลต่อการทำงานของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล นอกจากนี้การสั่นสะเทือนยังทำให้เกิดเสียงดังและทำให้ชิ้นส่วนสั่นคลอนอีกด้วย อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมบางประเภทจำเป็นต้องอาศัยการสั่นของเครื่องจักรกล เช่น เครื่องเขย่า (shaking) เป็นต้น

เครื่องจักรกลหรือ โครงสร้างอาจจะประกอบด้วยชิ้นส่วนที่ซับซ้อน แต่สามารถจำลองหรือแทนเครื่องจักรกลดังกล่าวด้วยระบบง่าย ๆ ที่ประกอบด้วย มวล,สปริง และตัวหน่วง และเรียกระบบที่จำลองขึ้นใหม่นั้นว่า “ระบบเสมือน” (Equivalent system) หรือ “ระบบสั่นสะเทือนจำลอง” (Vibration model) ผลของการวิเคราะห์จึงเป็นผลของระบบจำลอง

2.2 การสั่นสะเทือนทางกล

การสั่นสะเทือนทางกลแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่ไม่เหมือนกัน โดยจะมีการจัดความเร็วและความเร่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ลักษณะโดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นคาบ

- Sinusoidal vibration มีแอมพลิจูดคงที่ โดยไม่มี loss ต่าง ๆ
- Fading vibration มีการลดลงของแอมพลิจูดเนื่องจากตัวหน่วงการเคลื่อนที่ และผลของความเสียดทาน สัญลักษณ์ตัวแปร คุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่

แอมพลิจูดที่เวลา t : $x = f(t)$

คาบของการสั่น : $T = \frac{1}{f}$

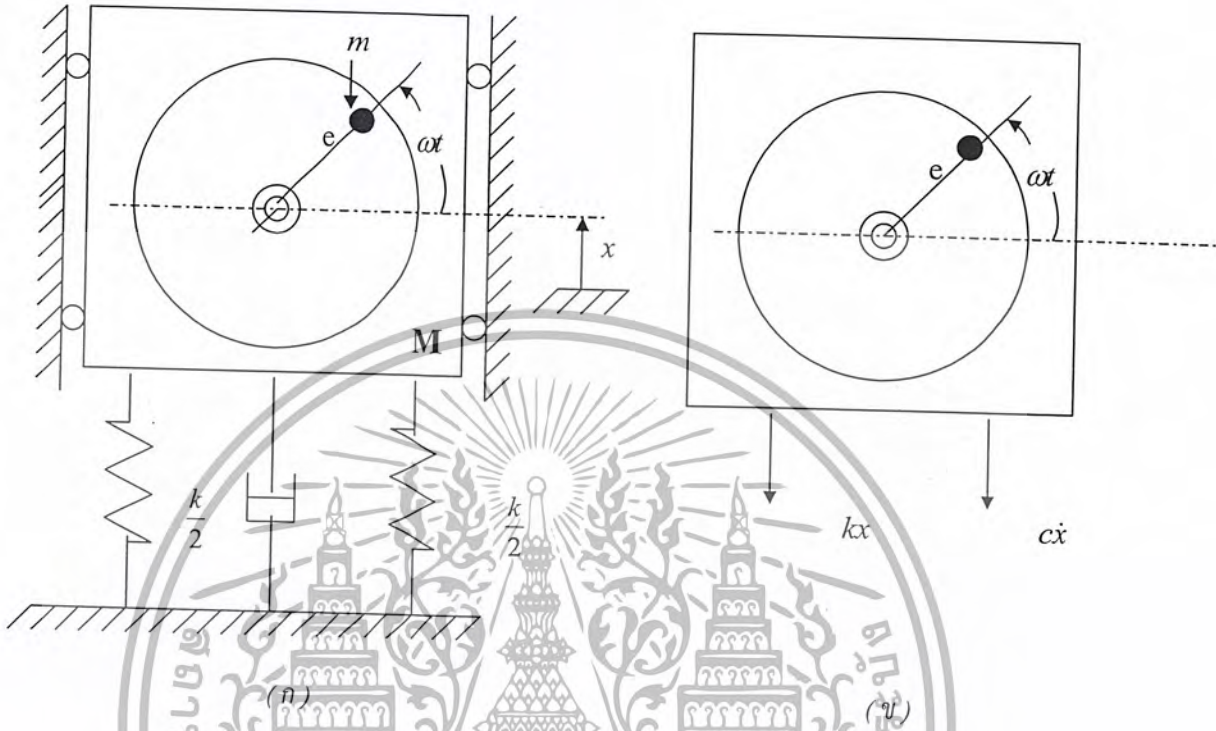
ความเร็วเชิงมุม : $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

มุมเฟส : $\gamma = \omega t + \gamma_0$

| | | |
|-----|------------|--|
| โดย | x | คือแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนในรูปความเร็ว ความเร่ง และการจัด |
| | t | คือเวลา |
| | f | คือความถี่ |
| | T | คือคาบเวลา |
| | γ_0 | คือมุมเฟสที่ $t = 0$ |
| | γ | คือมุมเฟสที่ t ใดๆ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การสั่นสะเทือนเนื่องจากการหมุนรอบแกนของมวลไม่สมมาตร



รูป 2.7 ระบบจำลองการหมุนของมวลที่ไม่สมมาตรในวัตถุหมุน

การหมุนรอบแกนของมวลจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือน โดยแรงนั้น เช่น การหมุนของเพลาคือ เหวี่ยงที่ไม่สมมาตร การหมุนของเพลามีลิ้มหรือมีตกรูยึดติดอยู่ เป็นต้น สมมติมวลดังกล่าวแทนด้วย m ในรูป 2.7 และให้ M เท่ากับมวลรวมของระบบ ดังนั้นมวลของเครื่องจักรจริง ๆ เท่ากับ $(M-m)$, e เป็นระยะเยื้องศูนย์กลางของมวล m ถ้ามวล m เคลื่อนที่รอบแกนด้วยความเร็วเชิงมุม ω เรเดียนต่อวินาที ดังนั้นตำแหน่งของมวลที่เวลา t ใด ๆ ก็คือ ωt (ในรูป 2.7) ถ้าให้มวล $(M-m)$ เคลื่อนที่ได้เฉพาะขึ้นลงได้เท่านั้น และถ้าเคลื่อนที่ขึ้นจะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นระยะเคลื่อนที่ในแนวตั้งของมวล m คือ $(x+e \sin \omega t)$ และสมการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบคือ

$$(M - m) \frac{d^2 x}{dt^2} + m \frac{d^2}{dt^2} (x + e \sin \omega_f t) = -kx - c \frac{dx}{dt} \quad (2.2)$$

หรือจัดรูปใหม่ได้

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = (me\omega^2) \sin \omega t \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของสมการ (2.3) สามารถหาคำตอบการเคลื่อนที่ (x) ได้คือ

$$x = X \sin(\omega_f t - \phi) \quad (2.4)$$

$$x = \frac{me \omega_f^2}{\sqrt{(k - M\omega_f^2)^2 + (c\omega_f)^2}}$$

$$x = \frac{\frac{me}{M} \omega_f^2 \frac{M}{k}}{\sqrt{\left(\frac{k - M\omega_f^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega_f}{k}\right)^2}}$$

$$r = \frac{\omega_f}{\omega_n};$$

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

$$x = \frac{me/M}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.6)$$

$$\tan \phi = \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (2.7)$$

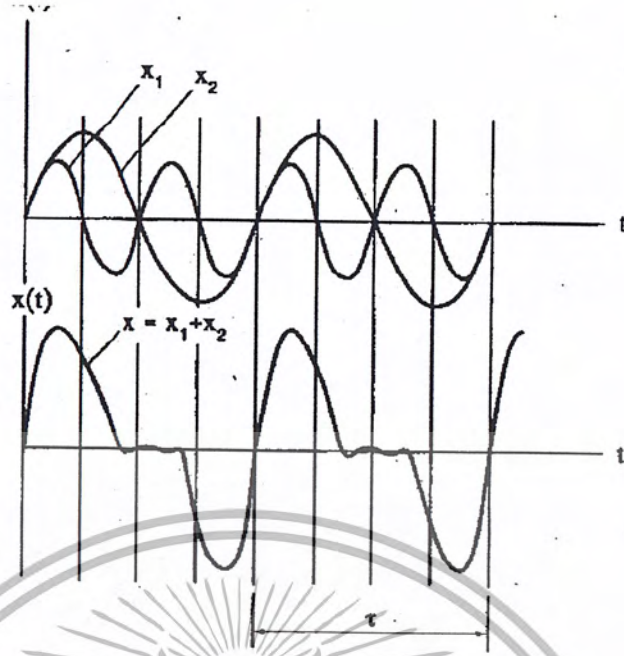
โดยความถี่ธรรมชาติของระบบที่ไม่มีตัวหน่วง $\omega_n = \sqrt{k/m}$ และ x คือ ระยะเคลื่อนที่ของมวลหลัก ($M-m$) ส่วนมุมเฟส ϕ จะเป็นมุมของแกนมวลเชิงศูนย์กลาง m เทียบกับมุม $\omega_f t$

2.4 การเคลื่อนที่เป็นคาบ

โดยทั่วไปแล้วการสั่นสะเทือนทางกลจะประกอบด้วยหลายความถี่ซึ่งเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ($f, 2f, 3f, \dots, nf$) โดยที่ f คือความถี่มูลฐาน ส่วนถัดไปจะเป็นฮาร์มอนิก $2f, 3f$ เป็นต้น

ตัวอย่างเช่น การสั่นสะเทือนแบบอิสระที่มี $\text{DOF} = 2$ จะมีความถี่ธรรมชาติสองค่า การสั่นสะเทือนที่ได้จึงมีรูปคลื่นซับซ้อนขึ้นและมีการเคลื่อนที่ซ้ำๆ กันในคาบหนึ่งๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

เจ. ฟูเรียร์ (J. Fourier พ.ศ. 2311 ถึง พ.ศ. 2373) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เสนอแนวคิดให้แทนการเคลื่อนที่เป็นคาบด้วยอนุกรมของไซน์และโคไซน์ โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์ทางฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่เป็นคาบด้วยคาบคงที่ τ

ถ้ากำหนดให้ $x(0)$ เป็นฟังก์ชันเป็นคาบที่มีคาบเท่ากับ τ

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos \omega_2 t + \dots + b_1 \sin \omega_1 t + b_2 \sin \omega_2 t + \dots \quad (2.8)$$

โดยที่ $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}$ และ $\omega_n = n\omega_1 = \frac{2\pi n}{\tau}$

จากความสัมพันธ์เชิงตั้งฉาก (Orthogonal relations)

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \cos \omega_n t \cos \omega_m t dt = \begin{cases} 0 & \text{ถ้า } m \neq n \\ \tau/2 & \text{ถ้า } m = n \end{cases} \quad (2.9 ก)$$

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \sin \omega_n t \sin \omega_m t dt = \begin{cases} 0 & \text{ถ้า } m \neq n \\ \tau/2 & \text{ถ้า } m = n \end{cases} \quad (2.9 ข)$$

$$\int_{-\tau/2}^{\tau/2} \cos \omega_n t \sin \omega_m t dt = 0 \text{ เสมอ} \quad (2.9 ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ a_n และ b_n โดยคุณสมบัติที่ 2.8 ด้วย $\cos \omega_n t$ หรือ $\sin \omega_n t$ และอินทิเกรตแต่ละพจน์ในช่วงคาบ τ โดยอาศัยความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.9) จะได้

$$a_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t) \cos \omega_n t dt \quad (2.10 \text{ ก})$$

$$b_n = \frac{2}{\tau} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} x(t) \sin \omega_n t dt \quad (2.10 \text{ ข})$$

พิจารณา $x(t)$ ประกอบด้วยฟังก์ชันคู่ (even function; $E(t)$) และฟังก์ชันคี่ (Odd function; $O(t)$) นั่นคือ

$$x(t) = E(t) + O(t) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันคู่และฟังก์ชันคี่

จากรูปที่ 2.9 สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ถ้า $x(t)$ เป็นฟังก์ชันคู่ พบว่า

$$a_n = \frac{\omega_1}{\pi} \int_{-\pi/\omega_1}^{\pi/\omega_1} x(t) \cos n\omega_1 t dt = \frac{2\omega_1}{\pi} \int_0^{\pi/\omega_1} x(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (2.12)$$

ถ้าสำหรับ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b_n = \frac{\omega_1}{\pi} \int_{-\pi/\omega_1}^{\pi/\omega_1} x(t) \sin n\omega_1 t dt = 0 \quad (2.12)$$

สำหรับ $n = 1, 2, 3, \dots$

โดยที่ $\tau = 2\pi/\omega_1, \omega_n = n\omega_1$

2) ถ้า $x(t)$ เป็นฟังก์ชันคี่ พบว่า

$$a_n = 0, \text{ สำหรับ } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.13)$$

$$b_n = \frac{2\omega_1}{\pi} \int_0^{\pi/\omega_1} x(t) \sin n\omega_1 t dt \text{ สำหรับ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.14)$$



บทที่ 3

การปรับสมดุลวัตถุหมุน

ความไม่สมดุลของส่วนที่หมุนเป็นสาเหตุทำให้เครื่องจักรเกิดความสั่นสะเทือนมากที่สุด ซึ่งการออกแบบเครื่องจักรในปัจจุบันก็ได้ให้ความสำคัญในเรื่องนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบเครื่องจักรที่มีความเร็วในการหมุนสูงและต้องการความน่าเชื่อถือสูง ความไม่สมดุลจะถูกนำมาพิจารณาเป็นหลัก

การปรับความสมดุลของวัตถุหมุนเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดล้าชุกป็นรับภาระหนักเกินไป เป็นการหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดจากการล้าชุกของวัตถุ (fatigue failure) ช่วยให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น

3.1 พื้นฐานและคำจำกัดความ

3.1.1 ความไม่สมดุล (Unbalancing) ความไม่สมดุลของวัตถุหมุน (Rotor) เป็นผลมาจากการกระจายมวลที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้โรเตอร์เกิดการสั่นขึ้น การสั่นเกิดจากแรงปฏิกิริยาของส่วนประกอบมวลที่ไม่สมดุล มีความเร่งไปในแนวรัศมีร่วมกับแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นไปพร้อมกัน เมื่อส่วนประกอบมวลหมุน ก็จะทำให้เกิดแรงที่มาจาก การหมุนและความพยายามเคลื่อนที่ของโรเตอร์ไปตามแนวเส้นแรง การสั่นสะเทือนจะส่งผลผ่านไปยังตลับลูกปืนของวัตถุหมุนที่จุดใดจุดหนึ่งที่จุดใดจุดหนึ่งของตลับลูกปืนต่อการหมุนหนึ่งรอบ

3.1.2 การปรับความสมดุล (Balancing) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการหาการวางตัวของมวลของโรเตอร์ที่หมุนในตลับลูกปืนที่ไม่ได้มีการชดเชยแรงหนีศูนย์กลาง วิธีการปรับความสมดุลอาจทำได้โดยการเพิ่มมวลเข้าไปที่จุดที่เหมาะสมของวัตถุหมุน หรืออาจจะเป็นการเอามวลออกไปก็ได้เช่นการเจาะรูหรือการขันมวลที่ไว้ไว้ในร่องเกลียวออก

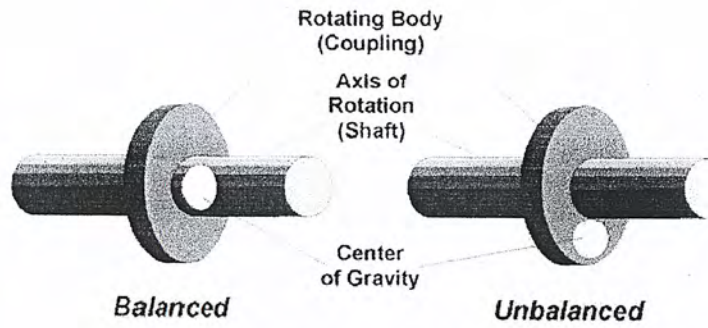
3.1.3 Field Balancing เป็นกระบวนการปรับความสมดุลของโรเตอร์ในตลับลูกปืนและโครงสร้างฐานที่รองรับ มากกว่าจะเป็นการปรับความสมดุลของเครื่องจักร

3.1.4 ประเภทของความไม่สมดุล ความไม่สมดุลของวัตถุหมุน แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์ ความไม่สมดุลแบบค้ำเปิด ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์

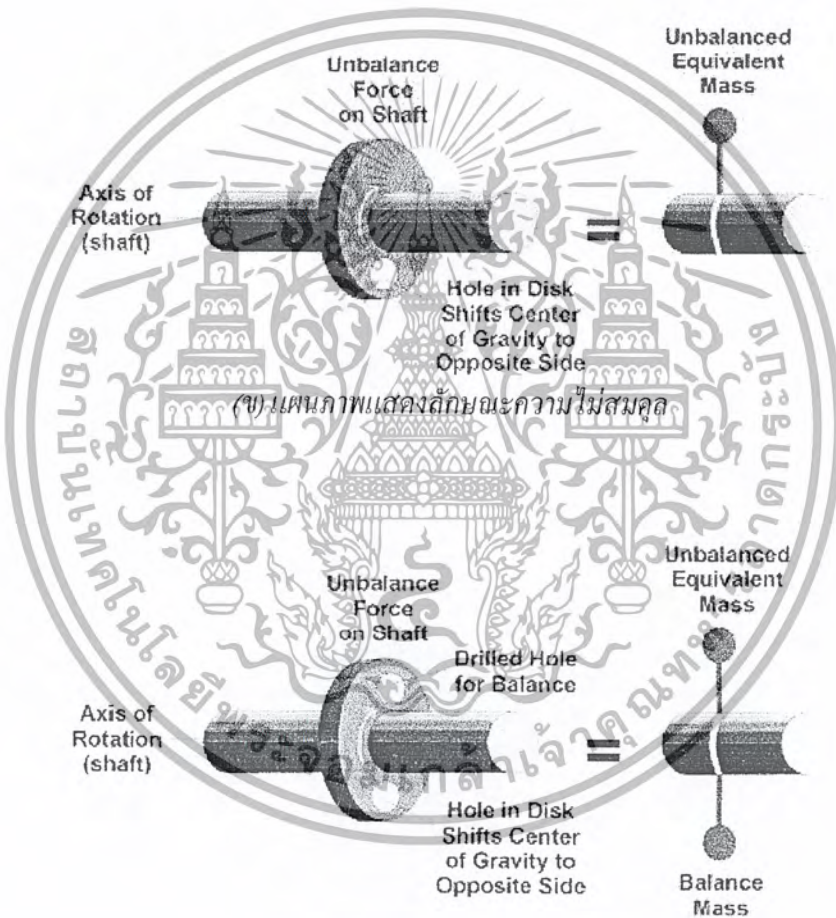
ก. ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์ (Static Unbalance) เป็นการเอียงศูนย์กลางของจุดศูนย์กลางโรเตอร์จากตำแหน่งของมวลจุดใดจุดหนึ่งตามแนวรัศมีที่วัดจากจุดศูนย์กลางของการหมุน (ดูรูปที่ 2.1) ในการปรับสมดุลนั้นมวลที่จะนำมาปรับความสมดุลจะวางไว้ที่มุม 180 องศาของมวลที่ไม่สมดุลในรัศมีที่เท่ากันจะทำให้จุดศูนย์กลางถ่วงกลับมาที่จุดศูนย์กลางของการหมุนดั้งเดิม การแก้ไขความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์จะมุ่งไปที่การแก้แรงปฏิกิริยาในระนาบเดียว และเป็นการเพิ่มมวลที่เหมาะสมในระนาบเดียวกันนี้เท่านั้น ตัวอย่างของของรูปแบบการหมุนที่มีศูนย์กลางของมวลอยู่ในระนาบเดียว หรือ โค้งเดียวระนาบเดียว เช่น ล้อช่วยแรง, ล้อรถยนต์, เครื่องเจียรใน, ล้อขับสายพาน ฯลฯ สามารถแก้ปัญหาได้ตามวิธีดังกล่าว หรือ กล่าวได้ว่า ถ้าโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว 7 ถึง 10 เท่า ก็มักจะแก้ไขใน

ระนาบเดียวหรือแบบสถิตยศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ลักษณะของสมดุลแบบสถิตยศาสตร์



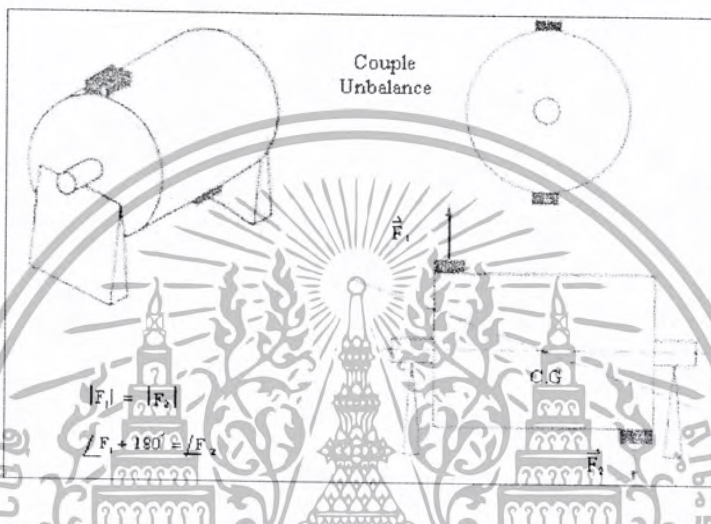
(ค) แสดงการปรับสมดุลแบบสถิตยศาสตร์

รูปที่ 3.1 ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์

ข. ความไม่สมดุลแบบคัปเปิล (Couple Moment Unbalance) เป็นความไม่สมดุลที่พบในกรณีที่มีโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าความยาว 7 ถึง 10 เท่า หรือรูปทรงกระบอก (ดังรูปที่ 3.2) การปรับสมดุลอาจเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีวางมวลขนาดเท่ากันในลักษณะสมมาตรให้อยู่ห่างจากกึ่งกลางของจุด

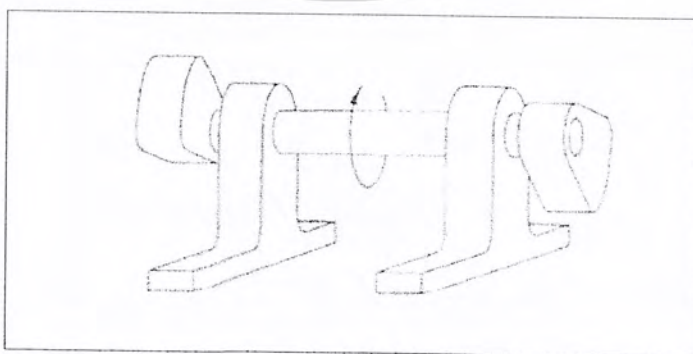
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์ถ่วง และให้ตำแหน่งต่างกัน 180 องศาจากกันและกัน โรเตอร์จะเสมือนอยู่ในลักษณะสมดุลแบบสถิตยศาสตร์ไม่มีการเอียงกันของจุดศูนย์กลางของจุดศูนย์ถ่วง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อโรเตอร์หมุน การหมุนของของมวลสองอันในแนวแกนจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างมากในตลับลูกปืนการแก้ไขความไม่สมดุลนี้ทำได้โดยการ วัดความสั่นสะเทือน โรเตอร์ที่กำลังหมุนและเพิ่มมวลเข้าไปเพื่อแก้ไขทั้งสองระนาบ



รูปที่ 3.2 ความไม่สมดุลแบบคัปเปิล

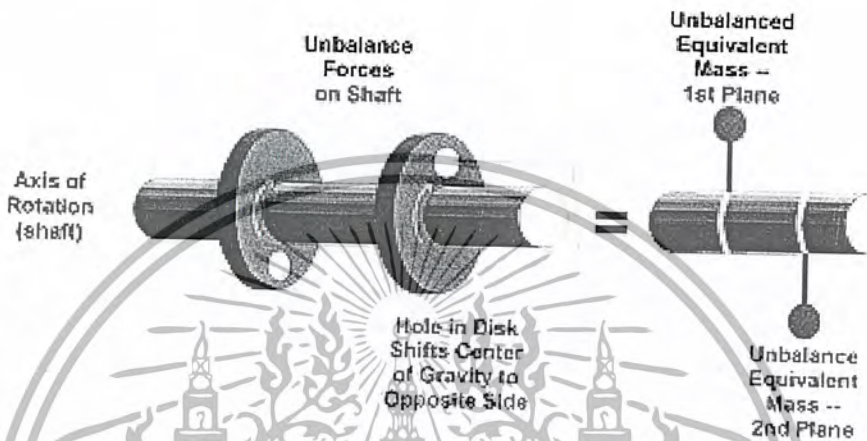
ความแตกต่างระหว่างความสมดุลแบบสถิตยศาสตร์และความสมดุลแบบคัปเปิล แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 โดยลักษณะของโรเตอร์เมื่อหยุดนิ่ง มวลที่ปลายทั้งสองข้างจะสมดุล อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการหมุน จะเกิดความไม่สมดุลขึ้นอย่างมาก



รูปที่ 3.3 ความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์และความไม่สมดุลแบบคัปเปิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance) ความไม่สมดุลประเภทนี้แสดงในรูปที่ 3.4 เป็นการรวมความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์และความไม่สมดุลแบบค้ำเปิดเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่มักพบเห็นอยู่ทั่วไป การแก้ไขความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์จำเป็นต้องวัดค่าความสั่นสะเทือนขณะเครื่องจักรกำลังเดินเครื่องและเพิ่มมวลเข้าไปในทั้งสองระนาบ



รูปที่ 3.4 ความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์

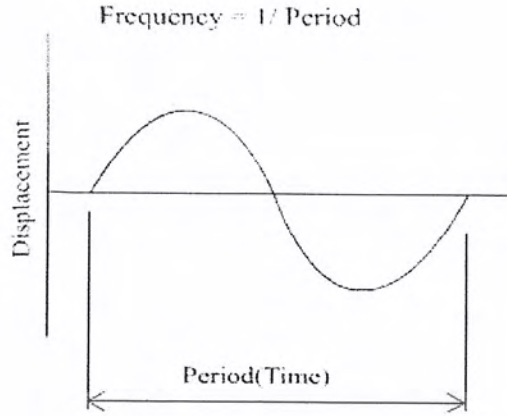
3.1.5 ประเภทของวัตถุหมุน (Type of Rotors) วัตถุหมุนสามารถแบ่งตามลักษณะได้ 2 ชนิดคือแบบวัตถุหมุนเกร็ง (Rigid rotor) และวัตถุหมุนชนิดหยุ่น (Flexible rotor) ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัตถุหมุนเกร็งเท่านั้น

วัตถุหมุนเกร็ง คือ วัตถุหมุนที่ใช้ความเร็วใช้งานจะอยู่ในช่วงน้อยกว่า 50 % ของความเร็ววิกฤติเท่านั้น หากความเร็วมากกว่านี้จะเรียกว่าแบบ Flexible ในการปรับความสมดุลสำหรับวัตถุหมุนชนิดหยุ่นจะซับซ้อนกว่ามากเพราะต้องพิจารณาการเบี่ยงเบนเนื่องจากการยืดหยุ่นของโรเตอร์ด้วย

3.1.6 ความถี่การสั่นสะเทือน จากรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า เวลา 1 คาบ(period) คือ ระยะเวลาที่ทำให้เกิดสัญญาณครบ 1 รอบ ส่วนความถี่ (Frequency) คือ จำนวนรอบที่เกิดขึ้นในหนึ่งช่วงเวลา ดังนั้นจะเห็นได้ว่า $\text{frequency} = 1/\text{period}$ หน่วยของความถี่นิยมใช้เป็นจำนวนรอบต่ออนาที (Cycles per minute, CPM) หรือใช้เป็นจำนวนรอบต่อวินาที (cycle per second, Hz)

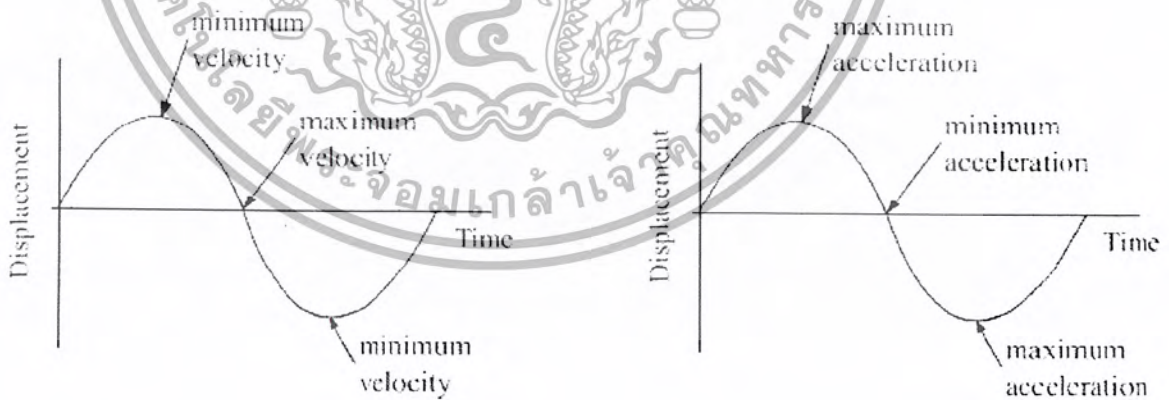
3.1.7 การกระจัดของการสั่นสะเทือน การกระจัดของการสั่นสะเทือนคือระยะการเคลื่อนที่ได้ของชิ้นส่วนที่เกิดการสั่นสะเทือน จากจุดสิ้นสุดด้านหนึ่งไปยังจุดสิ้นสุดอีกด้านหนึ่ง (peak to peak displacement) ซึ่งปกติจะแสดงในหน่วย mil โดย 1 mil จะเท่ากับ 0.001 นิ้ว ในระบบเมตริก จะใช้หน่วยไมโครเมตร (μm) โดย 1 ไมโครเมตร จะเท่ากับ 0.001 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ความของการสั่นสะเทือน

3.1.8 ความเร็วและความเร่งของการสั่นสะเทือน ความเร็วของการสั่นสะเทือน พิจารณาได้ดังรูปที่ 3.6 โดยความเร็วสูงสุดจะเกิดเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านจุดสมดุล ในขณะที่ความเร่งสูงสุดจะเกิดที่จุดปลายแต่ละด้านของการเคลื่อนที่เนื่องจากการสั่นสะเทือน ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 3.7 หน่วยของความเร็วนิยมวัดเป็น นิ้ว/วินาที หรือ มิลลิเมตร/วินาที ส่วนในหน่วยของความเร่ง ปกติใช้เป็น “g” ซึ่ง 1g จะเท่ากับความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ผิวโลก โดยสากลจะกำหนดไว้เท่ากับ 980.665 cm/sec^2

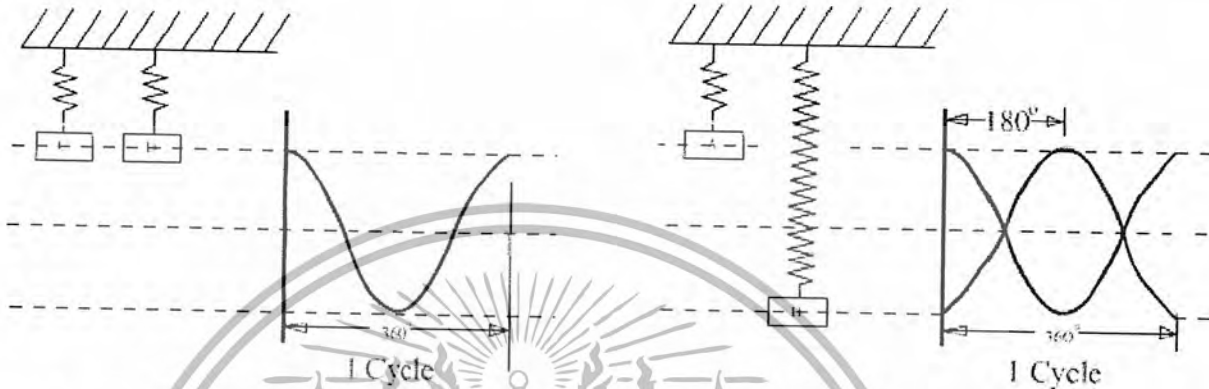


รูปที่ 3.6 ความเร็วของการสั่นสะเทือน

รูปที่ 3.7 ความเร่งของการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.9 มุมเฟสของการสั่นสะเทือน มุมเฟสจะแสดงถึงตำแหน่ง ของการสั่นสะเทือนเทียบกับจุดอ้างอิงจุดหนึ่ง หรือ ใช้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับความสั่นสะเทือนอื่น ๆ ดังรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความสั่นสะเทือนของวัตถุ 2 สิ่งที่มีมุมเฟสมุมเดียวกัน และเฟสต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 3.8 การสั่นที่ in phase กัน

รูปที่ 3.9 การสั่นที่ Out of phase กัน

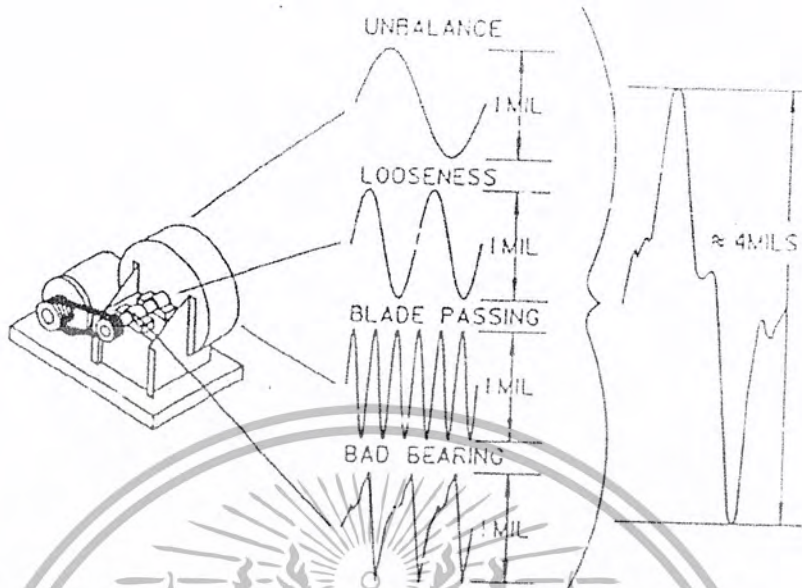
3.2 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

เราสามารถวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น โดยการพิจารณาลักษณะการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร ได้ดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือน เมื่อเรารู้ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ตัวหนึ่งหมุนด้วยความเร็วที่ 3600 RPM และมอเตอร์ตัวนี้ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์ทด ไปขับพัดลมที่มีความเร็วรอบ 2400 RPM ถ้าระบบนี้มีความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 3600 RPM เราสามารถสรุปได้ในขั้นต้นว่า เกิดปัญหาขึ้นที่ตัวมอเตอร์

สัญญาณการสั่นสะเทือนที่ซับซ้อนมักมีการรวมความถี่ ฮาร์โมนิก ฮาร์โมนิกคือความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน ($n \cdot f_{pm}$) โดยฮาร์โมนิกที่ 1 จะมีความถี่เท่ากับความถี่พื้นฐาน ($1 \cdot RPM$)

3.2.2 การวิเคราะห์ขนาดการสั่นสะเทือน(การกระจัด ความเร็ว และความเร่ง) เมื่อเครื่องจักรกำลังทำงาน ขนาดการสั่นสะเทือนจะเป็นตัวบ่งบอกสภาวะของเครื่องจักร ถ้ามีขนาดมากจะเกิดความสั่นสะเทือนสูง และเกิดความเสียหายได้เร็วพิจารณาเส้นลวดหรือแผ่น โลหะ เมื่อนำมาบิดขึ้นลงจะทำให้เส้นลวดหรือแผ่น โลหะขาดจากกัน แต่ถ้าเราต้องการยืดระยะเวลาที่เส้นลวดหรือแผ่น โลหะขาดจากกัน อาจทำได้ 2 วิธี คือ ประการแรก ลดขนาดการบิดให้น้อยลง และอีกประการหนึ่ง คือ ลดอัตราการบิดให้น้อยลง การลดขนาดการบิดเปรียบเสมือนการลดขนาดของความสั่นสะเทือนและ การลดอัตรา การบิดก็เปรียบเสมือนการลดขนาดของความถี่ ดังนั้นปัญหา ของการวิเคราะห์จึงอยู่ที่เมื่อไร จะวิเคราะห์ ความสั่นสะเทือนด้วย ความเร็ว ความเร่ง หรือ การกระจัด



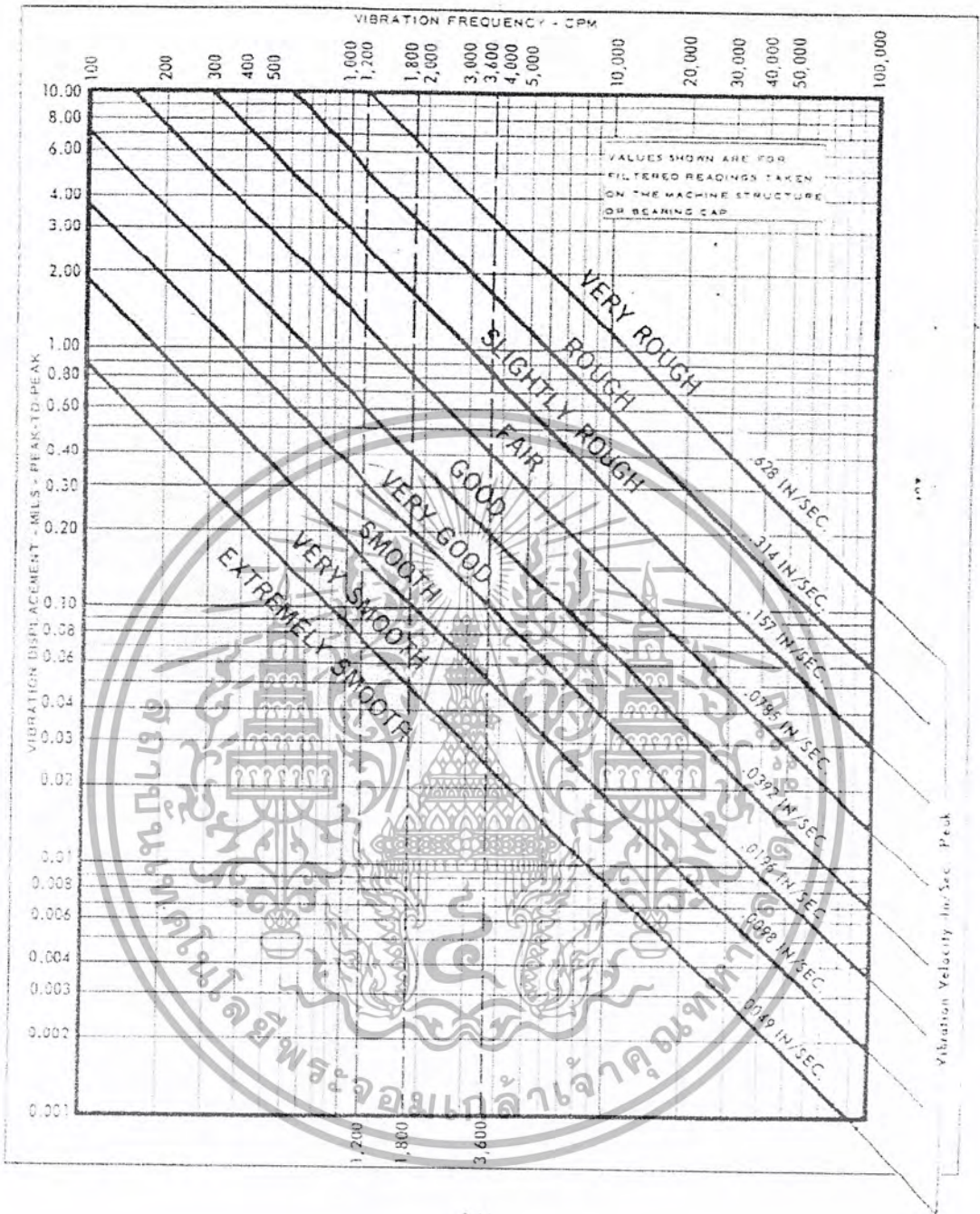
รูปที่ 3.11 แสดงผลรวมความถี่ของการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์ด้วยความเร็ว การวิเคราะห์ด้วยความเร็วจะใช้เมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนอยู่ในช่วง 600 ถึง 60,000 CPM

การวิเคราะห์ด้วยการกระจัด ใช้ในการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะความเค้น โคนามิค ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรที่กำลังหมุนด้วยความเร็ว 60 RPM และมีระยะกระจัดของความสั่นสะเทือน 20 mil peak to peak จากความไม่สมดุลของโรเตอร์ซึ่ง จะมีค่าความสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.585 in/sec สภาวะดังกล่าวจะทำให้ให้เบริงมีการขูดตัว 20 mils ซึ่งเป็นผลมาจากความเค้น(การกระจัด) มากกว่าที่จะเกิดจากความล่า(ความเร็ว) นั่นคือในสภาวะความถี่ต่ำ (<60 CPM) จะใช้การวิเคราะห์ ความสั่นสะเทือนด้วยระยะการกระจัด

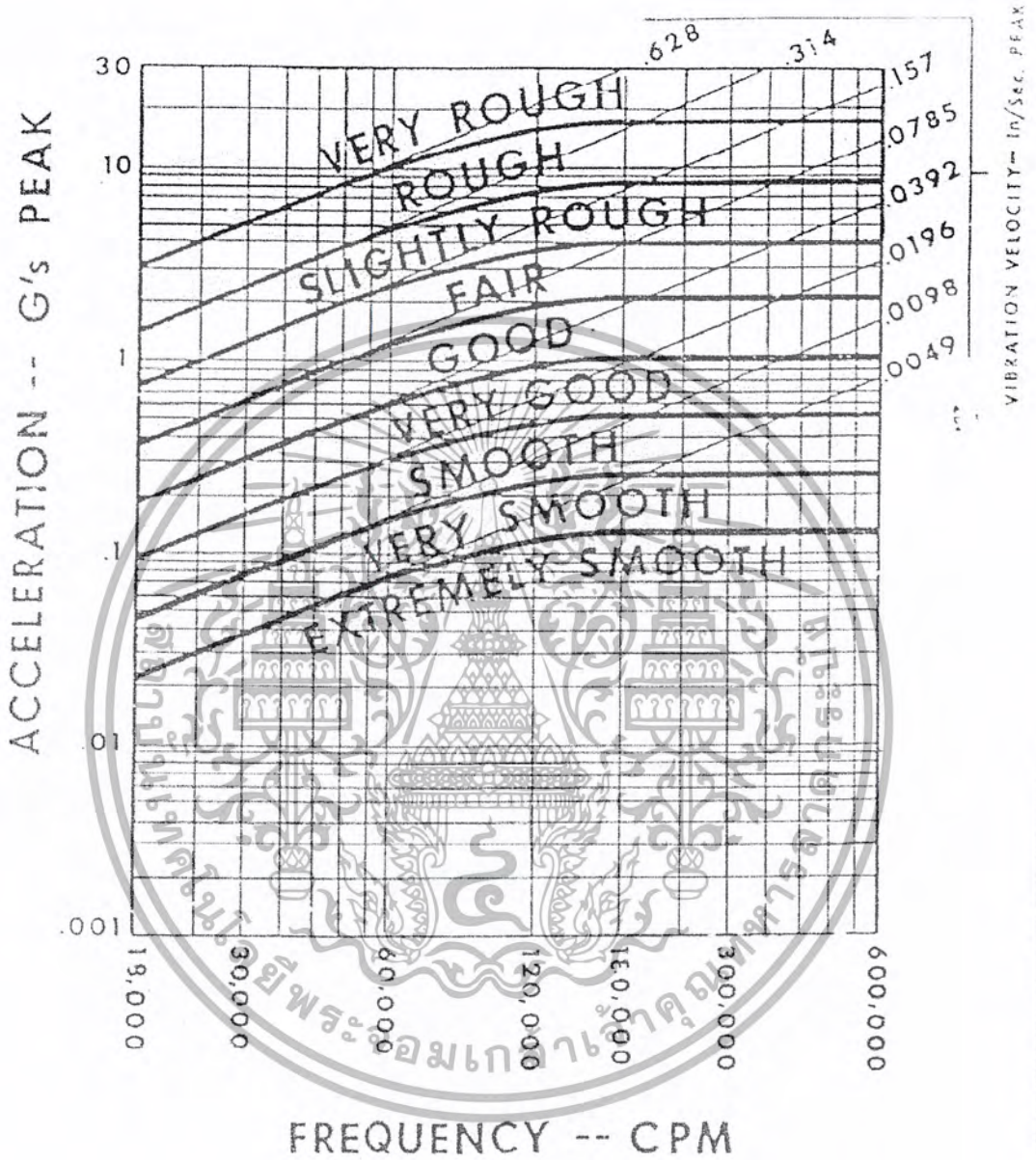
การวิเคราะห์ด้วยความเร่ง การวัดความสั่นสะเทือนด้วยความเร่ง เหมาะสำหรับเครื่องจักรที่มีความถี่สูงเพราะที่ความถี่สูง ความเสียหายส่วนใหญ่จะมีผลมาจากแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งแรงนี้มีผลโดยตรงต่อค่าความเร่งของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

Figure 2-12
Displacement/velocity severity chart.



รูปที่ 3.12 Displacement/ Velocity severity chart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 Acceleration /Velocity severity chart

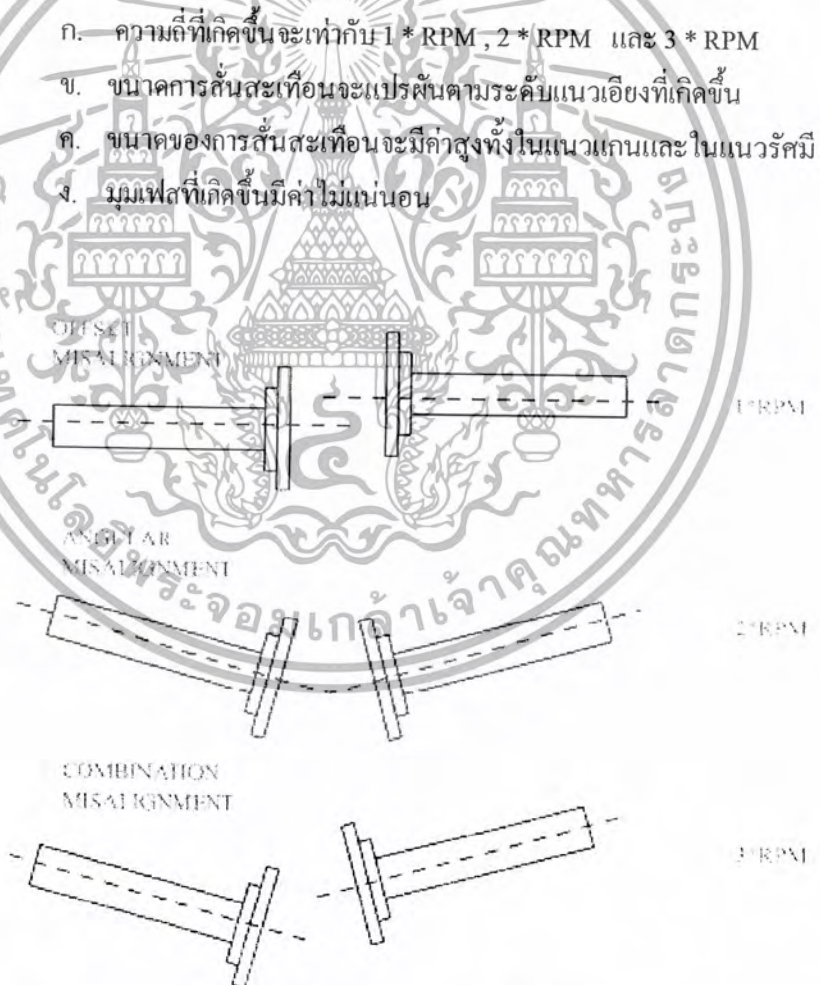
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของความสั่นสะเทือน

1) การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากความไม่สมดุล (Vibration Due to Unbalance) ความไม่สมดุลของเครื่องจักรข้อมทำให้เครื่องจักรเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ซึ่งมีสภาวะดังนี้

- ความถี่ของการสั่นสะเทือนจะเท่ากับ $1x$ RPM
- ขนาดของความสั่นสะเทือนจะขึ้นกับขนาดของความไม่สมดุล
- ขนาดของความสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงตามแนวรัศมีของการวัด
- มุมเฟสจะมีค่าคงที่ และขึ้นกับจุดอ้างอิง

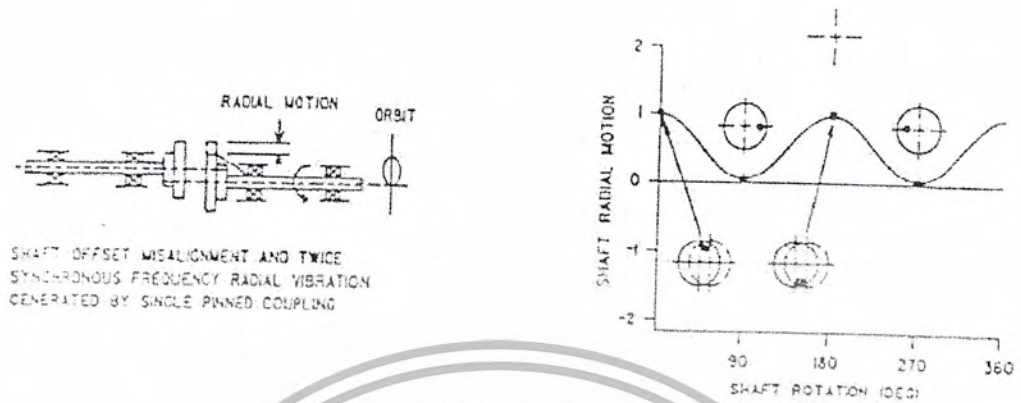
2) การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการไม่ได้ระดับเดียวกัน (Vibration Due to Misalignment) พิจารณาได้จากแนวเส้นตรงของเพลาคู่ละอันหรือแบร็งค์แต่ละตัวอยู่บนแนวเดียวกันหรือไม่ Misalignment จะพิจารณาทั่วไปได้ 3 ชนิด คือการขนานการอยู่คนละแนว ทั้งสองแนวตัดกันเป็นมุม หรือเกิดขึ้นสองอย่างพร้อมกัน ดังรูปที่ 3.14 ความสั่นสะเทือนเนื่องจากสาเหตุดังกล่าวมีสภาวะสังเกตได้ดังนี้



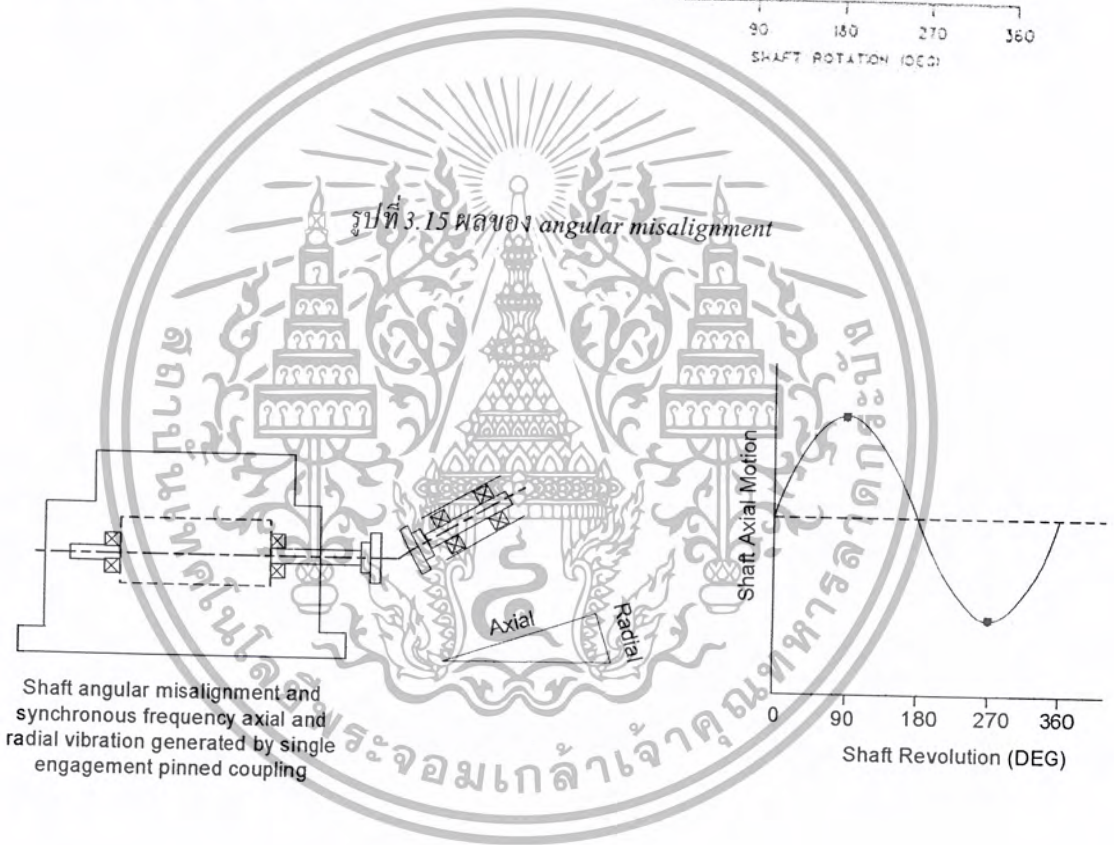
รูปที่ 3.14 ลักษณะของการไม่ได้ระดับเดียวกัน (Misalignment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ Misalignment ยังอาจเกิดจากความแอ่นโค้งของเพลาลงและแบร์ริงเสื่อมสภาพ



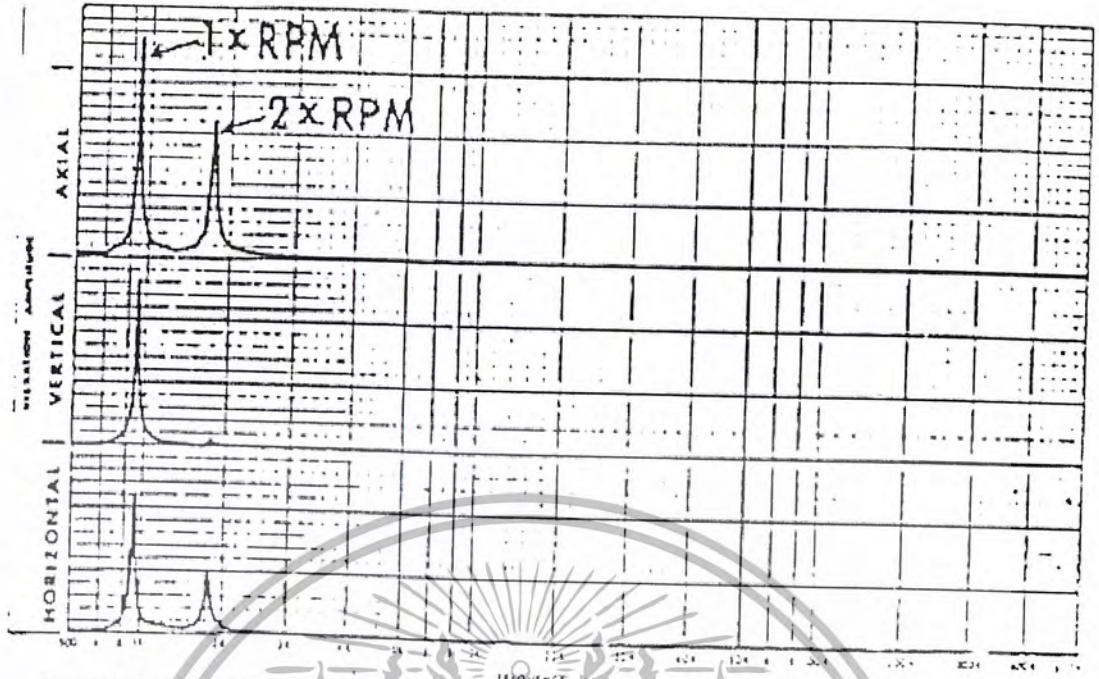
รูปที่ 3.15 ผลของ angular misalignment



รูปที่ 3.16 ผลของ offset misalignment

รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของ angular Misalignment เพลาลงของตัวขับเคลื่อนจะต่อกับเพลาลงของเครื่องจักร เมื่อตัวขับเคลื่อนจะทำให้เครื่องจักรเกิดความสั่นสะเทือนด้วยความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อน ส่วนรูป 3.16 เป็นลักษณะของ Offset Misalignment ซึ่งจะให้ความสั่นสะเทือนในแนวรัศมีมีค่าเป็นสองเท่าของความเร็วรอบของตัวขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 สัญญาณความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจาก misalignment

รูปที่ 3.17 เป็นผลของ Misalignment ระหว่างมอเตอร์กับพัลคมจะเห็นได้ว่าความสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเด่นชัดในแนวแกน



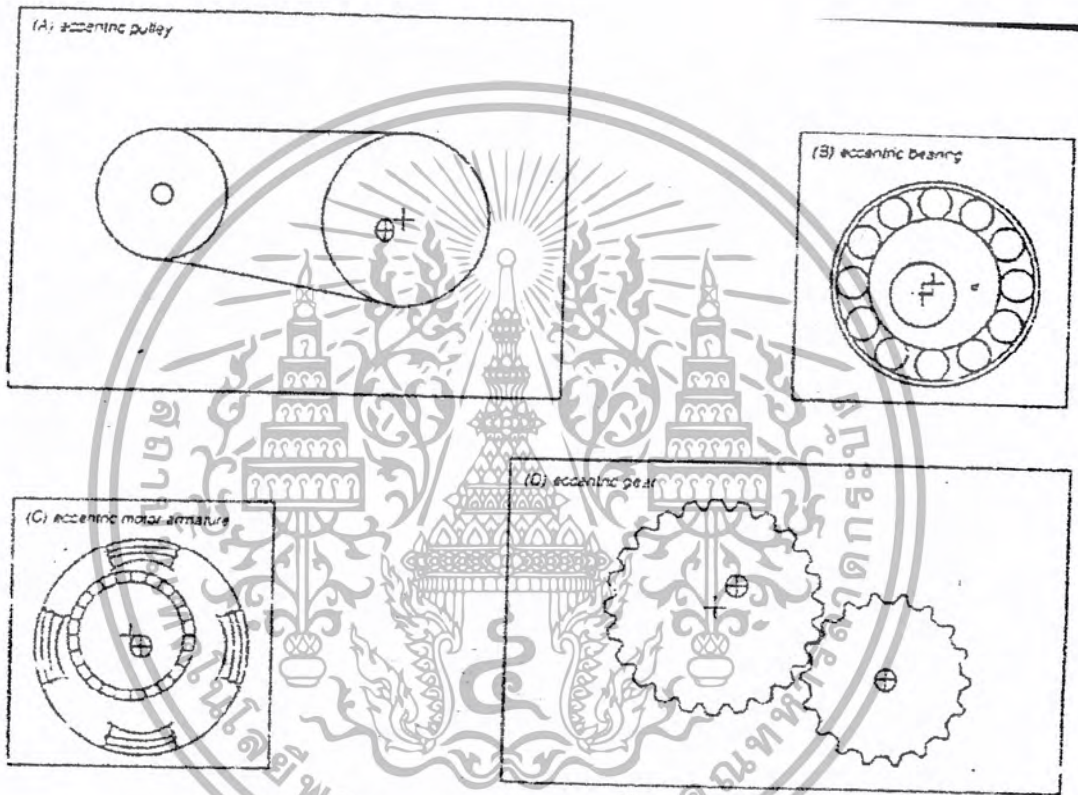
รูปที่ 3.18, 3.19 แสดงลักษณะของ misalignment

รูปที่ 3.18 และ 3.19 เป็นตัวอย่างของ misalignment ที่เกิดจากแบริ่ง ผลทำให้เกิดความสั่นสะเทือนในแนวแกน และสามารถกำจัดได้โดยการติดตั้งแบริ่งให้เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ความสั่นสะเทือนเนื่องจากการเอียงศูนย์ การเอียงศูนย์เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ตัวอย่างดังรูปที่ 3.20 จริง ๆ แล้วการเอียงศูนย์ทำให้เกิดความไม่สมดุล เนื่องจากทางด้านหนึ่งของแนวเส้นผ่าศูนย์กลางจะมีมวลมากกว่าอีกด้านหนึ่ง ดังนั้นในการถ่วงสมดุลควรพิจารณาสาเหตุนี้ด้วย

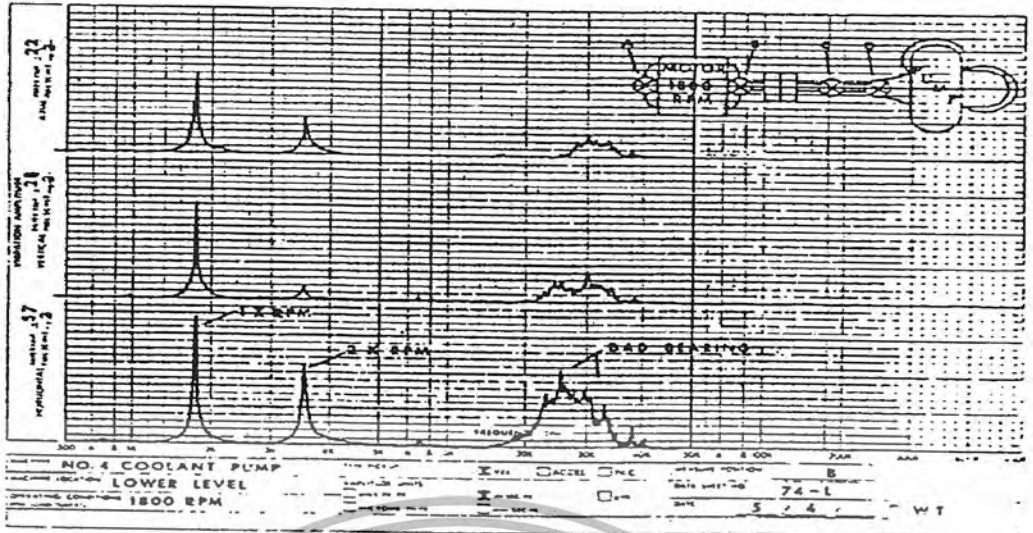
การเอียงศูนย์ของโรเตอร์ในพัดลม บีม หรือ คอมเพรสเซอร์ จะเกิดแรงสั่นสะเทือนแรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากทางพลศาสตร์และไฮดรอลิกที่เกิดกับโรเตอร์ ถ้าการถ่วง สมดุลไม่ดีพอ จะทำให้ใบพัดสึกหรอ และ เพลาเกิดความเสียหายได้



รูปที่ 3.20 แสดงลักษณะการเอียงศูนย์

4) ความสั่นสะเทือนที่เกิดจากความเสื่อมสภาพของแบร์ริง (Vibration Due to Faulty Rolling Element Bearing) บอลแบร์ริงหรือ โรลเลอร์แบร์ริงที่เสื่อมสภาพ จะทำให้เครื่องจักรมีความถี่ของการสั่นสะเทือนสูง และความถี่ที่เกิดขึ้นไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเท่าของความเร็วรอบเพลาคับ ผลการวิเคราะห์เครื่องจักรที่ติดตั้งแบร์ริงที่เสื่อมสภาพแสดงดังรูปที่ 3.21 จะเห็นว่าเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นที่บริเวณความถี่สูง จะเป็นผลมาจากความเสื่อมสภาพของแบร์ริงที่ใช้เท่านั้น จึงทำให้เราทราบสาเหตุของความสั่นสะเทือนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากเบร้งเสื่อมสภาพ

3.3 การปรับสมดุล

3.3.1 หลักการปรับสมดุล การปรับสมดุลของวัตถุหมุนคือการนำมวลไปติดด้านตรงข้ามกับด้านที่มี Heavy spot หรือการเอามวลจากด้านที่เกิด Heavy spot ออกเพื่อให้ความสั่นสะเทือนลดลง ขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดมวลที่ไม่สมดุล ส่วนตำแหน่งของเครื่องหมายอ้างอิง จะใช้ในการบอกตำแหน่งของความไม่สมดุล ตำแหน่งที่ติดและขนาดของมวลที่ใช้ในการถ่วงสมดุลทำให้เกิดผลที่เป็นไปได้ดังนี้

ก. เมื่อติดมวลไว้ด้านที่เกิด heavy spot ผลก็คือจะเป็นการเพิ่มขนาดความสั่นสะเทือน แต่มุมเฟสไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราจะทำการปรับสมดุลโดยเปลี่ยนตำแหน่งไปที่ 180° และทำการเพิ่มหรือลดมวลเพื่อให้ขนาดความสั่นสะเทือนลดลง

ข. ถ้าเราติดมวลไว้ด้านตรงข้ามที่เกิด heavy spot ผลที่จะเกิดได้ 2 กรณี คือ เมื่อมวลที่ติดมีน้ำหนักเบาว่า heavy spot จะมีผลทำให้ความสั่นสะเทือนลดลง และมุมเฟสไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเราสามารถเพิ่มมวลที่ติดจนกระทั่งการถ่วงสมดุลสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามถ้ามวลที่ติดมีน้ำหนักมากกว่า heavy spot จะทำให้มุมเฟสมีการเปลี่ยนไป 180° ดังนั้นการปรับสมดุลเราจะลดน้ำหนักของมวลลงจนการถ่วงสมดุลสมบูรณ์

ค. เมื่อมวลที่ติดมีตำแหน่งอยู่ระหว่างด้านที่เกิด heavy spot กับด้านตรงข้าม การปรับสมดุลจะทำได้ยาก ต้องใช้เทคนิคเข้าช่วย

ในการปรับสมดุลนั้นจะมีการปรับสมดุลโดยใส่มวลขนาดที่แน่นอนลงตำแหน่งที่ถ่วงความไม่สมดุลของวัตถุหมุน ซึ่งจะต้องกำหนดขนาดของมวลที่นำมาแก้ความไม่สมดุลรวมทั้งตำแหน่งในการติดตั้ง

ในหลักการปฏิบัติจริงจะมีการหาการกระจายมวลของวัตถุหมุน โดยการเพิ่มมวลทดสอบและวัดผลของขนาดและมุมเฟสการสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน ผลของการทดสอบนี้จะนำมาหาค่าขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ให้ใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้เผยแพร่หรือจำหน่าย การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตำแหน่งของมวลที่ต้องติดตั้งเข้ากับโรเตอร์ โดยปกติค่านี้จะสามารถหาได้โดยการเครื่องคำนวณ ใน
 ที่นี้สามารถใช้โปรแกรมการคำนวณที่ภาคผนวกในการคำนวณ

ที่จุดใด ๆ จุดหนึ่งบนดิสก์ลูกปืนจะรับแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับความไม่สมดุล
 จำนวนหนึ่งครั้งต่อการหมุนของวัตถุหมุนหนึ่งรอบ ดังนั้นหากดูที่สเปกตรัมทางความถี่ของสัญญาณการ
 สั่นสะเทือน จะเห็นความไม่สมดุลจากการสั่นสะเทือนที่เพิ่มขึ้นในความถี่การหมุน

การวัดความสั่นสะเทือนที่เกิดจากความไม่สมดุล จะวัดจากค่าเฉลี่ยของโพรมวัด
 ความเร่ง(Accelerometer) ที่ติดไว้กับโครงของดิสก์ลูกปืน(ตามรูปที่ 3.22) สัญญาณความสั่นสะเทือนจะ
 ถ่ายทอดผ่านไปยังส่วนกรองสัญญาณซึ่งปรับไว้ในช่วงความถี่ของการหมุนของโรเตอร์ ดังนั้นส่วน
 ประกอบของสัญญาณความสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ของการหมุนเท่านั้นที่จะถูกวัดผ่านไปยังเครื่อง
 แสดงค่าความสั่นสะเทือน(Vibration meter) ซึ่งจะแสดงค่าของระดับที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่เกิด
 จากมวลที่ไม่สมดุล

