การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

DESIGN AND DEVELOPMENT OF UNBALANCE MEASURING MACHINE FOR CAR SEAT VENTILATION FAN

กฤษณ์ดนัย สอนศรี

โชติภน ขจรวิทยา

นันทวัฒน์ วงศ์วานโต๊ะขุน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

DESIGN AND DEVELOPMENT OF UNBALANCE MEASURING MACHINE FOR CAR SEAT VENTILATION FAN

กฤษณ์ดนัย สอนศรี

โชติภน ขจรวิทยา

นันทวัฒน์ วงศ์วานโต๊ะขุน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF UNBALANCE MEASURING MACHINE FOR CAR SEAT VENTILATION FAN

KRITDANAI SORNSRI

CHOTIPON KACHONVITTAYA

NANTHAWAT WONGWANTOHKHUN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายอากาศของเก้าอี้รถยนต์
DESIGN AND DEVELOPMENT OF UNBALANCE MEASURING MACHINE
FOR CAR SEAT VENTILATION FAN

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษณ์ดนัย	สอนศรี	รหัสประจำตัว 58010046
2. นายโชติภน	ขจรวิทยา	รหัสประจำตัว 58010304
2. นายนันทวัฒน์	วงศ์วานโต๊ะขุน	รหัสประจำตัว 58010667

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.อุมนัต พิณโสภณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายอากาศของเก้าอี้รถยนต์

กฤษณ์ดนัย	สอนศรี	58010046
โชติภน	ขจรวิทยา	58010304
นันทวัฒน์	วงศ์วานโต๊ะขุน	58010667
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์	พิมสาร	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร.อุนนัติ	พิณโสภณ	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตพัดลมระบายอากาศของเก้าอี้รถยนต์จำเป็นต้องทำการปรับสมดุลพัดลมก่อนจำหน่ายตามมาตรฐาน ISO-1940-1 [1] ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ในส่วนอุปกรณ์เพื่อนำไปเป็นเครื่องต้นแบบให้แก่บริษัท เดลต้า อีเลคโทรนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) โดยใช้ทฤษฎีการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งที่มีการหมุนอย่างไม่สมดุลแบบพลศาสตร์สองระนาบจากมวลที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ออกแบบส่วนอุปกรณ์เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลให้โปรแกรมคำนวณความไม่สมดุล การออกแบบเครื่องวัดความไม่สมดุลมีลักษณะเป็นแบบแท่งเดี่ยวมียางรองรับการสั่นสะเทือนที่คำนวณความถี่ธรรมชาติให้ห่างกับความถี่ใช้งานเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นพ้องและมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่งแบบ Ceramic Shear ขนาด 100 มิลลิโวลต์/ค่าความเร่งโน้มถ่วง (mV/g) จำนวน 2 ตัวในแนวแกนนอนและแกนตั้ง ณ ตำแหน่งฐาน เพื่อนำค่าความเร่งไปหาค่าความสั่นสะเทือนโดยการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้าอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล National Instruments Data Acquisition Device Vibration Module ใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ 102,400 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้ความละเอียดสูงสุดในการสุ่มสัญญาณและส่งต่อข้อมูลความเร่งให้ส่วนโปรแกรมคำนวณต่อไป มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบแบบเลเซอร์ เพื่อวัดความเร็วรอบให้ได้ตามความเร็วที่ต้องการวัด อีกทั้งยังได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการสร้างระบบการทำงานของอุปกรณ์ประกอบไปด้วยโมดูลอ่านค่า โมดูลการตั้งค่า และ โมดูลบันทึกค่าอีกด้วย

จากนั้นได้ทำการทดลองวัดความไม่สมดุลในรูปของค่าขนาดความเร่งกำลังสองเฉลี่ยของพัดลมตัวอย่าง 4 ตัว ที่ความถี่ต่างๆแล้วนำค่ามาคำนวณด้วยโปรแกรม Dewesoft และการคำนวณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน จากผลลัพธ์พบว่า มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นได้ทำการทดลองวัดค่าความเร็วรอบใช้งานที่ 3900 รอบต่อนาที เพื่อให้มั่นใจได้ว่า ความเร็วรอบต้องมีค่าตามเป้าหมาย ผลลัพธ์จากการวัดค่าการทดลอง 5 ครั้งๆละ 30 วินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF UNBALANCE MEASURING MACHINE

FOR CAR SEAT VENTILATION FAN

Kritdanai	Sonsri	58010046
Chotipon	Kachonvittaya	58010304
Nanthawat	Wongwantohkhun	58010667
Asst.Prof.Dr.Monsak	Pimsarn	Advisor
Asst.Prof.Dr.Unnat	Pinsopon	Advisor

Abstract

In the manufacturing process of the car seat ventilation fan, it is necessary to balance the fan according to the ISO-1940-1 [1] standard. This thesis is intended to design and develop an unbalance measuring machine to be used as a prototype for the Delta Electronics (Thailand) Public Company Limited by using the theory of rigid rotor balancing. In this thesis, the hardware part was designed to send measured data to the unbalance program. This unbalance measuring machine was designed as a single rod type with a supporting rubber, having natural frequencies which are away from the operating frequency to avoid resonance. There are 2 ceramic shear accelerometers, 100 mV/g each, installed in the horizontal and vertical axes at base. The measured data was employed to evaluate vibration level and it was send as voltage signals to the National Instruments Data Acquisition Device Vibration Module with the sampling rate of 102,400 Hz, which is the highest value of the DAQ to achieve maximum detail. An optical laser sensor was also installed to measure the fan speed while measuring unbalance. Moreover, the LabVIEW software was employed to create the working system of the device, consisting of a signal reading module, setup module, and value recording module.

Later, the experiments of unbalance measurement in the forms of root mean square value of the 4 sample fans at various frequencies were carried out. The measured data was later calculated using the Dewesoft program and the developed program using MATLAB. The calculated results were compared and it was found that the difference was not more than 12 percent. Besides, the experiment of operating speed was conducted at 3900 RPM to ensure that the fan speed must meet the target value. The measured results, from the five measurements, 30 seconds for each measurement, showed that the error was not more than 1 percent.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จได้ด้วยดีหากไม่ได้รับความช่วยเหลือและร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่าย ด้วยกันลำดับแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คืออาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ทั้งสองท่าน ผศ.ดร. อุนนัติ พิณโสภณ และ ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือเสมอมาซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณบริษัท เดลต้า อีเลคโทรนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการทำงานและสนับสนุนอุปกรณ์ ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐวุฒิ เรืองตระกูล ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานด้านการวัดและระบบเครื่องมือวัด ขอขอบพระคุณ ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม ผู้ให้คำแนะนำ ด้านการทดสอบ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาตร์สำนักหอสมุดกลางที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางตำราและเอกสารอ้างอิง ตลอดจนเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกทุกๆเรื่อง ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนงบประมาณในการทำโครงงานรวมทั้งบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ที่มีส่วนร่วมให้ปริญญานิพนธ์ฉบับบนี้สำเร็จได้ด้วยดี

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ลืมไม่ได้คือบุคคลที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้บิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดีพร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

กฤษณ์ดนัย สอนศรี
โชติภน ขจรวิทยา
นันทวัฒน์ วงศ์วานโต๊ะขุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I
Abstract II
กิตติกรรมประกาศ III
หน้า IV
สารบัญรูป VIII
สารบัญตาราง X
บทที่ 1 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา 1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 1
1.5 ขอบเขตการวิจัย 2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา 2
บทที่ 2 3
2.1 บทนำ 3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
2.3 ข้อกำหนดและคำจำกัดความ 3
2.3.1 การปรับสมดุล (Balancing) 3
2.3.2 ความไม่สมดุล (Unbalance) 3
2.3.3 ความไม่สมดุลเริ่มต้น (Initial Unbalance) 3
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4
2.4.1 ระบบการสั่นสะเทือนที่มีหลายระดับของความอิสระ: การสั่นสะเทือนอิสระที่ปราศจากตัวหน่วง (Multiple Degree of Freedom System: Undamped Free Vibration) 4
2.4.2 ระบบการสั่นสะเทือนอิสระที่ปราศจากตัวหน่วงสองระดับของความอิสระ(Undamped Two-ฏegree-of-Freedom) 4
2.4.3 การวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural Frequency of system) 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 รูปแบบของความไม่สมดุล 6
2.4.4.1 ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์ (Static Unbalance) 6
2.4.4.2 ความไม่สมดุลคับเปิล (Couple Unbalance) 7
2.4.4.3 ความไม่สมดุลพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance) 7
2.4.5 ข้อกำหนดของพิกัดเผื่อของความไม่สมดุล (Specification of balance tolerances) ตามมาตรฐาน ISO 1940-1 [1] 8
2.4.5.1 เกรดคุณภาพของความสมดุล G (Balance quality grades G) 8
2.4.5.2 ความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ (Permissible residual unbalance) 8
2.4.5.3 การกระจายความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ไปยังระนาบพิกัดเผื่อ (Allocation Of Permissible Residual Unbalance To Tolerance Planes) 11
2.5 อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล Data Acquisition (DAQ) 12
2.5.1 อุปกรณ์ NI DAQ 13
2.5.2 Compact DAQ 14
2.6 เวลาการดิจิไทซ์ (Digitization Timing) 14
2.6.1 Digitization Timing Architectures 14
2.7 สัญญาณทางไฟฟ้า (Signal) 16
2.7.1 การแบ่งประเภทสัญญาณ 17
2.7.2 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) 18
2.7.3 สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) 18
2.8 โดเมนของสัญญาณความถี่ (Frequency Domain Signals) 18
2.9 แหล่งสัญญาณทางไฟฟ้า 19
2.10 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) 19
2.11 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณจากอานาลอกเป็นดิจิทัล 20
2.12 การสุ่มสัญญาณ (Sampling) 20
2.12.1 ทฤษฎี Nyquist 21
2.13 โปรแกรมรับข้อมูลและแสดงผลการสั่นสะเทือน 22
2.13.1 การเขียนโปรแกรมแบบแผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Programming) 22
2.13.2 หน้าปัด (Front Panels) และ แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) 23
2.13.3 โปรแกรมลูป (Loop) 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.4 โครงสร้างแบบเคส (Case Structures) 25
2.13.5 โครงสร้างตามลำดับ (Sequence Structure) 26
2.13.6 ตัวแปรโลคอล (Local Variable) และ ตัวแปรโกลบอล (Global Variable) 26
2.14 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square Value) 27
2.15 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) 28
บทที่ 3 29
3.1 บทนำ 29
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 29
3.3 อุปกรณ์การทดลอง 29
3.3.1 เครื่องวัดความสมดุลของพัดลมที่นั่งรถยนต์ส่วนอุปกรณ์ติดยึด 29
3.3.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนพัดลมระบายอากาศในเก้าอี้รถยนต์ 33
3.3.3 การเลือกอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล National Instruments Data Acquisition Device 33
3.3.4 การเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง 34
3.3.5 การเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ 35
3.3.6 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ 36
3.4 วิธีการทำงานของเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ 38
3.5 การออกแบบการทำงานของซอฟท์แวร์ใช้งาน 40
3.5.1 ภาพรวมการทำงานของโปรแกรม 41
3.5.2 โมดูลตั้งค่า 42
3.6 โมดูลบันทึกค่า 44
3.7 โมดูลอ่านค่า 45
บทที่ 4 47
4.1 บทนำ 47
4.2 วิธีการทดลอง 47
4.2.1 การคำนวณผลการตอบสนองทางทฤษฎี 47
4.2.2 การวัดผลตอบสนองความเร่งจากการทดลอง 47
4.3 ผลการทดลอง 50
4.3.1 การเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกันของพัดลมตัวเดียวกัน 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การเปรียบเทียบพัดลม 4 ตัวที่ความถี่ใช้งาน 65 เฮิรตซ์ 57
4.3.3 การทดลองการวัดซ้ำเพื่อดูความเสถียรภาพของการเครื่องวัด 66
4.3.4 การเปรียบเทียบระหว่างสมการการเคลื่อนที่กับผลที่ได้จากการวัดของพัดลมที่สมดุลแล้ว 67
4.3.5 การทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม 69
บทที่ 5 72
5.1 บทนำ 72
5.2 สรุปผลการทดลอง 72
5.3 ปัญหาจากการศึกษา 72
5.4 ข้อเสนอแนะ 72
บรรณานุกรม 73
ภาคผนวก 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์ 6
รูปที่ 2.2 ความไม่สมดุลคับเปิล (Couple Unbalance) 7
รูปที่ 2.3 ความไม่สมดุลพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance) 8
รูปที่ 2.4 ความไม่สมดุลคงเหลือเฉพาะที่อยู่บนพื้นฐานของเกรดคุณภาพความสมดุลและความเร็ว 10
รูปที่ 2.5 วัตถุหมุน(Rotor)ที่มีศูนย์กลางมวลอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตร 12
รูปที่ 2.6 วัตถุหมุน(Rotor)ด้านนอกที่มีศูนย์กลางมวลอยู่ในตำแหน่งที่สูงเกินไป 12
รูปที่ 2.7 แผนผังการส่งข้อมูล 13
รูปที่ 2.8 Compact DAQ 14
รูปที่ 2.9 Multiplexed Sampling Architecture 15
รูปที่ 2.10 การสุ่มสัญญาณ 15
รูปที่ 2.11 Simultaneous Sampling Architecture 16
รูปที่ 2.12 สัญญาณ Digitalแบบ TTL (Transistor to Transistor Logic)และPulse Train Signal 17
รูปที่ 2.13 สัญญาณแอนะล็อก ทั้ง 3 ชนิด 18
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวิธีการสุ่มสัญญาณแต่ละความถี่ 20
รูปที่ 2.15 ทฤษฎี Nyquist 21
รูปที่ 2.16 อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ที่น้อยเกินไป 21
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟด้วยด้วยวิธี Trapezoidal's Rule 27

บทที่ 3

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องวัดความสมดุลของพัดลมที่นั่งรถยนต์ 31
รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องวัดความไม่สมดุล 32
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง 32
รูปที่ 3.4 Ceramic Shear ICP® Accelerometer, 100 mV/g จาก PCB Piezotronics, Inc 34
รูปที่ 3.5 วิธีการต่อเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ 35
รูปที่ 3.6 LV-S41 Optical Laser Type Tachometer 36
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) 36
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ 39
รูปที่ 3.9 แสดงภาพรวมการทำงานของเครื่องวัดความไม่สมดุล 40
รูปที่ 3.10หน้าต่างโปรแกรมหลัก 40
รูปที่ 3.11 แผนผัง (Flow Chart) ภาพรวมการทำงานของโปรแกรมหลัก 42
รูปที่ 3.12 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลการตั้งค่า 43
รูปที่ 3.13 หน้าต่างโมดูลการตั้งค่า 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 หน้าต่างโปรแกรมบันทึกค่า 44
รูปที่ 3.15 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลบันทึกค่า 45
รูปที่ 3.16 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลอ่านค่า 46
บทที่ 4

รูปที่ 4.1 ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง 48
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง 48
รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการปรับความถี่ที่กล่องควบคุม 49
รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมรับค่าความเร่งจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง 49
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างไฟล์ค่าความเร่งที่ได้จากการทดลอง 50
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 58 เฮิรตซ์ 52
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 65 เฮิรตซ์ 53
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 70 เฮิรตซ์ 55
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ในแนวนอน.. 56
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ในแนวตั้ง... 57
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 1 58
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลม ตัวที่ 2 60
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 3 62
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 4 63
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมทั้ง 4 ตัวจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในแนวแกนนอน 65
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมทั้ง 4 ตัวจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในแนวแกนตั้ง 65
รูปที่ 4.17 กราฟผลการทดลองเสถียรภาพเซ็นเซอร์วัดความเร่งแนวนอน 66
รูปที่ 4.18 กราฟผลการทดลองเสถียรภาพเซ็นเซอร์วัดความเร่งแนวแกนตั้ง 67
รูปที่ 4.19 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองเซ็นเซอร์วัดความเร่งแกนแนวนอน 68
รูปที่ 4.20 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองเซ็นเซอร์วัดความเร่งแกนแนวตั้ง 68
รูปที่ 4.21 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 1 69
รูปที่ 4.22 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 2 70
รูปที่ 4.23 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 3 70
รูปที่ 4.24 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 4 70
รูปที่ 4.25 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 5 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 คำแนะนำสำหรับเกรดคุณภาพสมดุลสำหรับวัตถุหมุน (Rotor)ที่เป็นวัตถุความแข็งเกร็ง 9

บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft. 52
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft. 54
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft. 55
ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง 56
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 1 59
ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 2 61
ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft. 62
ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft. 64
ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง 64
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของการวัด 40 ครั้งและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 67
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเร่งทั้งสองแนวแกน. 69
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลมทั้ง 5 ครั้ง 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนตร์ผู้ผลิตต้องทำการปรับสมดุลทางกลก่อนจัดจำหน่าย เพราะจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ข้อที่2 ความเร่งของวัตถุจะแปรผันตรงและมีทิศเดียวกับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ เมื่อมีแรงลัพธ์ขนาดไม่เป็นศูนย์มากระทำกับวัตถุ โดยเครื่องจักรกลหมุนเคลื่อนที่เป็นวงกลม จะมีความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ดังนั้นวัตถุที่มีการแผ่กระจายมวลไม่สม่ำเสมอจะเกิดแรงเฉื่อยจากความไม่สมดุล ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อการสึกหรอของตลับลูกปืนและเกิดเสียงที่เป็นที่ไม่พึงประสงค์อย่างยิ่ง เนื่องจากรบกวนสมาธิผู้ขับขี่ ดังนั้นเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการผลิตพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ เพื่อช่วยลดแรงเฉื่อยซึ่งนำมาสู่การสั่นสะเทือนให้อยู่ในค่ามาตรฐานการผลิต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาวิธีการลดความไม่สมดุลของวัตถุหมุนอันเนื่องมาจากการแผ่เฉลี่ยของมวลไม่สม่ำเสมอ

1.2.2 ออกแบบเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ส่วนอุปกรณ์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งการเสียสมดุลของพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์แบบพลศาสตร์ตามมาตรฐานระดับความสมดุลพัดลม (ISO-1940-1) [1]

1.2.3 เพื่อออกแบบเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ให้มีการวัดแม่นยำเพื่อส่งให้โปรแกรมคำนวณความไม่สมดุลคำนวณได้อย่างถูกต้อง

1.2.4 เพื่อออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ให้ง่ายต่อการติดตั้งและการซ่อมบำรุง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 ทราบถึงสมการคำนวณความไม่สมดุลและการสั่นสะเทือน

1.3.2 สามารถออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์เพื่อใช้ในการวัดค่าที่แม่นยำ

1.3.3 สามารถออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ที่มีความเร็วรอบการหมุนพัดลมคงที่

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานการสั่นสะเทือนเครื่องจักรกลหมุน

1.4.2 ทฤษฎีความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์และวิธีการปรับความไม่สมดุล

1.4.3 ทฤษฎีการวัดและเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ส่วนอุปกรณ์ส่วนฐานชิ้นงานรองรับการสั่นสะเทือนขณะพัดลมหมุนและส่วนอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล

1.5.2 เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการรับค่าและเก็บข้อมูลจากเครื่องมือวัดสัญญาณ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 ศึกษาทฤษฎีพื้นการสั่นสะเทือนทางกล ทฤษฎีความไม่สมดุล และวิธีการปรับความไม่สมดุล

1.6.2 ศึกษามาตรฐานระดับความสมดุลพัดลม

1.6.3 ศึกษาอุปกรณ์ในการออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

1.6.4 ออกแบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ส่วนอุปกรณ์รองรับการสั่นสะเทือนขณะพัดลมหมุนและส่วนอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล

1.6.5 เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการรับค่าและเก็บข้อมูลจากเครื่องมือวัดสัญญาณ

1.6.6 ทดสอบประกอบอุปกรณ์ของเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ทั้งหมดเข้าด้วยกัน

1.6.7 ทดสอบระบบเครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ด้วยการวิเคราะห์ระบบการวัด

1.6.8 สรุปการทำงาน ผลที่ได้รับ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการศึกษาการออกแบบเครื่องวัดความไม่สมดุลของพัดลม จำเป็นต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการสั่นสะเทือน เข้าใจในหลักการทำงานของพัดลมและพื้นฐานการเขียนโปรแกรม LabVIEW รวมถึงความรู้ทางไฟฟ้าเบื้องต้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากวิทยานิพนธ์เรื่องการปรับสมดุลของวัตถุแข็งเกร็งของ นาย นัฐพล ทรงพัฒนะโยธิน และ นาย ปกรณ์ พรเติม [2] ปีการศึกษา 2545 ได้การศึกษาทฤษฎีการหมุนของวัตถุหมุนเกร็งที่มีการหมุนอย่างไม่สมดุลอันเนื่องมาจากการแผ่กระจายมวลอย่างไม่สม่ำเสมอและทำการแก้ไขโดยวิธีการปรับสมดุลโดยใช้วิธีคำนวณจากเวกเตอร์ของการสั่นสะเทือนโดยได้ทำการออกแบบชุดจำลองการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรหมุนเพื่อทำการทดลองเปรียบเทียบผลทางปฏิบัติกับผลทางทฤษฎีเพื่อหาขนาดและตำแหน่งของความไม่สมดุลโดยพิจารณาจากการสั่นสะเทือนในขณะหมุนด้วยความเร็วคงที่ของวัตถุหมุนเกร็งชุดจำลองการสั่นสะเทือนที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นชุดสาธิตในการศึกษาการปรับสมดุลของวัตถุหมุน

Wang Qiuxiao และ Wang Fei [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนทางกลของเครื่องสมดุลการหมุนของดาวเทียม การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของการสั่นสะเทือนในแนวนอนและการสั่นสะเทือนแบบบิดของกลไกการสั่นสะเทือนนั้นส่วนใหญ่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องเช่นเดียวกับความเสถียรของตำแหน่งศูนย์กลางการสั่นสะเทือน ซึ่งบริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีการสั่นสะเทือนในแนวนอนและการสั่นสะเทือนแบบบิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพียงเท่านั้น

2.3 ข้อกำหนดและคำจำกัดความ

2.3.1 การปรับสมดุล (Balancing)

ตรวจสอบโดยการกระจายมวลของวัตถุหมุน (Rotor) และถ้าจำเป็นให้ปรับแก้ไขเพื่อให้มั่นใจว่าความไม่สมดุลตกค้าง หรือการสั่นสะเทือนของแรง บนตลับลูกปืน (Bearing) ที่ความถี่ที่สอดคล้องกับความเร็วให้บริการให้อยู่ภายในขีดจำกัดที่ระบุ (ISO 1940-1) [1]

2.3.2 ความไม่สมดุล (Unbalance)

สภาพที่มีอยู่ในวัตถุหมุน (Rotor) เมื่อมีแรงสั่นสะเทือนหรือการเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับตลับลูกปืน (Bearing) อันเป็นผลมาจากแรงเหวี่ยง (ISO 1940-1) [1]

2.3.3 ความไม่สมดุลเริ่มต้น (Initial Unbalance)

ความไม่สมดุลของทุกรูปแบบที่มีอยู่ในวัตถุหมุน(Rotor)ก่อนที่จะทำการปรับสมดุล (ISO 1940-1) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ระบบการสั่นสะเทือนที่มีหลายระดับของความอิสระ: การสั่นสะเทือนอิสระที่ปราศจากตัวหน่วง (Multiple Degree of Freedom System: Undamped Free Vibration) [4]

สำหรับระบบการสั่นที่มีลำดับความอิสระมากกว่าหนึ่ง สามารถใช้พีชคณิตทางเมทริกซ์มาช่วยในการวิเคราะห์การแก้ปัญหาระบบการสั่นอย่างอิสระที่ไม่สนใจตัวหน่วงสามารถถูกเขียนอยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังสมการ

$$\mathrm{M}\ddot{\mathrm{x}} + \mathrm{kx} = 0 \tag{2.3}$$

Eigenvalue Problem ถูกนำมาใช้เพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบการสั่นโดยการเปลี่ยนรูปของสมการที่ (2.6) โดยการเปลี่ยนรูปเวกเตอร์เมทริกซ์ $\mathbf{x} = \mathrm{M}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{q}$ และคูณด้วยเมทริกซ์ $\mathrm{M}^{-\frac{1}{2}}$ ทั้งสมการทำการสมมุติคำตอบให้ $\mathbf{q} = \mathbf{v}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\mathrm{t}}$ สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่

$$\widetilde{\mathrm{K}}\mathbf{v} = \omega^2\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \tag{2.4}$$

โดยที่ $\widetilde{\mathbf{K}}$ คือ Mass-Normalized Stiffness Matrix

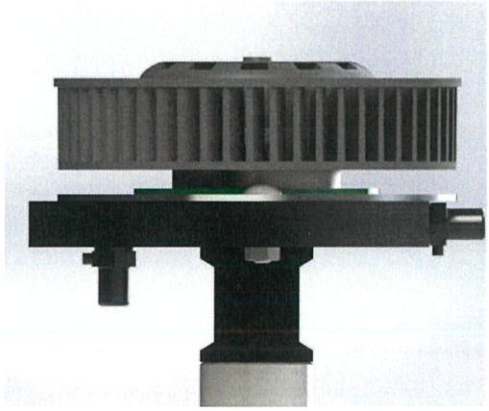
λ คือ Eigenvalue

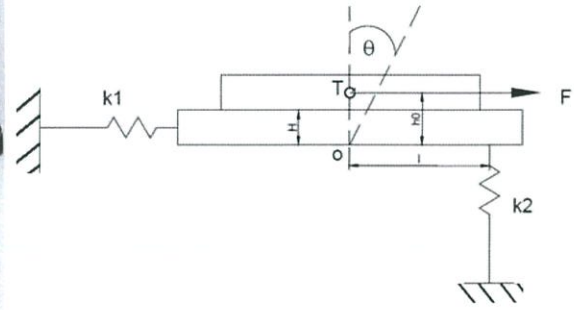
$\mathbf{v}$ คือ Eigenvector

2.4.2 ระบบการสั่นสะเทือนอิสระที่ปราศจากตัวหน่วงสองระดับของความอิสระ (Undamped Two-Degree-Of-Freedom)

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากกระตุ้นจากความไม่สมดุลของพัดลมโดยปราศจากตัวหน่วงที่สองระดับของความอิสระสามารถเขียนแบบจำลองการสั่นได้ ส่วนในการสั่นสะเทือนของระบบจะใช้ยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) ในการเป็นตัวช่วยในการสั่นซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับมาตรฐานตามอุตสาหกรรมจึงมีค่า ค่า k_1 และ k_2 โดยจะแสดงการหาค่า k ในแต่ละแกนตามหัวข้อ 3.3.6 ซึ่งค่า k จะมีทั้งในแนวแกนตั้งและแกนนอน แต่การเคลื่อนที่ของระบบการสั่นสะเทือนมีการสั่นในแนวระนาบและการสั่นโดยผ่านจุดหมุน ซึ่งยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) จะไม่ได้รับการสั่นในแนวแกนตั้งโดยตรง ดังนั้นเราจึงต้องวัดการสั่นสะเทือนของการหมุนที่ตำแหน่งของการติดเซ็นเซอร์แนวตั้ง โดยจะกำหนดให้ค่า k_2 มีค่าเท่ากับ ค่าที่ได้จากหัวข้อ 3.3.6 เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





จากการเขียนผังวัตถุอิสระ การเคลื่อนที่ของระบบการสั่นดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดย สมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.5) และ สมการที่ (2.6)

$$M\ddot{x} + MH\ddot{\theta} + k_1 x = 0 \tag{2.5}$$

$$MH\ddot{x} + J\ddot{\theta} + k_2 l^2 \theta = 0 \tag{2.6}$$

สมการที่ และ สามารถเขียนสมการเมทริกซ์ในระบบการสั่นสะเทือนแบบบังคับไร้ตัวหน่วงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M & MH \\ MH & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Fh_0 + T \end{bmatrix}$$

หรือเขียนในรูปสัญลักษณ์เมทริกซ์ได้ว่า

$$M\ddot{x} + kx = 0 \tag{2.7}$$

2.4.3 การวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของระบบ (Natural Frequency of system)

เมทริกซ์ M เป็นเมทริกซ์ที่สมมาตร (Symmetric Matrix) และเป็นเมทริกซ์บวก (Positive Definite) แต่เนื่องจาก M ไม่ได้เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix) เหมือนเมทริกซ์ทั่วไป ดังนั้นการหาค่าไอเก้น λ (Eigen Value) แบบทั่วจึงหาไม่ได้ ต้องเลือกใช้ วิธี Cholesky Decomposition ขั้นตอนการหาตามลำดับดังนี้

ทำการหา เมทริกซ์ L (Lower Triangular Matrix) ที่จะทำให้

$$M = LL^T \text{ หรือ } L^{-1}M(L^T)^{-1} = I \tag{2.8}$$

ซึ่งจะหาโดยใช้โปรแกรม Matlab ในการช่วยหาเมทริกซ์ L (Lower Triangular Matrix) และจะได้ค่า $\tilde{K}$ (Mass-Normalized Stiffness Matrix)

$$\tilde{K} = L^{-1}M(L^T)^{-1} \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถหาค่า ค่าไอแกน λ (Eigenvalue) ได้จาก

$$\det(\tilde{K} - \lambda I) = 0 \tag{2.10}$$

จะได้ค่าไอเก้นสองค่า คือ λ_1, λ_2

ดังนั้น ความถี่ธรรมชาติของระบบมีสองค่า

$$\omega_{n,1} = \sqrt{\lambda_1} \tag{2.11}$$

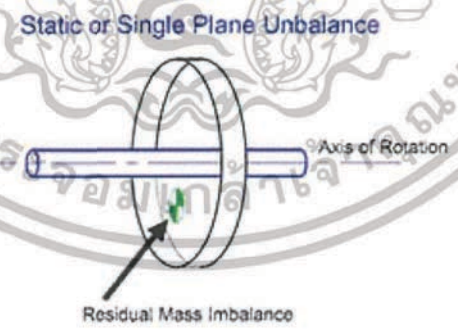
$$\omega_{n,2} = \sqrt{\lambda_2} \tag{2.12}$$

2.4.4 รูปแบบของความไม่สมดุล

ความไม่สมดุลสามารถแยกออกได้เป็น 3 รูปแบบ [4] ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์ (Static Unbalance) ความไม่สมดุลคับเปิล (Couple Unbalance) และ ความไม่สมดุลพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance)

2.4.4.1 ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์ (Static Unbalance)

หมายถึงปรากฏการณ์การทำงานผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุหมุน (Rotor) และตามคำจำกัดความสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มหรือลดมวลที่ตำแหน่งเดียวตามแนวศูนย์กลางมวล ความหมายโดยนัยคือการทำให้แกนวัตถุหมุน (Rotor) ขนานกับแนวแกนของตลับลูกปืน (Bearing) ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์สามารถตรวจวัดได้โดยไม่ต้องหมุนวัตถุหมุน (Rotor)



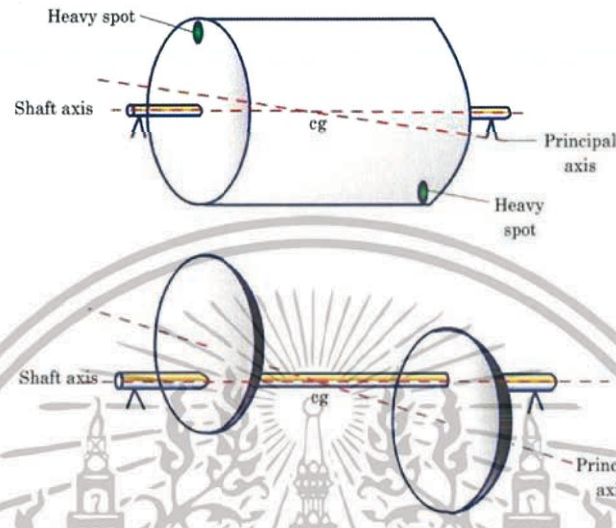
รูปที่ 2.1 ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์

โดยที่ถ้าวัตถุหมุน (Rotor) มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาวของเพลาหรือแกนหมุนมากกว่า 7 ถึง 10 เท่า จะใช้การแก้ไขความไม่สมดุลในรูปแบบของ ความไม่สมดุลสถิตยศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.2 ความไม่สมดุลคับเปิล (Couple Unbalance)

หมายถึงความไม่สมดุลเมื่อวัตถุหมุน (Rotor) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบกับขนาดของเพลาหรือแกนหมุนน้อยกว่า 7 ถึง 10 เท่า (ทรงกระบอก) [4]

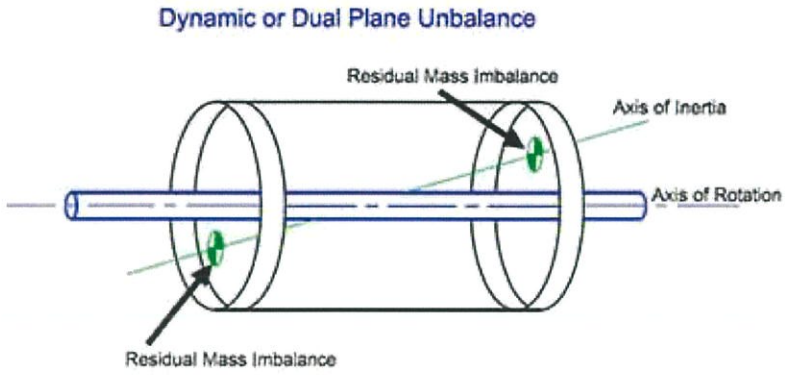


รูปที่ 2.2 ความไม่สมดุลคับเปิล (Couple Unbalance)

2.4.4.3 ความไม่สมดุลพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance)

ความไม่สมดุลพลศาสตร์คือการรวมกันของทั้งความไม่สมดุลแบบสถิตยศาสตร์ และความไม่สมดุลคับเปิล อีกทั้งยังเป็นรูปแบบส่วนใหญ่ของความไม่สมดุล ในการวัดค่าความไม่สมดุลแบบพลศาสตร์ต้องวัดในขณะที่วัตถุหมุน (Rotor) หมุนในความเร็วให้บริการ จากนั้นใช้วิธีเพิ่มหรือลดมวลลงในทั้งสองระนอบของวัตถุหมุน (Rotor) เพื่อให้เกิดความสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ความไม่สมดุลพลศาสตร์ (Dynamic Unbalance)

2.4.5 ข้อกำหนดของพิกัดเผื่อของความไม่สมดุล (Specification of Balance Tolerances) ตามมาตรฐาน ISO 1940-1 [1]

2.4.5.1 เกรดคุณภาพของความสมดุล G (Balance Quality Grades G)

ถูกตั้งขึ้นเพื่ออนุญาตการจัดประเภทของคุณภาพความสมดุลที่ต้องการสำหรับแต่ละรูปแบบของเครื่องจักร ดูตารางที่ 2.1

เกรดคุณภาพความสมดุล G ได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับขนาดของ $e_{per}\,\Omega$ แสดงในหน่วยมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) ถ้าหากขนาดเท่ากับ 6.3 มิลลิเมตรต่อวินาที, เกรดคุณภาพความสมดุลที่ถูกออกแบบคือ G 6.3

ค่าของ e_{per} (ซึ่งก็คือ U_{per}/m) จะถูกวาดด้วยความเร็วสูงสุดในรูปที่ 2.1

2.4.5.2 ความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ (Permissible Residual Unbalance)

U_{per} สามารถคำนวณได้โดยการเลือกเกรดคุณภาพของความสมดุล G ลงในสมการสมการต่อไปนี้

$$U_{per} = 1000\,\frac{(e_{per}\Omega)m}{\Omega} \tag{2.6}$$

U_{per} คือ ค่าตัวเลขของความไม่สมดุลคงค้างที่สามารถยอมรับได้, อธิบายในหน่วยกรัมมิลลิเมตร (g-mm)

$e_{per}\Omega$ คือ ค่าตัวเลขของเกรดคุณภาพของความสมดุลที่เลือก, อธิบายในหน่อยมิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)

m คือ ค่าตัวเลขขนาดของมวลวัตถุหมุน (Rotor) ในหน่วยกิโลกรัม (kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ω คือ ค่าตัวเลขของความเร็วเชิงมุมของความเร็วให้บริการ, อธิบายในหน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s) ,เมื่อ $\Omega \approx n/10$ และ n คือความเร็วให้บริการในหน่วยรอบต่อนาที (RPM)

Machinery types: General examples	Balance quality grade G	Magnitude $e_{per} \cdot \Omega$ mm/s
Crankshaft drives for large slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently unbalanced	G 4000	4 000
Crankshaft drives for large slow marine diesel engines (piston speed below 9 m/s), inherently balanced	G 1600	1 600
Crankshaft drives, inherently unbalanced, elastically mounted	G 630	630
Crankshaft drives, inherently unbalanced, rigidly mounted	G 250	250
Complete reciprocating engines for cars, trucks and locomotives	G 100	100
Cars: wheels, wheel rims, wheel sets, drive shafts Crankshaft drives, inherently balanced, elastically mounted	G 40	40
Agricultural machinery Crankshaft drives, inherently balanced, rigidly mounted Crushing machines Drive shafts (cardan shafts, propeller shafts)	G 16	16
Aircraft gas turbines Centrifuges (separators, decanters) Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds up to 950 r/min Electric motors of shaft heights smaller than 80 mm Fans Gears Machinery, general Machine-tools Paper machines Process plant machines Pumps Turbo-chargers Water turbines	G 6,3	6,3
Compressors Computer drives Electric motors and generators (of at least 80 mm shaft height), of maximum rated speeds above 950 r/min Gas turbines and steam turbines Machine-tool drives Textile machines	G 2,5	2,5
Audio and video drives Grinding machine drives	G 1	1
Gyroscopes Spindles and drives of high-precision systems	G 0,4	0,4

NOTE 1 Typically completely assembled rotors are classified here. Depending on the particular application, the next higher or lower grade may be used instead. For components, see Clause 9.

NOTE 2 All items are rotating if not otherwise mentioned (reciprocating) or self-evident (e.g. crankshaft drives).

NOTE 3 For limitations due to set-up conditions (balancing machine, tooling), see Notes 4 and 5 in 5.2.

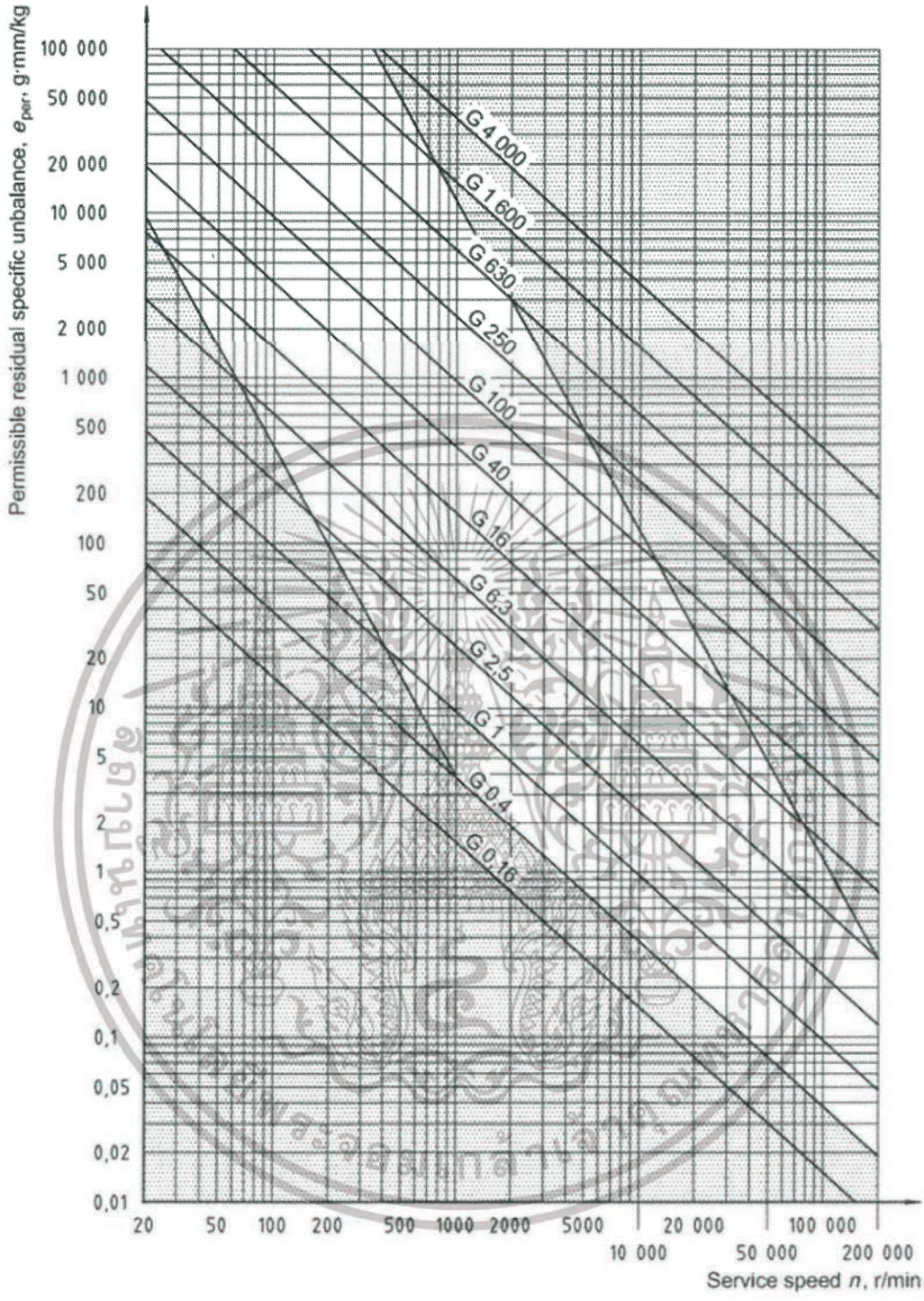
NOTE 4 For some additional information on the chosen balance quality grade, see Figure 2. It contains generally used areas (service speed and balance quality grade G), based on common experience.

