

โปรแกรมการวัดการสั่นและวิเคราะห์สภาพเครื่องยนต์ดีเซลใน  
กระบวนการทดสอบโดยประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2566

VIBRATION MEASUREMENT AND STATUS ANALYSIS OF DIESEL  
ENGINES DURING TESTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
TECHNIQUES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic Year 2023

โครงการวัดการสั้นและวิเคราะห์สภาพเครื่องยนต์ดีเซลใน  
กระบวนการทดสอบโดยประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.ศโรภา แซ่กการ)  
ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีรัฐผล)  
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์)  
กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)  
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิศักดิ์ ทองมี : โปรแกรมการวัดการสั่นและวิเคราะห์สภาพเครื่องยนต์ดีเซลในกระบวนการทดสอบโดยประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (VIBRATION MEASUREMENT AND STATUS ANALYSIS OF DIESEL ENGINES DURING TESTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES)

อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสวีรัฐผล, 91 หน้า

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม/เครื่องยนต์ดีเซล/การวัดการสั่นสะเทือน

เครื่องยนต์ดีเซล มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในงานเกษตรกรรม เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องตัดหญ้า ฯลฯ ปัจจุบันในการผลิตพบปัญหาทางด้านคุณภาพของชิ้นส่วนที่ส่งนำเข้าจากต่างประเทศในบางชิ้นมีความบกพร่อง เช่น ส่วนเพลาค้อเหวี่ยงและล้อช่วยแรงเครื่องยนต์ที่ไม่ได้สมดุล เป็นต้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์ดีเซลมีลักษณะเฉพาะตัว สามารถแยกแยะความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้เหมาะที่จะนำมาตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งความบกพร่องที่สนใจมีอยู่ 2 ความบกพร่อง คือ ความไม่สมดุลของมูเล่ และ ความเสียหายเพลาลังสมดุล ในการทดลองจะมีการกำหนดความเร็วรอบไว้ที่ 1700 rpm และใส่โหลด 75 kg/cm<sup>2</sup> เพื่อเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้และนำปัญญาประดิษฐ์ (AI : Artificial Intelligence) มา ประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซล

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

APISAK THONGMEE : VIBRATION MEASUREMENT AND STATUS ANALYSIS OF  
DIESEL ENGINES DURING TESTING USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
TECHNIQUES.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D., 91 PP.

Keywords: Artificial Neural Network/Diesel Engine/Vibration Measurement

Diesel engines are widely used in agricultural applications such as water pumps, grass cutters, and more. Currently, there are quality issues with some imported components used in the production process. For example, the crankshaft and unbalanced engine flywheel have defects. In this research, a technique for measuring and analyzing vibrations is presented. Diesel engine vibrations have unique characteristics that can help identify abnormalities in the engine's operation. The two main defects of interest are unbalance of the camshaft and damage to the counterweighted crankshaft. In the experiments, the engine speed is set at 1700 rpm and a load of 75 kg/cm<sup>2</sup> is applied to provide a controlled variable for testing. Artificial intelligence (AI) is employed to detect engine defects.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Mechatronics Engineering  
Academic Year 2023

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Apisak  
Srisertphol

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยและเขียนโครงการวิทยานิพนธ์นี้ด้วยความตั้งใจและด้วยความตั้งใจและขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ที่ให้คำแนะนำ ปรีกษา ทั้งด้านการดำเนินการวิจัยและวิชาการ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ได้ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ในการดำเนินงานวิจัย คอยชี้แนะแนวทางในแต่ละขั้นตอนรวมถึงให้ความรู้ ทางด้านวิชาการ ด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ ด้านกระบวนการคิด และดำเนินชีวิต และยังช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์อีกด้วย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง, อาจารย์ ดร.อุเทน ลีตน, รองศาสตราจารย์ ดร.โศภณา แข็งการ, อาจารย์ ดร.ธีทัต ดลวิชัย และ อาจารย์ วินัย ตุ่มทอง ที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัย ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้มอบทุนการศึกษาในระดับมหาบัณฑิตศึกษาแก่ผู้วิจัย และช่วยเหลือด้านเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต่องานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัท อาร์เอพี เอ็นเตอร์ไพรส์ แอนด์ เซอร์วิสেস ที่ได้ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วง สำหรับข้อมูลงานความรู้ด้านวิศวกรรมต่างๆ และช่วยเหลือผู้วิจัยให้มีประสบการณ์การทำงานที่บริษัท

ขอขอบพระคุณ บริษัท บริษัท พลวัชรเครื่องยนต์ จำกัด ที่ได้ช่วยเหลืองานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วง สำหรับข้อมูลงานความรู้ด้านวิศวกรรมต่างๆ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านเอกสารและดำเนินการต่างๆสำหรับวิทยานิพนธ์ เพื่อให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวทุนทวีศีลศักดิ์ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอนให้เป็นคนดี ตลอดจนส่งเสริมด้านการศึกษา และคอยให้กำลังใจจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

อภิศักดิ์ ทองมี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	2
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 การสันสະเพื่อน.....	4
2.2 สัญญาของการสันสະเพื่อน.....	5
2.3 เครื่องวิเคราะห์แบบ FFT (Fast Fourier Transform).....	6
2.4 Order Tracking.....	9
2.5 เทคนิคการวัดและมาตรฐานการสันสະเพื่อน.....	9
2.6 การวิเคราะห์การสันสະเพื่อนบนแกนความถี่.....	11
2.7 การเรียนรู้ของเครื่องจักร.....	14
2.8 โครงข่ายประสาทเทียม.....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล .....	15
2.10 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	16
<b>3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>20</b>
3.1 กล่าวนำ.....	20
3.2 เครื่องยนต์ดีเซล KAWAMA 110 ET .....	21
3.3 การสร้างระบบการวิเคราะห์สัญญาณการสันสะเทือน.....	21
3.4 การสร้างชุดอุปกรณ์เก็บและประมวลผลสัญญาณการสันสะเทือน .....	34
3.5 การสอบเทียบสัญญาณการสันสะเทือน.....	38
3.6 การออกแบบการทดลองในแต่ละกรณี.....	39
<b>4 ผลการวิจัยและการจำแนกความเสียหายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม .....</b>	<b>43</b>
4.1 บทนำ.....	43
4.2 การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล.....	43
4.3 การฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแล็บ .....	55
4.4 ผลของการจำแนกข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซล .....	55
4.5 การประเมินผลความถูกต้องของโมเดล.....	56
<b>5 สรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>59</b>
5.1 สรุป.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง.....	61
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ .....	63
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างโค้ดการทำงานของซอฟต์แวร์.....	73
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	85
ประวัติผู้เขียน.....	91



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซล KAWAMA 110 ET ..... 21
3.2	ค่า Error ของค่า Amplitude..... 25
3.3	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 1 ..... 26
3.4	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 2 ..... 27
3.5	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 3 ..... 27
3.6	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 4 ..... 27
3.7	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 5 ..... 27
3.8	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 6 ..... 27
3.9	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 7 ..... 28
3.10	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 8 ..... 28
3.11	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 9 ..... 28
3.12	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 10 ..... 28
3.13	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 11 ..... 28
3.14	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 12 ..... 29
3.15	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 13 ..... 29
3.16	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 14 ..... 29
3.17	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 15 ..... 29
3.18	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 16 ..... 29
3.19	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 17 ..... 30
3.20	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 18 ..... 30
3.21	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 19 ..... 30
3.22	ค่า Error ของค่า Amplitude ครั้งที่ 20 ..... 30
3.23	ค่า Sample rate ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz ..... 31
3.24	ค่า Error ของ Amplitude ที่อ่านค่าได้ของ Sample rate ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz ..... 32
4.1	ความถูกต้องของโมเดลเทียบกับ Hidden layers ..... 55

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่น.....	4
2.2	ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแบบ FFT.....	7
2.3	รูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะเป็นคาบ.....	8
2.4	ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร.....	10
2.5	ตาราง ISO 10816-3.....	11
2.6	สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนเวลา.....	12
2.7	สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนความถี่.....	12
2.8	สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนเวลาลักษณะเป็นคาบ.....	13
2.9	สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนความถี่.....	13
2.10	ประเภทของ Machine Learning.....	14
2.11	แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	15
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.2	ขั้นตอนการทำงานการอ่านสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	22
3.3	สัญญาณ Sine Wave 20 Hz.....	23
3.4	กราฟโดเมนความถี่ 20 Hz.....	23
3.5	กราฟโดเมนความถี่ 20 และ 45 Hz.....	24
3.6	กราฟโดเมนความถี่ 20 , 45 และ 70 Hz.....	24
3.7	สัญญาณ Noise.....	25
3.8	สัญญาณ Sine Wave + Noise.....	26
3.9	กราฟโดเมนความถี่ 20, 45 และ 70 Hz.....	26
3.10	ขั้นตอนการทำงานการอ่านสัญญาณความเร็วรอบ.....	33
3.11	สัญญาณความเร็วรอบ.....	34
3.12	Raspberry Pi 4.....	35
3.13	IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi.....	35
3.14	Proximity Sensor.....	36

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.15	Acceleration Meter .....	37
3.16	แผนภาพของการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ .....	38
3.17	เครื่องสอบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือน .....	38
3.18	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ .....	39
3.19	ขั้นตอนการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม .....	40
3.20	ลักษณะการต่อของเครื่องยนต์ดีเซลกับโหลด .....	41
3.21	มูเล่ในสภาวะเสี่ยสมดุล .....	41
3.22	เพลาถ่วงสมดุลในสภาวะเสี่ยหาย .....	42
4.1	ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ .....	43
4.2	Kurtosis แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	44
4.3	Kurtosis แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	44
4.4	Kurtosis แนวแกน X ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	45
4.5	Kurtosis แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	45
4.6	Mean แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	45
4.7	Mean แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	46
4.8	Mean แนวแกน X ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	46
4.9	Mean แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	46
4.10	Peak Value แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	47
4.11	Peak Value แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	47
4.12	Peak Value แนวแกน X ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	47
4.13	Peak Value แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	48
4.14	root mean square แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	48
4.15	root mean square แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz .....	48
4.16	root mean square แนวแกน X ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	49
4.17	root mean square แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform (FFT) 50-65 Hz .....	49
4.18	ค่าความโด่ง(Kurtosis) แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz .....	49
4.19	ค่าความโด่ง(Kurtosis) แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz .....	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	ค่าความโด่ง(Kurtosis) แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz ..... 50
4.21	ค่าความโด่ง(Kurtosis) แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 50
4.22	ค่าเฉลี่ย(Mean) แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz..... 51
4.23	ค่าเฉลี่ย(Mean) แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz ..... 51
4.24	ค่าเฉลี่ย(Mean) แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 51
4.25	ค่าเฉลี่ย(Mean) แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 52
4.26	ค่าสูงสุด(Peak Value) แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz..... 52
4.27	ค่าสูงสุด(Peak Value) แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz ..... 52
4.28	ค่าสูงสุด(Peak Value) แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 53
4.29	ค่าสูงสุด(Peak Value) แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz ..... 53
4.30	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง(root mean square) แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz ..... 53
4.31	ค่าเฉลี่ยกำลังสอง(root mean square) แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz..... 54
4.32	root mean square แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 54
4.33	root mean square แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz..... 54
4.34	ไดอะแกรมการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแลบ ..... 55
4.35	เมทริกซ์คอนฟิวชันของแบบจำลองการจำแนกประเภทความผิดปกติ ..... 57
4.36	คอนฟิวชันเมทริกซ์ของข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการฝึกสอน ..... 58
4.37	ตัวอย่างการทดสอบการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์..... 58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

เครื่องยนต์ดีเซลมีการใช้อย่างแพร่หลายในงานเกษตรกรรม เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องตัดหญ้า ฯลฯ ปัจจุบันในการผลิตพบปัญหาทางด้านคุณภาพของชิ้นส่วนที่ส่งนำเข้าจากต่างประเทศในบางชิ้นมีความบกพร่อง เช่น พบเศษโลหะจากขั้นตอนการผลิตตกค้างจำนวนมากอยู่ในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ส่งนำเข้า ส่วนเพลาคือข้อเหวี่ยงและล้อช่วยแรงเครื่องยนต์ที่ไม่ได้สมดุล เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำชิ้นส่วนดังกล่าวมาประกอบแล้วทำให้พบข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซลจึงไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานของโรงงาน ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขเป็นอย่างมาก ซึ่งความผิดปกติที่ตรวจพบ ประกอบไปด้วย ความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance) และ ความเสียหายเพลากลวงสมดุล (Balancer fault) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เชิงกลที่หมุนได้ ซึ่งสังเกต ความผิดปกติเหล่านี้ได้จากการทดสอบด้วยไดนาโมมิเตอร์ แล้วฟังเสียงที่ผิดปกติโดยเจ้าหน้าที่ที่มีความเชี่ยวชาญ เพื่อประเมินคุณภาพการประกอบของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนส่งมอบให้ลูกค้า เนื่องจากต้องอาศัยเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญและประสบการณ์ที่สูงในการประเมินคุณภาพ หากขาดเจ้าหน้าที่คนดังกล่าวไป จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการประเมินคุณภาพดังกล่าว หากต้องการฝึกฝน เจ้าหน้าที่ใหม่ก็มีความจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการฝึกฝนเป็นเวลานาน จากปัญหาที่กล่าวมาจึงมีความจำเป็น ที่ต้องหาอุปกรณ์และกระบวนการตรวจเช็คเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์ดีเซลมีลักษณะเฉพาะตัว สามารถแยกแยะความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้เหมาะที่จะนำมาตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์และนำปัญญาประดิษฐ์ (AI : Artificial Intelligence) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการตรวจจับข้อบกพร่องของเครื่องยนต์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อใช้เก็บข้อมูลในการสร้างระบบ จำแนกความไม่สมดุลของมูเล่และความไม่สมดุลของเพลากลวงสมดุลในเครื่องยนต์ดีเซล

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบการจำแนกความไม่สมดุลของมู่เฒ่และความไม่สมดุลของเพลากล่วงสมดุลในเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 จำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์รุ่น 110-ET ด้วยความเร็วรอบ 1700 RPM และใส่โหลด 75 kg/cm<sup>2</sup>

1.3.2 จำแนกความไม่สมดุลของมู่เฒ่(flywheel unbalanced)และความไม่สมดุลของเพลากล่วงสมดุล(Balancer Unbalanced) ในเครื่องยนต์ดีเซล

1.3.3 ใช้ ANN (Artificial Neural Networks)ในการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซล

1.3.4 ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของ ANN (Artificial Neural Networks)

### 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 ศึกษาโครงสร้างของเครื่องยนต์มาส่วนไหนที่เกิดความเสียหาย

1.4.2 ทำการทดลองเพื่อหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น

1.4.3 ทำการทดลองเพื่อหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น

1.4.4 ศึกษาประเภทและการทำงานของ ปัญญาประดิษฐ์ เพื่อเลือกชนิดที่เหมาะสม

1.4.5 นำปัญญาประดิษฐ์ มาเรียนรู้สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

1.4.6 ออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อประกอบ บอร์ดประมวลผลและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

1.4.7 ออกแบบการทดลองเพื่อเก็บผลจากอันกอร์ทีมี่สร้างขึ้น

1.4.8 สรุปผลและจัดทำข้อเสนอแนะ

1.4.9 จัดทำเอกสาร และรายงานการวิจัย

### 1.5 สถานที่ทำวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 และ บริษัท พลวัชรเครื่องยนต์ จำกัด เลขที่ 46/88 ม.23 ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ

### 1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1.6.1 คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.6.2 Raspberry Pi 1 ขึ้น

- 1.6.3 acceleration sensor 2 ชิ้น
- 1.6.4 IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi 1 ชิ้น
- 1.6.5 Proximity Sensor 1 ชิ้น

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 สามารถนำมาแทนที่ผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์เสียหายที่ทำให้เกิดการสั้นสะเทือนได้
- 1.7.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายของเครื่องยนต์
- 1.7.3 สามารถแยกได้ว่าเครื่องยนต์มีความเสียหายที่ส่วนไหนได้ทันที

## 1.8 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 อธิบายเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญ รวมถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลและโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 3 อธิบายถึงวิธีการดำเนินงานวิจัย เช่น การจัดเตรียมเครื่องยนต์ดีเซลในสถานะต่าง ๆ

บทที่ 4 อธิบายเกี่ยวกับการทดลองและวิธีการเก็บข้อมูลรวมไปถึงวิธีการจำแนกเพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียม รวมถึงการประเมินความถูกต้องของโครงข่ายประสาทเทียมและการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

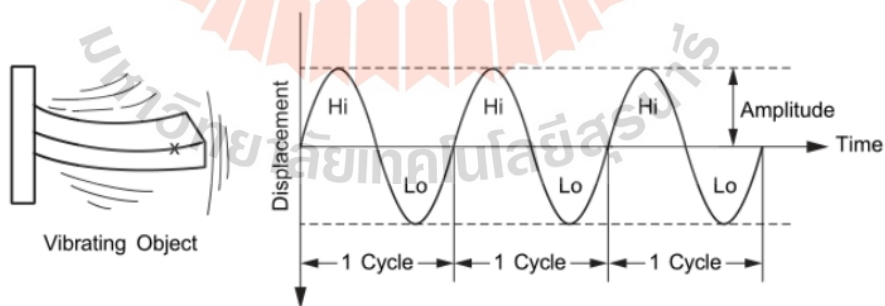
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและปริทัศน์วรรณกรรม

#### 2.1 การสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน (Vibration) หมายถึง การเคลื่อนที่ของวัตถุไปมารอบจุดสมดุล (equilibrium position) ในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่แบบนี้สามารถเกิดขึ้นในรูปแบบการเคลื่อนที่ที่กลับไปกลับมา (back-and-forth motion) หรือการแกว่ง (oscillation) รอบจุดสมดุลก็ได้

หากเราสามารถสังเกตการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ช้าลง จะพบว่ารูปแบบการเคลื่อนที่นั้นเกิดขึ้นในทิศทางที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับความห่างไกลหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นรอบตำแหน่งสมดุล ลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่แบบสั่น แสดงดังรูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่นนี้ ได้แก่

- แอมพลิจูด (Amplitude): หมายถึง ระยะทางสูงสุดที่วัตถุเคลื่อนที่ห่างจากจุดสมดุล
- ความเร่ง (Acceleration): หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อหน่วยเวลา
- ความถี่ (Frequency): หมายถึง จำนวนรอบการสั่นสะเทือนในหน่วยเวลา
- ความเร็ว (Velocity): หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่แบบสั่น

##### 2.1.1 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ (Frequency) ของวัตถุที่สั่นสะเทือน หมายถึง จำนวนรอบการเคลื่อนที่ไปมาผ่านตำแหน่งคงที่หนึ่ง (equilibrium position) ในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการเคลื่อนที่ไปมาครบ 1



รอบ (1 Cycle) จะเริ่มจากตำแหน่งสูงสุด (maximum position) หนึ่ง ไปยังตำแหน่งสูงสุดอีกค่าหนึ่ง และกลับมายังตำแหน่งคงที่เดิมดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค่าความถี่ของวัตถุที่สั่นสะเทือนจะวัดเป็นจำนวนรอบการสั่นในหน่วยเวลา โดยหน่วยที่ใช้ทั่วไป คือ เฮิรตซ์ (Hertz; Hz) หนึ่งเฮิรตซ์ (Hz) หมายถึง วัตถุเคลื่อนที่ไปมาครบ 1 รอบ ในเวลา 1 วินาที

### 2.1.2 แอมพลิจูด (Amplitude)

แอมพลิจูด (Amplitude) ของวัตถุที่สั่นสะเทือน หมายถึง ค่าระยะทางสูงสุด (maximum displacement) หรือค่าขจัด(displacement) มากที่สุดในแต่ละข้างของตำแหน่งคงที่ (equilibrium position) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ค่าแอมพลิจูดของวัตถุที่สั่นสะเทือนจะวัดเป็นหน่วยระยะทาง เช่น มิลลิเมตร (Millimeter; mm) หรือ นิ้ว (Inches; in)

### 2.1.3 ความเร็ว (Velocity)

ความเร็ว (Velocity) ของวัตถุที่สั่นสะเทือน หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าขจัด (Displacement) เทียบกับเวลาในระหว่างการเคลื่อนที่ หน่วยวัดความเร็วที่ใช้ทั่วไปคือ มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) หรือ นิ้วต่อวินาที (in/s) ในการวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน มักใช้วิธีวัดแบบค่ารากเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square; RMS) โดยวิธีนี้จะใช้กับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 20 Hz ถึง 1,000 Hz (หรือความเร็วรอบในการหมุนมากกว่า 1,200 รอบต่อนาที)

## 2.2 สัญญาณของการสั่นสะเทือน

สัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration Signal) ที่วัดได้จากเครื่องจักรนั้น เปรียบเสมือนตัวบ่งชี้สภาพหรือความบกพร่องของเครื่องจักร ข้อมูลสัญญาณการสั่นสะเทือนเหล่านี้ ประกอบด้วย ปัจจัยสำคัญหลายประการในการวัดและวิเคราะห์สภาพของเครื่องจักร ปัจจัยสำคัญ ดังกล่าว ได้แก่

### 2.2.1 ความถี่ (Frequency)

ความถี่ (Frequency) ของสัญญาณการสั่นสะเทือน หมายถึง จำนวนรอบการสั่นสะเทือนในหน่วยเวลา บนกราฟโดเมนเวลา ความถี่จะแสดงเป็นจำนวนรอบของคลื่นไซน์ที่ปรากฏในกราฟต่อหน่วยเวลา หน่วยวัดความถี่ที่นิยมใช้ ได้แก่

- 1) รอบต่อนาที (Cycles Per Minute; CPM): เหมาะสำหรับการวัดความถี่รอบต่ำ
- 2) รอบต่อวินาที (Cycles Per Second; CPS): เหมาะสำหรับการวัดความถี่รอบปานกลาง
- 3) เฮิรตซ์ (Hertz; Hz): เหมาะสำหรับการวัดความถี่รอบสูง

## 2.2.2 ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude)

ขนาดของการสั่นสะเทือน (Amplitude) เป็นตัวบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการสั่นสะเทือนในเครื่องจักรกล หากค่าขนาดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับสภาวะปกติ แสดงว่าเครื่องจักรนั้นเริ่มมีปัญหา ขนาดของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในปัจจุบันและเป็นที่ยอมรับกันมากที่สุด มีอยู่ 3 ชนิด ดังนี้

1) การขจัดหรือระยะการเคลื่อนที่ (Displacement): วัดระยะทางสูงสุดของการสั่นสะเทือน หน่วยวัดที่ใช้ทั่วไปคือ มิลลิเมตร (mm) หรือ นิ้ว (in) การวัดค่าขจัดเหมาะสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำ

2) ความเร็ว (Velocity): วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าขจัดเทียบกับเวลา หน่วยวัดที่ใช้ทั่วไปคือ มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) หรือ นิ้วต่อวินาที (in/s) การวัดค่าความเร็วเหมาะสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ปานกลาง