เครื่องวัดแสดงค่าเฟส (Phase Meter) จะวัดและแสดงค่ามุมเฟสระหว่างสัญญาณ จาก
 โพรมวัดความเร็วที่เป็นสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณความสั่นสะเทือนที่ถูกกรองแล้ว ค่าของมุมที่แสดงจะ
 เป็นประโยชน์ในการหาตำแหน่งในการแก้ไขความไม่สมดุล ซึ่งจะสัมพันธ์กับตำแหน่งที่กำหนดให้

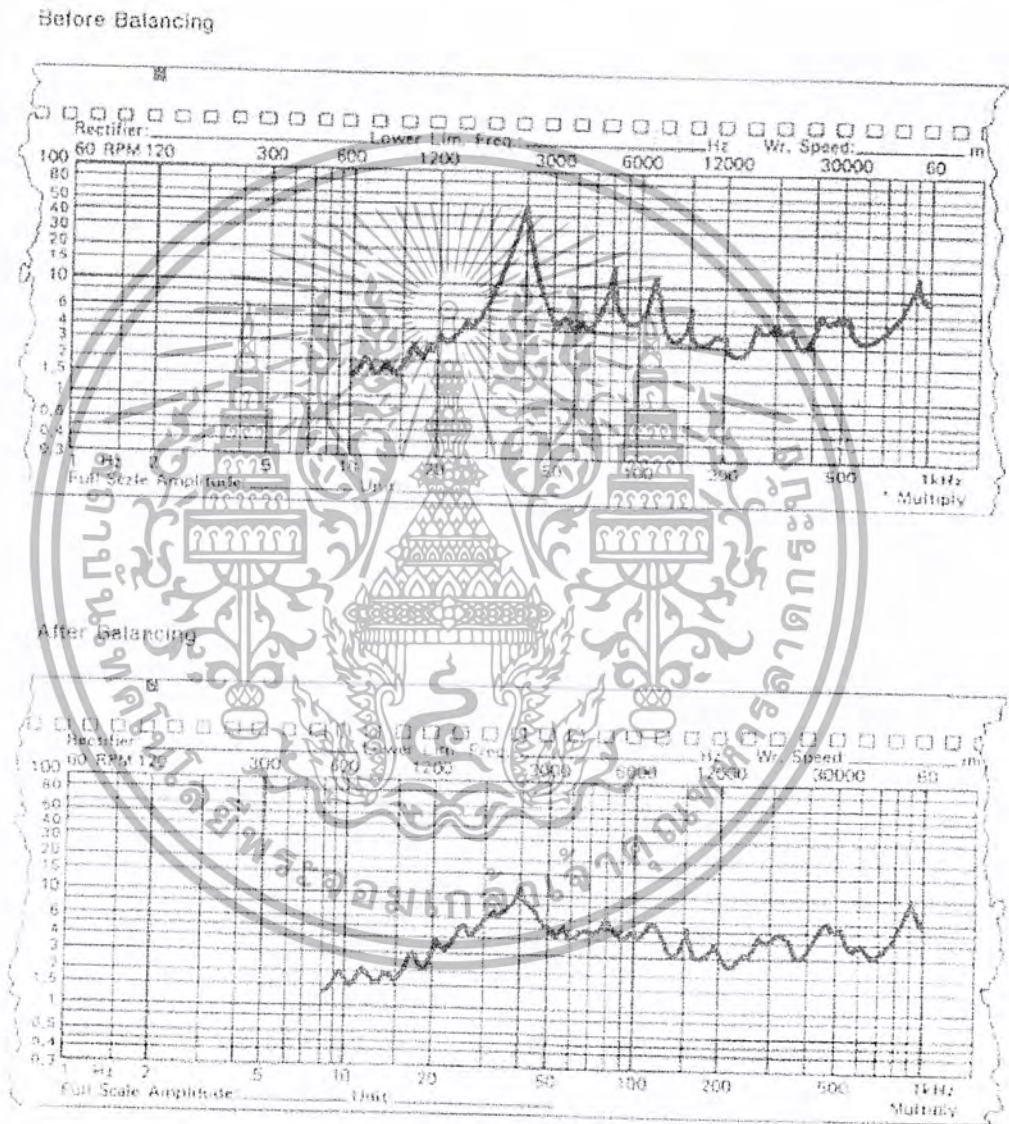


รูปที่ 3.22 รูปแบบในการวัดสัญญาณ

3.3.2 ขั้นตอนเบื้องต้นในการปรับสมดุล ก่อนทำการปรับสมดุลวัตถุหมุนใด ๆ ทั้งแบบ
 สถิติศาสตร์และแบบพลศาสตร์จะต้องทำการวิเคราะห์และเตรียมข้อมูลที่จะนำเป็นดังต่อไปนี้เพื่อให้การ
 ปรับสมดุลมีความถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วิเคราะห์ส่วนประกอบสัญญาณความถี่ ก่อนที่จะปรับแต่งควรวิเคราะห์ส่วนประกอบทางสัญญาณความถี่เสียก่อน เพื่อที่จะหาสาเหตุของการสั่นสะเทือนว่าเกิดจากสาเหตุอื่นหรือไม่ เช่น การปรับแนวการต่อไม่ถูกต้อง (misalignment) หรือแกนคด (bent shaft) ถ้าส่วนหมุนไม่สมดุล จะมีความระดับความสั่นสะเทือนสูงสุดที่ความถี่ช่วงการหมุนและค่าสูงสุดนี้จะเป็นค่าที่เด่นชัดที่สุดในสเปกตรัมจากการวิเคราะห์ความถี่ก่อนและหลังการปรับสมดุล จะสังเกตเห็นระดับสัญญาณความถี่สั่นสะเทือนลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 3.23

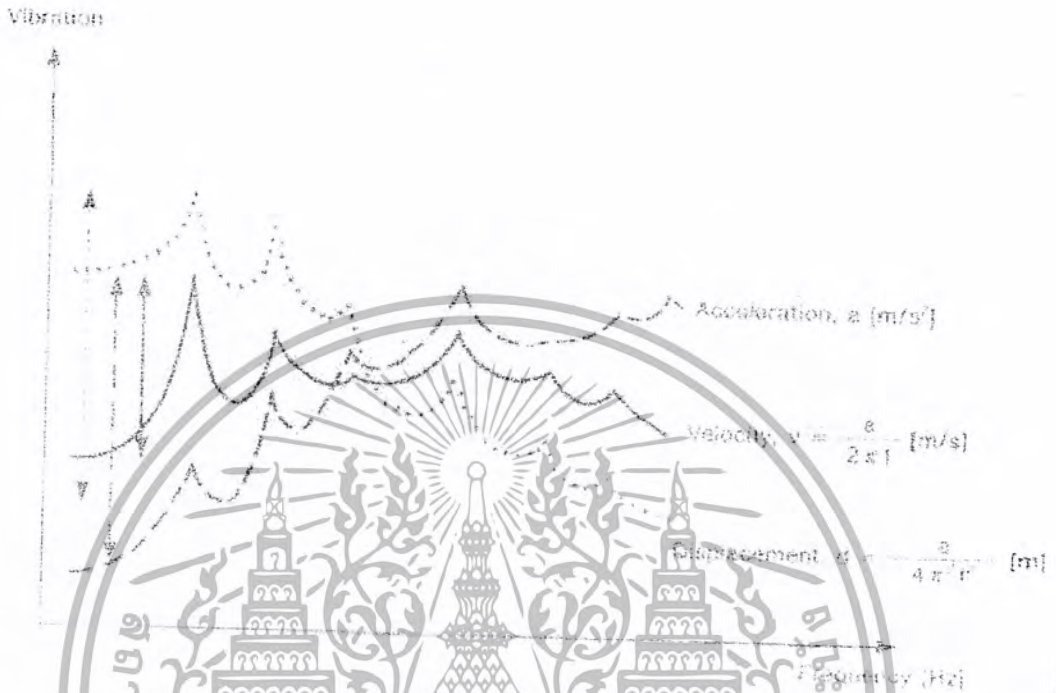


รูปที่ 3.23 สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนก่อนการปรับแต่งและหลังการปรับแต่ง

2) การเลือกส่วนประกอบเพื่อการวัดที่ดีที่สุด การวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณความถี่สั่นสะเทือนก่อนการปรับแต่งความสมดุล นับว่าเป็นแนวทางที่จะทำให้ได้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ดีที่สุดในการวัดความถี่สั่นสะเทือน ซึ่งค่าที่จะวัดก็คือสัญญาณความเร่ง (acceleration) ,ความเร็ว (velocity) และระยะการเคลื่อนที่ (Displacement) รูปที่ 3.24 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสามในรูปของความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรทั้งสามจะมีความชันแตกต่างกัน แต่ค่าสูงสุดในสเปกตรัมเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันในแต่ละกรณี รายละเอียดที่แสดงระดับการสั่นสะเทือนจะเหมือนกันในแต่ละเส้น แต่รูปแบบในการแสดงจะมีการพิจารณาแตกต่างกันออกไป



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของรูปแบบการวัด

ตัวแปรที่เป็นเส้นเรียบที่สุด หรือเส้นสเปกตรัมที่เป็นแนวนอนมากที่สุดจะนำมาใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนเสมอ ตัวแปรเหล่านี้ต้องการเครื่องมือวัดที่มีช่วงทำงานที่แคบที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน จะสูงกว่า นั่นคือ มีสัญญาณที่จะรบกวนได้น้อยที่สุด

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติพบว่า ความเร็วเป็นเส้นกราฟที่ค่อนข้างเรียบที่สุด ดังนั้นความเร็วจึงเป็นตัวแปรที่มักนำมาใช้เสมอ ส่วนความเร่งก็มีส่วนสำคัญในส่วนประกอบความถี่สูง นั่นก็คือ จะใช้สัญญาณความเร่งเป็นตัวแปรเมื่อมีปัญหาจากสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำ ส่วนสัญญาณระยะการเคลื่อนที่ซึ่งมีความสำคัญในส่วนประกอบความถี่ต่ำ จึงนำมาใช้ในกรณีที่ต้องการหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่สูง

3) การกำหนดคุณภาพของการปรับสมดุล ในทางอุดมคติ เครื่องจักรที่ดีจะไม่แสดงออกถึงความไม่สมดุล แต่ในทางปฏิบัติ เครื่องจักรมีความคลาดเคลื่อนเสมอ ความไม่สมดุลที่สมบูรณ์จึงไม่เกิดขึ้น ด้วยข้อแตกต่างทั้งชนิดและขนาดของเครื่องจักร จึงมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้ของเพลาข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ ซึ่งมีความสำคัญมาก จำเป็นที่จะต้องแบ่งชนิดของโรเตอร์ก่อนที่จะนำมาปรับความสมดุลให้เป็นไปตามระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับความไม่สมดุลมาตรฐาน ISO 1940 ซึ่งมีการแบ่งระดับขั้นของคุณภาพ และตัวอย่างของแต่ระดับขั้น การออกแบบระดับขั้นหนึ่งๆ ค่าความสั่นสะเทือนสูงสุดจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและการบริการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดไว้ ถ้าหากรู้ความเร็วรอบของวัตถุหมุน ก็จะทราบค่าสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้หลังจากการปรับแต่งความสมดุลแล้ว ในการคำนวณค่าความไม่สมดุลเฉพาะที่แฝงอยู่นั้น จะสมมติว่ามวลของโรเตอร์กระจายอยู่รอบ ๆ จุดศูนย์กลางวงสม่ำเสมอ แต่ถ้ามวลของโรเตอร์กระจายอยู่ไม่เท่ากัน การคำนวณจะซับซ้อนขึ้นมา

วัตถุหมุนที่มีความสมดุลอย่างสมบูรณ์แรงกระทำที่ปลายทั้งสองด้านของโรเตอร์จะเท่ากัน แต่ถ้าโรเตอร์มีรูปร่างคดโค้งรูปที่ 3.25 แม้แรงทั้งสองแต่ด้านจะทำกัน แต่ค่าความสมดุลจำเพาะที่แฝงอยู่ในแต่ละระดับลูกปืนจะมีค่าระดับการยอมรับที่ต่างกัน ซึ่งตำแหน่งจุดศูนย์กลางจะแบ่งช่วงโรเตอร์ในอัตราส่วน $1/2 : 2/3$ และผลรวมของแรงรอบ ๆ จุดศูนย์กลางต้องเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าความไม่สมดุลจำเพาะที่ตลับลูกปืน A เท่ากับ $2/3$ ของผลรวมของค่าความไม่สมดุลและตลับลูกปืน B มีค่าความไม่สมดุลจำเพาะที่ $1/3$ ของผลรวม

4) การเลือกมวลคู่ มวลความไม่สมดุลจำเพาะจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่ามวลคู่ที่จะนำมาใช้ในการปรับสมดุล โดยการกระจายมวลของโรเตอร์และหาความสัมพันธ์ระหว่างความไม่สมดุลจำเพาะกับระดับของگردانของตลับลูกปืน

การประมาณค่าที่เหมาะสมของมวลคู่ ให้มวลของโรเตอร์มีหน่วยเป็นกิโลกรัมและรัศมีมีหน่วย มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ถูกต้องจะได้จากการคำนวณ ส่วนค่ามวลแฝงมากที่สุดมีหน่วยเป็น กรัม หาได้จากสมการที่ 3.1

$$M_{MR} = \frac{SU \times M_R}{R_C}$$

(3.1)

M_{MR} = ค่ามวลแฝงที่มากที่สุด (g)

SU = ค่าความสมดุลจำเพาะที่ต้องการ (g-mm/kg)

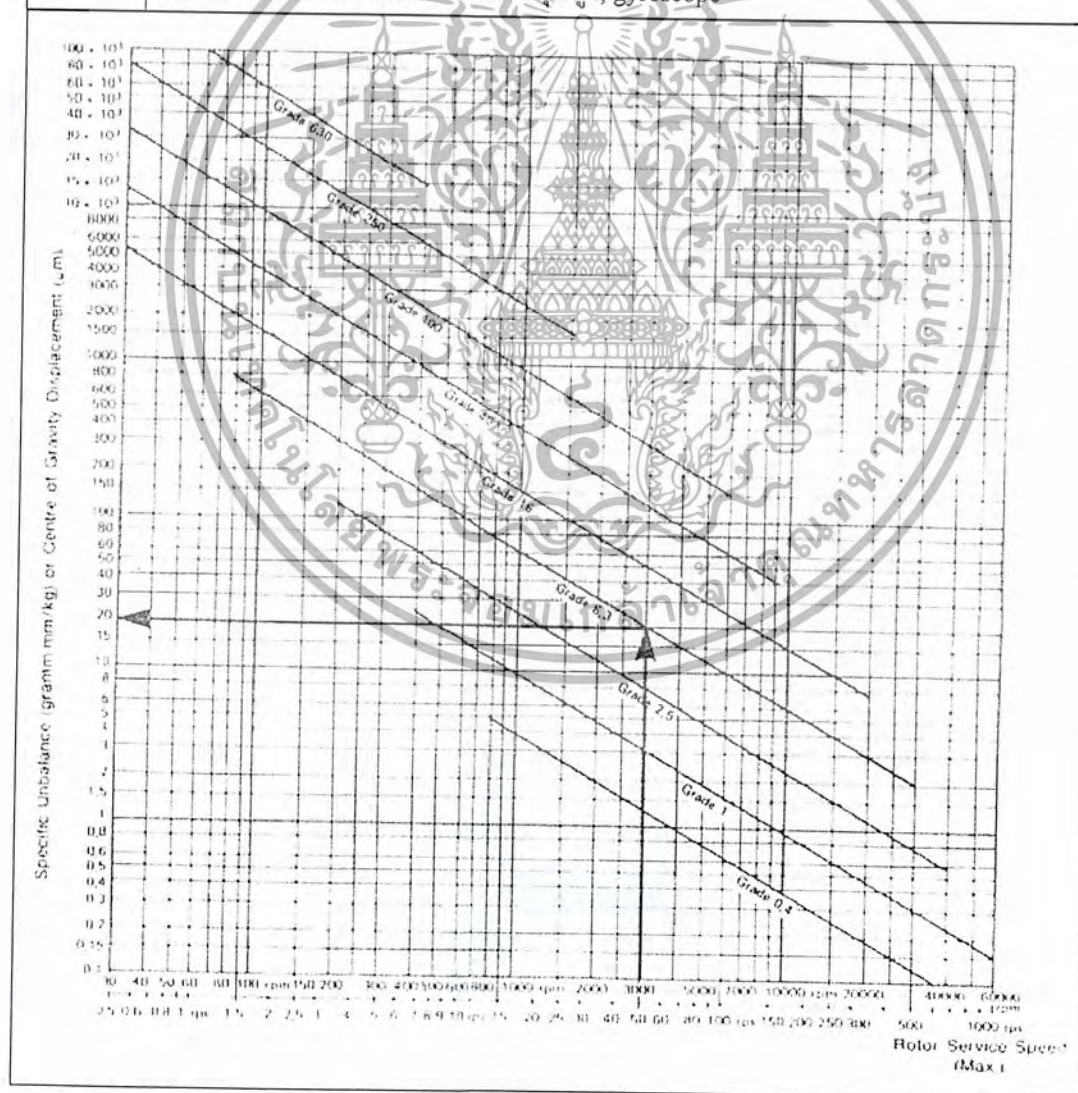
M_R = มวลของโรเตอร์ (kg)

R_C = รัศมีที่แก้ไข (mm)

โดยค่าที่เหมาะสมในการทดสอบคือ 5 ถึง 10 เท่าของค่ามวลแฝงมากที่สุด

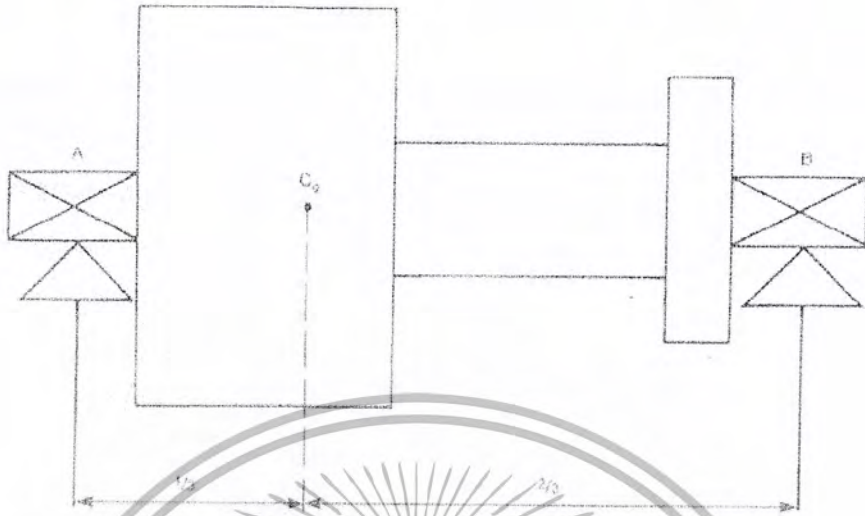
ข้อควรระวังในการเลือกมวลคู่ อาจเป็นไปได้ว่ามวลคู่ไม่ได้ให้ผลการปรับแต่งความไม่สมดุลที่เหมาะสม ทำให้ค่าจากการคำนวณผิดพลาด ดังนั้นสิ่งสำคัญก่อนจะใช้มวลคู่จากการคำนวณ จะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าค่าเหล่านั้นถูกต้องหรือไม่

| ระดับคุณภาพที่ต้องการ | |
|-----------------------|---|
| ระดับ | ตัวอย่างวัตถุหมุน |
| 630 | ขนาดใหญ่, รอบหมุนช้า เช่น เพลาลูกเบี้ยวของเครื่องยนต์แบบสี่ช่วงชัก |
| 250 | เพลาลูกเบี้ยวของเครื่องยนต์ดีเซลสี่สูบ, รอบหมุนเร็ว |
| 100 | เพลาลูกเบี้ยวของเครื่องยนต์ดีเซลหกสูบหรือมากกว่า, รอบหมุนเร็ว |
| 40 | ล้อยานยนต์ เพลาลูกเบี้ยวเครื่องยนต์ของรถยนต์ |
| 16 | เพลาลูกและโรเตอร์ทั่วไป |
| 6.3 | โรเตอร์ของเครื่องเป่าและพัดลม, ล้อช่วยแรง, เครื่องยนต์ต่อไป, มอเตอร์ไฟฟ้า และ อามเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า |
| 2.5 | เทอร์ไบน์, ตัวขับเคลื่อนมือกด, อามเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็ก |
| 1 | ตัวขับเคลื่อนเสียง ซีดี และ เทป |
| 0.4 | โรเตอร์ที่ต้องการความละเอียดการหมุนสูง, gyroscope |



ตาราง 3.1 ข้อกำหนดความไม่สมดุล (gramm. mm/kg) ตามระดับคุณภาพความสมดุลและความเร็วโรเตอร์ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สูงสุดไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วัตถุประสงค์ที่มีการกระจายมวลไม่เท่ากัน

| | $\Delta V < 25\%$ | $\Delta V > 25\%$ |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| $\Delta \phi < 25\%$ | เพิ่มขนาดมวลลุ่ม | ขยับตำแหน่งมวล |
| $\Delta \phi > 25\%$ | นำค่าไปคำนวณต่อได้ | นำค่าไปคำนวณต่อได้ |

ตาราง 3.2 แนวทางปฏิบัติหลังจากที่วัดค่าได้แล้ว

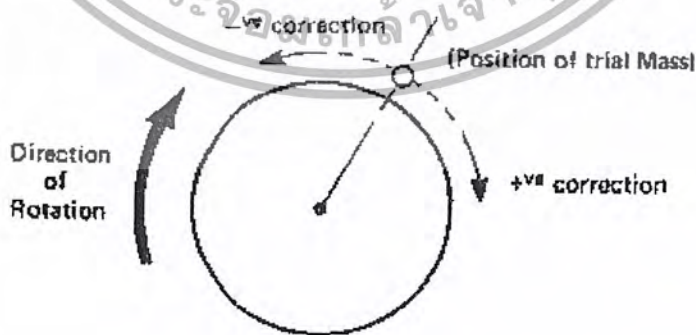
จากตารางที่ 3.2 เป็นการสรุปเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้สี่แบบเมื่อ

- 1) $\Delta \phi$ คือ ความแตกต่างระหว่างเฟสที่ถูกวัดก่อนและหลังการติดตั้งมวลลุ่ม
- 2) ΔV คือ ค่าความแตกต่างระหว่างการวัดระดับการสันสะท้อนก่อนและหลังการติดตั้งมวลลุ่ม
- 3) ถ้าการเปลี่ยนแปลงเฟส $\Delta \phi$ น้อยกว่า 25 องศา ต้องเพิ่มขนาดมวลลุ่มหรือย้ายตำแหน่งมวล ลุ่ม ขึ้นอยู่กับว่าระดับการสันสะท้อนที่น้อยกว่าหรือมากกว่า 25% ตามลำดับ
- 4) แต่ถ้าเฟสเปลี่ยนแปลงมากกว่า 25 องศา การวัดค่านี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณขนาดของมวลและมุมในการติดตั้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การปรับความสมดุลแบบสถิตยศาสตร์ในระนาบเดียว การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือนและคำนวณหาค่ามวลทดสอบที่เหมาะสมมีขั้นตอนของหลักการปรับความสมดุล ที่ระนาบเดียว ดังนี้

- 1) ติดตั้งหัววัดความเร่ง หรือ หัววัดความเร็ว ต่อเข้ากับเครื่องมือวัด
- 2) ให้เครื่องจักรหมุนที่ความเร็วใช้งานปกติ(ควร จะใช้ความเร็วนี้ แต่อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นจะต้องปรับความสมดุลที่ความเร็วใช้งานเสมอ ไป ดูหัวข้อ 3.3.5 “การปรับสมดุลแบบพิเศษ” เกี่ยวกับการปรับสมดุลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วใช้งาน)
- 3) วัดและบันทึกระดับการสั่นสะเทือนและมุมเฟส
- 4) หยุดเครื่องจักรและชั่งมวลทดสอบค่าที่เหมาะสมลงไป พร้อมทั้งบันทึกขนาดน้ำหนัก และตำแหน่งมุมเฟส ของมวลทดสอบที่ติดตั้งเข้าไป
- 5) ให้เครื่องจักรหมุน แล้ววัดและบันทึกระดับการสั่นสะเทือนอีกครั้งพร้อมทั้งค่ามุมเฟส
- 6) หยุดเครื่องจักรและเอามวลทดสอบออก
- 7) คำนวณได้มวลที่ต้องใช้แก้ไข โดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในหัวข้อ 3.4 “วิธีการคำนวณค่าความไม่สมดุล”
- 8) ติดตั้งมวลที่คำนวณได้ในตำแหน่งมุมเฟสที่กำหนดในรัศมีเดียวกันกับมวลทดสอบ มุมที่แสดงค่า บวก หมายถึง ทิศทางเดียวกันกับทิศทางของการหมุน และมุมที่แสดงค่า ลบ หมายถึงทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการหมุน ดังรูปที่ 3.26
- 9) ให้เครื่องจักรทำงาน (หมุน) อีกครั้งและวัดค่าความไม่สมดุล หากมีระดับต่ำและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ก็ไม่จำเป็นต้องปรับความสมดุลอีก



รูปที่ 3.26 การกำหนดทิศทางของมวลที่แก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การปรับความสมดุลแบบพลศาสตร์ (แบบ 2 ระนาบ) ขั้นตอนการปรับความสมดุลแบบสองระนาบ จะคล้ายกับแบบระนาบเดียวมาก อย่างไรก็ตามแบบสองระนาบต้องใช้หัววัดการสั่นสะเทือนสองตัวเพื่อวัดความสั่นสะเทือนทั้งสองระนาบ ในการปรับความสมดุลแบบนี้ ในระนาบหนึ่งจะมีผลกับอีกระนาบที่เหลือ ดังนั้นก่อนที่จะทำการปรับสมดุล ต้องวัดและวิเคราะห์ความถี่ของทั้งสองระนาบก่อน

ขั้นตอนทั้งหมดเกี่ยวกับการปรับความสมดุลแบบสองระนาบมีดังนี้

- 1) ติดตั้งหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่โครงเบร้งหัวและท้ายเครื่องจักร และ ต่อเข้ากับเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน
- 2) ให้เครื่องจักรหมุนตามความเร็วที่ใช้งานตามปกติ(ควรจะใช้ความเร็วนี้ แต่อย่างไรก็ตามไม่จำเป็นจะต้องปรับความสมดุลที่ความเร็วใช้งานเสมอไป ดูหัวข้อ 3.3.5 “การปรับสมดุลแบบพิเศษ” เกี่ยวกับการปรับสมดุลที่มีความเร็วต่ำกว่าความเร็วใช้งาน)
- 3) วัดและบันทึกระดับการสั่นสะเทือนและมุมเฟส ของแต่ละระนาบ
- 4) หุุดเครื่องจักร และ ตัดมวลทดสอบในระนาบที่ 1 พร้อมทั้งบันทึกขนาดน้ำหนัก และตำแหน่งมุมเฟส ของมวลทดสอบที่ติดตั้งเข้าไป
- 5) ให้เครื่องจักรหมุน แล้ววัดและบันทึกระดับความสั่นสะเทือนพร้อมทั้งค่ามุมเฟสของ แต่ละระนาบอีกครั้ง
- 6) หุุดเครื่องจักรและนำมวลทดสอบออกจากระนาบที่ 1
- 7) ตัดมวลทดสอบในระนาบที่ 2 (อาจจะใช้มวลทดสอบอันเดียวกันกับระนาบที่ 1 ก็ได้) พร้อมทั้งบันทึกขนาดน้ำหนัก และตำแหน่งมุมเฟส ของมวลทดสอบที่ติดตั้งเข้าไป
- 8) ให้เครื่องจักรหมุน แล้ววัดและบันทึกระดับความสั่นสะเทือนพร้อมทั้งค่ามุมเฟสของ แต่ละระนาบ
- 9) หุุดเครื่องจักรและนำมวลทดสอบออกทั้งหมด
- 10) คำนวณค่ามวลที่ต้องใช้แก้ไข โดยใช้วิธีใดวิธีหนึ่งในหัวข้อ “3.4 วิธีการคำนวณค่าความไม่สมดุล”
- 11) ติดตั้งมวลที่คำนวณได้ในตำแหน่งมุมเฟสที่กำหนดในวิธีเดียวกันกับมวลทดสอบ
- 12) ให้เครื่องจักรทำงาน (หมุน) อีกครั้งและวัดค่าระดับการสั่นสะเทือนอีกครั้งเพื่อตรวจสอบระดับความสั่นสะเทือนว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้จึงเสร็จการปรับความสมดุล แต่ถ้ามีระดับสูงเกินกว่าช่วงที่ยอมรับได้ ให้เริ่มต้นปรับความสมดุลอีกครั้ง

3.3.5 การปรับความสมดุลกรณีพิเศษ

1) การปรับแต่งความสมดุลที่ความเร็วต่ำกว่าการใช้งาน ตามปกติการปรับความสมดุลวัตถุหมุนโดยทั่วไปควรปรับที่ความเร็วการใช้งาน แต่ก็ไม่จำเป็นที่จะใช้ความเร็วใช้งาน ซึ่งสภาพการทำงานจริง ๆ มีอยู่หลายกรณี ที่เราไม่สามารถเดินเครื่องจักรที่ความเร็วการใช้งานได้ในขณะที่ทำการปรับแต่งความสมดุล การพิจารณาการปรับแต่งจะต้องดูที่ระดับ (grade) ของเครื่องจักร โดยในเครื่องจักรเดียวกัน หากการปรับแต่งที่ความเร็วลดต่ำลง จะต้องลดค่าการคลงด้วยโดยดูจากตารางที่ 3:1 เพื่อให้ได้ค่าการคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ถูกต้องค่าเดียว เมื่อความเร็วลดต่ำลงค่าเกรดจะเพิ่มขึ้น จากการดูที่ตารางที่ 1 ที่เกรด 6.3 เพื่อให้ได้ค่าเกรด 6.3 จะใช้ความเร็วรอบที่ 3000 รอบ/นาที แต่ถ้าโรเตอร์ปรับแต่งที่ความเร็ว 500 รอบ/นาที ค่าของเกรดในการปรับแต่งความสมดุล จะอยู่ที่ 1

2) การแก้ไขค่ามวลและรัศมี การแก้ไขค่าน้ำหนัก บางครั้งก็เป็นไปได้ที่จะใช้รัศมีเท่ากับน้ำหนักทดสอบ ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของโรเตอร์ (ดูรูปที่ 3.27) การแก้ไขความไม่สมดุลในกรณีนี้ เราใช้ความสัมพันธ์ของสมการตามสมการที่ 3.2 คือ

$$\bar{e} = \frac{m\bar{r}}{M} \quad (3.2)$$



\bar{e} = ความไม่สมดุลจำเพาะ

m = น้ำหนักที่ไม่สมดุล

\bar{r} = รัศมีที่ใช้เป็นตำแหน่งแก้ไข

M = มวลของโรเตอร์

รูปที่ 3.27 การติดตั้งน้ำหนักที่แก้ไขรัศมีต่างกับขนาดรัศมีของน้ำหนักทดสอบที่คิดไว้

อาจแปลงให้อยู่ในรูป

$$\bar{e}M = m\bar{r}$$

ดังนั้น

$$\bar{e}M = m\bar{r} = m_1\bar{r}_1 = m_2\bar{r}_2 = \dots$$

ดังนั้นถ้ารัศมี \bar{r}_2 ซึ่งมีมวลแก้ไขค่าความไม่สมดุลยึดติดอยู่ แตกต่างจากรัศมี \bar{r}_1 ที่ซึ่งมวลคู่ติดอยู่ เราเปลี่ยนค่าของมวลปรับความสมดุล m_2 ดังนั้นผลคูณของผลรวมจะมีค่าคงที่ นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การตรวจสอบค่าความไม่สมดุล หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการปรับความสมดุล ควรกำหนดค่าของความไม่สมดุล ซึ่งสามารถทำได้โดยตรงโดยใช้เครื่องมือดังอธิบายไว้ในตอนแรก ๆ ในกรณีที่ไม่มีเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ อาจจะต้องนำขั้นตอนที่อธิบายไว้ในมาตรฐาน ISO1940 มาใช้ดังนี้