NOTE 5 Crankshaft drives may include crankshaft, flywheel, clutch, vibration damper, rotating portion of connecting rod. Inherently unbalanced crankshaft drives theoretically cannot be balanced; inherently balanced crankshaft drives theoretically can be balanced.

NOTE 6 For some machines, specific International Standards stating balance tolerances may exist (see Bibliography).

ตารางที่ 2.1 คำแนะนำสำหรับเกรดคุณภาพสมดุลสำหรับวัตถุหมุน (Rotor) ที่เป็นวัตถุความแข็งเกร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



NOTE The white area is the generally used area, based on common experience.

รูปที่ 2.4 ความไม่สมดุลคงเหลือเฉพาะที่อยู่บนพื้นฐานของเกรดคุณภาพความสมดุลและความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5.3 การกระจายความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ไปยังระนาบพิกัดเผื่อ (Allocation of Permissible Residual Unbalance to Tolerance Planes) [5]

1.ระนาบเดียว

ในกรณีของการแก้ไขระนาบเดียว U_{per} ถูกใช้กับทั้งระนาบ ส่วนในกรณีอื่นๆใช้จากกรณีระนาบพิกัดเผื่อแบบสองระนาบ

2.สองระนาบ

ความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ U_{per} ถูกกระจายส่วนจามระยะจากจุดศูนย์กลางมวลไปยังระนาบพิกัดเผื่อด้านตรงข้าม ตามรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 เมื่อระนาบพิกัดเผื่อคือระนาบตลับลูกปืน (Bearing) A และ B กล่าวได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$U_{perA} = \frac{U_{per} \times L_B}{L} \quad (2.7)$$

$$U_{perB} = \frac{U_{per} \times L_A}{L} \quad (2.8)$$

เมื่อ U_{perA} คือ ความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ในตลับลูกปืน (Bearing) ระนาบ A

U_{perB} คือ ความไม่สมดุลคงเหลือที่สามารถยอมรับได้ในตลับลูกปืน (Bearing) ระนาบ B

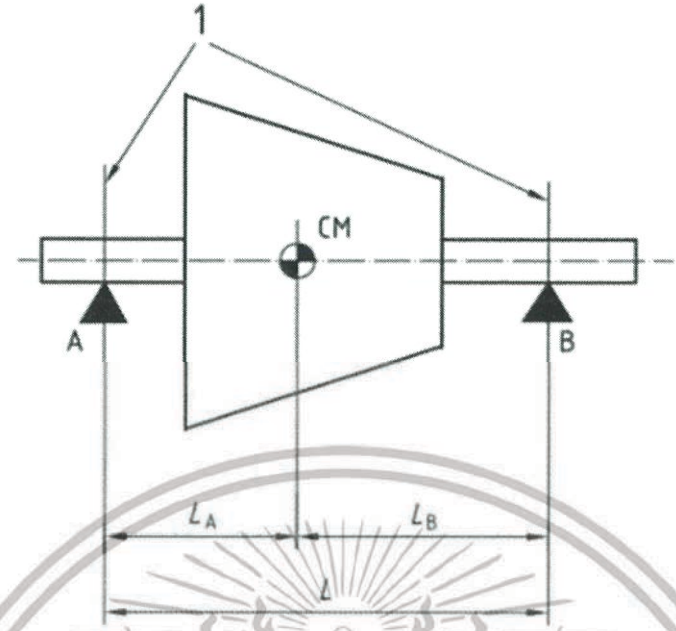
U_{per} คือ ความไม่สมดุลคงเหลือ (รวม) ที่สามารถยอมรับได้ (ในระนาบศูนย์กลางมวล)

L_A คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลไปยังตลับลูกปืน (Bearing) ระนาบ A

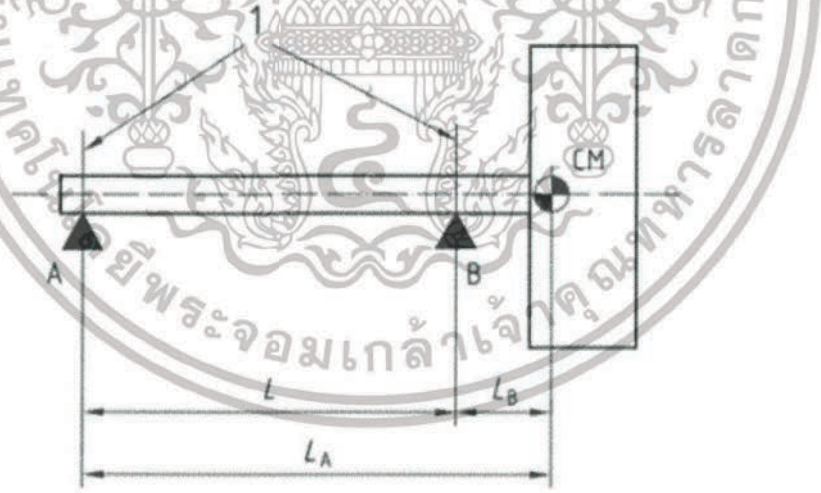
L_B คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลไปยังตลับลูกปืน (Bearing) ระนาบ B

L คือ ความกว้างตลับลูกปืน (Bearing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วัตถุหมุน (Rotor) ที่มีศูนย์กลางมวลอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สมมาตร



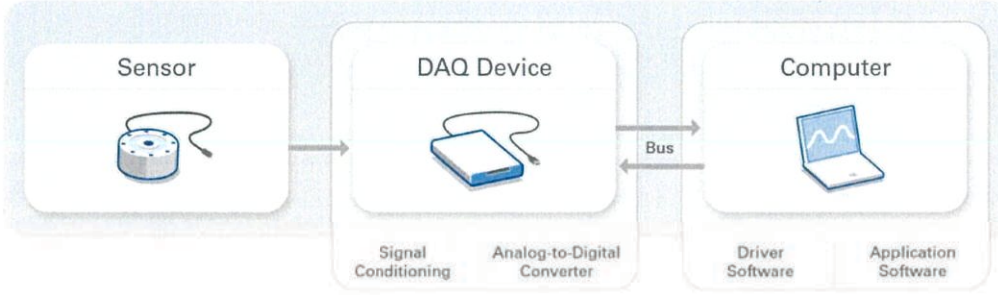
รูปที่ 2.6 วัตถุหมุน (Rotor) ด้านนอกที่มีศูนย์กลางมวลอยู่ในตำแหน่งที่สูงเกินไป

2.5 อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล Data Acquisition (DAQ)

อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล Data Acquisition (DAQ) [6] ทำการแปลงเป็นดิจิทัลเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมาจากเซ็นเซอร์เป็นสัญญาณดิจิทัลที่คอมพิวเตอร์สามารถอ่านได้ ซึ่งเป็นฟังก์ชันหลักของระบบเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูล DAQ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ฮาร์ดแวร์การวัด DAQ และซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการวัดแบบเดิม ระบบ DAQ ที่ใช้คอมพิวเตอร์จะมีการประมวลผลและความสามารถในการเชื่อมต่อของคอมพิวเตอร์ในอุตสาหกรรมเพื่อการวัดที่มีประสิทธิภาพ ยืดหยุ่น และคุ้มค่ามากขึ้น



รูปที่ 2.7 แผนผังการส่งข้อมูล

ที่มา NI Engineers Guide to Digitization

การใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล Data Acquisition (DAQ) จากบริษัท National instruments (NI) อ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วนำไปเก็บไว้ในหน่วยความจำบนคอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์และแสดงผลซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการเขียนโปรแกรม ระบบวิเคราะห์ข้อมูลบนคอมพิวเตอร์จะมีส่วนประกอบอยู่สี่ส่วนด้วยกันคือส่วนของแหล่งสัญญาณจากเซ็นเซอร์, ส่วนฮาร์ดแวร์ การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning), ส่วนอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล, และซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ สัญญาณที่เราจะวัดอาจเป็นสัญญาณแอนะล็อก (+10 โวลต์ หรือ 4-20 มิลลิแอมป์) หรือเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มาจากเซ็นเซอร์และจะถูกต่อสายเข้าไปในอุปกรณ์การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการปรับปรุงสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะวัดด้วยฮาร์ดแวร์ DAQ เช่นถ้าสัญญาณมีขนาดเล็กเกินไปก็จะต้องขยายให้ใหญ่ขึ้นหรือถ้าสัญญาณเข้ามาใหญ่เกินไปก็ต้องลดทอนสัญญาณให้เล็กลงเป็นต้น แต่ถ้าสัญญาณมีลักษณะเหมาะสมแล้วก็ไม่จำเป็นต้องนำการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) มาใช้ สำหรับอุปกรณ์ DAQ แบบพื้นฐานจะสามารถวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง +10 โวลต์ (Volts) เท่านั้น ซึ่งฮาร์ดแวร์นี้จะถูกติดตั้งบนพีซีที่มีไดร์ฟเวอร์และมีแอพพลิเคชั่นที่เขียนด้วยซอฟต์แวร์สำหรับพัฒนาระบบ เช่น LabVIEW

2.5.1 อุปกรณ์ NI DAQ

อุปกรณ์ NI DAQ [6] ประเภทหลายฟังก์ชันซึ่งมีหน้าที่หลักอยู่สี่ระบบได้แก่ แอนะล็อก Input, แอนะล็อก Output, ดิจิทัล Input / Output, และ Counter Input / Output (อุปกรณ์บางรุ่นอาจมีไม่ครบทุกหน้าที่ขึ้นอยู่กับการออกแบบ) โดยจะสามารถต่อกับคอมพิวเตอร์ได้หลายช่องทาง ซึ่งแต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปให้เราเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 Compact DAQ

รูปที่ 2.8 Compact DAQ

ที่มา http://www.ni.com/product-documentation/9939/en/

Data Acquisition แบบคอมแพกต์ซึ่งมีความสามารถและยืดหยุ่นสูงกว่าแบบอื่นๆเพราะจะสามารถเลือกโมดูลการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ได้หลายแบบตามความต้องการ ว่าต้องการวัดสัญญาณหรือสร้างสัญญาณประเภทไหนบ้างและกี่ช่องสัญญาณซึ่งเราจะมีอิสระในการเลือกใช้โมดูลที่มีมากกว่า 50 แบบและสามารถเลือกขนาดของสล็อต (Slot) เสียบโมดูลได้ทั้งแบบ 1, 4, และ 8 สล็อต (Slot) รวมถึงวิธีการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีให้เลือกหลายแบบ อุปกรณ์ NI DAQ ทุกรุ่นทุกแบบจะใช้ซอฟต์แวร์ไดร์ฟเวอร์ (Driver) ชื่อว่า NI DAQmx จึงสามารถทดลองนำอุปกรณ์แบบใดก็ได้มาทำการทดลองศึกษา

2.6 เวลาการดิจิไทซ์ (Digitization Timing)

อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล Data Acquisition (DAQ) สมัยใหม่นำเสนอโครงสร้างดิจิทัลที่หลากหลาย ซึ่งทั้งหมดนี้ต้องใช้การเชื่อมต่อไฟฟ้าบางประเภทกับขาหรือเทอร์มินัลจริงเพื่อรับสัญญาณที่คุณกำลังวัด ตัวเลือกในอุดมคตินั้นแตกต่างกันไปตามความต้องการของแอปพลิเคชัน DAQ ของคุณรวมถึงความหนาแน่นของแชนเนล, อัตราการได้มาต่อแชแนลและการจัดตำแหน่งเฟสระหว่างแชนเนลที่อยู่ติดกันบนอุปกรณ์

2.6.1 Digitization Timing Architectures

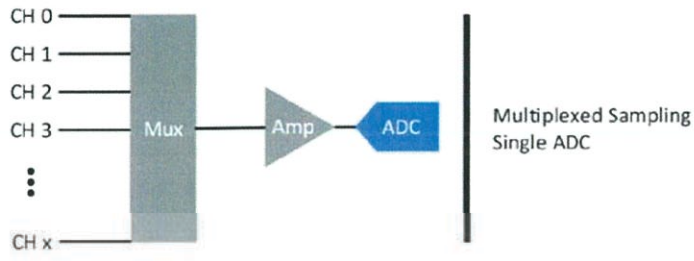
การแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นดิจิทัลนั้นควบคุมโดยโครงสร้างพื้นฐานเวลาภายในอุปกรณ์ DAQ แหล่งเวลาหนึ่งหรือหลายแหล่งอาจระบุเมื่อตัวอย่างถูกแปลงจากอนาล็อกเป็นดิจิทัลและในอัตราใด สองแบบคืออุปกรณ์ DAQ แบบ Simultaneous และ Multiplexed Sampling Architecture [6]

อุปกรณ์ DAQ ทั่วไปจะมีช่องสำหรับ แอนะล็อก Input จำนวนหลายช่องเพื่อให้สามารถวัดสัญญาณแอนะล็อก ได้หลาย ๆ ช่องพร้อมกันซึ่งในทางการออกแบบฮาร์ดแวร์หรือ Architecture จะมีสองวิธีให้เราเลือก

1. Multiplexed Sampling Architecture

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

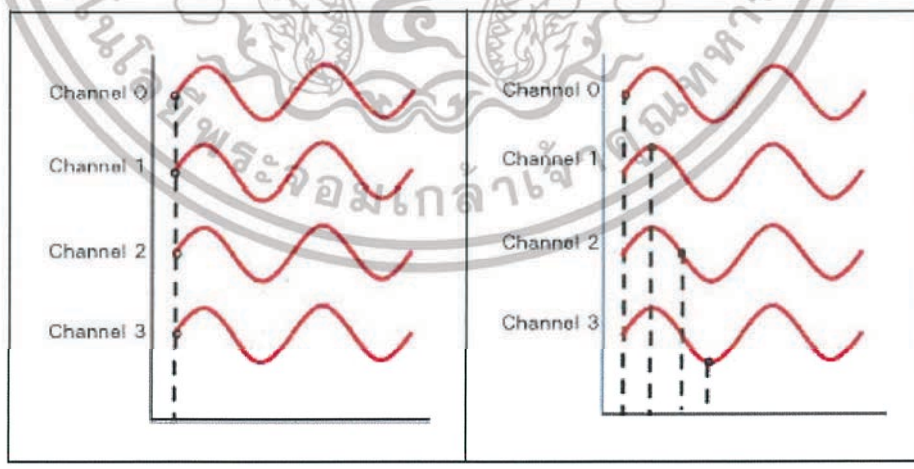
Multiplexed Sampling Architecture คือการใช้ Multiplexer (MUX) เข้ามาช่วยในการสวิตช์สัญญาณที่ละช่องเข้ามาในอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ซึ่งเป็นการสวิตช์แบบกลับไปมาที่รวดเร็วมากก่อนจะเข้าไปถึง ADC ดังภาพ



รูปที่ 2.9 Multiplexed Sampling Architecture

ที่มา NI Engineers Guide to Digitization

ข้อดีของอุปกรณ์แบบนี้คือมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเพราะใช้ ADC เพียงตัวเดียวก็สามารถวัดสัญญาณหลาย ๆ ช่องได้ในคราวเดียวกันส่วนข้อเสียคือ อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) สูงสุดที่สามารถใช้ได้จะต้องถูกหารด้วยจำนวนช่องที่ใช้ตัวอย่างเช่น ถ้าการสุ่มตัวอย่างสัญญาณสูงสุด (Maximum Sampling rate) ของอุปกรณ์คือ 100,000 ตัวอย่าง/วินาที แล้วเราต้องการวัดพร้อมกันสิบช่องกรณีนี้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) จะเหลือให้ใช้ได้สูงสุดเพียงช่องละ 10,000 ตัวอย่าง/วินาที เท่านั้น ข้อเสียอีกประการคือการเกิด Phase Shift Error [6] เนื่องจากวิธีการนี้จะเป็นการวัดสัญญาณด้วยการสแกนสัญญาณเข้า ADC ที่ละช่องไม่ได้สุ่มสัญญาณพร้อมกันจริง ๆ จึงทำให้สัญญาณที่อ่านได้แต่ละช่องมีเฟสคลาดเคลื่อนออกไปซึ่งจะเห็นชัดเจนมากขึ้นในกรณีที่สัญญาณมีความถี่สูงอุปกรณ์ที่ใช้วิธีการสุ่มแบบนี้จึงใช้ได้กับสัญญาณที่เฟสในแต่ละช่องไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน



รูปที่ 2.10 การสุ่มสัญญาณ

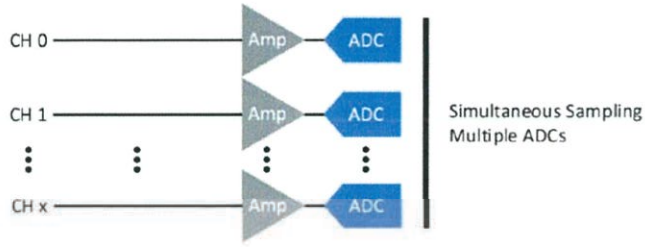
ที่มา NI Engineers Guide to Digitization

ฝั่งขวาใช้การสุ่มสัญญาณแบบ Multiplexed สี่ช่องโดยต่อสายวัดไปที่แหล่งสัญญาณเดียวกันจะเห็นได้ว่าที่จังหวะการสแกนเดียวกันกว่าจะสแกนจากช่องแรกไปถึงช่องสุดท้ายต้องใช้เวลาไป 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครวินาทีสัญญาณช่องสุดท้ายอาจจะเลื่อนไปแล้วถึง 270 องศา ในขณะที่ฝั่งซ้ายใช้การสุ่มแบบ simultaneous ที่แทบจะไม่มีการเลื่อนของเฟสในแต่ละช่องสัญญาณ

2. Simultaneous Sampling Architecture



รูปที่ 2.11 Simultaneous Sampling Architecture

ที่มา NI Engineers Guide to Digitization

วิธีการนี้จะติดตั้ง ADC ประจำอยู่ในแต่ละช่องสัญญาณเพื่อให้สามารถใช้อัตราการสุ่มสัญญาณได้อย่างเต็มที่และยังสามารถสุ่มสัญญาณได้พร้อมกันอย่างแท้จริงเพื่อรักษาความสัมพันธ์ทางเฟสของสัญญาณในแต่ละช่อง ซึ่งจะเหมาะกับการอ่านข้อมูลที่เฟสในแต่ละช่องมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์สัญญาณเช่น การวิเคราะห์เสียงและความมั่นสะเทือน, การวิเคราะห์แรงเครียดแบบไดนามิกส์ในโครงสร้าง, การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า ซึ่งในโครงงานนี้ได้เลือกใช้แบบ Simultaneous Sampling Architecture

2.7 สัญญาณทางไฟฟ้า (Signal)

สัญญาณทางไฟฟ้าคือลักษณะของสัญญาณที่จะเข้าสู่เครื่องมือวัด [6] เพราะลักษณะของสัญญาณที่จะเข้าสู่เครื่องมือวัดเป็นสิ่งที่จะกำหนดระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งหมด และถ้าหากระบบเก็บข้อมูลที่เรามีอยู่ไม่สามารถที่จะเก็บสัญญาณที่ออกมาจากตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) ได้เราอาจจำเป็นต้องเปลี่ยนเครื่องมือเก็บสัญญาณหรือตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) อย่างใดอย่างหนึ่ง สิ่งที่ทำให้เกิดข้อจำกัดของอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะมาจาก เวลาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล

เวลา มักจะเป็นตัวแปรที่วิกฤติที่สุดในการวัดแทบทุกรูปแบบ ไม่ว่าเราต้องการที่จะวัดปริมาณใดก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของปริมาณนั้นไปกับเวลามักจะทำให้ การวัดเปลี่ยนแปลงวิธีการไปด้วย ในการวัดปริมาณใดก็ตามอาจจะไม่เพียงพอถ้าเรารู้เฉพาะว่าเราจะวัดอะไรเท่านั้น แต่เราจะต้องรู้ว่ามันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นแม้แต่สัญญาณที่เรียกว่าสัญญาณกระแสตรง (Direct Current) ในความหมายด้านการวัดไม่ได้หมายถึงไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียว แต่หมายถึงปริมาณสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงช้ามากก็ยังต้องเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

เวลาจะมีความสำคัญในการออกแบบอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล DAQ (Data Acquisition) อยู่สองประการคือ เราต้องการทราบว่า อัตราการสุ่มสัญญาณข้อมูล ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าคอมพิวเตอร์ต้องทำการวัดบ่อยครั้งเพียงใดในช่วงเวลาหนึ่ง และประการที่สองเราจำเป็นต้องทราบว่าเมื่อวัดปริมาณนั้น ได้แล้ว เรามีเวลาเหลืออีกเท่าใดเพื่อที่จะนำข้อมูลที่วัดได้ไปประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การแบ่งประเภทสัญญาณ

เราสามารถแยกประเภทสัญญาณได้ตามลักษณะของมันได้เป็น 2 แบบ [6] คือ

1) สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

2) สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal)

สำหรับปริมาณที่เกิดขึ้นตามปรากฏการณ์ธรรมชาติจะเป็นสัญญาณประเภทแอนะล็อกแทบทั้งสิ้น ส่วนสัญญาณดิจิทัลนั้นโดยมากแล้วจะเป็นสัญญาณที่มนุษย์สร้างขึ้น และมักใช้ประโยชน์ในงานควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์

โดยปกติเมื่อสัญญาณผ่านออกจากตัวแปลงสัญญาณ (Transducer) มาแล้ว สัญญาณจะมีลักษณะเป็นสัญญาณไฟฟ้าแต่ยังคงเป็นสัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) อยู่ การจะนำปริมาณนั้นเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล เราจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า A/C (Analog to Digital Converter) เมื่อสัญญาณเข้าสู่ ADC จะได้รับการเปลี่ยนลักษณะให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจากนั้นเราจึงสามารถให้คอมพิวเตอร์ดึงข้อมูลของสัญญาณนั้นออกมาได้ ข้อมูลที่สำคัญที่บบจุอยู่ในสัญญาณนั้นก็เช่น รูปร่าง, ปริมาณ, ความถี่ เป็นต้น

ถ้าจะแบ่งประเภทของสัญญาณกัน แล้วสัญญาณทุกแบบเป็นสัญญาณเชิงอุปมานแทบทั้งสิ้นและมักเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อย่างไรก็ตามในการพิจารณาเรื่องการวัดสัญญาณเราจะแบ่งสัญญาณออกย่อยเป็นทั้งหมด 5 ประเภทคือ

สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. ON-OFF Signal หรือ TTL (Transistor to Transistor Logic)
2. Pulse Train Signal

รูปที่ 2.12 สัญญาณดิจิทัลแบบ TTL (Transistor to Transistor Logic) และ Pulse Train Signal

สำหรับเปิด-ปิดสัญญาณ มักจะเป็นสัญญาณที่มีข้อมูลที่เป็นสภาวะ (State) ว่าขณะนี้มีสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่มีสัญญาณ

สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) สามารถแบ่งแยกย่อยออกเป็น 3 ชนิดคือ

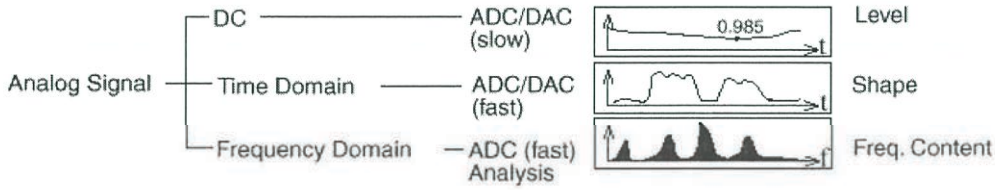
1) สัญญาณกระแสตรง (DC Signal) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) สัญญาณกระแสสลับ (AC Signal) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเทียบกับเวลา (Time Domain)

3) โดเมนของสัญญาณความถี่ (Frequency Domain Signal) สัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่เป็นการพิจารณาว่าสัญญาณนั้น มีความถี่ใดบ้างที่บรรจุอยู่

สัญญาณแอนะล็อกทั้ง 3 ชนิดแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.13 สัญญาณแอนะล็อกทั้ง 3 ชนิด

2.7.2 สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal)

สัญญาณเชิงอุปมานนี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ เทียบต่อเวลา คุณลักษณะที่สำคัญของสัญญาณกระแสตรงก็คือปริมาณหรือขนาดของสัญญาณที่ได้ขณะนั้น เนื่องจากสัญญาณกระแสตรงเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ ความแม่นยำในการวัดจึงสำคัญมากกว่าอัตราการเก็บข้อมูล ลักษณะของสัญญาณกระแสตรงนี้มักได้จากอุปกรณ์การวัดทางกลขั้นพื้นฐาน เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลในท่อปกติ เป็นต้น

2.7.3 สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal)

ลักษณะของสัญญาณแอนะล็อก (AC Signal) ที่สำคัญก็คือจะส่งผ่านทั้งขนาดของสัญญาณและการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเทียบต่อเวลา ในการวัดปริมาณและแสดงผลของสัญญาณในลักษณะนี้เรามักเรียกสัญญาณนี้ว่าอยู่ในรูปของ waveform

ในการวัดสัญญาณแอนะล็อก (AC Signal) เราจำเป็นจะต้องวัดข้อมูลต่อเนื่องกันเพื่อจะหาขนาดของสัญญาณในแต่ละเวลา การวัดจะต้องกระทำบ่อยครั้งเพื่อให้เพียงพอต่อการนำข้อมูลนี้ไปแปรความหมายได้อย่างถูกต้องแต่ต้องไม่มากจนเกินไป เพราะเราคงไม่มีทรัพยากรในคอมพิวเตอร์เพียงพอที่จะบรรจุข้อมูลเหล่านี้ตลอดเวลา ลักษณะของ DAQ ที่เหมาะสมกับงานประเภทนี้

2.8 โดเมนของสัญญาณความถี่ (Frequency Domain Signals)

แอนะล็อกทุกรูปแบบข้อมูลที่สำคัญที่อยู่ในข้อมูลนั้นคืออะไร สำหรับสัญญาณประเภทนี้นั้นมีความแตกต่างจากสัญญาณแอนะล็อกตรงที่ต้องการทราบว่าในสัญญาณที่วัดโดยรวมนั้นมีสัญญาณที่มีความถี่เท่าใดบ้างบรรจุอยู่ด้วยและแต่ละความถี่มีปริมาณเท่าใด แต่ในสัญญาณแอนะล็อกปกติทั่วไปเราจะให้ความสำคัญกับรูปทรงของสัญญาณมากกว่าความถี่ที่บรรจุอยู่

-High Bandwidths สุ่มตัวอย่างด้วยอัตราสูง

-Accurate Sample Clock สามารถสุ่มตัวอย่างเป็นช่วงด้วยความแม่นยำ

-Triggering เริ่มสุ่มตัวอย่างด้วยเวลาที่แม่นยำ

-Analysis Function เปลี่ยนข้อมูลใน Time Domain ให้อยู่ใน Frequency Domain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แหล่งสัญญาณทางไฟฟ้า

สัญญาณทางไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบซึ่งแหล่งกำเนิดอาจมาจากตัวส่งสัญญาณหรือเซ็นเซอร์ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะเป็นตัวแสดงถึงปริมาณทางกายภาพที่เราจะวัดคือความเร่งและความเร็วแล้วสัญญาณแอนะล็อกจะต้องถูกแปลงไปเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ก่อนที่จะถูกอ่านค่าด้วยอุปกรณ์ DAQ, โดยเราจะเรียกแหล่งกำเนิดสัญญาณ [6] ประเภทแรงดันไฟฟ้าว่าเป็นความต่างศักย์ระหว่างสายสองเส้น จึงเป็นตัวแทนของแหล่งสัญญาณที่พร้อมที่จะถูกวัดด้วยอุปกรณ์ DAQ ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ แหล่งสัญญาณแบบต่อกราวด์ (Grounded Source) และแบบไม่ต่อกราวด์หรือแบบลอย (Floating Source)

2.10 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning)

การปรับสภาพสัญญาณ คืออุปกรณ์เสริมที่ทำหน้าที่ปรับสัญญาณให้เหมาะสมก่อนการวัดด้วยอุปกรณ์ DAQ [6] เพื่อให้ได้ผลการวัดที่เที่ยงตรงและปลอดภัยมากขึ้นทั้งนี้เราอาจสร้างวงจรแปลงสัญญาณขึ้นมาเองหรือใช้อุปกรณ์สำเร็จรูปที่มีคุณภาพสูงเพื่อความแม่นยำมากขึ้นก็ได้ซึ่งอุปกรณ์การปรับสภาพสัญญาณ มีหลากหลายรูปแบบให้เลือกทั้งแบบติดตั้งแยกจาก DAQ, และแบบที่รวมเป็นชิ้นเดียวกันกับ DAQ และแต่ละแบบก็ยังแยกตามชนิดของสัญญาณตัวอย่างของการปรับสภาพสัญญาณ

1. การขยายสัญญาณ (Amplification) คือการขยายสัญญาณที่เล็กเกินไปให้มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้อุปกรณ์ DAQ สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ละเอียดมากขึ้นเช่นสัญญาณจากเทอร์โมคัพเปอร์ซึ่งจะอยู่ในระดับมิลลิโวลต์

2. การกระตุ้น (Excitation) คือการจ่ายไฟกระตุ้นเนื่องจากเซ็นเซอร์บางชนิดเช่นโหลดเซลล์จำเป็นต้องมีการจ่ายแรงดันไปเลี้ยงการปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) จะทำการจ่ายไฟเลี้ยงให้ในรูปแบบและขนาดที่เหมาะสม

3. วงจรบริดจ์ (Configuration) คือการต่อตัวต้านทานเพิ่มให้ครบสี่ตัวเป็นวงจรแบบบริดจ์ซึ่งใช้กับการวัดอย่างเช่นสเตรนเกจ (Strain Gauge)

4. การกรองสัญญาณ (Filtering) คือการกรองสัญญาณในย่านความถี่ที่ไม่ต้องการออกเช่นถ้าสัญญาณที่เราต้องการมีความถี่ต่ำแต่ในระบบมีสัญญาณรบกวนความถี่สูงปะปนเข้ามาด้วยเราสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter) เพื่อตัดสัญญาณรบกวนย่านความถี่สูงออกหรือในกระบวนการสุ่มสัญญาณเราสามารถใช้ ตัวเกลี่ยความขรุขระของสัญญาณ (Anti-Aliasing Filter) เพื่อตัดสัญญาณที่เราไม่ต้องการอ่านออกไปจากระบบเพื่อให้สัญญาณมีคุณภาพดีขึ้น

5. การแยก (Isolation) คือการแยกตัวนำไฟฟ้าของระบบวัดสัญญาณสองส่วนออกจากกันเพื่อความปลอดภัยในกรณีที่อาจมีทรานเซียนขนาดใหญ่วิ่งเข้ามาในระบบและยังสามารถแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปที่กล่าวไว้ในตอนต้นได้อีกด้วย

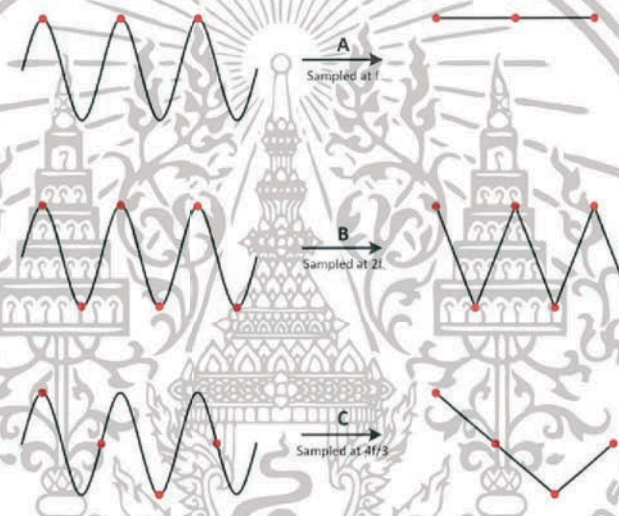
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล

ในอุปกรณ์ DAQ ทั่วไปจะมีช่องสำหรับวัดสัญญาณแอนะล็อกเรียกว่าช่อง Analog Input ซึ่งจะวัดสัญญาณในช่วง + 10 โวลต์ ได้ (แล้วแต่รุ่น) การนำสัญญาณแอนะล็อกนี้เข้ามาอยู่ในพีซีซึ่งเป็นฟอร์มแมตแบบดิจิทัลจะต้องผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่เป็นกระบวนการในการนำค่าทางดิจิทัล (ซึ่งมีจำนวนจำกัด) มาเลียนแบบค่าแอนะล็อก (ซึ่งมีจำนวนไม่จำกัด) โดยกระบวนการนี้มีขั้นตอนบางอย่างที่เราควรทราบเพื่อใช้นำไปปรับแต่งค่าอุปกรณ์ในการดึงสัญญาณดังนี้

2.12 การสุ่มสัญญาณ (Sampling)

เนื่องจากคอมพิวเตอร์จะเก็บและประมวลผลข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลเท่านั้นกระบวนการนี้จึงเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแอนะล็อกที่เป็นเส้นกราฟต่อเนื่องให้กลายเป็นจุดของข้อมูลดิจิทัลที่ไม่ต่อเนื่องด้วยวิธีการสุ่มสัญญาณหรือที่เรียกว่าการสุ่มสัญญาณด้วยอัตราเร็วที่คงที่ สัญญาณแอนะล็อกต้นฉบับและสัญญาณที่ถูกลุ่ม



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างวิธีการสุ่มสัญญาณแต่ละความถี่

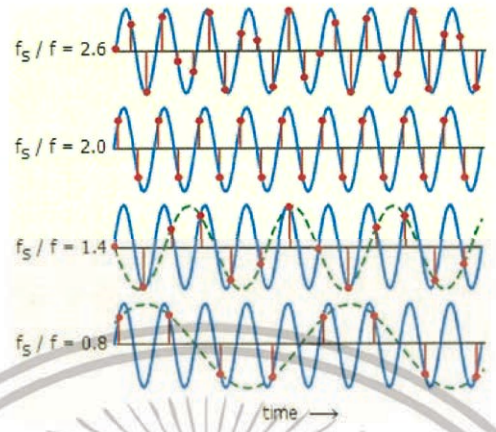
ที่มา https://psychology.stackexchange.com/questions/18237/what-happens-at-sampling-rates-lower-or-higher-that-the-nyquist-rate

จะสังเกตได้ว่าถ้าหากเรายิ่งสุ่มสัญญาณเร็วจุดที่ได้จากการสุ่มก็จะหนาแน่นมากขึ้นก็จะยิ่งเก็บความละเอียดของเส้นกราฟได้ใกล้เคียงต้นฉบับมากขึ้นความเร็วในการสุ่มสัญญาณนี้เรียกกว่า อัตราการสุ่มสัญญาณซึ่งมีหน่วยเป็นจุดตัวอย่างต่อวินาที (Sample/s) หรือเฮิรตซ์ (Hz) ก็ได้แต่ความเร็วนี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ Sample Cock ของอุปกรณ์ว่าจะสามารถสุ่มได้เร็วสูงสุดเท่าไหร่แต่การสุ่มข้อมูลด้วยความเร็วมากเกินไปก็ไม่ใช่สิ่งที่จำเป็นเพราะจะทำให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำและพื้นที่เก็บข้อมูลเราสามารถกำหนดอัตราการสุ่มสัญญาณในการแปลงสัญญาณที่เหมาะสมได้เองโดยยึดตามหลักการแปลงสัญญาณที่เรียกว่าทฤษฎี Nyquist [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1 ทฤษฎี Nyquist

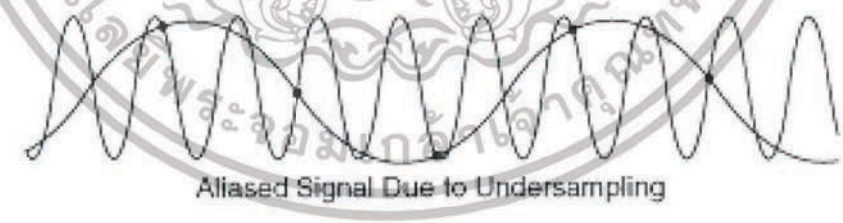
กล่าวไว้ว่าสัญญาณจะต้องถูกสุ่มด้วยความเร็วอย่างน้อยสองเท่าของความถี่สูงสุดที่มีอยู่ในสัญญาณ เพื่อให้สามารถนำจุดข้อมูลเหล่านั้นมาสร้างเป็นลักษณะคลื่นกลับมาให้เหมือนกับสัญญาณต้นฉบับได้



รูปที่ 2.15 ทฤษฎี Nyquist

ถ้าเราใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ที่สองเท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณพอดีเราอาจได้ข้อมูลทางความถี่ของสัญญาณที่ถูกต้องแต่จะไม่สามารถเก็บรายละเอียดของรูปทรงของกราฟได้ทั้งหมดเพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติเราควรใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ที่ประมาณ 5 เท่าถึง 10 เท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณเพื่อให้ได้รูปทรงของกราฟที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นซึ่งในเครื่องวัดความไม่สมดุลในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) 102,400 ตัวอย่าง/วินาที

กรณีที่เราตั้งอัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ช้ากว่าที่ในทฤษฎี Nyquist กำหนดไว้เช่น ถ้าเราตั้งเป็น 11 เฮิรตซ์ จะมีความถี่ผิดไปจากต้นฉบับคือจะต่ำกว่าเดิมเหตุการณ์แบบนี้เรียกว่าข้อผิดพลาดแฝง



รูปที่ 2.16 อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling rate) ที่น้อยเกินไป

ที่มา https://blogs.umass.edu/Techbytes/2018/04/20/a-mathematical-analysis-of-sample-rates-and-audio-quality/

เราจึงควรทราบลักษณะของสัญญาณที่เราจะดึงก่อนที่จะตั้งค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดเข้ามาปะปนกับสัญญาณที่เราต้องการในกรณีที่ไม่สามารถเลี่ยงได้ เช่นระบบที่มีสัญญาณรบกวนความถี่สูงเราสามารถเลือกใช้การปรับสภาพสัญญาณรุ่นที่มีตัวกรองเพื่อกรองเอาเฉพาะความถี่ในช่วงที่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของอัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสัญญาณที่เราไม่สนใจความถี่หรือไม่มีความถี่เช่นสัญญาณอุณหภูมิ, ระดับของเหลว, น้ำหนัก, และสัญญาณต่าง ๆ ที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วให้เราใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ตามความเหมาะสมเช่นเราอาจสนใจข้อมูลทุกวินาทีหรือทุกสิบวินาทีหรืออาจจะทุกหนึ่งนาทีก็แล้วแต่ความต้องการ

2.13 โปรแกรมรับข้อมูลและแสดงผลการสั่นสะเทือน

โปรแกรมรับข้อมูลและแสดงผลการสั่นสะเทือนใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งเป็นโปรแกรมชุดพัฒนาแอพพลิเคชั่น (Development Environment) จากเนชั่นแนลอินสทรูเม้นทส์ (National Instruments) เพื่อใช้ในการสร้างระบบการวัด, ทดสอบ, และควบคุมโดยใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาโค้ดรูปภาพ (Graphical Programming) และมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการวาดแผนผังที่เข้าใจได้ง่าย ซึ่งชุดพัฒนาจะมาพร้อมกับชุดฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมนับร้อยแบบสำหรับการวิเคราะห์ประมวลผล, และแสดงข้อมูลรวมถึงความสามารถต่าง ๆ ในการใช้งานร่วมกับฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์อื่น ๆ ได้ดีทำให้ LabVIEW ซึ่งออกสู่ตลาดมาตั้งแต่ปีค.ศ. 1986 ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมและการวิจัยที่ต้องการระบบอัตโนมัติในการวัดและการควบคุมอาทิเช่นในอุตสาหกรรมการผลิต, ยานยนต์, การทหารและอากาศยาน, พลังงาน, การสื่อสาร, เครื่องมือแพทย์ไปจนถึงเครื่องจักรที่ซับซ้อนที่สุดอย่างเครื่องเร่งอนุภาค ปัจจุบันนอกจาก LabVIEW จะถูกใช้งานบนคอมพิวเตอร์ทั่วไปเพื่อการดึงสัญญาณหรือควบคุมเครื่องมือวัดแล้วแนวคิดของเนชั่นแนลอินสทรูเม้นทส์ ขยายขีดความสามารถของแพลตฟอร์ม LabVIEW ให้สามารถทำการออกแบบได้ทั้งระบบตั้งแต่ส่วนของการออกแบบซอฟต์แวร์, การคำนวณไปจนถึงการดึงสัญญาณและการติดตั้งลงไปรันในฮาร์ดแวร์ทั้งแบบวินโดวส์, เรียลไทม์ โดยใช้แพลตฟอร์ม LabVIEW เพียงแพล็ตฟอร์มเดียวจึงทำให้สามารถทำงานต่อยอดได้ทันทีเมื่อเวลาที่เราต้องการย้ายจากการทำงานกับพีซีบนวินโดวส์ไปเป็นฮาร์ดแวร์แบบฝังตัวเป็นต้น