3) ความเร่ง (Acceleration): วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเทียบกับเวลา หน่วยวัดที่ใช้ทั่วไปคือ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ( $m/s^2$ ) การวัดค่าความเร่งเหมาะสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความถี่สูง

## 2.3 เครื่องวิเคราะห์แบบ FFT (Fast Fourier Transform)

เครื่องวิเคราะห์แบบ FFT (Fast Fourier Transform) เป็นเครื่องมือที่มีความสามารถสูงกว่ามิเตอร์วัดการสั่นสะเทือนทั่วไป เครื่องมือนี้สามารถเก็บข้อมูลการวัดได้ทั้งรูปแบบของโดเมนความถี่ (Frequency Domain) และโดเมนเวลา (Time Domain) ความสามารถพิเศษของเครื่องวิเคราะห์แบบ FFT มีดังนี้

1) วิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ (Frequency Spectrum Analysis): แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแอมพลิจูดของสัญญาณการสั่นสะเทือน ช่วยให้ระบุสาเหตุของการสั่นสะเทือนได้อย่างแม่นยำ

2) วิเคราะห์รูปแบบของสัญญาณการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา: แสดงรูปแบบคลื่นของสัญญาณการสั่นสะเทือน ช่วยให้ระบุจุดผิดปกติและวิเคราะห์ความรุนแรงของการสั่นสะเทือน

3) ประมวลผลข้อมูลการวัดแบบเรียลไทม์: แสดงผลการวิเคราะห์แบบทันที ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็ว

### 2.3.1 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแบบ FFT

การแปลงสัญญาณแบบ FFT (Fast Fourier Transform) เป็นกระบวนการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อแยกความถี่ต่าง ๆ ที่รวมกันอยู่บนสัญญาณในโดเมนเวลาออกแสดงแยกกันบนโดเมนความถี่ ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแบบ FFT แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการแปลงสัญญาณแบบ FFT

#### 2.3.1.1 การเตรียมสัญญาณ:

- 1) สัญญาณแบบอนาล็อก (Analog Signal): สัญญาณที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน สัญญาณความดัน หรือสัญญาณอื่น ๆ มักอยู่ในรูปแบบอนาล็อก
- 2) สัญญาณขาเข้า (Input Signal): สัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน อาจผ่านกระบวนการอินทิเกรตหนึ่งหรือสองครั้ง ขึ้นอยู่กับการใช้งาน
- 3) กรองเฉพาะความถี่ที่ต้องการ (Anti-Alias Filter): กรองสัญญาณเฉพาะความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์ ตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออก ป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณ
- 4) ปรับปรุงสัญญาณ (A/D Converter): แปลงสัญญาณจากรูปแบบอนาล็อกเป็นดิจิทัล เหมาะสำหรับการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์

#### 2.3.1.2 การแปลงสัญญาณแบบ FFT:

- 1) การปรับปรุงสัญญาณแบบวินโดว์ (Windowing): ตัดส่วนหนึ่งของสัญญาณต่อเนื่องที่ต้องการวิเคราะห์ กำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของข้อมูล
- 2) กระบวนการ FFT (FFT Process): ใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ของ FFT แยกความถี่ต่าง ๆ บนสัญญาณในโดเมนเวลา แสดงผลเป็นสเปกตรัมความถี่
- 3) กระบวนการเฉลี่ยค่า (Averaging Process): คำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จาก FFT กรณีที่มีการเก็บข้อมูลหลายครั้ง

#### 2.3.1.3 การแสดงผล:

- 1) การแสดงผลหรือเก็บข้อมูล (Display or Storage of Data): แสดงผลสเปกตรัมความถี่ในรูปแบบกราฟ ใช้สำหรับวิเคราะห์ ประเมินค่า และหาสาเหตุของการสั่นสะเทือน

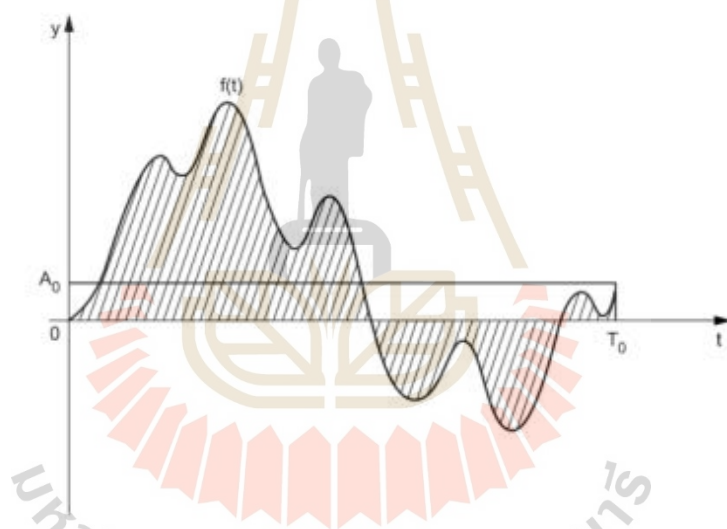
## 2.3.2 การแปลงสัญญาณแบบฟูรีเยร์

### 2.3.2.1 ประวัติการค้นพบการแปลงสัญญาณแบบฟูรีเยร์

ในช่วงปี ค.ศ. 1768 - 1830 ฌอง-แบ็ปติสต์ โจเซฟ เดอ ฟูรีเยร์ (Jean-Baptiste Joseph de Fourier) นักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้พัฒนาเทคนิคทางคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์สัญญาณความถี่ โดยแปลงสัญญาณในรูปแบบคลื่นคาบ (Periodic Waveform) ไปเป็นสัญญาณในรูปแบบความถี่ (Frequency Domain) เทคนิคนี้ช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และตีความสัญญาณด้วยคอมพิวเตอร์

### 2.3.2.2 หลักการของการแปลงสัญญาณแบบฟูรีเยร์

การแปลงสัญญาณแบบฟูรีเยร์ อาศัยหลักการที่ว่าสัญญาณคลื่นคาบใด ๆ สามารถแยกออกเป็นผลรวมของคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน โดยแต่ละคลื่นไซน์จะมีแอมพลิจูดและเฟสที่แตกต่างกัน เทคนิคนี้ใช้สมการคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า "สมการฟูรีเยร์" (Fourier Transform)



รูปที่ 2.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ลักษณะเป็นคาบ

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\omega_k t) + \sum_{k=0}^{\infty} b_k \sin(\omega_k t) \quad (2.1)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ หาได้จาก

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) dt \quad (2.2)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (2.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (2.4)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{r} \text{ เมื่อ } r = \text{คาบของการเคลื่อนที่ และ } k = 1, 2, 3, k \quad (2.5)$$

## 2.4 Order Tracking

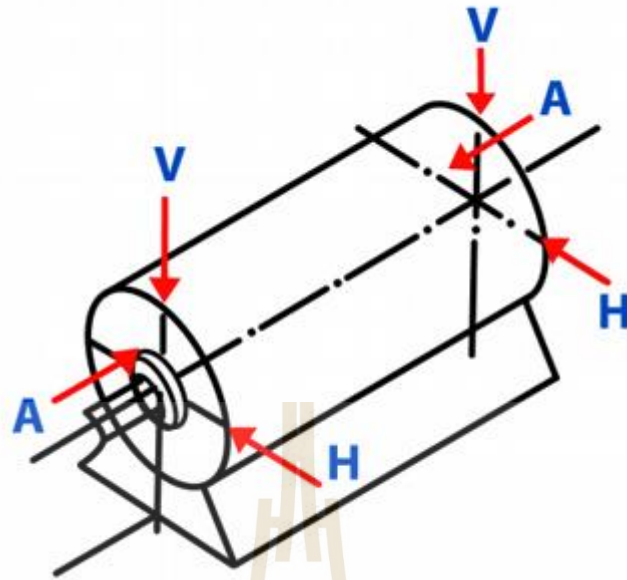
Order Tracking เป็นชุดของเทคนิคการวัดและวิเคราะห์พฤติกรรมแบบไดนามิกของเครื่องจักรที่หมุน ซึ่งความเร็วในการหมุนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา แตกต่างจากเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ทั่วไปที่ใช้ความถี่เป็นตัวแปรอิสระ เทคนิค Order Tracking จะแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของ "Order" ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วรอบของเครื่องจักร การวัด Order Tracking ที่มีประสิทธิภาพ มักแสดงผลในรูปแบบของ "Order Spectrum" และ "Order Track" ดังนี้

1) Order Spectrum: แสดงแอมพลิจูดของสัญญาณเป็นฟังก์ชันของ "Harmonic Order" ของความถี่การหมุนเพลลาอ้างอิง ซึ่งหมายความว่า สัญญาณฮาร์โมนิก (Sub-harmonic) ทั้งหมดจะปรากฏบนกราฟเดียวกัน โดยไม่คำนึงถึงความเร็วรอบของเครื่องจักร

2) Order Track: แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณที่วัดได้ (เช่น แรงสั่นสะเทือน) ตาม "Order" เทียบกับความเร็วรอบ (RPM)

## 2.5 เทคนิคการวัดและมาตรฐานการสั่นสะเทือน

การวางตำแหน่งหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนโดยทั่วไป นิยมติดตั้งหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนในทิศทางที่มีการเคลื่อนที่ได้ง่ายที่สุด ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งหัววัด คือ ตำแหน่งที่มีการส่งผ่านแรงจากชุดเพลลาออกมา กรณีที่ไม่สามารถติดตั้งหัววัดในตำแหน่งดังกล่าว ควรเลือกตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุด ซึ่งจะมีตำแหน่งการวัดอยู่ทั้งหมด 3 แนวแกน ได้แก่ A = Axial (แนวแกน), H = Horizontal (แนวนอน) และ V = Vertical (แนวตั้ง) โดยตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักร

### 2.5.1 มาตรฐานการสั่นสะเทือนตามมาตรฐานสากล (ISO Standards)

มาตรฐาน ISO 10816-3 [ISO 10816-3:2019] เป็นมาตรฐานสากลที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบค่าการสั่นสะเทือนที่วัดได้ของตัวเรือนเครื่องจักร (Casing Vibration) มาตรฐานนี้กำหนดเกณฑ์การแบ่งระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือน 4 ระดับ ดังนี้

DIN ISO 10816-3	Group 1		Group 2	
Machine type	Large machines 300 kW < P < 50 MW		Medium sized machines 15 kW < P < 300 kW	
	Motor H > 315 mm		Motor 160 mm < H < 315 mm	
Foundation	flexible	rigid	flexible	rigid
Velocity $v_{eff}$ mm/s rms	11,0		D	
	7,1			
10–1000 Hz $r > 600$ rpm	4,5		C	
	3,5			
2–1000 Hz $120 < r < 600$ rpm	2,8		B	
	2,3			
	1,4		A	
				OPRÜFTECHNIK AG
	<b>A</b> Newly commissioned machines	<b>B</b> Unrestricted long term operation	<b>C</b> Restricted long term operation	<b>D</b> Vibration causing damage

รูปที่ 2.5 ตาราง ISO 10816-3

โดยจากรูปที่ 2.5 ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนตามมาตรฐาน ISO 10816-3

ระดับ A: เครื่องจักรใหม่เพิ่งใช้งาน ค่าความเร็ว RMS ของการสั่นสะเทือนอยู่ระหว่าง 0 - 3.50 มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s)

ระดับ B: เครื่องจักรเริ่มมีการสั่นสะเทือน ส่งผลเสียในระยะยาว ค่าความเร็ว RMS ของการสั่นสะเทือนอยู่ระหว่าง 3.50 - 7.10 mm/s

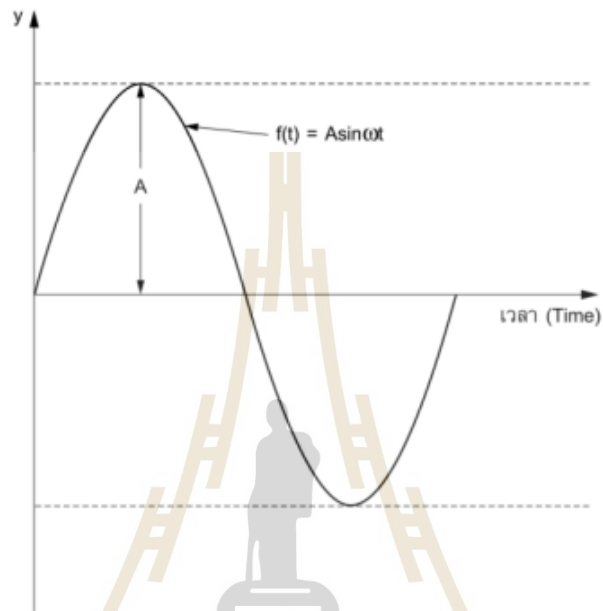
ระดับ C: เครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนรุนแรง ปล่อยให้อาจส่งผลเสียต่อเครื่องจักรในระยะเวลายาว ค่าความเร็ว RMS ของการสั่นสะเทือนอยู่ระหว่าง 7.10 - 11.00 mm/s

ระดับ D: เครื่องจักรมีการสั่นสะเทือนรุนแรงมาก อาจทำให้เครื่องจักรเสียหายแบบฉับพลัน ค่าความเร็ว RMS ของการสั่นสะเทือนมากกว่า 11.00 mm/s

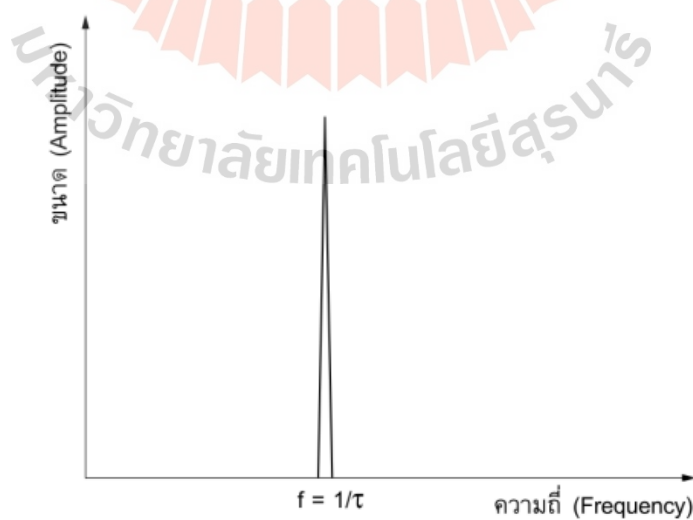
## 2.6 การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนบนแกนความถี่

โดยทั่วไป ผลลัพธ์สุดท้ายของการวิเคราะห์ปัญหาการสั่นสะเทือนในเครื่องจักร จะแสดงในรูปแบบกราฟสเปกตรัม (Spectrum) หรือที่เรียกว่ากราฟโดเมนความถี่ (Frequency Domain) กราฟสเปกตรัมนี้ เป็นผลลัพธ์จากการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลา (Time Domain) ซึ่งสัญญาณ

ในโดเมนเวลานั้น อาจจะเป็นกราฟรูปคลื่นรูปทรงต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของสัญญาณ กรณีที่สัญญาณมีเพียงความถี่เดียว กราฟในโดเมนเวลาจะเป็นกราฟรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และเมื่อแปลงสัญญาณนี้ด้วยเทคนิค FFT (Fast Fourier Transform) ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกราฟสเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 2.7



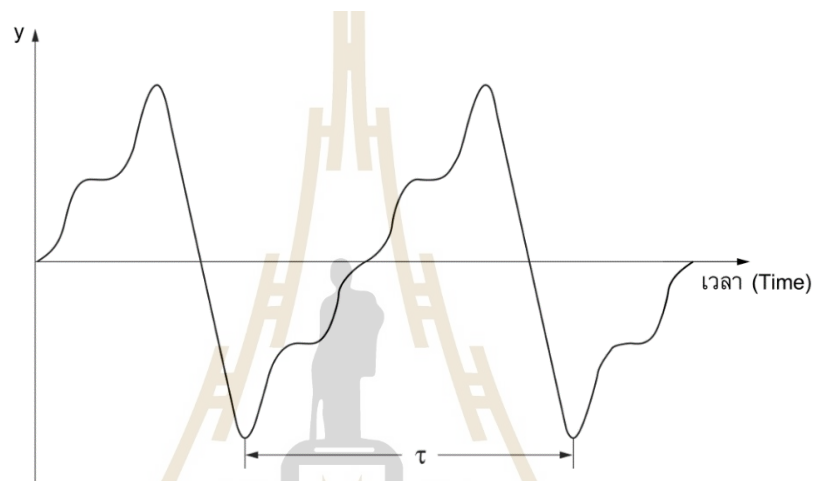
รูปที่ 2.6 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนเวลา



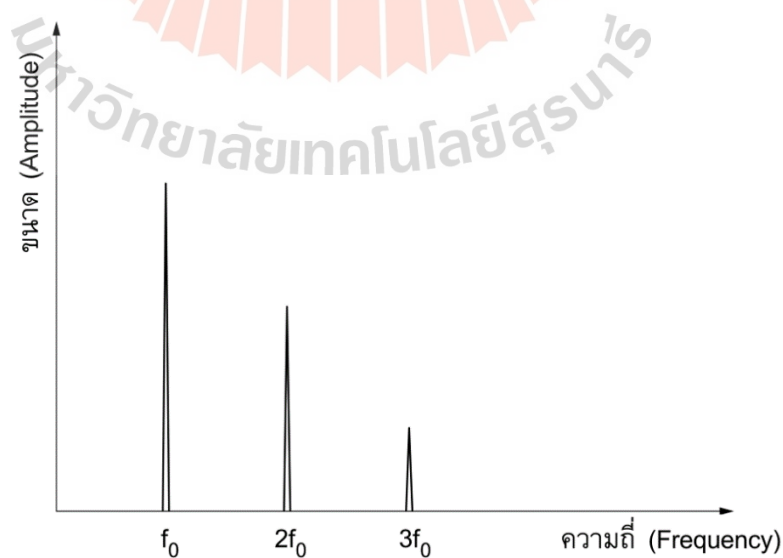
รูปที่ 2.7 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปกราฟโดเมนความถี่



เมื่อมีสัญญาณการสั่นสะเทือนหลายความถี่เข้ามารวมกัน สัญญาณเหล่านั้นจะรวมตัวกันเป็นสัญญาณแบบคาบ แสดงผลในรูปแบบกราฟบนโดเมนเวลา ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีสัญญาณ 3 ความถี่เข้ามารวมกัน กราฟบนโดเมนเวลาจะปรากฏดังรูปที่ 2.6 ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ผล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) เพื่อแยกความถี่แต่ละตัวออกจากกัน แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟโดเมนความถี่ หรือที่เรียกว่ากราฟสเปกตรัม จากรูปที่ 2.8 แสดงกราฟสเปกตรัมของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่มี 3 ความถี่ หลังจากแปลงสัญญาณด้วยเทคนิค FFT จะแยกความถี่ทั้ง 3 ออกจากกันได้ ได้ผลลัพธ์คือ  $f_0$ ,  $2f_0$  และ  $3f_0$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9



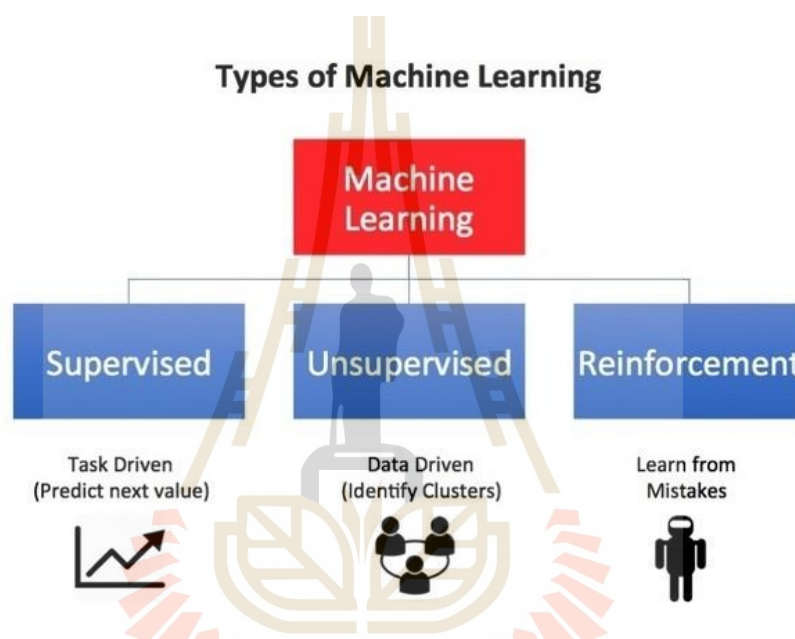
รูปที่ 2.8 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบกราฟโดเมนเวลาลักษณะเป็นคาบ



รูปที่ 2.9 สัญญาณการสั่นสะเทือนในรูปแบบกราฟโดเมนความถี่

## 2.7 การเรียนรู้ของเครื่องจักร

การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) เป็นสาขาหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถเรียนรู้จากข้อมูล โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมแบบดั้งเดิมหรือกำหนดกฎเกณฑ์ตายตัว อัลกอริทึมเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนตัวเองเรียนรู้จากข้อมูล และสร้างแบบจำลอง (Model) ที่สามารถทำนายผลลัพธ์ของข้อมูลใหม่ได้ การเรียนรู้ของเครื่องจักรมีหลายประเภท แต่ละประเภทมีจุดเด่นจุดด้อยและเหมาะสมกับงานที่แตกต่างกันไป ประเภทของ Machine learning สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ประเภทของ Machine Learning

**Supervised learning :** อัลกอริทึมจะเรียนรู้จากข้อมูลที่มีการติดป้ายกำกับ (labeled data) ซึ่งระบุไว้ว่าข้อมูลแต่ละตัวอยู่ในหมวดหมู่ใด ตัวอย่างเช่น การสอนให้โมเดลจำแนกภาพแมว โดยมีชุดข้อมูลรูปภาพแมวและรูปภาพสุนัขที่มีการติดป้ายกำกับไว้ โมเดลจะเรียนรู้จากชุดข้อมูลนี้และสามารถจำแนกภาพแมวใหม่ ๆ ได้

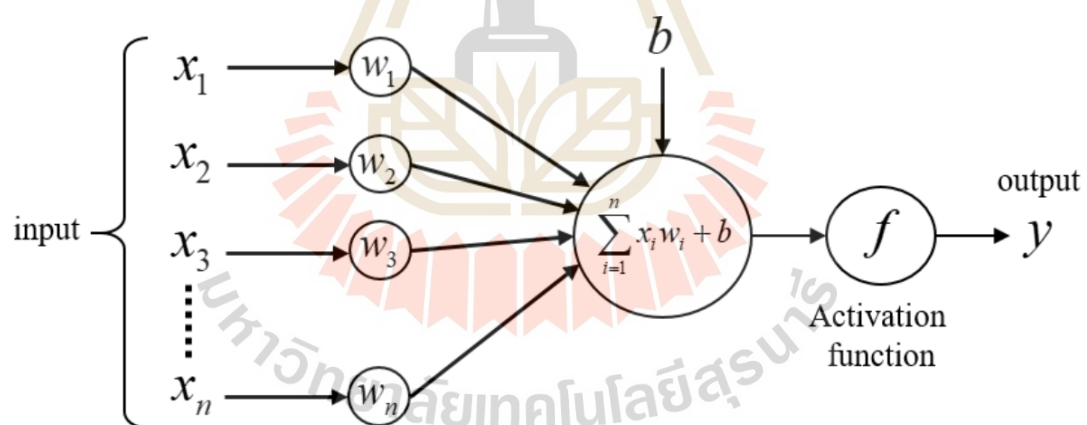
**Unsupervised learning :** อัลกอริทึมจะเรียนรู้จากข้อมูลที่ไม่มีการติดป้ายกำกับ (unlabeled data) เป้าหมายคือการหาโครงสร้างหรือรูปแบบของข้อมูล ตัวอย่างเช่น การจัดกลุ่มลูกค้าที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยไม่ต้องระบุไว้ล่วงหน้าว่าลูกค้าแต่ละกลุ่มมีลักษณะอย่างไร