1. ทำเครื่องหมายแบ่งระยะของสาคที่เท่า ๆ กัน เช่น 45 องศา บนโรเตอร์ดังรูปที่ 3.28
2. ยึดมวลลุ่มที่ตำแหน่ง 0 องศา และ ให้โรเตอร์หมุนที่ความเร็วปกติ และวัดระดับความสั่นสะเทือน บันทึกค่าที่ได้เป็นตารางดังตัวอย่างในรูปที่ 3.28
3. เลื่อนมวลลุ่มไปตำแหน่ง 45 องศา วัดค่าระดับความสั่นสะเทือนและบันทึกผลเก็บไว้ในตาราง
4. ให้เลื่อนมวลลุ่มไปยังตำแหน่งต่อไป ซึ่งเพิ่มครั้งละ 45 องศา และทำซ้ำต่อไปจนครบทุกตำแหน่ง
5. ลากเส้นระดับความสั่นสะเทือนพร้อมทั้งตำแหน่งของมวลลุ่ม ดังรูปที่ 3.28 ถ้าส่วนโค้งที่ได้คล้ายกับคลื่นรูปไซน์อย่างต่อเนื่อง แสดงว่าการตรวจสอบใช้ได้ แต่ถ้าไม่ใช่ แสดงว่ามวลลุ่มมีขนาดเล็กเกินไป หรือมีความไวของการวัดไม่เหมาะสม
6. ลากเส้นครึ่งหนึ่งของส่วนสูงสุดกับส่วนต่ำสุดของรูปไซน์ ระยะทางระหว่างเส้นและจุดสูงสุด (V_{res}) และระยะทางที่เส้นศูนย์กลางจะเป็นระดับของมวลลุ่ม (V_r) ขนาดของมวลที่ไม่สมดุล (M_{res}) คำนวณได้จาก

$$M_{res} = \frac{|V_{res}|}{|V_r|} \times M_r \quad (3.3)$$

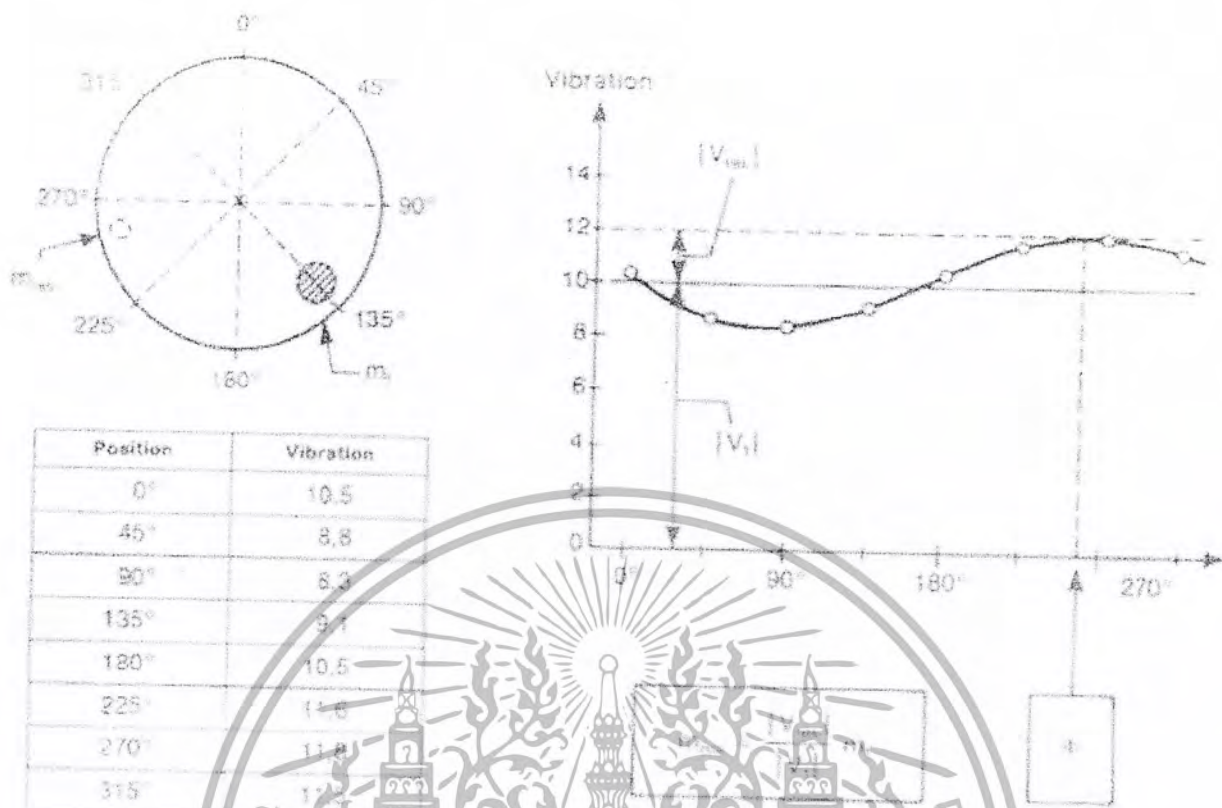
7. ตำแหน่งของมวลที่ไม่สมดุล (ϕ) จะหาได้จากการลากเส้นตรงแนวตั้งจากจุดที่สูงที่สุดและอ่านค่ามุมบนแกนนอน

เนื่องจากตำแหน่งความ ไม่สมดุลของมวลจะพบได้จากกราฟซึ่งจะมองเห็นได้อย่างชัดเจนจากวิธีการดังกล่าว จะใช้งานในกรณีที่เรามีเพียงมิเตอร์วัดระดับความสั่นสะเทือนเท่านั้น แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ใช้เวลาในการปรับแต่งความสมดุลนานกว่าการใช้วิธี การวัดการสั่นสะเทือนและเฟสโดยตรง

3.4 วิธีการคำนวณค่าความไม่สมดุล

เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของผลการทดสอบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณค่ามวลที่ใช้แก้ไขความไม่สมดุล รวมทั้งมุมที่ต้องติดตั้ง โดยมีการหาข้อมูลที่เป็นสองวิธีคือ การคำนวณ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เครื่องคำนวณบางรุ่นมีฟังก์ชันการคำนวณเหล่านี้ใช้ง่าย และสะดวก ในโครงการนี้เราจะใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณการปรับสมดุลโดยเฉพาะ อีกวิธีการหนึ่งคือ การคำนวณจากเวกเตอร์ (Graphic Vector Method) การคำนวณวิธีนี้มีข้อพิจารณาสองแบบคือ การปรับความสมดุลแบบระนาบเดียว และ การปรับความสมดุลแบบสองระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

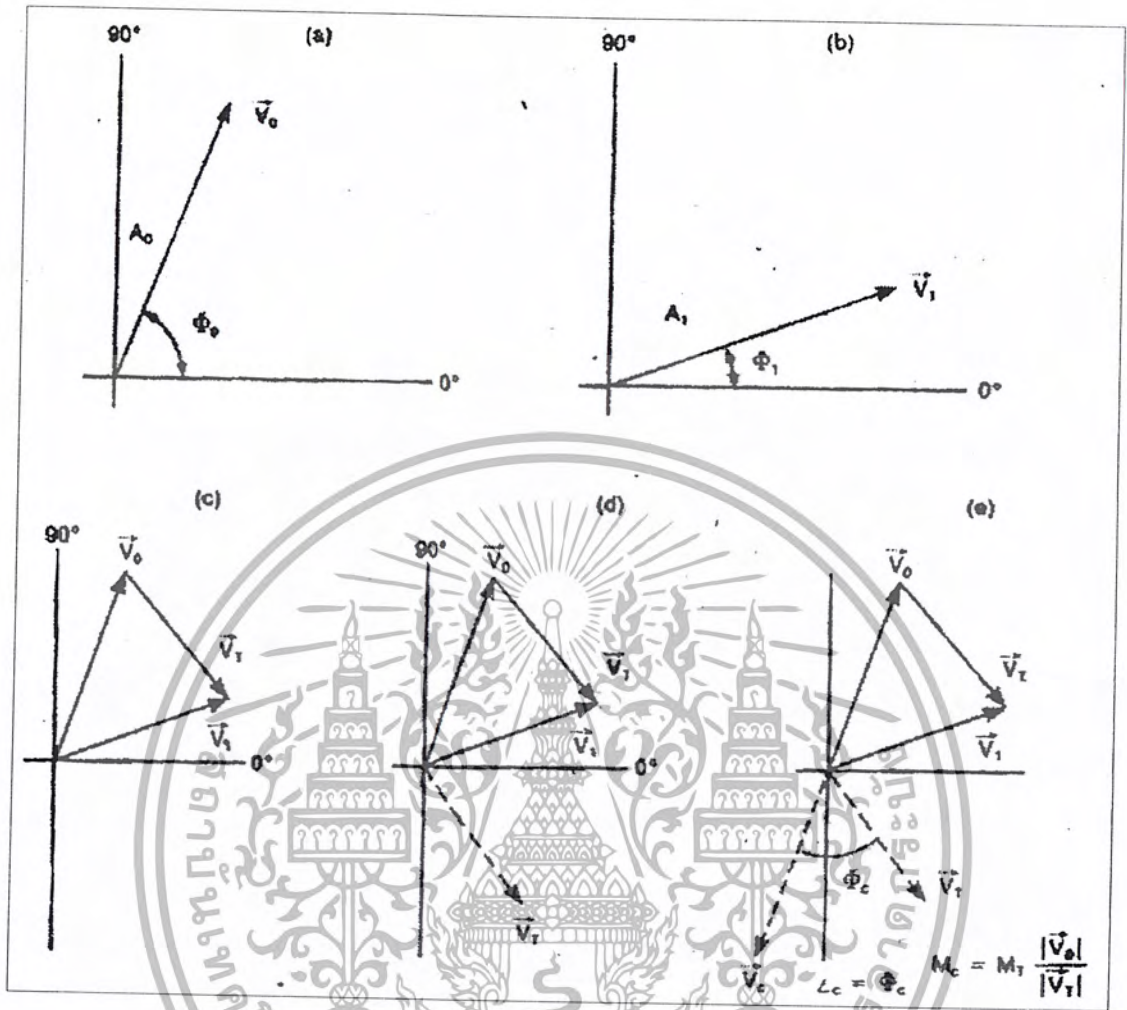


รูปที่ 3.28 วิธีการใช้กราฟเพื่อตรวจสอบความไม่สมดุลโดยใช้ไมเตอร์วัดการสั่นสะเทือนเท่านั้น

3.4.1 วิธีเวกเตอร์สำหรับการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว การปรับความสมดุลแบบนี้ ค่าของมวลที่ใช้ในการแก้ไขความไม่สมดุลและตำแหน่งมุมที่ต้องติดตั้งมวลเพื่อแก้ไขความสมดุล สามารถกำหนดโดยการวัดเวกเตอร์ ดังรูปที่ 3.29

- 1) เวกเตอร์ \vec{v}_0 แสดงความไม่สมดุลของเครื่องในสภาวะเริ่มต้น ความยาว v_0 เท่ากับขนาดของความสั่นสะเทือนและทิศทางจะเป็นมุมเฟส
- 2) เวกเตอร์ \vec{v}_1 แสดงขนาดและมุมของการสั่นสะเทือนหลังจากติดตั้งมวลคู่ไปแล้ว
- 3) ปลายเวกเตอร์ \vec{v}_0 และ \vec{v}_1 ต่อกันแล้วได้เป็นเวกเตอร์ที่ 3 คือ \vec{v}_r ซึ่งจะกำหนดทิศทางจาก \vec{v}_0 ไป \vec{v}_1 เวกเตอร์นี้จะแสดงผลของมวลคู่อย่างเดี่ยว
- 4) เวกเตอร์ที่วาดขนานกับเวกเตอร์ \vec{v}_r ด้วยขนาดและทิศทางเดียวกัน แต่จุดเริ่มต้นของเวกเตอร์อยู่ที่จุดกำเนิดซึ่งเรียกว่า \vec{v}_c ด้วยเหมือนกัน
- 5) เวกเตอร์ \vec{v}_0 ถูกลากผ่านจุดกำเนิดในทิศทางตรงกันข้ามกับ \vec{v}_c เวกเตอร์นี้เรียกว่า \vec{v}_{comp} ซึ่งแสดงซึ่งแสดงตำแหน่งและขนาดของมวลที่ต้องการ เพื่อแก้ไขความไม่สมดุลจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.29 เวกเตอร์ที่ใช้บอกระดับการสันสะเทือน (a และ b) ค่าที่วัด (c,d,e) เป็นค่าจากการคำนวณ

6) ถ้าเรากำหนดให้ขนาดของการสันสะเทือนเป็นอัตราส่วนของมวลที่ไม่สมดุล เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{M_T}{V_T} = \frac{M_{comp}}{V_{comp}} = \frac{M_0}{V_0}$$

ดังนั้น

$$M_0 = \frac{|V_0|}{|V_T|} \times M_T \tag{3.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ตำแหน่งของมวลมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของมวลคู่ สามารถกำหนดจากเวกเตอร์ได้โดยใช้ไม้โปรแทรกเตอร์ หรือ จากสมการ 3.5

$$\phi_{comp} = -\phi_T + \phi_0 + 180^\circ \quad (3.5)$$

มุมที่คำนวณจะวัดจากตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้บน โรเตอร์ซึ่งเป็นจุดที่ติดมวลคู่อยู่ ถ้าเป็นมุมบวก คือ มุมที่วัดในทิศเดียวกันกับทิศทางการหมุน แต่ถ้าเป็นค่ามุมลบแสดงว่าเป็นทิศตรงกันข้าม

3.4.2 วิธีเวกเตอร์สำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

ในการคำนวณหาค่าความไม่สมดุลของวัตถุแบบสองระนาบ จะกำหนดให้แรงรวมของมวลที่ไม่สมดุลสามารถแทนด้วยแรงสองแรงขนาด U_L และ U_R ที่ระนาบตั้งฉากแกนหมุนสองระนาบที่หัวและท้ายของวัตถุหมุน ดังรูปที่ 3.30 สามารถคำนวณได้จากขั้นตอนต่อไปนี้

ถ้าแอมพลิจูดการสั่นและตำแหน่งเชิงมุมตอนเริ่มต้นของมวลที่ไม่สมดุลของวัตถุหมุนที่แท้จริงแต่ละอัน แล้วบันทึกค่าในรูปของเวกเตอร์ความไม่สมดุลบนแบร็ง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\vec{V}_A = \vec{A}_{AL} \vec{U}_L + \vec{A}_{AR} \vec{U}_R \quad (3.6)$$

$$\vec{V}_B = \vec{A}_{BL} \vec{U}_L + \vec{A}_{BR} \vec{U}_R \quad (3.7)$$

โดย

\vec{V}_A = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่แบร็ง A

\vec{V}_B = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่แบร็ง B

\vec{A}_{AL} = เวกเตอร์ความไม่สมดุลที่ระนาบซ้ายมือวัดที่แบร็ง A

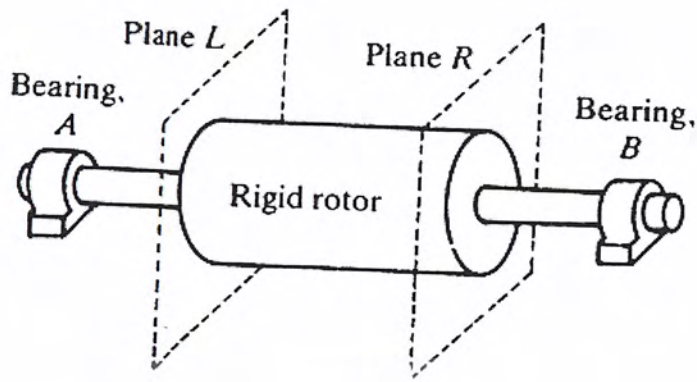
\vec{A}_{AR} = เวกเตอร์ความไม่สมดุลที่ระนาบขวามือวัดที่แบร็ง A

\vec{A}_{BL} = เวกเตอร์ความไม่สมดุลที่ระนาบซ้ายมือวัดที่แบร็ง B

\vec{A}_{BR} = เวกเตอร์ความไม่สมดุลที่ระนาบขวามือวัดที่แบร็ง B

หลังจาก ติดมวลคู่หรือเพิ่มน้ำหนักที่รู้ค่า (w_L) เข้าไปในระนาบด้านซ้ายในจุดที่รู้ตำแหน่งและมุม วัดค่าการสั่นสะเทือนและ มุมเฟส ของการสั่นที่แบร็งทั้ง 2 โดย โรเตอร์ หมุนที่ความเร็วเท่ากับ ω โดยค่าของการสั่นจะอยู่ในรูปของ vector ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 แสดงการเลือกระนาบหัวและท้ายในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

$$\vec{V}'_A = \vec{A}_{AL} (\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{AR} \vec{U}_R \tag{3.8}$$

$$\vec{V}'_B = \vec{A}_{BL} (\vec{U}_L + \vec{W}_L) + \vec{A}_{BR} \vec{U}_R \tag{3.9}$$

โดย

- \vec{V}'_A = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่เบริง A หลังเติมมวลคู่ที่ระนาบซ้าย
- \vec{V}'_B = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่เบริง B หลังเติมมวลคู่ที่ระนาบซ้าย
- \vec{W}_L = ขนาดและตำแหน่งมุมของมวลคู่ที่ติดที่ระนาบซ้าย

นำสมการ (3.6) และสมการ (3.7) ลงด้วยสมการ (3.8) และสมการ (3.9) ตามลำดับจะได้ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของระนาบซ้ายที่เบริง A และ B ดังนี้ คือ

$$\vec{A}_{AL} = \frac{\vec{V}'_A - \vec{V}_A}{\vec{W}_L} \tag{3.10}$$

$$\vec{A}_{BL} = \frac{\vec{V}'_B - \vec{V}_B}{\vec{W}_L} \tag{3.11}$$

ย้ายมวลคู่หรือน้ำหนัก \vec{W}_L ออกและนำน้ำหนัก \vec{W}_R มาเพิ่มเข้าไปในระบบทางขวาในจุดที่รู้ตำแหน่งของมุมและวัดผลของการสั่น เมื่อ Rotor หมุนด้วยความเร็ว ω สามารถวัดค่าของการสั่นในรูปของเวกเตอร์ ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{V}_A'' = \vec{A}_{AR} (\vec{U}_R + \vec{W}_R) + \vec{A}_{AL} \vec{U}_L \quad (3.12)$$

$$\vec{V}_B'' = \vec{A}_{BR} (\vec{U}_R + \vec{W}_R) + \vec{A}_{BL} \vec{U}_L \quad (3.13)$$

\vec{V}_A'' = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่แท้จริง A หลังเติมมวลคู่ที่ระนาบขวา

\vec{V}_B'' = เวกเตอร์การสั่นสะเทือนที่แท้จริง B หลังเติมมวลคู่ที่ระนาบขวา

\vec{W}_R = ขนาดและตำแหน่งมุมของมวลคู่ที่ติดที่ระนาบขวา

นำสมการ (3.6) และสมการ (3.7) ไปลบออกจากสมการ (3.12) และสมการ (3.13) ตามลำดับจะให้ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ความไม่สมดุลอันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของระนาบขวาที่แท้จริง A และ B ดังนี้ คือ

$$\vec{A}_{AR} = \frac{\vec{V}_A'' - \vec{V}_A}{\vec{W}_R} \quad (3.14)$$

$$\vec{A}_{BR} = \frac{\vec{V}_B'' - \vec{V}_B}{\vec{W}_R} \quad (3.15)$$

เมื่อค่าของเวกเตอร์ \vec{A}_i เมื่อ $i=A,B$ และ $j=L,R$ รู้ค่าแล้วจากสมการ (3.10),(3.11),(3.14) และ (3.15) แล้วเราสามารถหาค่าของเวกเตอร์ความไม่สมดุล \vec{U}_L และ \vec{U}_R ได้ดังนี้ คือ

$$\vec{U}_L = \frac{\vec{A}_{BR} \vec{V}_A - \vec{A}_{AR} \vec{V}_B}{\vec{A}_{BR} \vec{A}_{AL} - \vec{A}_{AR} \vec{A}_{BL}} \quad (3.16)$$

$$\vec{U}_R = \frac{\vec{A}_{BL} \vec{V}_A - \vec{A}_{AL} \vec{V}_B}{\vec{A}_{BL} \vec{A}_{AR} - \vec{A}_{AL} \vec{A}_{BR}} \quad (3.17)$$

วัตถุหมุนสามารถทำให้สมดุลได้โดยการเพิ่มมวลมวล ที่มีขนาดเท่ากันไว้ที่ด้านตรงข้ามในแต่ละระนาบโดยเวกเตอร์มวลที่ต้องเติมคือ

$$\vec{B}_L = -\vec{U}_L \quad \text{และ} \quad \vec{B}_R = -\vec{U}_R \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

อุปกรณ์ เครื่องมือ และชุดการทดลอง

ในการศึกษาการปรับสมดุลวัตถุหมุนในโครงงานนี้ได้สร้างแบบจำลองเครื่องจักร และ สร้างแบบจำลองการสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการทดลองศึกษาวิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุน ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนนั้น จะใช้หัวข้อสัญญาณความถี่เป็นหัวข้อสัญญาณ ส่วนการวัดตำแหน่งอ้างอิงจะใช้ฮอปโตเซนเซอร์เป็นหัวข้อสัญญาณ เมื่อนำหัวข้อสัญญาณทั้งสองไปติดตั้งกับชุดจำลองการสั่นสะเทือน จะได้สัญญาณออกมาในรูปสัญญาณอนาล็อก ส่งเข้าชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผลสัญญาณ DAWE-3010 เพื่อประมวลผลสัญญาณออกมาเป็นแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนและมุมเฟสการสั่นสะเทือน โดยผ่านโปรแกรม DASYLab 5.6 ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

4.1 ชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

เพื่อความสะดวกในการทำการศึกษาดทดลองวิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุน จึงได้ทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองเครื่องจักร และ จำลองการสั่นสะเทือน แทนการปรับสมดุลกับเครื่องจักรจริงโดยตรง โดยชุดการทดลองที่ได้ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

ส่วนประกอบของชุดจำลองการสั่นสะเทือน (ดูรายละเอียด Drawing และการคำนวณ ในการออกแบบที่ภาคผนวกท้ายเล่ม) ประกอบด้วย

1. แท่นเครื่องขนาดกว้าง 180 มม. ยาว 515 มม. สูง 40 มม. สำหรับเป็นฐานรองรับน้ำหนักและจุดจับการสั่นสะเทือนของ โครงสร้าง

2. ชุดจำลองวัตถุหมุนได้ออกแบบเป็นแผ่นจานอลูมิเนียมเจาะรูจำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นจานมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มม. และรูเจาะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มม. จำนวน 8 รู เพื่อเติมมวลเพื่อสร้าง

ความไม่สมดุลแก่วัตถุหมุน แผ่นจานยึดอยู่บนเพลากลางการหมุนโดยแผ่นจานสามารถเลื่อนไปมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามแนวแกนเพลลาได้ เพื่อจำลองเป็นวัตถุแบบระนาบเดียวเมื่อเลื่อนให้แผ่นงานชิดกัน และวัตถุแบบสองระนาบเมื่อเลื่อนแผ่นงานออกจากกัน

3. เพลาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ซึ่งเป็นแกนเพลลาไฮดรอลิก
4. บอลเบริงความเร็วรอบสูง บรรจุอยู่ใน housing เพื่อรองรับเพลลาที่หัวและท้าย
5. มอเตอร์ กระแสตรงขนาด 24 โวลต์ 300 วัตต์ มี Encoder 24 pulse / revolution
6. Flexible Coupling เชื่อมต่อระหว่างเพลลาโรเตอร์และแกนมอเตอร์

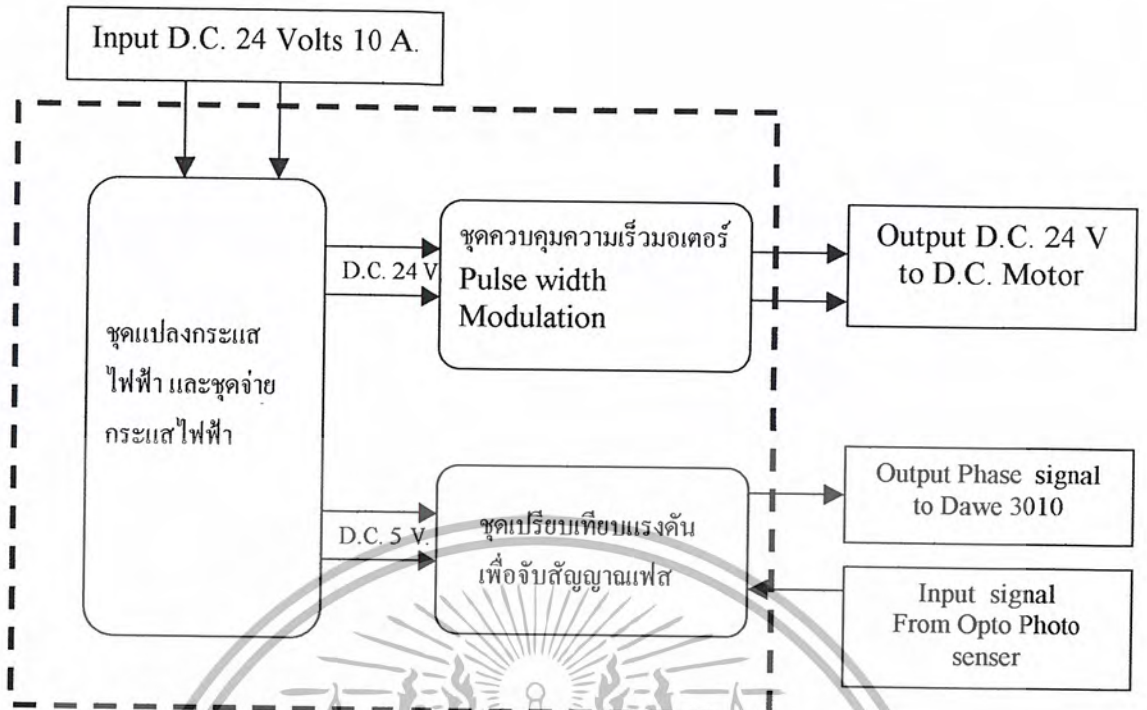
4.2 ชุดควบคุมการทำงาน

ชุดควบคุมการทำงานที่จัดทำขึ้นเพื่อควบคุมการทดลองตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยลักษณะภายนอกจะมีรูปร่างดังรูปที่ 4.2 ชุดควบคุมการทำงานจะทำหน้าที่จ่ายไฟที่มาจากแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่มีหน้าที่ควบคุมการทำงาน ภายในชุดควบคุมจะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์หลัก ๆ 3 ชุด คือ ชุดวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ ชุดวงจรขยายสัญญาณเฟส ชุดวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้า



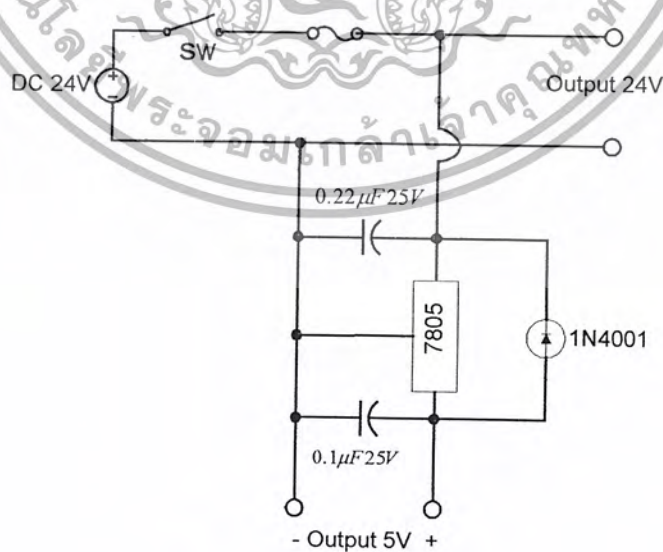
รูปที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของชุดควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงการทำงานของชุดควบคุมการทำงาน

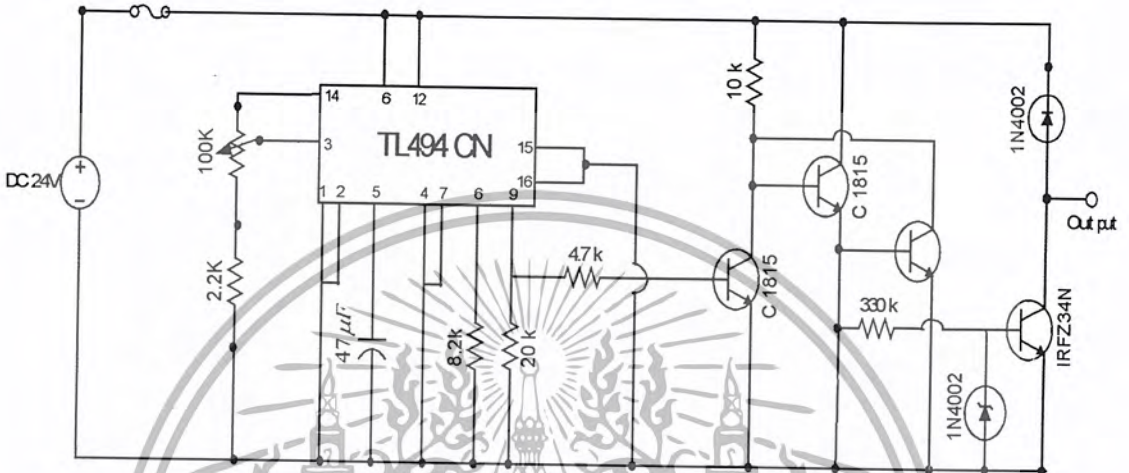
4.2.1 ชุดควบคุมกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่เปิดปิดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 24 โวลต์ และ จ่ายไฟเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในกล่องของชุดควบคุม โดยมีแผนผังแสดงการทำงานดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรควบคุมควบคุมกระแสไฟฟ้า

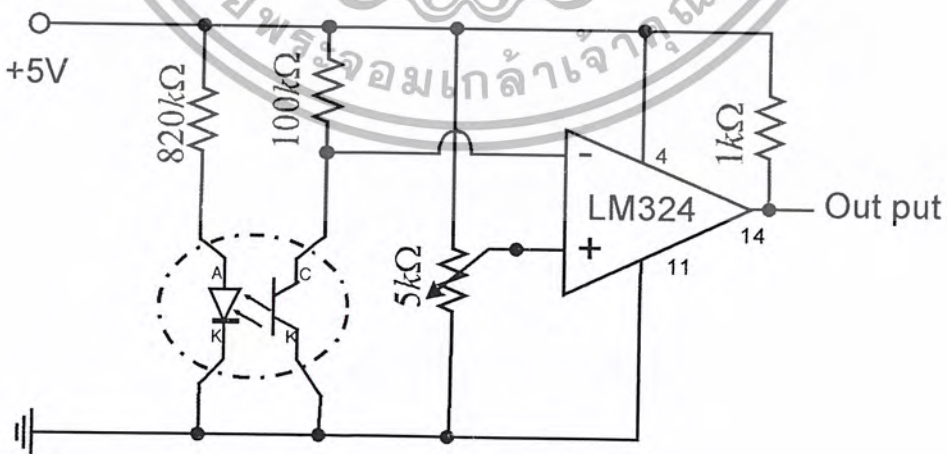
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ใช้วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์ แบบ Pulse Width Moduration Control DC Motor (รูปที่ 4.5) ซึ่งการควบคุมโดยการใช้ pulse width modulation เป็นวิธีที่ใช้ pulse ที่มีขนาดสั้นๆ ในการควบคุม motor ทำให้ไม่เกิดความร้อนสูงเกินไปที่ตัวมอเตอร์ และการควบคุมความเร็วของมอเตอร์นั้น ก็จะขึ้นอยู่กับ pulse duration ที่จ่ายให้ ถ้าหาก pulse มีขนาดที่กว้างก็จะทำให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น



รูปที่ 4.5 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์

4.2.3 ชุดเปรียบเทียบแรงดันเพื่อจับสัญญาณเฟส วงจรการทำงานมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 หลักการทำงาน เมื่อจุดอ้างอิงของโรเตอร์เคลื่อนที่ผ่าน opto photo sensor ตัว opto จะส่งสัญญาณแรงดันไปยังออปแอมป์เพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า จากนั้นจะส่งสัญญาณแรงดันให้กับเครื่องประมวลผลสัญญาณ Dawe 3010 ต่อไป

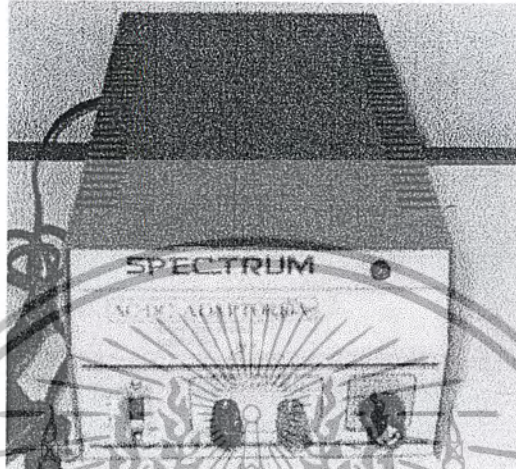


รูปที่ 46 วงจรเปรียบเทียบแรงดันเพื่อวัดสัญญาณเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ชุดจ่ายไฟ (power supply)

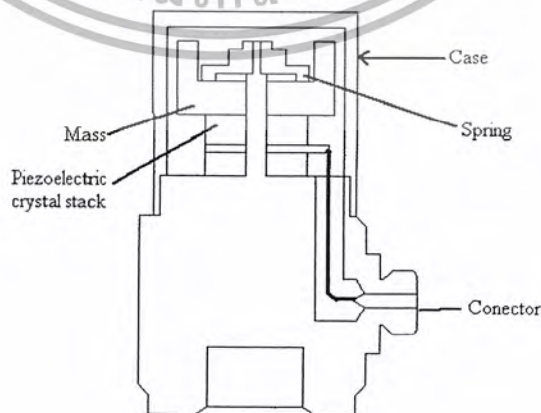
ชุดจ่ายไฟใช้หม้อแปลงแปลงไฟกระแสสลับแรงดัน 220 V. เป็น ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดแรงดัน 24 V กระแส 10 A ดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 24 โวลต์

4.4 หัวจับสัญญาณความเร่ง (Accelerometer)

หัวจับสัญญาณความเร่งเป็นหัวจับสัญญาณที่ได้รับความนิยมที่สุดในกรณีวิเคราะห์การสั่นสะเทือนเนื่องจากมีความเที่ยงตรงในกรณีวัดมากและสามารถวัดได้ช่วงการใช้งานที่กว้าง โครงสร้างลักษณะภายในของหัวจับสัญญาณความเร่งมีลักษณะโครงสร้างง่าย ๆ ดังรูปที่ 4.8 การสั่นสะเทือนจะส่งแรงกระทำต่อแท่งแก้ว piezoelectric แล้วส่งสัญญาณประจุไฟฟ้าที่เป็นอัตราส่วนกันกับแรง จากนั้น Charge amplifier จะเปลี่ยนประจุไฟฟ้าไปเป็นแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 โครงสร้างของหัวจับสัญญาณความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเชิงพาณิชย์ในเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่แนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวจับสัญญาณความเร่งที่ใช้ในโครงการ คือ Kisler Type 8776A50 Sn C145168 ย่านการวัด $\pm 50 \text{ g}$ Sensitivity 118.0 mV/g Transverse sensibility 2.2 % Resonant frequency 40.0 kHz ,Temperature - 54 - 121 °C