2.13.1 การเขียนโปรแกรมแบบแผนภาพกระแสข้อมูล (Data Flow Programming)

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้รูปภาพ หรือสัญลักษณ์แทนการเขียนด้วยตัวอักษรเหมือนโปรแกรมปกติทั่วไป ซึ่งข้อดีข้อแรกก็คือการลดความผิดพลาดด้านการสะกดผิดหรือพิมพ์ผิดออกไป ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งที่สำคัญของการเขียนโปรแกรมแบบจีกับการเขียนด้วยตัวหนังสือก็คือ การเขียนด้วยภาษาจีนี้เป็นการเขียนโดยใช้หลักการของแผนภาพกระแสข้อมูลซึ่งเมื่อเริ่มส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม เราจะต้องกำหนดทิศทางไหลของข้อมูลว่าจะไปที่ส่วนใด ผ่านการประเมินผลและคำนวณในส่วนใดบ้าง และจะให้แสดงผลอย่างไร ซึ่งลักษณะการเขียนภาษาจีหรือแผนภาพกระแสข้อมูลนี้จะมีลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมือนกับการแผนภาพบล็อก (Block Diagrams) ซึ่งทำให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถให้ความสนใจกับการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้โดยไม่ต้องจดจำรูปแบบคำสั่งที่ยุ่งยาก

เนื่องจาก LabVIEW ใช้ลักษณะการเขียนแบบ แผนภาพบล็อก (Block Diagrams) ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยอยู่แล้ว จึงเป็นการง่ายที่จะทำความเข้าใจและนำไปพัฒนาใช้ต่อไปได้ และถ้าหากเราจำได้ถึงขั้นตอนการเขียนโปรแกรมว่าก่อนที่จะเขียนโปรแกรม เราควรจะต้องเขียนผังงาน (Flow Chart) ให้เสร็จสิ้นก่อน หลังจากตรวจสอบผังงาน (Flow Chart) เรียบร้อยแล้วเราจึงนำไปเขียนโปรแกรม ดังนั้นเราจะมีความสะดวกมากขึ้น ถ้าหากการเขียนผังงาน (Flow Chart) ของ LabVIEW ก็คือการเขียนโปรแกรมนั่นเอง

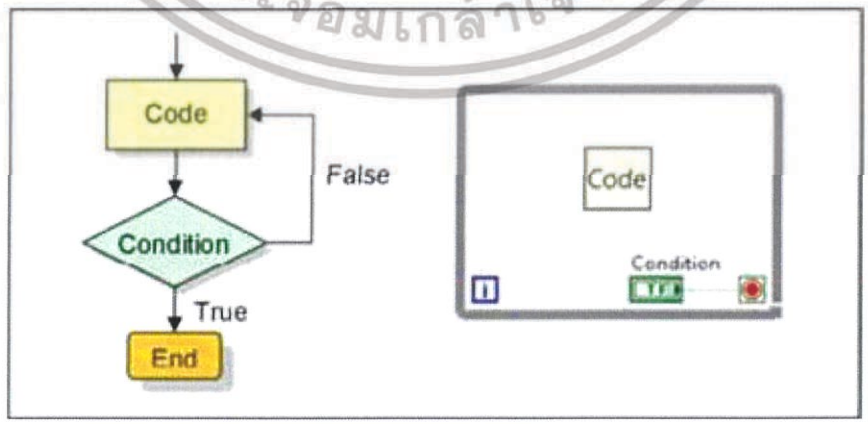
2.13.2 หน้าปัด (Front Panels) และ แผนภาพบล็อก (Block Diagrams)

องค์ประกอบพื้นฐานของ LabVIEW สองส่วนคือส่วนติดต่อกับโปรแกรมหรือหน้าปัด (Front Panels) และส่วนที่ผู้เขียนจะต้องกำหนดการทำงานของโปรแกรม

- หน้าปัด (Front Panels) หรือ หน้าปัทม์คือส่วนที่ผู้ใช้จะใช้ติดต่อกับโปรแกรม ในขณะที่เราให้ VI ทำงานอยู่นั้นหน้าปัทม์นี้จะต้องทำงานร่วมอยู่ด้วย เพื่อให้ผู้ใช้หรือผู้ควบคุมสามารถให้ข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม และเมื่อข้อมูลได้รับการประมวลผลแล้วก็จะแสดงออกมาทางหน้าปัด (Front Panels) นี้ ดังนั้นหากจะเปรียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปอื่นและหน้าปัดนี้ก็คือ Graphic User Interface (GUI) ของ LabVIEW นั่นเอง
- แผนภาพบล็อก (Block Diagrams)สามารถสร้างหน้าปัด (Front Panels) ได้ให้เป็นไปตามต้องการของเรา ไม่ใช่สิ่งที่ยากมากนักสำหรับ LabVIEW แต่สิ่งที่จะยุ่งยากมากกว่าคือการกำหนดให้สิ่งต่างๆ ให้มีขั้นตอนหรือมีกระบวนการของการวิเคราะห์ต่างๆ ตามที่เราต้องการ

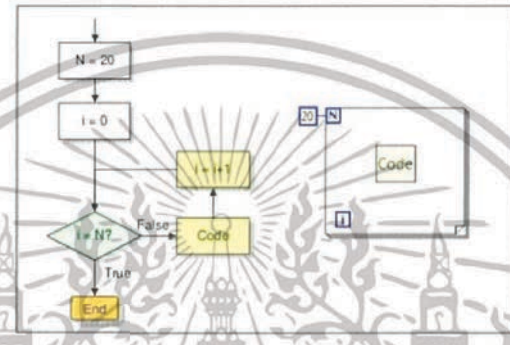
2.13.3 โปรแกรมลูป (Loop)

- การเขียนโค้ด (Code) ให้มีการทำซ้ำหรือวนลูปเป็นสิ่งที่จำเป็นในแทบทุกโปรแกรม เนื่องจากการประมวลผล บางอย่างจำเป็นจะต้องทำในลักษณะซ้ำสำหรับ LabVIEW ลูปคือกรอบสี่เหลี่ยมที่ล้อมรอบโค้ดวนซ้ำ (While Loop)

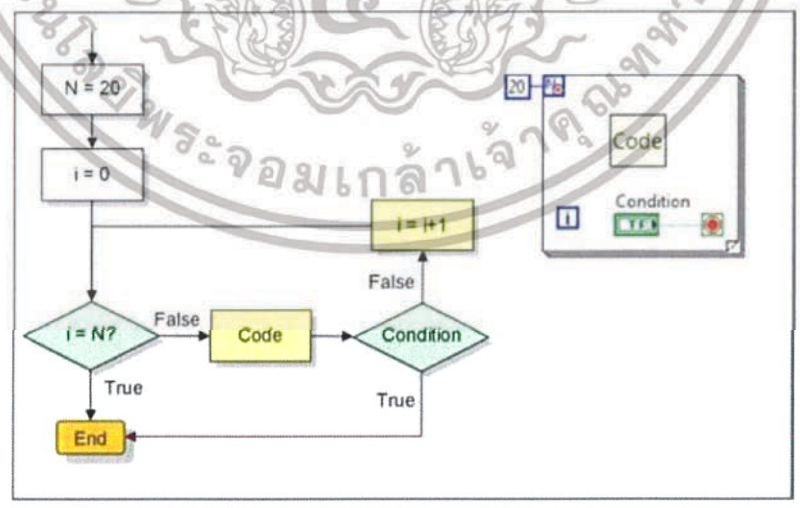


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สิ่งที่น่าลังเกตคือการเช็คเงื่อนไขของลูปจะทำหลังจากรันโค้ดครั้งแรกไปแล้วซึ่งก็หมายความว่าอย่างน้อยที่สุดโค้ดวนซ้ำ (While Loop) จะต้องรันหนึ่งครั้งก่อนที่จะถูกหยุดการสร้าง โค้ดวนซ้ำ (While Loop) ทำได้โดยเลือกจาก Functions Palette : Programming » Structures » While Loop จากนั้นให้นำเม้ามาครอบเป็นกรอบสี่เหลี่ยมตามขนาดที่ต้องการ
- For Loop มีไว้สำหรับการรันลูปที่แน่นอนว่าต้องการรันทั้งหมดกี่ครั้ง โดยเราจำเป็นจะต้องระบุจำนวนครั้ง (N) ของ For Loop ไว้ก่อน มิฉะนั้นจะรันโค้ดไม่ได้ส่วน Iteration จะเหมือนกับ While Loop คือให้ผลเป็นตัวเลขแสดงจำนวนลูปที่รันไปแล้วโดยเริ่มนับจากศูนย์ซึ่งกลไกใน For Loop เป็นไปดังโฟล์วชาร์ตตามนี้



จะเห็นได้ว่าโค้ดใน For Loop มีโอกาสที่จะไม่ถูกรันเลยถ้า N มีค่าเป็นศูนย์ และ For Loop จะมีเงื่อนไขเดียวเท่านั้นที่จะจบได้ คือเมื่อรันครบ N ครั้งแล้วเท่านั้น For Loop ยังสามารถ เพิ่มเงื่อนไขการจบให้เหมือนกับ While Loop ได้อีกด้วยโดยการคลิกขวาที่ขอบ ของFor Loop แล้วเลือก Conditional Terminalและเราสามารถจะให้ For Loop ที่มีเงื่อนไขการจบได้ ซึ่งเราเรียกลูปแบบนี้ว่า Conditional For Loop ซึ่งงมีประโยชน์สามารถใช้ทดแทน While Loop ได้ในหลายกรณี และช่วยในเรื่องการใช้หน่วยความจำ สรุป การทำงานของ Conditional For Loop เป็นโฟลว์ชาร์ตได้ดังนี้

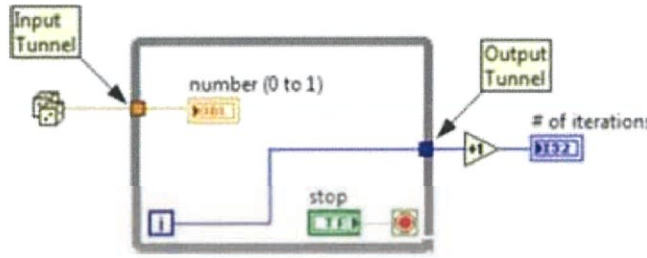


-

การส่งค่าเข้า-ออกจากลูปก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ต้องทำความเข้าใจ ลูปเป็น Structure ซึ่งสามารถมองให้ เป็น Node ใหญ่อันหนึ่งที่สามารถมีได้ทั้ง Input และ Output, การที่โยงสายเข้าไปในลูปหรือออกจากลูป จะเห็นเกิดเป็นจุดสี่เหลี่ยมตันขึ้นที่ขอบของลูป จุดแบบนี้เรียกว่า Tunnel ซึ่งแสดงให้เห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่านี้คือ ให้ข้อมูลเข้า หรือ ส่งข้อมูลออก ของลูป และตามหลักการ Dataflow, ลูป (Node) จะไม่สามารถเริ่มได้จนกว่าจะได้รับข้อมูลเข้าครบและลูปจะส่งข้อมูลอกมาจาก Output Tunnel ได้ก็ต่อเมื่อลูปจบการทำงานแล้วเท่านั้น ซึ่งหลักการนี้สำคัญมากในการออกแบบโปรแกรมที่ต้องมีลำดับก่อนหลังในการรัน



2.13.4 โครงสร้างแบบเคส (Case structures)

เป็นโครงสร้างการทำงานที่สั่งให้ LabVIEW ทำงานตามแต่ละกรณีที่เรากำหนดซึ่งเราอาจจะกำหนดด้วย Boolean คือจริงหรือเท็จ ซึ่งก็จะเหมือนกับการใช้คำสั่ง “if-then-else” ของภาษาคอมพิวเตอร์ทั่วๆ ไป หรืออาจกำหนดเป็นตัวเลข 0, 1, 2, 3, ... โดยถ้าค่า Input เท่ากับ 2 จะทำให้ LabVIEW ก็จะทำตามข้อกำหนดที่ 2 ถ้า Input เท่ากับ 5 LabVIEW ก็จะทำตามข้อกำหนดที่ 5 เป็นต้น

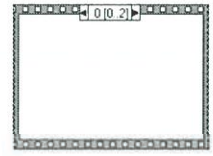
ถ้าตัวแปรที่เราต่อเข้า terminal เป็น Boolean ลักษณะของ case จะเป็น 2 กรณี คือ FALSE และ TRUE แต่ถ้านำตัวเลขต่อเข้าไปสู่ Selector Terminal โครงสร้างนั้นจะมีกรณีพิจารณาได้จาก 0 ถึง 215-1 กรณี ซึ่งด้านบนของ structure จะมีแถบบอก กรณีว่าเป็นกรณีใด ในการสร้างโครงสร้างแบบเคส (Case structures) ครั้งแรก เราจะได้กรณีที่เป็น Boolean คือ FALSE และ TRUE เท่านั้น แต่ case จะเปลี่ยนเป็นตัวเลขทันทีที่เราต่อสายตัวเลขจาก Numeric Control เข้าสู่ Selector Terminal ในตอนแรกที่เราสร้างโครงสร้างแบบเคส (Case structures) ที่เป็นตัวเลขขึ้นมาใหม่นั้นเราจะมีกรณีให้เลือกเพียง 2 กรณีคือ กรณี 0 และกรณี 1 เราสามารถเพิ่มหรือลดจำนวนกรณีได้โดยการใช้ Pop-up menu ของโครงสร้างแล้วเลือก Add Case Before หรือ Add Case After

โครงสร้างแบบเคส (Case structures) สามารถมีได้หลาย Sub-diagram แต่เราจะสามารถมองเห็นได้เพียงครั้งละกรณีเท่านั้น เหมือนกับการวางไพ่ทั้งสำรับทับกันไว้ การที่จะเปลี่ยนคู่กรณีอื่นให้เรากดเมาส์ที่ตำแหน่งลูกศรซ้ายมือหรือขวามือของแถบด้านนั้นของโครงสร้างแบบเคส (Case structures) หรืออาจใช้คำสั่ง Show Case จาก Pop-up menu

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.5 โครงสร้างตามลำดับ (Sequence Structure)

การทำงานของ โครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) จะเป็นในลักษณะกำหนดให้โปรแกรมทำงานที่ละขั้นจากขั้น 0, ขั้นที่ 1 ต่อไปจนกระทั่งขั้นสุดท้าย เมื่อโปรแกรมทำงานขั้นตอนสุดท้ายเสร็จแล้ว ข้อมูลจึงจะออกไปจากโครงสร้าง ขั้นตอนแต่ละขั้นตอน LabVIEW จะเรียกว่าเฟรม (Frame) ลักษณะของโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) แสดงในรูปต่อไป



การสร้างโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) จะสร้างจาก Structures Subpalette ของ Function Palette และเหมือนกับโครงสร้างแบบเคส (Case Structures) คือเฟรมจะปรากฏให้เห็นครั้งละ 1 เฟรมเท่านั้น เราต้องกดเมาส์ที่ลูกศรบนกรอบบนของโครงสร้างเพื่อสลับดูสิ่งที่แสดงในเฟรมอื่น หรืออาจจะใช้ Pop-up menu ที่ขอบเขตโครงสร้างแล้วใช้คำสั่ง Show Frame นอกจากนี้การเพิ่มหรือลดเฟรมจะใช้คำสั่ง Add Frame After, Add Frame Before จาก Pop-up menu ในการส่งข้อมูลของโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) ออกสู่ภายนอก เราจะส่งออกที่เฟรมใดก็ได้ และอุโมงค์ที่ส่งข้อมูลออกจะใช้เฉพาะเฟรมนั้นๆ เท่านั้น ไม่ใช่ร่วมกับเฟรมอื่น ซึ่งทำให้แตกต่างจากในกรณีของการใช้โครงสร้างแบบเคส (Case Structures) อย่างไรก็ตามข้อมูลจะส่งออกจากโครงสร้างก็ต่อเมื่อโปรแกรมทำการประเมินทุกเฟรมจนครบแล้ว เราจะใช้โครงสร้างแบบลำดับเพื่อควบคุมลำดับขั้นการทำงานของ Node ซึ่งข้อมูลของแต่ละเฟรมไม่เกี่ยวข้องกัน ทำให้ในแต่ละเฟรมจะมีลักษณะคล้ายกับ Block Diagram ที่แยกออกมาต่างหาก อย่างไรก็ตามเราสามารถส่งผ่านข้อมูลข้ามระหว่างเฟรมได้โดยใช้ Terminal ที่เรียกว่า Sequence Local ซึ่งจะเป็นการฝากและดึงข้อมูลในระหว่างเฟรม ในการจะเพิ่ม Sequence Local นี้เราจะได้จากการใช้คำสั่ง Add Sequence Local ภายใต้ Pop-up Menu ของโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) เมื่อเราเลือกใช้ Sequence Local ครั้งแรก Terminal จะปรากฏเป็นสี่เหลี่ยมสีเหลืองดังที่แสดงในรูปต่อไปนี้ เราสามารถสังเกตเห็นลักษณะของ Sequence Local Terminal เมื่อเราต่อสาย terminal เข้ากับแหล่งข้อมูลก็จะปรากฏลูกศรขึ้น ถ้าเราต่อสายจาก Control เข้าสู่ Terminal นี้ก็เสมือนกับว่าเราต้องการให้ Terminal นั้นเป็นที่เก็บข้อมูลเข้าสู่โครงสร้างเพื่อเอาไว้ใช้ในเฟรมอื่น ลูกศรจะกลายเป็นลูกศรที่พุ่งเข้าหากรอบ นอกเหนือจากนั้นเราจะเห็นว่าทุกเฟรมต่อจากนั้นจะเกิดเป็นลูกศรชี้เข้าแสดงให้เห็นว่ามีข้อมูลที่จะให้ใช้ในเฟรมเหล่านั้นได้ ยกเว้นในเฟรมก่อนหน้าเฟรมที่มีการส่งข้อมูลเข้าโครงสร้างเพราะขณะนั้นในเฟรมเหล่านั้นจะยังไม่มีข้อมูลส่งเข้าสู่โครงสร้าง จึงยังไม่สามารถดึงข้อมูลไปใช้ได้ และลักษณะจะปรากฏเป็นสี่เหลี่ยมที่ปรากฏไม่ชัดเจน อย่าลืมว่าการทำงานของโครงสร้างแบบลำดับ (Sequence Structure) จะทำงานจากเฟรม 0 ก่อนจากนั้นจะทำต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งจบเฟรมสุดท้ายจึงจะออกจาก Structure นั้น

2.13.6 ตัวแปรโลคอล (Local Variable) และ ตัวแปรโกลบอล (Global Variable)

Local Variable และ Global Variable สำหรับใน LabVIEW ก็จะมีตัวแปรทั้ง 2 ประเภทนี้อยู่ด้วย ที่ผ่านมาอาจจะรู้สึกเข้าใจยากกับการเขียนโปรแกรมในลักษณะที่เป็น Data Flow อยู่บ้าง เช่นหาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการแสดงผลให้กับ Indicator ตัวหนึ่งเราก็จะต้องต่อสายเข้ากับ Indicator นั้น แต่เนื่องจาก Terminal ของ Indicator แต่ละตัวจะมี Input เข้าสู่ Terminal นั้นได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ดังนั้นถ้าหากเราต้องการให้ Indicator นั้นแสดงค่าที่ได้จากการประมาณผลหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพที่กำหนดโดยปกติแล้วเราไม่สามารถทำได้ หรือตัวอย่างเช่นเรากำหนดค่าที่ Control ค่าหนึ่งแล้วส่งเข้าสู่การทำงานของโปรแกรมเมื่อ VI ทำงานไปเราต้องการปรับค่าของ Control นั้นโดยอัตโนมัติตามสภาวะของ VI นั้น จากขีดจำกัดที่เราศึกษามาก่อนหน้านี้ก็จะบอกว่าเราไม่สามารถทำงานได้ เพราะโดยปกติเราไม่สามารถต่อสายเข้าไปสู่ Control เพื่อกำหนดค่าได้ ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้หากเราใช้ Local หรือ Global Variable

-Local Variable ช่วยให้เราสามารถกำหนดค่าของ Object บน Front Panel จากจุดต่างๆ บน Block Diagram ของ VI แทนในกรณีที่เราไม่สามารถหรือไม่ต้องการจะต่อสายเข้ากับ Terminal ของ Object นั้น

-Global Variable ในหลายๆ กรณี Global Variable จะทำงานคล้ายกับ Local Variable เพียงแต่ Global Variable ไม่ได้จำกัดการทำงานอยู่เพียงภายใน VI หนึ่งๆ เท่านั้นเราสามารถส่งค่าของ Global Variable ไประหว่างที่ VI หลายชุดกำลังทำงานอยู่พร้อมๆ กันได้

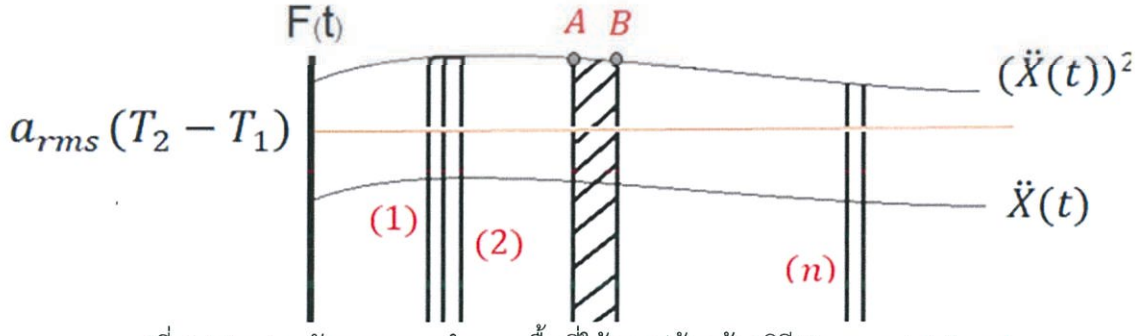
อย่างไรก็ตามเนื่องจากการทำความเข้าใจ Global Variable อย่างแท้จริงเป็นเรื่องยากและการนำไปใช้ในความเป็นจริงมีโอกาศผิดพลาดได้ง่ายหากไม่ได้รับการวางแผนการเขียน VI ทั้งระบบมาอย่างดี

2.14 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square Value)

การคำนวณหาค่าเฉลี่ย [7] ของขนาดความเร่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นของสัญญาณที่มีลักษณะเป็น แบบฮาโมนิกจำเป็นต้องใช้การหาค่าเฉลี่ยจากค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยดังนี้

$$a_{rms} = \frac{1}{T_2 - T_1}\sqrt{\int_{T_1}^{T_2} (\ddot{x}(t))^2 \, dt} \tag{2.9}$$

โดยการคำนวณค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยนั้น คำนวณจากวิธี Trapezoidal's Rule โดยการแบ่งช่วงย่อยเพื่ออินทีเกรทจะช่วยให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟด้วยด้วยวิธี Trapezoidal's rule

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในการอินทีเกรทนั้นจะแบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูย่อยออกเป็น n พื้นที่ แล้วนำมาบวกกัน โดยที่จุด A กำหนด $\ddot{X}_A^2 = \ddot{X}_t^2 = \ddot{X}_i^2$ ที่จุด B กำหนด $\ddot{X}_B^2 = \ddot{X}_{t+\Delta t}^2 = \ddot{X}_{i+1}^2$ และจากเวลา T_1 และ T_2 สามารถหาเวลาในแต่ละช่วงเวลา (Δt) ได้ดังนี้ $\Delta t = \frac{T_1 - T_2}{n}$ ดังนั้น พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.50)

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ยทั้งหมด} = \sqrt{\text{ผลรวมของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูจำนวน } n \text{ พื้นที่}} \tag{2.10}$$

$$\text{พื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ยทั้งหมด} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(\ddot{X}_{i+1}^2 + \ddot{X}_i^2)}{2} \times \Delta t} \tag{2.11}$$

ดังนั้น ค่าความเร่งรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย มีสมการดังต่อไปนี้

$$a_{rms} = \frac{1}{T_2 - T_1} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(\ddot{X}_{i+1}^2 + \ddot{X}_i^2)}{2} \times \Delta t} \tag{2.12}$$

2.15 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [7] ของตัวแปรสุ่ม X มีการนิยามไว้ดังนี้

$$\sigma = \sqrt{E((X - E(X))^2} = \sqrt{E(X^2) - E(X))^2} = \sqrt{Var(X)} \tag{2.13}$$

เมื่อ $E(X)$ หมายถึงค่าคาดหมายของ X (เป็นอีกความหมายหนึ่งของมัชฌิม) และ $Var(X)$ หมายถึงความแปรปรวนของ X แต่ก็ไม่ใช่ว่าตัวแปรสุ่มทุกตัวจะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ถ้าหากค่าคาดหมายไม่มีอยู่จริงหรือไม่นิยาม ตัวอย่างเช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่มภายใต้การแจกแจงโคชี(Cauchy distribution) จะไม่นิยาม เพราะว่า $E(X)$ ก็ไม่นิยามเช่นกัน

ถ้าตัวแปรสุ่ม X มีพื้นฐานอยู่บนเซตข้อมูลซึ่งสมาชิกเป็นจำนวนจริงและมีความน่าจะเป็นเท่ากัน ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากสูตรข้างล่างนี้ อันดับแรกต้องคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ X เสียก่อน ค่าเฉลี่ยเขียนแทนด้วยซึ่งนิยามด้วยผลรวม (Summation) ดังนี้

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_N}{N} \tag{2.14}$$

เมื่อ N คือจำนวนสมาชิกของเซตข้อมูล จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้จาก

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มต้นตั้งแต่การวิเคราะห์และคำนวณเพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานเพื่อง่ายต่อการซ่อมบำรุงในภายหลัง โดยจะแบ่งออกแบ่งออกเป็น3ส่วน ส่วนอุปกรณ์ติดยึด ส่วนอุปกรณ์ขับเคลื่อนพัดลม ส่วนเซ็นเซอร์และอุปกรณ์รับค่าโดยมีโมดูลทำการรับอินพุตที่เป็นสัญญาณอนาล็อค จากนั้นจะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิทัล และนำค่าที่ได้มาแสดงผ่านการเขียนโปรแกรม LabVIEW แสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ จากนั้นส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลต่อไป

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มต้นตั้งแต่การศึกษาปัญหา เมื่อพัดลมไม่มีความสมดุลจะทำให้เกิดการสั่นได้อย่างไร และศึกษาส่วนประกอบในการออกแบบ จากนั้นจำลองการออกแบบผ่านโปรแกรม SolidWorks รวมทั้งหาค่าตัวแปรจากโปรแกรม เมื่อสร้างชิ้นงานเรียบร้อย จึงออกแบบการทำงานของการรับส่งสัญญาณผ่าน โมดูล NI LabVIEW

1) ศึกษาการสั่นสะเทือนที่เกิดจากความไม่สมดุลของพัดลมบนสองระนาบ

2) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือน

3) ศึกษาการสร้างแบบเครื่องวัดความไม่สมดุลโดยศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4) สร้างแบบจำลองเครื่องวัดความไม่สมดุลในโปรแกรม SolidWorks

5) ออกแบบและสร้างเครื่องวัดความไม่สมดุลโดยอุปกรณ์ที่สร้างจะใช้อุปกรณ์ที่ได้รับมาตรฐานยอมรับทางอุตสาหกรรม

6) ออกแบบการเก็บข้อมูลและการควบคุม โดยจะเลือกใช้ NI LabVIEW ในการเก็บข้อมูล

7) ทำการทดลองเครื่องวัดความไม่สมดุล

3.3 อุปกรณ์การทดลอง

3.3.1 เครื่องวัดความสมดุลของพัดลมที่นั่งรถยนต์ส่วนอุปกรณ์ติดยึด

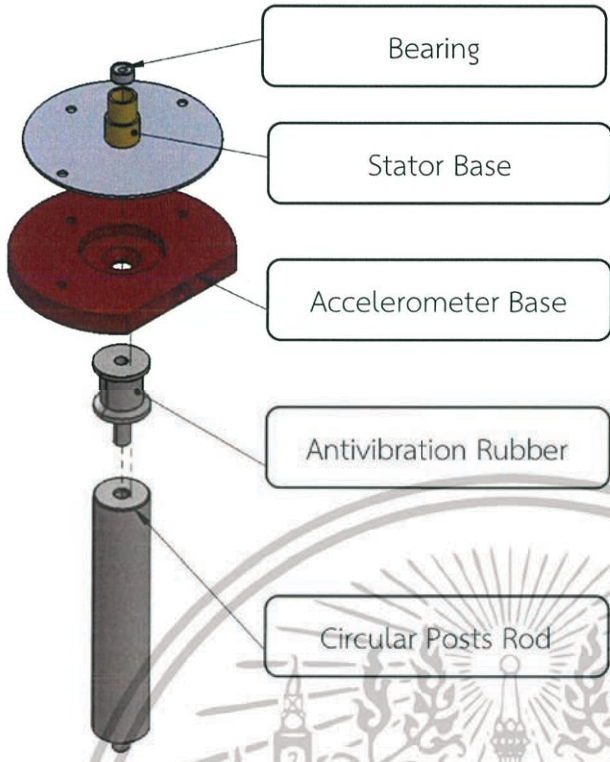
เครื่องวัดความสมดุลของพัดลมที่นั่งรถยนต์ส่วนอุปกรณ์ติดยึดออกแบบและคำนวณจากสมการความไม่สมดุลให้สอดคล้องกับโปรแกรมคำนวณ ความแข็งแรง และคำนึงถึงพื้นที่การทำงานของพนักงานวัดเป็นสำคัญเพื่อให้มีความสะดวกรวดเร็วในการทำงานเพื่อเพิ่มอัตราการวัด โดยมีองค์ประกอบดังนี้

1) ตลับลูกปืน (Bearing) ใช้รองรับเพลาให้เที่ยงตรงทั้งแนวรัศมีและแนวแกน มีหน้าที่หลักในการรับน้ำหนักช่วยลดแรงเสียดทานหรือลดความฝืด (Friction) ระหว่างการหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

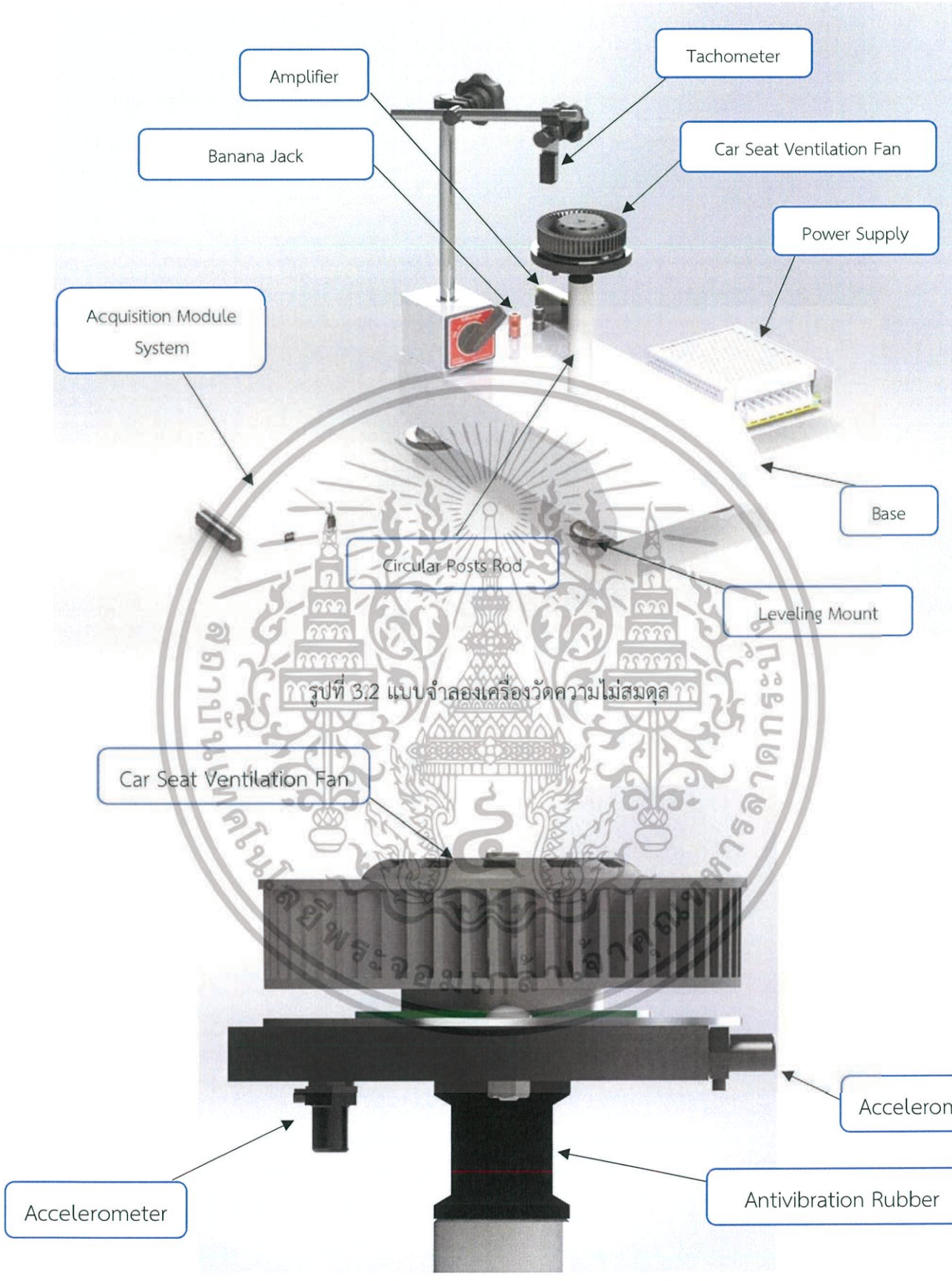
2) ฐานรองสเตเตอร์ (Stator Base) ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ทำหน้าที่ติดยึดสเตเตอร์ (Stator) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมระบายความร้อนในที่นั่งรถยนต์
3) ฐานติดเซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Base) ทำจากวัสดุเบคีไลต์ (Bakelite) ลักษณะเป็นแผ่นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตรเป็นวัสดุแข็งและมีความหนาแน่นสูง เกิดจากการใช้ความร้อนและความดันกับชั้นของกระดาษหรือผ้า แล้วหุ้มด้วยเรซิน ทำหน้าที่รองรับฐานรองสเตเตอร์ (Stator Base) ติดยึดด้วยน็อตตัวผู้แฉกแบนและน็อตตัวเมีย และทำหน้าที่รองรับเซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) 2ตัวในแนวแกนตั้งและแกนนอนโดยการเจาะรูขนาด 2 มิลลิเมตร
4) ยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) ยางป้องกันการสั่นสะเทือนคำนวณตามสมการการสั่นสะเทือนให้มีค่าความแข็ง (Stiffness) ของยาง
5) เหล็กแท่งรองรับอุปกรณ์ (Circular Posts Rod) เสาเหล็กทำจากวัสดุเหล็กสำหรับโครงสร้างทั่วไป (Steel For General Structure) เป็นส่วนที่รองรับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวัดความไม่สมดุลพัดลมและเชื่อมต่อกับส่วนฐาน โดยด้านนึงเป็นเกลียวตัวผู้และอีกด้านเป็นเกลียวตัวเมียขนาด 6 มิลลิเมตร
6) ส่วนฐาน (Base) ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) หนา 2 มิลลิเมตรเพื่อความแข็งแรงออกแบบจากการคำนึงถึงพื้นที่ทำงานของพนักงานวัดความไม่สมดุล โดยการนำเหล็กแผ่นมาตัดด้วยเครื่องจักรกลแบบอัตโนมัติที่มีการทำงานด้วยระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control) และเชื่อมเป็นรูปกล่องเพื่อใช้ในการเก็บสายไฟและติดตั้งปุ่มเปิดปิดพัดลมและปุ่มหยุดฉุกเฉินในอนาคตต่อไป
7) ขาปรับระดับ (Adjustable Foot) อุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเพื่อปรับตั้งระดับความสูง หรือปรับตั้งระดับความลาดเอียงของเครื่องเพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีระดับความเอียงให้เหมาะสมตามเครื่องวัดระดับน้ำ
8) ขาตั้งจับเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ ทำหน้าที่ติดยึดเซ็นเซอร์วัดความเร่งยึดติดกับฐานโดยการการต๊าปเกลียว (Tap) และยึดด้วยน็อตตัวเมีย สามารถปรับตำแหน่งได้เพื่อให้เลเซอร์จากเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบตรงกับตำแหน่งอ้างอิงการวัดในพัดลมระบายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบเครื่องวัดความสมดุลของพัดลมที่นั่งรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบจำลองเครื่องวัดความไม่สมดุล

รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อนพัดลมระบายอากาศในเก้าอี้รถยนต์

1) อุปกรณ์จ่ายไฟ (Power Supply) รุ่น MCP M10-QD305 2x30V/5A เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบ Dual Linear Adjustable Power เป็นอุปกรณ์ที่มีความเสถียรสูง, เสียงรบกวนต่ำ, แรงดันเอาต์พุตหรือกระแสสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่องและแรงดันคงที่และกระแสสามารถแปลงโดยอัตโนมัติได้ จ่ายไฟเอาต์พุต แบบกระแสตรงสามารถปรับอิสระได้สองช่องทางความต่างศักย์ 0-30 โวลต์ (Volts) และกระแส 0-5 แอมป์

2) สเตเตอร์ (Stator) ใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมผ่านขดลวดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับแถบแม่เหล็กที่ติดตั้งในพัดลมโดยสเตเตอร์จะเป็นส่วนที่หยุดนิ่งอยู่กับที่ทำให้ไม่ส่งผลกับการสั่นสะเทือนจากความไม่สมดุลเคลื่อนที่ ซึ่งต่างจากการใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนที่จะทำให้เกิดความไม่สมดุลจากมอเตอร์ด้วย

3.3.3 การเลือกอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล National Instruments Data Acquisition Device

อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล DAQ สำหรับส่วนงานสัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration) มีหน้าที่รับสัญญาณที่ส่งออกมาจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และทำหนีที่จ่ายกระแสไฟฟ้าสำหรับเลี้ยงอุปกรณ์เซ็นเซอร์ประเภท IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric) โดยใช้อุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล สัญญาณการสั่นสะเทือน cDAQ-9232 จากบริษัท National Instruments

- ความสามารถในการสุ่มตัวอย่างสัญญาณสูงสุด (Maximum Sample Rate) คือ จำนวนจุดตัวอย่าง สูงสุดที่สามารถกำหนดได้บนกราฟสัญญาณเข้าจากเซ็นเซอร์ใน 1 วินาที มีค่า 102,400 ตัวอย่าง/วินาที/ช่องสัญญาณ (S/s/ch)
- ช่วงแรงดันสัญญาณแอนะล็อกขาเข้า (Analog Input Voltage Range) คือ สัญญาณอินพุตแอนะล็อกเป็นช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น โวลต์ อยู่ในช่วงสูงสุด ±30 โวลต์ (Volts)
- ปริมาณกระแสไฟฟ้าสำหรับเลี้ยงเซ็นเซอร์ IEPE (IEPE Excitation) คือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าสำหรับเลี้ยง IEPE เซ็นเซอร์ขนาดเป็นมิลลิแอมป์ เพื่อใช้จ่ายให้กับเซ็นเซอร์วัดความเร่ง
- ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เข้ากันได้กับเซ็นเซอร์ IEPE (IEPE Compliance Voltage Range) คือ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เข้ากันได้กับ เซ็นเซอร์ IEPE คำนวณได้จากสมการ
-

1) ค่าความสามารถในอัตราการสุ่มสัญญาณต่ำสุด (Minimum Sample Rate)
   - พิจารณาจากการ แบ่งพัดลมออกเป็นช่วง ช่วง 10° จากจุดศูนย์เป็นวงกลม จะได้ทั้งหมด 36 ช่วง จาก 360°
   - เนื่องจากความเร็วรอบให้บริการของการหมุดของพัดลมที่ใช้ในการวัด เท่ากับ 3900 รอบ/นาที หรือ 65 เฮิรตซ์
   - จากทฤษฎี Nyquist ทำให้ต้องใช้จำนวนการสุ่มสัญญาณ 5-10 เท่า(ผู้ทดลองเลือกใช้ 10 เท่า) จากการวัดใน1รอบ