Reinforcement learning : อัลกอริทึมจะเรียนรู้จากการลองผิดลองถูก โดยได้รับรางวัล (reward) หรือการลงโทษ (punishment) จากสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น การสอนให้โมเดลเล่นเกม โดยโมเดลจะได้รับรางวัลเมื่อทำคะแนนได้ และจะถูกลงโทษเมื่อทำผิดพลาด โมเดลจะเรียนรู้จากประสบการณ์และพัฒนากลยุทธ์การเล่นให้ดีขึ้น

## 2.8 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เปรียบเสมือนสมองกลที่เรียนรู้และทำงานเองได้ จำลองการทำงานของระบบประสาทในสมองมนุษย์ โดยใช้หลักการ การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ฝึกโมเดลให้เรียนรู้และปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้มีความแม่นยำในการทำนายผลลัพธ์

โครงสร้างประกอบด้วยหน่วยประมวลผล (Neuron) หลายตัวเชื่อมต่อกันเป็น ชั้น (Layer) ทำงานร่วมกันเพื่อประมวลผลข้อมูล เปรียบเสมือนเซลล์ประสาทในสมองที่เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย แต่ละชั้นมีหน้าที่เฉพาะ ได้แก่ ชั้นต้นแบบ (Input Layer): รับข้อมูลเข้ามาประมวลผล, ชั้นซ่อน (Hidden Layer): เรียนรู้และวิเคราะห์ข้อมูล และ ชั้นส่งออก (Output Layer): แสดงผลลัพธ์ที่ได้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

## 2.9 การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล

การคัดแยกคุณสมบัติเด่นของข้อมูล (Feature Extraction) เป็นขั้นตอนสำคัญในการเตรียมชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม เปรียบเสมือนการกลั่นกรองข้อมูลคัดแยกคุณสมบัติที่สำคัญช่วยให้โมเดลจดจำรูปแบบได้ดีขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโมเดลโดยรวม งานวิจัยนี้ใช้ วิธีการทางสถิติ ในการคัดแยกคุณสมบัติเด่นของข้อมูล ประกอบด้วย:

- ค่าเฉลี่ย (Mean): ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.6)$$

- ค่าอัตราส่วนค่าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย (Crest factor): อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสัญญาณต่อค่าเฉลี่ย บ่งบอกถึงความแหลมของสัญญาณ

$$C = \frac{x_{peak}}{x_{rms}} \quad (2.7)$$

- ค่าความโด่ง (Kurtosis): บ่งบอกถึงรูปร่างของการกระจายของข้อมูล ว่ามีความแหลมหรือแบน

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (2.8)$$

- อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SINAD): อัตราส่วนระหว่างพลังงานของสัญญาณที่ต้องการ ต่อพลังงานของสัญญาณรบกวน

$$SINAD = \frac{P_{signal} + P_{noise} + P_{distortion}}{P_{noise} + P_{distortion}} \quad (2.9)$$

## 2.10 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2019 ทีมวิจัยที่นำโดย Toumi Yassine ได้ศึกษาและพัฒนาเทคนิค kurtogram เพื่อกำหนด band-pass ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์แอมพลิจูดของตลับลูกปืน โดยใช้การพัฒนาตัวกรองสัญญาณจากการแปลง Hilbert และ FFT เพื่อช่วยแยกคุณสมบัติของสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาใช้ในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อจำแนกประเภทความผิดปกติของตลับลูกปืน ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องถึง 98.08% การวิจัยนี้ช่วยเสริมความเชื่อมั่นในการใช้เทคนิค kurtogram และโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับและจำแนกความผิดปกติของตลับลูกปืนอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 2019 นักวิจัยที่นำโดย Shixin Zhang ได้ทำการศึกษาการวินิจฉัยเชิงคุณภาพของตลับลูกปืนโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) โดยมีการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนแบบมิติเดียวเป็นข้อมูลนำเข้า โครงข่ายประสาทเทียมสามารถแยกแยะคุณสมบัติของ

ข้อมูลความผิดพลาดของตลับลูกปืนได้โดยอัตโนมัติ และผลการจำแนกประเภทนั้นมีความแม่นยำสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม วิธีการนี้ช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการสร้างคุณสมบัติเสมือน และมีความแม่นยำสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายความเชื่อเชิงลึก (Deep Belief Networks, DBN) นอกจากนี้ยังลดจำนวนพารามิเตอร์ของเครือข่ายลงและไม่จำเป็นต้องทำการจำลองล่วงหน้า เมื่อเทียบกับโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ภาพความถี่เวลา วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เวฟเล็ต

ในปี ค.ศ. 2010 นักวิจัยทีมที่นำโดย Liang Qunlong ได้ทำการสำรวจวิธีการตรวจจับภาวะของตลับลูกปืนในเครื่องจักรหมุน โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) พวกเขาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เรียบง่ายและสามารถควบคุมความแม่นยำได้ดี รวมถึงมีความสามารถในการลดเสียงรบกวน คุณสมบัติของโครงข่ายประสาทเทียมนี้คือการใช้ข้อมูลตัวอย่างโดยไม่ต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ และทำการตรวจจับความไม่เชิงเส้นของระบบจากพื้นที่พิกัดจริง (Real coordinate space) ผลลัพธ์ที่ได้คือโมเดลที่เรียบง่ายและการคำนวณที่รวดเร็วในการระบุภาวะของตลับลูกปืน

ในปี ค.ศ. 2021 Pratik Phalle และ Sangram Patil ได้นำเสนอการวิเคราะห์ความผิดพลาดในตลับลูกปืน โดยใช้เทคโนโลยี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแยกแยะผลกระทบของข้อบกพร่องที่วางมีต่อสเปกตรัมการสั่นสะเทือนของลูกปืน การวิเคราะห์พบว่าพีคสูงในแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่สังเกตได้ที่ BPF ในสเปกตรัมความถี่บ่งชี้ถึงข้อบกพร่องที่วางภายในของลูกปืน วิธีการวิเคราะห์นี้ใช้ความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์ แต่ต้องการความแม่นยำและไม่มีการแทรกแซงของมนุษย์ ดังนั้น ใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับโปรแกรม MATLAB และโครงข่ายประสาทเทียมในการตรวจจับความผิดปกติของตลับลูกปืน และได้ผลความถูกต้องอยู่ที่ 94.27% เป็นการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพและมีความสำเร็จในการตรวจจับข้อผิดพลาดในตลับลูกปืนในปีนั้น

ในปี ค.ศ. 2021 นักวิจัยทีมที่นำโดย Anastasia Kotelnikova ได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการควบคุมโดยใช้ตัวสังเกตการณ์แบบปรับค่าพารามิเตอร์โพลได้ เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพในการทำงานของเซอร์โวไดรฟ์ในสถานะที่มีตัวแปรทางกลเปลี่ยนแปลง วิธีการนี้มีความแตกต่างจากวิธีอื่น ๆ โดยตัวสังเกตการณ์จะประมวลผลค่าความเร็วและความเร่งจริงแทน ซึ่งผู้สังเกตการณ์สามารถประมาณค่าแรงบิดโพลและความเฉื่อยรวมของระบบได้ภายใต้คำสั่งประเภทต่าง ๆ การจำลองแนวทางการควบคุมที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนตัวคูณของตัวควบคุมความเร็วจะปรับแต่งโดยอัตโนมัติตามความเฉื่อยโดยประมาณ ทำให้เชื่อถือได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบย่อยทางกล วิธีการนี้เสนอแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมโพลและความเฉื่อยของระบบในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเงื่อนไขการทำงานอย่างสัมพันธ์กับตัวแปรทางกลได้อย่างมีประสิทธิภาพในปีนั้น

ในปี ค.ศ. 2018 นักวิจัยที่นำโดย Jing Sun ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการใช้การปรับปรุงตัวสังเกตการรบกวน (DOB) เพื่อลดการรบกวนและเสียงรบกวนในระบบควบคุมระบบความเร็วของเซอร์โว โดยอ้างอิงจากตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองประยุกต์ใช้บนโปรแกรม MATLAB/Simulink และในแพลตฟอร์มการทดลองกึ่งฟิสิกส์ของ Quanser โดยใช้คอนโทรลเลอร์ PID ที่มีการปรับปรุงและไม่มีการปรับปรุงของ DOB ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า DOB ที่มีการปรับปรุงแล้วสามารถลดสัญญาณรบกวนได้มากกว่า DOB แบบดั้งเดิม และสามารถป้องกันการรบกวนภายนอกและเสียงรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้เสนอแนวทางการปรับปรุง DOB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและลดการรบกวนในระบบควบคุมเซอร์โวในปี 2018 ซึ่งเป็นการแสดงถึงความพึงพอใจในการปรับปรุงที่มีผลลัพธ์มากขึ้นจากการใช้ DOB ในระบบควบคุมของเซอร์โวในระดับวิชาการและการประยุกต์ใช้ในการควบคุมจริงในโลกของอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีในปีนั้น

ในปี ค.ศ. 2017 นักวิจัยที่นำโดย Zhou Minghao ได้ศึกษาและพัฒนาตัวสังเกตการณ์แบบใหม่สำหรับระบบเซอร์โวของความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้การควบคุมโหมดเลื่อนเทอร์มินัลแบบอันดับเต็ม (full-order sliding-mode control) ซึ่งได้รับการออกแบบเฉพาะเพื่อตัวสังเกตการณ์และการควบคุมที่เกี่ยวข้องโดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในและการรบกวนจากภายนอก สัญญาณควบคุมต่อเนื่องถูกสร้างขึ้นเพื่อรับฟีดแบ็คโรเตอร์เรียบและความเร็ว ฟีดแบ็คของโรเตอร์สามารถใช้สำหรับการนำเสนอกควบคุม field orientation control ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ และการประมาณความเร็วสามารถใช้ในการควบคุม มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไร้เซ็นเซอร์ ผลการเปรียบเทียบตัวกรองความถี่ต่ำในโหมดเลื่อนเทอร์มินัลแบบสั่งการเต็มรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมได้ ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพ การจำลอง และการตรวจสอบวิธีการที่เสนออย่างเป็นระบบ

ในปี ค.ศ. 2019 Xiaoming Ren และ Shengju Li ได้ศึกษาและทดลองวิธีควบคุมสองแบบคือ ตัวควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy) และตัวควบคุมแบบฟัซซี-PID โดยพบว่าตัวควบคุม Fuzzy-PID มีประสิทธิภาพไดนามิกที่ดีขึ้นและมีการชดเชยความผิดพลาดแบบคงที่มากกว่าการควบคุมแบบฟัซซี ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวสังเกตการณ์เพื่อลดผลของการรบกวนภายนอกและช่วยควบคุมความเร็วของมอเตอร์เชิงเส้นมีประสิทธิภาพที่ดี แต่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพไดนามิกของมอเตอร์เชิงเส้น แม้ว่าการปรับปรุงนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพคงที่ของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เชิงเส้นได้

ในปี ค.ศ. 2020 นักวิจัยที่นำโดย T Wanglomklang ศึกษาวิธีการตรวจจับความผิดพลาดของตลับลูกปืนเชิงเส้นโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ตามข้อมูลที่สังเกตได้สำหรับระบบอัตโนมัติความเร็วสูง การสร้างแบบจำลองไดนามิกของฟีดแบ็ค และการออกแบบระบบเซอร์โวโดย

ทดสอบใน 3 สถานการณ์ได้แก่ ปกติ, ขาดสารหล่อลื่น 50%, และไม่มีสารหล่อลื่น ข้อมูลคุณลักษณะวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการออกแบบระบบควบคุมมีประสิทธิภาพในการติดตามการตอบสนอง และโมเดล ANN มีความแม่นยำ 99.7% โดยใช้อัลกอริธึม Levenberg Marquardt

ในปี ค.ศ. 2018 นักวิจัยที่นำโดย Eva Navasari ได้ศึกษาความเสียหายของตลับลูกปืน โดยการตรวจสอบผ่านการวิเคราะห์กระแสชั่วคราวโดยใช้วิธีการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น การประมวลผลสัญญาณกระแสชั่วคราวโดยใช้เวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่อง เปรียบเทียบความถี่ในช่วงความถี่ของสัญญาณที่ตลับลูกปืนปกติและเมื่อเกิดข้อผิดพลาด นอกจากนี้โครงข่ายประสาทเทียมถูกใช้ในการจำแนกประเภทของความผิดพลาด ผลการวิเคราะห์พบว่า การจำแนกประเภทมีความสำเร็จในร้อยละ 100 สำหรับข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่รางใน, 98 สำหรับข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่รางนอก และ 100 สำหรับลูกบอลของตลับลูกปืนที่เสียหาย

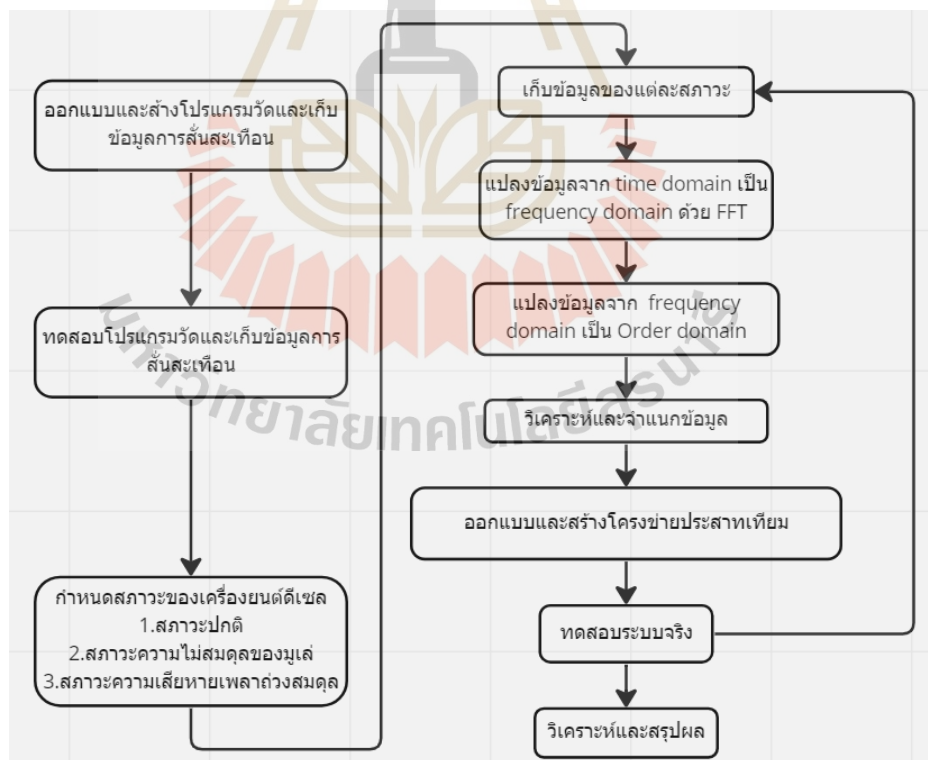


## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 กล่าวนำ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซลด้วยการนำเทคนิคการวัดการสั่นสะเทือนมาใช้ โดยการนำสัญญาณของการสั่นสะเทือนในโดเมนเวลา (Time Domain) มาแปลงให้เป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) เพื่อวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสามารถบ่งชี้ได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ดีเซลมีความรุนแรงในการสั่นสะเทือนมากน้อยเพียงใด และ นำโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาปรับใช้ในการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซล ขั้นตอนการทำวิจัยจะแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



### 3.2 เครื่องยนต์ดีเซล KAWAMA 110 ET

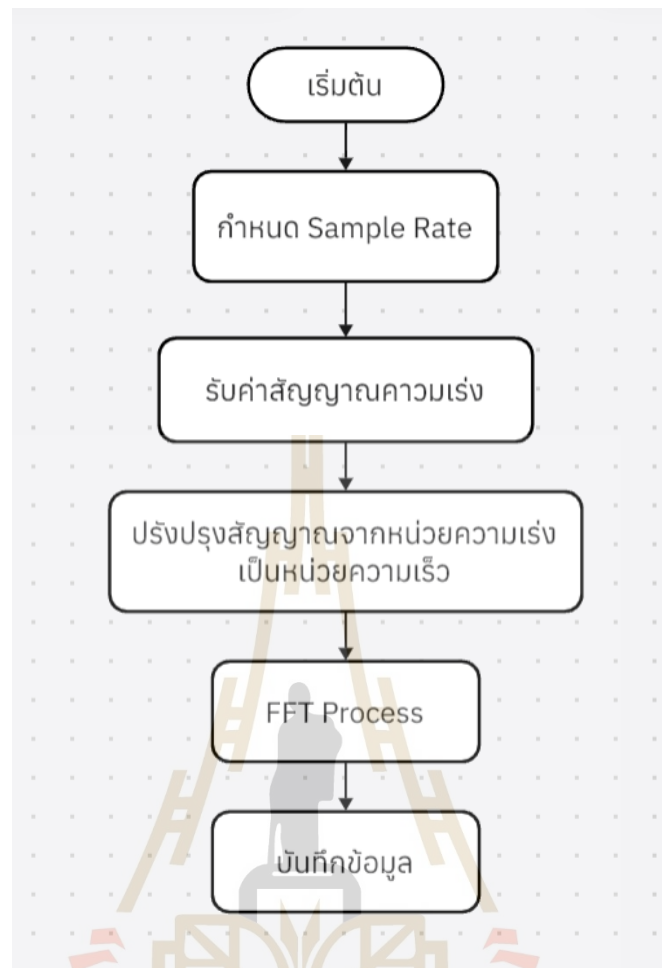
เครื่องยนต์ดีเซลถือเป็นเงื่อนไขหลักในการออกแบบตัวจำแนกความเสียหาย ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความสามารถของเครื่องยนต์ดีเซล อาทิเช่น ความเร็วในการหมุน หรือ กำลังในการหมุน เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต่อการออกแบบการทดลองเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ดีเซล

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องยนต์ดีเซล KAWAMA 110 ET

รายละเอียด	หน่วย	KAWAMA 110 ET
ขนาดกระบอกสูบ X ช่วงชัก	มม.	92 x 90
ปริมาตรกระบอกสูบ	ซีซี.	598
แรงม้าสม่ำเสมอ	แรงม้า/รอบต่อนาที	9.5/2400
แรงม้าสูงสุด	แรงม้า/รอบต่อนาที	11/2400
แรงบิดสูงสุด	แรงม้า/รอบต่อนาที	3.5/1800
ความเร็วรอบต่ำ (ขณะไม่มี ภาระ)	รอบ/นาที	500
ความเร็วรอบสูงสุด (ขณะไม่มี ภาระ)	รอบ/นาที	2400
อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง	ลิตร/ชม.	2.291
เครื่องควบคุมรอบความเร็ว	-	แบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
หัวฉีด	-	แบบเข็มบานปลาย (NP-DN 15 SD NK 1)
แรงดันการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	กก./ตร.ชม.	120
จังหวะฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง	-	ฉีดก่อนจุดศูนย์ตายบน 20 องศา

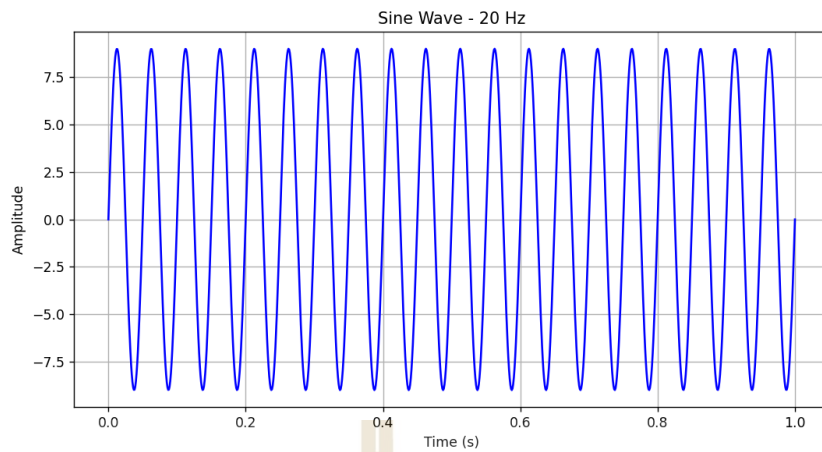
### 3.3 การสร้างระบบวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน

การสร้างระบบวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมภาษา Python โดยระบบแบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนคือการอ่านสัญญาณการสั่นสะเทือนและการอ่านความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลและโดยส่วนการอ่านสัญญาณการสั่นสะเทือนมีลำดับการทำงานของระบบดังรูปที่ 3.2 และมีการทดสอบการทำงานของซอฟต์แวร์ ดังนี้



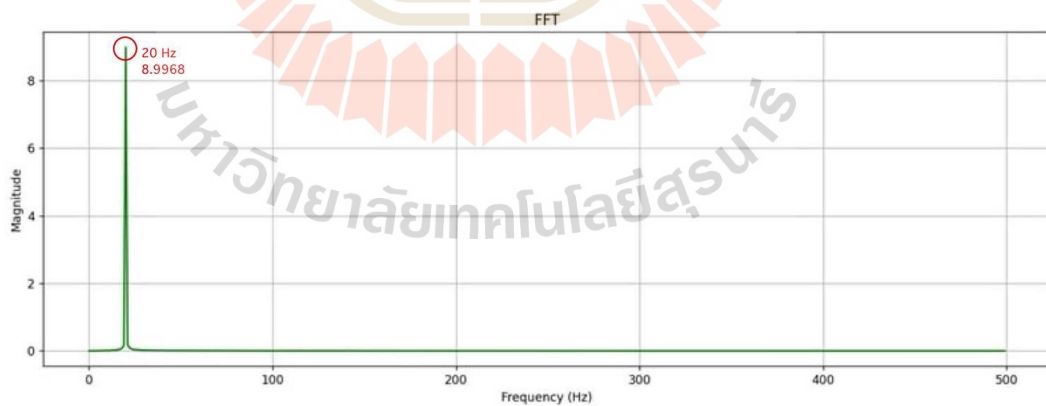
รูปที่ 3.2 ลำดับการทำงานการอ่านสัญญาณการสั่นสะเทือน