4.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน DAWE-3010

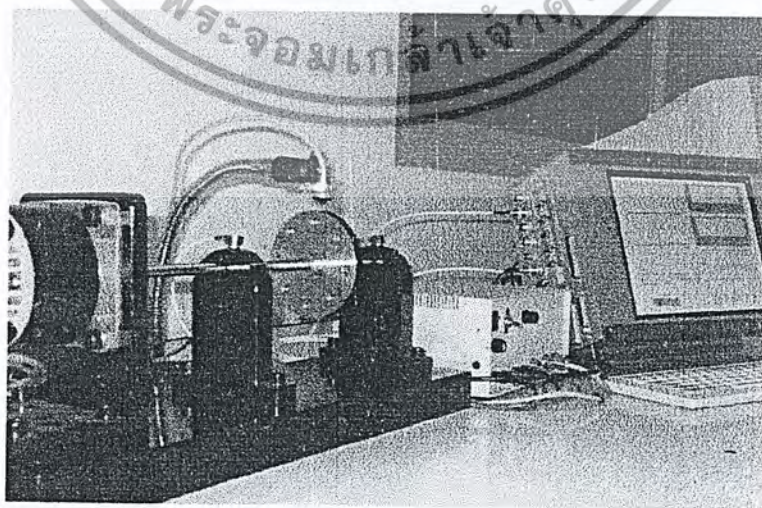
เครื่องวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน มีลักษณะดังรูปที่ 4.8 เป็นคอมพิวเตอร์ประมวลผลสัญญาณ โดยรับสัญญาณเข้าทางการ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ทางPCI Slot และประมวลผลสัญญาณที่ได้โดยโปรแกรม DASY Lab 5.6



รูปที่ 4.8 ชุดเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน DAWE-3010

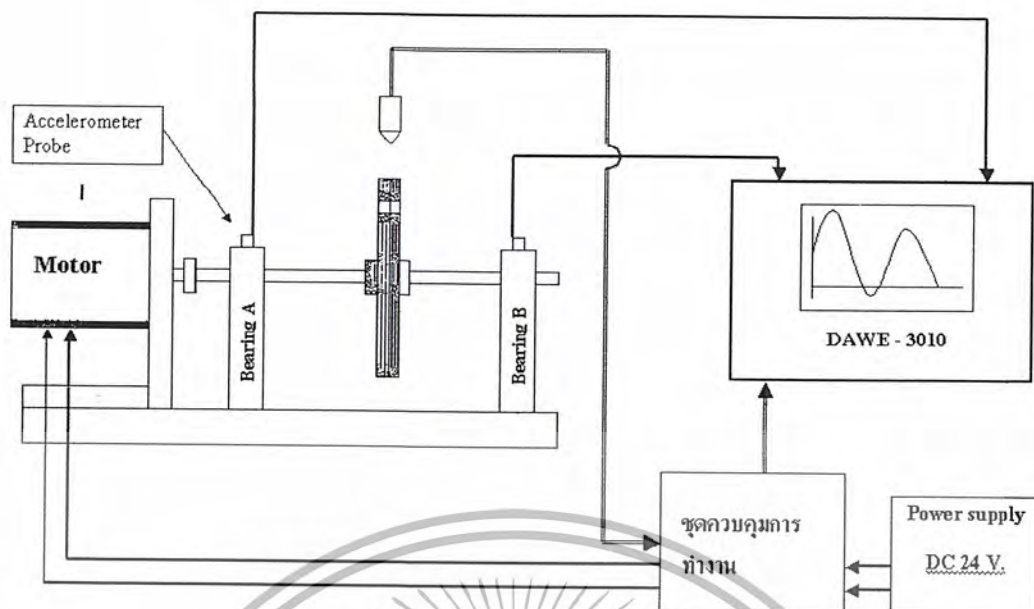
4.6 การประกอบชุดทดลอง

ในการทดลองเรื่องการปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็งชุดทดลองที่จัดทำขึ้นสามารถประกอบเป็นชุดทดลองรูปที่ 4.8 และมีแผนผังแสดงการทำงานและการติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 การประกอบชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



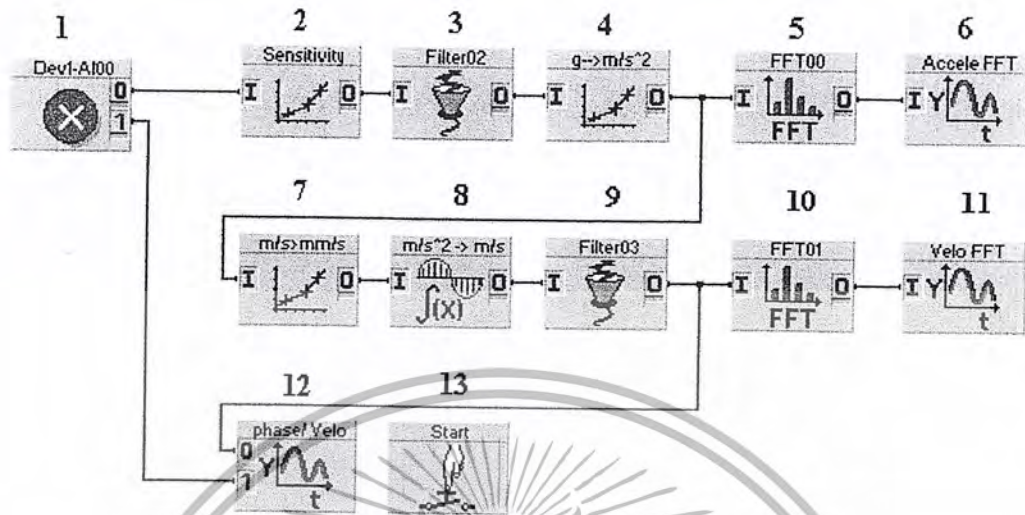
รูปที่ 4.9 แผนผังแสดงการทำงานของชุดทดลอง

รูปที่ 4.9 เมื่อเปิดสวิตช์มอเตอร์ ชุดควบคุมการทำงานจะจ่ายกระแสไฟเพื่อขับมอเตอร์และสามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ที่ชุดควบคุมการทำงาน เมื่อมอเตอร์หมุนจะส่งแรงการหมุนผ่านคัปปลิงที่เชื่อมต่อระหว่างเพลามอเตอร์กับเพลาของชุดจำลองการสั่นสะเทือน ทำให้โรเตอร์หมุน เกิดการสั่นสะเทือนที่แบร์ริงสองตัวคือ แบร์ริง A และ B ที่รองรับเพลา หัวจับสัญญาณความเร่งจะส่งสัญญาณความเร่งเข้าเครื่องประมวลผลสัญญาณ DAWE 3010 ส่วนตัว OptoPhoto sensor จะจับสัญญาณเฟสการหมุนของตัวโรเตอร์ผ่านชุดเปรียบเทียบแรงดันของชุดควบคุมการทำงานแล้วส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์ผลสัญญาณ DAWE-3010 เพื่อเปรียบเทียบเฟสกับสัญญาณการสั่นสะเทือน

4.7 โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

โปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนจะใช้โปรแกรม DASY LAB 5.6 ในเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ DEWE-3010 ลักษณะการทำงานของโปรแกรมคือจะรับสัญญาณดิจิทัลที่เครื่อง DEWE-3010 แปลงจากสัญญาณอนาล็อกที่ได้มาจาก Input Sensor ต่าง ๆ แต่เนื่องจากโปรแกรมเป็น Universal Analysis ดังนั้นจึงต้องเขียนแผนผังการทำงานและกำหนดคุณลักษณะต่าง ๆ ของโมดูลเอง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เรากำลังต้องการทราบ ในโครงการนี้ต้องการค่าความเร็ว และการเปรียบเทียบค่าเฟส ซึ่งสามารถเขียนแผนผังโปรแกรมได้ดังต่อไปนี้

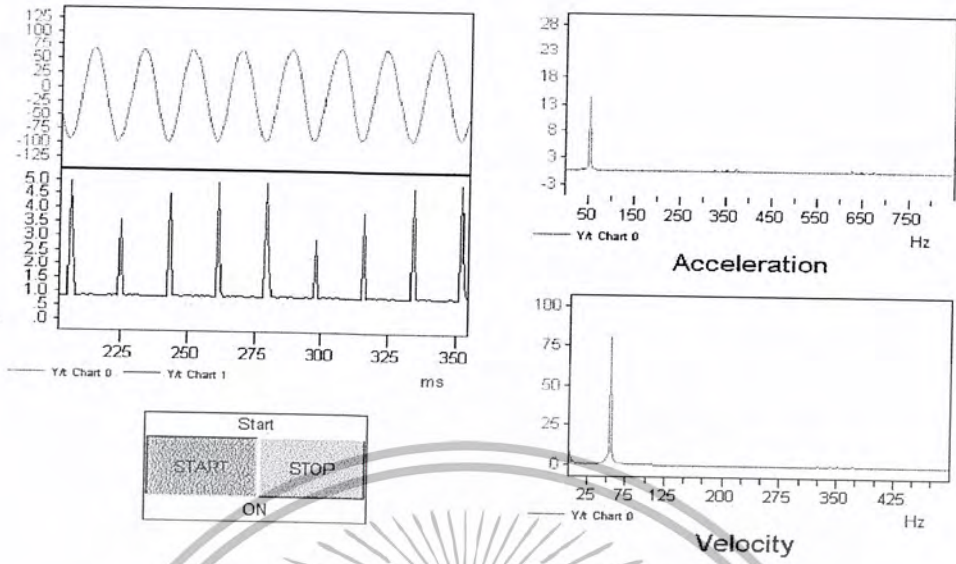
4.7.1 โปรแกรมวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบ 1 ระนาบ



รูปที่ 4.10 แผนผังลำดับการวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว

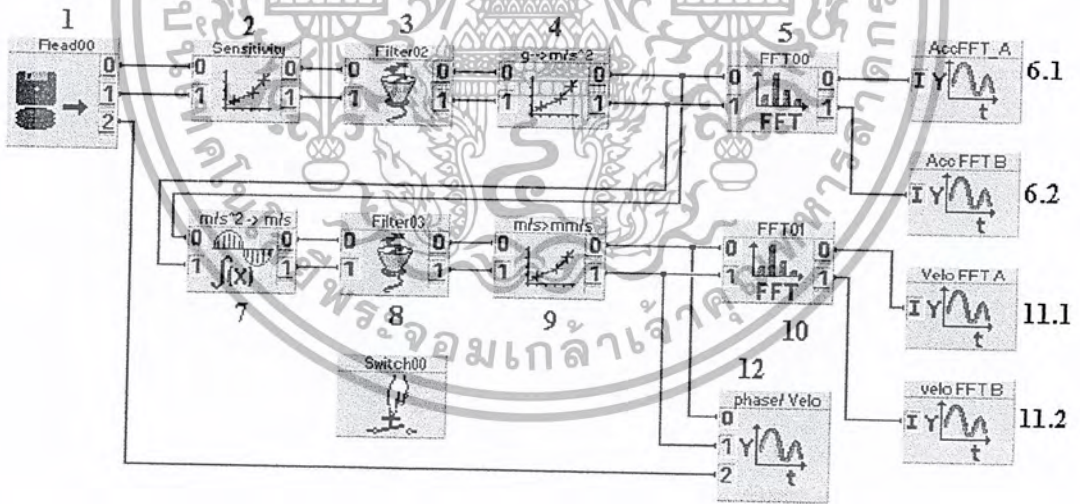
จากรูปที่ 4.10 Module Dev1-A100 (หมายเลข 1) จะรับสัญญาณจากคาร์ดรับสัญญาณของเครื่อง DAWE-3010 กำหนดให้มี 2 ช่องสัญญาณคือ Ch0 รับสัญญาณจากหัวจับสัญญาณความเร่งและ Ch2 รับสัญญาณจาก Phase Detector สัญญาณจาก Ch0 จะถูกส่งไปยัง Sensitivity Module (หมายเลข 2) เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นค่าความเร่งในหน่วยจำนวนเท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g) จากนั้นจะส่งไปกรองสัญญาณย่านความถี่รบกวนออกโดย Filter Module (หมายเลข 3) แล้วแปลงค่าเป็นค่าความเร่ง (m/s^2) โดย Scaling Module (หมายเลข 4) ส่วน FFT Module (หมายเลข 5) จะวิเคราะห์สัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ แล้วแสดงผลออกทางกราฟความเร่งหมายเลข 6 ค่าความเร่งที่ได้จากหมายเลข 4 จะถูกเปลี่ยนหน่วยจาก m/s^2 เป็น mm/s^2 ที่ Scaling Module (หมายเลข 7) จากนั้นจะผ่าน Integration Module (หมายเลข 8) เพื่อเปลี่ยนความเร่งเป็นความเร็วและ กรองค่าคงที่จากการอินทิเกรตที่ Filter Module (หมายเลข 9) จากนั้น FFT Module (หมายเลข 10) จะแยกสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ เพื่อแสดงขนาดความเร็วที่ความถี่ต่าง ๆ ทางกราฟความเร็วเทียบกับโดเมนความถี่(หมายเลข 11) ในขณะที่ความถี่ที่ได้จากหมายเลข 9 จะถูกส่งไปแสดงผลเทียบตำแหน่งเฟส กับจุดอ้างอิงในโดเมนเวลา และแสดงผลทางกราฟหมายเลข 12

การแสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณของโปรแกรมจะแสดงผลทาง LayOut window ของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 LayOut Window ของการปรับสมดุลแบบ 2 ระนาบ

4.7.2 โปรแกรมวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบ 2 ระนาบ

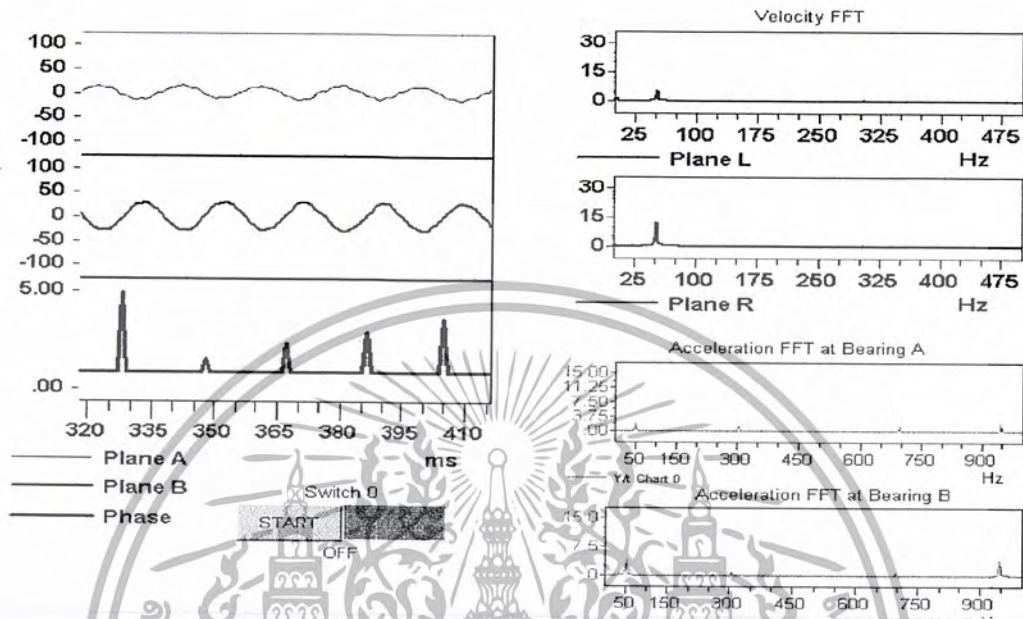


รูปที่ 4.12 แผนผังลำดับการวิเคราะห์และแสดงผลสัญญาณสำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

จากรูปที่ 4.12 มีหลักการการทำงานเหมือนแบบ 1 ระนาบในรูปที่ 4.10 ทุกขั้นตอนแต่มีข้อแตกต่างคือ สำหรับแบบสองระนาบ ในแต่ละโมดูลจะมี 2 ช่องสัญญาณ คือ Ch0 เป็นสัญญาณที่ได้จากการสั่นสะเทือนที่เบร็ง A ส่วน Ch1 เป็นสัญญาณที่ได้จากการสั่นสะเทือนที่เบร็ง B และ Ch2 เป็นสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากจุดอ้างอิงเพื่อใช้เทียบตำแหน่งเฟส การแสดงผลของค่าการวัดจะแสดงทาง LayOut Window ดังรูปที่ 4.13

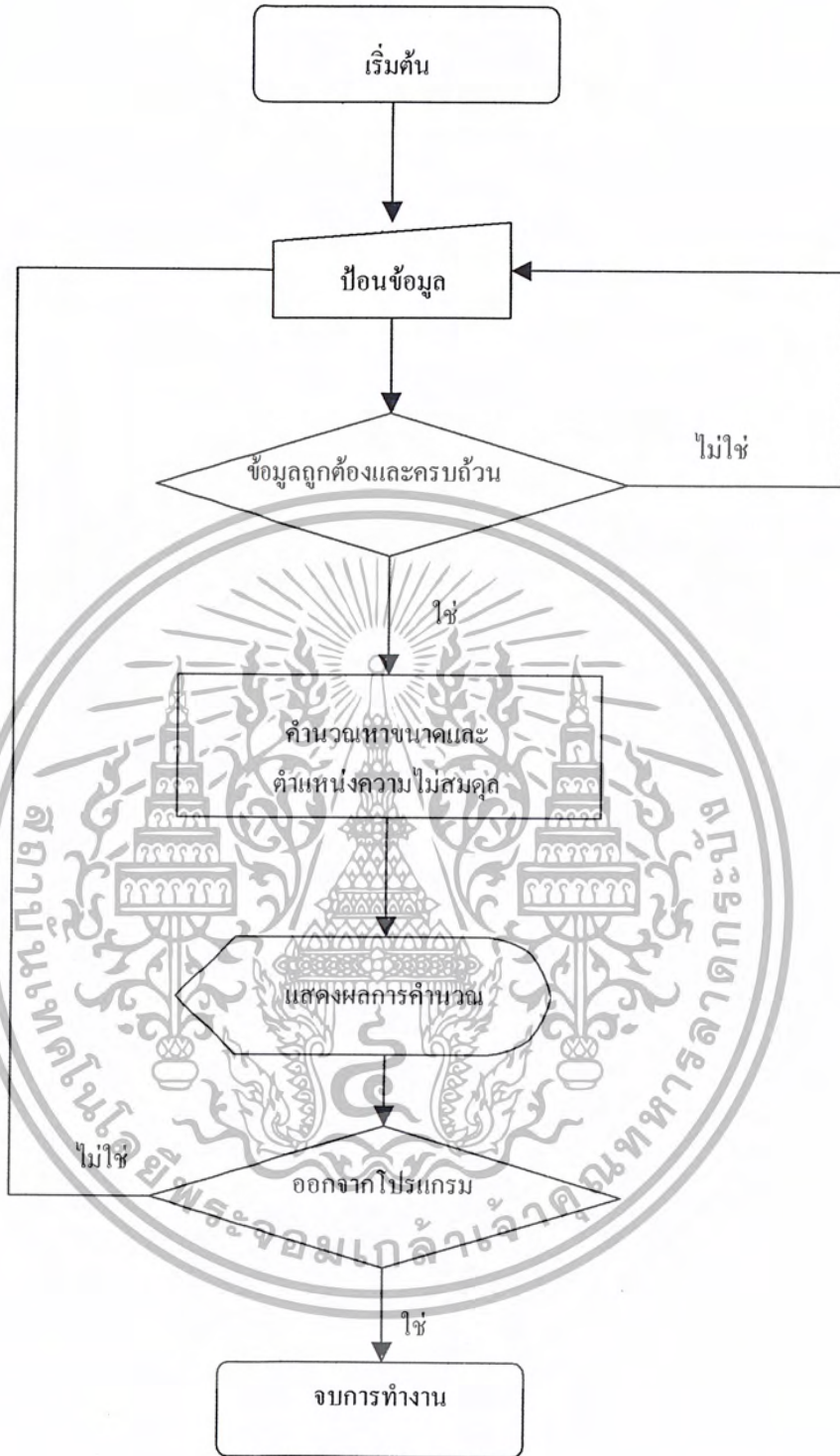


รูปที่ 4.13 LayOut Window ของการปรับสมดุลแบบ 25 องศา

4.8 โปรแกรมการคำนวณหาขนาดและตำแหน่งความไม่สมดุล

เพื่อความสะดวก ถูกต้อง และรวดเร็วในการคำนวณหาความไม่สมดุลและขนาดของมวลถ่วง พร้อมกับตำแหน่งที่ต้องถ่วงมวล ในการปรับสมดุล โดยวิธีการเวกเตอร์การสันสะท้อนดังบทที่ 3 จึงได้เขียนโปรแกรมการคำนวณขึ้นมา คือ โปรแกรม BalanceCalc1.02 ด้วยภาษาโปรแกรม Microsoft Visual Basic (สามารถดู program code ได้ที่ภาคผนวกท้ายเล่ม) หลักการทำงานของโปรแกรมแสดงไว้ในแผนผังงานของโปรแกรม(Flowchart) ดังรูป 4.14

โปรแกรมจะรับค่าตัวแปรต่าง ๆ คือ การสันสะท้อนเริ่มต้น การสันสะท้อนหลังคิดมวลถ่วง และขนาดของมวลและตำแหน่งมวลถ่วงที่คิดเข้าไป เพื่อนำไปคำนวณตามสูตร โดยวิธีเวกเตอร์และแสดงผลลัพธ์ออกมาทางหน้าจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.14 แผนผังงาน(Flowchart) ของโปรแกรมคำนวณค่าความไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

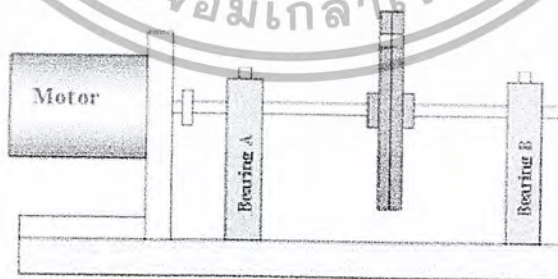
5.1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

- ก. ศึกษาทฤษฎีการปรับสมดุลการสั่นสะเทือนของวัตถุหมุน
- ข. ศึกษาการใช้งานเครื่องวัดการสั่นสะเทือน DAWE-3010
- ค. ศึกษาการเขียน โปรแกรมคำนวณหาค่าความไม่สมดุลสำหรับระนาบเดียวและสองระนาบ โดยใช้วีเคราะห์เวกเตอร์การสั่นสะเทือน โดยใช้ Microsoft Visual Basic 6.0
- ง. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน ด้วยโปรแกรม DASyLab 5.6
- จ. ออกแบบและสร้างชุดทดลอง ชุดจำลองการสั่นสะเทือน ชุดสัญญาณ
- ฉ. ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชุดการทดลองสร้างขึ้น

การทดสอบชุดทดลองการปรับสมดุลที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี ว่ามีค่าผิดพลาดอยู่ในระดับใด โดยการ สร้างสภาวะความไม่สมดุล ที่รู้ทั้งตำแหน่งและขนาดของความไม่สมดุล โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกเป็นสองชุดคือ การทดลองปรับสมดุลแบบระนาบเดียวและการทดลองปรับสมดุลแบบสองระนาบ

5.2 การทดลองในการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว

การทดลองการปรับสมดุลแบบระนาบเดียว แผ่นจาน โรเตอร์จะเลื่อนมาประกบกันและอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างเบร้งทั้งสองดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ การวัดระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนในขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass การทดสอบความถูกต้องในการแสดงค่าขนาดและตำแหน่งของ Unbalance Mass ที่เรารู้ค่า และการทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุล

5.2.1 ระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass

เมื่อทำการติดตั้งและประกอบชุดทดลองเข้าด้วยกันดังรูป 4.9 และ รูปที่ 5.1 แล้วสับสวิทช์มอเตอร์ให้มอเตอร์หมุน ปรับความเร็วรอบในฟังก์ชันที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที วัดการสั่นสะเทือนที่เบร็ง B แล้วบันทึกผลการทดลอง ได้กราฟแสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.3

5.2.2 การทดสอบความถูกต้องของขนาดมวลและมุมเฟสที่คิดเพื่อปรับความสมดุล

ในการทดลองจะจำลองเครื่องจักรเป็นแผ่นจานกลมซึ่งเจาะรู 8 รู (ทุก ๆ 45 องศา) ที่รัศมี 35 มม. เพื่อใช้ติดมวลทดสอบ สวมบนเพลาคิดเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีความเร็วรอบประมาณ 2500 รอบ/นาที และทำการถ่วงสมดุลแผ่นเหล็กให้มีความไม่สมดุลเหลือน้อยที่สุด จากนั้นทำการติดมวลไม่สมดุลสมมติด้วยขนาดและมุมค่าหนึ่ง แล้วเริ่มสตาร์ทมอเตอร์จนกระทั่งมีความเร็วรอบคงที่ จากนั้นก็ใช้เครื่องวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน DAWE-3010 เพื่อวัดขนาดการสั่นสะเทือนและมุมเฟส นำค่าสัญญาณที่อ่านได้ป้อนเข้าโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อคำนวณหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุลของวัตถุ แล้วเทียบกับตำแหน่งจริง เพื่อหาค่าผิดพลาดของเครื่อง

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ต่อสายหัวจับสัญญาณ Opto Photo Sensor เข้ากับชุดควบคุมและติดตั้งเข้ากับขาตั้งซึ่งรายละเอียดการให้อยู่ในบทที่ 4, ต่อสายสัญญาณเฟสจากชุดควบคุมเข้าเครื่องประมวลผลสัญญาณ DAWE-3010 ที่ Analog Input Channel (CH7), ต่อสายไฟจากชุดจ่ายไฟเข้าชุดควบคุม และจากชุดควบคุมเข้ามอเตอร์
- 2) ติดหัวจับสัญญาณความเร่งที่เบร็ง โดยใช้ขั้วตั้งยึดให้แน่น และต่อสายเข้ากับเครื่องประมวลผลสัญญาณ DAWE-3010
- 3) เปิดเครื่องประมวลผลสัญญาณแล้วเปิด โปรแกรม DasyLAB5.6 และเลือกเปิด ไฟล์ Rotor balancing one plane
- 4) ติดมวลไม่สมดุลสมมติ ขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 0 องศา เข้ากับโรเตอร์กดสวิทช์มอเตอร์ให้มอเตอร์ทำงาน ปรับความเร็วรอบในการหมุนให้เหมาะสม แล้วอ่านและจดบันทึกขนาดการสั่นสะเทือนและมุมเฟสจากโปรแกรม Dasy Lab
- 5) หุยมอเตอร์แล้วติดมวลกลุ่มเข้าไปที่ตัวโรเตอร์ พร้อมจดบันทึกขนาดและตำแหน่งของมวลกลุ่ม
- 6) เปิดสวิทช์มอเตอร์ให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบคงที่แล้วอ่านค่าและจดบันทึกการสั่นสะเทือนและมุมเฟสที่สั่นสะเทือน
- 7) คำนวณหาความไม่สมดุลโดยใช้โปรแกรม BalancCalc. 1.0 ที่เขียนขึ้น (คู่มือภาคผนวก)
- 8) ย้ายตำแหน่งมวลไม่สมดุลสมมติ เพื่อทำการทดลองที่ตำแหน่งอื่น คือ ที่ 0, 90, 135,

180, 225, 270, 315 องศา ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 – 5.7.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุล

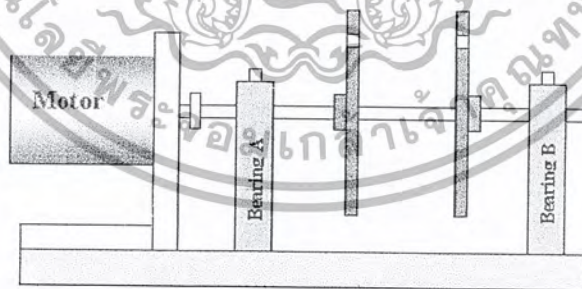
การทดสอบนี้ทำขึ้นเพื่อทดสอบว่าในการปรับความสมดุลแต่ละครั้งตามที่โปรแกรมคำนวณได้จะทำให้ระดับการสั่นสะเทือนลดน้อยลงไปได้หรือไม่ โดยการทดลองจะใช้การคิดมวลที่ไม่สมดุลบนโรเตอร์ แล้วจึงทำการถ่วงมวลในการปรับสมดุลเพื่อลดขนาดของการสั่นสะเทือน

ขั้นตอนการทดลอง

- 1) เตรียมชุดการทดลองเหมือนข้อ 1 – 3 ของหัวข้อ 5.2.2
- 2) ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 4 – 7 ของหัวข้อ 5.2.2 โดยทดสอบที่ตำแหน่งเพิ่มทีละ 45 องศาจากศูนย์ถึง 360 และทำการถ่วงมวลเพื่อปรับสมดุลตามที่คำนวณได้ในแต่ละกรณี
- 3) ผลการทดลองแสดงในตาราง 5.8

5.3 การทดลองในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

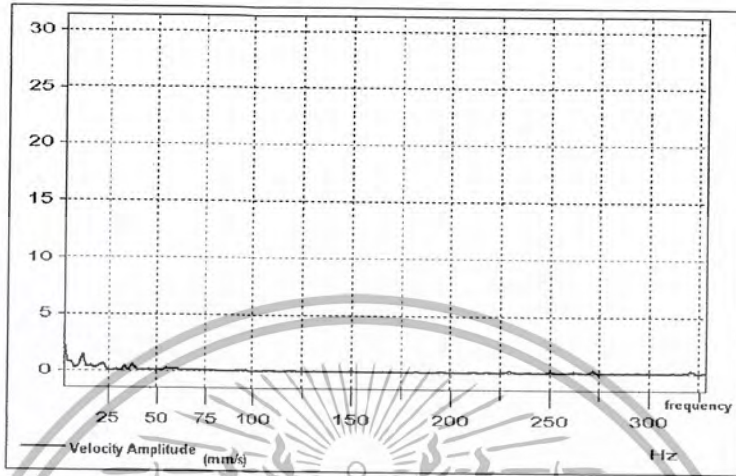
การทดลองการปรับสมดุลแบบสองระนาบ แผ่นจาน โรเตอร์จะเลื่อนออกจากกันดังรูปที่ 5.2 การทดลองจะแบ่งออก 3 กรณีคือ การวัดระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนในขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass การทดสอบการแสดงค่าขนาดและตำแหน่งของ Unbalance Mass ที่เรารู้ค่า และการทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุล ขั้นตอนการทดลองจะคล้ายแบบหนึ่งระนาบแต่จะทำการวัดการสั่นสะเทือนทั้งแบร์ริง A และ แบร์ริง B และส่งมวลเข้าไปทั้งสองระนาบคือระนาบซ้ายและระนาบขวา ผลการทดลองแสดงไว้ในหัวข้อ 5.4



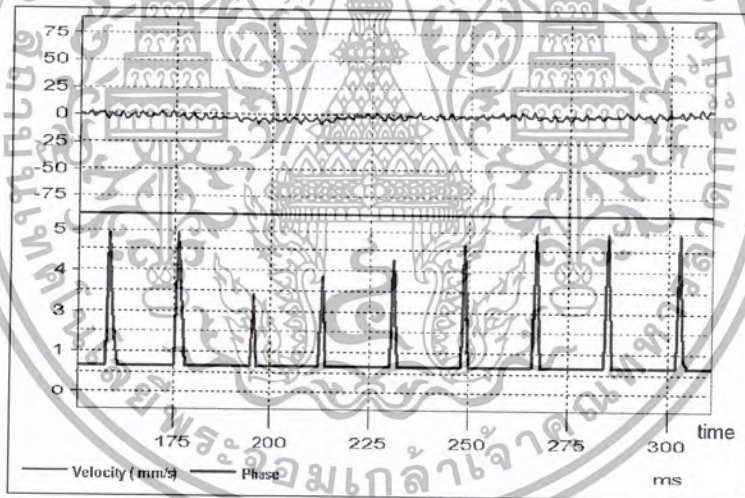
รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของโรเตอร์ในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

5.4 ผลการทดลอง

5.4.1 ระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนขณะไม่มี Unbalance Mass ได้ผลดังรูปที่ 5.3



(ก) แอมพลิจูดการสั่นสะเทือนเทียบกับ โดเมนความถี่



(ข) แอมพลิจูดการสั่นสะเทือนและตำแหน่งเฟสเทียบกับเวลา

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนของวัตถุหนึ่งระนาบ

จากกราฟในรูปที่ 5.3 รูป ก. จะแสดงขนาดของความเร็ว(mm/s)ในโดเมนความถี่ เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 10 Hz หรือ 0.2 เท่าของความถี่ในการหมุนของโรเตอร์ (50 Hz) เป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ส่วนที่ความถี่ของเพลลาจะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจาก Unbalance mass มีค่าน้อยมากโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.5 mm/s แสดงว่ามีการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสามารถประมาณได้ว่าชุดจำลองที่

สร้างขึ้นมีความสมดุลในระดับที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของการแสดงขนาดมวลและมุมเฟสที่ติดเพื่อปรับความสมดุลแบบหนึ่งระนาบ

ตาราง 5.1 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 0 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 0° | | | |
|----------|-----------|--------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 45 | 3.90 | 0.10 | 6.92 | 6.92 |
| 2 | 4 g @ 90 | 3.24 | 0.76 | 10.00 | 10.00 |
| 3 | 4 g @ 135 | 3.47 | 0.53 | 9.47 | 9.47 |
| 4 | 4 g @ 180 | 1.21 | 2.79 | 87.97 | 87.97 |
| 5 | 4 g @ 225 | 4.01 | 0.01 | 10.00 | 10.00 |
| 6 | 4 g @ 270 | 2.43 | 1.57 | 20.00 | 20.00 |
| 7 | 4 g @ 315 | 3.65 | 0.35 | 10.00 | 10.00 |

ตาราง 5.2 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 90 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 90° | | | |
|----------|-----------|---------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 0 | 5.19 | 1.19 | 94.74 | 4.74 |
| 2 | 4 g @ 45 | 3.67 | 0.33 | 94.74 | 4.74 |
| 3 | 4 g @ 180 | 3.01 | 0.99 | 94.74 | 4.74 |
| 4 | 4 g @ 225 | 3.73 | 0.27 | 94.74 | 4.74 |
| 5 | 4 g @ 315 | 6.51 | 2.51 | 94.74 | 4.74 |