ดังนั้นสามารถหาขนาดของอัตราการสุ่มสัญญาณต่ำสุด ได้จาก

อัตราการสุ่มสัญญาณต่ำสุด = 36 x 65 x 10 = 23,400 ตัวอย่าง/วินาที/ช่องสัญญาณ (S/s/ch)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ทดลองได้เลือกใช้อุปกรณ์ National Instruments Data Acquisition Device รุ่น NI cDAQ-9232 สามารถเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ได้ 3 ช่องสัญญาณ ที่มีขนาดการสุ่มตัวอย่างสัญญาณสูงสุด/ช่องสัญญาณ (Maximum Sample Rate/Channel) 102,400 ตัวอย่าง/วินาที/ช่องสัญญาณ (S/s/ch) เพื่อนเป็นการเผื่อขีดจำกัดความสามารถในการวัดของอุปกรณ์หากต้องการใช้ความละเอียดในการทดลองมากขึ้น

2) ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เข้ากันได้กับเซ็นเซอร์ IEPE (IEPE Compliance Voltage Range) คำนวณได้จากคู่มือของอุปกรณ์ DAQ

$$V_{IEPE} = (0.67x\ V_{common\text{-}mode}) + V_{bias} \pm V_{full\text{-}scale} \quad (3.1)$$

(แสดงการคำนวณในหัวข้อที่ 3.3.4 ในส่วนของเซ็นเซอร์ความเร่ง)

3.3.4 การเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง

เซ็นเซอร์วัดความเร่งในแนวแกนเดี่ยว (วัดในหน่วยความเร่ง g หรือ m/s^2) เซ็นเซอร์วัดความเร่งแบบ Ceramic Shear 100 มิลลิโวลต์/หน่วยความเร่ง (mV/g) จำนวน 2 ตัวติดตั้งในแนวแกนนอนและแกนตั้งเพื่อนำค่าความเร่งไปหาความสั่นสะเทือนโดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเซ็นเซอร์วัดความเร่งดังนี้

รูปที่ 3.4 Ceramic Shear ICP® Accelerometer, 100 มิลลิโวลต์/หน่วยความเร่ง (mV/g) จาก PCB Piezotronics, Inc

ที่มา http://www.pcb.com/Products.aspx?m=352C33

1) การคำนวณช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เข้ากันได้กับเซ็นเซอร์ IEPE หรือ V_{IEPE} (IEPE Compliance Voltage Range) ในการใช้กับ DAQ สามารถคำนวณได้จาก สมการในคู่มือของ National Instruments โดยค่าของ $V_{common\text{-}mode}$, V_{bias} , $V_{full\text{-}scale}$ เป็นค่ากำหนดของเซ็นเซอร์(ระบุไว้ในภาคผนวก)

$$V_{IEPE} = 0.67\ V_{common\text{-}mode} + V_{bias} \pm V_{full\text{-}scale} \quad (3.2)$$

$$V_{IEPE\text{-}Max} = (+50 \times 100) + 12 \text{ โวลต์ (Volts)}$$

$$= 17 \text{ โวลต์ (Volts)}$$

$$V_{IEPE\text{-}Min} = (-50 \times 100) + 8 \text{ โวลต์ (Volts)}$$

$$= 3 \text{ โวลต์ (Volts)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น V_{IEPE} = 3 - 17 โวลต์ (Volts)

หมายเหตุ สำหรับ NI cDAQ-9232 เซ็นเซอร์ที่มีค่า V_{IEPE} อยู่นช่วง 0-22 โวลต์ (Volts) ดังนั้นจึงสามารถใช้งานกับเซ็นเซอร์ IEPE รุ่น Ceramic Shear ICP® Accelerometer, 100 มิลลิโวลต์/หน่วยความเร่ง (mV/g)จาก PCB Piezotronics, Inc ได้

2) ช่วงขนาดของความเร่งสูงสุด เลือกใช้ค่า ± 50 ในหน่วยความเร่ง (g) เพื่อเป็นการเผื่อขนาดของความเร่งที่สามารถวัดได้ โดยที่ค่าขนาดของความเร่งจริง ทั้งสองแกนวัดได้ไม่เกิน 1 g แต่เนื่องจากผู้วิจัยมีทรัพยากรจำกัดจึงจำเป็นต้องใช้เซ็นเซอร์ขนาด ± 50 ในหน่วยความเร่ง (g) นี้

3.3.5 การเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ

เครื่องวัดความเร็วรอบเป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดความเร็วในการหมุนของพัดลมระบายอากาศมีหน่วยเป็นรอบต่อนาทีโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบแบบ เครื่องวัดความเร็วรอบ แบบเลเซอร์ (Optical Laser Type Tachometer) ติดกับขาตั้งปรับตำแหน่งได้อยู่ด้านบนพัดลมซึ่งเลเซอร์จะวัดกับตำแหน่งอ้างอิงบนพัดลมเพื่อปรับความเร็วรอบให้ได้ตามการใช้งานจริงของพัดลมขณะทำการวัดค่าความไม่สมดุล

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับ เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Tachometer Sensor)

- แผนภาพตัวอย่างการต่อใช้งาน เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ

รูปที่ 3.5 วิธีการต่อเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ

- ความดันไฟฟ้าเลี้ยงเซ็นเซอร์ (Excitation Voltage) คือความดันไฟฟ้าที่จ่ายให้เซ็นเซอร์สำหรับทำงาน ขนาด 12-24 โวลต์ (Volts)
- แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด (Control Output Voltage Max) สัญญาณเอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุด ขนาด ±40 โวลต์ (Volts)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 LV-S41 Optical Laser Type Tachometer

ที่มา https://www.keyence.com/products/sensor/laser/lv-s/models/lv-s41/index.jsp

วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) Keyence LV-11SAP อุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ช่วยเพิ่มขนาดหรือกำลังของสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Tachometer Sensor) ควบคุมสัญญาณเอาต์พุทให้มีรูปร่างเหมือนสัญญาณอินพุท แต่มีขนาดใหญ่กว่า

รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier)

ทั้งนี้ถึงแม้ว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 40 โวลต์ (Volts) แต่ขนาดแรงดันที่ปล่อยออกมาจริงขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรขยายสัญญาณ ดังนั้นผู้ทดลองจึงปรับแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้อยู่ที่ขนาดไม่เกิน 30 โวลต์ (Volts) เพื่อให้อุปกรณ์วัดความเร็วรอบสามารถใช้งานกับอุปกรณ์ National Instruments Data Acquisition Device

3.3.6 พารามิเตอร์ของอุปกรณ์

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเครื่องวัดความไม่สมดุลจากการหมุนของพัดลมสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.5) และค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สอดคล้องกับแบบจำลองเครื่องวัดความไม่สมดุลที่ได้จากออกแบบ ในโปรแกรม SolidWorks โดยการกำหนดวัสดุและน้ำหนักที่ได้จากการชั่งลงในโปรแกรม หลังจากนั้นดู ค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (2.11) มวลอุปกรณ์เหนือยางกันสั่นรวมพัดลมและโมเมนต์ความเฉื่อยรวมถึงค่าอื่นหาได้จากคุณสมบัติของมวลในภาคผนวก ส่วนระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์ถ่วงของมวล ระยะจากจุดหมุนถึงเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวตั้งและระยะจากจุดหมุนถึงกึ่งกลางความสูงของพัดลมหาจาก

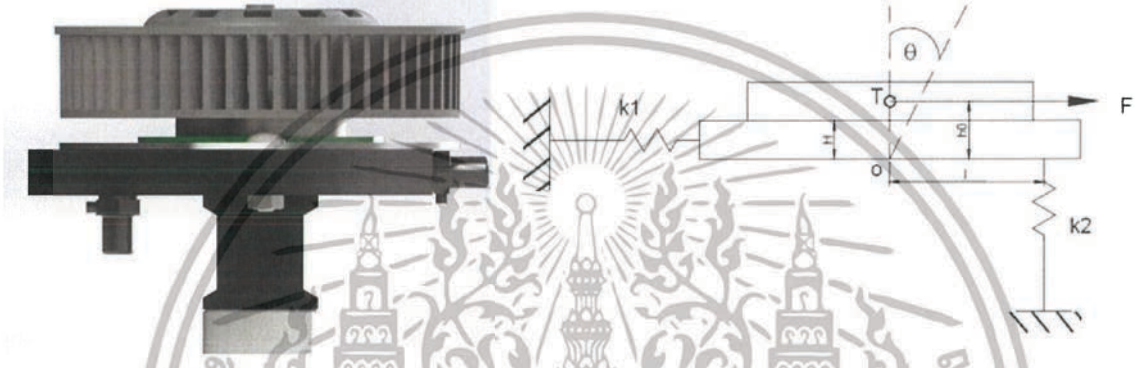
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดระยะในโปรแกรมได้ตามลำดับ โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหมุนที่จุดศูนย์ถ่วงมวล (J_0) จะได้มาจากในโปรแกรม SolidWorks ตามภาคผนวก ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดหมุนของระบบจะเท่ากับ

$$J = J_0 + MH^2 \quad (3.3)$$

จะได้ค่า

$$J = 124662.7737 \quad \text{กรัม-มิลลิเมตร}^2$$



พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่าของพารามิเตอร์	หน่วย
มวลอุปกรณ์เหนือยางกันสั่นรวมพัดลม	M	0.16379	กิโลกรัม
โมเมนต์ความเฉื่อย	J	0.0001246627	กิโลกรัม-เมตร^2
ค่าความแข็งของยางป้องกันการสั่นสะเทือน ในแนวนอน	k_1	19360	นิวตัน/เมตร
ค่าความแข็งของยางป้องกันการสั่นสะเทือน ในแนวตั้ง	k_1	88000	นิวตัน/เมตร
ระยะจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์ถ่วงของมวล	H	0.01196	เมตร
ระยะจากจุดหมุนถึงเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวตั้ง	l	0.02964	เมตร
ระยะจากจุดหมุนถึงกึ่งกลางความสูงของพัดลม	h_0	0.02196	เมตร

การคำนวณการเลือกใช้ ยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาด ข้อจำกัดของจุดประสงค์ที่สามารถซ่อมบำรุงได้ง่ายและได้มาตรฐานตามอุตสาหกรรมและข้อจำกัดความหลากหลายในการเลือกใช้จากภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นเราจึงเลือกยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) ความเหมาะสมในรูปร่างและนำค่าค่าความแข็งของยางป้องกันการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(k) สำหรับยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) เพื่อให้มีค่าความถี่ธรรมชาติ มีค่าต่างกับความถี่ใช้งานของพัดลมที่ได้จากความเร็วรอบ

การคำนวณการเลือกใช้ของยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) ยี่ห้อ misumi รุ่น BGONA 20200 ตามภาคผนวก ก โดย จะได้ค่า k_2 เท่ากับ 88000 นิวตัน/เมตร และค่าอัตราส่วนความแข็งระหว่าง k_2 ต่อk_1 เท่ากับ 0.22 ดังนั้น จะได้

$$k_1 = 88000(0.22) = 19360 \quad \text{นิวตัน/เมตร}$$

$$k_2 = 88000 \quad \text{นิวตัน/เมตร}$$

เมื่อได้ค่าความแข็งของยางป้องกันการสั่นสะเทือน (k) สำหรับยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) เพื่อตรวจสอบค่าความถี่ธรรมชาติให้มีค่าต่างกับความถี่ใช้งานของพัดลมที่ได้จากความเร็วรอบซึ่งมีค่าเท่ากับ $\omega = 308.117$ เรเดียน/วินาที โดยจะคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB ตามภาคผนวก ก จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติดังนี้

$$\omega_{n,1} = 336.7672 \text{ เรเดียน/วินาที}$$

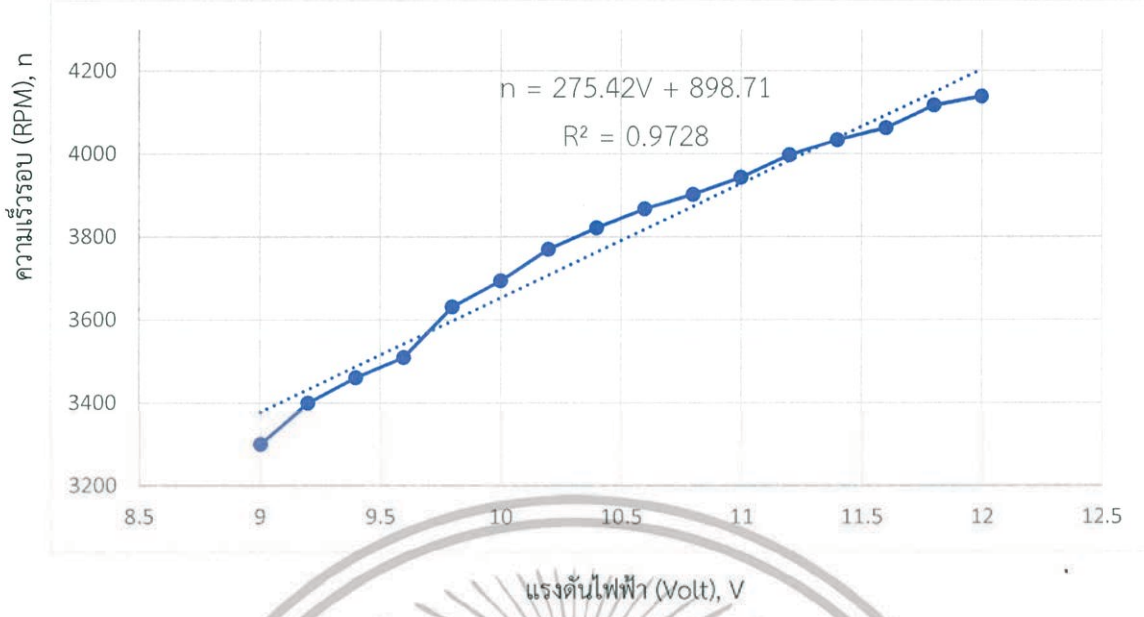
$$\omega_{n,2} = 883.1801 \text{ เรเดียน/วินาที}$$

เพราะฉะนั้นจึงจะสามารถยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) ยี่ห้อ Misumi รุ่น BGONA 20200 ได้

3.4 วิธีการทำงานของเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

1) ปรับระดับเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ที่ขาปรับระดับโดยใช้ระดับน้ำเพื่อให้ส่งผลต่อความไม่สมดุล
2) เมื่อใช้งานอุปกรณ์โดยการเปิดอุปกรณ์จ่ายไฟ (Power Supply) จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังสเตเตอร์ผ่านแจ็คปลั๊กกล้วย (Banana Jack) ซึ่งความเร็วรอบพัดลมที่ขับเคลื่อนโดยสเตเตอร์แปลผลตรงกับความต่างศักย์เป็นไปดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบ

พบว่ากราฟจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ปรับจากแหล่งจ่ายไฟกับความเร็วรอบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

$$n = 275.42V + 898.71 \quad (3.4)$$

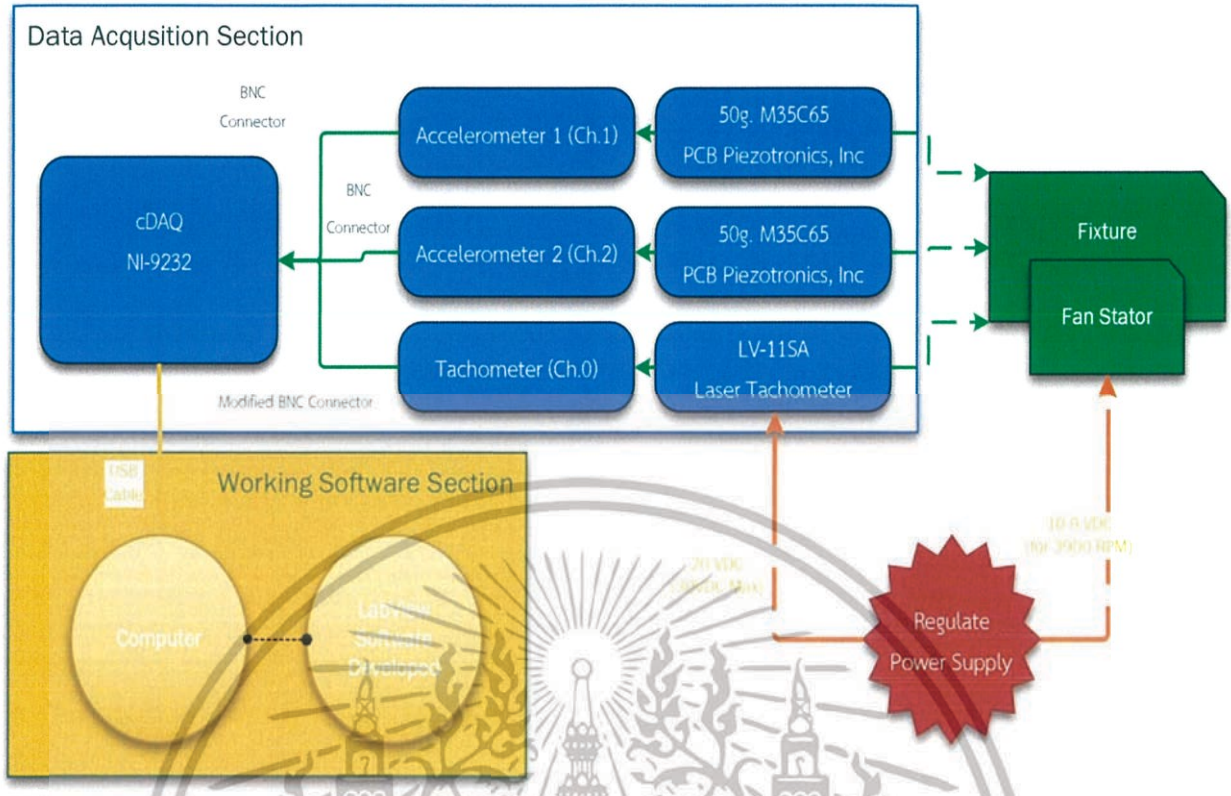
โดยที่ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟ โวลต์ (Volts)

n คือ ความเร็วรอบ รอบต่อนาที (RPM)

3) เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ทั้ง 2 ตัววัดความเร่งจากพัดลมและส่งค่าไปยังอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล National Instruments Data Acquisition Device Vibration Module
โดยการเชื่อต่อด้วยขั้วต่อบีเอ็นซี (BNC Connector) เป็นขั้วต่อสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) แบบหนึ่ง ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายเคเบิลแบบโคแอกเชียล

4) เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ (Tachometer Sensor) วัดความเร็วรอบโดยส่งค่าไปยังอุปกรณ์วิเคราะห์ข้อมูล National Instruments Data Acquisition โดยการเชื่อมต่อแบบวงจร NPN

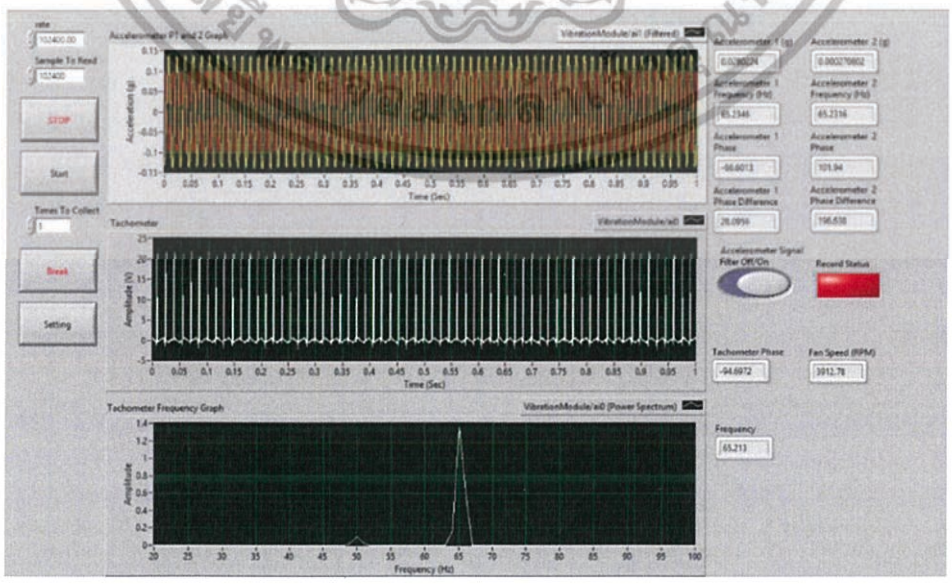
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงภาพรวมการทำงานของเครื่องวัดความไม่สมดุล

3.5 การออกแบบการทำงานของซอฟท์แวร์ใช้งาน

ผู้ทดลองได้ออกแบบและเขียนโค้ดของโปรแกรมในการใช้งานของอุปกรณ์เอง โดยใช้ซอฟท์แวร์ LabVIEW ในการสร้างระบบการทำงานของอุปกรณ์ สามารถอธิบายได้ออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ภาพรวมการทำงานของโปรแกรม, โปรแกรมอ่านค่า, โปรแกรมการตั้งค่า และ โปรแกรมบันทึกค่า



รูปที่ 3.10 หน้าต่างโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ภาพรวมการทำงานของโปรแกรม

ในส่วนนี้กล่าวถึงภาพรรวมทั้งหมดของโปรแกรมทั้งหมด โดยมีทั้งโปรแกรมอ่านค่า โปรแกรมตั้งค่า และ โปรแกรมบันทึกค่า บรรจุอยู่ภายใน แบ่งลำดับการทำงานออกเป็นสองลำดับ ด้วยการเขียนโครงสร้างแบบลำดับ (Sequent Structure) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน

อธิบายลำดับการทำงานได้ดังนี้

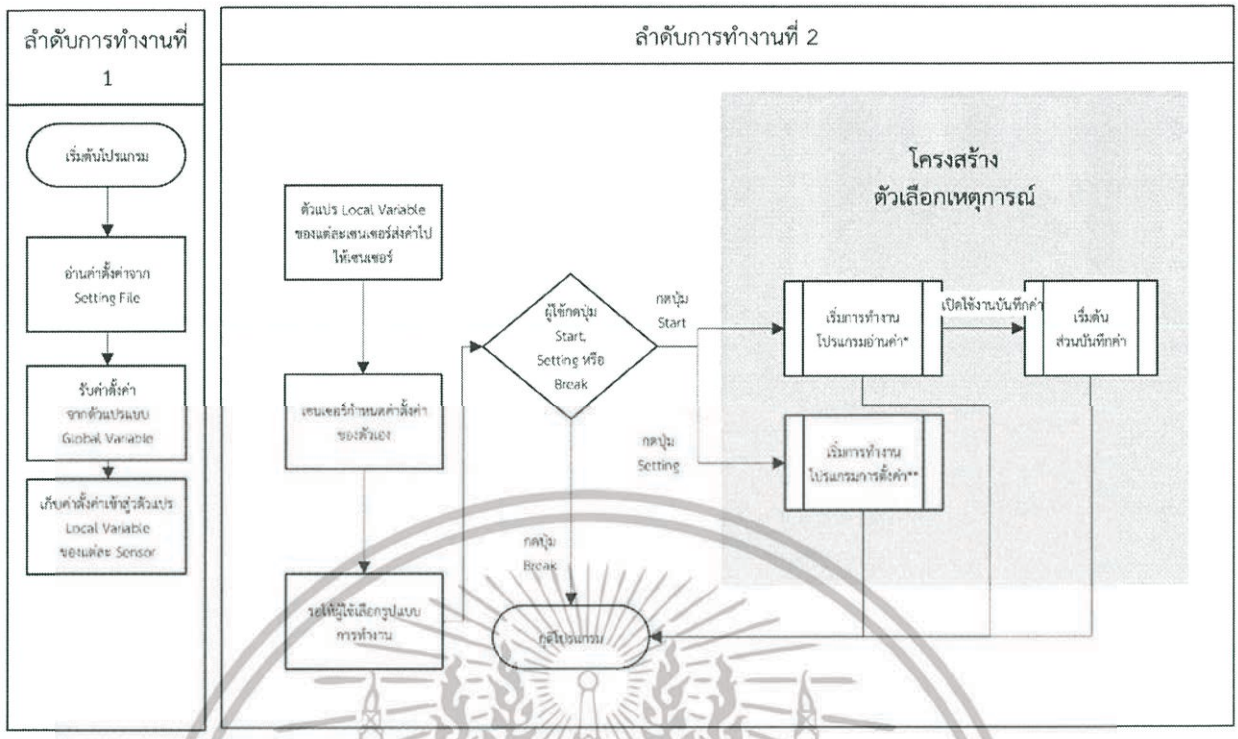
ลำดับการทำงานที่ 1

- เริ่มต้นโปรแกรมหลัก
- อ่านค่า Setting File ที่มีชื่อว่า "Binary Sensor Setting" ซึ่งถูกสร้างไว้ภายในโปรแกรม
- เก็บค่าที่อ่านได้จาก Setting File เก็บไว้ในตัวแปรแบบ Global และ Local Variable ตามลำดับ

ลำดับการทำงานที่ 2

- ตัวแปร Local Variable ส่งค่าที่ตั้งไว้เข้าสู่เซ็นเซอร์แต่ละตัว เพราะเตรียมพร้อมทำงาน
- โปรแกรมรอให้ผู้ใช้กดปุ่ม เพื่อเลือกสิ่งที่จะทำงานต่อไปโดยใช้โครงสร้างแบบ Event Structure แบ่งออกเป็น 3 เหตุการณ์ได้แก่
    1. กดปุ่ม Start : โปรแกรมจะเริ่มการทำงานในส่วน โปรแกรมอ่านค่า
    2. กดปุ่ม Setting : โปรแกรมจะเริ่มทำงานในส่วน Setting
    3. กดปุ่ม Break : โปรแกรมจะยุติการทำงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



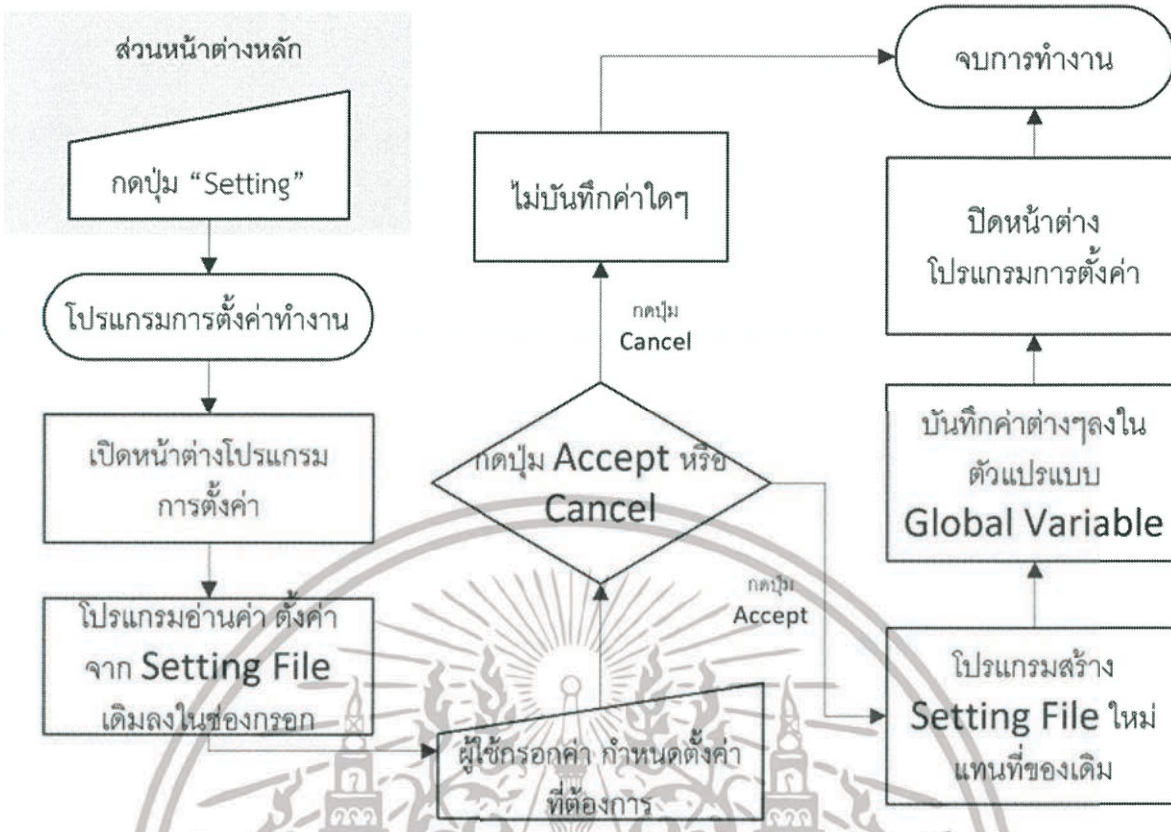
รูปที่ 3.11 แผนผัง (Flow Chart) ภาพรวมการทำงานของโปรแกรมหลัก

3.5.2 โมดูลตั้งค่า

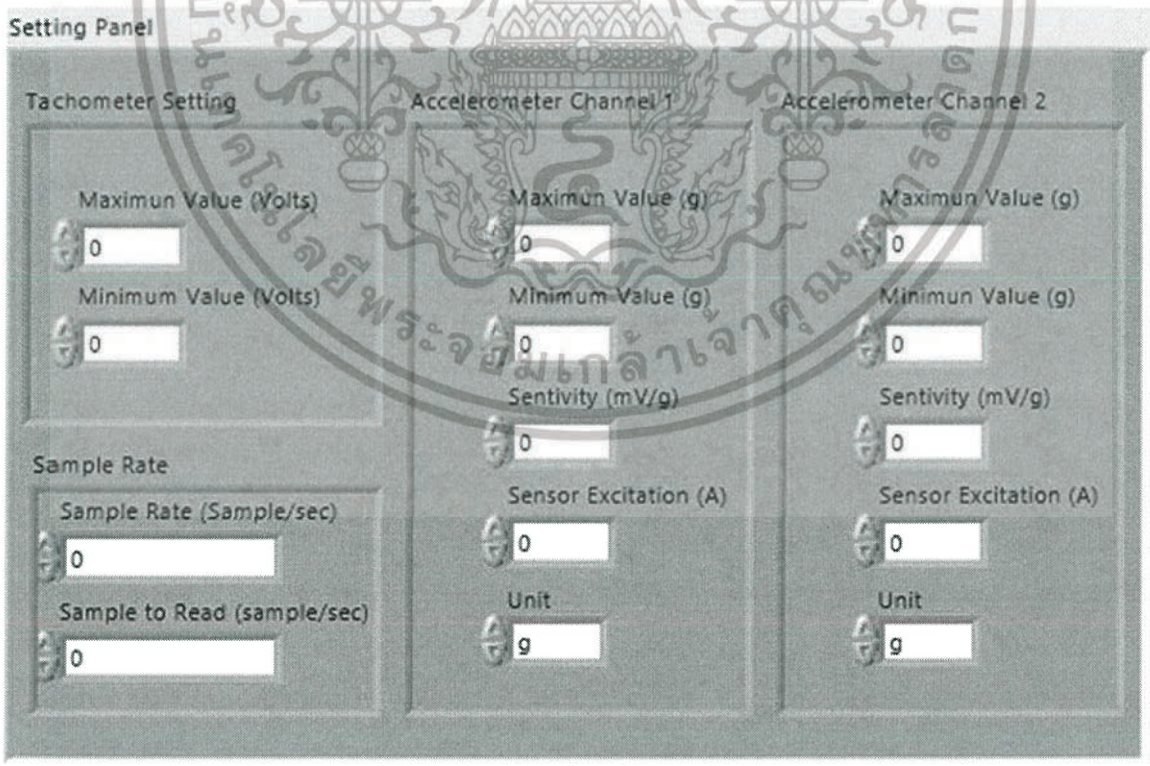
ในส่วนโปรแกรมการตั้งค่ามีไว้เพื่อความสะดวกแก่ผู้ใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าตั้งค่าต่างๆ อธิบายลำดับการทำงานได้ดังนี้

- ผู้ใช้กดปุ่ม “Setting” จากหน้าโปรแกรมหลัก
- หน้าต่างโปรแกรมการตั้งค่าถูกเปิดขึ้น
- ระบบอ่านค่าจาก Setting File ที่มีอยู่เดิม เพื่อป้อนค่า Default ให้กับหน้าต่างของโมดูลเพื่อโมดูลจะได้ไม่ต้องเริ่มต้นที่ค่า 0 ในทุกๆครั้ง
- ผู้ใช้งานกรอกค่าตั้งค่าที่ต้องการตามต้องการ
- หากกดปุ่ม “Accept” โปรแกรมจะสร้าง Setting File ใหม่แทนไฟล์เดิม ค่าที่กำหนดขึ้นมาใหม่จะถูกเก็บไว้ในรูปแบบของตัวแปร Global Variable
- จากนั้นหน้าต่างโปรแกรมการตั้งค่าจะถูกปิดและกลับออกมาที่หน้าโปรแกรมหลัก
- หากกดปุ่ม “Cancel” ส่วนโปรแกรมการตั้งค่าจะถูกปิดและไม่มีการบันทึกค่าใหม่ใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลการตั้งค่า

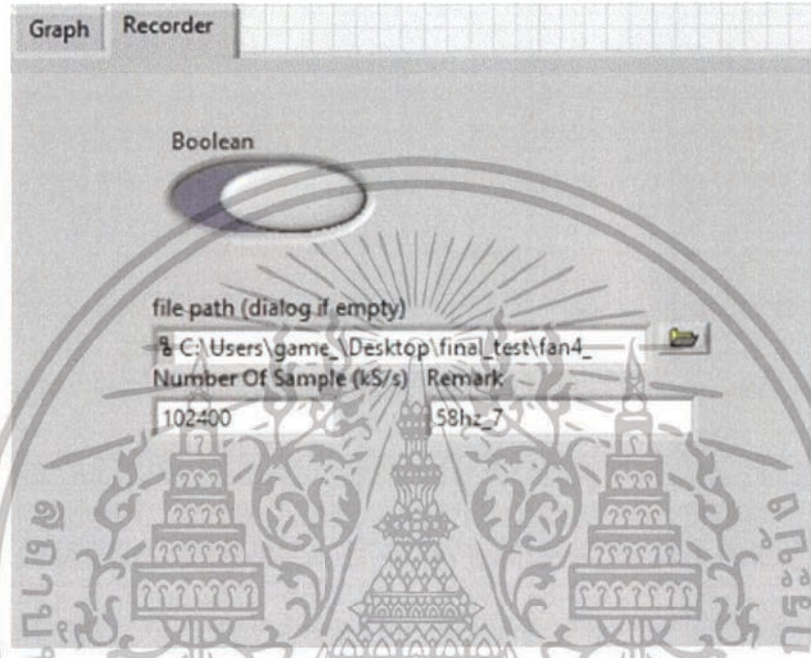


รูปที่ 3.13 หน้าต่างโมดูลการตั้งค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 โมดูลบันทึกค่า

ส่วนของโมดูลบันทึกค่าคือส่วนที่ใช้ในการเก็บค่าข้อมูลจากการวัด โดยอธิบายได้ว่า 1 รอบของการวัดจะได้ค่าเท่ากับจำนวนของ Sample to Read ตัวอย่างเช่น หากทำการตั้งค่า Sample to Read ไว้เท่ากับ 102,400 ในการวัดหนึ่งรอบก็จะได้ค่าที่อ่านทั้งหมด 102,400 ค่าเช่นเดียวกันโดยจะเก็บค่าที่ได้ ในรูปแบบของไฟล์นามสกุล .tdm ซึ่งเป็นไฟล์จากการบันทึกของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถเปิดใช้งานได้ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เช่นเดียวกัน

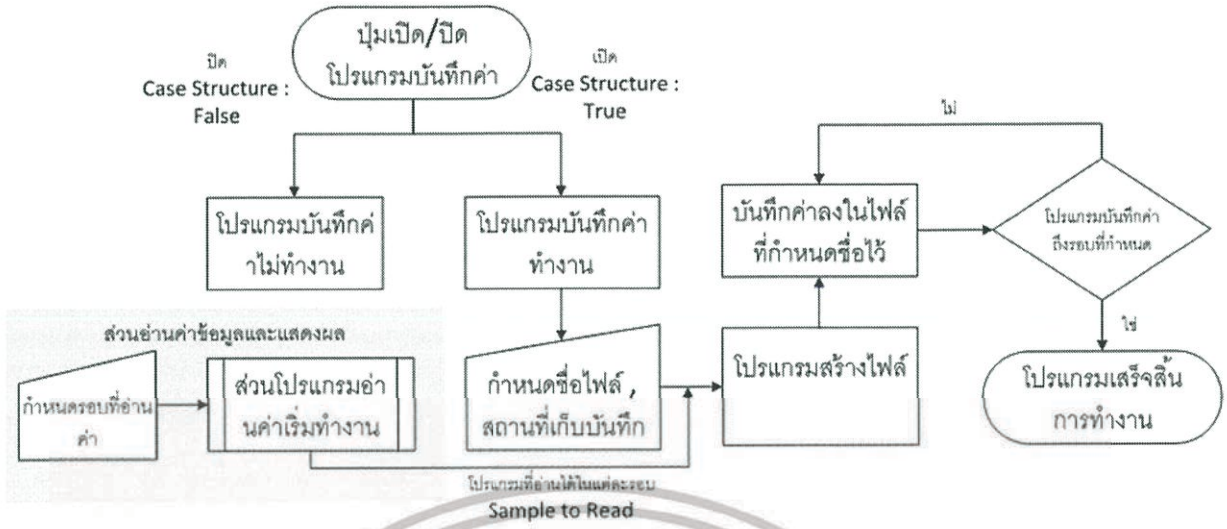


รูปที่ 3.14 หน้าต่างโปรแกรมบันทึกค่า

อธิบายลำดับการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้

- เมื่อโปรแกรมอ่านค่าทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ จะส่งผ่านค่าที่ได้มายังโปรแกรมบันทึกค่า
- ก่อนเริ่มต้นมีการกำหนดชื่อไฟล์ และจำนวนรอบของการวัดไว้ก่อน
- โปรแกรมบันทึกค่า รับค่าที่ได้รับมาในแต่ละรอบจนถึงรอบที่กำหนด
- นำค่าทั้งหมดที่รับได้ เขียนลงไฟล์ .tdm
- ไฟสัญญาณสีแดงที่หน้าโปรแกรมหลัก เปลี่ยนเป็นสีเขียว หมายถึงเสร็จสิ้นกระบวนการบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลบันทึกค่า

3.7 โมดูลอ่านค่า

ส่วนโมดูลทำงานคือส่วนที่มีหน้าที่ในการรับค่าจากเซ็นเซอร์ ทั้งจาก 3 เซ็นเซอร์ เป็นส่วนที่จะคำนวณและแสดงผลของค่าที่อ่านได้ ทั้งค่าข้อมูลดิบจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งและเซ็นเซอร์วัดความเร็วข้อมูลที่คำนวณ ความถี่ หรือ เฟส เป็นต้น อีกทั้งมีหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่อ่านได้ไปยังส่วนโปรแกรมบันทึกค่า

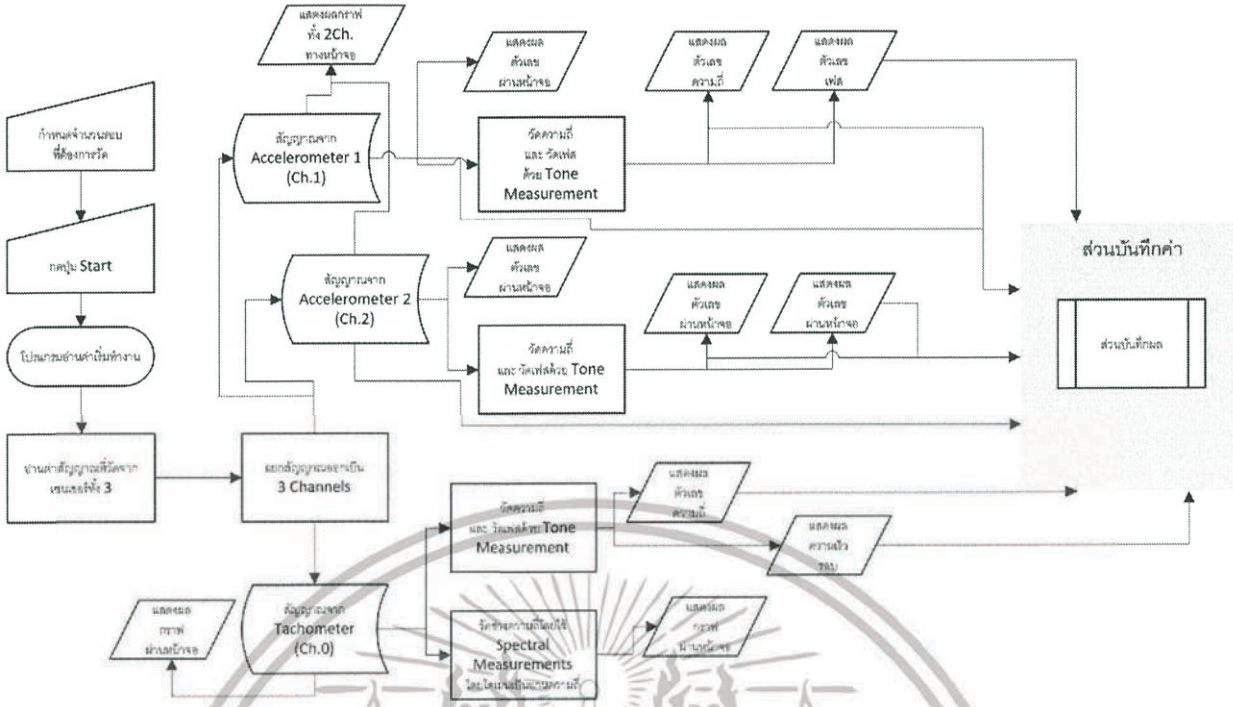
โดยผู้ใช้สามารถกำหนดรอบในการอ่านค่าได้ว่า ให้อ่านค่า ทั้งหมดกี่รอบของ Sample to Read