ลำดับที่ 1 จะสร้างสัญญาณ Sine Wave ตามสมการ  $Amplitude \times \sin(Frequency \times 2 \times \pi)$  โดยกำหนดให้ขนาด Amplitude มีค่าเท่ากับ 9 และ ความถี่(Frequency) มีค่าเท่ากับ 20 Hz โดยได้สัญญาณดังรูปที่ 3.3

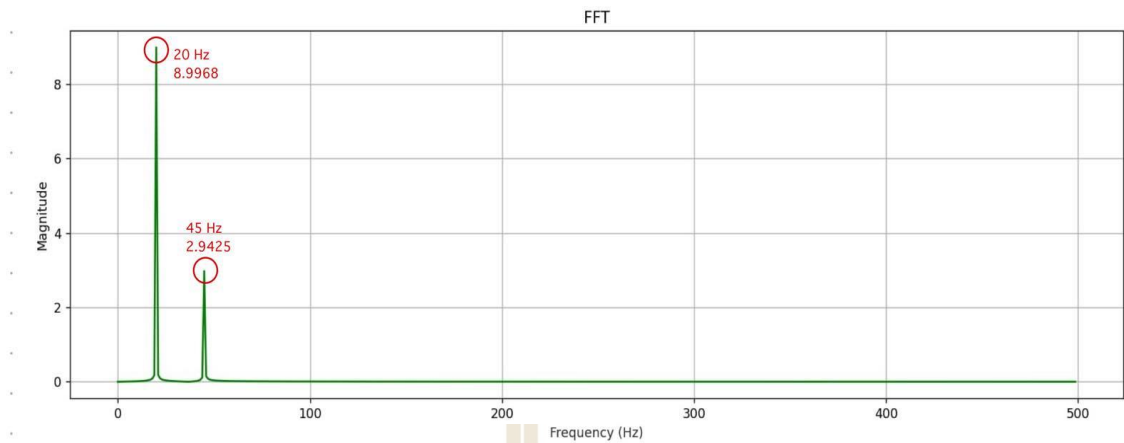


รูปที่ 3.3 สัญญาณ Sine Wave 20 Hz

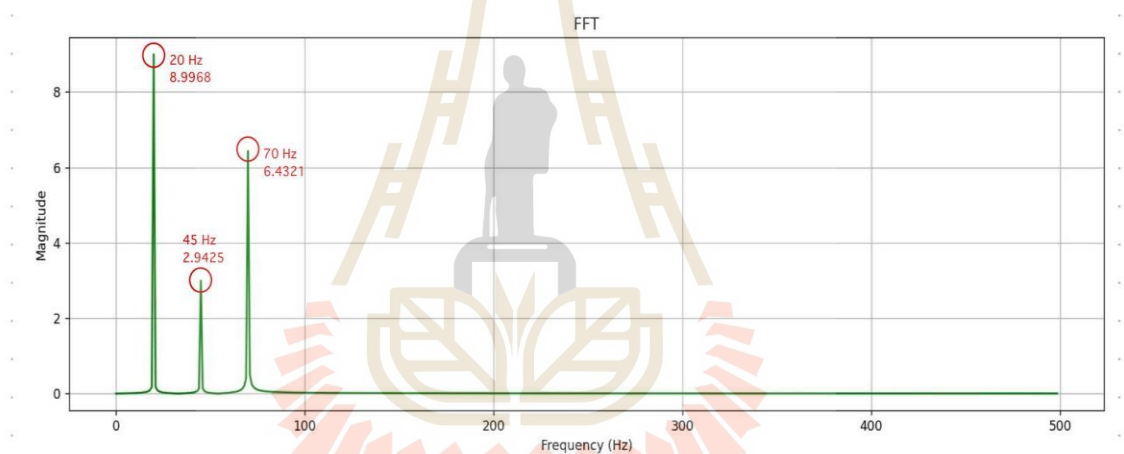
ลำดับที่ 2 ทำการเปลี่ยนสัญญาณในรูปแบบกราฟโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นกราฟโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้วิธีการแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์ (Fourier Transform) จากการใช้ไลบรารีของโปรแกรมภาษา Python และดูการทำงานของของไลบรารีว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด โดยการสร้างสัญญาณ ความถี่ 1, 2 และ 3 ความถี่ตามลำดับ รูปที่ 3.4 แสดงสัญญาณแบบ 1 ความถี่ ที่ 20 Hz รูปที่ 3.5 แสดง สัญญาณแบบ 2 ความถี่ ที่ 20 และ 45 Hz และรูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณแบบ 3 ความถี่ ที่ 20, 45 และ 70 Hz



รูปที่ 3.4 กราฟโดเมนความถี่ 20 Hz



รูปที่ 3.5 กราฟโดเมนความถี่ 20 และ 45 Hz



รูปที่ 3.6 กราฟโดเมนความถี่ 20 , 45 และ 70 Hz

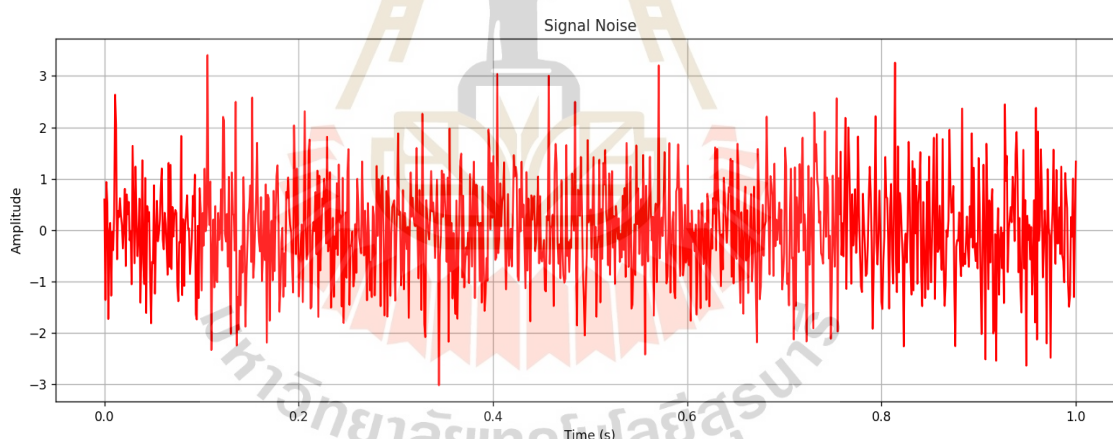
จากผลการจำลองรูปที่ 3.4 – 3.6 สามารถแสดงขนาด Amplitude ที่ทำการป้อนและขนาด Amplitude ที่อ่านได้พร้อมทั้งคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของขนาด Amplitude ที่อ่านได้ โดยผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า Error ของขนาด Amplitude

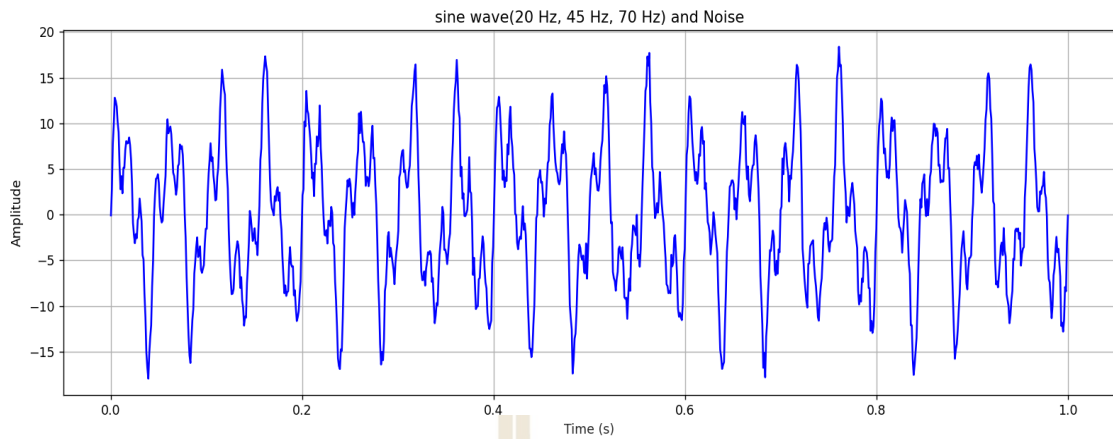
ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9968	0.035%
45	3	2.9925	0.25%
70	6.5	6.4321	1.04%

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการป้อนขนาดแอมพลิจูดเท่ากับ 9, 3 และ 6.5 ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz และขนาดที่อ่านได้มาคำนวณหาค่า Error จะได้กับ 0.035%, 0.25% และ 1.04% ตามลำดับ จะพบว่าขนาดที่อ่านได้ที่ความถี่ 20 Hz มีค่า Error ต่ำที่สุด

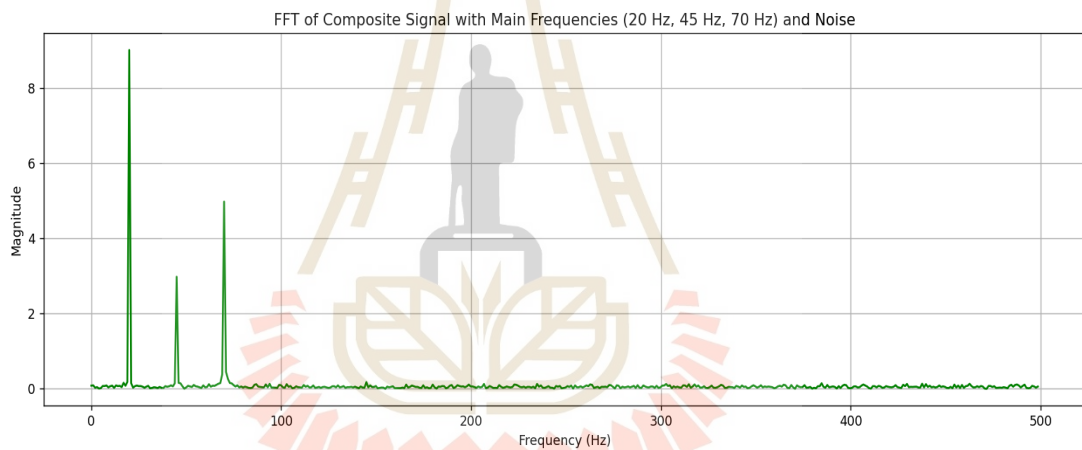
ลำดับที่ 3 หลังจากทดสอบการทำงานของไลบรารีโปรแกรมภาษา Python จะทำการทดสอบระบบโดยการสร้างสัญญาณรบกวน(Noise) แบบสุ่ม ดังรูปที่ 3.7 และเพิ่มสัญญาณรบกวนให้กับ สัญญาณ Sine wave ดังรูปที่ 3.8 ทำให้สัญญาณความถี่มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 โดยจะทำทดลองซ้ำ 20 ครั้ง เพื่อทดสอบการทำงานของระบบว่ายังมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 3.7 สัญญาณ Noise



รูปที่ 3.8 สัญญาณ Sine Wave + Noise



รูปที่ 3.9 กราฟโดเมนความถี่ 20, 45 และ 70 Hz

จากผลการทดลองสามารถแสดงขนาด Amplitude ที่ทำการป้อนและขนาด Amplitude ที่อ่านได้ พร้อมทั้งคำนวณค่า Error ของขนาด Amplitude ที่อ่านได้ ครั้งที่ 1 – 20 ได้ดังตารางที่ 3.3 – 3.22 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 1

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0699	1%
45	3	2.9881	0%
70	6.5	6.5308	0%

ตารางที่ 3.4 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 2

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0359	1%
45	3	3.0307	1%
70	6.5	6.4520	1%

ตารางที่ 3.5 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 3

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9572	1%
45	3	2.9475	2%
70	6.5	6.4367	1%

ตารางที่ 3.6 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 4

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0186	0%
45	3	3.0247	1%
70	6.5	6.5199	0%

ตารางที่ 3.7 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 5

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0079	0%
45	3	2.9821	1%
70	6.5	6.4139	1%

ตารางที่ 3.8 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 6

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0017	0%
45	3	2.9858	1%
70	6.5	6.6090	2%

ตารางที่ 3.9 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 7

ความถี่	ค่าที่ทำกรบ้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0115	0%
45	3	2.9791	1%
70	6.5	6.5002	0%

ตารางที่ 3.10 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 8

ความถี่	ค่าที่ทำกรบ้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.024	0%
45	3	3.0158	0%
70	6.5	6.6247	2%

ตารางที่ 3.11 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 9

ความถี่	ค่าที่ทำกรบ้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9826	1%
45	3	3.0382	1%
70	6.5	6.5747	1%

ตารางที่ 3.12 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 10

ความถี่	ค่าที่ทำกรบ้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9674	1%
45	3	3.0092	0%
70	6.5	6.6247	2%

ตารางที่ 3.13 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 11

ความถี่	ค่าที่ทำกรบ้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9183	1%
45	3	3.0114	0%
70	6.5	6.5747	1%



ตารางที่ 3.14 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 12

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0471	0%
45	3	3.0466	2%
70	6.5	6.4715	0%

ตารางที่ 3.15 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 13

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0088	0%
45	3	3.0321	1%
70	6.5	6.6114	2%

ตารางที่ 3.16 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 14

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9278	1%
45	3	3.0125	0%
70	6.5	6.4494	1%

ตารางที่ 3.17 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 15

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9553	1%
45	3	2.9557	1%
70	6.5	6.5424	1%

ตารางที่ 3.18 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 16

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9560	1%
45	3	3.0092	0%
70	6.5	6.4385	1%

ตารางที่ 3.19 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 17

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9534	1%
45	3	3.0055	0%
70	6.5	6.5838	1%

ตารางที่ 3.20 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 18

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0160	0%
45	3	3.0343	1%
70	6.5	6.6263	2%

ตารางที่ 3.21 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 19

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	9.0773	1%
45	3	3.0323	1%
70	6.5	6.4694	0%

ตารางที่ 3.22 ค่า Error ของขนาด Amplitude ครั้งที่ 20

ความถี่	ค่าที่ทำการป้อน	ค่าที่อ่านได้	%Error
20	9	8.9434	1%
45	3	2.9506	2%
70	6.5	6.5375	0%

จากการทดลองทั้ง 20 ครั้ง จะพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า Error สูงสุดที่อยู่ที 2% ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

ลำดับที่ 4 เมื่อทดสอบการทำงานของระบบที่สัญญาณที่มีการรบกวน(Noise) จะทำการทดสอบ Sample rate โดยกำหนด Sample rate อยู่ในช่วง 100 - 1000 Sample โดยป้อนสัญญาณดังนี้ 20 Hz Amplitude = 9, 45 Hz Amplitude = 3, 70 Hz Amplitude= 6.5 ได้ผลแสดงดังตารางที่ 3.23

ตารางที่ 3.23 ค่า Sample rate ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz

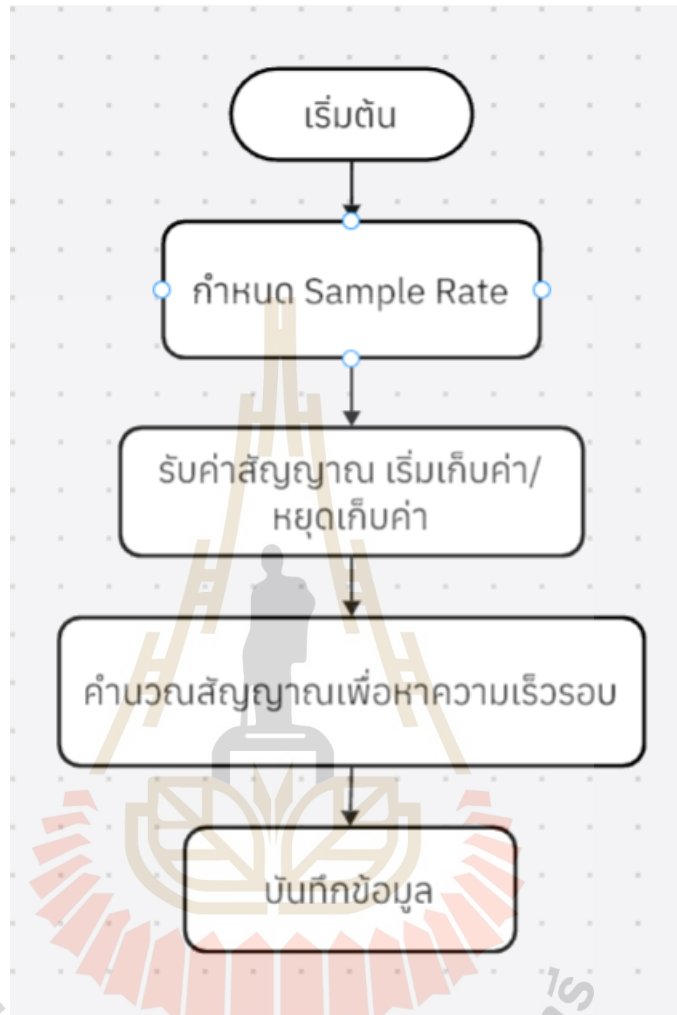
Sampling rate	20 Hz	45 Hz	70 Hz
102	4.5000	อ่านค่าไม่ได้	อ่านค่าไม่ได้
120	7.2000	1.1700	อ่านค่าไม่ได้
150	7.9200	1.7400	3.1850
180	8.2800	2.3700	4.2250
200	8.6400	2.5500	4.9400
230	8.8200	2.6700	5.3300
256	8.9100	2.7600	5.5250
380	8.9997	2.9100	5.9150
510	8.9998	2.9700	6.3050
640	8.9999	2.9999	6.4350
770	8.9999	3.0000	6.4350
890	9.0000	3.0000	6.4997
1000	8.9997	3.0000	6.4998
1150	8.9999	2.9999	6.4999
1270	9.0000	3.0000	6.5000
1400	8.9999	3.0000	6.4999
1560	9.0000	3.0000	6.4999

และสามารถคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Amplitude ที่ทำการป้อน และค่า Amplitude ที่อ่านค่าได้ ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz ดังตารางที่ 3.24

ตารางที่ 3.24 ค่า Error ของ Amplitude ที่อ่านค่าได้ของ Sample rate ที่ความถี่ 20, 45 และ 70 Hz

Sampling rate	20 Hz	45 Hz	70 Hz
102	50%	อ่านค่าไม่ได้	อ่านค่าไม่ได้
120	20%	61%	อ่านค่าไม่ได้
150	12%	42%	51%
180	8%	21%	35%
200	4%	15%	24%
230	2%	11%	18%
256	1%	8%	15%
380	0%	3%	9%
510	0%	1%	3%
640	0%	0%	1%
770	0%	0%	1%
890	0%	0%	0%
1000	0%	0%	0%
1150	0%	0%	0%
1270	0%	0%	0%
1400	0%	0%	0%
1560	0%	0%	0%

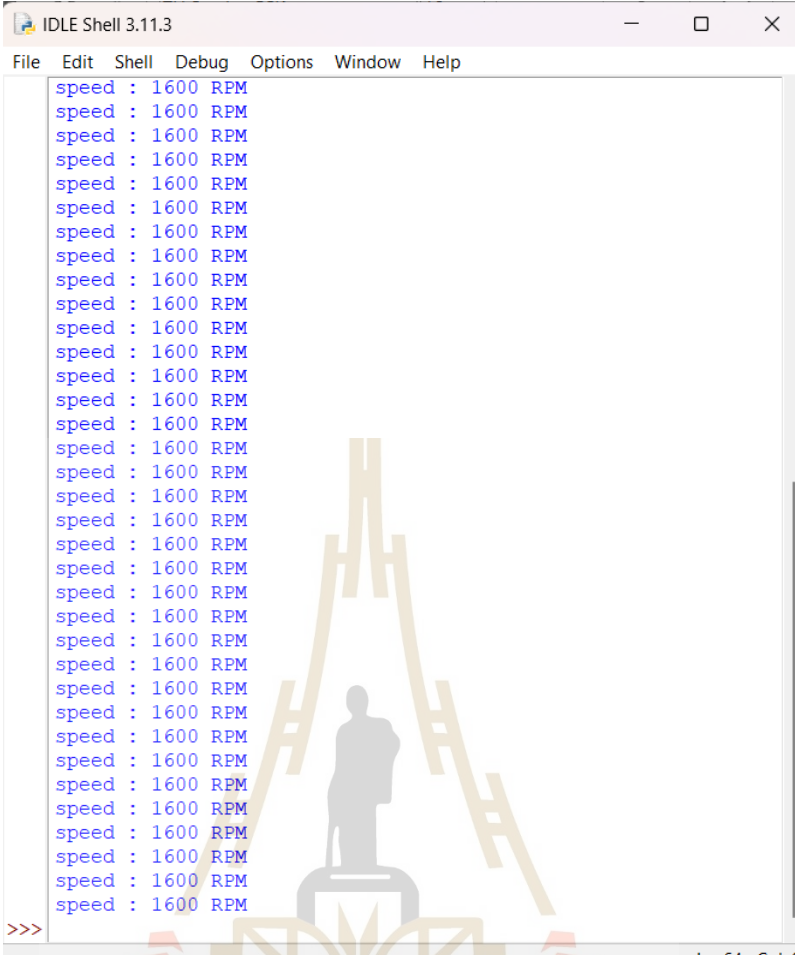
การอ่านความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลมีลำดับการทำงานของระบบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลำดับการทำงานของระบบการอ่านสัญญาณความเร็วรอบ

การหาความเร็วรอบนั้นสามารถทำได้โดยการอ่านค่าจากพรีอ็อกซิมีตีเซนเซอร์ (Proximity Sensor) ที่ใช้ หลักการทำงานจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อเซนเซอร์อยู่ใกล้กับเป้าหมายจะส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมา จะให้สัญญาณทางไฟฟ้าออกมาเป็น 5V นั้นเอง จึงนำมาใช้ในการวัดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซล ตามสมการที่ 3.1 โดยทำการวัดว่าภายในระยะเวลา 1 วินาทีอ่านค่าสะท้อนแสงได้จำนวนเท่าใด จากนั้นจึงแสดงผล ออกมาได้ดังรูป 3.11

$$speed = count * 60/t \quad (3.1)$$



The screenshot shows a terminal window titled 'IDLE Shell 3.11.3'. The window contains a list of 25 lines, each displaying the text 'speed : 1600 RPM'. The text is in a blue monospace font. At the bottom left of the terminal area, there are three right-pointing chevrons '>>>'. At the bottom right, the status bar shows 'Ln: 64 Col: 0'. A large, semi-transparent watermark of a university logo is overlaid on the terminal content.