ตาราง 5.3 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 135 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 135° | | | |
|----------|-----------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 0 | 3.56 | 0.44 | 151.58 | 16.58 |
| 2 | 4 g @ 45 | 5.22 | 1.22 | 140.00 | 5.00 |
| 3 | 4 g @ 225 | 3.55 | 0.45 | 151.58 | 16.58 |
| 4 | 4 g @ 270 | 3.02 | 0.98 | 151.58 | 16.58 |
| 5 | 4 g @ 315 | 3.77 | 0.23 | 140.00 | 5.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.4 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล
เมื่อสร้างมวลไม่สมดุลหรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 180 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 135° | | | |
|----------|-----------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 0 | 3.75 | 0.25 | 189.47 | 9.47 |
| 2 | 4 g @ 45 | 3.78 | 0.22 | 189.47 | 9.47 |
| 4 | 4 g @ 90 | 4.46 | 0.46 | 189.47 | 9.47 |
| 5 | 4 g @ 270 | 2.53 | 1.47 | 170.53 | 9.47 |
| 6 | 4 g @ 315 | 2.88 | 1.12 | 180.00 | 0.00 |

ตาราง 5.5 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล
เมื่อสร้างมวลไม่สมดุลหรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 225 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 225° | | | |
|----------|-----------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 0 | 2.88 | 1.17 | 233.51 | 8.51 |
| 2 | 4 g @ 45 | 3.79 | 0.21 | 227.37 | 2.37 |
| 3 | 4 g @ 90 | 4.68 | 0.68 | 227.37 | 2.37 |
| 4 | 4 g @ 135 | 3.06 | 0.94 | 240.00 | 15.00 |
| 5 | 4 g @ 315 | 5.26 | 1.26 | 240.00 | 15.00 |

ตาราง 5.6 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล
เมื่อสร้างมวลไม่สมดุลหรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 270 องศา

| ครั้งที่ | มวลลุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 270° | | | |
|----------|-----------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 4 g @ 0 | 3.57 | 0.43 | 284.21 | 14.21 |
| 2 | 4 g @ 45 | 3.53 | 0.47 | 284.21 | 14.21 |
| 3 | 3 g @ 90 | 3.81 | 0.19 | 284.21 | 14.21 |
| 4 | 3 g @ 135 | 4.06 | 0.06 | 284.21 | 14.21 |
| 5 | 3 g @ 180 | 3.89 | 0.11 | 284.21 | 14.21 |

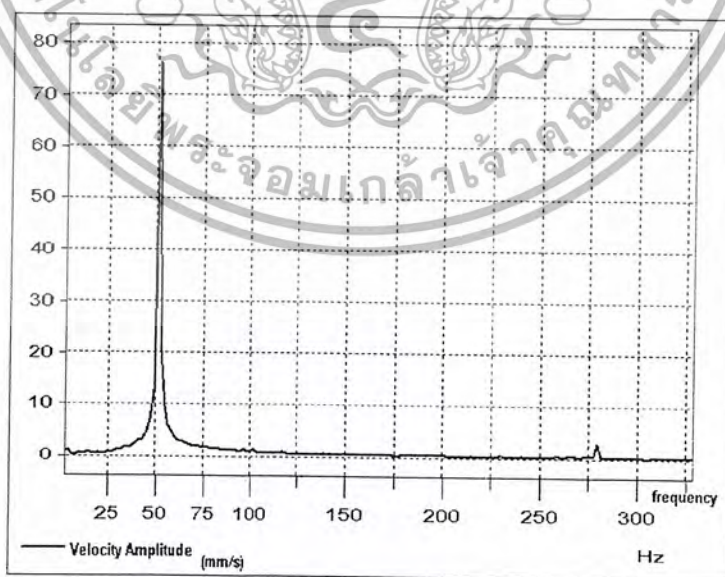
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.7 แสดงผลของการทดสอบเพื่อหาขนาดและตำแหน่งมวลที่ไม่สมดุล
เมื่อสร้างมวลไม่สมดุล หรือมวลสมมติ ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 315 องศา

| ครั้งที่ | มวลสุ่ม | Unbalance สมมติ 4 g @ 315° | | | |
|----------|-----------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | | ขนาด(กรัม) | คลาดเคลื่อน | ตำแหน่งมุม | มุมคลาดเคลื่อน |
| 1 | 3 g @ 0 | 4.10 | 0.10 | 322.11 | 7.11 |
| 2 | 3g @ 90 | 3.35 | 0.65 | 320.00 | 5.00 |
| 3 | 3 g @ 135 | 3.81 | 0.19 | 322.11 | 7.11 |
| 4 | 3 g @ 180 | 4.29 | 0.29 | 322.11 | 7.11 |
| 5 | 3 g @ 225 | 3.21 | 0.79 | 320.00 | 5.00 |

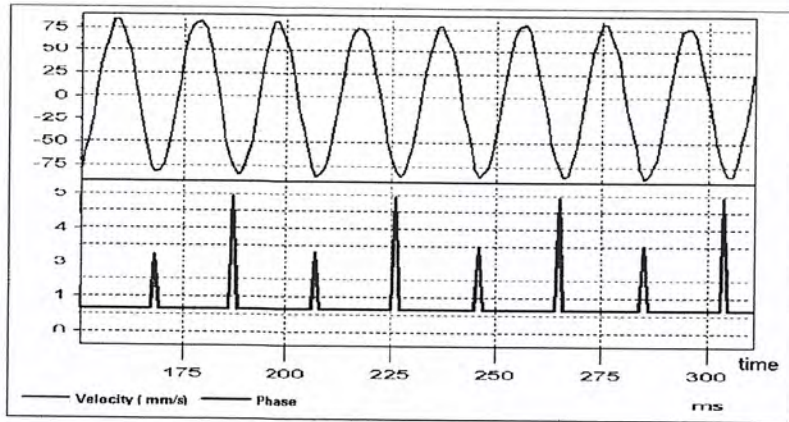
5.4.3 ผลการทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุลแบบสองระนาบ

เมื่อทำการติด Unbalance Mass ขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 0 องศา แล้ววัดค่าการสั่นสะเทือน เกิดการสั่นสะเทือนขนาด 75.54 mm/s ที่ตำแหน่ง 9 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 เมื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณ โดยโปรแกรมจะต้องถ่วงมวลขนาด 3.91 กรัม ที่ตำแหน่ง 189 องศา และเมื่อทำการถ่วงมวลเข้าไปแล้ววัด การสั่นสะเทือนปรากฏว่าการสั่นสะเทือนลดลงเหลือ 0.27 mm/s ที่ตำแหน่ง 182 องศา ดังแสดงใน รูปที่ 5.5 จากนั้นทดลองย้ายตำแหน่งของ Unbalance Mass ไปที่ตำแหน่งอื่น ๆ ได้แก่ที่ตำแหน่งมุม 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 องศาตามลำดับแล้วทำการทดลองเหมือนข้างต้นผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.8 และ รูปที่ 5.6



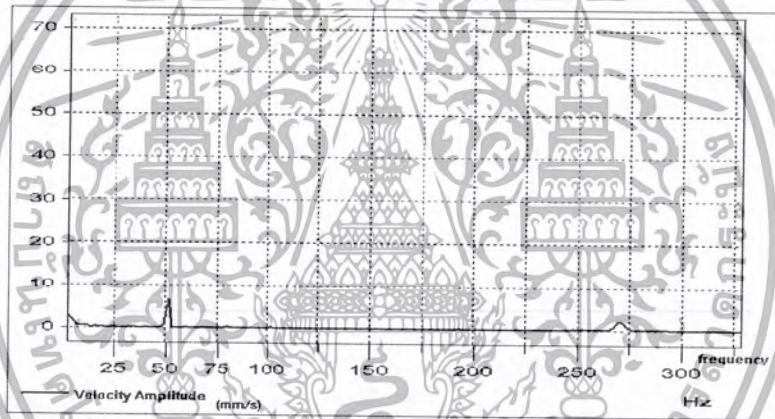
รูปที่ 5.4 (ก) การสั่นสะเทือนเทียบกับ โดเมนความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 (ข) การสั่นสะเทือนและตำแหน่งเทียบเวลา

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ขนาด 4 กรัม ที่ตำแหน่ง 0 องศา ก่อนปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ



(ก) การสั่นสะเทือนเทียบกับ โดเมนความถี่



(ข) การสั่นสะเทือนและตำแหน่งเทียบเวลา

รูปที่ 5.5 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ขนาด 4 กรัม

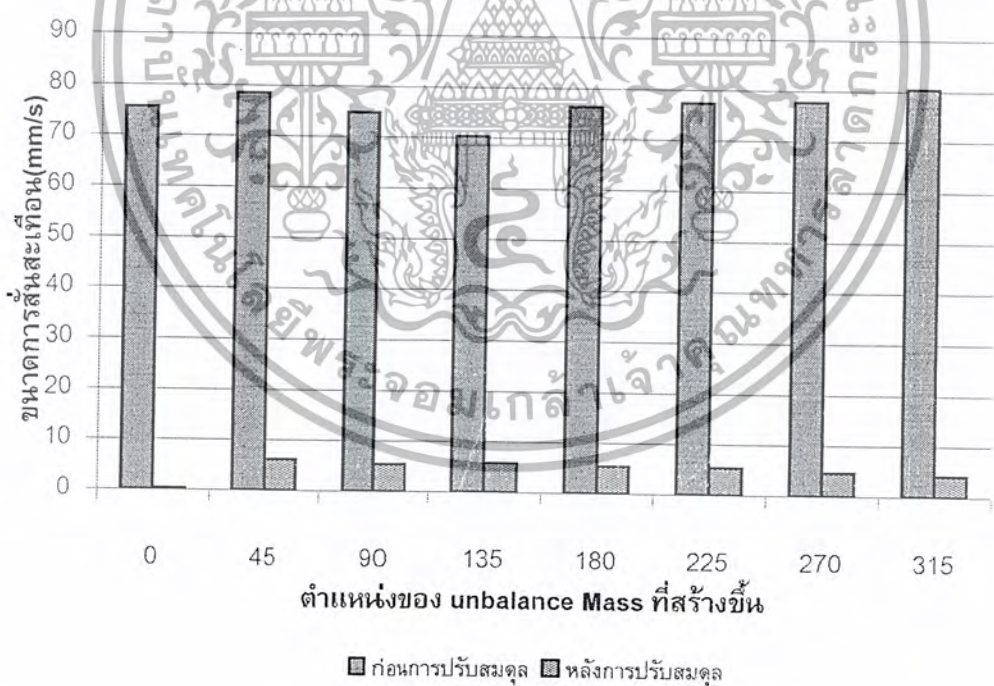
ที่ตำแหน่ง 0 องศา หลังปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 5.8 แสดงผลของการทดสอบระดับการสั่นสะเทือนก่อนและหลังปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ

| ครั้งที่ | มวลสมมุติ | การสั่นสะเทือนเริ่มต้น | | มวลถ่วงที่วัดได้ | | มวลที่ใช้ถ่วงจริง | | การสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุล | |
|----------|-----------|------------------------|--------|------------------|---------|-------------------|---------|-----------------------------|--------|
| | | mm/s | องศา | กรัม | ตำแหน่ง | กรัม | ตำแหน่ง | mm/s | องศา |
| 1 | 4g @ 0 | 75.54 | 9.00 | 3.91 | 189.00 | 4.00 | 180.00 | 0.27 | 182.00 |
| 2 | 4g @ 45 | 78.43 | 54.00 | 3.98 | 234.00 | 4.00 | 225.00 | 6.21 | 54.00 |
| 3 | 4g @ 90 | 74.81 | 90.00 | 3.86 | 270.00 | 4.00 | 270.00 | 5.35 | 90.00 |
| 4 | 4 g @ 135 | 70.24 | 144.00 | 3.82 | 324.00 | 4.00 | 315.00 | 5.82 | 126.00 |
| 5 | 4g @ 180 | 76.36 | 198.00 | 4.08 | 378.00 | 4.00 | 0.00 | 5.44 | 196.00 |
| 6 | 4g @ 225 | 77.27 | 234.00 | 3.84 | 54.00 | 4.00 | 45.00 | 5.35 | 234.00 |
| 7 | 4g @ 270 | 77.75 | 288.00 | 3.96 | 108.00 | 4.00 | 90.00 | 4.61 | 234.00 |
| 8 | 4g @ 315 | 80.31 | 324.00 | 3.97 | 144.00 | 4.00 | 135.00 | 4.08 | 196.00 |

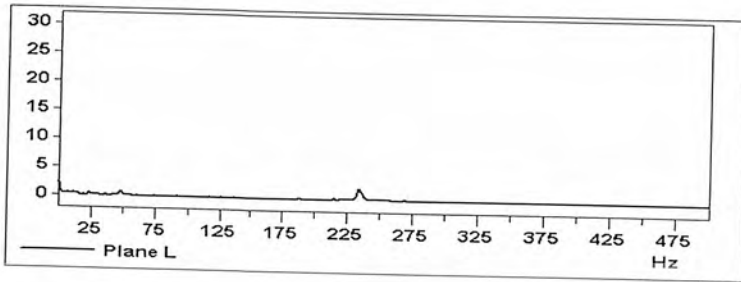
จากตารางบันทึกผลการทดลองในตาราง 5.8 เมื่อคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของมวลเพื่อปรับสมดุลแล้วปรับสมดุลทำให้ขนาดการสั่นลดลงจากตอนเริ่มต้น โดยเฉลี่ยการสั่นสะเทือนมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 93.90 สำหรับการปรับสมดุลหนึ่งระนาบ



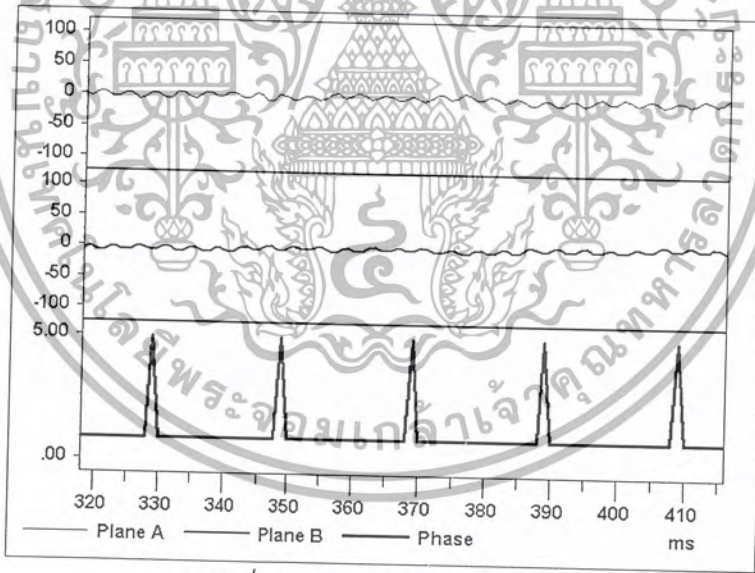
รูปที่ 5.6 แผนภูมิเปรียบเทียบระดับการสั่นสะเทือนก่อนที่เกิดจากมวลไม่สมดุลขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ก่อนและหลังการปรับสมดุลในการการทดลองแบบหนึ่งระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.4 ผลการวัดระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนในขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass ของการปรับสมดุลแบบสองระนาบ



(ก) การสั่นสะเทือนเทียบกับ โดเมนความถี่



(ข) การสั่นสะเทือนและตำแหน่งเทียบเวลา

รูปที่ 5.7 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนของวัดถูกระนาบเดียว

จากกราฟในรูปที่ 5.7 รูป ก. จะแสดงขนาดของความเร็ว(mm/s)ที่เบริง A และ เบริง B ซึ่งมีผลมาจากระนาบด้านซ้ายและระนาบด้านขวาตามลำดับ ในโดเมนความถี่ เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของการสั่นสะเทือนจะเห็นได้ว่าที่ความถี่ประมาณ 230 Hz หรือประมาณ 5 เท่าของความถี่ในการหมุนของโรเตอร์ (50 Hz) ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนที่เกิดจากเบริงเนื่องจากเบริงจะทำให้การสั่นสะเทือนที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ความถี่ของเพลาจจะเห็นได้ว่าการสั่นสะเทือนเริ่มต้นของชุดจำลองการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจาก Unbalance mass มีค่าน้อยมากโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.55 mm/s แสดงว่าการสั่นสะเทือนเพียงเล็กน้อยเท่านั้นสามารถประมาณได้ว่าชุดจำลองที่สร้างขึ้นมีความสมดุลในระดับที่ยอมรับได้

5.4.5 ผลการแสดงค่าความไม่สมดุล ขนาดและตำแหน่งมวลที่ต้องถ่วงในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

เมื่อทำการติดมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโรเตอร์แล้วทำการวัดค่าการสั่นสะเทือนและคำนวณหาความไม่สมดุลและตำแหน่งมวลที่ต้องถ่วง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตาราง 5.9 แสดงการสั่นสะเทือนเริ่มต้นและขนาดพร้อมทั้งตำแหน่งมวลที่ต้องใช้ถ่วง สำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ

| ครั้งที่ | ระนาบ, มุม | มวลสมมุติ | การสั่นสะเทือนเริ่มต้น | | มวลที่ต้องใช้ถ่วง | |
|----------|------------|-----------|------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | | mm/s | ตำแหน่งองศา | กรัม | ตำแหน่งองศา |
| 1 | L, A | 4g @ 0 | 11.45 | 205.71 | 2.27 | 73.14 |
| | R, B | 4g @ 135 | 13.77 | 68.57 | 1.87 | 165.98 |
| 2 | L, A | 4g @ 45 | 11.58 | 240.00 | 3.01 | 227.29 |
| | R, B | 4g @ 180 | 10.86 | 102.86 | 2.09 | 160.89 |
| 3 | L, A | 4g @ 45 | 27.83 | 154.29 | 12.28 | 192.35 |
| | R, B | 4g @ 40 | 10.95 | 34.29 | 0.97 | 173.94 |
| 4 | L, A | 4g @ 270 | 12.87 | 342.00 | 3.16 | 255.78 |
| | R, B | 4g @ 135 | 18.59 | 180.00 | 5.16 | 198.45 |
| 5 | L, A | 4g @ 135 | 10.39 | 144.00 | 3.16 | 248.60 |
| | R, B | 4g @ 315 | 14.60 | 324.00 | 1.38 | 196.15 |
| 6 | L, A | 4g @ 90 | 18.98 | 246.32 | 3.78 | 242.46 |
| | R, B | 4g @ 45 | 48.67 | 94.74 | 12.92 | 189.46 |

จากตารางที่ 5.9 ขนาดและตำแหน่งมวลที่ต้องการใช้ถ่วงในการปรับสมดุลแบบสองระนาบนั้นมีความละเอียดมาก อีกทั้งตำแหน่งมุมที่ต้องถ่วงนั้นมีค่าไม่ไกลเกินไปกับตำแหน่งรูของโรเตอร์ที่เราได้ออกแบบไว้ ดังนั้นเป็นการยากที่จะถ่วงมวลตามตำแหน่งที่คำนวณได้ เพราะฉะนั้นการสาธิตการปรับสมดุลของวัตถุหมุนแบบสองระนาบสามารถทำได้เป็นบางกรณีเท่านั้น

5.4.6 ผลการทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนหลังปรับสมดุลแบบสองระนาบ

การทดลองปรับความไม่สมดุลแบบสองระนาบ จากการสร้าง ความไม่สมดุลขึ้นมาโดยติดมวลขนาด 4 กรัมตำแหน่ง 45 องศาที่ระนาบด้านซ้าย และมวลขนาด 4 กรัมตำแหน่ง 180 องศาที่ระนาบด้านขวา แล้วเดินมอเตอร์เพื่อวัดผลการสั่นสะเทือน ได้ค่าการสั่นสะเทือนที่เบริง A 14.98 mm/s และการสั่นสะเทือนที่เบริง B 23.75 mm/s ผลดังแสดงในรูปที่ 11 หลังจากนั้นคำนวณหามวลถ่วงแล้วปรับสมดุลได้ผลดังรูปที่ 12



(ข) การสั่นสะเทือนและตำแหน่งเทียบเวลา

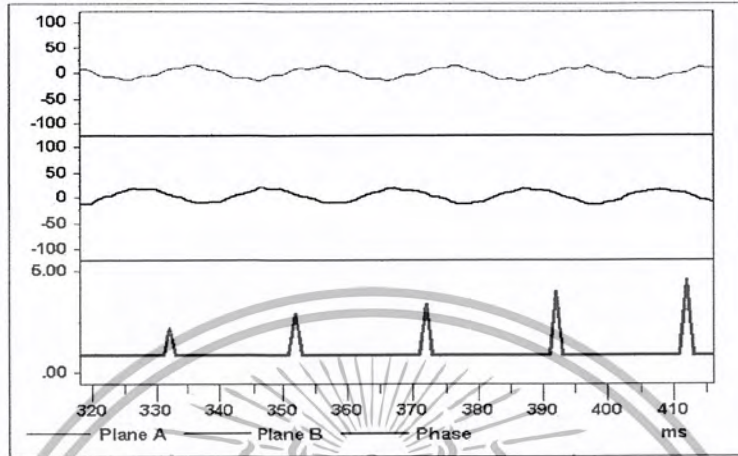
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี Unbalance mass ที่ระนาบด้านซ้ายขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 45 องศา และที่ระนาบด้านขวาขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 180 องศา ก่อนปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบสองระนาบ

จากรูปที่ 5.8 เกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่การหมุนของโรเตอร์ (50 Hz) เนื่องจาก Unbalance Mass ของแผ่นโรเตอร์ คำนวณหาค่ามวลที่ต้องถ่วงเพื่อปรับสมดุลคือ ขนาด 2.91 กรัมที่

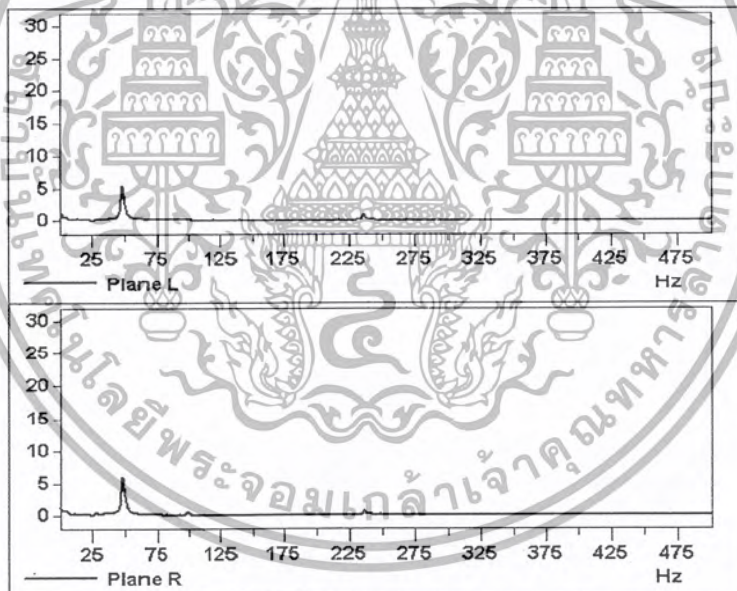
ตำแหน่งมุม 222.54 องศา สำหรับระนาบด้านซ้าย และขนาด 2.42 กรัมที่ตำแหน่ง 156 องศา สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบด้านขวา แต่เพื่อความสะดวกในการหามวลและเพื่อให้สามารถคิดในตำแหน่งรูนโรเตอร์ได้จึงได้ใช้ขนาดมวลถ่วงสำหรับระนาบด้านซ้ายเป็น 3 กรัม ที่ตำแหน่ง 225 องศา และมวลถ่วงขนาด 2.5 กรัม ที่ตำแหน่งมุม 135 องศา ได้ผลการสั่นสะเทือนลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.9



(ก) การสั่นสะเทือนเทียบกับโดเมนความถี่



(ข) การสั่นสะเทือนและตำแหน่งเทียบเวลา

รูปที่ 5.9 กราฟแสดงขนาดการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากมี *Unbalance mass* ที่ระนาบด้านซ้ายขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 45 องศา และที่ระนาบด้านขวาขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่ง 180 องศา หลังปรับสมดุลในการทดลองปรับสมดุลแบบสองระนาบ

จากรูปที่ 5.9 หลังการปรับสมดุลขนาดการสั่นสะเทือนลดลงระดับหนึ่ง ไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนได้มากกว่านี้เนื่องจาก ขนาดและตำแหน่งมวลที่ใช้ถ่วงเพื่อปรับสมดุลนั้นไม่เป็นไปตามที่

คำนวณได้ ทำให้ยังมีการสั่นสะเทือนของโรเตอร์เนื่องจาก *Unbalance Mass* หลงเหลืออยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผล

เนื้อหาในบทที่ 6 จะนำเสนอถึงสรุปผลการทดลอง สรุปผลการดำเนินงาน ผลที่ได้รับจากการทำโครงการนี้ ตลอดจนปัญหาและแนวทางแก้ไขปรับปรุงต่อไป

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.2.1 การปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ

การปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ การสั่นสะเทือนเริ่มต้นในขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass อยู่ในระดับค่าที่ยอมรับได้ ถือว่าชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรสำหรับหนึ่งระนาบ ที่สร้างขึ้นมีความสมดุล

การทดลองคิดมวล Unbalance Mass ที่รู้ค่าทั้งขนาดและตำแหน่งคือขนาด 4 กรัมที่ตำแหน่งมุมทุก ๆ 45 องศา แล้ววัดค่าและคำนวณหาความไม่สมดุลปรากฏว่าแสดงค่าโดยเฉลี่ยแล้วชุดทดลองสามารถแสดงค่าขนาดมวลที่ไม่สมดุลผิดพลาด 12 % และตำแหน่งมุมคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6 องศา คิดเป็น 2 % สรุปได้ว่าการวัดและคำนวณหาความไม่สมดุลมีค่าผิดพลาดน้อย เพียงพอที่จะใช้วิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุนแบบ 1 ระนาบได้

การทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนในการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ โดยเฉลี่ยแล้วสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ถึง 93.90 % เมื่อเทียบกับขนาดการสั่นสะเทือนเริ่มต้นก่อนการปรับสมดุล หลังการปรับสมดุลสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ในระดับดี

สรุปชุดจำลองการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นชุดสาธิตวิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุนแบบหนึ่งระนาบได้เป็นอย่างดี

6.2.2 การปรับสมดุลแบบสองระนาบ

ระดับการสั่นสะเทือนเริ่มต้นในขณะที่ยังไม่มี Unbalance Mass อยู่ในระดับค่าจนสามารถยอมรับได้ ถือว่าชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแบบสองระนาบ ที่สร้างขึ้นมีความสมดุล

การแสดงค่าขนาดและตำแหน่งของความไม่สมดุลสามารถคำนวณได้โดยละเอียดและค่าตำแหน่งไม่ใกล้เคียงกับตำแหน่งรูที่เจาะในโรเตอร์ ทำให้ไม่สามารถถ่วงมวลในตำแหน่งที่คำนวณให้ได้

การทดสอบความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนในการปรับสมดุลแบบสองระนาบนั้น ขนาดการสั่นสะเทือนลดลงได้ไม่มากนักคือ ประมาณ 50 % เท่านั้นเอง เนื่องจากขนาดและตำแหน่งที่ถ่วงมวลนั้นเป็นค่าโดยประมาณเพื่อให้สามารถติดในตำแหน่งรูของโรเตอร์ได้ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ตรงกับที่คำนวณได้จึงทำให้ความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนนั้นน้อย

สรุปชุดจำลองการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นสามารถใช้เป็นชุดสาธิตวิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุนแบบสองระนาบได้เพียงบางกรณีเท่านั้น

6.2 สรุปและวิจารณ์ผลการทำโครงการ

ในการจัดทำชุดทดลองการสั้นสะเทือนของเครื่องจักร เพื่อใช้ในการศึกษาวิธีการปรับสมดุลวัตถุหมุนชนิดเกร็งที่เกิดการสั้นสะเทือนในขณะที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการแผ่กระจายตัวของมวลไม่สม่ำเสมอตลอดเนื้อวัสดุ สามารถสาธิตสำหรับวัตถุแบบหนึ่งระนาบได้ดี แต่สำหรับแบบสองระนาบจะต้องมีการปรับปรุงตัวโรเตอร์สามารถถ่วงมวลได้ในหลาย ๆ ตำแหน่งและมีความละเอียดมากกว่านี้

6.3 ปัญหาในการทำโครงการ

ปัญหาในการทำโครงการส่วนมากเป็นปัญหาทางเทคนิคในการทำงาน เนื่องจากต้องใช้ความรู้ทั้งทางด้านสาขาวิชาเครื่องกล ไฟฟ้า และ อิเล็กทรอนิกส์ ผู้จัดทำโครงการมีความรู้และเชี่ยวชาญน้อย จึงต้องอาศัยคำปรึกษาจากอาจารย์ และ บุคคลอื่น ๆ ในการจัดทำโครงการอยู่เสมอ ส่งผลให้งานล่าช้ากว่าแผนงานเป็นอย่างมาก

6.4 ข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนา

1. เนื่องจากขนาดของตัวโรเตอร์ที่ใช้ในการคิดมวล มีขนาดใหญ่พอสมควร ทำให้ไม่สามารถทดลองคิดมวลที่มีขนาดน้ำหนักน้อย ๆ ได้ ควรออกแบบให้มีขนาดรูเล็กกว่านี้
2. เนื่องจากตำแหน่งรูที่ใช้สำหรับคิดมวลของโรเตอร์อยู่ที่ทุก ๆ ตำแหน่งมุม 45 องศา ทำให้ความละเอียดของตำแหน่งในการคิดมวลมีเพียง 8 ตำแหน่งเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถคิดมวลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ดีขึ้นควรตำแหน่งรูของตัวโรเตอร์ควรมีจำนวนรูเยอะกว่าที่ออกแบบใน โครงการนี้
3. ควรมีชุดแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงที่ชุดควบคุมเพื่อความสะดวกในการปรับค่าความเร็วรอบมอเตอร์ แทนการคำนวณจากตำแหน่งเฟส ที่ใช้อยู่ใน โครงการนี้
4. โปรแกรมการคำนวณขนาดความไม่สมดุล ควรพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถพิมพ์รายงานผลการคำนวณ ระบบความช่วยเหลือวิธีการใช้โปรแกรม รวมทั้งการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของฐานข้อมูลด้วย
5. ควรปรับปรุงชุดมวลถ่วงให้มีน้ำหนักที่เป็นมาตรฐานและมีน้ำหนักที่ถูกต้อง และจัดทำเพิ่มหลาย ๆ ขนาด

6.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

1. มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีการสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นระหว่างการหมุน อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของวัตถุหมุนที่มีการแผ่กระจายของมวลไม่สม่ำเสมอ
2. ได้ความรู้ในหลักการวิธีการปรับสมดุลเพื่อลดการสั้นสะเทือนของวัตถุหมุน โดยวิธีการแบบพลศาสตร์ ในระนาบตั้งฉากแกนหมุน 1 และ 2 ระนาบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการทำงานในอนาคตได้
3. ได้ความรู้สาขาวิชาอื่น ๆ นอกจากสาขาวิชาเครื่องกล เช่น ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนวิธีการใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดผลต่าง ๆ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมคำนวณค่าความไม่สมดุล

ก.1 บทนำ เนื่องจากการคำนวณหามวลที่จะนำมาถ่วงเพื่อปรับสมดุลโดยวิธีกราฟหรือวิธีเวกเตอร์ค่อนข้างจะยุ่งยาก และไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องแน่นอนได้ ดังนั้นจึงใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยคำนวณ เพื่อที่จะลดเวลาและข้อผิดพลาดอันอาจจะเกิดขึ้นเมื่อคำนวณ โดยการเขียนกราฟ

ก.2 วัตถุประสงค์ เป็นโปรแกรมเพื่อใช้คำนวณหาขนาดน้ำหนักและตำแหน่งของมวลไม่สมดุลและมวลที่ต้องนำมาถ่วงเพื่อปรับสมดุล ของวัตถุหมุนชนิดเกร็งทั้งแบบระนาบเดียวและแบบสองระนาบ

ก.3 ลักษณะทั่วไปของโปรแกรม

ชื่อโปรแกรม BalanceCalc. 1.0

ภาษาที่ใช้เขียน Visual Basic 6.0

ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 98SE, Microsoft Windows 2000, XP

ก.3 การใช้โปรแกรม

1. การติดตั้งโปรแกรม เรียกโปรแกรม Setup.exe แล้วทำตามขั้นตอน
2. การเปิดโปรแกรม Start Menu > Programs > Rigid Rotor Balancing > BalanceCalc. 1.0
3. เมื่อเปิดโปรแกรมจะมีหน้าต่างหลักขึ้นมาดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1

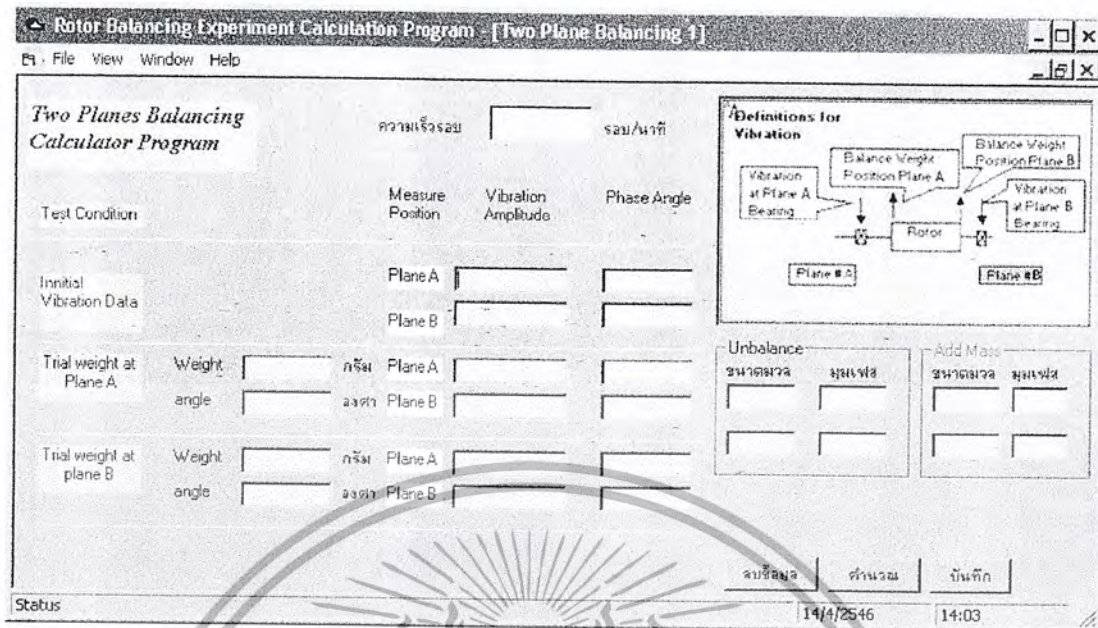
4. เลือกเมนู File

- File > New One Plane Balance สำหรับการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ
- File > New Two Plane Balance สำหรับการปรับสมดุลแบบสองระนาบ
- Exit สำหรับการจบการทำงาน