อีกทั้งยังสามารถกำหนดจำนวนของอัตราการสุ่มสัญญาณ (Sample Rate) และ จำนวนของ Sample to Read ได้ว่ามีจำนวนเท่าไรใน 1 รอบ

อธิบายลำดับการทำงานของโปรแกรมได้ดังนี้

- เมื่อโมดูลอ่านค่าเริ่มทำงาน จะรับค่าจากเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดความเร่ง 1 (Ch.1), เซ็นเซอร์วัดความเร่ง 2 (Ch.2) และ เซ็นเซอร์วัดความเร็ว (Ch.0)
- สัญญาณทั้ง 3 จะถูกแยกออกไปโดยที่ สัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งจะนำไปผ่านตัวกรองสัญญาณ
- สัญญาณดิบจากทั้ง 3 จะถูกแยกออกไปแสดงผลเป็นค่าตัวเลข และกราฟเพื่อแสดงบนหน้าจอ
- สัญญาณทั้ง 3 ใช้ Tone Measurements ในการวัดค่าความถี่ และ วัดเฟส จากนั้นแสดงผลตัวเลขผ่านหน้าจอ
- ค่าความถี่จากเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบ จากหน่วย เฮิร์ทซ์ (Hz) ให้อยู่ในหน่วยความเร็วรอบต่อนาที (RPM)
- จากนั้นสัญญาณทั้งหมดถูกส่งต่อให้กับส่วนโปรแกรมบันทึกค่าเพื่อเก็บค่าลงไฟล์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 แผนผัง (Flow Chart) การทำงานของโมดูลอ่านค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีการทดลองและผลลัพธ์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายวิธีการทดลองของเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนส่วนอุปกรณ์จะวิเคราะห์ระบบการวัดตามคุณสมบัติ คือ เสถียรภาพ และ ความเที่ยงตรง เพื่อจะส่งข้อมูลให้โปรแกรมคำนวณได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน Dewesoft และค่าจากการจำลองด้วยสมการในโปรแกรม MATLAB

4.2 วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การคำนวณผลการตอบสนองทางทฤษฎีและการวัดผลตอบสนองความเร่งจากการทดลอง

4.2.1 การคำนวณผลการตอบสนองทางทฤษฎี

ผลตอบสนองทางทฤษฎีสามารถใช้วิธีการคำนวณจากโปรแกรม MATLAB โดยใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยที่ (2.5) และ (2.6) โดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบทางโปรแกรม SolidWorks ดังหัวข้อ 3.3.4 และใช้แรงกระตุ้นที่ได้จากค่ายอมรับได้ของความไม่สมดุลตาม ISO 1940-1 [1] โดยเขียนชุดคำสั่งให้โปรแกรมทำการคำนวณขนาดของความเร่งตอบสนองในช่วงเวลา เขียนกราฟ บันทึกค่าที่ได้และกราฟไว้ใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลอง

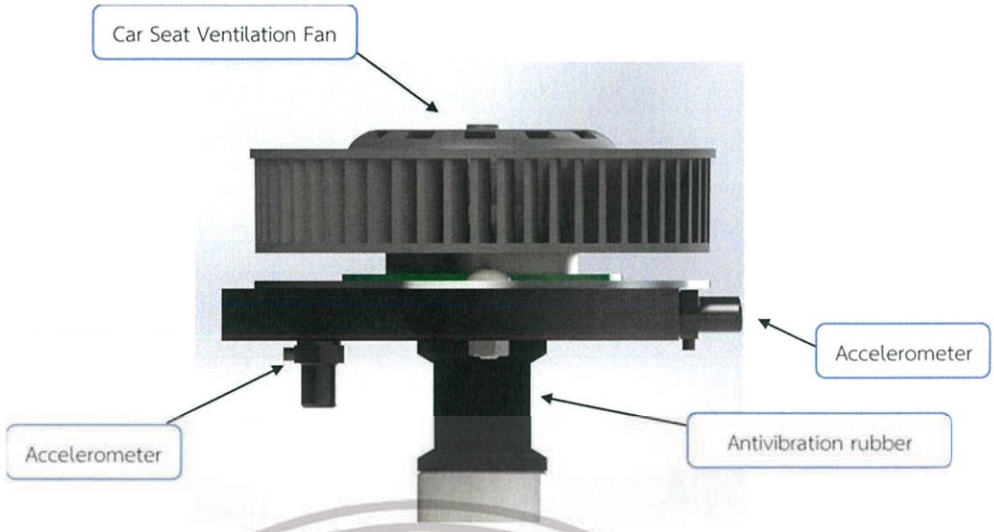
4.2.2 การวัดผลตอบสนองความเร่งจากการทดลอง

ก่อนที่จะได้ผลลัพธ์จากการทดลอง ต้องทำขั้นตอนต่อไปนี้

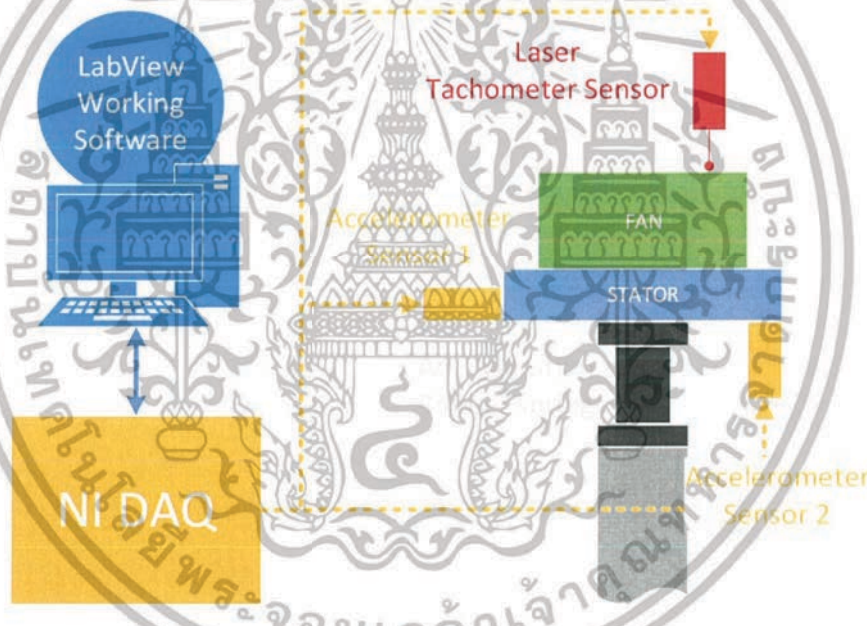
1. ติดตั้งพัดลมลงสเตเตอร์

2. ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง ที่ตำแหน่งฐานของสเตเตอร์โดยจะมีเซ็นเซอร์วัดความเร่งในแกนแนวนอนและแกนแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

3. ต่อสาย USB เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูล

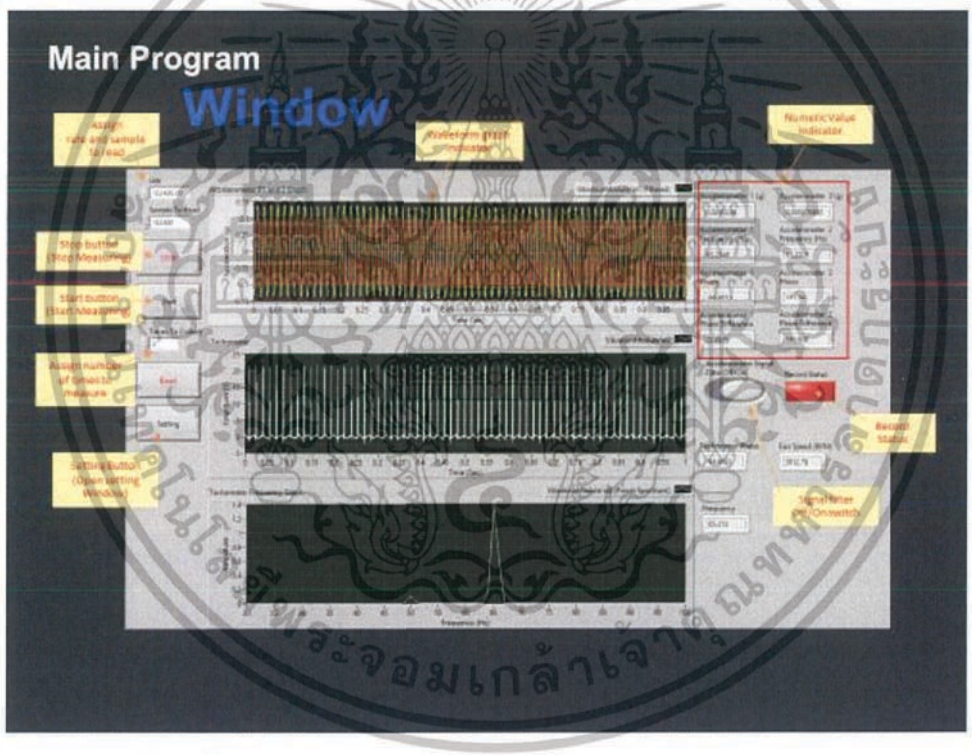
4. เปิดโปรแกรม NI LabVIEW ขึ้นมา

5. ตั้งค่าโปรแกรมโดยที่กำหนด อัตราการสุ่มสัญญาณ 102.4 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับ NI LabVIEW

6. ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์จ่ายไฟโดยหมุนปรับตามค่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการปรับความถี่ที่กล่องควบคุม



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมรับค่าความเร่งจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

7.กำหนดค่าตัวกรองสัญญาณเพื่อลดสัญญาณรบกวน ค่าที่ควรใช้ระหว่าง 60-70 เฮิรตซ์

8.เมื่อกราฟความเร่งที่ช่องข้อมูลปรากฏขึ้นและกำจัดสัญญาณรบกวนออกแล้ว กดบันทึกข้อมูลโดยกดที่ “Start”

9.บันทึกไฟล์นามสกุลเป็น .xls จากนั้นรอประมาณ 10 วินาที ออกจากโปรแกรมโดยกด “Stop”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.เปิดไฟล์ที่บันทึกขึ้นมา จะพบข้อมูลความเร่งทั้งสองแกนจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง ดังรูปที่ 4.4

	A	B	C	D
1	Time	VibrationModule/ai1 (Filtered)	VibrationModule/ai2 (Filtered)	
2	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121845071	0.087726829	
3	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121704541	0.087732303	
4	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121562473	0.087736669	
5	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121418867	0.087739927	
6	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121273726	0.087742077	
7	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.121127052	0.087743118	
8	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120978846	0.087743051	
9	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120829111	0.087741876	
10	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120677848	0.087739593	
11	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120525059	0.087736202	
12	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120370746	0.087731702	
13	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120214911	0.087726095	
14	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.120057557	0.087719379	
15	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119898684	0.087711556	
16	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119738295	0.087702624	
17	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119576393	0.087692585	
18	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119412978	0.087681439	
19	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119248054	0.087669185	
20	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.119081622	0.087655823	
21	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.118913684	0.087641355	
22	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.118744243	0.08762578	
23	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.118573301	0.087609098	
24	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.118400859	0.087591309	
25	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.11822692	0.087572414	
26	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.118051487	0.087552413	
27	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.117874561	0.087531307	
28	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.117696144	0.087509095	
29	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.11751624	0.087485777	
30	25/05/2019 02:35:41.738 PM	-0.11733485	0.087461355	

fan4_102400_3Ch_58hz_4.tdm (ro | Untitled | Untitled1 | Untitled2 | Untitled3 | Untitled4 | Untitled5

รูปที่ 4.5 ตัวอย่างไฟล์ค่าความเร่งที่ได้จากการทดลอง

ค่าที่อ่านได้จากโปรแกรมในแต่ละ ช่องสัญญาณ มีหน่วยเป็น “g” ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าเป็นความเร่งได้ด้วยการคูณ 9.81 เมตร/วินาที^{2}

ค่าความถี่ที่ปรับได้ของการทดลองจะอยู่ในช่วง 3900 รอบ/นาที หรือ 10.9 โวลต์ (Volts) ที่แสดงบนอุปกรณ์จ่ายไฟเนื่องมาจากหากใช้ความถี่ต่ำกว่าในย่านนี้ แรงเนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ไม่สามารถหมุนโรเตอร์ได้

4.3 ผลการทดลอง

ผลของการศึกษาในครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 4 การเปรียบเทียบได้แก่ การเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกันของพัดลมตัวเดียวกัน การเปรียบเทียบพัดลม 4 ตัวที่ความถี่ใช้งาน การทดลองการวัดซ้ำเพื่อดูความเสถียรภาพของการเครื่องวัด การเปรียบเทียบระหว่างสมการการเคลื่อนที่กับผลที่ได้จากการวัดของพัดลมที่ผ่านการทดสอบความสมดุลแล้ว และการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ทั้งหมดนี้จะใช้หลักการค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยทั้งสิ้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Dewesoft

4.3.1 การเปรียบเทียบที่ความถี่ต่างกันของพัดลมตัวเดียวกัน

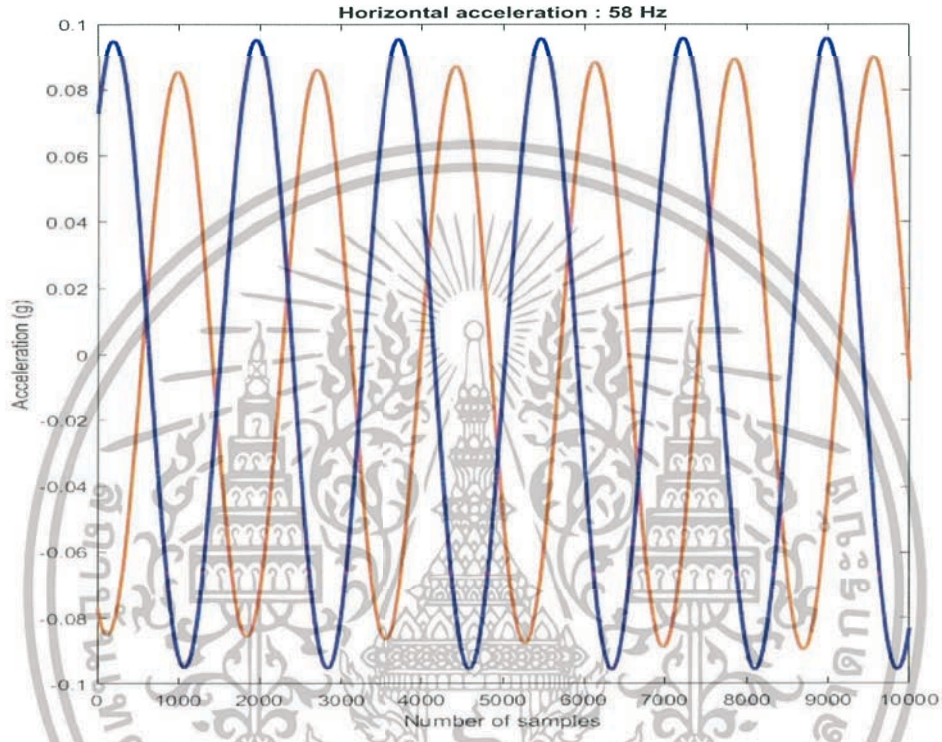
เมื่อทำการทดลองวัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 58 เฮิรตซ์, 65 เฮิรตซ์, 70 เฮิรตซ์ โดยจะทำการวัดการสั่นสะเทือน 10 ครั้งในแต่ละความถี่โดยวัดจาก NI LabVIEW และวัดจาก Dewesoft เขียนกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังตัวอย่างด้านล่าง โดยเส้นสีน้ำเงินคือผลการทดลองจาก NI LabVIEW และสีส้มคือผลจากการทดลอง Dewesoft และหาค่าความคลาดเคลื่อนได้จาก สมการที่ 4.1

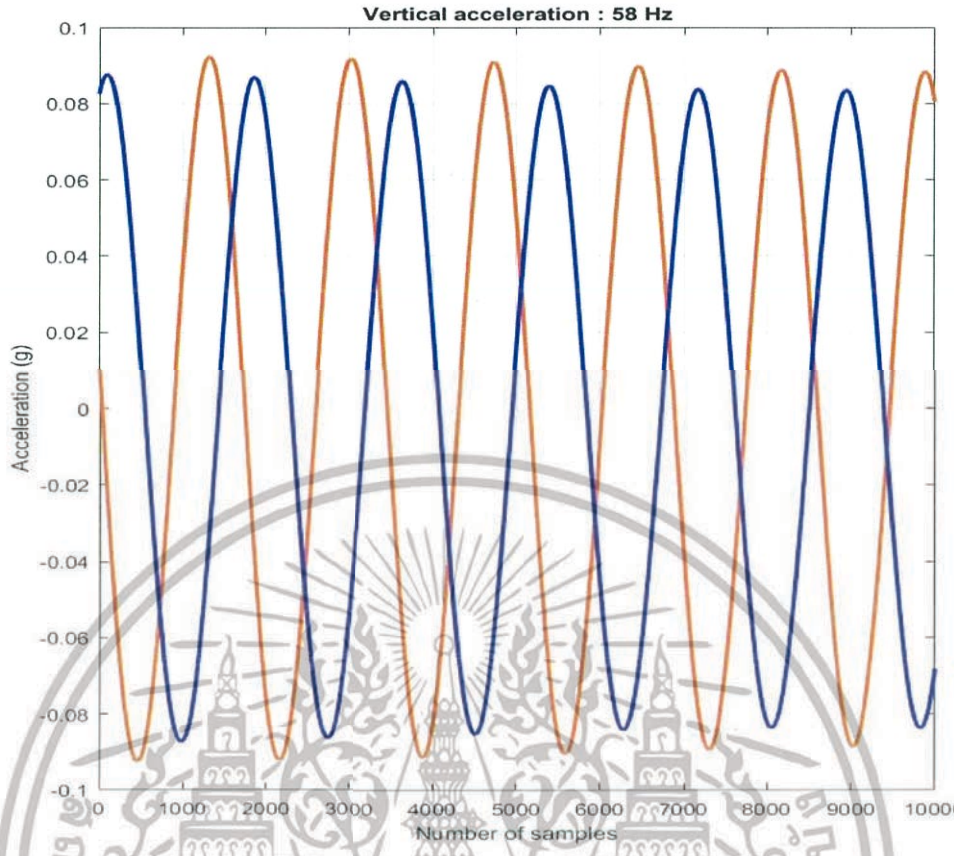
$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = \frac{\text{ค่าที่ได้จาก NI LabVIEW} - \text{ค่าที่ได้จาก Dewesoft}}{\text{ค่าที่ได้จาก NI LabVIEW}} \times 100\% \qquad (4.1)$$

ที่ความถี่เท่ากับ 58 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 58 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



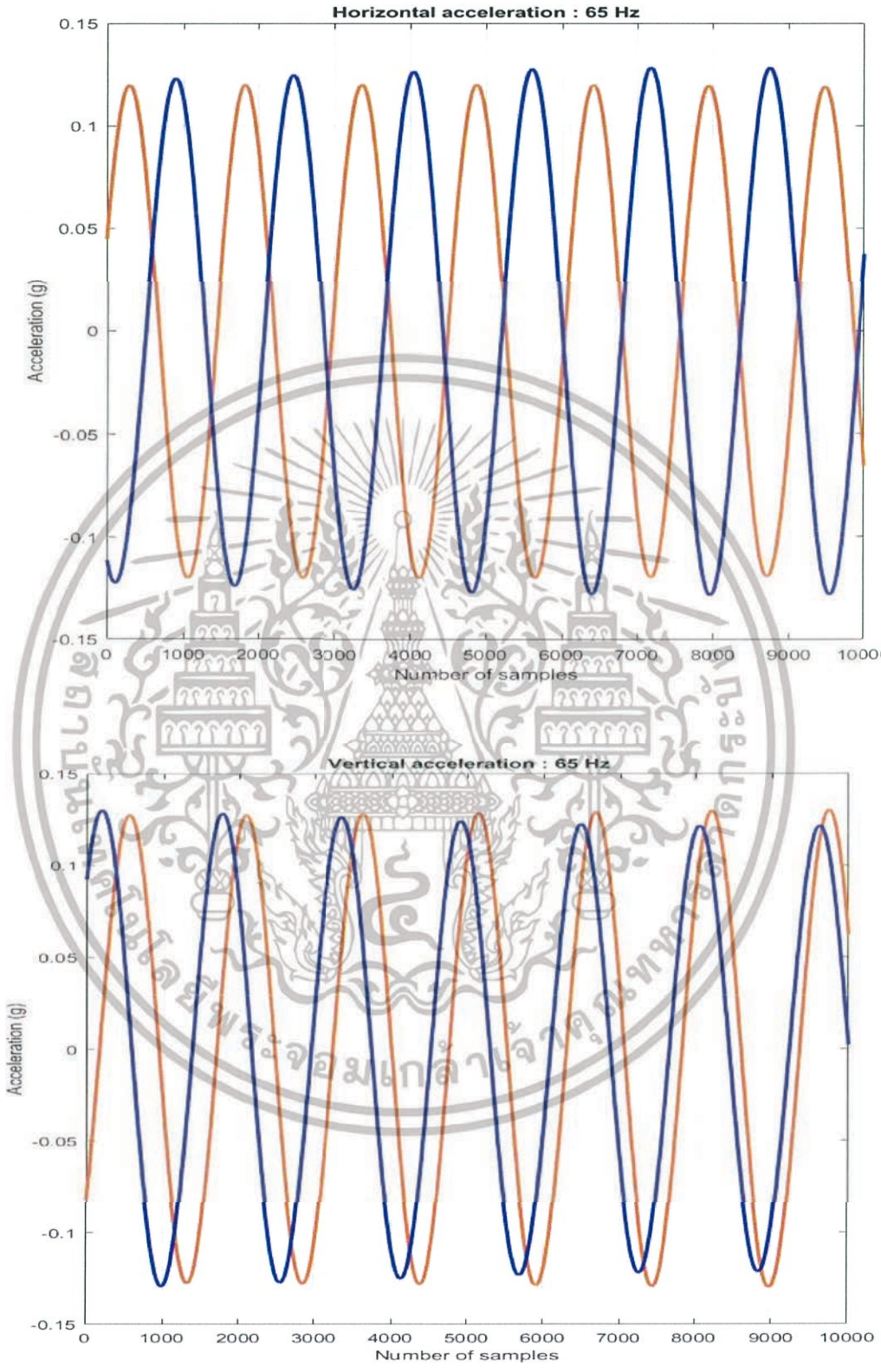
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 58 เฮิรตซ์

58 เฮิรตซ์	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0677	0.0614	0.0622	0.0612	8.84%	0.33%
2	0.0644	0.0616	0.0627	0.0613	2.71%	0.49%
3	0.0645	0.0611	0.0615	0.0611	4.88%	0.00%
4	0.0641	0.0621	0.0622	0.0614	3.05%	1.14%
5	0.0651	0.0621	0.0623	0.0611	4.49%	1.64%
6	0.0671	0.0609	0.0621	0.061	8.05%	-0.16%
7	0.0662	0.062	0.0619	0.0605	6.95%	2.48%
8	0.0661	0.0622	0.0626	0.0604	5.59%	2.98%
9	0.0657	0.0622	0.0616	0.0607	6.66%	2.47%
10	0.0661	0.0612	0.0617	0.0603	7.13%	1.49%
ค่าเฉลี่ย	0.0657	0.06168	0.06208	0.0609	5.83%	1.28%

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ความถี่การกระตุ้น 58 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่เท่ากับ 65 เฮิรตซ์



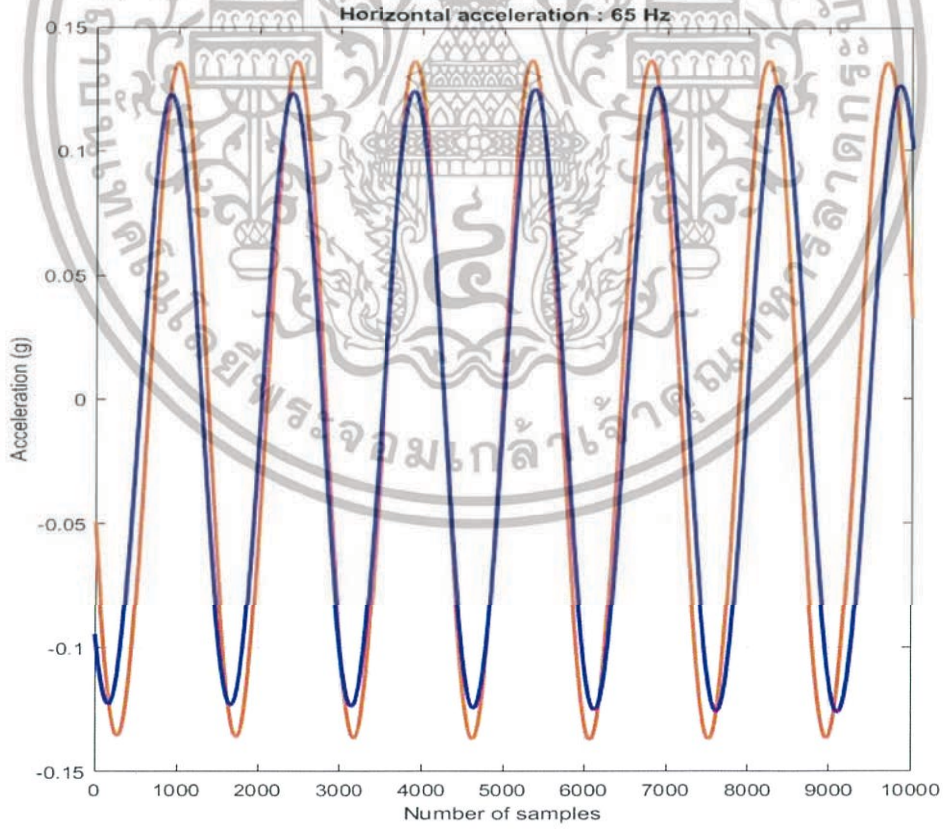
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 65 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

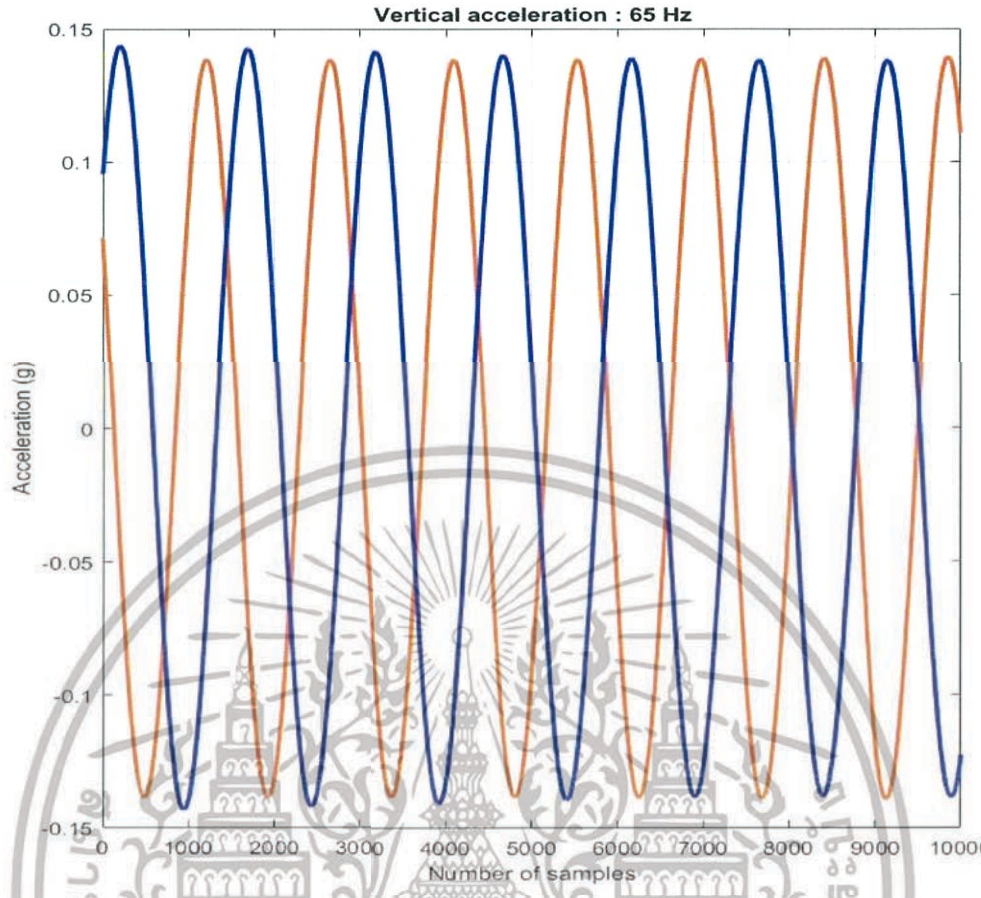
65 เฮิรตซ์	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0861	0.0906	0.0835	0.0881	3.11%	2.84%
2	0.0843	0.0912	0.0839	0.0873	0.48%	4.47%
3	0.0824	0.0898	0.0839	0.0867	-1.79%	3.58%
4	0.0806	0.0914	0.0835	0.0887	-3.47%	3.04%
5	0.0805	0.0912	0.084	0.0879	-4.17%	3.75%
6	0.0814	0.0911	0.0835	0.0867	-2.51%	5.07%
7	0.0833	0.0899	0.0834	0.0879	-0.12%	2.28%
8	0.0815	0.0917	0.0836	0.0879	-2.51%	4.32%
9	0.0789	0.091	0.0836	0.0879	-5.62%	3.53%
10	0.0776	0.0919	0.0836	0.088	-7.18%	4.43%
ค่าเฉลี่ย	0.08166	0.09098	0.08365	0.08771	-2.38%	3.73%

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ความถี่การกระตุ้น 65 เฮิรตซ์

ที่ความถี่เท่ากับ 70 เฮิรตซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ 70 เฮิรตซ์

70 เฮิรตซ์	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0881	0.0995	0.0958	0.0986	-8.04%	0.91%
2	0.0884	0.0969	0.0958	0.0973	-7.72%	-0.41%
3	0.0888	0.0979	0.0966	0.0965	-8.07%	1.45%
4	0.0878	0.0983	0.0969	0.0954	-9.39%	3.04%
5	0.0874	0.097	0.0969	0.0945	-9.80%	2.65%
6	0.0873	0.0974	0.0973	0.0955	-10.28%	1.99%
7	0.0871	0.0974	0.0967	0.0946	-9.93%	2.96%
8	0.0892	0.0959	0.0968	0.0946	-7.85%	1.37%
9	0.086	0.0992	0.0967	0.0949	-11.07%	4.53%
10	0.0886	0.0969	0.0964	0.095	-8.09%	2.00%
ค่าเฉลี่ย	0.08787	0.09764	0.09659	0.09569	-9.03%	2.04%

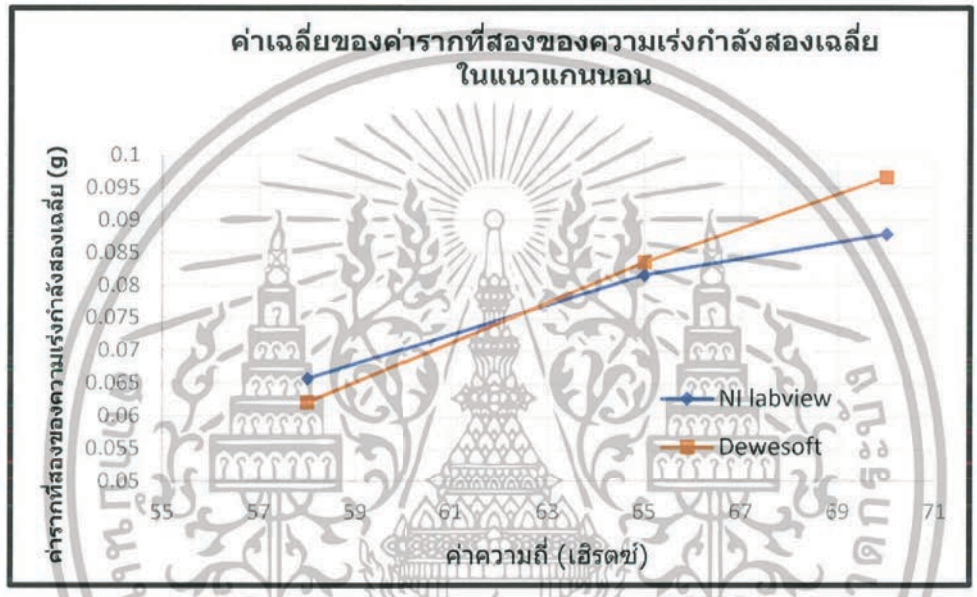
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ความถี่การกระตุ้น 65 เฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 10 ครั้ง ในแต่ละความถี่

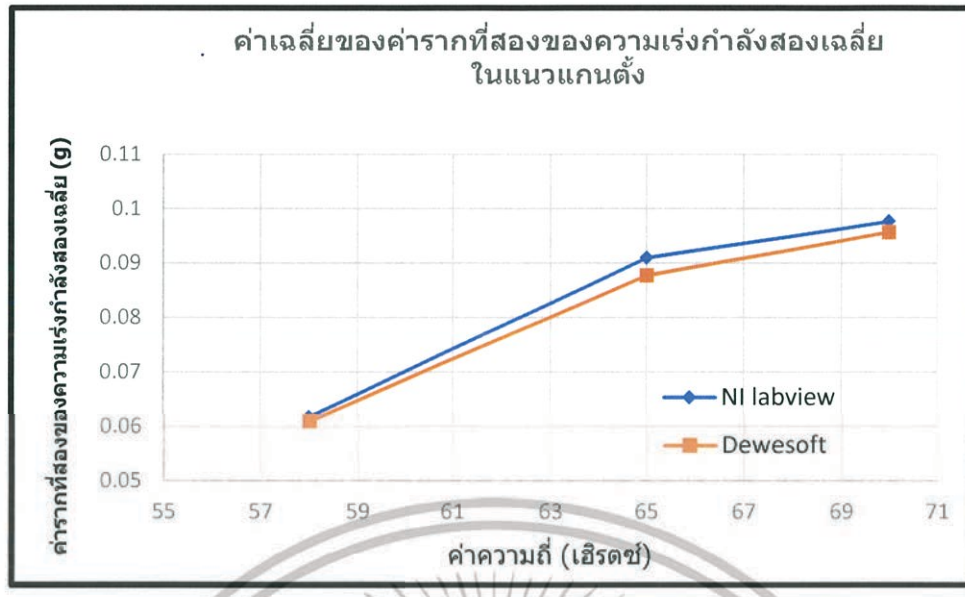
	ค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
ค่าความถี่(เฮิรตซ์)	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
58	0.0657	0.06168	0.06208	0.0609	5.83%	1.28%
65	0.08166	0.09098	0.08365	0.08771	-2.38%	3.73%
70	0.08787	0.09764	0.09659	0.09569	-9.03%	2.04%

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ที่ความถี่การกระตุ้น 58,65,70 เฮิรตซ์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ในแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ในแนวตั้ง

ผลการเปรียบเทียบขนาดแอมปลิจูดของความเร่งพบว่าผลจากการทดลองของพัดลมที่ความถี่ 58 เฮิรตซ์ มีค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW ที่ได้ทำการเฉลี่ยการทดลองจำนวน 10 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก Dewesoft โดยที่ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอน ดังตารางที่ 4.1 และ รูปที่ 4.6

ที่ความถี่ 65 เฮิรตซ์ คือความถี่ใช้งานจริงของพัดลม ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอน ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7

ที่ความถี่ 70 เฮิรตซ์ ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอน ดังตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.8

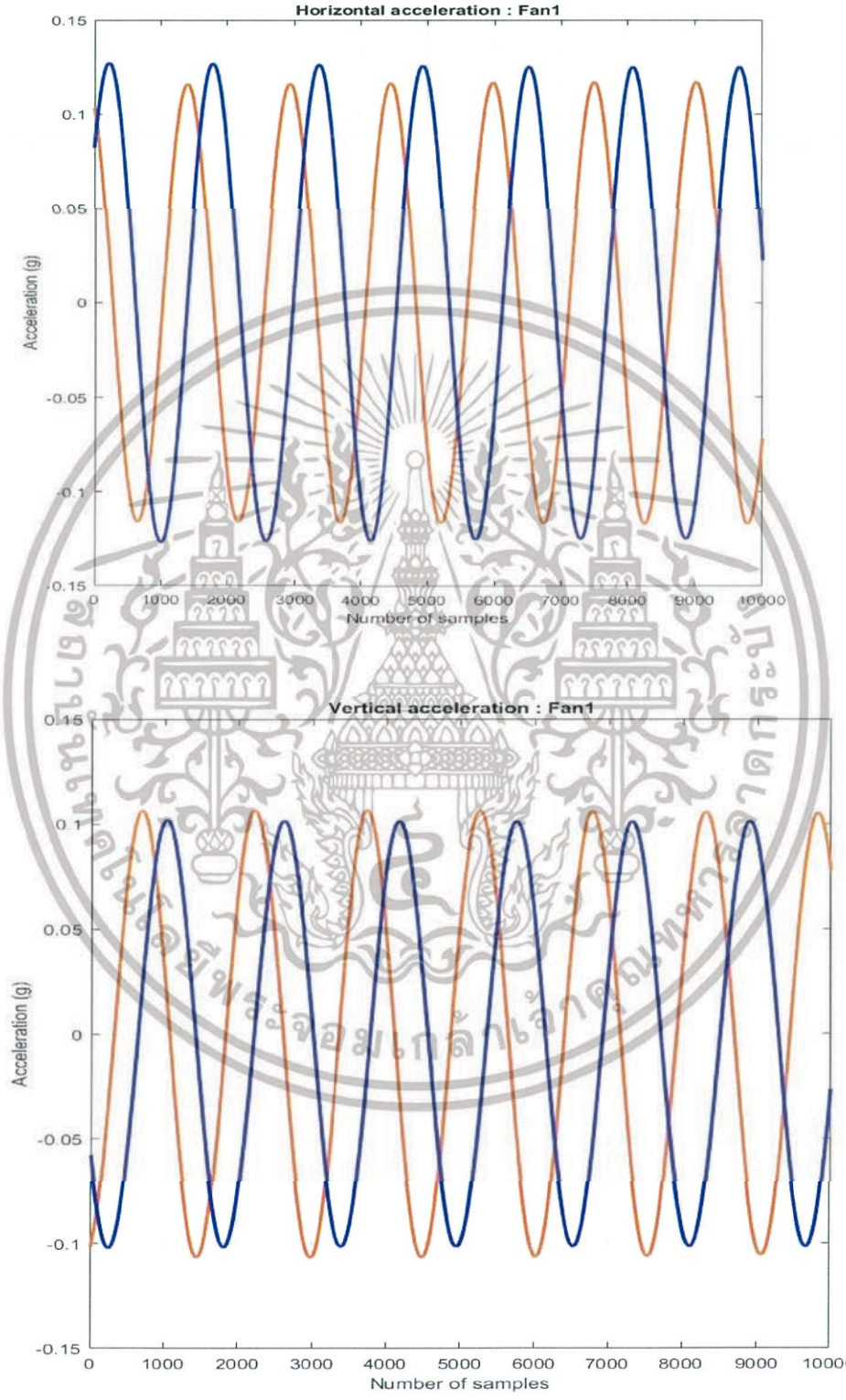
ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องพัดลมเป็นพัดลมซึ่งมวลน้อยมากเพียง 40 กรัม สิ่งแวดล้อมขณะทดลอง มันทั้งเสียง ลม และมนุษย์ ซึ่งไวต่อเซ็นเซอร์และพัดลมที่มีมวลเบาจะมีทำให้แอมปลิจูดของการตอบสนองมีมีค่าความคลาดเคลื่อน อีกสาเหตุหนึ่งคือความคลาดเคลื่อนจากผลของค่าอัตราการสุ่มสัญญาณซึ่ง Dewesoft มีค่าน้อยกว่า NI laview อยู่ 2400 เฮิรตซ์