รูปที่ 3.11 สัญญาณความเร็วรอบ

จากการทดสอบการหาความเร็วรอบ จะพบว่าระบบสามารถทำงานได้ โดยโปรแกรมสามารถแสดงค่าความเร็วรอบได้อย่างถูกต้องแสดงว่าโปรแกรมสามารถอ่านความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 3.4 การสร้างชุดอุปกรณ์เก็บและประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือน

การที่จะตรวจสอบการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องยนต์ดีเซล จำเป็นจะต้องสร้างอุปกรณ์จัดเก็บและประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งการทำงานของอุปกรณ์คือ อ่านค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากเซนเซอร์ จากนั้นจะนำค่าสัญญาณที่อ่านได้เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณและส่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณออกมาจัดเก็บไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ Microcontroller เป็นตัวควบคุมและคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกัชุดอุปกรณ์ดังนี้

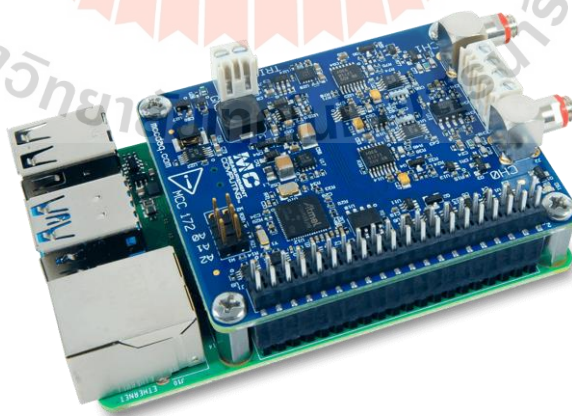
### 3.4.1 Raspberry Pi 4



รูปที่ 3.12 Raspberry Pi 4

Raspberry Pi เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ที่มีความสามารถเหมือนเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ทุกประการทั้งต่อ จอแสดงผล(Monitor) แลน(Lan) หรือ ประมวลผลข้อมูล เพียงแต่มีประสิทธิภาพการประมวลผลที่ไม่เทียบเท่ากับเครื่องคอมพิวเตอร์และยังมี GPIO(general purpose input/output) ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมและรับค่าจากอุปกรณ์ภายนอกได้

### 3.4.2 IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi



รูปที่ 3.13 IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi

IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi เป็นโมดูล Digilent MCC 172 IEPE การวัด DAQ HAT สำหรับ Raspberry Pi มีสองช่องทางสำหรับการวัดเสียงและการสั่นสะเทือนจากเซ็นเซอร์ IEPE มาตรฐานความถี่และไมโครโฟน HAT มี A/D 24 บิตต่อช่องสัญญาณและอัตราตัวอย่างสูงสุด 51.2 KS/s/ch สามารถวาง MCC HAT ได้สูงสุดแปดชิ้นบน Raspberry Pi หนึ่งตัว

### 3.4.3 Proximity Sensor

พร็อกซิมีตี้เซ็นเซอร์ (Proximity Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถตรวจจับวัตถุได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุโดยตรง ทำให้ไม่เกิดรอยหรือการชำรุดเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งจะอาศัยหลักการจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณด้านหน้าของอุปกรณ์ เมื่อเซ็นเซอร์อยู่ใกล้กับวัตถุเป้าหมาย มันจะส่งสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วในการตรวจจับและไม่มีการสัมผัสกับตัววัตถุ มีความทนทาน การตรวจจับมีเสถียรภาพ เวลาการตอบสนองรวดเร็วถึง 1ms. ใช้งานง่ายและติดตั้งง่าย



รูปที่ 3.14 Proximity Sensor



### 3.4.4 Acceleration Meter

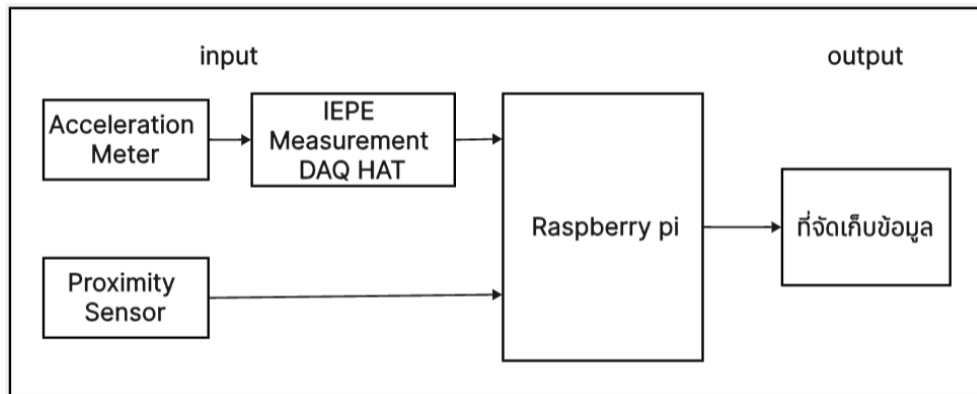


รูปที่ 3.15 Acceleration Meter

Accelerometer หรือมิเตอร์ความเร่ง เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเร่งที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง (ในหน่วย  $m/s^2$ ) ของแรงโน้มถ่วงหรือค่า G ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $9.8 m/s^2$  โดยหลักการทำงานของมันเริ่มต้นจากกล่องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่มีสปริงติดอยู่ทุกด้าน โดยเมื่อมีแรงที่มากกระทำต่อกล่องทำให้กล่องเอียงไปด้านหนึ่ง สปริงก็จะยุบไปด้านนั้นตามแรงที่มากกระทำ เรียกได้ว่าแรงดันของสปริงจะน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก ในการทำงาน Accelerometer นั้นใช้วงจรไฟฟ้าในการดึง Output Analog ออกมาใช้งานในหน่วยของแรงดันไฟฟ้า เราสามารถใช้ Accelerometer เพื่อเป็นตัวชี้วัดว่าอยู่ในสถานะ Static (นิ่งเฉย) หรือ Dynamic (เคลื่อนไหวทันทีทันใด หรือหยุดทันทีทันใด) ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวหรือการหยุดของวัตถุได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้

### 3.4.5 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของชุดอุปกรณ์

จากอุปกรณ์ที่กล่าวมาข้างต้นนำมาประกอบเพื่อใช้เก็บและประมวลผลสัญญาณการสั่นสะเทือน เริ่มต้นจากการเชื่อมต่อเซนเซอร์ตรวจวัดการสั่นเข้ากับตัวส่งผ่านข้อมูลประเภท DAQ จากนั้นนำข้อมูลความเร็วรอบที่วัดได้จาก Proximity Sensor sensor และค่าสัญญาณการสั่นที่วัดได้นำไปป้อนเป็น Input ให้กับ Raspberry pi จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปคำนวณค่าหา พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องและทำการแปลงข้อมูลจากโดเมนเวลาความเป็นโดเมนถี่และส่งข้อมูลที่จัดเก็บข้อมูล ซึ่งแผนภาพของการเชื่อมต่อ จะเป็นดังรูปที่ 3.16



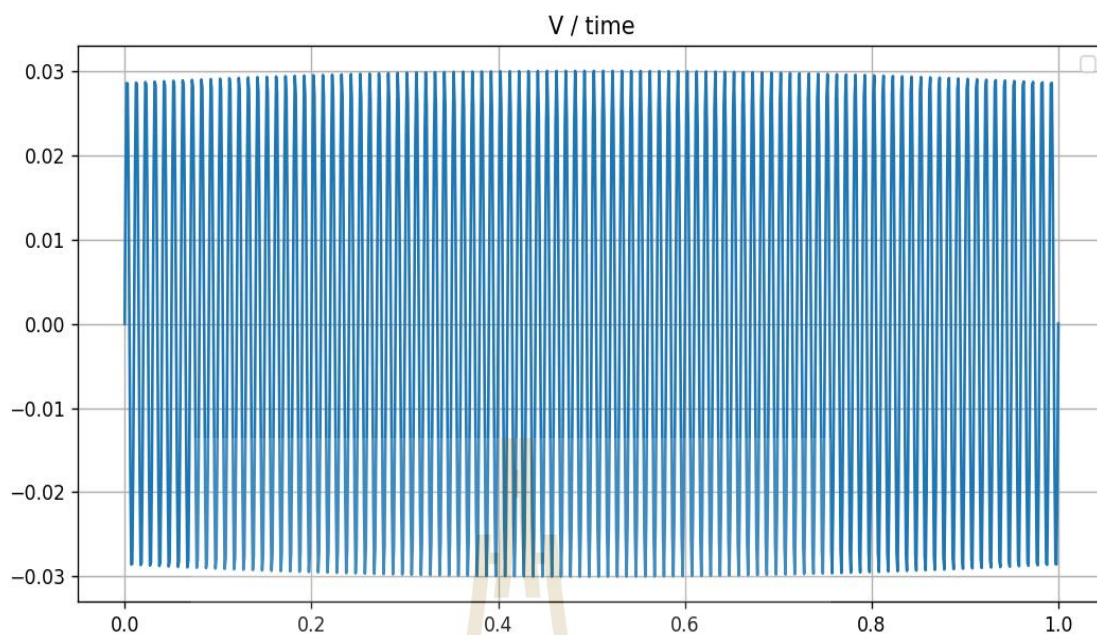
รูปที่ 3.16 แผนภาพของการเชื่อมต่อของอุปกรณ์

### 3.5 การสอบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือน

การสอบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือนทำโดยการนำเครื่องสอบเทียบที่มีการสร้าง สัญญาณการสั่นสะเทือนขนาด 10 mm/s เพื่อเป็นต้นกำเนิดสัญญาณให้กับเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3.17 จากนั้นอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งอ่านได้จากเซนเซอร์การสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 เครื่องสอบเทียบสัญญาณการสั่นสะเทือน

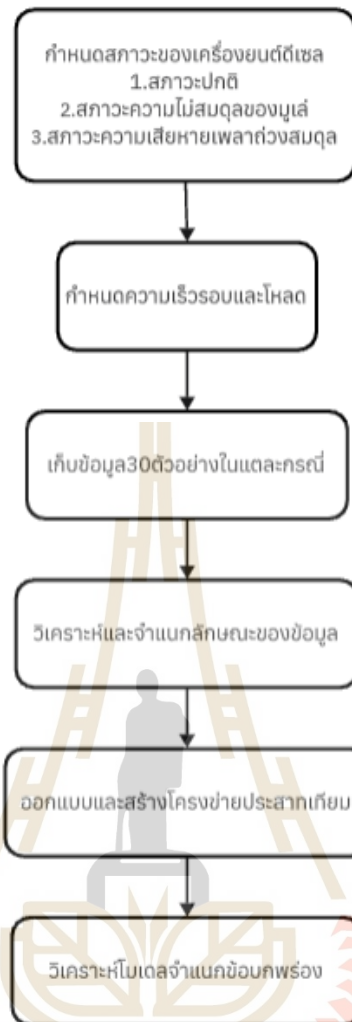


รูปที่ 3.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากเซนเซอร์

### 3.6 การออกแบบการทดลองในแต่ละกรณี

ในงานวิจัยนี้ได้จำลองสถานะของเครื่องยนต์ดีเซลทั้งหมด 3 กรณี ประกอบด้วย สถานะปกติ สถานะความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance) และ สถานะความเสียหายเพลาถ่วงสมดุล (Balancer fault) โดยในการทดลองจะกำหนดความเร็วรอบไว้ที่ 1700 rpm และใส่โหลด 75 kg/cm<sup>2</sup> เพื่อเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งแสดงขั้นตอนการทดลอง ในรูปที่ 3.19 ดังนี้

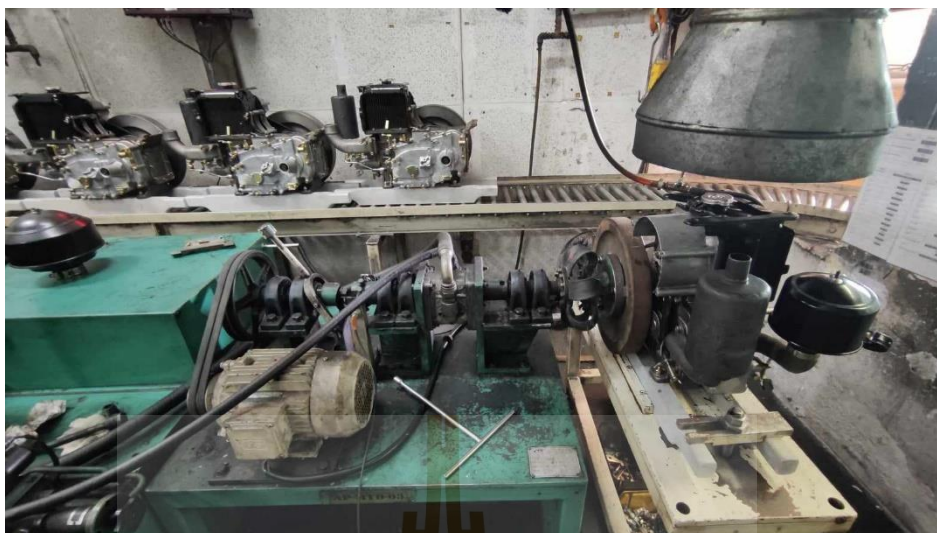
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

### 3.6.1 การกำหนดเงื่อนไขการทำงาน

ได้กำหนดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลที่คงที่อยู่ที่ 1700 รอบต่อนาที และกำหนดภาระโหลดอยู่ที่  $75 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งลักษณะการต่อของเครื่องยนต์ดีเซลกับโหลดแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ลักษณะการต่อของเครื่องยนต์ดีเซลกับโหลด

### 3.6.2 การสร้างสภาวะความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance)

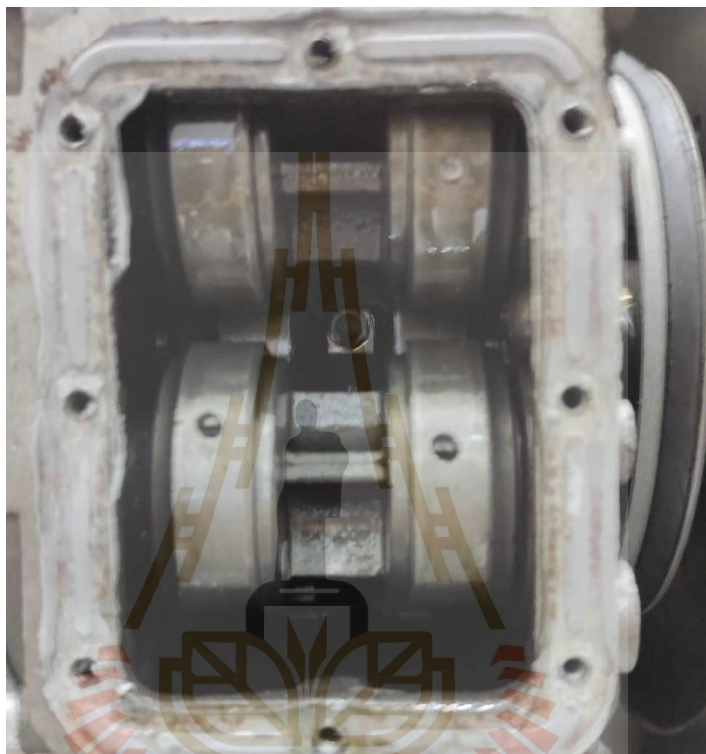
โดยปกติแล้วมูเล่่นั้นจะมีความสมดุลในตัวอยู่แล้ว และพร้อมใช้งานในสภาวะงานปกติ ส่วนในสภาวะการเสียสมดุลของมูเล่่นั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเจาะมูเล่ด้วยสว่านไฟฟ้า เพื่อให้มูเล่เกิดการเสียสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 มูเล่ในสภาวะเสียสมดุล

### 3.6.3 การสร้างสถานะความเสียหายเพลาถ่วงสมดุล(Balancer fault)

โดยปกติแล้วเพลาถ่วงสมดุลนั้นจะมีความสมดุลในตัวอยู่แล้ว และพร้อมใช้งานในสภาวะงานปกติ ส่วนในสภาวะการเสียหายของเพลาถ่วงสมดุลนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเจาะมเพลาถ่วงสมดุลด้วยสว่านไฟฟ้า เพื่อให้เพลาถ่วงสมดุลเกิดการเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 3.22



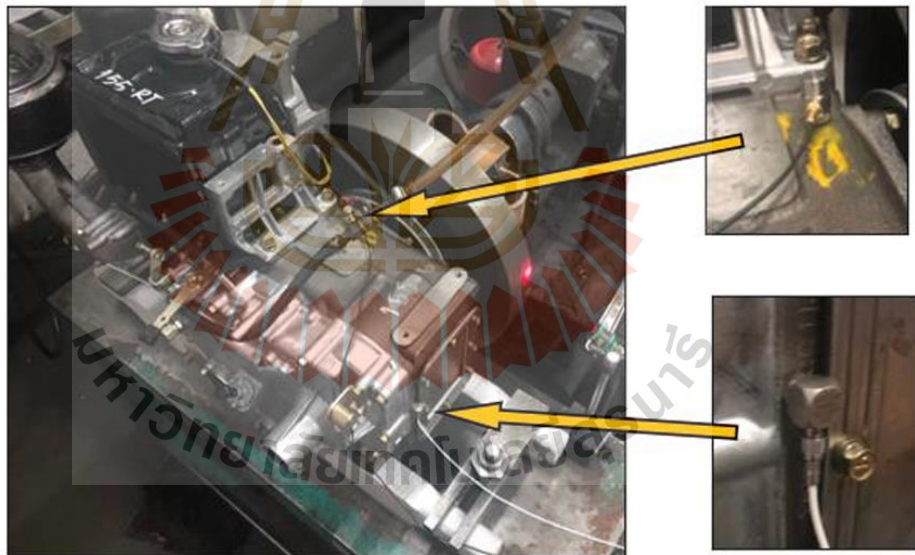
รูปที่ 3.22 เพลาถ่วงสมดุลในสภาวะเสียหาย

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการจำแนกความเสียหายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะทดสอบกระบวนการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับเครื่องจำลองความเสียหายของของเครื่องยนต์ดีเซล ในการทดสอบจะทดสอบในสถานะที่มีโหลด 75 kg/cm<sup>2</sup> โดยจะใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซล โดยจะจำลองสามสถานะคือ สถานะปกติ, สถานะความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance) และ สถานะความเสียหายเพลถ่วงสมดุล (Balancer fault) สำหรับการทดสอบในแต่ละสถานะ จะกำหนดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลให้อยู่ที่ประมาณ 1700 รอบต่อนาที

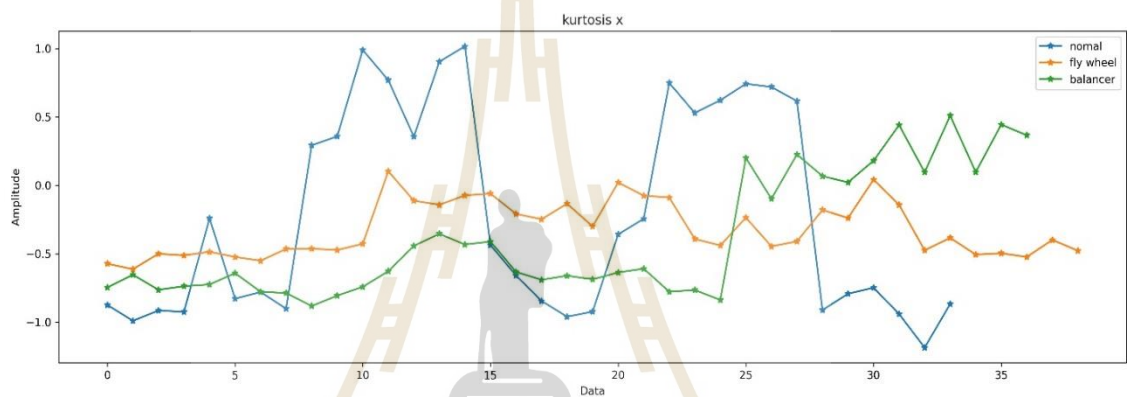


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์

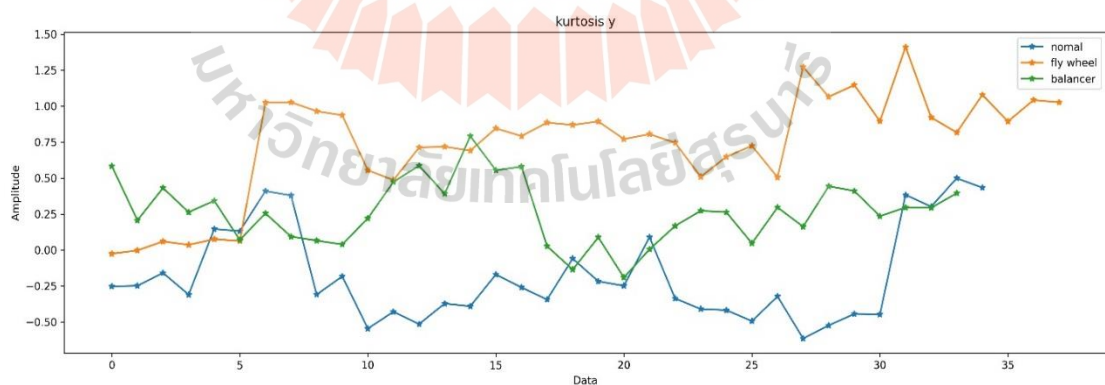
#### 4.2 การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล

การคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล (Feature Extraction) คือ การที่นำข้อมูลที่มีมากและซับซ้อนมาแยกลักษณะเด่นที่สำคัญและมีความหมาย โดยการนำข้อมูลมาแปลงให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการนำไปใช้งาน โดยทั่วไปจะมุ่งเน้นเจาะจงที่การคัดแยกลักษณะเด่นที่เกี่ยวข้องกับงาน ซึ่งในงานวิจัย

ได้ใช้พารามิเตอร์ทางสถิติประกอบด้วย ค่าความโด่ง (Kurtosis), ค่าสูงสุด (Peak Value), ค่าเฉลี่ย (Mean), และค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) เพื่อตัดแยกข้อมูล สำหรับการทดลองมีข้อมูลทั้งหมด 35 ข้อมูลในแต่ละสภาวะ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนทั้งหมด 2 จุด คือ ที่ด้านบนของเครื่องยนต์ดีเซล (แนวแกน Y) และที่ด้านหน้าของเครื่องยนต์ดีเซล (แนวแกน X) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และผู้ทำวิจัยได้นำข้อมูลมาทำการตัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูลทั้งที่เป็น Sine Wave และ Fast Fourier transform (FFT) โดยจะพิจารณาที่ 2 ช่วงความถี่ คือ 20-35 Hz และ 50-65 Hz หรือก็คือช่วงของ Order 1 และ Order 2 รูปต่อไปนี้จะแสดงลักษณะของข้อมูลที่มีการตัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูลแล้ว ดังนี้