5. การคำนวณในการปรับสมดุลแบบหนึ่งระนาบ เมื่อเลือกเมนู File > New One Plane Balance ตามข้อ 4 แล้วจะปรากฏหน้าต่างการคำนวณสำหรับหนึ่งระนาบดังรูปที่ ก.2 หลังจากนั้นก็ป้อนข้อมูลในเฟรมข้อมูลให้ครบทุกช่อง แล้วกดปุ่ม “คำนวณ” ผลการคำนวณจะแสดงที่เฟรม “ผลการคำนวณ” เมื่อต้องการลบข้อมูลที่ป้อนทั้งหมด คลิกเลือกปุ่ม “เคลียร์”

รูปที่ ก.2

6. การคำนวณในการปรับสมดุลแบบสองระนาบ เมื่อเลือกเมนู File > New Two Plane Balance ตามข้อ 4 แล้วจะปรากฏหน้าต่างการคำนวณสำหรับสองระนาบดังรูปที่ ก.3 หลังจากนั้นก็ป้อนข้อมูลในเฟรมข้อมูลให้ครบทุกช่อง แล้วกดปุ่ม “คำนวณ” ผลการคำนวณจะแสดงที่เฟรม “ผลการคำนวณ” เมื่อต้องการลบข้อมูลที่ป้อนทั้งหมด คลิกเลือกปุ่ม “เคลียร์”



รูปที่ ก.2

ก.4 Program Code

```

===== General =====
Private Declare Function SendMessage Lib "user32" Alias "SendMessageA" (ByVal hwnd As Long,
ByVal wParam As Long, ByVal wParam As Long, ByVal lParam As Any) As Long
Const EM_UNDO = &HC7
Private Declare Function OSWinHelp% Lib "user32" Alias "WinHelpA" (ByVal hwnd&, ByVal
HelpFile$, ByVal wCommand%, dwData As Any)
' Rigid Rotor Balancing Project
' BalanceCal. Version 1.0
' Mr. Pakorn Pornterm Mechanical Engineering Department KMITL
++++ Main Form +++++
Private Sub MDIForm_Load()
LoadResStrings Me
Me.Left = GetSetting(App.Title, "Settings", "MainLeft", 1000)
Me.Top = GetSetting(App.Title, "Settings", "MainTop", 1000)
Me.Width = GetSetting(App.Title, "Settings", "MainWidth", 6500)
Me.Height = GetSetting(App.Title, "Settings", "MainHeight", 6500)
LoadNewDoc
End Sub
    
```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Private Sub LoadNewdocTwoPlane()      'LoadNewDoc()
    Static IDocumentCount As Long
    Dim frmD As frmTwoPlane 'frmDocument
    IDocumentCount = IDocumentCount + 1
    Set frmD = New frmTwoPlane 'frmDocument
    frmD.Caption = "Two Plane Balancing " & IDocumentCount
    frmD.Show
End Sub

```

```

Private Sub MDIForm_Unload(Cancel As Integer)
    If Me.WindowState <> vbMinimized Then
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainLeft", Me.Left
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainTop", Me.Top
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainWidth", Me.Width
        SaveSetting App.Title, "Settings", "MainHeight", Me.Height
    End If
End Sub

```

```

Private Sub mnuFileNewOnePlane_Click()
    LoadNewDocOnePlane
End Sub

```

```

Private Sub mnuNewTwoPlane_Click()
    LoadNewdocTwoPlane
End Sub

```

```

Private Sub tbToolBar_ButtonClick(ByVal Button As MSComCtlLib.Button)
    On Error Resume Next
    Select Case Button.Key
        Case "New"
            LoadNewDocOnePlane
    End Select
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Private Sub mnuHelpAbout_Click()
    frmAbout.Show vbModal, Me
End Sub
```

```
Private Sub mnuHelpSearchForHelpOn_Click()
```

```
    Dim nRet As Integer
    'if there is no helpfile for this project display a message to the user
    'you can set the HelpFile for your application in the
    'Project Properties dialog
    If Len(App.HelpFile) = 0 Then
        MsgBox "Unable to display Help Contents. There is no Help associated with this project.",
vbInformation, Me.Caption
    Else
        On Error Resume Next
        nRet = OSWinHelp(Me.hwnd, App.HelpFile, 261, 0)
        If Err Then
            MsgBox Err.Description
        End If
    End If
End Sub
```

```
Private Sub mnuHelpContents_Click()
```

```
    Dim nRet As Integer
    'if there is no helpfile for this project display a message to the user
    'you can set the HelpFile for your application in the
    'Project Properties dialog
    If Len(App.HelpFile) = 0 Then
        MsgBox "Unable to display Help Contents. There is no Help associated with this project.",
vbInformation, Me.Caption
    Else
        On Error Resume Next
        nRet = OSWinHelp(Me.hwnd, App.HelpFile, 3, 0)
        If Err Then
            MsgBox Err.Description
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

Dim frmD As frmOnePlane 'frmDocument
IDocumentCount = IDocumentCount + 1
Set frmD = New frmOnePlane 'frmDocument
frmD.Caption = "OnePlane balancing " & IDocumentCount
frmD.Show
End Sub

```

+++++ One Plane Form window +++++

Option Explicit

Private Sub Command1_Click()

On Error GoTo ErrBox

Dim x0, x1, p0, P1, Mt, Pt As Single

Dim a0, a1, b0, b1, at, bt As Single

Dim mo, po, VtScalar, Pa As Single

txtMo.Text = ""

txtPo.Text = ""

x0 = CSng(txtX0.Text) ' Initial Vibration Amplitude

p0 = CSng(txtP0.Text) ' Initial Vibration Phase

x1 = CSng(txtX1.Text) ' After add Trial Mass Vibration Amplitude

P1 = CSng(txtP1.Text) ' After add Trial Mass Vibration Phase

Mt = CSng(txtMt.Text) ' mass of trial weight

Pt = CSng(txtPt.Text) ' Phase of trial weight

a0 = x0 * Cos(p0 * 3.14159 / 180)

b0 = x0 * Sin(p0 * 3.14159 / 180)

a1 = x1 * Cos(P1 * 3.14159 / 180)

b1 = x1 * Sin(P1 * 3.14159 / 180)

at = a1 - a0

bt = b1 - b0

VtScalar = Sqr(at * at + bt * bt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    If VtScalar = 0 Then
        MsgBox "ท่านป้อนข้อมูล ไม่ถูกต้องหรือยังไม่ได้คิดมวลสุ่มกรุณาป้อนข้อมูลให้ครบ", vbOKOnly
    + vbExclamation, "Error"

        mo = 0

        Else

            mo = (x0 / VtScalar) * Mt

            po = p0 + 180

            Pa = -Pt + p0 + 180

            txtMo.Text = CStr(mo)

            txtPo = CStr(po)

            txtAm.Text = mo

            txtPhA.Text = -Pt + p0 + 180

            txtAddPhase2.Text = p0 + 180

        End If

    Exit Sub

    ErrBox:

    MsgBox "ป้อนข้อมูลไม่ครบและ โปรดป้อนเป็นตัวเลขเท่านั้น", vbOKOnly + vbExclamation, "-ข้อผิดพลาด"

    End Sub

Private Sub Command2_Click()

    txtX0.Text = ""

    txtP0.Text = ""

    txtX1.Text = ""

    txtP1.Text = ""

    txtMt.Text = ""

    txtPt.Text = ""

    txtMo.Text = ""

    txtPo.Text = ""

    txtAm.Text = " "

    txtAddPhase2.Text = ""

    txtPhA.Text = ""

End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

'+++++Two plane Form Window+++++

Option Explicit

Private Sub Command1_Click() ' Clear button