4.3.2 การเปรียบเทียบพัดลม 4 ตัวที่ความถี่ใช้งาน 65 เฮิรตซ์

เมื่อทำการทดลองวัดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 65 เฮิรตซ์ โดยจะทำการวัดการสั่นสะเทือน 10 ครั้งในพัดลมแต่ละตัวโดยวัดจาก NI LabVIEW และวัดจาก Dewesoft เขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ดังตัวอย่างด้านล่าง โดยเส้นน้ำเงินคือผลการทดลองจาก NI LabVIEW และสีส้มคือผลการทดลองจาก Dewesoft

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดลมตัวที่ 1



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 1

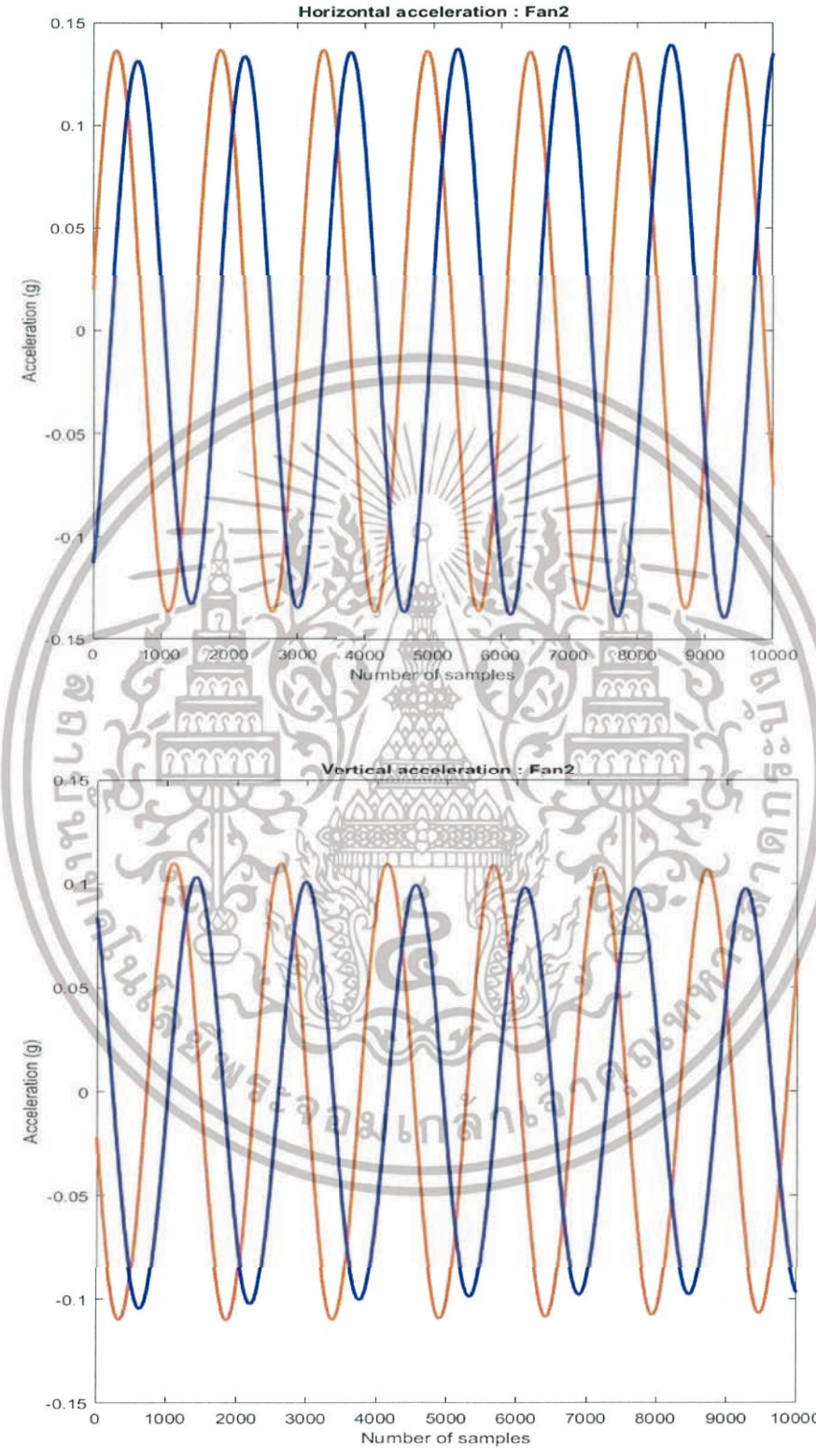
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดลมตัวที่ 1	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0894	0.0717	0.0829	0.0751	7.84%	-4.53%
2	0.0898	0.0716	0.0826	0.0745	8.72%	-3.89%
3	0.0901	0.071	0.0824	0.0744	9.34%	-4.57%
4	0.0898	0.0711	0.0823	0.0742	9.11%	-4.18%
5	0.0899	0.0715	0.0822	0.0736	9.37%	-2.85%
6	0.0899	0.0713	0.0823	0.074	9.23%	-3.65%
7	0.0897	0.0716	0.0823	0.074	8.99%	-3.24%
8	0.0899	0.0714	0.082	0.0743	9.63%	-3.90%
9	0.0897	0.0716	0.0821	0.0741	9.26%	-3.37%
10	0.0899	0.0713	0.0821	0.0739	9.50%	-3.52%
ค่าเฉลี่ย	0.08981	0.07141	0.08232	0.07421	9.10%	-3.77%

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดลมตัวที่ 2



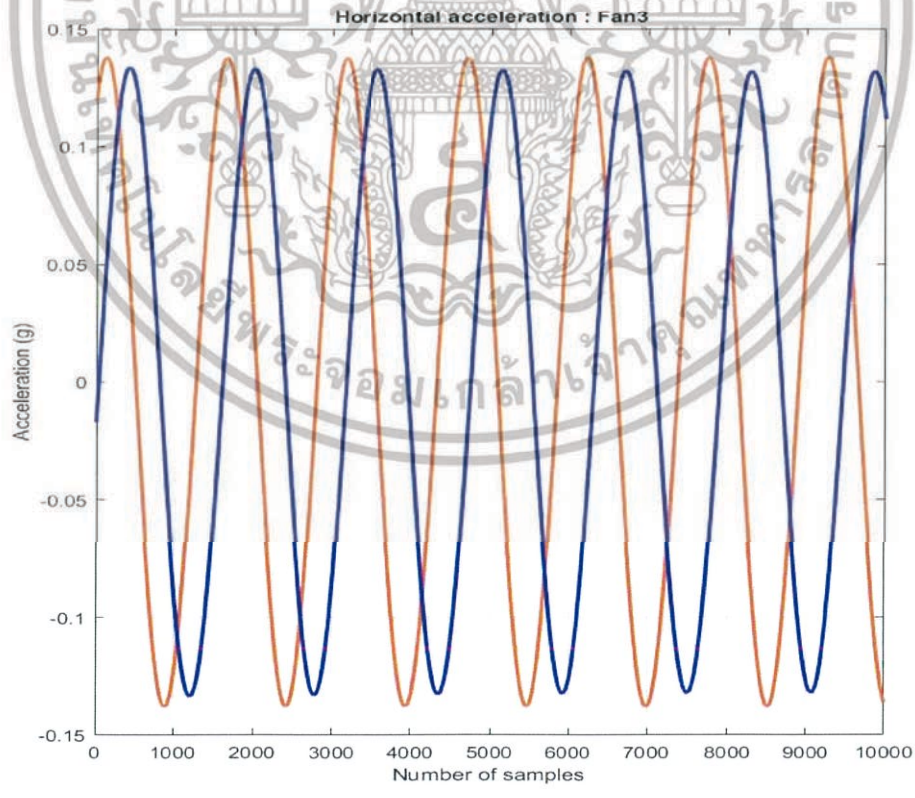
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

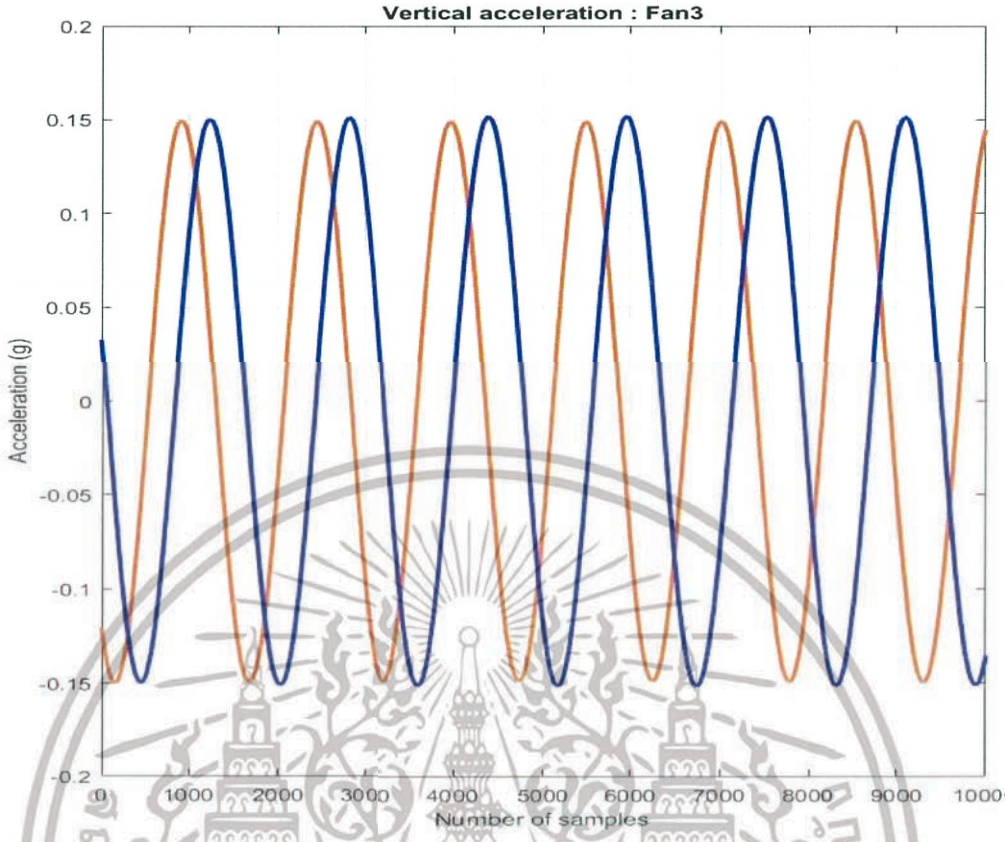
พัดลมตัวที่ 2	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0951	0.0734	0.0952	0.0769	-0.11%	-4.55%
2	0.0919	0.0744	0.0951	0.0776	-3.36%	-4.12%
3	0.0945	0.0742	0.0948	0.0768	-0.32%	-3.39%
4	0.0915	0.0754	0.0939	0.0758	-2.56%	-0.53%
5	0.0938	0.0728	0.0939	0.0765	-0.11%	-4.84%
6	0.094	0.0712	0.0935	0.075	0.53%	-5.07%
7	0.0927	0.0736	0.0934	0.0747	-0.75%	-1.47%
8	0.0943	0.0726	0.094	0.0762	0.32%	-4.72%
9	0.0958	0.0719	0.0941	0.0752	1.81%	-4.39%
10	0.0945	0.0734	0.0939	0.0754	0.64%	-2.65%
ค่าเฉลี่ย	0.09381	0.07329	0.09418	0.07601	-0.39%	-3.58%

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 2

พัดลมตัวที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



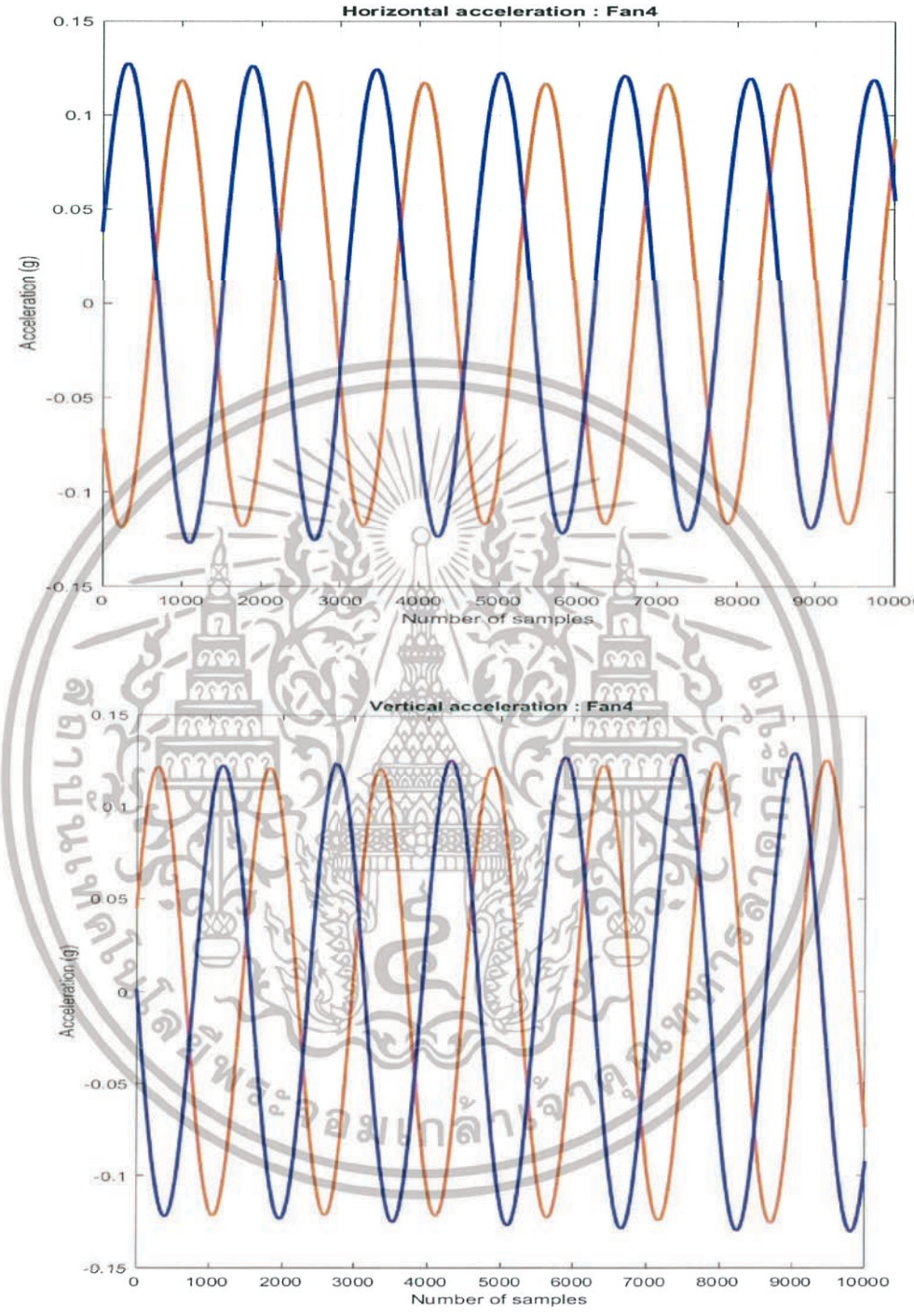
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 3

พัดลมตัวที่ 3	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0944	0.1055	0.0974	0.105	-3.08%	0.48%
2	0.0975	0.106	0.0974	0.1051	0.10%	0.86%
3	0.1042	0.1048	0.0977	0.1043	6.65%	0.48%
4	0.0986	0.1079	0.0977	0.1045	0.92%	3.25%
5	0.0978	0.1063	0.0977	0.1043	0.10%	1.92%
6	0.0988	0.1058	0.0973	0.1042	1.54%	1.54%
7	0.0981	0.1059	0.097	0.1039	1.13%	1.92%
8	0.0983	0.108	0.0974	0.1033	0.92%	4.55%
9	0.1068	0.1074	0.0984	0.1017	8.54%	5.60%
10	0.1003	0.1078	0.0972	0.1026	3.19%	5.07%
ค่าเฉลี่ย	0.09948	0.10654	0.09752	0.10389	2.01%	2.55%

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดลมตัวที่ 4



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของความเร่งระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัดลมตัวที่ 4	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
จำนวนครั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.0861	0.0906	0.0835	0.0881	3.11%	2.84%
2	0.0843	0.0912	0.0839	0.0873	0.48%	4.47%
3	0.0824	0.0898	0.0839	0.0867	-1.79%	3.58%
4	0.0806	0.0914	0.0835	0.0887	-3.47%	3.04%
5	0.0805	0.0912	0.084	0.0879	-4.17%	3.75%
6	0.0814	0.0911	0.0835	0.0867	-2.51%	5.07%
7	0.0833	0.0899	0.0834	0.0879	-0.12%	2.28%
8	0.0815	0.0917	0.0836	0.0879	-2.51%	4.32%
9	0.0789	0.091	0.0836	0.0879	-5.62%	3.53%
10	0.0776	0.0919	0.0836	0.088	-7.18%	4.43%
ค่าเฉลี่ย	0.08166	0.09098	0.08365	0.08771	-2.38%	3.73%

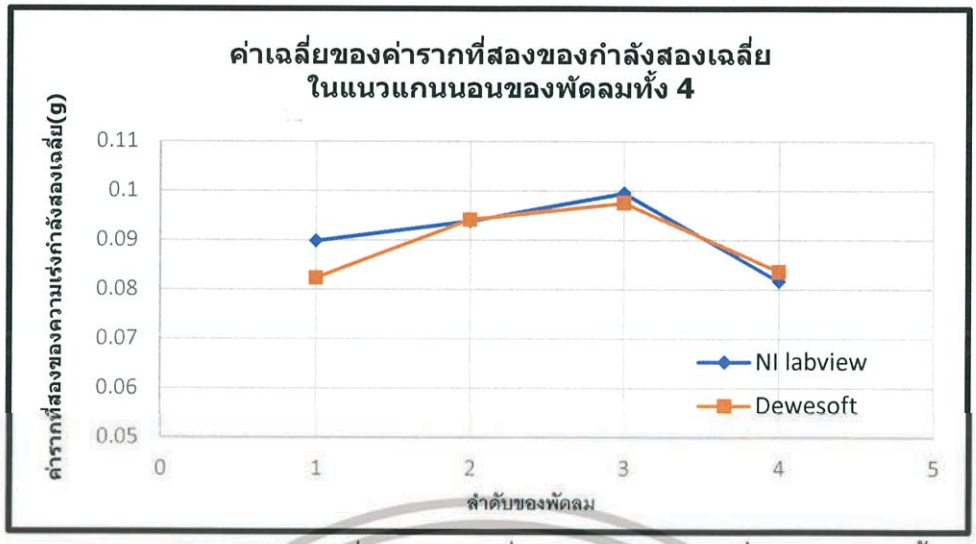
ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมตัวที่ 4

รวมค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 10 ครั้ง ในแต่ละพัดลม

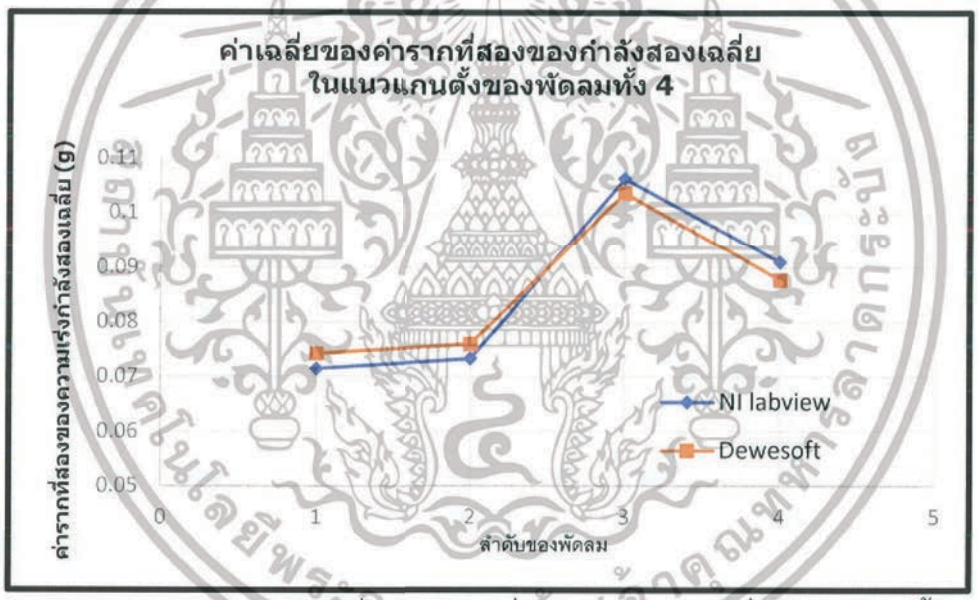
	ค่ารากที่สองของความเร่งกำลังสองเฉลี่ย				ค่าความคลาดเคลื่อน	
	NI LabVIEW		Dewesoft			
พัดลม	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
1	0.08981	0.07141	0.08232	0.07421	9.10%	-3.77%
2	0.09381	0.07329	0.09418	0.07601	-0.39%	-3.58%
3	0.09948	0.10654	0.09752	0.10389	2.01%	2.55%
4	0.08166	0.09098	0.08365	0.08771	-2.38%	3.73%

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมทั้ง 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมทั้ง4ตัวจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในแนวแกนนอน



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยจำนวน 10 ครั้ง ระหว่าง NI LabVIEW และ Dewesoft ของพัดลมทั้ง4ตัวจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในแนวแกนตั้ง

ผลการเปรียบเทียบขนาดแอมปลิจูดของความเร่งพบว่าผลจากการทดลองของพัดลม

พัดลมตัวที่ 1 มีค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW ที่ได้ทำการเฉลี่ยการทดลองจำนวน 10 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกับค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก Dewesoft โดยที่ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9.1 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.77เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวตั้ง ดังตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.11

พัดลมตัวที่ 2 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.39 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.58 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวตั้ง ดังดังตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

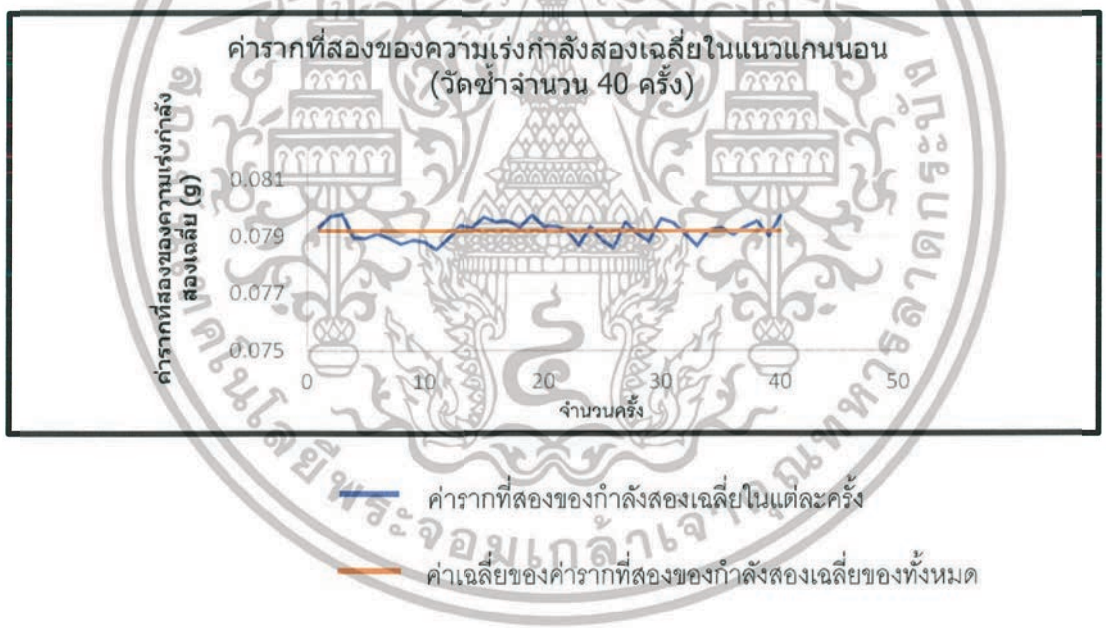
พัดลมตัวที่ 3 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.55 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอน ดังดังตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.13

พัดลมตัวที่4 ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแอมปลิจูดจาก NI LabVIEW มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.98 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอนและมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.12 เปอร์เซ็นต์ จากเซ็นเซอร์ความเร่งในแนวนอน ดังดังตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.14

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องพัดลมเป็นพัดลมซึ่งมวลน้อยมากเพียง 40 กรัม สิ่งแวดล้อมขณะทดลอง มันทั้งเสียง ลม และมนุษย์ ซึ่งไวต่อเซ็นเซอร์และพัดลมที่มีมวลเบาจะมีทำให้แอมปลิจูดของการตอบสนองมีมีค่าความคลาดเคลื่อน อีกสาเหตุหนึ่งคือความคลาดเคลื่อนจากผลของค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ ซึ่ง Dewesoft มีค่าน้อยกว่า NI laview อยู่ 2400 เฮิรตซ์ ซึ่งจากค่าเฉลี่ยจากพัดลมทั้งสี่ตัว มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ในทางวิศวกรรม

4.3.3 การทดลองการวัดซ้ำเพื่อดูความเสถียรภาพของการเครื่องวัด

การทดลองเสถียรภาพโดยการวัดค่าความเร่งในความถี่ใช้งาน 65 เฮิรตซ์ ซ้ำจำนวน 40ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยกำลังสองเพื่อดูความเสถียรของเครื่องมือวัด



รูปที่ 4.17 กราฟผลการทดลองเสถียรภาพเซ็นเซอร์วัดความเร่งแนวนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.18 กราฟผลการทดลองเสถียรภาพเซ็นเซอร์วัดความเร่งแนวแกนตั้ง

	ค่าความเร่งเฉลี่ย (g)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
แกนนอน	0.07920755	0.000345068
แกนตั้ง	0.08471265	0.000728588

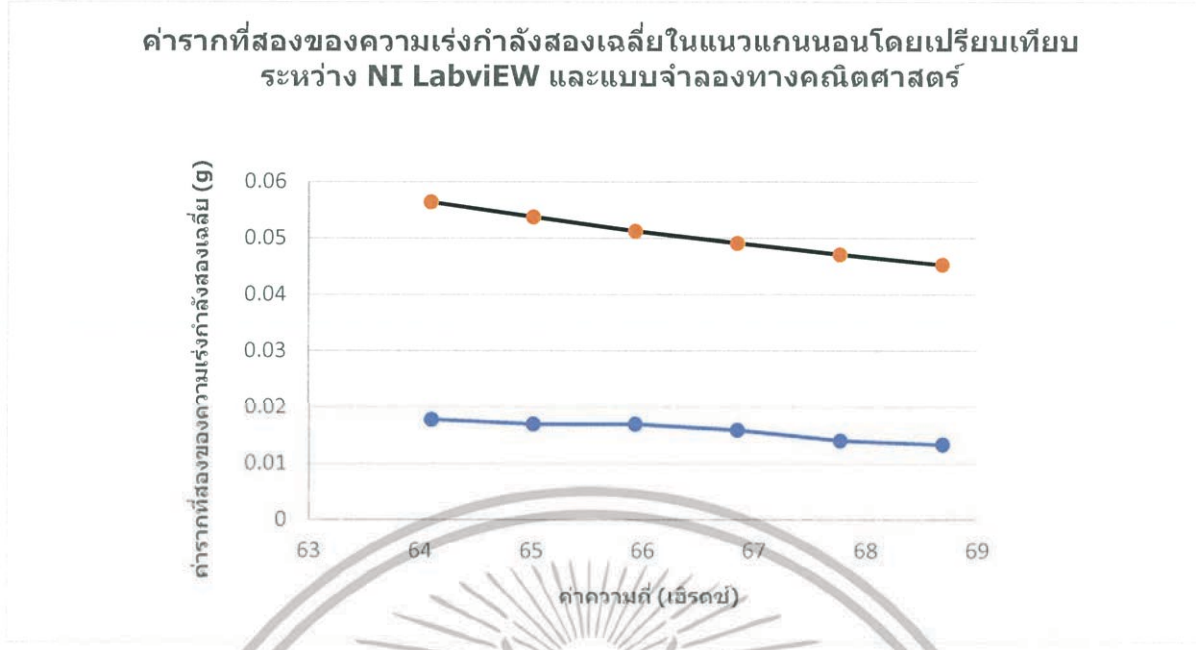
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของการวัด 40 ครั้งและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

โดยค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความเร่งจาก เซ็นเซอร์วัดความเร่งแนวแกนนอน และแนวแกนตั้ง ในการวัด 40 ครั้งจากอุปกรณ์ National Instruments Data Acquisition อยู่ที่ 0.07920 g และ 0.08471 g ตามลำดับ และเมื่อ พิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) อยู่ที่ 0.00034, 0.00072 ตามลำดับ ซึ่งค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าน้อยมาก แสดงว่าข้อมูลชุดนี้ค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน ซึ่งเป็นผลดีต่อการวัดจากเครื่องมือวัดนี้

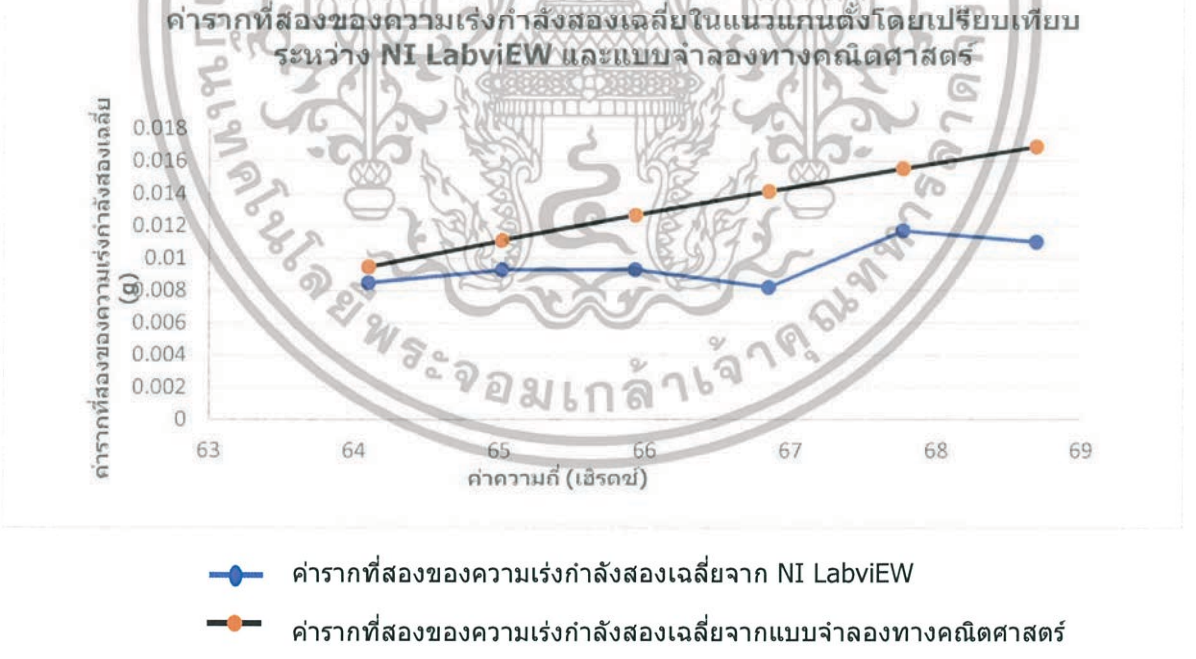
4.3.4 การเปรียบเทียบระหว่างสมการการเคลื่อนที่กับผลที่ได้จากการวัดของพัดลมที่สมดุลแล้ว

การทดลองนี้เป็นการทดลองโดยการนำพัดลมที่ผ่านการปรับสมดุลแล้วมาทดสอบที่ 6 ความถี่ผลการตอบสนอง ค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเร่งที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีถูกนำมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับของความเร่งผลการทดลอง โดยเส้นสีดำคือผลจากการคำนวณ และสีน้ำเงินคือผลจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองเซ็นเซอร์วัดความเร่งแกนแนวนอน



รูปที่ 4.20 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองเซ็นเซอร์วัดความเร่งแกนแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

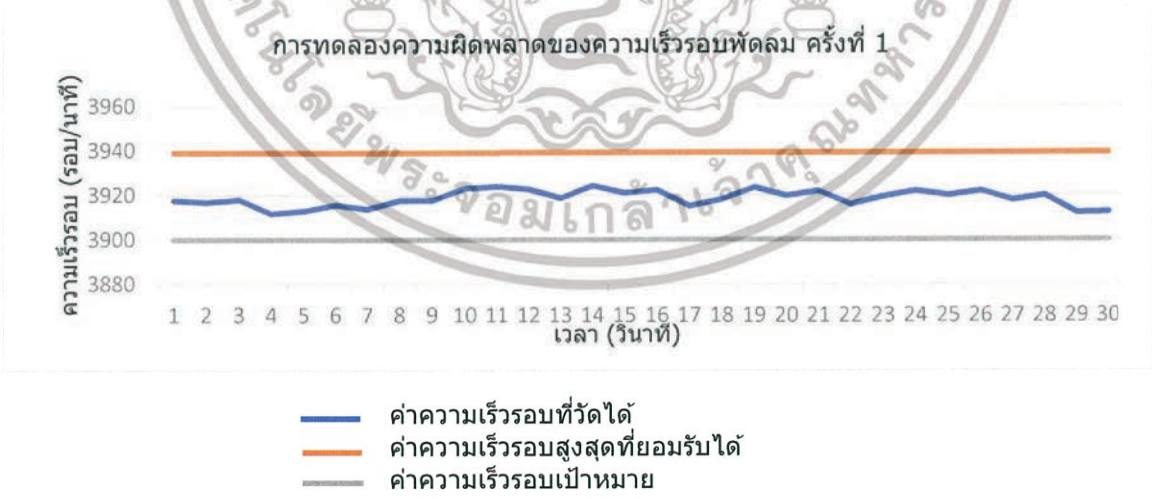
ค่าความถี่(เฮิรตซ์)	NI LabVIEW		แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model)	
	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง
64.09507	0.0178	0.0085	0.056419	0.009474
65.01313	0.017	0.0093	0.053732	0.0111
65.9312	0.017	0.0093	0.051258	0.012655
66.84927	0.0159	0.0082	0.049066	0.01414
67.76733	0.014	0.0117	0.047086	0.015554
68.6854	0.0133	0.011	0.045248	0.016897

ตารางที่4.11 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับค่ารากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของความเร่งทั้งสองแนวแกน

จากผลการทดลองพบว่าเครื่องวัดความไม่สมดุลสามารถวัดค่าความเร่งพัดลมที่ปรับสมดุลตามมาตรฐานจากโรงงานได้ค่าไม่เกินค่าสูงสุดที่ยอมรับจาก ISO 1940-1 [1] ซึ่งสรุปได้ว่าเครื่องวัดความไม่สมดุลสามารถวัดค่าได้ถูกต้องแต่เนื่องด้วยพัดลมที่ผ่านการปรับสมดุลมาที่ความถี่ 65 เฮิรตซ์ จึงไม่เป็นแนวโน้มตามความถี่และเนื่องด้วยไม่ทราบค่าความเร่งจริงของพัดลมที่ปรับสมดุลจึงไม่สามารถสรุปความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้

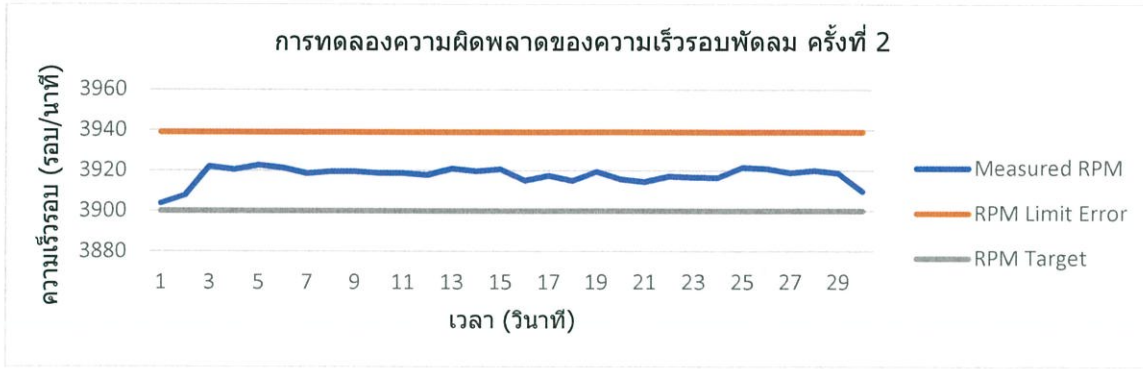
4.3.5 การทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม

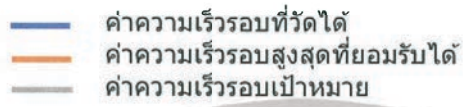
ทำการวัดความเร็วรอบของพัดลมในระยะเวลา 30 วินาที เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบว่าความเร็วพัดลมที่ได้จากความต่างศักย์ไฟฟ้าที่กำหนดที่ความเร็วใช้งาน (3900 รอบต่อนาที) และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ (ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1เปอร์เซ็นต์) หรือไม่ โดยทำการวัด 5 ครั้ง



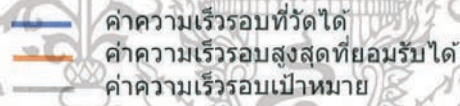
รูปที่ 4.21 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





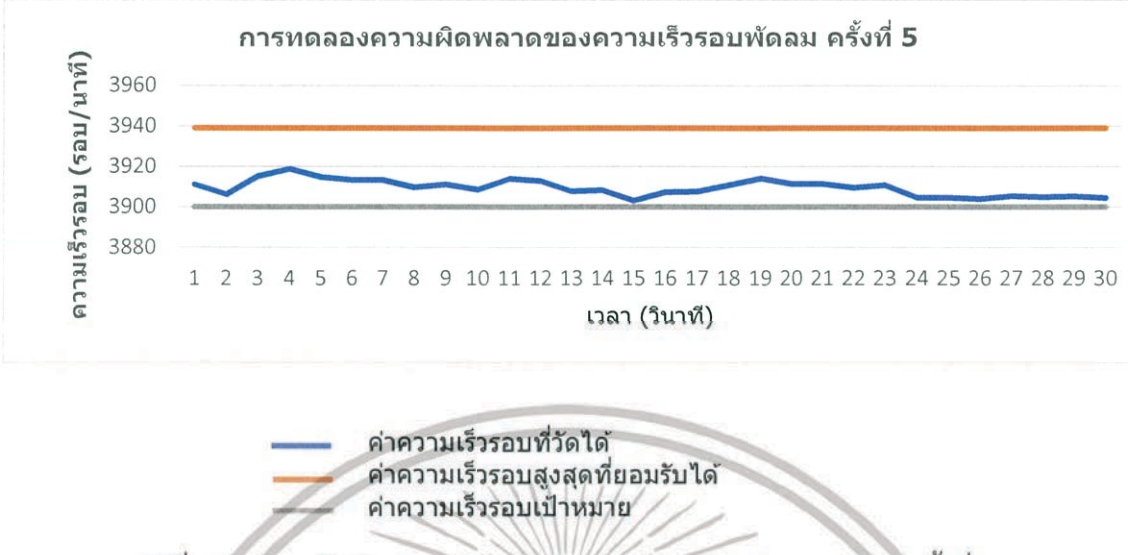
รูปที่ 4.22 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 2



รูปที่ 4.23 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 3

รูปที่ 4.24 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลม ครั้งที่ 5

จำนวนครั้ง	ค่าความเร็วรอบที่วัดได้	ค่าความเร็วรอบเป้าหมาย	ค่าความคลาดเคลื่อน	ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้
1	3924.256172	3900	0.6220%	1%
2	3922.647776	3900	0.5807%	1%
3	3925.869625	3900	0.6633%	1%
4	3917.682173	3900	0.4534%	1%
5	3918.833869	3900	0.4829%	1%

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองความผิดพลาดของความเร็วรอบพัดลมทั้ง 5 ครั้ง

จากการทดลองทั้ง 5 ครั้ง ผลที่ได้คือ ความเร็วรอบมีการคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ หรือไม่เกิน 3939 รอบ/นาที ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนจากความเร็วรอบเป้าหมายน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เมื่อได้ผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบกับโปรแกรมมาตรฐานและผลจำลองทางทฤษฎีแล้ว ผู้ทดลองจะทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นซึ่งจะกล่าวไว้ในบทนี้ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะในการพัฒนาชุดทดลองในอนาคตต่อไป

5.2 สรุปผลการทดลอง

1. สามารถศึกษาวิธีการลดความไม่สมดุลของวัตถุหมุนอันเนื่องมาจากการแผ่เฉลี่ยของมวลไม่สม่ำเสมอได้สำเร็จ

2. ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์เครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ส่วนอุปกรณ์เพื่อหาขนาดและตำแหน่งการเสียสมดุลของพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์แบบพลศาสตร์ตามมาตรฐานระดับความสมดุลพัดลม (ISO-1940-1) [1]

3. ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์เครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์มีความแม่นยำเพียงพอ เพื่อส่งข้อมูลให้โปรแกรมคำนวณความไม่สมดุลคำนวณได้อย่างถูกต้อง

4. เครื่องปรับสมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์ให้สามารถติดตั้งและซ่อมบำรุงได้ง่าย

5.3 ปัญหาจากการศึกษา

1. เนื่องจากการสั่งซื้ออุปกรณ์ต้องผ่านขั้นตอนบริษัทจึงเกิดความยุ่งยากและล่าช้าซึ่งทำให้ไม่มีความยืดหยุ่นในการทำงาน

2. การใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นเรื่องที่ต้องศึกษาใหม่จึงต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษา

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรสร้างพื้นที่จัดระเบียบสายไฟฟ้าและสายสัญญาณให้เรียบร้อยเพราะสายไฟฟ้าที่มากเกินไปจะส่งผลต่อสัญญาณรบกวนในการวัดค่าความไม่สมดุลได้

2. ควรควบคุมสภาพแวดล้อมในการทำการวัดค่าความไม่สมดุลเนื่องด้วยพัดลมมีน้ำหนักเบาและส่งผลทำให้เกิดความผันแปรต่อสภาพแวดล้อมขณะทำการวัดได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] INTERNATIONAL STANDARD, 2003, ISO 1940-1 Second edition

[2] นัฐพล ทรงพัฒนะโยธิน, ปกรณ์ พรเติม, พ.ศ.2545, การปรับสมดุลวัตถุหมุนเกร็ง, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[3] Wang Qiuxiao, Wang Fei, 2013, A new vibration mechanism of balancing machine for satellite-borne spinning rotors, Chinese Society of Aeronautics and Astronautics and Beinhang University

[4] Victor Wowk, 1994, Mechinery Vibration Balancing, McGraw-Hill, Inc.,

[5] วราคม เนิดน้อย, พรชัย นิเวศน์รังสรรค์, พ.ศ.2552, เครื่องถ่วงสมดุลด้วยโปรแกรมLabVIEW, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[6] กิจไพบูลย์ ชีวพันธุศรี, 2011, National Instruments LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาระบบการวัดและควบคุม, ซีเอ็ดยูเคชั่น, บมจ.