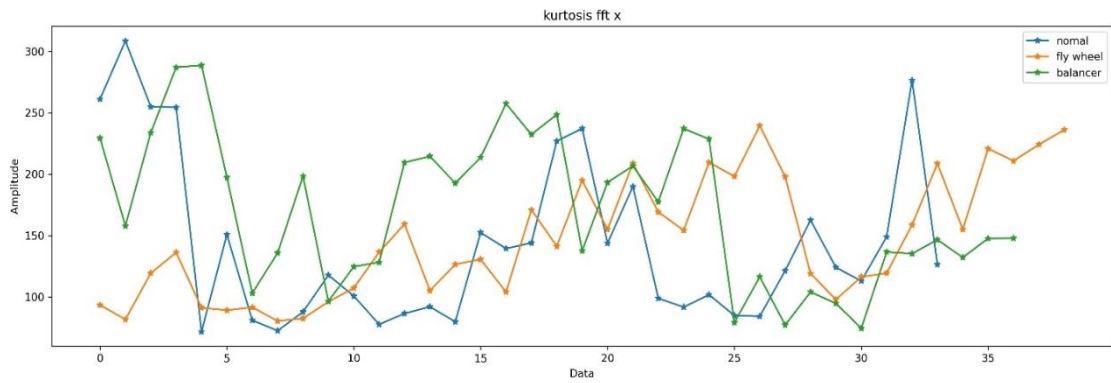


รูปที่ 4.2 Kurtosis แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz

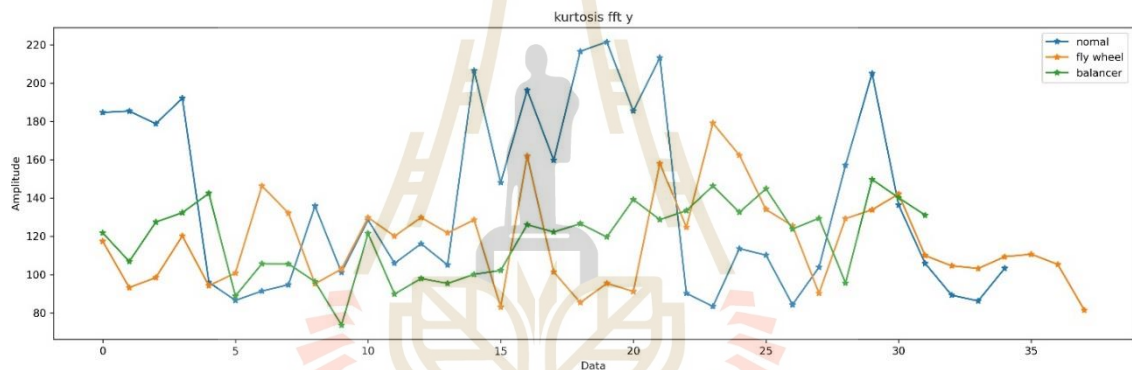


รูปที่ 4.3 Kurtosis แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz

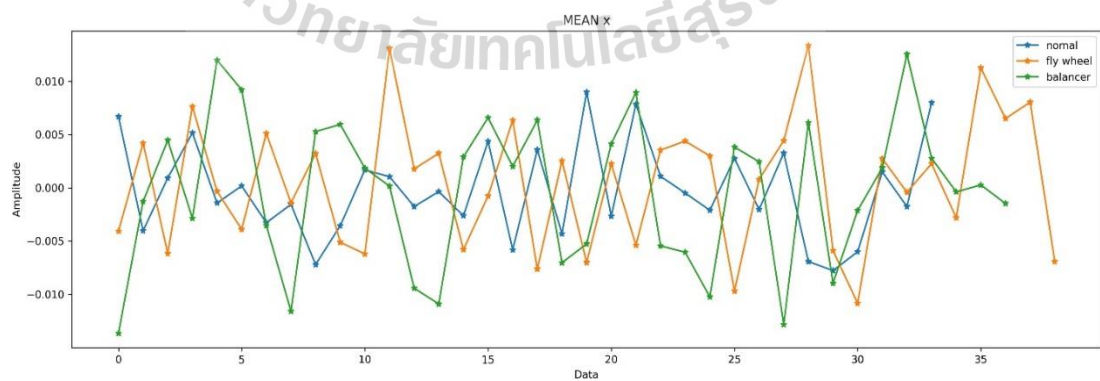




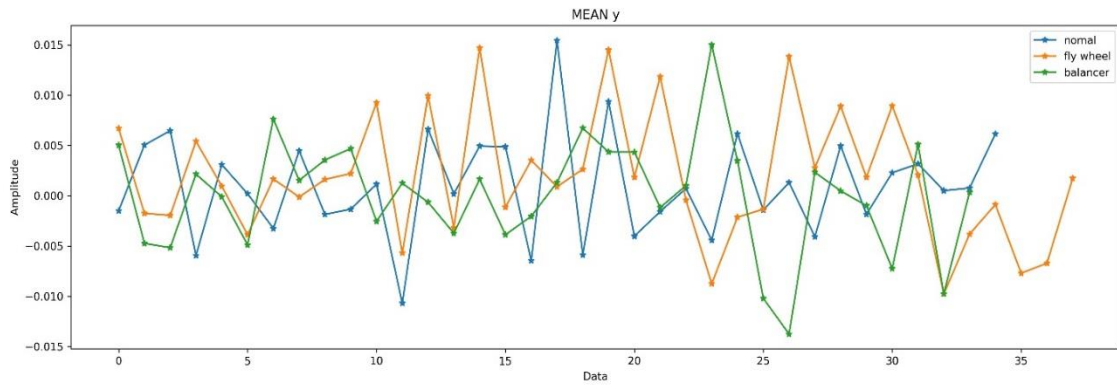
รูปที่ 4.4 Kurtosis แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



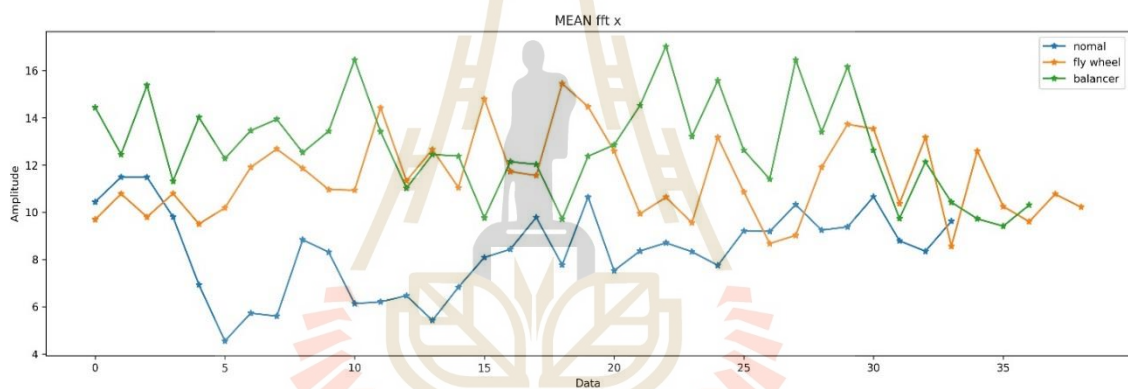
รูปที่ 4.5 Kurtosis แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



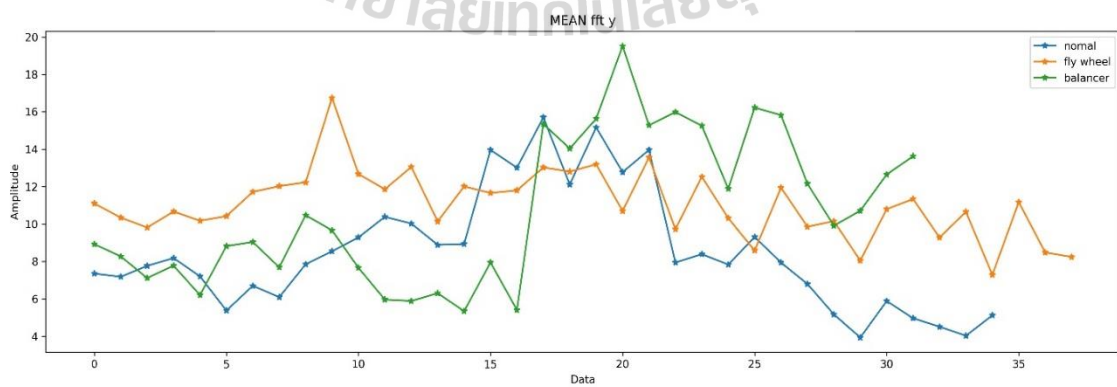
รูปที่ 4.6 Mean แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz



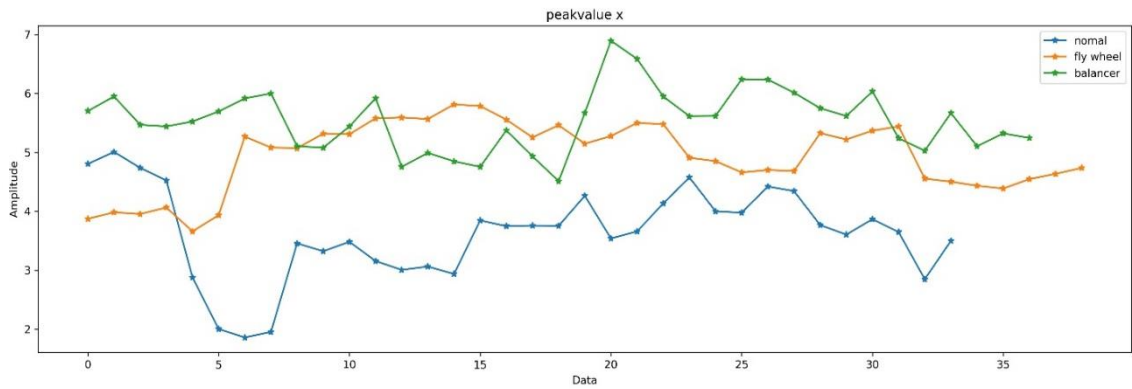
รูปที่ 4.7 Mean แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz



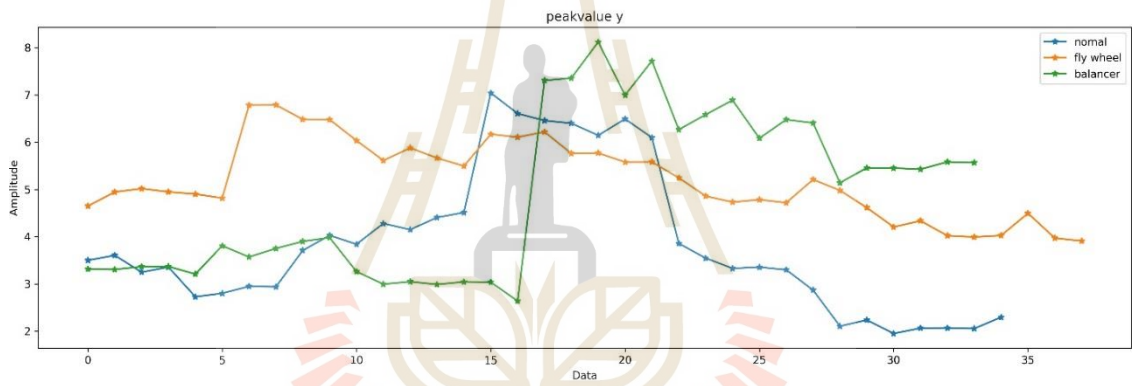
รูปที่ 4.8 Mean แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



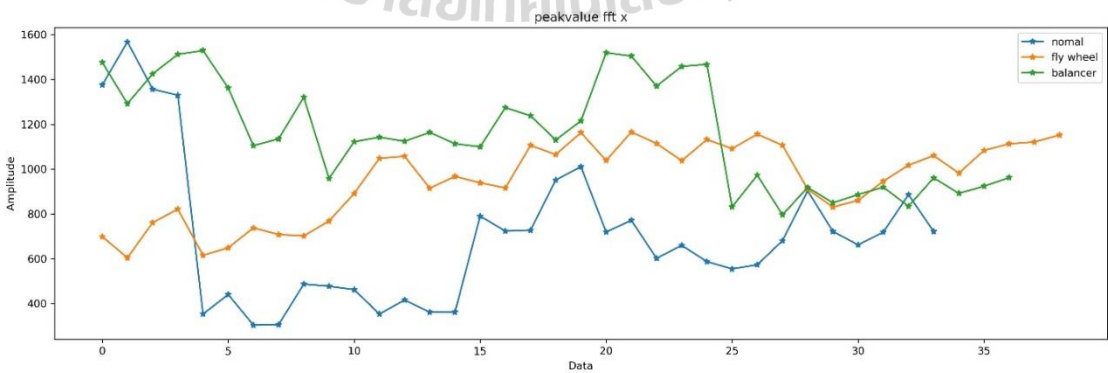
รูปที่ 4.9 Mean แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



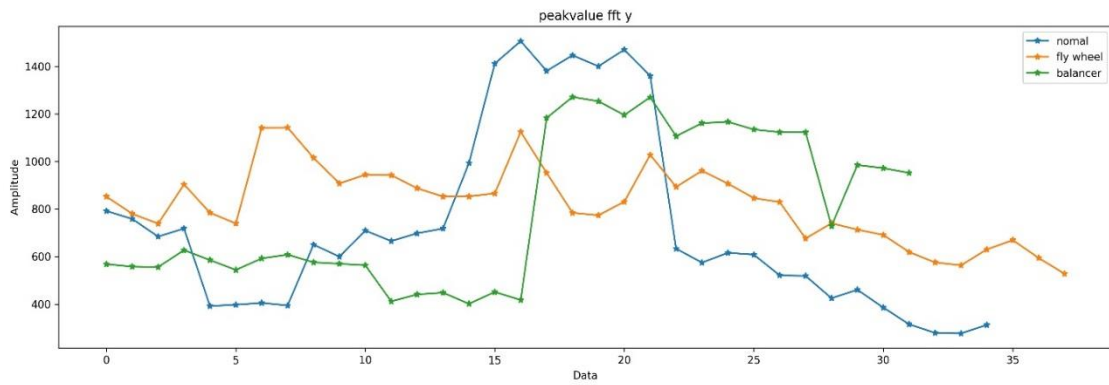
รูปที่ 4.10 Peak Value แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz



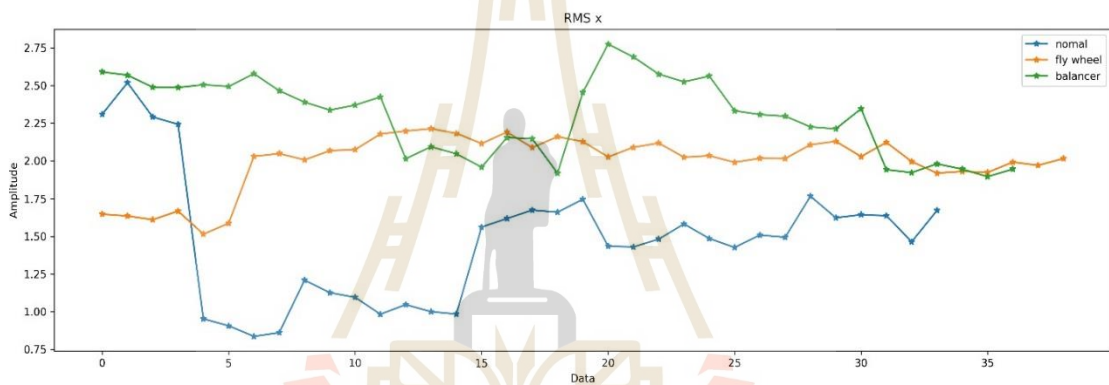
รูปที่ 4.11 Peak Value แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz



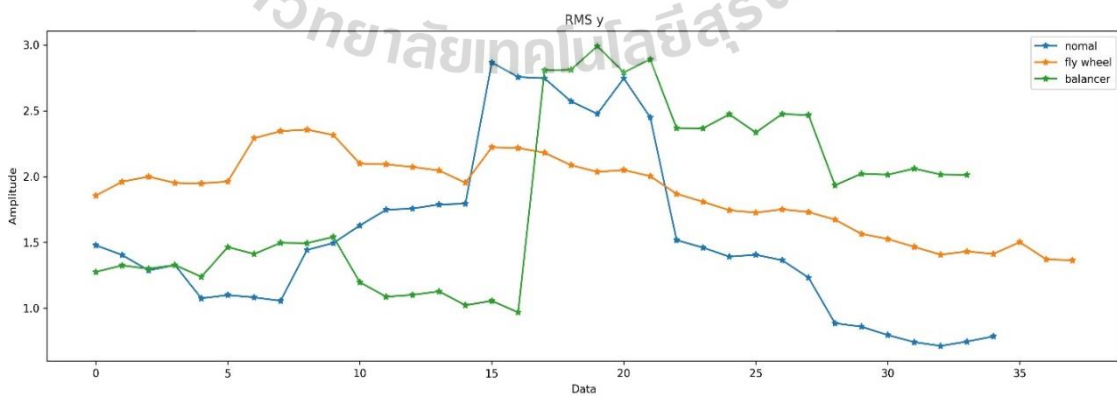
รูปที่ 4.12 Peak Value แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



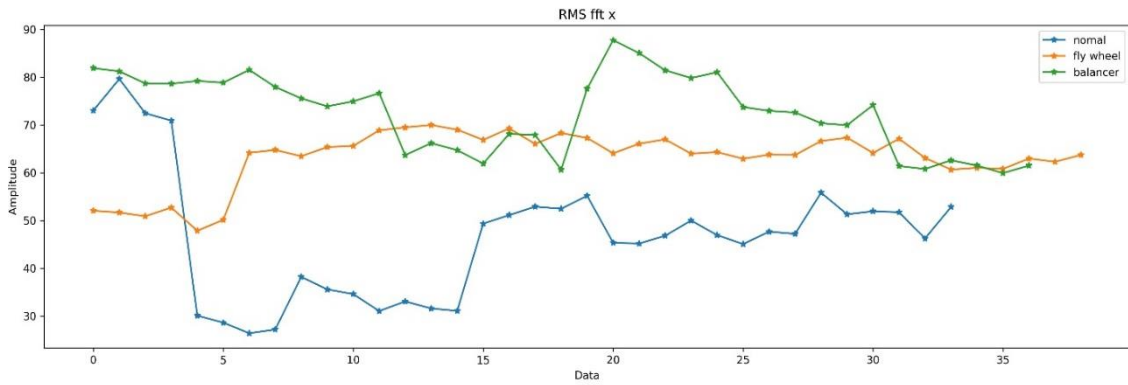
รูปที่ 4.13 Peak Value แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



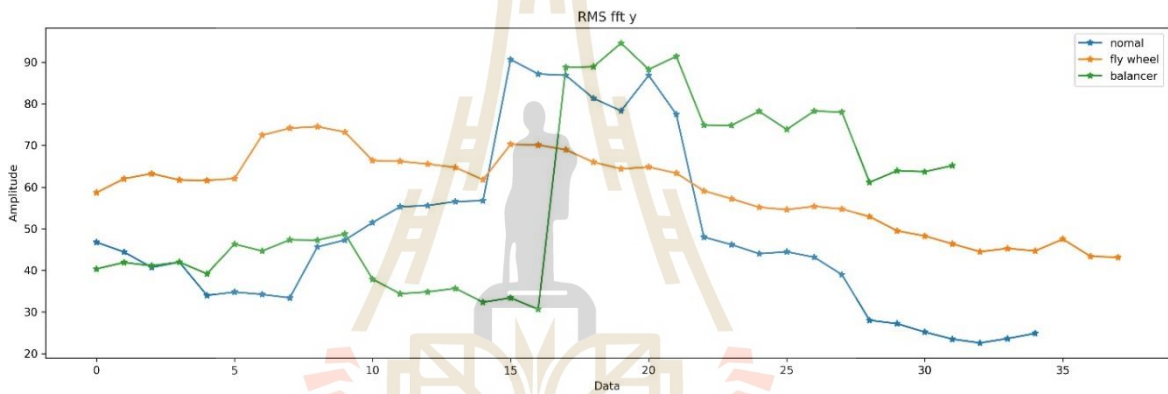
รูปที่ 4.14 root mean square แนวแกน X ของ Sine Wave 50-65 Hz



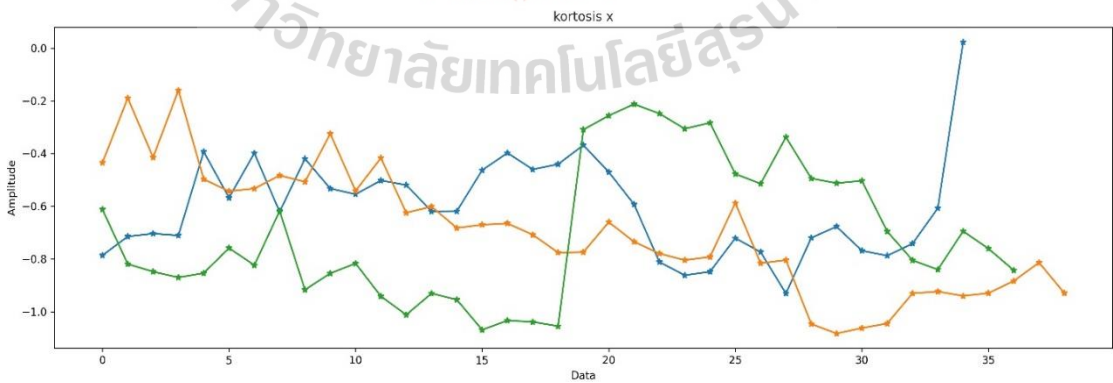
รูปที่ 4.15 root mean square แนวแกน Y ของ Sine Wave 50-65 Hz



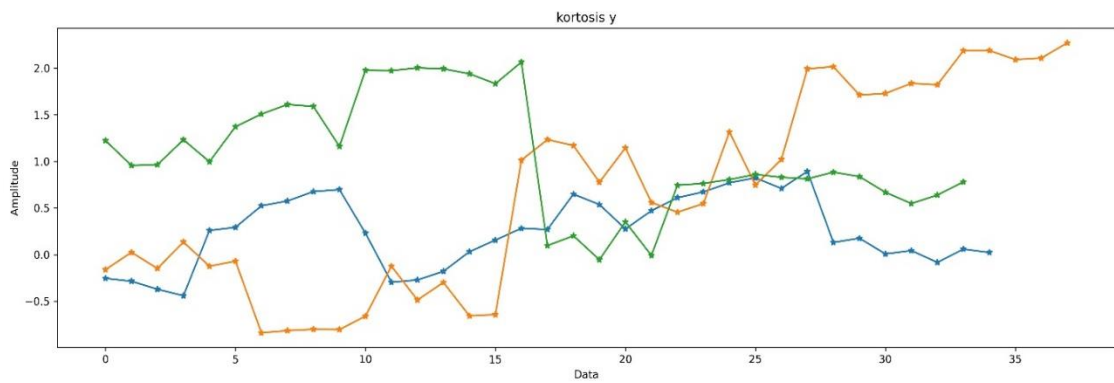
รูปที่ 4.16 root mean square แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



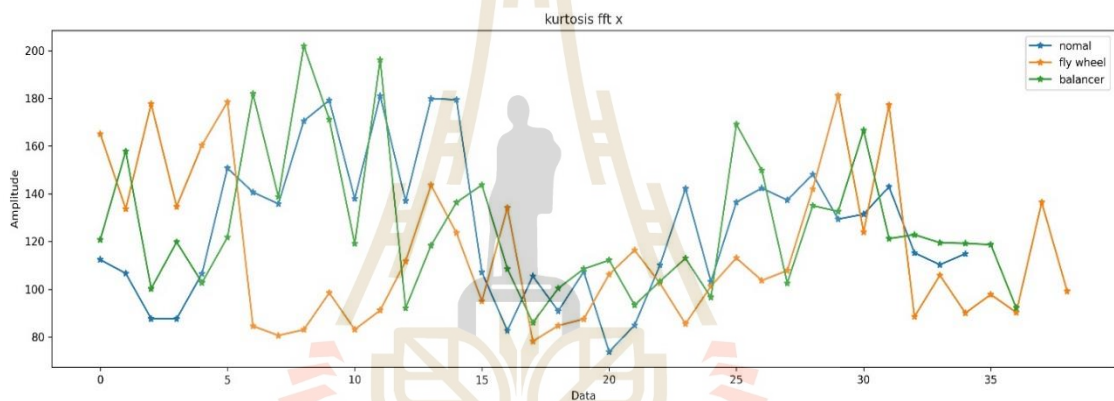
รูปที่ 4.17 root mean square แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 50-65 Hz