```

txtXa0.Text = ""
txtPa0.Text = ""
txtXa1.Text = ""
txtPa1.Text = ""
txtXa2.Text = ""
txtPa2.Text = ""
txtXb0.Text = ""
txtPb0.Text = ""
txtXb1.Text = ""
txtPb1.Text = ""
txtXb2.Text = ""
txtPb2.Text = ""
txtW1.Text = ""
txtP1.Text = ""
txtW2.Text = ""
txtP2.Text = ""
Text2.Text = ""
Text3.Text = ""
Text4.Text = ""
Text5.Text = ""
Text6.Text = ""
Text7.Text = ""
Text8.Text = ""
Text9.Text = ""

```

End Sub

Private Sub cmdCal_Click()

On Error GoTo ErrBox

Dim Xa0, Xa1, Xa2, Xb0, Xb1, Xb2, Pa0, Pa1, Pa2, Pb0, Pb1, Pb2, XW1, XW2, P1, P2, AW1, AW2, PW1, PW2 As Single

Dim VA0(2), VA1(2), VA2(2), VB0(2), VB1(2), VB2(2), WL(2), WR(2) As Single

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dim DelA10(2), DelB10(2), DelA20(2), DelB20(2) As Single

Dim AAL(2), ABL(2), AAR(2), ABR(2) As Single

Xa0 = CSng(txtXa0.Text) 'convert text to real

Pa0 = CSng(txtPa0.Text)

Xa1 = CSng(txtXa1.Text)

Pa1 = CSng(txtPa1.Text)

Xa2 = CSng(txtXa2.Text)

Pa2 = CSng(txtPa2.Text)

Xb0 = CSng(txtXb0.Text)

Pb0 = CSng(txtPb0.Text)

Xb1 = CSng(txtXb1.Text)

Pb1 = CSng(txtPb1.Text)

Xb2 = CSng(txtXb2.Text)

Pb2 = CSng(txtPb2.Text)

XW1 = CSng(txtW1.Text)

PW1 = CSng(txtP1.Text)

XW2 = CSng(txtW2.Text)

PW2 = CSng(txtP2.Text)

• แปลงสเกลาร์เป็นเวกเตอร์ในรูปแบบ ai+bj

VA0(1) = Xa0 * Cos(Pa0 * 3.14159 / 180) ' plane A initial

VA0(2) = Xa0 * Sin(Pa0 * 3.14159 / 180)

VA1(1) = Xa1 * Cos(Pa1 * 3.14159 / 180) ' plane A step 1

VA1(2) = Xa1 * Sin(Pa1 * 3.14159 / 180)

VA2(1) = Xa2 * Cos(Pa2 * 3.14159 / 180) ' plane A step 2

VA2(2) = Xa2 * Sin(Pa2 * 3.14159 / 180)

VB0(1) = Xb0 * Cos(Pb0 * 3.14159 / 180) ' plane B step 0

VB0(2) = Xb0 * Sin(Pb0 * 3.14159 / 180)

VB1(1) = Xb1 * Cos(Pb1 * 3.14159 / 180) ' plane B step 1

VB1(2) = Xb1 * Sin(Pb1 * 3.14159 / 180)

VB2(1) = Xb2 * Cos(Pb2 * 3.14159 / 180) ' plane b step 2

VB2(2) = Xb2 * Sin(Pb2 * 3.14159 / 180)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$WL(1) = XW1 * \text{Cos}(PW1 * 3.14159 / 180) \text{ ' Trial Mass Plane L}$$

$$WL(2) = XW1 * \text{Sin}(PW1 * 3.14159 / 180)$$

$$WR(1) = XW2 * \text{Cos}(PW2 * 3.14159 / 180) \text{ ' Trial Mass Plane R}$$

$$WR(2) = XW2 * \text{Sin}(PW2 * 3.14159 / 180)$$

$$\text{DelA10(1)} = \text{VA1(1)} - \text{VA0(1)} \text{ ' result of va1- va0}$$

$$\text{DelA10(2)} = \text{VA1(2)} - \text{VA0(2)}$$

$$\text{DelA20(1)} = \text{VA2(1)} - \text{VA0(1)}$$

$$\text{DelA20(2)} = \text{VA2(2)} - \text{VA0(2)}$$

$$\text{DelB10(1)} = \text{VB1(1)} - \text{VB0(1)} \text{ ' result of va1- va0}$$

$$\text{DelB10(2)} = \text{VB1(2)} - \text{VB0(2)}$$

$$\text{DelB20(1)} = \text{VB2(1)} - \text{VB0(1)}$$

$$\text{DelB20(2)} = \text{VB2(2)} - \text{VB0(2)}$$

$$\text{AAL(1)} = (\text{DelA10(1)} * \text{WL(1)} + \text{DelA10(2)} * \text{WL(2)}) / (\text{WL(1)}^2 + \text{WL(2)}^2)$$

$$\text{AAL(2)} = (\text{WL(1)} * \text{DelA10(2)} - \text{DelA10(1)} * \text{WL(2)}) / (\text{WL(1)}^2 + \text{WL(2)}^2)$$

$$\text{ABL(1)} = (\text{DelB10(1)} * \text{WL(1)} + \text{DelB10(2)} * \text{WL(2)}) / (\text{WL(1)}^2 + \text{WL(2)}^2)$$

$$\text{ABL(2)} = (\text{WL(1)} * \text{DelB10(2)} - \text{DelB10(1)} * \text{WL(2)}) / (\text{WL(1)}^2 + \text{WL(2)}^2)$$

$$\text{AAR(1)} = (\text{DelA20(1)} * \text{WR(1)} + \text{DelA20(2)} * \text{WR(2)}) / (\text{WR(1)}^2 + \text{WR(2)}^2)$$

$$\text{AAR(2)} = (\text{WR(1)} * \text{DelA20(2)} - \text{DelA20(1)} * \text{WR(2)}) / (\text{WR(1)}^2 + \text{WR(2)}^2)$$

$$\text{ABR(1)} = (\text{DelB20(1)} * \text{WR(1)} + \text{DelB20(2)} * \text{WR(2)}) / (\text{WR(1)}^2 + \text{WR(2)}^2)$$

$$\text{ABR(2)} = (\text{WR(1)} * \text{DelB20(2)} - \text{DelB20(1)} * \text{WR(2)}) / (\text{WR(1)}^2 + \text{WR(2)}^2)$$

Dim AbrVa(2), AarVb(2), AbrAal(2), AarAbl(2), AbIva(2), AalVb(2), AblAar(2), AalAbr(2) As

Single

$$\text{AbrVa(1)} = \text{ABR(1)} * \text{VA0(1)} - \text{ABR(2)} * \text{VA0(2)}$$

$$\text{AbrVa(2)} = \text{ABR(1)} * \text{VA0(2)} + \text{ABR(2)} * \text{VA0(1)}$$

$$\text{AarVb(1)} = \text{AAR(1)} * \text{VB0(1)} - \text{AAR(2)} * \text{VB0(2)}$$

$$\text{AarVb(2)} = \text{AAR(1)} * \text{VB0(2)} + \text{AAR(2)} * \text{VB0(1)}$$

$$\text{AbrAal(1)} = \text{ABR(1)} * \text{AAL(1)} - \text{ABR(2)} * \text{AAL(2)}$$

$$\text{AbrAal(2)} = \text{ABR(1)} * \text{AAL(2)} + \text{ABR(2)} * \text{AAL(1)}$$

$$\text{AarAbl(1)} = \text{AAR(1)} * \text{ABL(1)} - \text{AAR(2)} * \text{ABL(2)}$$

$$\text{AarAbl(2)} = \text{AAR(1)} * \text{ABL(2)} + \text{AAR(2)} * \text{ABL(1)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AbIVa(1) = ABL(1) * VA0(1) - ABL(2) * VA0(2)$$

$$AbIVa(2) = ABL(1) * VA0(2) + ABL(2) * VA0(1)$$

$$AalVb(1) = AAL(1) * VB0(1) - AAL(2) * VB0(2)$$

$$AalVb(2) = AAL(1) * VB0(2) + AAL(2) * VB0(1)$$

$$AblAar(1) = ABL(1) * AAR(1) - ABL(2) * AAR(2)$$

$$AblAar(2) = ABL(1) * AAR(2) + ABL(2) * AAR(1)$$

$$AalAbr(1) = AAL(1) * ABR(1) - AAL(2) * ABR(2)$$

$$AalAbr(2) = AAL(1) * ABR(2) + AAL(2) * ABR(1)$$

Dim UL0(2), UL1(2), UR0(2), UR1(2) As Single

$$UL0(1) = AbrVa(1) - AarVb(1)$$

$$UL0(2) = AbrVa(2) - AarVb(2)$$

$$UL1(1) = AbrAal(1) - AarAbl(1)$$

$$UL1(2) = AbrAal(2) - AarAbl(2)$$

$$UR0(1) = AbIVa(1) - AalVb(1)$$

$$UR0(2) = AbIVa(2) - AalVb(2)$$

$$UR1(1) = AblAar(1) - AalAbr(1)$$

$$UR1(2) = AblAar(2) - AalAbr(2)$$

Dim UL(2), UR(2), BL(2), BR(2) As Single

$$UL(1) = (UL0(1) * UL1(1) + UL0(2) * UL1(2)) / (UL1(1) ^ 2 + UL1(2) ^ 2)$$

$$UL(2) = (UL1(1) * UL0(2) - UL0(1) * UL1(2)) / (UL1(1) ^ 2 + UL1(2) ^ 2)$$

$$UR(1) = (UR0(1) * UR1(1) + UR0(2) * UR1(2)) / (UR1(1) ^ 2 + UR1(2) ^ 2)$$

$$UR(2) = (UR1(1) * UR0(2) - UR0(1) * UR1(2)) / (UR1(1) ^ 2 + UR1(2) ^ 2)$$

$$BL(1) = (0 - 1) * UL(1)$$

$$BL(2) = (0 - 1) * UL(2)$$

$$BR(1) = (0 - 1) * UR(1)$$

$$BR(2) = (0 - 1) * UR(2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dim ULamplitude, ULphase, BLamplitude, BLphase As Single

Dim URamplitude, URphase, BRamplitude, BRphase As Single

Dim angle1, angle2, angle3, angle4 As Single

Dim x1, x2, x3, x4 As Single

' Unbalance Mass weight and Phase at Plane L

$$x1 = UL(2) / UL(1)$$

$$angle1 = Atn(x1)$$

$$ULphase = (180 / 3.14159) * angle1$$

$$ULamplitude = Sqr(UL(1) ^ 2 + UL(2) ^ 2)$$

' ADD Mass weight and Phase at Plane L

$$x3 = BL(2) / BL(1)$$

$$angle3 = Atn(x3)$$

$$BLphase = 180 + (180 / 3.14159) * angle3$$

$$BLamplitude = Sqr(BL(1) ^ 2 + BL(2) ^ 2)$$

' Unbalance Mass weight and Phase at Plane R

$$x2 = UR(2) / UR(1)$$

$$angle2 = Atn(x2)$$

$$URphase = (180 / 3.14159) * angle2$$

$$URamplitude = Sqr(UR(1) ^ 2 + UR(2) ^ 2)$$

' Add Mass weight and Phase at Plane R

$$x4 = BR(2) / BR(1)$$

$$angle4 = Atn(x4)$$

$$BRphase = 180 + (180 / 3.14159) * angle4$$

$$BRamplitude = Sqr(BR(1) ^ 2 + BR(2) ^ 2)$$

Text2.Text = ULamplitude

Text3.Text = ULphase

Text4.Text = URamplitude

Text5.Text = URphase

Text6.Text = BLamplitude

Text7.Text = BLphase

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Text8.Text = BRamplitude

Text9.Text = BRphase

Exit Sub

ErrBox:

MsgBox "ท่านป้อนข้อมูลไม่ครบหรือป้อนข้อมูลที่ไม่ใช่ตัวเลข", vbOKOnly + vbExclamation, "ข้อผิดพลาด"

End Sub



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดชุดจำลองการสั่นสะเทือน

ข.1 การคำนวณในการออกแบบ

1. การหาค่าตั้งในการหมุนชุดทดลอง

Torque ที่ใช้ในการหมุนเครื่องโดยไม่คิดมวล Unbalance

$$T = I\alpha$$

โดยที่ I - โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกน

T - ทอร์กที่ใช้ในการหมุนของระบบ

α - ความเร่งเชิงมุม

$$I = \sum I = \sum \frac{1}{2}mr^2$$

$$= \frac{1}{2}m_{shaft}r_{shaft}^2 + \frac{1}{2}m_{rotor}r_{rotor}^2 + \frac{1}{2}m_{coupling}r_{coupling}^2$$

$$m_{shaft} = \left(\frac{\pi}{4}d^2L\right)(\rho_{aluminium})$$

โดยที่ $d = 10 \text{ mm.}$, $L = 360 \text{ mm.}$, $\rho_{aluminium} = 2711 \text{ kg/m}^3$

แทนค่า

$$m_{shaft} = \frac{\pi}{4}(10 \times 10^{-3})^2(360 \times 10^{-3})(2711)$$

$$= 0.07665 \text{ kg}$$

$$V_{rotor} = \frac{\pi}{4}(10 \times 10^{-3})^2(0.5 \times 10^{-2}) + \frac{\pi}{4}(2 \times 10^{-2})^2(0.8 \times 10^{-2})$$

$$m_{rotor} = \rho_{aluminium}V_{rotor}$$

$$= 0.1134 \text{ kg}$$

$$m_{coupling} = 0.07 \text{ kg}$$

เนื่องจากแผ่น Rotor มี 2 แผ่น ฉะนั้นน้ำหนักของแผ่น Rotor จึงเท่ากับ 0.227 kg

$$I = \frac{1}{2}(0.07665)(5 \times 10^{-3})^2 + \frac{1}{2}(0.227)(5 \times 10^{-2})^2 + \frac{1}{2}(0.07)(14 \times 10^{-3})^2$$

$$= 2.916 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$$

เวลาที่ระบบใช้ในการเข้าสู่สภาวะ steady state เท่ากับ 0.5 วินาที

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2\pi m}{60t}$$

$$= \frac{2\pi(3500)}{(60)(0.5)}$$

$$= 733.04 \text{ rad/s}^2$$

$$\therefore T = I\alpha$$

$$= (2.916 \times 10^{-4})(733.04)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่นเอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.21375 \text{ N} \cdot \text{m}$$

กำลังในการหมุนชุดทดลอง

$$\begin{aligned} W &= 2\pi nT \\ &= 2\pi \left(\frac{3500}{60} \right) (0.2135) \\ &= 78.345 \text{ Watts} \end{aligned}$$

ฉะนั้น มอเตอร์จึงควรมีขนาดมากกว่า 78.345 Watts เพื่อใช้ในการหมุนชุดทดลอง

2. การหาระยะการเบี่ยงเบนของเพลลา

เนื่องจากชุดทดลองเป็นชุดการทดลองแบบ Rigid balancing จึงจำเป็นต้องไม่ให้เกิดระยะเบี่ยงเบนในเพลลา ทั้งนี้จึงต้องมีการคำนวณถึงน้ำหนักของมวลที่ไม่สมดุลที่แกนเพลลาสามารถรับได้เพื่อไม่ให้เกิดระยะเบี่ยงเบนในแกนเพลลา แรงที่กระทำที่ก่อให้เกิดระยะเบี่ยงเบนในแกนเพลลา ได้แก่

- น้ำหนักของเพลลา
- น้ำหนักของแผ่น Rotor
- แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากมวลที่ไม่สมดุล (Centrifugal force)

$$\text{Centrifugal force} = F_c = 1.1 m_c \bar{r} \left(\frac{n}{10} \right)^2$$

โดยที่ F_c = แรงหนีศูนย์กลาง (N)

\bar{r} = ระยะห่างระหว่างแกนหมุนและมวลที่ไม่สมดุล (m)

n = จำนวนรอบของมอเตอร์ (rpm)

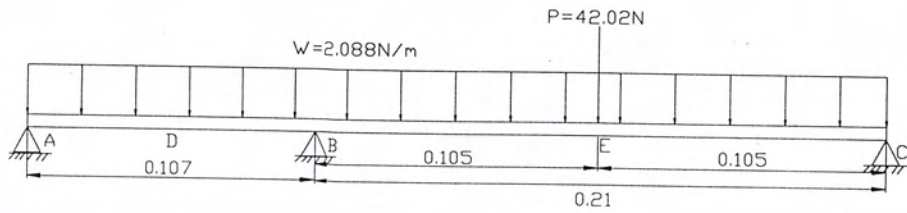
m_c = ขนาดของมวลที่ไม่สมดุล (kg)

ให้เพลลามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 mm. และมีความยาว 350 mm.

ในที่นี้การหาระยะการเบี่ยงเบนของเพลลาได้ใช้วิธี Visual work ในการคำนวณ

2.1. ระยะเบี่ยงเบนของเพลลาเมื่อติดมวลขนาด 8 กรัมแบบ 1 ระนาบ

$$\begin{aligned} \text{Centrifugal force} = F_c &= 1.1 m_c \bar{r} \left(\frac{n}{10} \right)^2 \\ &= 1.1 (8 \times 10^{-3}) (39 \times 10^{-3}) \left(\frac{3500}{10} \right)^2 \\ &= 42.042 \text{ N} \end{aligned}$$



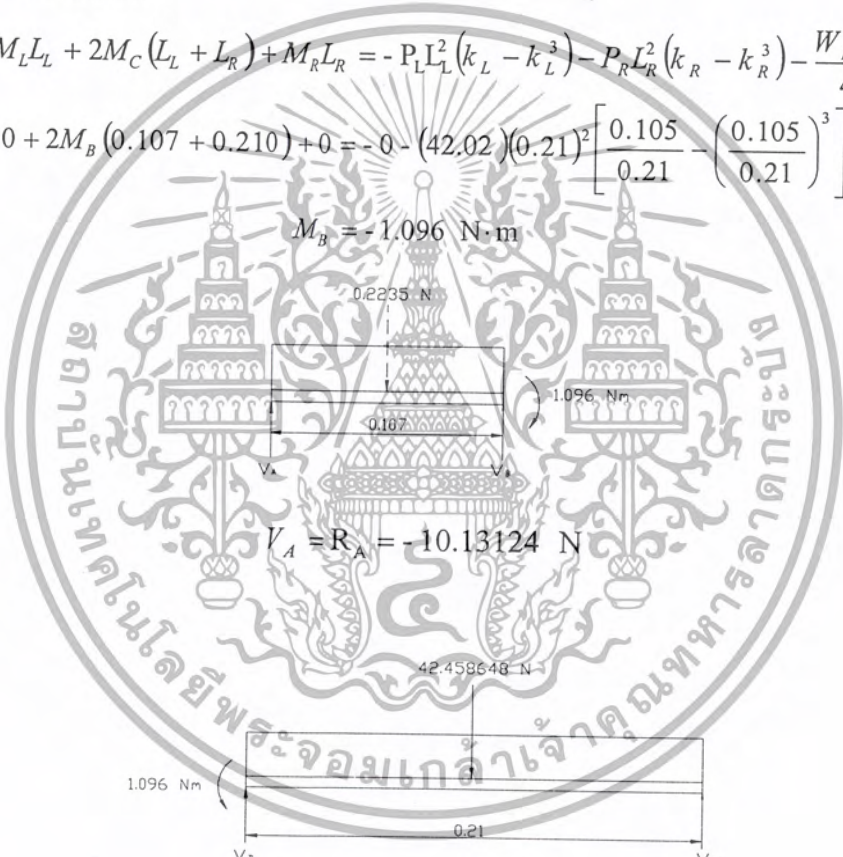
$$W = \rho A = (2711)(9.81) \left(\frac{\pi}{4} \right) (10 \times 10^{-3})^2 = 2.0888 \text{ N/m}$$

Three-Moment Equation.

$$M_L L_L + 2M_C (L_L + L_R) + M_R L_R = -P_L L_L^2 (k_L - k_L^3) - P_R L_R^2 (k_R - k_R^3) - \frac{W_L L_L^3}{4} - \frac{W_R L_R^3}{4}$$

แทนค่า $0 + 2M_B (0.107 + 0.210) + 0 = -0 - (42.02)(0.21)^2 \left[\frac{0.105}{0.21} - \left(\frac{0.105}{0.21} \right)^3 \right] - 0 - 0$

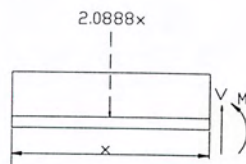
$$M_B = -1.096 \text{ N}\cdot\text{m}$$



$$V_C = R_C = 16.0103 \text{ N}$$

$$\therefore R_B = 36.80309 \text{ N}$$

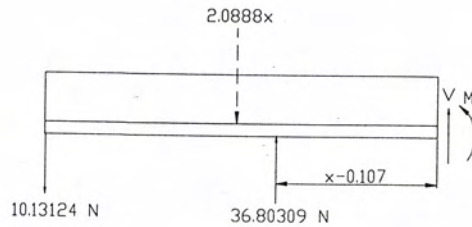
$$(0 \leq x \leq 0.107)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_1 = -10.13124 x - 2.0888 \frac{x^2}{2}$$

$$(0.107 \leq x \leq 0.212)$$



$$M_2 = 36.80309 (x - 0.107) - 10.13124 x - 2.0888 \frac{x^2}{2}$$

$$(0.212 \leq x \leq 0.317)$$

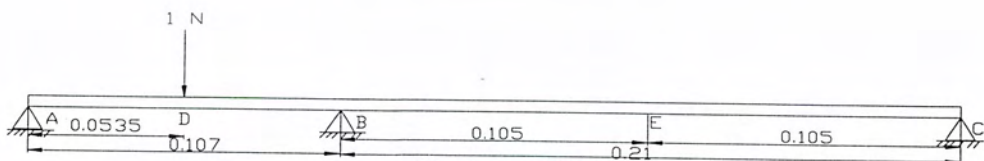


$$M_3 = 16.0103 (0.317 - x) + 2.0888 \frac{(0.317 - x)^2}{2}$$

ระยะการเบี่ยงเบนของเฟลาที่จุด D

โดยที่ $E = 71 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\pi}{64} (0.01)^4 = 4.9087 \times 10^{-10}$$

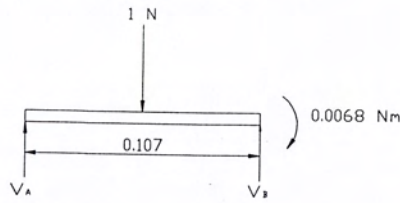


จาก Three-Moment Equation

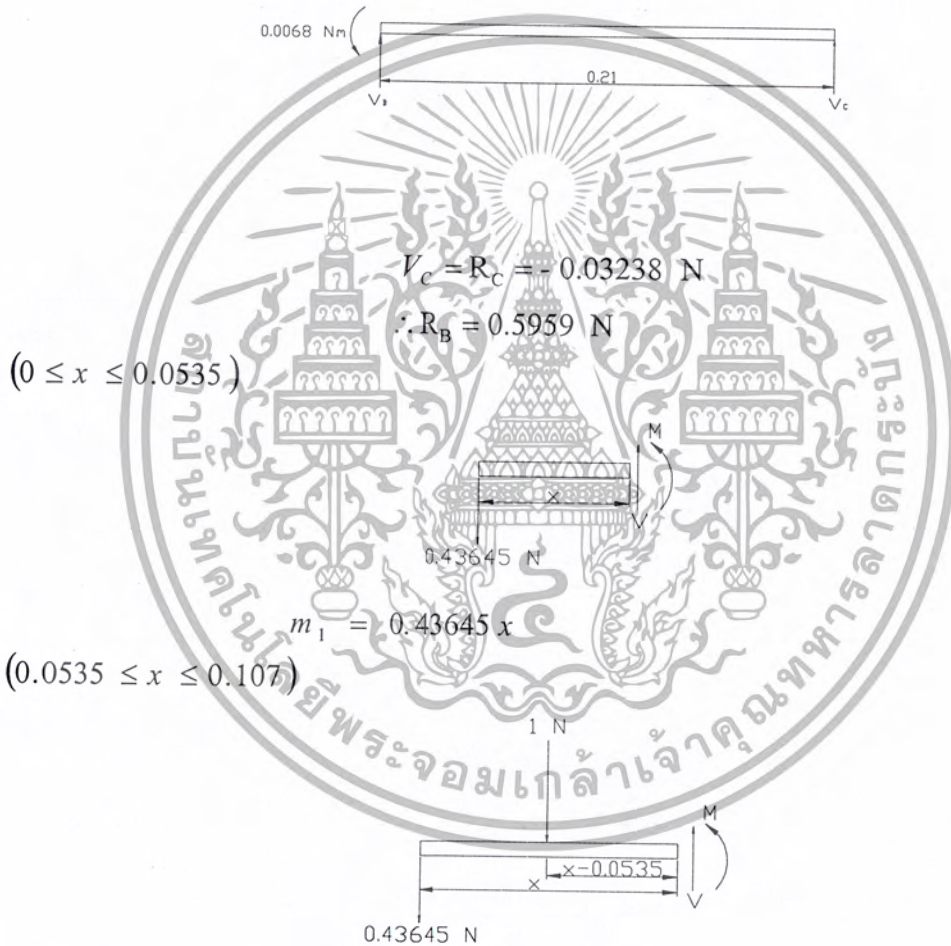
แทนค่า $0 + 2M_B(0.107 + 0.210) + 0 = -(0.107)^2 \left[\frac{0.0535}{0.107} - \left(\frac{0.0535}{0.107} \right)^3 \right] - 0 - 0 - 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_B = -0.0068 \text{ N}\cdot\text{m}$$



$$V_A = R_A = 0.43645 \text{ N}$$

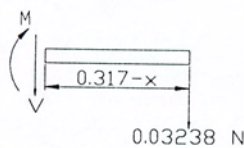


$$(0 \leq x \leq 0.0535)$$

$$(0.0535 \leq x \leq 0.107)$$

$$(0.107 \leq x \leq 0.317)$$

$$m_2 = -0.5363 x + 0.0535$$



$$m_3 = 0.03238 x - 0.01026$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta_D = \int \frac{Mm}{EI} dx$$

$$EI\Delta_D = \int_0^{0.0535} (10.13124x - 1.0444x^2)(0.43645x) dx$$

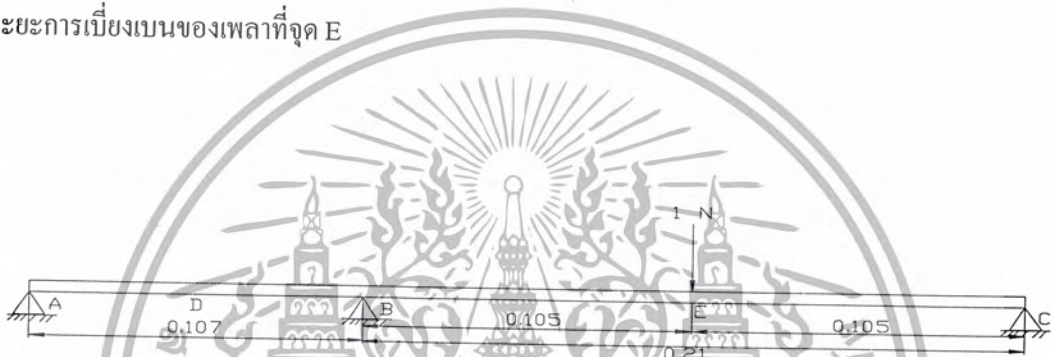
$$+ \int_{0.0535}^{0.107} (-10.13124x - 1.0444x^2)(-0.5636x + 0.0535) dx$$

$$+ \int_{0.107}^{0.212} (36.80309(x-0.107) - 10.13124 - 1.0444x^2)(0.03238x - 0.01026) dx$$

$$+ \int_{0.212}^{0.317} (16.0103(0.317-x) - 1.0444(0.317-x)^2)(0.03238x - 0.01026) dx$$

$\Delta_D = 0.62783 \text{ mm.}$

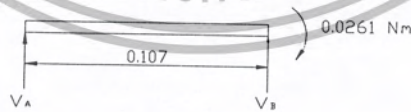
ระยะการเบี่ยงเบนของเพลานี้ที่จุด E



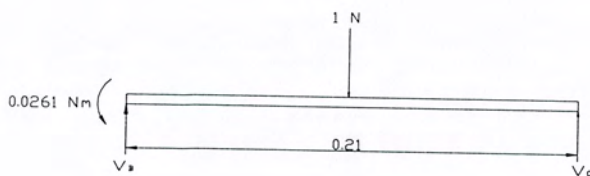
จาก Three-Moment Equation

แทนค่า $0 + 2M_B(0.107 + 0.210) + 0 = - (0.21)^2 \left[\frac{0.105}{0.21} - \left(\frac{0.105}{0.21} \right)^3 \right] - 0 - 0 - 0$

$M_B = -0.0261 \text{ N}\cdot\text{m}$



$V_A = R_A = -0.24393 \text{ N}$

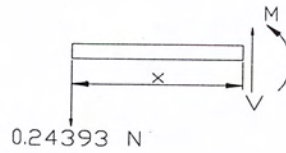


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_C = R_C = 0.3757 \text{ N}$$

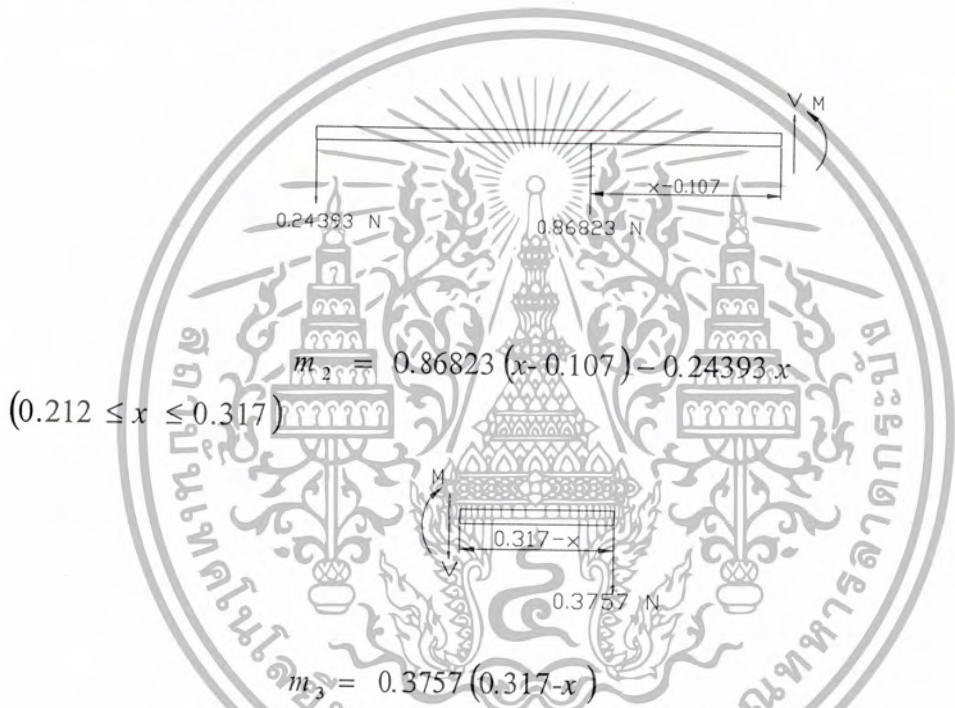
$$\therefore R_B = 0.86823 \text{ N}$$

$$(0 \leq x \leq 0.107)$$



$$m_1 = -0.24393 x$$

$$(0.107 \leq x \leq 0.212)$$



$$(0.212 \leq x \leq 0.317)$$

$$m_2 = 0.86823 (x - 0.107) - 0.24393 x$$

$$m_3 = 0.3757 (0.317 - x)$$

$$\Delta_E = \int \frac{Mm}{EI} dx$$

$$EI\Delta_E = \int_0^{0.107} (-10.1312x - 1.0444x^2)(-0.24393x) dx$$

$$+ \int_{0.107}^{0.212} (36.80309(x - 0.107) - 10.13124x - 1.0444x^2)(0.86823(x - 0.107) - 0.24393x) dx$$

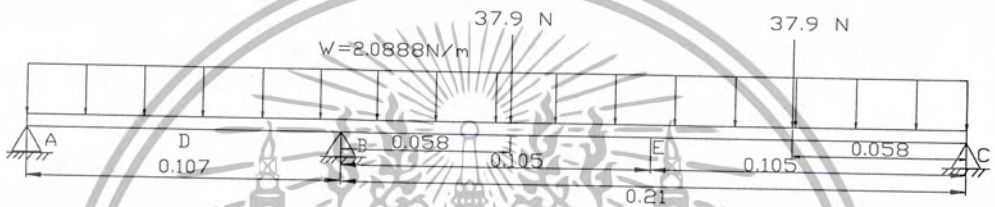
$$+ \int_{0.212}^{0.317} (16.0103(0.317 - x) - 1.0444(0.317 - x)^2)(0.3757(0.317 - x)) dx$$

$$\Delta_E = 0.14677 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. ระยะการเบี่ยงเบนของเพลามือตีตมขนาด 7 กรัมในแต่ละระนาบแบบ 2 ระนาบ

$$\begin{aligned}
 \text{Centrifugal force} = F_c &= 1.1m_c \bar{r} \left(\frac{n}{10} \right)^2 \\
 &= 1.1(7 \times 10^{-3})(39 \times 10^{-3}) \left(\frac{3500}{10} \right)^2 \\
 &= 37.9 \text{ N}
 \end{aligned}$$



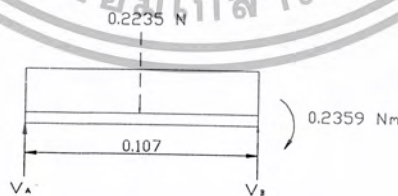
Three-Moment Equation.

$$M_L L_L + 2M_C(L_L + L_R) + M_R L_R = -P_L L_L^2 \left(k_L - k_L^3 \right) - P_R L_R^2 \left(k_R - k_R^3 \right) - \frac{W_L L_L^3}{4} - \frac{W_R L_R^3}{4}$$

แทนค่า

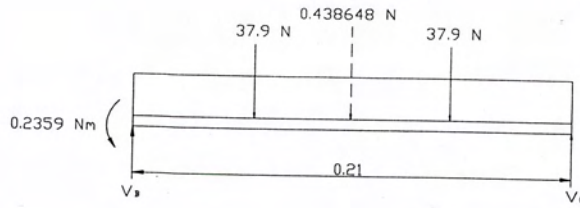
$$0 + 2M_B(0.21 + 0.107) + 0 = -0 - (37.9)(0.21)^2 \left[\frac{0.058}{0.21} - \left(\frac{0.058}{0.21} \right)^3 \right] - (37.9)(0.21)^2 \left[\frac{0.152}{0.21} - \left(\frac{0.152}{0.21} \right)^3 \right] - 0$$

$$M_B = -0.2359 \text{ N}\cdot\text{m}$$



$$V_A = R_A = -2.093 \text{ N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$V_C = R_C = 36.996 \text{ N}$$

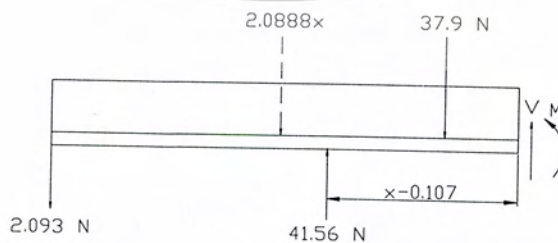
$$\therefore R_B = 41.56 \text{ N}$$

$$(0 \leq x \leq 0.107)$$

$$M_1 = -2.093x - 2.0888 \frac{x^2}{2}$$

$$(0.107 \leq x \leq 0.165)$$

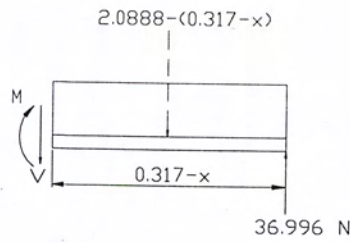
$$M_2 = 41.56(x - 0.107) - 2.093x - 2.0888 \frac{x^2}{2}$$

$$(0.165 \leq x \leq 0.259)$$


$$M_3 = 41.56(x - 0.107) - 2.093x - \frac{2.0888 x^2}{2} - 37.9(x - 0.165)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$(0.259 \leq x \leq 0.317)$



$$M_4 = 36.996(0.317-x) - 2.0888 \frac{(0.317-x)^2}{2}$$

ระยะการเบี่ยงเบนของเพลลาที่จุด D

โดยที่ $E = 71 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

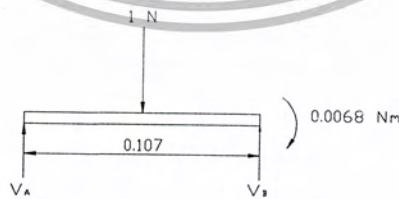
$$I = \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\pi}{64} (0.01)^4 = 4.9087 \times 10^{-10}$$



จาก Three-Moment Equation

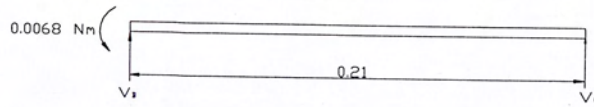
$$\text{แทนค่า } 0 + 2M_B(0.107 + 0.210) + 0 = - (0.107)^2 \left[\frac{0.0535}{0.107} - \left(\frac{0.0535}{0.107} \right)^3 \right] - 0 - 0 - 0$$

$$M_B = -0.0068 \text{ N}\cdot\text{m}$$



$$V_A = R_A = 0.43645 \text{ N}$$

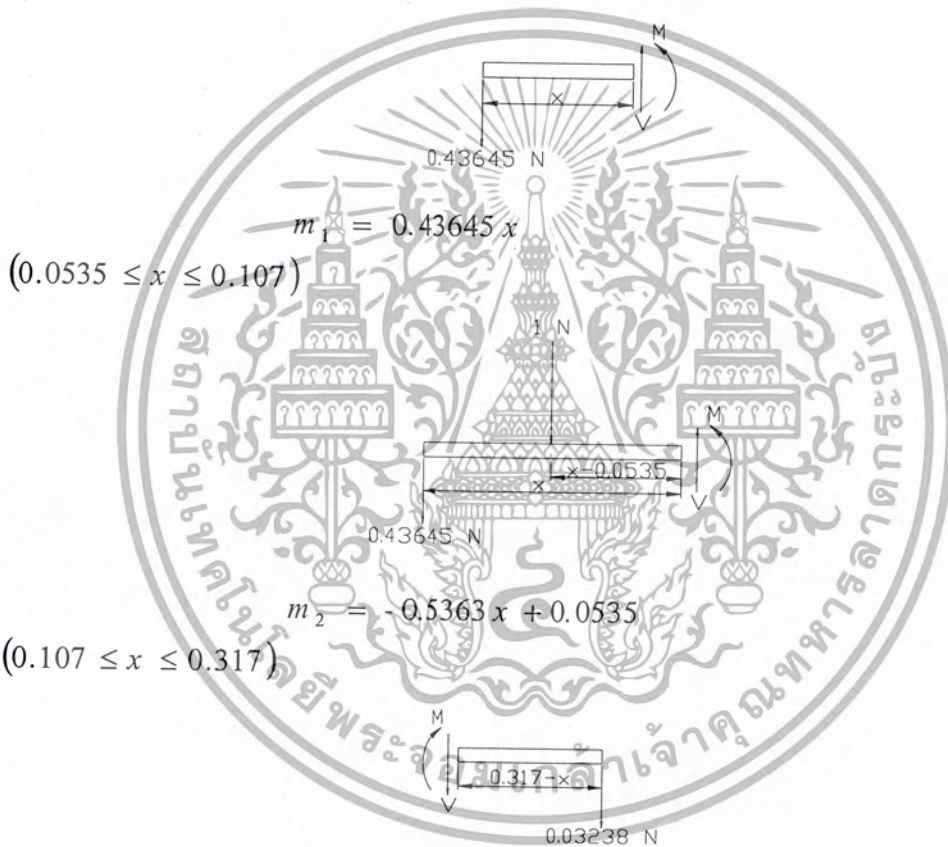
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$V_c = R_c = - 0.03238 \text{ N}$$

$$\therefore R_B = 0.5959 \text{ N}$$

$$(0 \leq x \leq 0.0535)$$



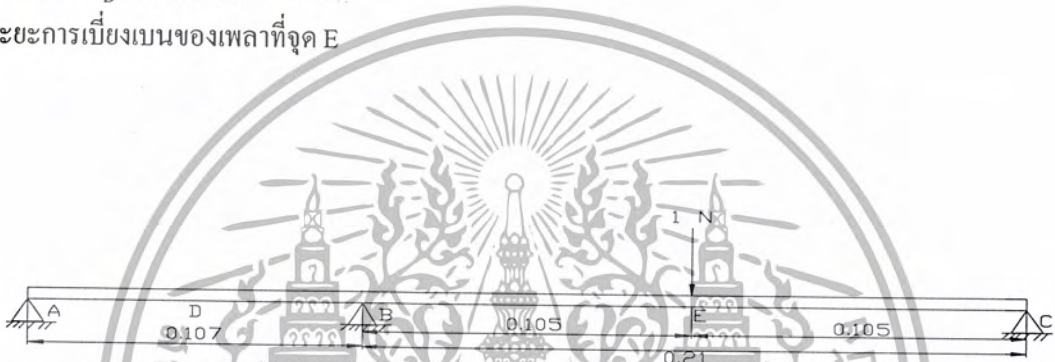
$$m_3 = 0.03238 x - 0.01026$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 EI\Delta_D &= \int_0^{0.0535} (-2.093x - 1.0444x^2)(0.43645x) dx \\
 &+ \int_{0.0535}^{0.107} (-2.093x - 1.0444x^2)(-0.5636x + 0.0535) dx \\
 &+ \int_{0.107}^{0.165} [41.56(x - 0.107) - 2.093x - 1.0444x^2](0.03238x - 0.01026) dx \\
 &+ \int_{0.165}^{0.259} [41.56(x - 0.107) - 2.093x - 1.0444x^2 - 37.9(x - 0.165)](0.03238x - 0.01026) dx \\
 &+ \int_{0.259}^{0.317} [36.996(0.317 - x) - 1.0444(0.317 - x)^2](0.03238x - 0.01026) dx
 \end{aligned}$$

$\Delta_D = 0.032611 \text{ mm.}$

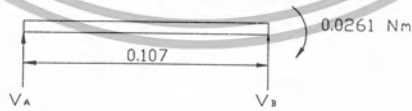
ระยะการเบี่ยงเบนของเฟลาที่จุด E



จาก Three-Moment Equation

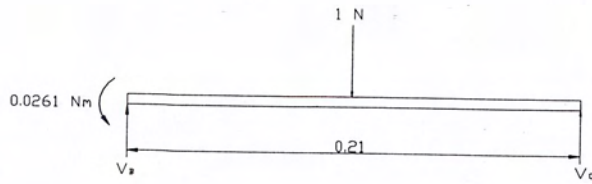
แทนค่า $0 + 2M_B(0.107 + 0.210) + 0 = - (0.21)^2 \left[\frac{0.105}{0.21} + \left(\frac{0.105}{0.21} \right)^3 \right] - 0 - 0 - 0$

$M_B = -0.0261 \text{ N}\cdot\text{m}$



$V_A = R_A = -0.24393 \text{ N}$

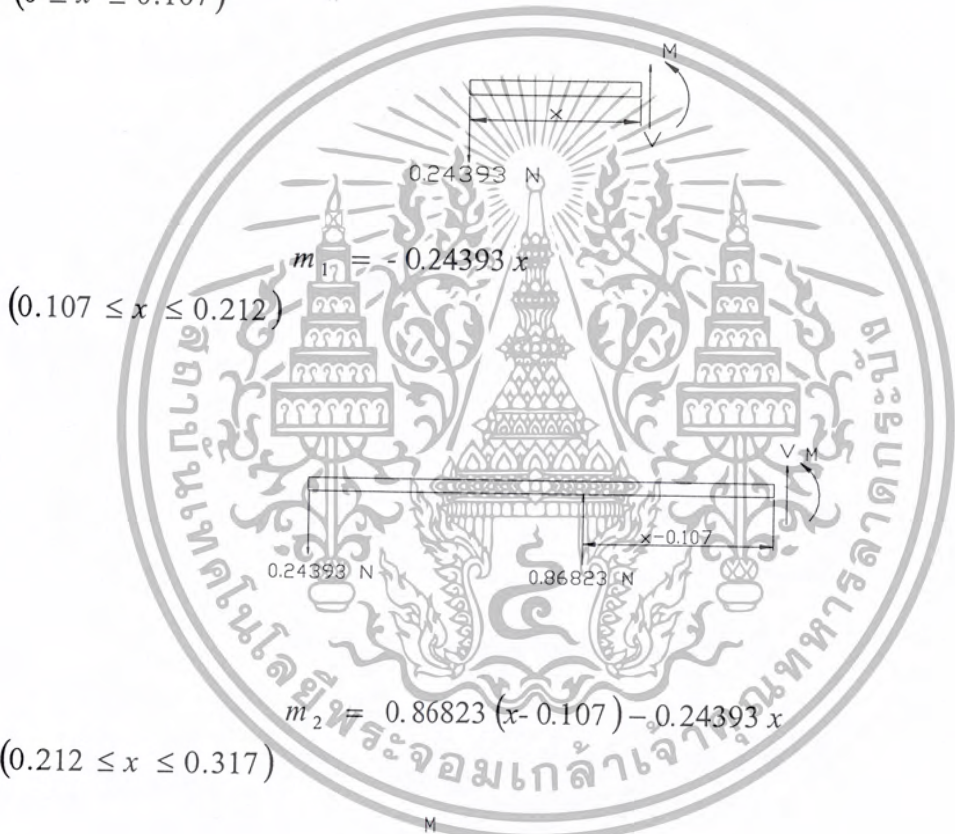
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$V_C = R_C = 0.3757 \text{ N}$$

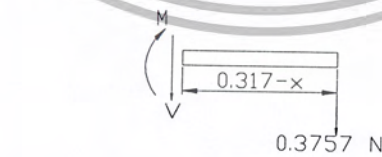
$$\therefore R_B = 0.86823 \text{ N}$$

$$(0 \leq x \leq 0.107)$$



$$(0.107 \leq x \leq 0.212)$$

$$(0.212 \leq x \leq 0.317)$$



$$m_3 = 0.3757(0.317 - x)$$

$$\Delta_E = \int \frac{Mm}{EI} dx$$

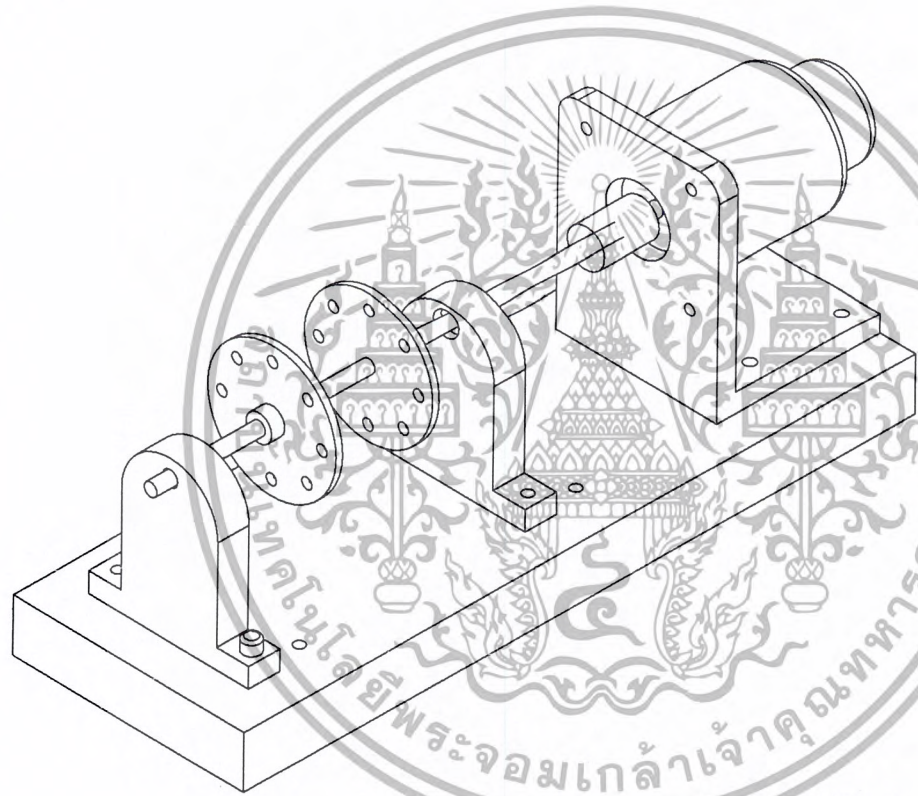
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 EI\Delta_E &= \int_0^{0.107} (2.093x - 1.0444x^2)(-0.24393x) dx \\
 &+ \int_{0.107}^{0.165} (41.56(x - 0.107) - 2.093x - 1.0444x^2)(0.86823(x - 0.107) - 0.24393x) dx \\
 &+ \int_{0.165}^{0.212} [41.56(x - 0.107) - 2.093x - 1.0444x^2 - 37.9(x - 0.165)](0.86823(x - 0.107) - 0.24393x) dx \\
 &+ \int_{0.212}^{0.259} [41.56(x - 0.107) - 2.093x - 1.0444x^2 - 37.9(x - 0.165)](0.3757(0.317 - x)) dx \\
 &+ \int_{0.259}^{0.317} [36.996(0.317 - x) - 1.0444(0.317 - x)^2](0.3757(0.317 - x)) dx
 \end{aligned}$$

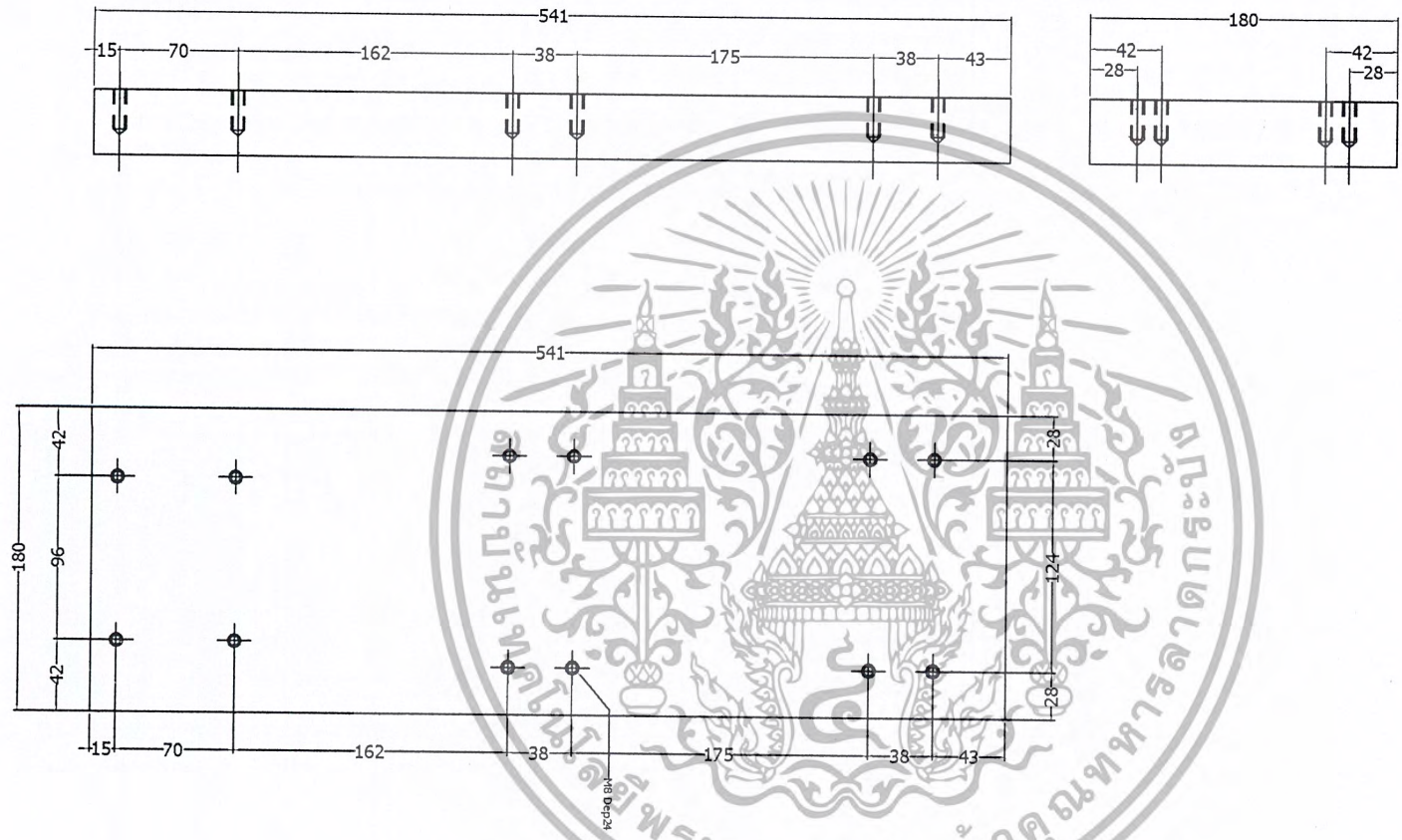
$$\Delta_E = 0.188065 \text{ mm.}$$



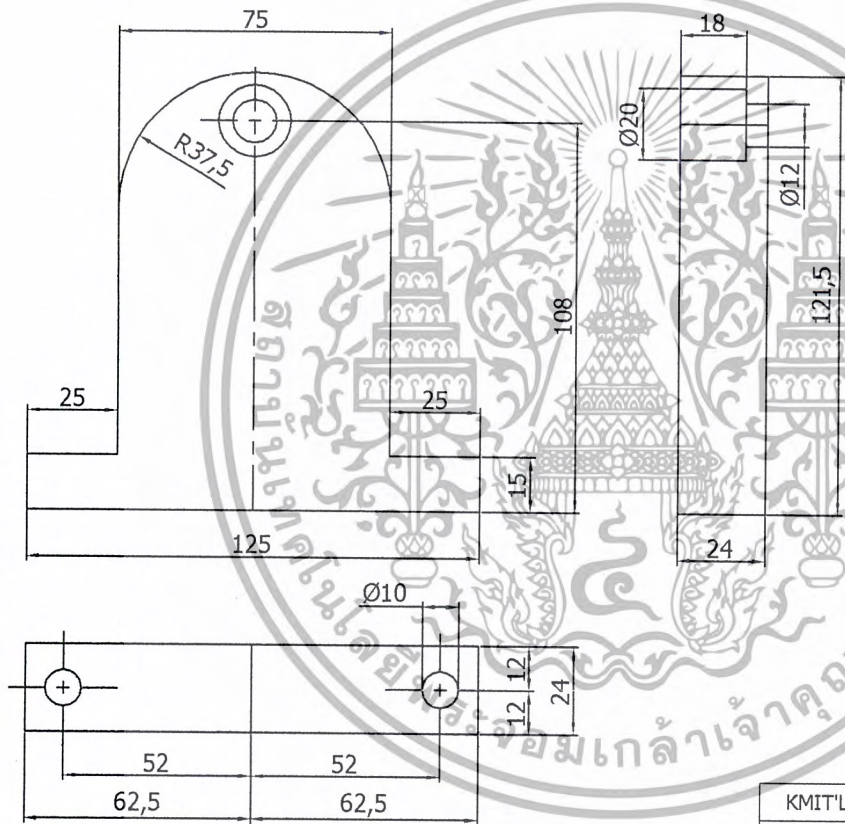
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



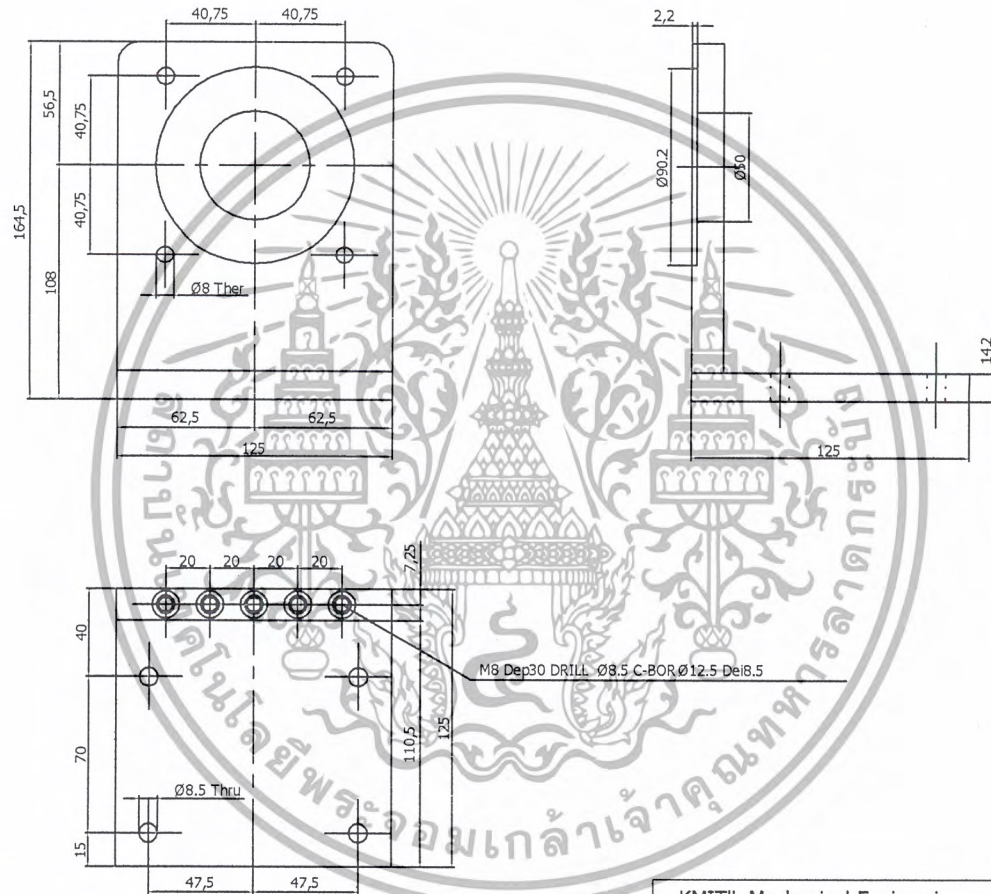
| | | | |
|-------------------------------|------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : | | 1 |
| Machine 's Vibration Model | Amout : 1 | | |
| | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |



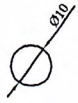
| | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : steel Amount : 1 | | 2 |
| Support Base | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |



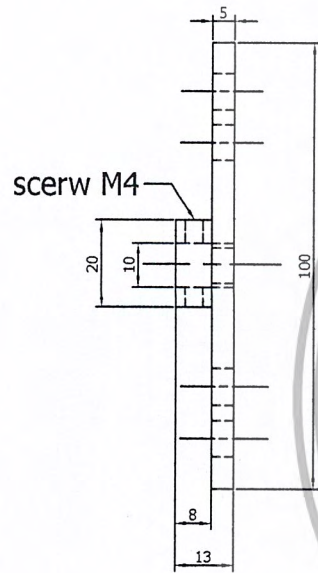
| | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : steel Amount : 2 | | 3 |
| Bearing Housing | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |



| | | | |
|-------------------------------|------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : steel | | 4 |
| Motor Base | Amout : 1 | | |
| | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |



| | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : steel Amount : 1 | | 5 |
| Shaft | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |



| | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------|
| KMIT'L Mechanical Engineering | DATE | 20 AUG, 2002 | List No. |
| Rigid Rotor Balancing Project | Material : Aluminium Amout : 2 | | 6 |
| Rotor | FIRST ANGLE PROJECTION | | |
| | DIMENSIONS ARE IN mm. | | |

เอกสารอ้างอิง

- [1] อธิพิพล ปานงาม, วิทยา ขงเจริญ, “การออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องถ่วงสมดุลของเครื่องจักรกลหมุน”, สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี พ.ศ. 2526, หน้า 6-27
- [2] Singiresu S.Rao, “*Mechanical Vibration*”, 3rd Edition , Addison Publishing Company, 1995, pp. 566-575
- [3] Victor Wowk, “*Machinery Vibration Balancing*”, McGraw -Hill, Inc., 1994, pp.1-6,35-58,91-108,125-146
- [4] Joseph Edward Shigley, “*Dynamic analysis of Machines*”, McGraw -Hill, Inc., 1961.
- [5] Aadrew Dimarogonas, “*Vibration for Engineer*”, Prentice-Hall Internationnal, Inc., 1996, pp 350-760



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้