[7] Jarkko Isotalo, 2014, Basics of Statistics, CreateSpace Independent Publishing Platform

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

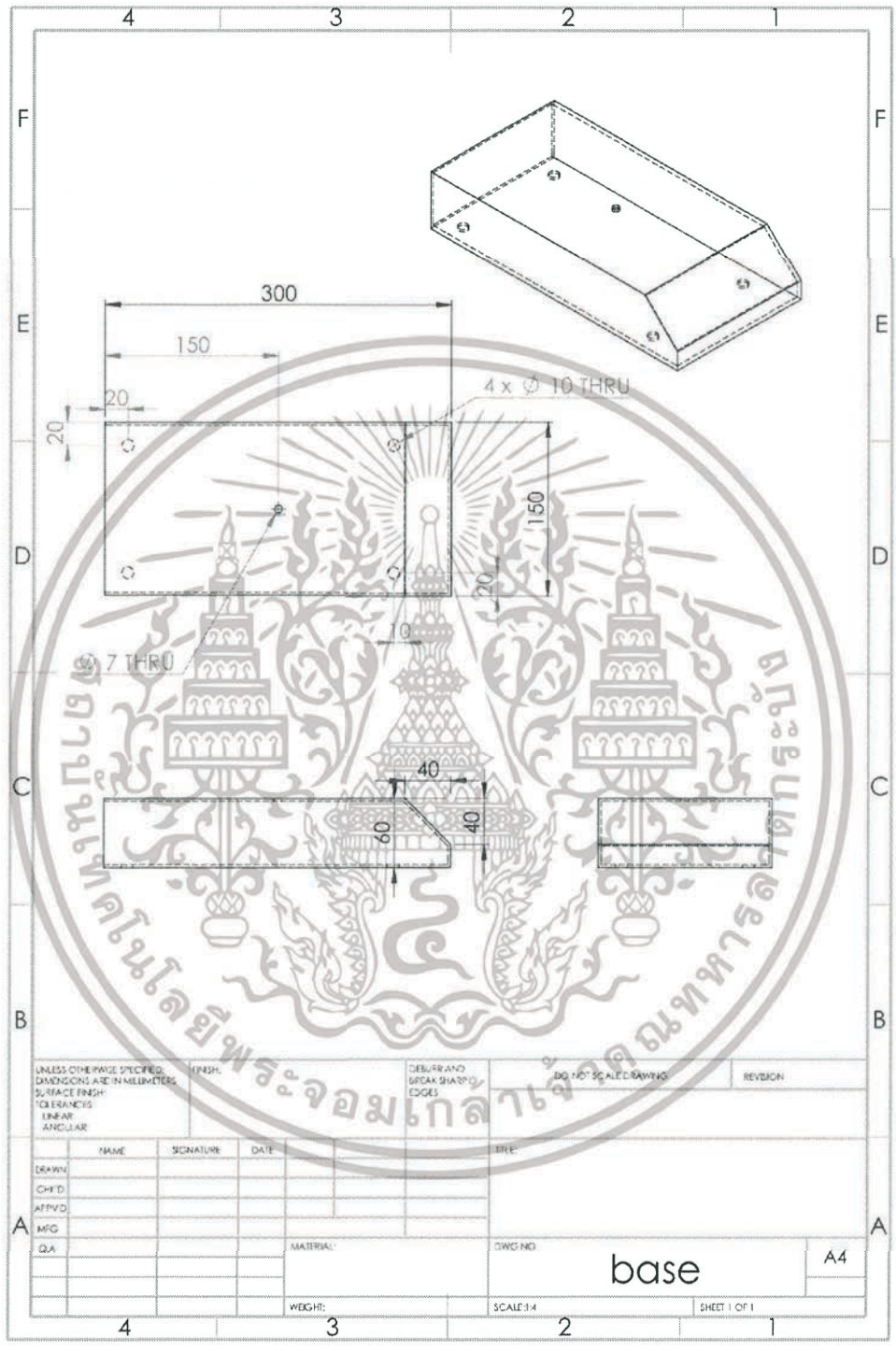
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

เครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ฐานเครื่องวัดความไม่สมดุลพัดลมระบายความร้อนเก้าอี้รถยนต์

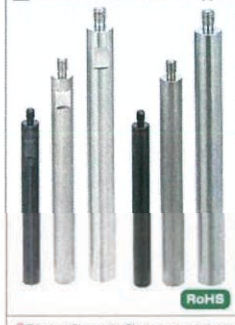
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Circular Posts

One End Threaded One End Tapped, Wrench Flats

■For this product, L dim. can be configured in 0.1mm increments by specifying LKC Alteration.

■One End Threaded One End Tapped

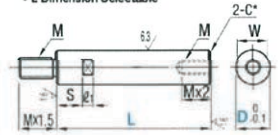


RoHS

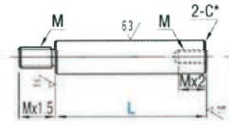
L Dimension Selectable	Type: L Dimension Configurable: Standard	Wrench Flats	Thread Dia. Configurable	Thread Dia. Configurable, Wrench Flats	M Material	S Surface Treatment
-	NETGRF	NETGRS	NETG	NETGS	Steel for General Structure	-
ETKGR	ETKGRF	ETKGRS	ETKG	ETKGS		Black Oxide
PETGR	PETGRF	PETGRS	PETG	PETGS		Electroless Nickel Plating
-	BETGRF	BETGRS	BETG	BETGS		Trivalent Chromate (Black)
SETGR	SETGRF	SETGRS	SETG	SETGS	SUS304	-

* C0.2~0.5 at the corner

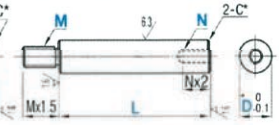
• L Dimension Selectable



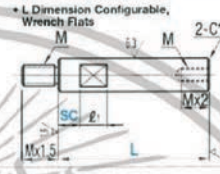
• L Dimension Configurable



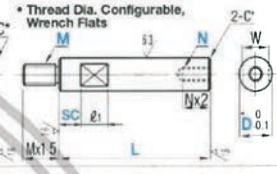
• Thread Dia. Configurable



• L Dimension Configurable, Wrench Flats



• Thread Dia. Configurable, Wrench Flats



Trivalent Chromate (Black) may not always be fully deposited on internal tapped threads.
* D tolerance of trivalent chromate (black) is ±0.05.
SC≤L-ℓ1
Tapping may cause slight swelling of D dimension.
Anti-rust Oil is applied on products made of Steel for General Structure.
Wrench flats vicinity with no surface treatment may become glossy due to barrel grinding.

■L Dimension Selectable

Part Number Type	D	L Selection	M (Coarse)	S	W	ℓ1
Steel for General Structure	6	15 20 25 30 35 40 45 50	3	3.5	5	8
ETKGR	8	20 25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150	4	6	7	
PETGR	10	20 25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 200	5	6	8	
SUS304	12	25 30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 200	6	7.5	10	10
SETGR	15	30 35 40 45 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 200	8	10	13	
	20	40 45 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 200	10	15	17	

■L Dimension Configurable / L Dimension Configurable, Wrench Flats

Part Number Type	D	L 0.5mm Increment	SC 1mm Increment For Wrench Flats Type only	M (Coarse)	W	ℓ1
L Dimension Configurable / Steel for General Structure	5	15~100	0~92	2.6	4	8
	6	15~100	0~92	3	5	
	8	20~200	0~192	4	7	
NETGRF	10	20~400	0~392	5	8	
ETKGRF	12	25~500	0~490	6	10	10
PETGRF	15	30~600	0~590	8	13	
BETGRF	20	40~800	0~790	10	17	
SUS304	25	55~700	0~690	12	22	
SETGRF	30	55~900	0~785	16	27	15
	*35	55~900	0~885	16	30	15
	*40	65~1000	0~980	20	36	20
	*50	80~1000	0~980	24	41	20

* D=35 is applicable only to N E and P.

■Thread Dia. Configurable / Thread Dia. Configurable, Wrench Flats

Part Number Type	D	L 0.5mm Increment	SC 1mm Increment For Wrench Flats Type only	M (Coarse) Selection	N (Coarse) Selection	W	ℓ1
Thread Dia. Configurable / Steel for General Structure	5	15~100	0~92	2.6 3 4	2.6 3	4	8
	6	15~100	0~92	3 4 5	3 4	5	
	8	20~200	0~192	3 4 5 6	3 4 5	7	
	10	20~400	0~392	3 4 5 6 8	3 4 5 6	8	
NETG	12	25~500	0~490	4 5 6 8	4 5 6 8	10	10
ETKG	15	30~600	0~590	5 6 8 10 12	5 6 8 10	13	
BETG	20	40~600	0~590	5 6 8 10 12 16	5 6 8 10 12	17	
	25	55~700	0~690	5 6 8 10 12 16 20	5 6 8 10 12 16	22	
	30	65~800	0~785	5 6 8 10 12 16 20 24	5 6 8 10 12 16 20	27	15
SUS304	*35	80~900	0~885	6 8 10 12 16 20 24	6 8 10 12 16 20 24	30	15
SETG	*40	80~1000	0~980	8 10 12 16 20 24	8 10 12 16 20 24	36	20
	*50	80~1000	0~980	10 12 16 20 24	10 12 16 20 24	41	20

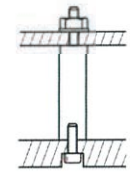
* D=35 is applicable only to N E and P. When L-SC<Nx3, W-N>2 is required. L≥Nx3+2

L Dimension Tolerance
L15~300 ±0.1
L300.5~600 ±0.3
L600.5~1000 ±0.4

Ordering Example

Part Number	L	SC	M	N
ETKGR10	150			
ETKGRF6	32			
ETKG12	250		M6	N8
ETKGS20	400	SC100	M8	N10

Example



เหล็กแท่งรองรับอุปกรณ์ (Circular Posts Rod) แบบ NETG D20 L100 M6 N6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Antivibration Rubber Mounts

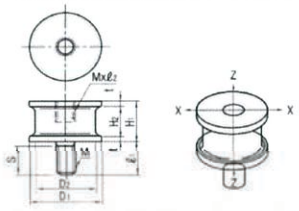
Tapped and Threaded Studs / Tapped Stud, Plate Mount

Takes up little space for installation. For types with slotted studs even easier to install. see P.462.

RoHS

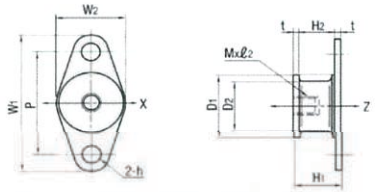
Tapped and Threaded Studs

Type	Material: Main Body	Material: Metal Fitting	Hardness	Accessory
BGONA	Natural Rubber	Steel (Trivalent Chromate)	Shore A60	Nut, Spring Washer 1 pc. each



Tapped Stud, Plate Mount

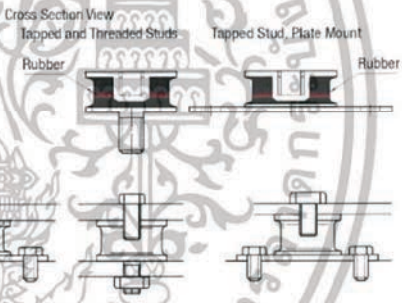
Type	Material: Main Body	Material: Metal Fitting	Hardness
BGONP	Natural Rubber	Steel (Trivalent Chromate)	Shore A60



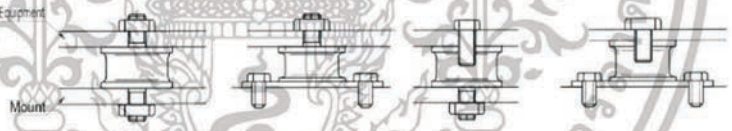
Part Number Type	No.	D1	D2	H1	H2	t	ℓ1	S	M (Screw size)	ℓ2	W1xW2	h	P	Z Direction: Allowable Load N {kgf}	Z Direction: Standard Load N {kgf}	X Direction Allowable Load N {kgf}	Rigidity Ratio KX/KZ	Unit Price: BGONA	Unit Price: BGONP
(Shore A60) Tapped and Threaded Studs BGONA Tapped Stud, Plate Mount BGONP	12160	12	10	16	12.0	2.0	12	11	5	4.5	-	-	-	110 {11}	30-78 {3-8}	62 {63}	25 {2.5}	0.20	
	15150	15	12	15	11.0		15	12						160 {16}	59-139 {6-13}	110 {110}	34 {3.5}	0.24	
	20150	20	15					13		5	49x20		36	280 {29}	98-156 {10-16}	180 {180}	69 {7}	0.18	
	20200			20	16.0				6					180 {18}	59-98 {6-10}	88 {90}	49 {5}	0.22	
	25180	25	20	18	13.4		18	16		6	56x25	7	42	580 {59}	147-239 {15-24}	220 {220}	98 {10}	0.19	
	25270			27	22.4									310 {32}	98-156 {9-16}	110 {110}	59 {6}	0.22	
	30180	30	25	18	13.4	2.3	24	20	8	7.2	62x30	9	46	1700 {170}	415-830 {43-85}	610 {620}	250 {25}	0.15	
	30260			26	21.4									760 {77}	196-370 {20-38}	180 {180}	150 {15}	0.22	
	35260	35	30								69x35		53	1100 {110}	275-550 {28-56}	250 {260}	260 {27}	0.24	
	40250	40	34	25	20.4		30	25			76x40		60	1420 {145}	363-736 {37-71}	340 {350}	320 {33}	0.23	

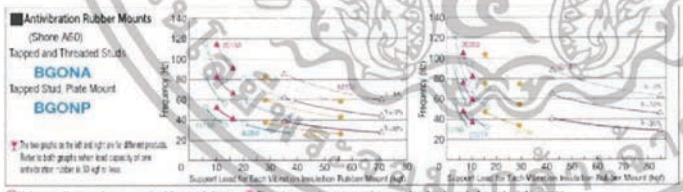
Ordering Example — Part Number: BGONA15150

- Spring constant in X direction is calculated by (Spring Constant in Z Direction x Rigidity Ratio).
- Selection Methods, Mounting Methods, Properties, Cautions ☞P.460



Example





- Values in the graph are nominal for each type.
- The above values are not guaranteed values but a calculated ones.

เลือกยางป้องกันการสั่นสะเทือน (Antivibration Rubber) รุ่น BGONA 20200

ซึ่งจะมีค่าความแข็ง $k = 88000$ และมีอัตราส่วนความแข็ง 0.22 จะได้ทำให้ได้

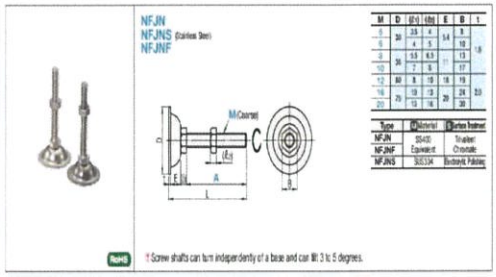
$$k_1 = 88000(0.22) = 19360 \quad \text{นิวตัน/เมตร}$$

$$k_2 = 88000 \quad \text{นิวตัน/เมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Note that, for some of the types shown here, order might be unable to be received by the MISUMI Indonesia offices.

Leveling Mount
Standard



NFJN
NFJNS (Stainless Steel)
NFJNF

M	D	d(h1)	d(h6)	E	B	L
5	20	3.5	4	5.4	9	18
6		4	5		10	
8	30	5.5	6.5	11	13	
10		7	8		17	
12	50	8	10	18	19	
16	70	10	12	20	24	23
20		13	16		30	

Type	Material	Surface Treatment
NFJN	SS400 Equivalent	Trivalent Chromate
NFJNF		
NFJNS	SUS304	Electrolytic Polishing

* Screw shafts can turn independently of a base and can tilt 3 to 5 degrees.

■A Selectable

Part Number Type	M-A	L	Allowable Vertical Load (kN) NFJN / NFJNS	Mass (g)	Unit Price NFJN	Unit Price NFJNS
NFJN (Stainless Steel) NFJNS	5 - 20	40.5	1.5	15		
	5 - 60	70.5		19		
	6 - 40	51	2.1	21		
	6 - 80	91		28		
	8 - 50	68.1	3.9	53		
	8 - 100	118.1		65		
	10 - 75	94.6	4.3	88		
	10 - 125	116.6		160		
	12 - 50	78	4.9	142		
	12 - 75	103		166		
	12 - 100	128		184		
	12 - 125	153		200		
	12 - 150	178		218		
	16 - 75	107	8.9	207		
	16 - 100	132		217		
	16 - 125	162		356		
	16 - 150	182		383		
	16 - 200	212		422		
	20 - 100	135	8.8	493		
	20 - 125	160		557		
	20 - 150	187		605		
	20 - 200	215		671		

■A configurable in 10mm Increment

Part Number Type	M	A 10mm Increment	L	Unit Price
NFJNF	10	80 - 200	A+19.6	
	12	90 - 250	A+28	
	16	80 - 300	A+30	
	20	140 - 300	A+35	

* Size of barrel is on packet.

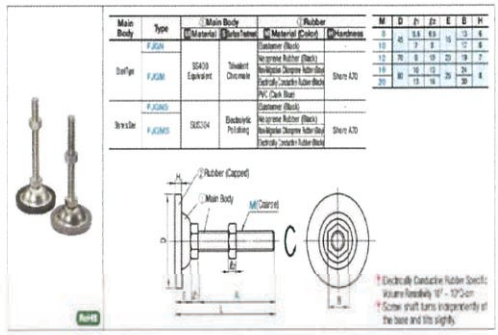
Ordering Example: Part Number - A

Alteration: Part Number - WC, WK, SC, WKB

* For NFJN only. * No plating on alteration-applied portions. * For any alterations other than the above, please request a quotation.

Alterations	Square Flats	Hex Flats	Wrench Flats	Hex Wrench Socket Machining
Code	WC	WK	SC	WKB
Spec.	Accepted Screw M	Accepted Screw M	Accepted Screw M	Accepted Screw M

Leveling Mount
Non-Slip



Main Body Type	Main Body ① Material	Main Body ② Surface Treatment	Rubber ① Material (Color)	Rubber ② Hardness
Steel Type	FJGN	SS400 Equivalent	Trivalent Chromate	Elastomer (Black)	Shore A70
	FJGM		Neoprene Rubber (Black) / Nitrile Rubber (Neoprene Rubber-Base) / Electrically Conductive Rubber (Black)	
Stainless Steel Type	FJGNS	SUS304	Electrolytic Polishing	Elastomer (Black)	Shore A70
	FJGMS		Neoprene Rubber (Black) / Nitrile Rubber (Neoprene Rubber-Base) / Electrically Conductive Rubber (Black)	

M	D	J1	J2	E	B	H
8	40	5.5	6.5	15	13	6
10		7	8		17	8
12	70	8	10	25	19	7
16	90	10	12	35	24	8
20		13	16		30	

* Rubber (Capped)
* Main Body
* Electrically Conductive Rubber Specific Volume Resistivity 10^7 - 10^9 Ω·cm
* Screw shaft turns independently of the base and tilts slightly.

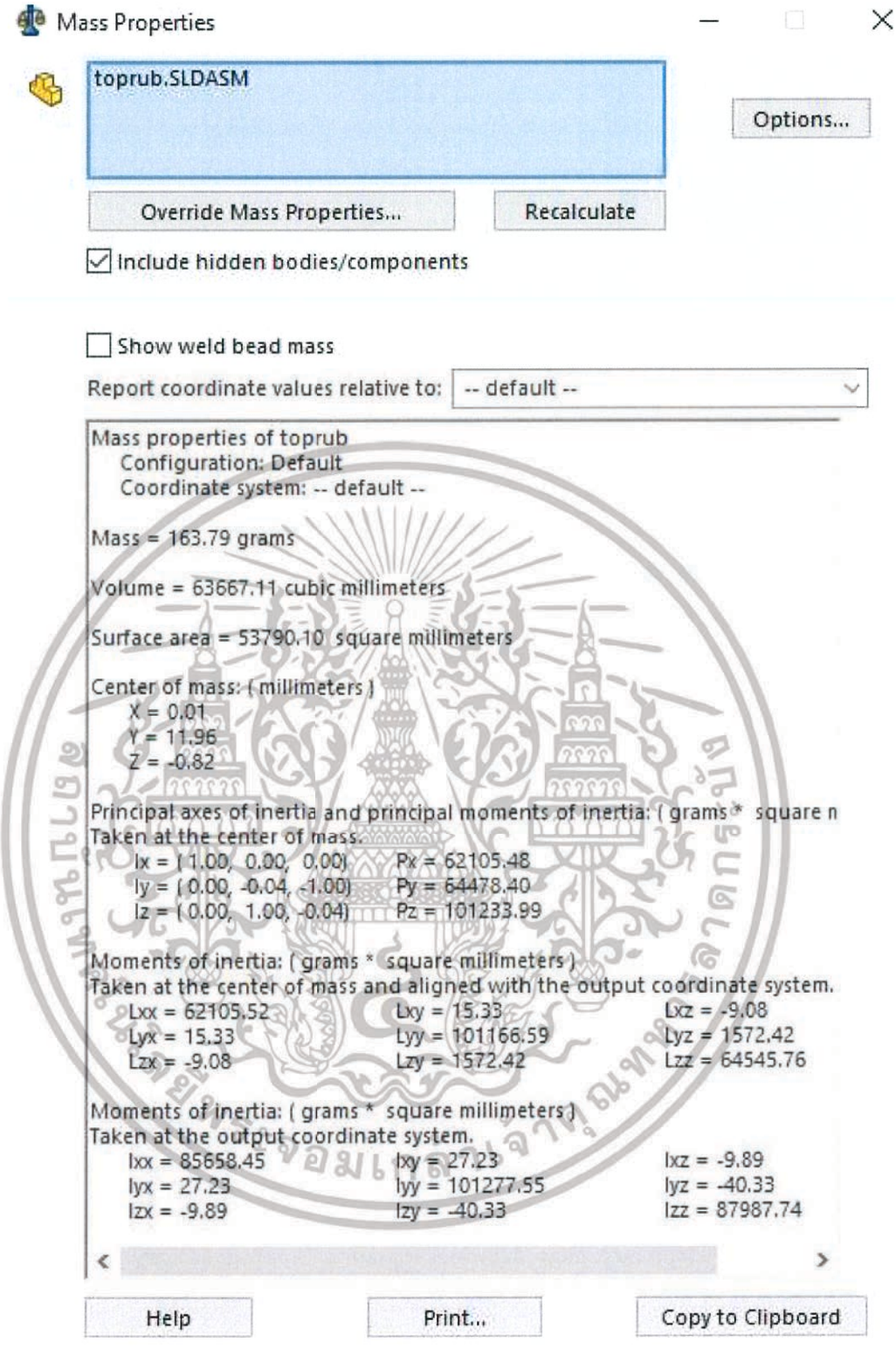
Part Number Type	M-A	FJGM / FJGMS Rubber Material	L	Allowable Vertical Load (kN)	Mass (g)	Unit Price FJGN	FJGM R	FJGM C	FJGM D	FJGM S	FJGMS	FJGMS R	FJGMS C	FJGMS D
FJGN FJGM FJGNS FJGMS	8 - 50	R (Nitrile Rubber) C (Neoprene Rubber) D (Electrically Conductive Rubber) S (NBR)	70.5	3.9	50					-				
	8 - 100		120.5		70					-				
	10 - 75		97	4.3	91					-				
	10 - 100		122		103					-				
	12 - 75		106		178					-				
	12 - 100		131	8.9	196									
	16 - 100		134		212									
	16 - 125		161		221					-				
	16 - 150		210		301					-				
	16 - 200		235		321									
	20 - 100		165	8.8	302									
	20 - 125		190		357					-				
	20 - 150		216		426									
	20 - 200		268		541		-	-	-	-		-	-	-
	25 - 125		198	13.7	473		-	-	-	-		-	-	-
	25 - 150		224		554		-	-	-	-		-	-	-
	25 - 200		276		723		-	-	-	-		-	-	-

* The symbol inside the rubber material is for FJGN and FJGNS. Elastomer is silent. * For rubber and stainless steel.

Ordering Example: Part Number - Rubber Material

Leveling Mount NFJN 10-100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

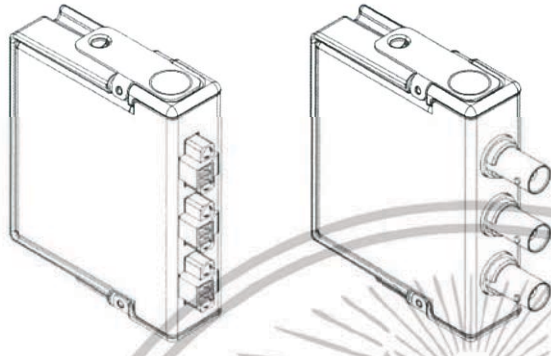
NI cDAQ 9232 Data Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DATASHEET

NI 9232

3 AI, ±30 V, 24 Bit, 102.4 kS/s/ch Simultaneous



- Screw-terminal or BNC connectivity
- Software-selectable AC/DC coupling
- Software-selectable IEPE signal conditioning (0 mA or 4 mA)
- Smart TEDS sensor compatibility
- 60 VDC, CAT I, channel-to-earth isolation

The NI 9232 is a 3-channel C Series dynamic signal acquisition module for making industrial measurements from integrated electronic piezoelectric (IEPE) and non-IEPE sensors with NI CompactDAQ or NI CompactRIO systems.

NATIONAL INSTRUMENTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C SERIES DYNAMIC SIGNAL ACQUISITION MODULE COMPARISON

Product Name	Signal Ranges	Channels	Sample Rate	Input Configurations	Noise at Maximum Sample Rate	Connectivity	Isolation Continuous
NI 9218	±5 V	2	51.2 kS/s/ch	IEPE with AC Coupling	50 µVrms	9-Position DSUB, LEMO	60 VDC Ch-Ch
NI 9230	±30 V	3	12.8 kS/s/ch	IEPE with AC Coupling, AC Coupling, DC Coupling	106 µVrms	Screw Terminal, BNC	60 VDC Ch-Earth
NI 9232	±30 V	3	102.4 kS/s/ch	IEPE with AC Coupling, AC Coupling, DC Coupling	251 µVrms	Screw Terminal, BNC	60 VDC Ch-Earth
NI 9234	±5 V	4	51.2 kS/s/ch	IEPE with AC Coupling, AC Coupling, DC Coupling	50 µVrms	BNC	None
NI 9251	3 Vrms (±4.243 V)	2	102.4 kS/s/ch	AC Coupling, DC Coupling	9.2 µVrms	mini XLR	None

NI C Series Overview

NI provides more than 100 C Series modules for measurement, control, and communication applications. C Series modules can connect to any sensor or bus and allow for high-accuracy measurements that meet the demands of advanced data acquisition and control applications.

- Measurement-specific signal conditioning that connects to an array of sensors and signals
- Isolation options such as bank-to-bank, channel-to-channel, and channel-to-earth ground
- -40 °C to 70 °C temperature range to meet a variety of application and environmental needs
- Hot-swappable

The majority of C Series modules are supported in both CompactRIO and CompactDAQ platforms and you can move modules from one platform to the other with no modification.

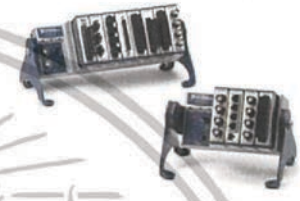
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CompactRIO

CompactRIO combines an open-embedded architecture with small size, extreme ruggedness, and C Series modules in a platform powered by the NI LabVIEW reconfigurable I/O (RIO) architecture. Each system contains an FPGA for custom timing, triggering, and processing with a wide array of available modular I/O to meet any embedded application requirement.

CompactDAQ

CompactDAQ is a portable, rugged data acquisition platform that integrates connectivity, data acquisition, and signal conditioning into modular I/O for directly interfacing to any sensor or signal. Using CompactDAQ with LabVIEW, you can easily customize how you acquire, analyze, visualize, and manage your measurement data.

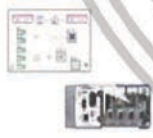


Software

LabVIEW Professional Development System for Windows

- Use advanced software tools for large project development
- Generate code automatically using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Use advanced measurement analysis and digital signal processing
- Take advantage of open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Build DLLs, executables, and MSI installers

NI LabVIEW FPGA Module



- Design FPGA applications for NI RIO hardware
- Program with the same graphical environment used for desktop and real-time applications
- Execute control algorithms with loop rates up to 300 MHz
- Implement custom timing and triggering logic, digital protocols, and DSP algorithms
- Incorporate existing HDL code and third-party IP including Xilinx IP generator functions
- Purchase as part of the LabVIEW Embedded Control and Monitoring Suite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

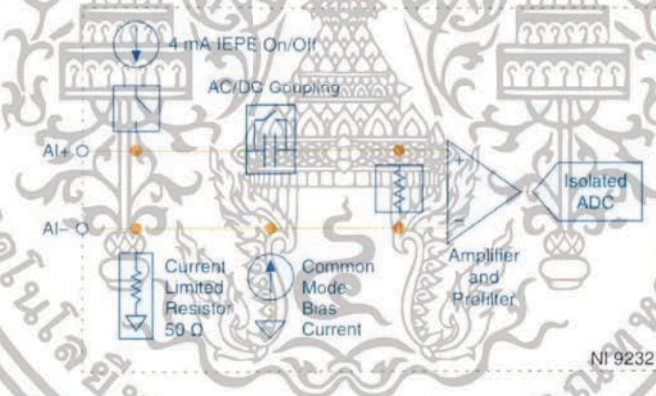
NI LabVIEW Real-Time Module

- Design deterministic real-time applications with LabVIEW graphical programming
- Download to dedicated NI or third-party hardware for reliable execution and a wide selection of I/O
- Take advantage of built-in PID control, signal processing, and analysis functions
- Automatically take advantage of multicore CPUs or set processor affinity manually
- Take advantage of real-time OS, development and debugging support, and board support
- Purchase individually or as part of a LabVIEW suite

Circuitry

The NI 9232 analog input channels are referenced to an isolated ground through a 50 Ω resistor. Each channel is protected from overvoltages. The input signal on each channel is buffered, conditioned, and then sampled by an isolated 24-bit Delta-Sigma ADC. You can configure each channel in software for AC or DC coupling. For channels set to AC coupling, you can turn the IEPE excitation current on or off. Refer to the software help for information about configuring channels on the NI 9232.

Figure 1. Input Circuitry for One Channel



The NI 9232 also has TEDS circuitry. For more information about TEDS, visit `ni.com/info` and enter the Info Code `rdteds`.

Filtering

The NI 9232 uses a combination of analog and digital filtering to provide an accurate representation of in-band signals while rejecting out-of-band signals. The filters discriminate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

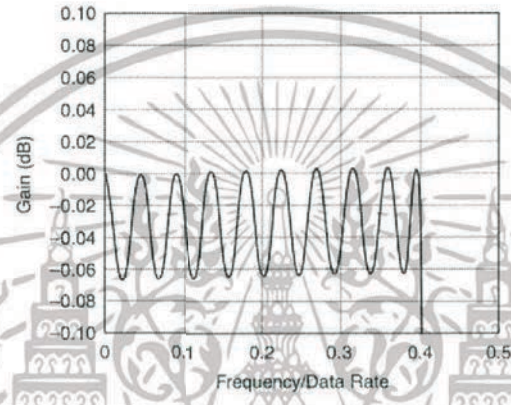
between signals based on the frequency range, or bandwidth, of the signal. The three important bandwidths to consider are the passband, the stopband, and the alias-free bandwidth.

The NI 9232 represents signals within the passband, as quantified primarily by passband ripple and phase nonlinearity. All signals that appear in the alias-free bandwidth are either unaliased signals or signals that have been filtered by at least the amount of the stopband rejection.

Passband

The signals within the passband have frequency-dependent gain or attenuation. The small amount of variation in gain with respect to frequency is called the passband flatness. The digital filters of the NI 9232 adjust the frequency range of the passband to match the data rate. Therefore, the amount of gain or attenuation at a given frequency depends on the data rate.

Figure 2. Typical Passband Flatness



Stopband

The filter significantly attenuates all signals above the stopband frequency. The primary goal of the filter is to prevent aliasing. Therefore, the stopband frequency scales precisely with the data rate. The stopband rejection is the minimum amount of attenuation applied by the filter to all signals with frequencies within the stopband.

Alias-Free Bandwidth

Any signal that appears in the alias-free bandwidth of the NI 9232 is not an aliased artifact of signals at a higher frequency. The alias-free bandwidth is defined by the ability of the filter to reject frequencies above the stopband frequency, and it is equal to the data rate minus the stopband frequency.

Data Rates

The frequency of a master timebase (f_M) controls the data rate (f_s) of the NI 9232.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Internal Master Timebase

The NI 9232 includes an internal master timebase with a frequency of 13.1072 MHz. When using the internal master timebase, the result is data rates of 102.4 kS/s, 51.2 kS/s, 34.13 kS/s, 25.6 kS/s, and so on down to 0.98 kS/s, depending on the decimation rate and the value of the clock divider. However, the data rate must remain within the appropriate data rate range.

The following equation provides the available data rates of the NI 9232:

$$f_s = \frac{f_M}{2 \times m \times n}$$

where

f_s is the data rate
f_M is the master timebase
m is the decimation rate
n is the clock divider from 1 to 26

There are multiple combinations of clock divider and decimation rate that yield the same data rate. The software always picks the highest decimation rate for the selected data rate.

Data Rates with the Internal Master Timebase

The following table lists the available data rates with the internal master timebase.

Table 1. Available Data Rates with the Internal Master Timebase

f_s (kS/s)	Decimation Rate	Clock Divider
102.40	64	1
51.20	128	1
34.13	64	3
25.60	256	1
20.48	64	5
17.07	128	3
14.63	64	7
12.80	256	2
11.38	64	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Available Data Rates with the Internal Master Timebase (Continued)

f_s (kS/s)	Decimation Rate	Clock Divider
10.24	128	5
9.31	64	11
8.53	256	3
7.88	64	13
7.31	128	7
6.83	64	15
6.40	256	4
6.02	64	17
5.69	128	9
5.39	64	19
5.12	256	5
4.88	64	21
4.65	128	11
4.45	64	23
4.27	256	6
4.10	64	25
3.94	128	13
3.66	256	7
3.41	128	15
3.20	256	8
3.01	128	17
2.84	256	9
2.69	128	19
2.56	256	10
2.44	128	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. Available Data Rates with the Internal Master Timebase (Continued)

f_s (kS/s)	Decimation Rate	Clock Divider
2.33	256	11
2.23	128	23
2.13	256	12
2.05	128	25
1.97	256	13
1.83	256	14
1.71	256	15
1.60	256	16
1.51	256	17
1.42	256	18
1.35	256	19
1.28	256	20
1.22	256	21
1.16	256	22
1.11	256	23
1.07	256	24
1.02	256	25
0.98	256	26

External Master Timebase

The NI 9232 also can accept an external master timebase or export its own master timebase. To synchronize the data rate of an NI 9232 with other modules that use master timebases to control sampling, all of the modules must share a single master timebase source. When using an external timebase with a frequency other than 13.1072 MHz, the NI 9232 has a different set of data rates. Refer to the software help for information about configuring the master timebase source for the NI 9232.

Note The NI 9151 R Series Expansion chassis does not support sharing timebases between modules.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NI 9232 Specifications

The following specifications are typical for the range -40 °C to 70 °C unless otherwise noted.

Caution Do not operate the NI 9232 in a manner not specified in this document. Product misuse can result in a hazard. You can compromise the safety protection built into the product if the product is damaged in any way. If the product is damaged, return it to NI for repair.

Input Characteristics

Number of channels	3 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode	Simultaneous
Type of TEDS supported	IEEE 1451.4 TEDS Class I
TEDS capacitive drive	3000 pF
Internal master timebase (f_M)	
Frequency	13.1072 MHz
Accuracy	±100 ppm
Data rate range (f_s) using internal master timebase	
Minimum	0.985 kS/s
Maximum	102.4 kS/s
Data rate range (f_s) using external master timebase	
Minimum	0.977 kS/s
Maximum	102.73 kS/s

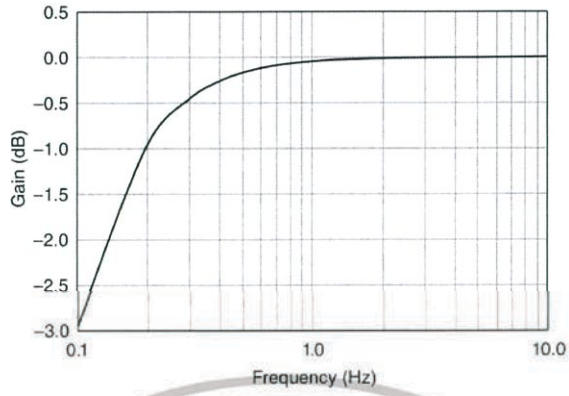
Figure 3. Data Rates (f_s)

$$\frac{f_M}{2 \times m \times n}$$

Input coupling	AC/DC (software-selectable)
AC cutoff frequency	
-3 dB	0.1 Hz
-0.1 dB	0.87 Hz maximum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 4. AC Cutoff Frequency Response



DC voltage input range	
Minimum	±30.87 V
Typical	±31.5 V
Maximum	±32.13 V
AC voltage full-scale range[1]	
Minimum	±30.87 Vpk
Typical	±31.5 Vpk
Maximum	±32.13 Vpk
Channel-to-channel common-mode voltage range (AI- to AI-)	±1 V maximum
IEPE excitation current (software-selectable on/off)	
Minimum	4 mA
Typical	4.25 mA
IEPE excitation noise	100 nArms
IEPE compliance voltage	22 V minimum

If you are using an IEPE sensor, use the following equation to make sure your configuration meets the IEPE compliance voltage range.

Figure 5. IEPE Compliance Voltage Range

$$\left(0.67 \times V_{\text{common-mode}} + V_{\text{bias}} \pm V_{\text{full-scale}}\right)$$

[1] The DC + AC voltage must be below the overvoltage protection of the NI 9232.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where

$V_{common\text{-}mode}$ is the channel-to-channel common-mode voltage across two or more channels

V_{bias} is the bias voltage of the IEPE sensor

$V_{full\text{-}scale}$ is the full-scale voltage of the IEPE sensor

Note This equation must resolve to 0 V to 22 V.