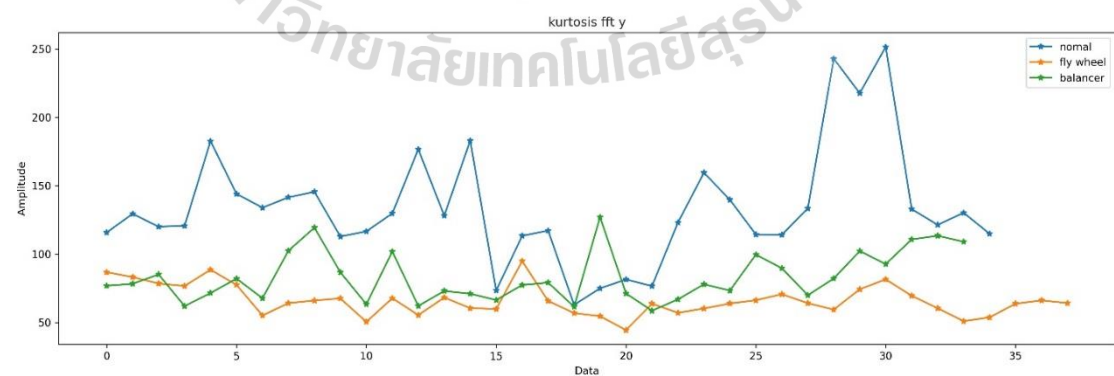
รูปที่ 4.18 Kurtosis แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz



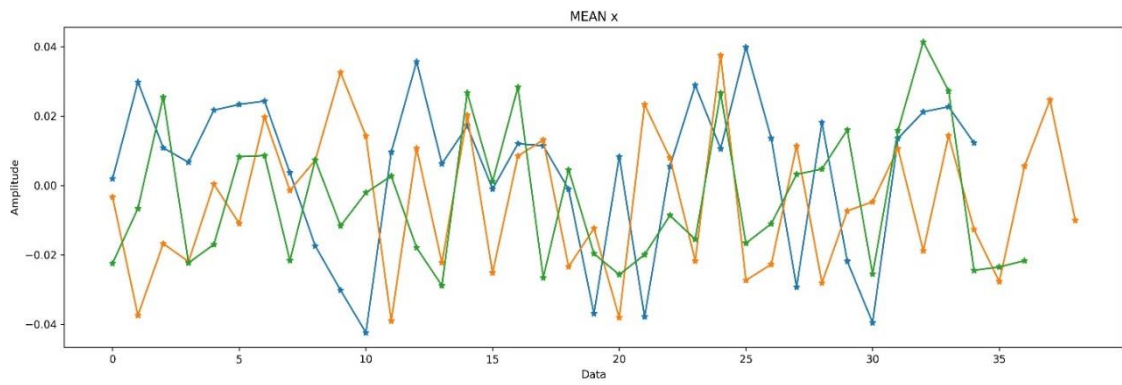
รูปที่ 4.19 Kurtosis แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz



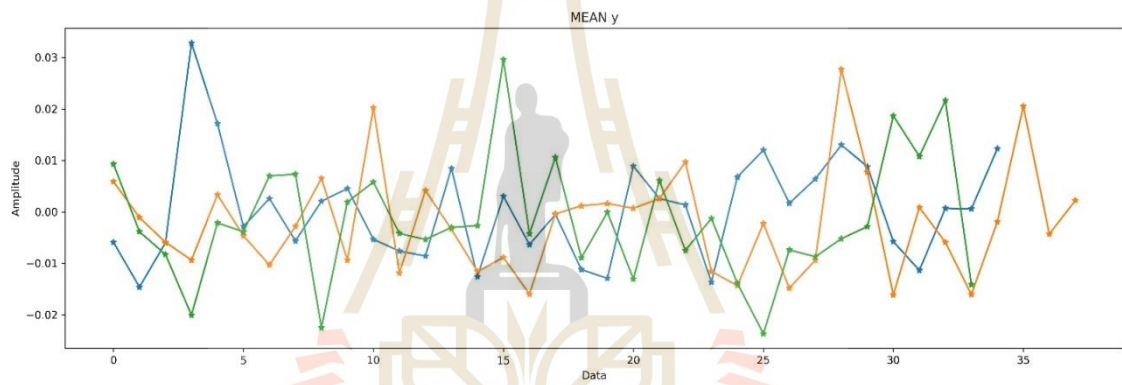
รูปที่ 4.20 Kurtosis แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz



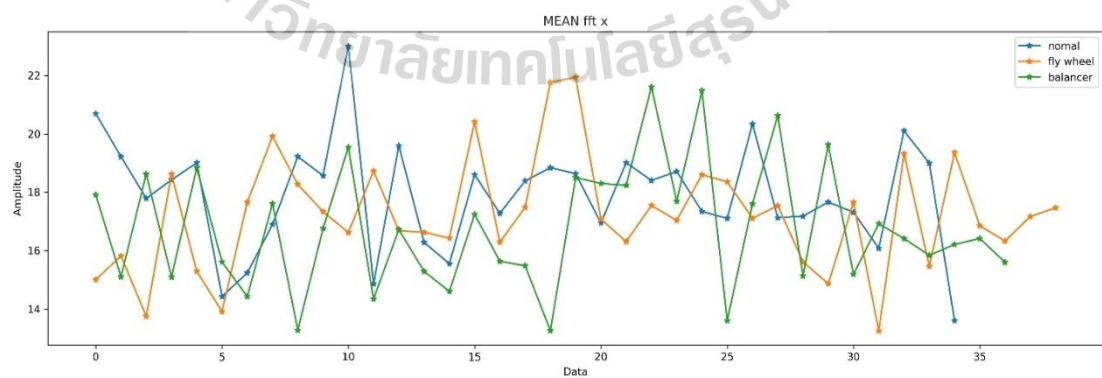
รูปที่ 4.21 Kurtosis แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz



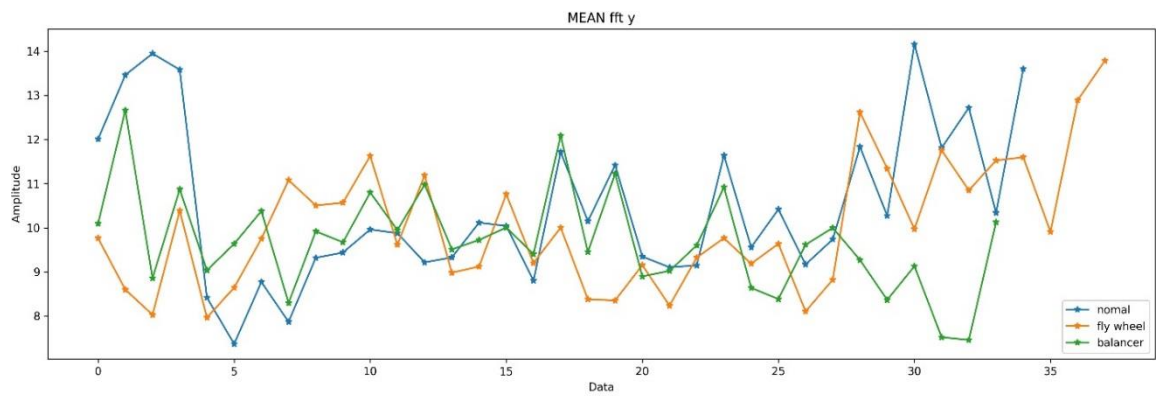
รูปที่ 4.22 Mean แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz



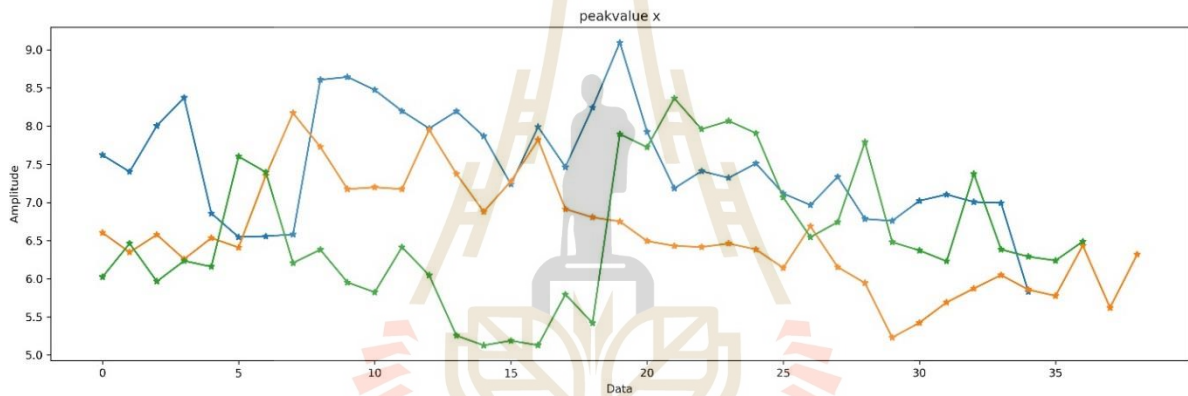
รูปที่ 4.23 Mean แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz



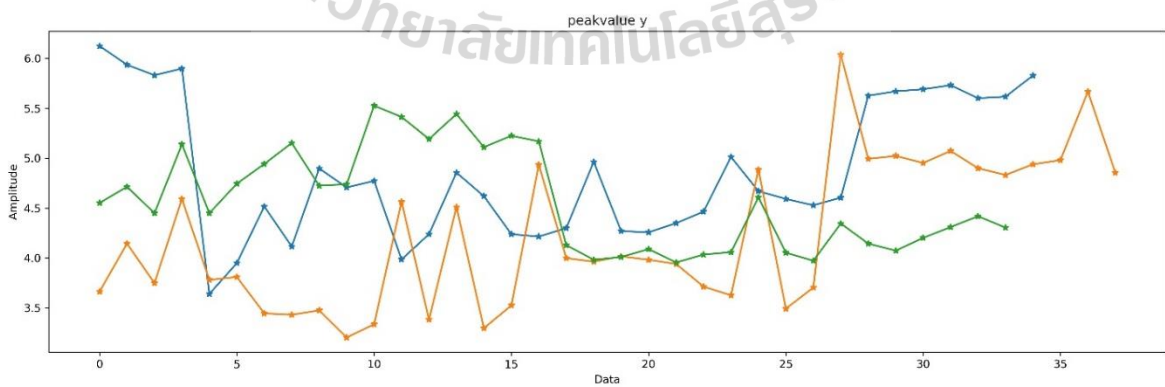
รูปที่ 4.24 Mean แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz



รูปที่ 4.25 Mean แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz

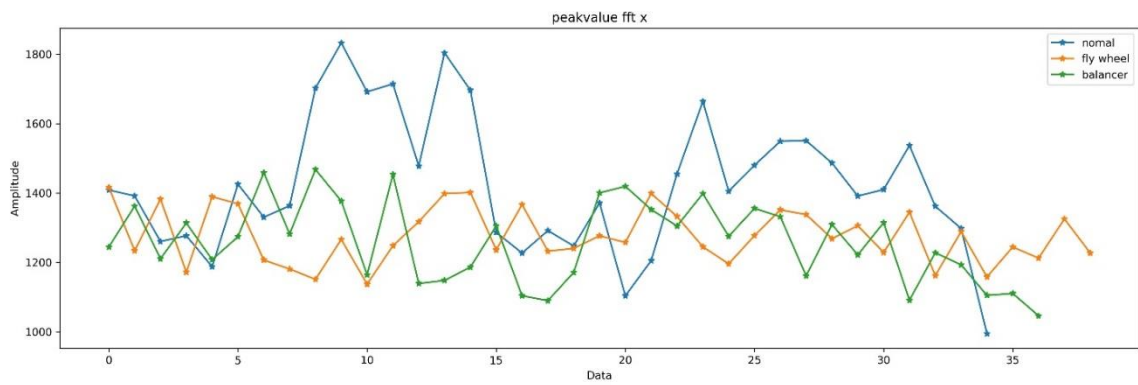


รูปที่ 4.26 Peak Value แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz

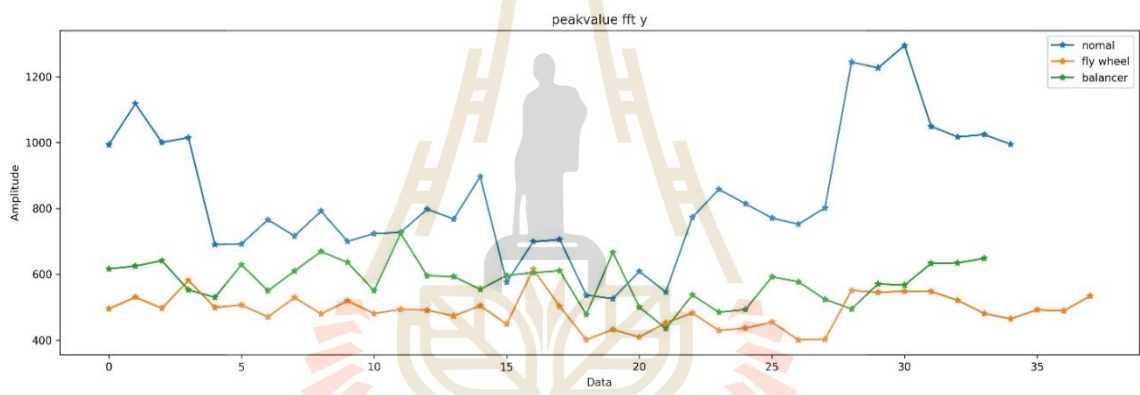


รูปที่ 4.27 Peak Value แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz

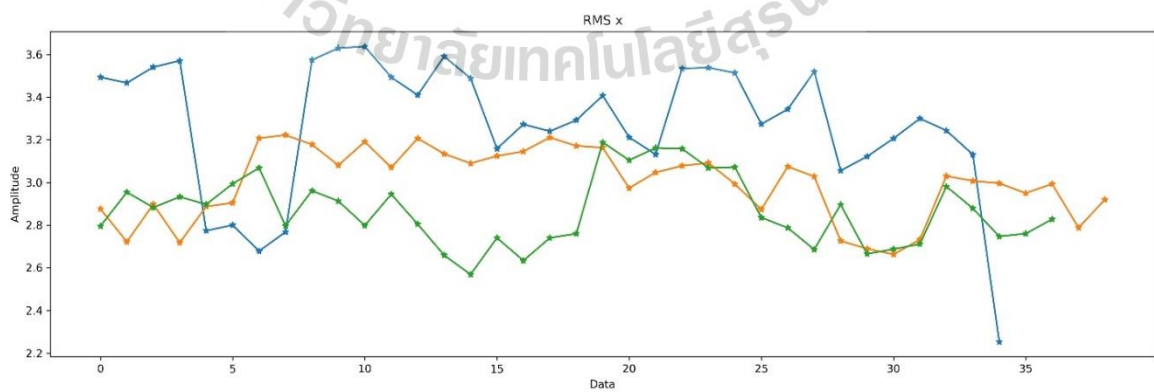




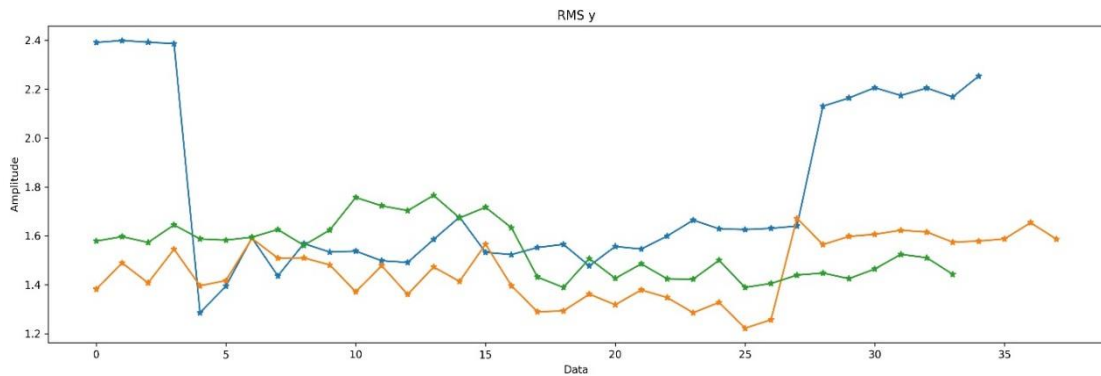
รูปที่ 4.28 Peak Value แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz



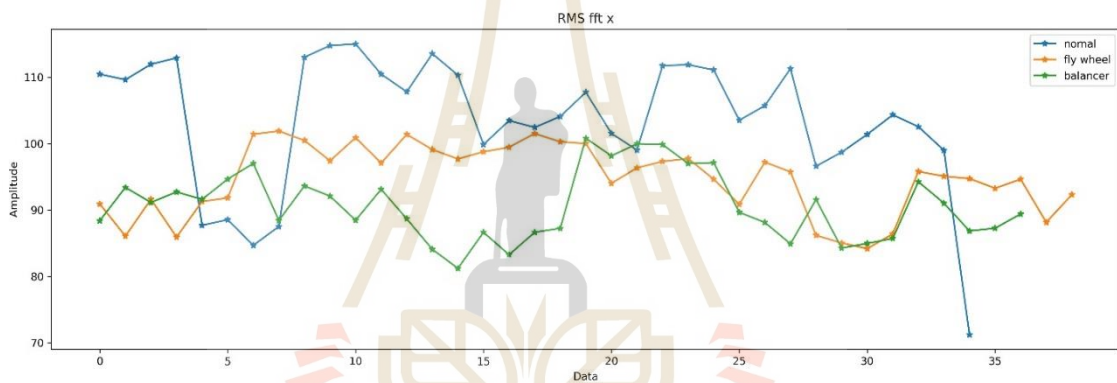
รูปที่ 4.29 Peak Value แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz



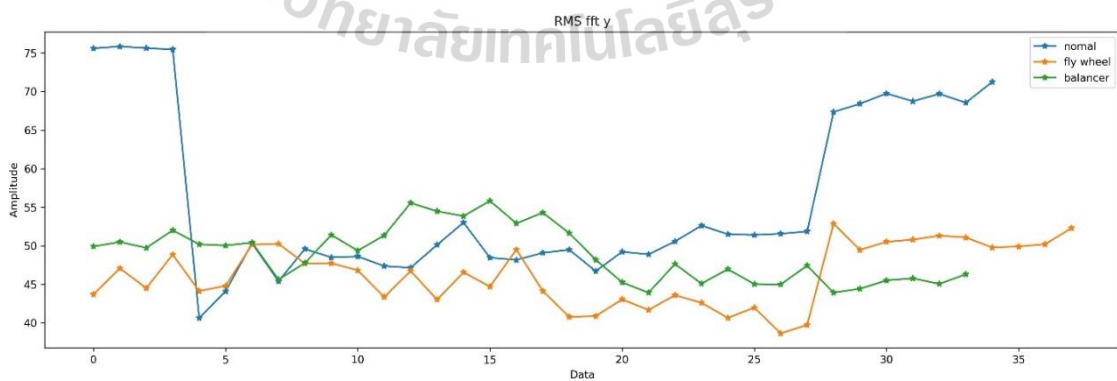
รูปที่ 4.30 root mean square แนวแกน X ของ Sine Wave 20-35 Hz



รูปที่ 4.31 root mean square แนวแกน Y ของ Sine Wave 20-35 Hz



รูปที่ 4.32 root mean square แนวแกน X ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz

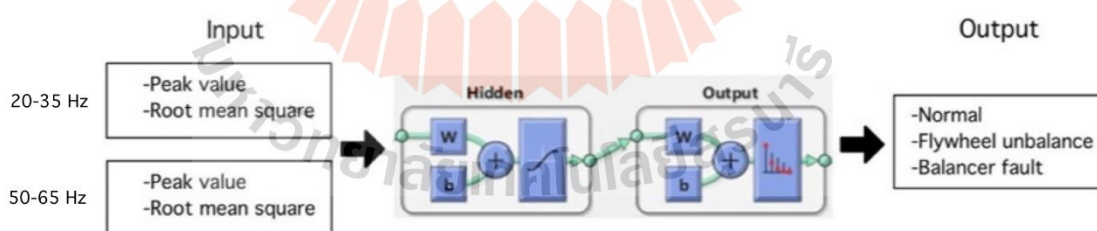


รูปที่ 4.33 root mean square แนวแกน Y ของ Fast Fourier transform(FFT) 20-35 Hz

จากผลการคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูลตามรูปที่ 4.2 ถึง 4.33 จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุด (Peak Value) และค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ในช่วงความถี่ 20-35 Hz และ 50-65 Hz แสดงข้อแตกต่างของกลุ่มข้อมูลในสภาวะปกติได้ อย่างไรก็ตาม ในบางกรณีที่มีสภาวะความไม่สมดุลของมูเล่ และสภาวะความเสียหายเพลลาถ่วงสมดุลมีค่าต่างกับเพียงเล็กน้อย

#### 4.3 การฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแลบ

การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมจะมีข้อมูลที่เป็นอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ อินพุตและเอาต์พุต โดยอินพุตเป็นกลุ่มข้อมูลที่ถูกคัดแยกลักษณะเด่นและถูกจัดเก็บในรูปแบบของพารามิเตอร์ทางสถิติ ส่วนเอาต์พุตเป็นสภาวะของเครื่องยนต์ดีเซลทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะปกติ สภาวะความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance) และ สภาวะความเสียหายเพลลาถ่วงสมดุล (Balancer fault) แสดงในรูปที่ 4.34 ในการสร้างโมเดล จำเป็นต้องเก็บข้อมูลที่จะนำมาฝึกสอนโดยแบ่งข้อมูลของเครื่องยนต์ดีเซลทั้ง 3 สภาวะ สภาวะละ 5 ข้อมูล เพื่อนำมาทดสอบภายหลัง จากนั้นข้อมูลที่ถูกแบ่งออกแล้วจะเหลืออยู่สภาวะละ 30 ข้อมูล ซึ่งสัดส่วนในการแบ่งข้อมูลที่จะนำไปฝึกสอนจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ 1) การฝึกสอน (Training) 75% 2) การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) 15% และ 3) การทดสอบ (Testing) 15% ในการฝึกสอนจะกำหนดจำนวน ชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียม (Hidden layers) ที่ส่งผลต่อความถูกต้องและแม่นยำ งานวิจัยนี้จะกำหนดจำนวนชั้นซ่อนเท่ากับ 1 และจะเพิ่มจำนวนของชั้นซ่อนเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง และทำการปรับ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) และค่าไบอัส (Bias) เพื่อที่จะหาโมเดลที่ให้ค่าความถูกต้องสูงที่สุด



รูปที่ 4.34 ไดอะแกรมการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมด้วยโปรแกรมแมทแลบ