IEPE fault detection[2]

Short circuit	V AI < 1.5 V
Open loop	V AI > 24 V

Overvoltage protection ±45 V for a low impedance source connected between any two terminals

Input delay

64x decimation	$30/f_s + 3.0\ \mu s$
128x decimation	$29/f_s + 3.0\ \mu s$
256x decimation	$28/f_s + 3.0\ \mu s$

Table 2. Accuracy

	Measurement Conditions	Percent of Reading (Gain Error)	Percent of Range[3] (Offset Error)[4]
Calibrated	Maximum (-40 °C to 70 °C)	±0.60%	±0.23%
	Typical (23 °C, ±5 °C)	±0.10%	±0.023%
Uncalibrated[5]	Maximum (-40 °C to 70 °C)	±1.50%	±0.59%
	Typical (23 °C, ±5 °C)	±0.40%	±0.12%

Stability

Gain drift	±25 ppm/°C
Offset drift (DC coupled)	±320 µV/°C

[2] Refer to the software help for information on reading the IEPE fault detection status.
[3] Range equals 31.5 V
[4] DC coupled
[5] Uncalibrated accuracy refers to the accuracy achieved when acquiring data in raw or unscaled modes and in which calibration constants that are stored in the module are not applied to the data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. Gain Matching (Calibrated)

Frequency Band	20 Hz to 40.96 kHz	
	Typical	Maximum
Channel-to-channel	25 mdB	120 mdB

Table 4. Phase Matching (Maximum)

Frequency Band	20 Hz to 40.96 kHz
Channel-to-channel	$(0.022°/\text{kHz} \times f_{in}) + 0.045°$
Module-to-module	$(0.022°/\text{kHz} \times f_{in}) + 0.045° + (360° \times f_{in} / f_M)$

Passband frequency	$0.4 \cdot f_s$

Table 5. Flatness (Peak-to-Peak)

Frequency Band	20 Hz to 20.48 kHz	20 hz to 40.96 kHz
Typical	70 mdB	75 mdB
Maximum	75 mdB[6]	100 mdB[7]

Table 6. Phase Nonlinearity (Maximum)

Frequency Band	20 Hz to 20.48 kHz	20 Hz to 40.96 kHz
AC Coupled	0.31°	0.31°
DC Coupled	0.025°	0.19°

Stopband	
Frequency	$0.5 \cdot f_s$
Rejection	120 dB
Alias-free bandwidth	$0.4 \cdot f_s$
Oversample rate	$64 \cdot f_s$, $128 \cdot f_s$, and $256 \cdot f_s$

[6] For conformal coated version, the maximum flatness for 20 Hz to 20.48 kHz is 76 mdB.
[7] For conformal coated version, the maximum flatness for 20 Hz to 40.96 kHz is 102 mdB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rejection at oversample rate[8]	
f_s = 10.24 kS/s	95 dB at 1.311 MHz
f_s = 102.4 kS/s	120 dB at 6.554 MHz
Crosstalk (f_{in} = 1 kHz)	-125 dB
CMRR	
Channel-to-channel ($f_{in} \leq$ 1 kHz)	56 dB
Channel-to-earth (f_{in} = 60 Hz)	107 dB
SFDR (f_{in} = 1 kHz, -60 dBFS)	
f_s = 102.4 kS/s	120 dBFS
f_s = 51.2 kS/s	123 dBFS
f_s = 25.6 kS/s	126 dBFS

Table 7. Input Noise

Data Rate	102.4 kS/s	51.2 kS/s	25.6 kS/s
AC coupled	251 µVrms	171 µVrms	127 µVrms
DC coupled	223 µVrms	150 µVrms	112 µVrms

Table 8. Dynamic range (f_{in} = 1 kHz, -60 dBFS)

Data Rate	102.4 kS/s	51.2 kS/s	25.6 kS/s
AC coupled	99 dBFS	102 dBFS	105 dBFS
DC coupled	100 dBFS	103 dBFS	106 dBFS

Input impedance	
Differential	324 kΩ
AI- to isolated ground	50 Ω

[8] Rejection of analog prefilter at oversample rate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 9. Total Harmonic Distortion (THD)

Input Amplitude	1 kHz	10 kHz
-10.5424 dBFS	-95 dB	-85 dB
-20 dBFS	-95 dB	-85 dB

Intermodulation distortion (-10.5424 dBFS)	
DIN 250 Hz/8 kHz 4:1 amplitude ratio	-80 dB
CCIF 11 kHz/12 kHz 1:1 amplitude ratio	-100 dB

Power Requirements

Power consumption from chassis	
Active mode	1 W maximum
Sleep mode	25 µW maximum
Thermal dissipation (at 70 °C)	
Active mode	1 W maximum
Active mode (BNC variant)	1.5 W maximum
Sleep mode	25 µW maximum

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Tip For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit *ni.com/dimensions* and search by module number.

Screw-terminal wiring	
Gauge	0.05 mm^2 to 1.5 mm^2 (30 AWG to 14 AWG) copper conductor wire
Wire strip length	6 mm (0.24 in.) of insulation stripped from the end
Temperature rating	90 °C minimum
Torque for screw terminals	0.22 N · m to 0.25 N · m (1.95 lb · in. to 2.21 lb · in.)
Wires per screw terminal	One wire per screw terminal; two wires per screw terminal using a 2-wire ferrule
Ferrules	0.25 mm^2 to 1.5 mm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connector securement	
Securement type	Screw flanges provided
Torque for screw flanges	0.2 N · m (1.80 lb · in.)
Weight	
NI 9232 with screw terminal	142 g (5.0 oz)
NI 9232 with BNC	159 g (5.6 oz)

Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits.

Isolation	
Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	
Continuous	60 VDC, Measurement Category I
Withstand	1,000 Vrms, verified by a 5 s dielectric withstand test

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.

Caution Do not connect the NI 9232 to signals or use for measurements within Measurement Categories II, III, or IV.

Note Measurement Categories CAT I and CAT O are equivalent. These test and measurement circuits are not intended for direct connection to the MAINS building installations of Measurement Categories CAT II, CAT III, or CAT IV.

Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nA IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nA IIC T4
Europe (ATEX) and International (IECEx)	Ex nA IIC T4 Gc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Safety and Hazardous Locations Standards

This product is designed to meet the requirements of the following electrical equipment safety standards for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1
- EN 60079-0:2012, EN 60079-15:2010
- IEC 60079-0: Ed 6, IEC 60079-15; Ed 4
- UL 60079-0; Ed 6, UL 60079-15; Ed 4
- CSA 60079-0:2011, CSA 60079-15:2012

Note For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Industrial immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- EN 55022 (CISPR 22): Class A emissions
- EN 55024 (CISPR 24): Immunity
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 22: Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions

Note In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.

Note Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.

Note For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the *Online Product Certification* section.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CE Compliance CE

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2014/35/EU; Low-Voltage Directive (safety)
- 2014/30/EU; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)
- 2014/34/EU; Potentially Explosive Atmospheres (ATEX)

Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit *ni.com/certification*, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system.

Operating vibration	
Random (IEC 60068-2-64)	5 g_{rms}, 10 Hz to 500 Hz
Sinusoidal (IEC 60068-2-6)	5 g, 10 Hz to 500 Hz
Operating shock (IEC 60068-2-27)	30 g, 11 ms half sine; 50 g, 3 ms half sine; 18 shocks at 6 orientations

Environmental

Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 °C to 70 °C
Storage temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40 °C to 85 °C
Ingress protection	IP40
Operating humidity (IEC 60068-2-78)	10% RH to 90% RH, noncondensing
Storage humidity (IEC 60068-2-78)	5% RH to 95% RH, noncondensing
Pollution Degree	2
Maximum altitude	5,000 m

Indoor use only.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at *ni.com/environment*. This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

EU Customers At the end of the product life cycle, all NI products must be disposed of according to local laws and regulations. For more information about how to recycle NI products in your region, visit *ni.com/environment/weee*.

电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）

中国客户 National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令（RoHS）。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 ni.com/environment/rohs_china。（For information about China RoHS compliance, go to ni.com/environment/rohs_china.）

Calibration

You can obtain the calibration certificate and information about calibration services for the NI 9232 at *ni.com/calibration*.

Calibration interval	1 year

Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at ni.com/trademarks for information on NI trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering NI products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the patents.txt file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at ni.com/patents. You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the readme file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at ni.com/legal/export-compliance for the NI global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data. NI MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN AND SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY ERRORS. *U.S. Government Customers: The data contained in* this manual was developed at private expense and is subject to the applicable limited rights and restricted data rights as set forth in FAR 52.227-14, DFAR 252.227-7014, and DFAR 252.227-7015.

© 2015 National Instruments. All rights reserved.

373932A-02 Dec15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

PCB Piezotronics, Inc. Model: 352C65

ICP® accel., 100 mV/g, 0.5 to 10k เฮิรตซ์, 5-44 side conn. ±50g

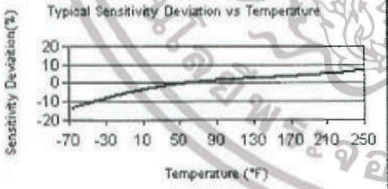
Data Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model Number	ICP® ACCELEROMETER	Revision: L
352C65		ECN #: 16511

	ENGLISH	SI	
Performance			
Sensitivity (±10 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s²)	
Measurement Range	±50 g pk	±491 m/s² pk	
Frequency Range (±5 %)	0.5 to 10000 Hz	0.5 to 10000 Hz	
Frequency Range (±10 %)	0.3 to 12000 Hz	0.3 to 12000 Hz	
Frequency Range (±3 dB)	0.2 to 20000 Hz	0.2 to 20000 Hz	
Resonant Frequency	≥35 kHz	≥35 kHz	
Phase Response (±5 °) (at 70° F [21° C])	2 to 6000 Hz	2 to 6000 Hz	
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.00016 g rms	0.0015 m/s² rms	[1]
Non-Linearity	≤1 %	≤1 %	[3]
Transverse Sensitivity	≤5 %	≤5 %	[4]
Environmental			
Overload Limit (Shock)	±5000 g pk	±49050 m/s² pk	
Temperature Range (Operating)	-65 to +200 °F	-54 to +93 °C	[2]
Temperature Response	See Graph	See Graph	
Base Strain Sensitivity	<0.005 g/με	<0.05 (m/s²)/με	[1]
Electrical			
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	≤300 ohms	≤300 ohms	
Output Bias Voltage	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC	
Discharge Time Constant	0.8 to 2.4 sec	0.8 to 2.4 sec	
Settling Time (within 10% of bias)	<10 sec	<10 sec	
Spectral Noise (1 Hz)	60 μg/√Hz	588 (μm/s²)/√Hz	[1]
Spectral Noise (10 Hz)	16 μg/√Hz	157 (μm/s²)/√Hz	[1]
Spectral Noise (100 Hz)	5 μg/√Hz	49 (μm/s²)/√Hz	[1]
Spectral Noise (1 kHz)	1.5 μg/√Hz	14.7 (μm/s²)/√Hz	[1]
Physical			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic	
Sensing Geometry	Shear	Shear	
Housing Material	Titanium	Titanium	
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic	
Size (Hex x Height)	0.31 in x 0.42 in	7.9 mm x 10.7 mm	
Weight	0.070 oz	2.0 gm	[1]
Electrical Connector	5-44 Coaxial	5-44 Coaxial	
Electrical Connection Position	Side	Side	
Mounting Thread	5-40 Male	5-40 Male	
Mounting Torque	8 to 12 in-lb	90 to 135 N-cm	

Typical Sensitivity Deviation vs Temperature



CE [5]

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.

ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

OPTIONAL VERSIONS

Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

A - Adhesive Mount [6]
Supplied Accessory: Model 080A90 Quick Bonding Gel (1) replaces Model 080A15

HT - High temperature; extends normal operation temperatures

Frequency Range (5 %)	5 Hz	5 Hz
Frequency Range (10 %)	3 Hz	3 Hz
Frequency Range (3 dB)	2 Hz	2 Hz
Temperature Range (Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C
Discharge Time Constant	0.08 to 0.24 sec	0.08 to 0.24 sec
Broadband Resolution (1 to 10000 Hz)	0.0002 g rms	0.002 m/s² rms
Spectral Noise (1 Hz)	75 μg/√Hz	736 (μm/s²)/√Hz
Spectral Noise (10 Hz)	25 μg/√Hz	245 (μm/s²)/√Hz
Spectral Noise (100 Hz)	5 μg/√Hz	49 (μm/s²)/√Hz
Spectral Noise (1 kHz)	1.5 μg/√Hz	14.7 (μm/s²)/√Hz

J - Ground Isolated

Frequency Range (5 %)	8 kHz	8 kHz
Frequency Range (10 %)	10 kHz	10 kHz
Frequency Range (3 dB)	16 kHz	16 kHz
Resonant Frequency	≥30 kHz	≥30 kHz
Electrical Isolation (Base)	$>10^8$ ohms	$>10^8$ ohms
Size (Hex x Height)	0.37 in x 0.55 in	9.5 mm x 14.0 mm
Weight	0.1 oz	2.8 gm

M - Metric Mount

Mounting Thread	M3 x 0.50 Male	M3 x 0.50 Male

Supplied Accessory: Model M080A15 Adhesive Mounting Base (1) replaces Model 080A15

W - Water Resistant Cable

Electrical Connector	Sealed Integral Cable	Sealed Integral Cable
Electrical Connection Position	Side	Side

NOTES:
[1] Typical.
[2] 200°F to 250°F data valid with HT option only.
[3] Zero-based, least-squares, straight line method.
[4] Transverse sensitivity is typically <= 3%.
[5] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.
[6] Mounting stud removed, adhesive mounting base not required.

SUPPLIED ACCESSORIES:
Model 080A109 Petro Wax (1)
Model 080A15 Adhesive Mounting Base (1)
Model ACS-1 NIST-traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point)

Entered: DS	Engineer: DD	Sales: WDL	Approved: [illegible]	Spec Number:
Date: 11/22/02	Date: 11/22/02	Date: 11/22/2	Date: 11/22/2	8339

PCB PIEZOTRONICS
VIBRATION DIVISION
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
Phone: 716-684-0001
Fax: 716-685-3886
E-Mail: vibration@pcb.com

ภาคผนวก ง.

Keyence LV-11SA

Laser Tachometer

Data Sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LV-11SA

แอมพลิฟายเออร์ยูนิต, ยูนิต Parent, NPN

ข้อมูลจำเพาะ

รุ่น			LV-11SA
ชนิด			หน่วยอุปกรณ์หลัก
ยูนิตหลัก/ยูนิตขยาย			
รุ่นที่ใช้ได้			LV-S61 S41 S41L S31 S71 S22
เอาต์พุตควบคุม			NPN open collector x 2 ของสัญญาณ สูงสุด 40 VDC สูงสุด 100 mA ต่อหนึ่งเอาต์พุต
เวลาตอบสนอง	ยกเว้น LV-S31	ULTRA	4 ms
		SUPER	2 ms
		TURBO	500 µs
		FINE	250 µs
		HSP	80 µs
	โหมดมาตรฐานของ LV-S31		500 µs
	โหมดมาตรฐานของ LV-S31	SPLD2	2 ms
		SPLD3	5 ms
		SPLD4	15 ms
	โหมดความเร็วสูงของ LV-S31		250 µs
อินพุตควบคุม			ต้นกำเนิดการปรับตั้งค่า, การปรับตั้งค่าเริ่มต้น, ปิดการทำงานของปุ่ม, การเลื่อนหน้าจอ/การเพิ่มค่า หรือการลดค่าปรับค่า
จำนวนชุดป้องกันการรบกวน	ULTRA		16
	SUPER		
	TURBO		
	FINE		
	HSP		
การต่อขยายชุดอุปกรณ์			
อัตรา	แรงดันแหล่งจ่ายไฟ		12 ถึง 24 VDC การกระเพื่อม (P-P) 10 % หรือน้อยกว่า, ตามข้อ 2*1
	การสิ้นเปลืองกำลังไฟ	ปกติ	สูงสุด 1.8 W (สูงสุด 75 mA ที่ 12 V, 38 mA ที่ 24 V)
		Eco-ครึ่งหนึ่ง/Eco-ทั้งหมด	สูงสุด 1.68 W (สูงสุด 65.3 mA ที่ 12 V)
ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม	อุณหภูมิแวดล้อมในการทำงาน		-10 ถึง +55 °C (ไม่เป็นน้ำแข็ง)*2
	การสั่นสะเทือน		10 ถึง 55 Hz, แอมพลิจูดสองทาง 1.5 mm, 2 ชั่วโมง สำหรับแต่ละแกนของ X, Y และ Z
วัสดุ	ชุดอุปกรณ์หลัก		ตัวเครื่อง: โพลีคาร์บอเนต
น้ำหนัก			ประมาณ 80 กรัม (รวมสายเคเบิล 2 ม.)

*1 เมื่อเชื่อมต่อเกินกว่า 8 ยูนิตขึ้นไป แรงดันของแหล่งจ่ายไฟจะต้องเท่ากับ 24 VDC การกระเพื่อม (P-P) 10 % หรือน้อยกว่า

*2 ในกรณีเชื่อมต่อหลายยูนิตเข้าด้วยกัน ต้องติดตั้งบนราง DIN ที่เป็นโลหะ และตรวจสอบให้แน่ใจว่าอุณหภูมิแวดล้อมเป็นไปตามข้อกำหนดดังต่อไปนี้

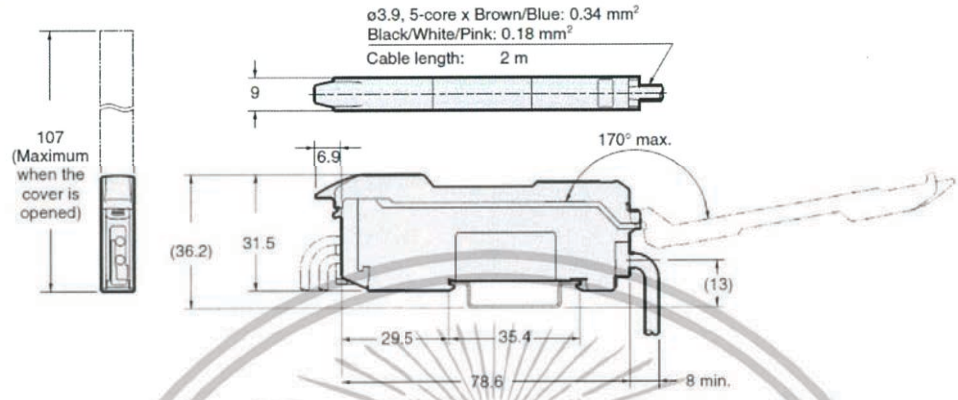
เมื่อเชื่อมต่อ 1 ถึง 2 ยูนิต: -10 ถึง +55 °C, เมื่อเชื่อมต่อ 3 หรือ 10 ยูนิต: -10 ถึง +50 °C, เมื่อเชื่อมต่อ 11 หรือ 16 ยูนิต: -10 ถึง +45 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

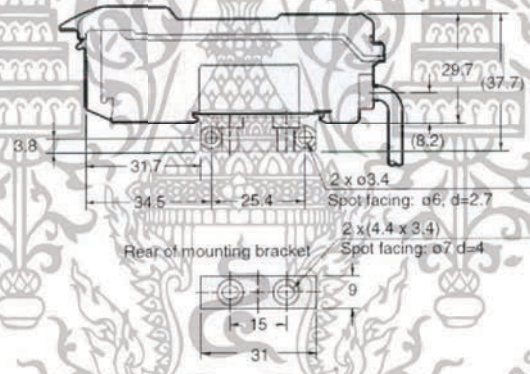
ขนาด

*หากข้อความนี้อ่านยาก โปรดตรวจสอบ CAD หรือคู่มือ

LV-11SA/11SAP



When the mounting bracket (included with LV-11SA(P)) is attached:

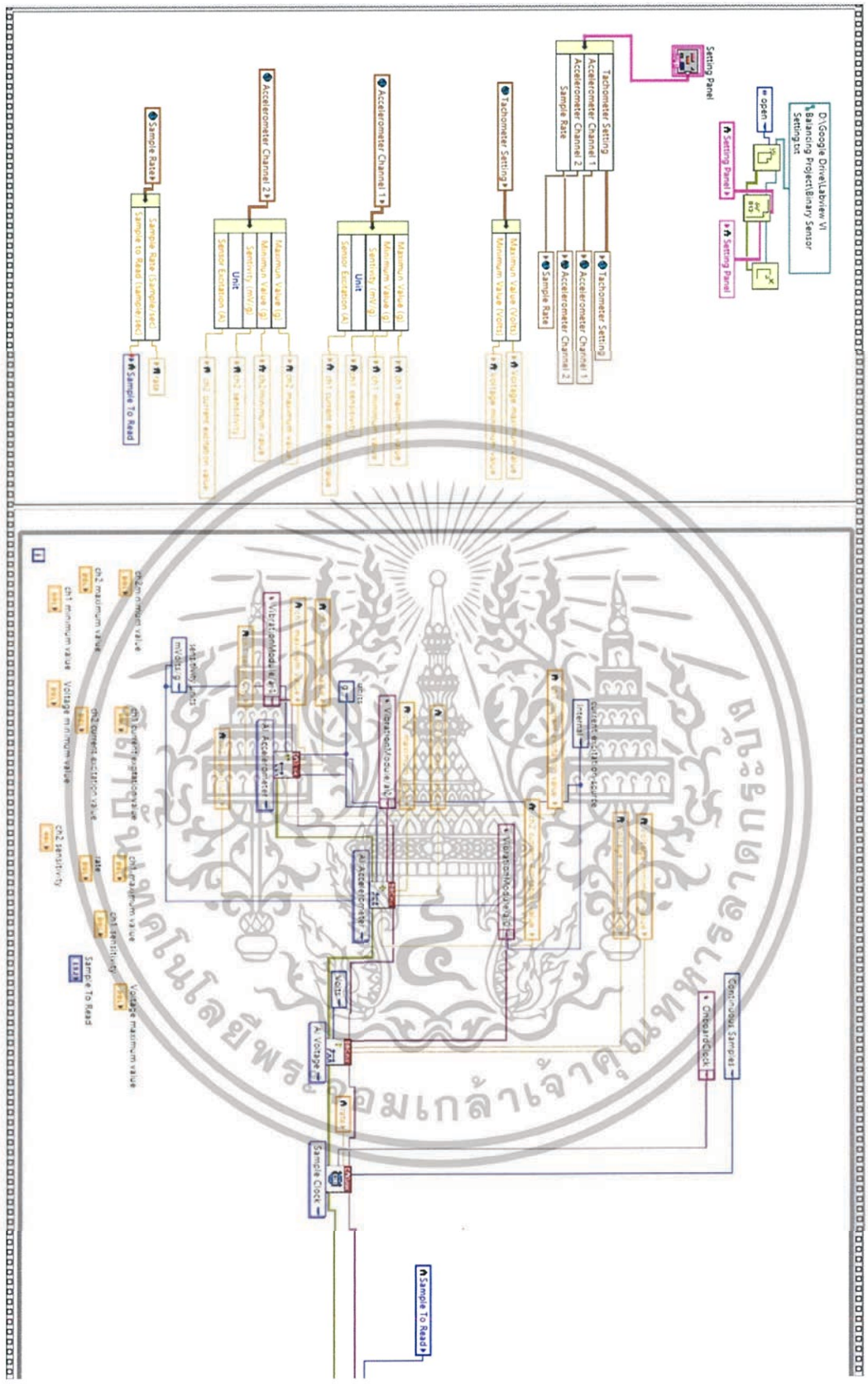


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

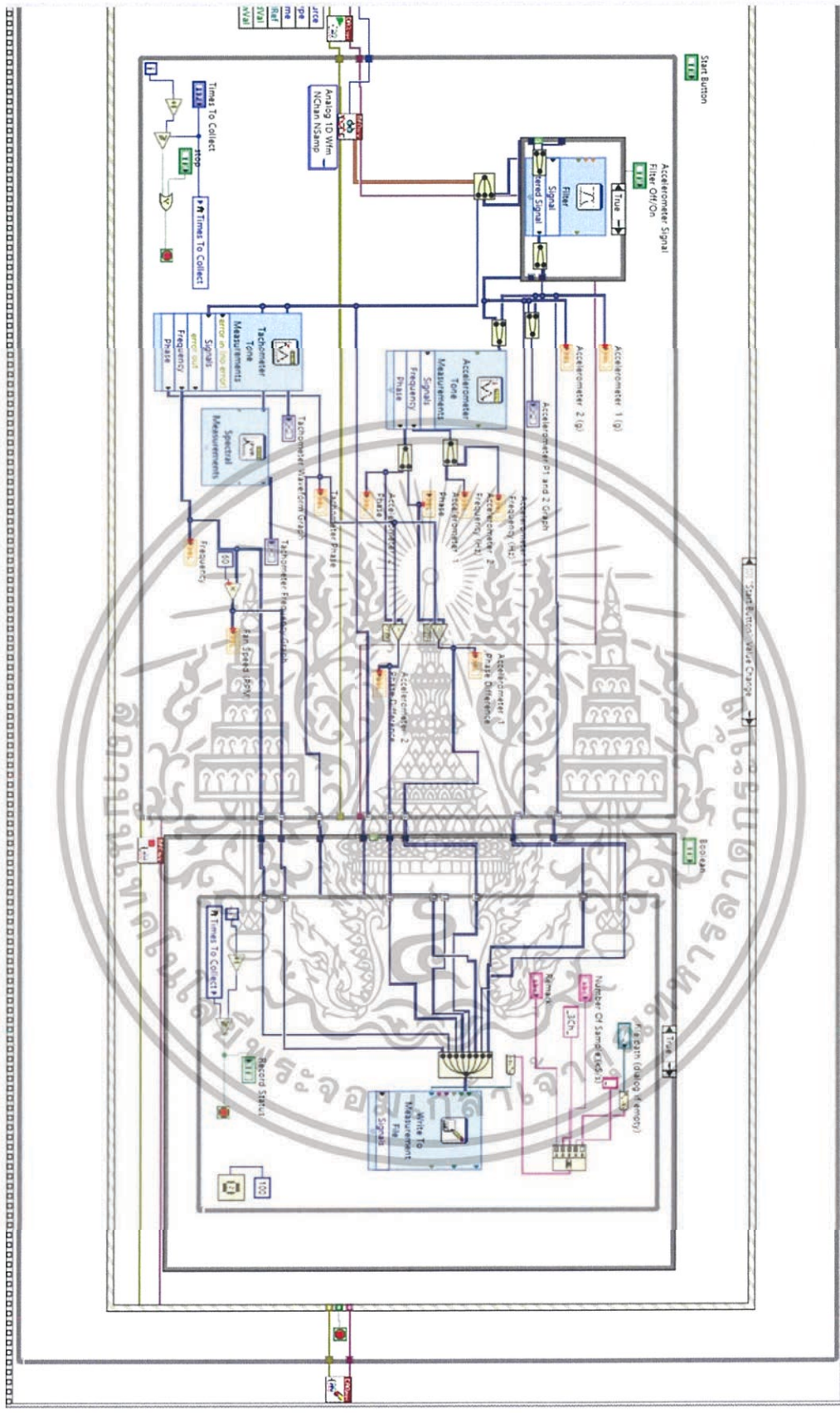
ซอฟท์แวร์ใช้งานจากโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



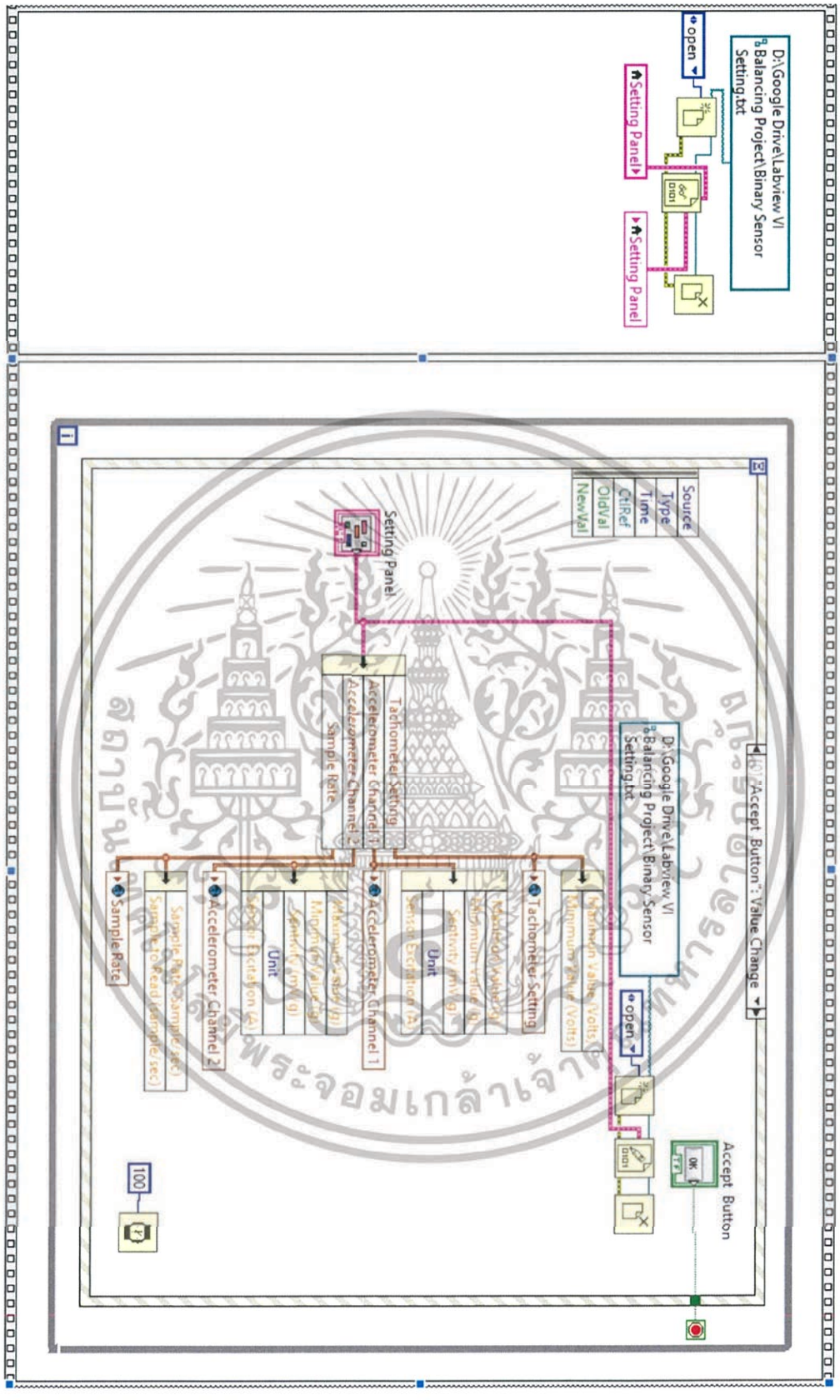
Block Diagram ของภาพรวมการทำงานของโปรแกรมหลักจากซอฟท์แวร์ LabVIEW(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



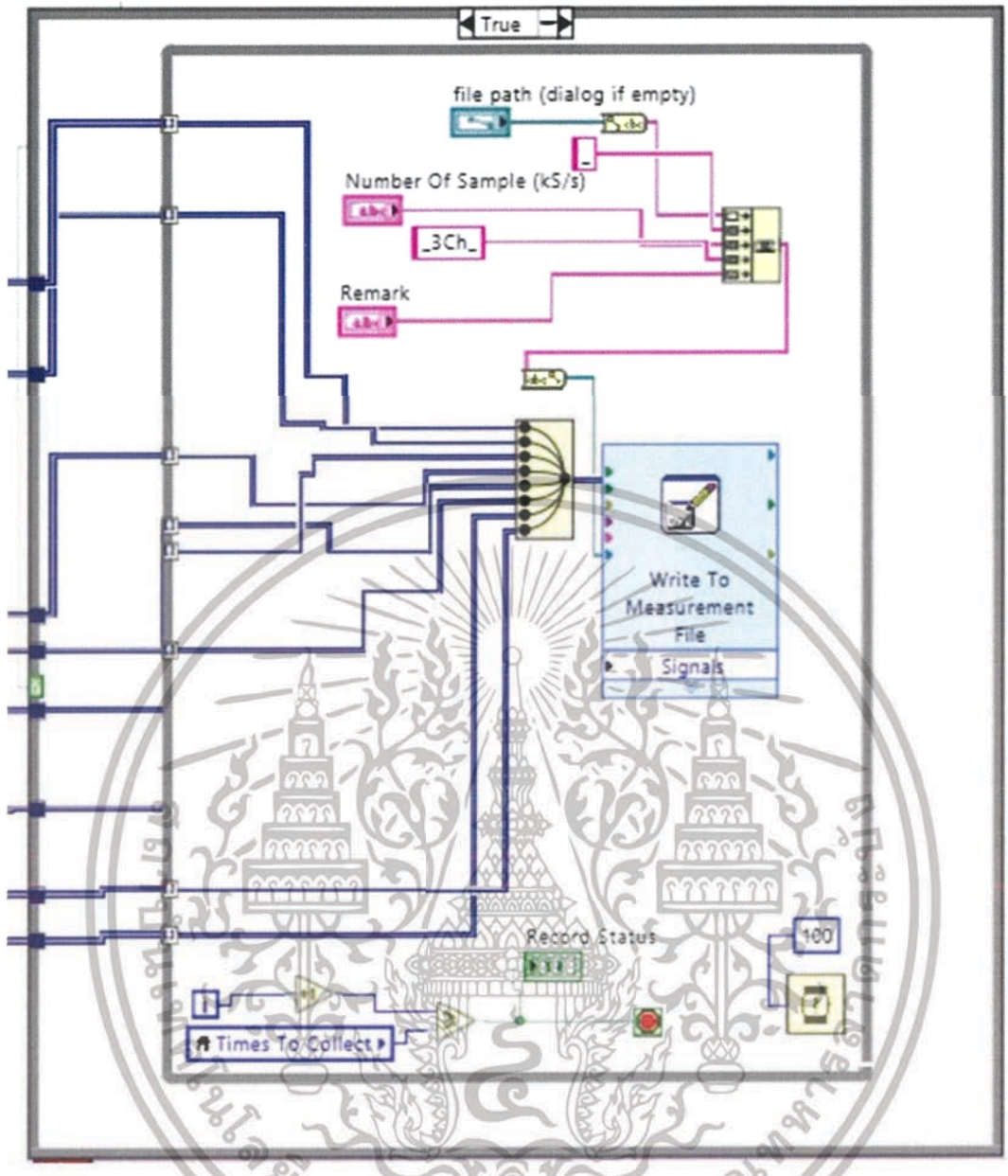
Block Diagram ของภาพรวมการทำงานของโปรแกรมหลักจากซอฟท์แวร์ LabVIEW(2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



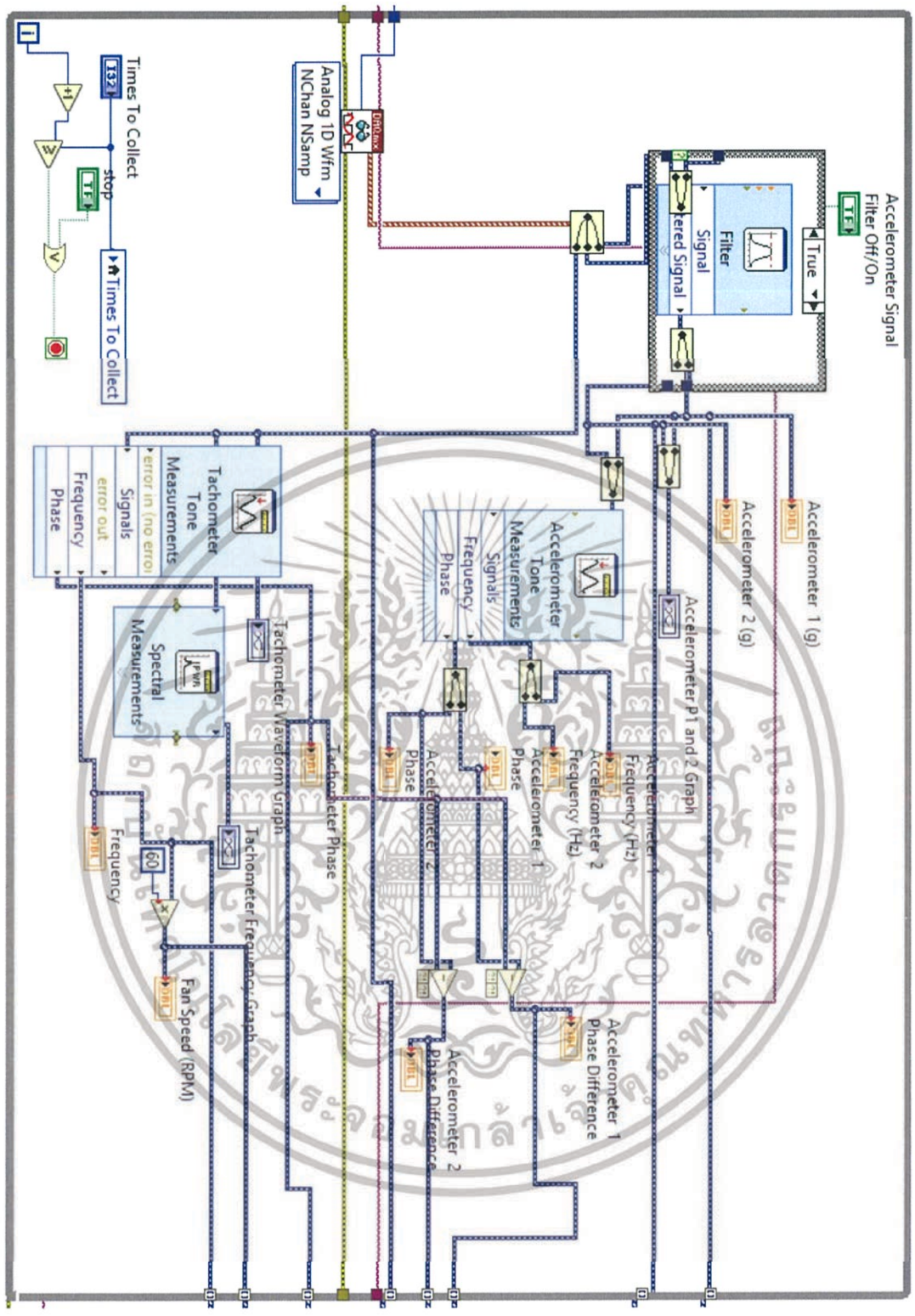
Block Diagram ของโปรแกรมการตั้งค่าจากซอฟท์แวร์ LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Block Diagram ของโปรแกรมการตั้งค่าจากซอฟท์แวร์ LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Block Diagram ของโปรแกรมอ่านค่าจากซอฟท์แวร์ LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ.

โค้ดโปรแกรมการคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
clear all
m=0.19925;                  %%Mass
H=0.009;                    %%Distance o to C.G
J=0.000126728480;           %%Moment of inertia
k2=88000;                   %%vertical rubber stiffness
k1=0.22*k2                  %%horizontal rubber stiffness
l=0.02964;                  %%Distance o to vertical sensor
h0=0.02196;                 %%Distance o to C.G.fan
hf=0.0135;                  %%Hieght of fan
hf1=0.0135*0.5;             %%Distance plane1 to C.G fan
hf2=0.0135*0.5;             %%Distance plane2 to C.G fan
G=6.3                       %%Grade of iso1940
N=3900;                     %%Revolution speed
R1=0.019;
R2=0.0208;
UD=(9549e-06)*(0.04/N)*G    %%Unbalance permissible from
iso1940
t=0:0.00001:0.05;

%%%%%%% Find natural frequency %%%%%%%

M=[m (m*H);(m*H) J]         %%เมทริกซ์ของมวลและโมเมนต์ความเฉื่อย(M)
L=chol(M,'lower');          %%Cholesky lower triangular
IL=inv(L);                  %%Inverse cholesky lower triangular
Lt=transpose(L);            %%Transpose cholesky lower triangular
ILt=inv(Lt)                 %%Inverse transpose cholesky lower
triangular
k=[(k1) 0;0 (k2*l*l)];      %%stiffness system
K=(IL)*k*(ILt);             %%Symmetric eigen value problem
E=eig(K);                   %%Eigen value
wn1=sqrt(E(1,1))
wn2=sqrt(E(2,1))

%%%%%%% Find Max distance of motion %%%%%%%
U=1.1*UD;                  %%Error max unbalance
U1=U*(hf1/hf)              %%Unbalance permissible plane 1
U2=U*(hf2/hf)              %%Unbalance permissible plane 2
w=(N/60)*(2*pi);           %%Frequency operate
F=U*w*w*cos(w*t);          %%Max Force
T=(U1*w*w*hf1)+(U2*w*w*hf2) %%Max overturning moment
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Q=(-(w*w)*M)+k;
FE=[F;(F*h0)+T];                    %%External force
IQ=inv(Q);
X=IQ*(FE);                          %%Max displacement of motion
A1=((X(1,1))*(k1/m))/9.81           %%Horizontal Accerelation
A2=((X(2,1))*((k2*l)/m))/9.81       %%Vertical Accerelation


%%%%%%% QC Limitation %%%%%%%
UL1=UD*(hf1/hf)       %%Unbalance limitation plane 1
UL2=UD*(hf2/hf)       %%Unbalance limitation plane 2
FL=UD*w*w*cos(w*t);       %%Max Force
TL=(UL1*w*w*hf1*cos(w*t))+(UL2*w*w*hf2*cos(w*t));
                      %%Max overturning moment

Q=(-(w*w)*M)+k;
FE=[FL;(FL*h0)+TL];     %%External force
IQL=inv(Q);
XL=IQ*(FE);             %%Max displacement of motion
M1=UL1/R1               %%Mass unbalance limitation plane 1
M2=UL2/R2               %%Mass unbalance limitation plane 2
AL1=((XL(1,1))*(k1/m))/9.81          %%Horizontal Accerelation
AL2=((XL(2,1))*((k2*l)/m))/9.81      %%Vertical Accerelation
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้