#### 4.4 ผลของการจำแนกข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซล

ผลลัพธ์ของการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม แสดงในตารางที่ 4.1 โดยจะทำการปรับจำนวนของ Hidden layers เพื่อหาจำนวน Hidden layers ที่มีค่าความแม่นยำมากที่สุด

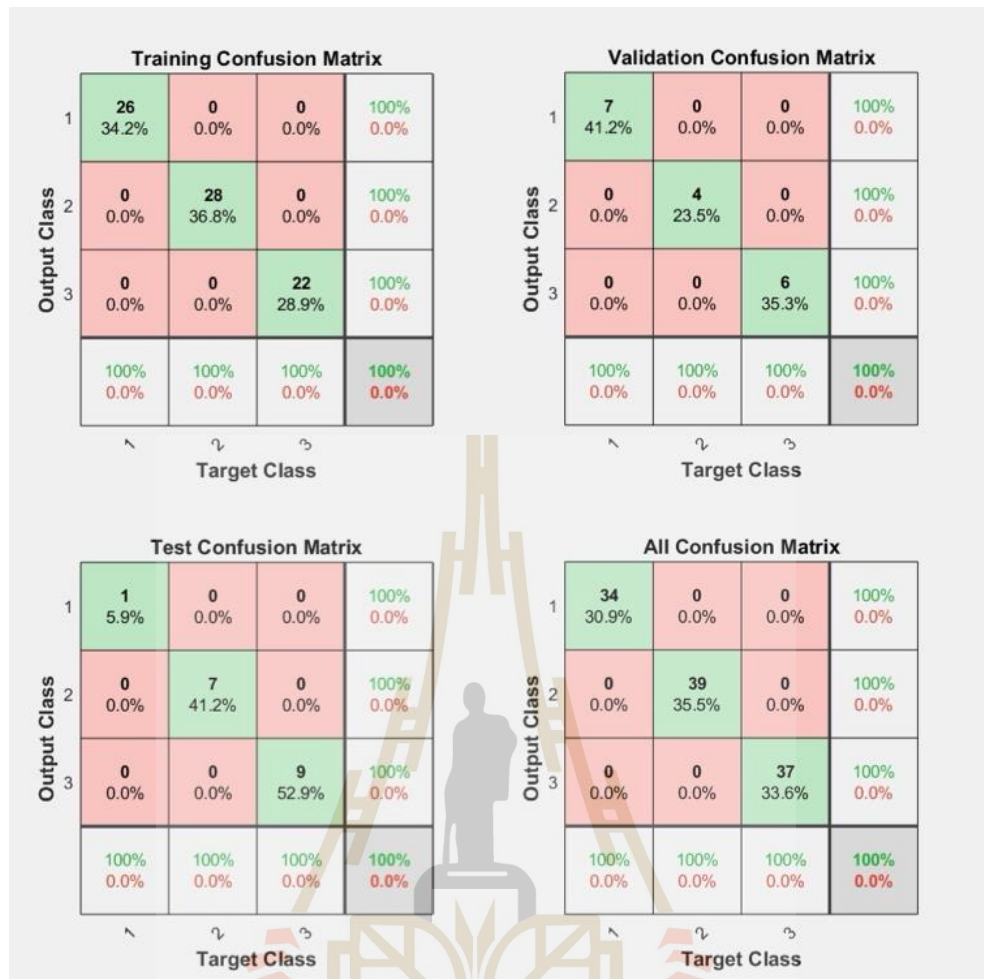
ตารางที่ 4.1 ความถูกต้องของโมเดลเทียบกับ Hidden layers

จำนวนของ Hidden layer	%ความถูกต้อง
10	95.5
20	94.5
30	100
40	92.7
50	96.4

จากการประยุกต์ใช้การเขียนโปรแกรมแมทแลบในการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ผลในตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องแม่นยำของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเปลี่ยนจำนวนของนิวรอนในการสอนโมเดล จะพบว่าที่จำนวนนิวรอนเท่ากับ 30 นิวรอน นั้น มีประสิทธิภาพความถูกต้องแม่นยำสูงสุด แต่ในการใช้งานจริงอาจจะต้องคำนึงถึงตัวแปรอื่น ๆ เช่น ระยะเวลาในการฝึกสอน จากผลในตารางที่ 4.1 พบว่าโมเดลที่ให้ความถูกต้องสูงที่สุดคือ 100%

#### 4.5 การประเมินผลความถูกต้องของโมเดล

เมทริกซ์คอนฟิวชั่น ดังแสดงในรูปที่ 4.35 รวบรวมละเอียดของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อจำแนกสภาพของเครื่องยนต์ดีเซลหมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงถึงสภาพปกติ ความไม่สมดุลของมุมเล่ และ ความเสียหายเพลลาถ่วงสมดุล เมทริกซ์การฝึกสอน การตรวจสอบความถูกต้อง และการทดสอบพบว่ามีค่าความถูกต้องมากกว่า 90% และโดยรวมทั้งหมดมีค่าความแม่นยำ 100%



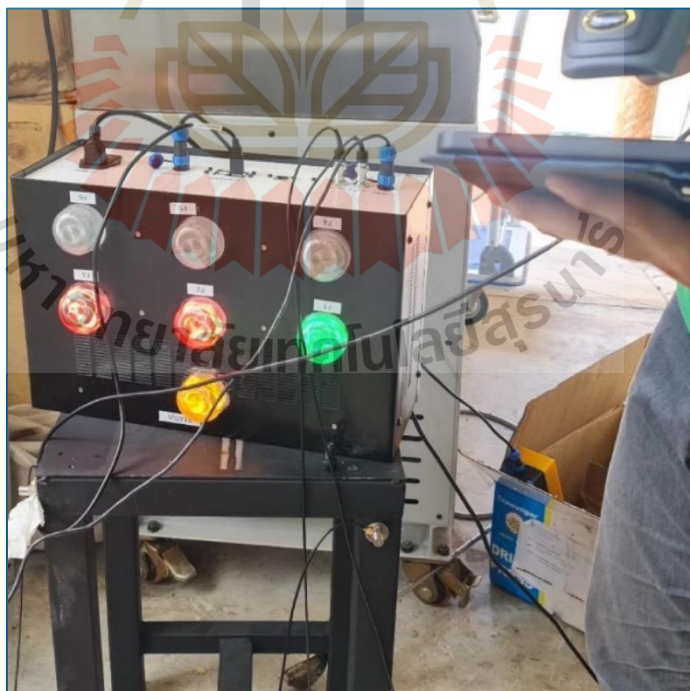
รูปที่ 4.35 เมทริกซ์คอนฟิวชันของแบบจำลองการจำแนกประเภทความผิดปกติ

จากนั้นนำข้อมูลของแต่ละสภาวะที่แยกไว้สภาวะละ 5 ชุด มาทำการทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม จะเห็นได้ว่าการนำข้อมูลที่ไม่ได้ทำการฝึกสอนมาทดสอบ ความถูกต้องของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจะมีค่าลดลงไปเหลืออยู่ที่ 93.3% โดยจะจำแนกสภาวะปกติได้ 100% แต่จะมีการจำแนกผิดระหว่างสภาวะความไม่สมดุลของมูล่ กับ สภาวะความเสียหายเพลลาถ่วงสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.36

**Confusion Matrix**

Output Class \ Target Class	1	2	3	
1	5 33.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	5 33.3%	1 6.7%	83.3% 16.7%
3	0 0.0%	0 0.0%	4 26.7%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	80.0% 20.0%	93.3% 6.7%

รูปที่ 4.36 คอนฟิวชันเมทริกซ์ของข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการฝึกสอน



รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการทดสอบการจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบตรวจจับและจำแนกความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซล โดยใช้เทคนิคการวัดการสั่นสะเทือนและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ขั้นตอนการวิจัยและผลงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ออกแบบระบบเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมภาษา Python โดยระบบแบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนคือ การอ่านสัญญาณการสั่นสะเทือนและการอ่านความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซล สามารถเก็บค่าการสั่นสะเทือนได้อย่างแม่นยำ และส่วนของการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือน สามารถกรองสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการได้ สามารถแปลงจากข้อมูลที่เก็บ โดเมนเวลา (Time Domain) เป็นโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ได้อย่างแม่นยำ ในส่วนของการอ่านความเร็วสามารถอ่านความเร็วรอบได้อย่างแม่นยำ

5.1.2 การทดลองโดยการสร้างสถานะความเสียหายของเครื่องยนต์ดีเซล เป็น 3 สถานะ คือ 1. สถานะเครื่องยนต์ปกติ 2. สถานะความไม่สมดุลของมูเล่ (flywheel unbalance) และ 3. สถานะความเสียหายเพลาถ่วงสมดุล (Balancer fault) โดยที่จะแบ่งเก็บข้อมูลของเครื่องยนต์ดีเซลในแต่ละสถานะเป็นสถานะละ 35 ข้อมูล หลังจากนั้นทำการจัดเตรียมข้อมูลโดยการคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูล (Feature extraction) ด้วยตัวแปรทางสถิติ อาทิเช่น ค่าความโด่ง (Kurtosis), ค่าสูงสุด (Peak Value), ค่าเฉลี่ย (Mean), และค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) เมื่อจัดเตรียมข้อมูลเสร็จแล้วจะทำการจัดแบ่งเพื่อที่จะฝึกสอนตัวโครงข่ายประสาทเทียมโดยที่แบ่ง 30 ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมและอีก 5 ข้อมูล เพื่อใช้ในการทดสอบหลังการสร้างโครงข่ายประสาทเทียม ในระหว่างการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม จะทำการปรับจำนวนของนิวรอนเพื่อหาโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมที่มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด พบว่าโมเดลของโครงข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำอยู่ที่ 100% ที่จำนวนนิวรอนเท่ากับ 30 นิวรอน และนำโมเดลไปทดสอบกับข้อมูลที่ไม่ได้ฝึกสอนมีความแม่นยำอยู่ที่ 93.3%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถทำนายได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลฝึกสอนที่มีปริมาณมากพอสมควรและข้อมูลที่เก็บมาต้องทำการแยกข้อมูลที่ดี และเสียออกจากกัน

5.2.2 เพื่อให้การเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ ควรหาอุปกรณ์จับยึดเซนเซอร์ความเร่ง (acceleration meter) ให้มั่นคง และควรจับยึดเครื่องยนต์ให้มั่นคง

5.2.3 เพื่อให้การเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ ควรควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดีเซลให้คงที่มากที่สุด

5.2.4 เพื่อให้การเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ ควรใช้เซนเซอร์ที่มี Sample Rate ที่สอดคล้องกับความเร็วและความถี่ที่ต้องการจะวัด

5.2.5 ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ต้องอยู่ใกล้กับตำแหน่งที่เกิดการสั่นสะเทือนมากที่สุด เพื่อให้การเก็บข้อมูลถูกต้องมากที่สุด





## รายการอ้างอิง

- [1] K. Wang and P. S. Heyns, "A comparison between two conventional order tracking techniques in rotating machine diagnostics," in *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, 17-19 June 2011 2011, pp. 478-481, doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976657.
- [2] K. Wang, W. Yaohui, L. Dashuang, and H. Qianhong, "Application of order tracking rationale to non-rotating cantilever beam analysis," in *2014 International Conference on Prognostics and Health Management*, 22-25 June 2014 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPHM.2014.7036365.
- [3] P. Nivesrangsan and D. Jantarajirojkul, "Bearing fault monitoring by comparison with main bearing frequency components using vibration signal," in *2018 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)*, 17-18 May 2018 2018, pp. 292-296, doi: 10.1109/ICBIR.2018.8391209.
- [4] V. K. Dhummansure, D. R. Rao, L. Rakate, and Y. Ambikar, "Design and Analysis of Balancer Shaft at Inclined Position for a Single Cylinder Engine," in *2019 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 4-5 Jan. 2019 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICNTE44896.2019.8945968.
- [5] A. Moosavian, G. Najafi, H. Nadimi, and M. Arab, "Estimation of engine friction using vibration analysis and artificial neural network," in *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 19-21 May 2017 2017, pp. 130-135, doi: 10.1109/ICMSC.2017.7959457.
- [6] Y. Liu, Q. Pan, H. Wang, and T. He, "Fault diagnosis of satellite flywheel bearing based on convolutional neural network," in *2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Qingdao)*, 25-27 Oct. 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PHM-Qingdao46334.2019.8942957.

- [7] S. M. Khot and S. Gurav, "Investigation of effect of surface failures on inner and outer race of bearing on vibration spectrum," in *2015 International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field (ICNTE)*, 9-10 Jan. 2015 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICNTE.2015.7029937.
- [8] W. Zheng-gang, L. Jun-ying, Y. Tongqiang, and L. Yong-hua, "Order Tracking of Speed-Up Signals for Gearbox Based on TMS320C5402," in *2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications*, 17-19 Sept. 2010 2010, pp. 25-28, doi: 10.1109/PCSPA.2010.15.
- [9] D. Hu, X. Dai, Z. Niu, Y. Xu, and H. Chen, "Unbalance Response Analysis on the High Speed Flywheel Motor Supported by Active Magnetic Bearings," in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 30 Oct.-1 Nov. 2020 2020, pp. 3745-3748, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346804.
- [10] S. S. Patil and J. A. Gaikwad, "Vibration analysis of electrical rotating machines using FFT: A method of predictive maintenance," in *2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT)*, 4-6 July 2013 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCNT.2013.6726711.
- [11] ประดิษฐ์ หมูเมืองสอง (2556). การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน(Vibration Analysis), กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [12] หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. (2552). การตรวจสอบความสั่นสะเทือนเครื่องจักร. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.



ภาคผนวก ก

รายละเอียดของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์

ก.1 รายละเอียดของ Acceleration Meter

**MODEL 3035B**

**MODEL 3035BG**

**MOUNTING SURFACE PREPARATION: 3035BG**  
 SELECT OR PREPARE A FLAT AREA OF AT LEAST Ø.250, FLAT TO .001 TIR. CLEAN TO REMOVE CONTAMINANTS. APPLY ADHESIVE TO SURFACE OR TO ACCELEROMETER AND PRESS TOGETHER UNTIL ADHESIVE SETS.


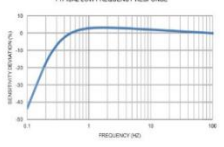
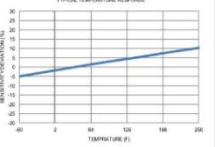
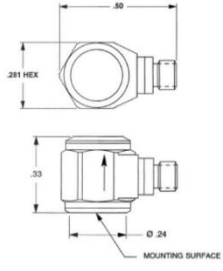
**MOUNTING PORT PREPARATION: 3035B**  
 SELECT OR PREPARE A FLAT AREA OF AT LEAST Ø.250, FLAT TO .001 TIR. AT THE CENTER, DRILL #38 (Ø.101) X .150 DEEP, MIN. TAP 5-40 UNC-2B X .125 DEEP, MIN.


2. MOUNTING TORQUE ON .281 HEX: 3 TO 4 LB.-IN.  
 1. WEIGHT: 2.5 GRAMS.

<b>DYTRAN</b> INSTRUMENTS, INC.		<b>MASTER</b> ONLY IF IN RED		CHATSWORTH, CA.	
SCALE	4X	REV	D	DATE	6/10/04
DATE	12/02/02	PART NO.	MODELS 3035B, 3035BG		
DRAWN	N.C.	CHECKED	R.A.	DATE	6/10/04
APPROVED	[Signature]		DATE	NEXT ASSEMBLY	
TITLE					USED ON
OUTLINE/INSTALLATION DRAWING, MODELS 3035B & 3035BG LVM ACCELEROMETERS					DWG NO. 127-3035B/G
					SHEET 1 OF 1

A-Tech Instruments Ltd. sales@a-tech.ca, www.a-tech.ca Toronto: 416 754 7008, Montreal: 514 695 5147, Toll Free: 1 888 754 7008

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

<p><b>Model Number</b> 3035BG</p>  <p><b>PHYSICAL</b> Weight, Max. Connector Mounting Provision Material, Housing/Connector Sensing Element Element Style</p> <p><b>PERFORMANCE</b> Sensitivity, ±10% [1] Range for ±5 Volts Output Frequency Response, ±10% Resonant Frequency Broad Band Resolution Linearity [2] Maximum Transverse sensitivity Strain Sensitivity @ 250µr</p> <p><b>ENVIRONMENTAL</b> Maximum Vibration Maximum Shock Temperature Range Seal</p> <p><b>ELECTRICAL</b> Supply Current Range [3] Compliance Voltage Range Output Impedance, Typ Bias Voltage Discharge Time Constant Electrical Isolation</p>	<p><b>PERFORMANCE SPECIFICATIONS</b></p> <p>IEPE ACCELEROMETER</p> <p>• MINATURE SIZE • HERMETICALLY SEALED • ADHESIVE MOUNT</p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">ENGLISH</th> <th colspan="2">SI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.09</td> <td>oz</td> <td>2.5</td> <td>grams</td> </tr> <tr> <td>5-44 Coaxial</td> <td></td> <td>5-44 Coaxial</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Adhesive</td> <td></td> <td>Adhesive</td> <td></td> </tr> <tr> <td>300 Series Stainless Steel</td> <td></td> <td>300 Series Stainless Steel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ceramic</td> <td></td> <td>Ceramic</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Shear</td> <td></td> <td>Shear</td> <td></td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>mV/g</td> <td>10.2</td> <td>mV/m/s<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>±50</td> <td>g</td> <td>±490.5</td> <td>m/s<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>0.5 to 10000</td> <td>Hz</td> <td>0.5 to 10000</td> <td>Hz</td> </tr> <tr> <td>±45</td> <td>KHz</td> <td>±45</td> <td>KHz</td> </tr> <tr> <td>0.007</td> <td>Grms</td> <td>0.009</td> <td>m/s<sup>2</sup> rms</td> </tr> <tr> <td>±1</td> <td>% F.S.</td> <td>±1</td> <td>% F.S.</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>%</td> <td>5</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>0.002</td> <td>g/µr</td> <td>0.02</td> <td>m/s<sup>2</sup>/µr</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>Gpeak</td> <td>5884</td> <td>m/s<sup>2</sup> peak</td> </tr> <tr> <td>10000</td> <td>Gpeak</td> <td>88067</td> <td>m/s<sup>2</sup> peak</td> </tr> <tr> <td>-65 to +250</td> <td>°F</td> <td>-51 to +121</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Hermetic</td> <td></td> <td>Hermetic</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2 to 20</td> <td>mA</td> <td>2 to 20</td> <td>mA</td> </tr> <tr> <td>18 to 30</td> <td>Volts</td> <td>18 to 30</td> <td>Volts</td> </tr> <tr> <td>100</td> <td>Ω</td> <td>100</td> <td>Ω</td> </tr> <tr> <td>11 to 13</td> <td>VDC</td> <td>11 to 13</td> <td>VDC</td> </tr> <tr> <td>1 to 2</td> <td>Sec</td> <td>1 to 2</td> <td>Sec</td> </tr> <tr> <td>Case Grounded</td> <td>GΩ,min</td> <td>Case Grounded</td> <td>GΩ,min</td> </tr> </tbody> </table>	ENGLISH		SI		0.09	oz	2.5	grams	5-44 Coaxial		5-44 Coaxial		Adhesive		Adhesive		300 Series Stainless Steel		300 Series Stainless Steel		Ceramic		Ceramic		Shear		Shear		100	mV/g	10.2	mV/m/s <sup>2</sup>	±50	g	±490.5	m/s <sup>2</sup>	0.5 to 10000	Hz	0.5 to 10000	Hz	±45	KHz	±45	KHz	0.007	Grms	0.009	m/s <sup>2</sup> rms	±1	% F.S.	±1	% F.S.	5	%	5	%	0.002	g/µr	0.02	m/s <sup>2</sup> /µr	600	Gpeak	5884	m/s <sup>2</sup> peak	10000	Gpeak	88067	m/s <sup>2</sup> peak	-65 to +250	°F	-51 to +121	°C	Hermetic		Hermetic		2 to 20	mA	2 to 20	mA	18 to 30	Volts	18 to 30	Volts	100	Ω	100	Ω	11 to 13	VDC	11 to 13	VDC	1 to 2	Sec	1 to 2	Sec	Case Grounded	GΩ,min	Case Grounded	GΩ,min	<p><b>DOC NO</b> P33035BG</p> <p>REV. A, EOM 11/06, 03/14</p> <p><b>This family also includes:</b></p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Model</th> <th>Range F.S. (g)</th> <th>Sensitivity (mV/g)</th> <th>Time Constant (Sec)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3035B1G</td> <td>± 500</td> <td>10</td> <td>1 to 2</td> </tr> <tr> <td>3035B2G</td> <td>± 100</td> <td>50</td> <td>1 to 2</td> </tr> <tr> <td>3035B3G</td> <td>± 1000</td> <td>5</td> <td>1 to 2</td> </tr> </tbody> </table> <p>Refer to the performance specifications of the products in this family for detailed description.</p> <p><b>Supplied Accessories:</b> 1) Accredited calibration certificate (ISO 17025)</p> <p><b>Notes:</b> [1] Measured at 100Hz, 1 Grms per ISA RP 37.2. [2] Measure using zero-based straight line method, % of F.S. or any lesser range. [3] Do not apply power to this system without current limiting, 20 mA MAX. To do so will destroy the IC charge amplifier. [4] In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>TYPICAL LOW FREQUENCY RESPONSE</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE</p>  </div> </div> <div style="text-align: center;">  </div> <p><small>Units on the line drawing are in inches, units in brackets are in millimeters. Refer to 127-3035BG for more information.</small></p>	Model	Range F.S. (g)	Sensitivity (mV/g)	Time Constant (Sec)	3035B1G	± 500	10	1 to 2	3035B2G	± 100	50	1 to 2	3035B3G	± 1000	5	1 to 2
ENGLISH		SI																																																																																																																				
0.09	oz	2.5	grams																																																																																																																			
5-44 Coaxial		5-44 Coaxial																																																																																																																				
Adhesive		Adhesive																																																																																																																				
300 Series Stainless Steel		300 Series Stainless Steel																																																																																																																				
Ceramic		Ceramic																																																																																																																				
Shear		Shear																																																																																																																				
100	mV/g	10.2	mV/m/s <sup>2</sup>																																																																																																																			
±50	g	±490.5	m/s <sup>2</sup>																																																																																																																			
0.5 to 10000	Hz	0.5 to 10000	Hz																																																																																																																			
±45	KHz	±45	KHz																																																																																																																			
0.007	Grms	0.009	m/s <sup>2</sup> rms																																																																																																																			
±1	% F.S.	±1	% F.S.																																																																																																																			
5	%	5	%																																																																																																																			
0.002	g/µr	0.02	m/s <sup>2</sup> /µr																																																																																																																			
600	Gpeak	5884	m/s <sup>2</sup> peak																																																																																																																			
10000	Gpeak	88067	m/s <sup>2</sup> peak																																																																																																																			
-65 to +250	°F	-51 to +121	°C																																																																																																																			
Hermetic		Hermetic																																																																																																																				
2 to 20	mA	2 to 20	mA																																																																																																																			
18 to 30	Volts	18 to 30	Volts																																																																																																																			
100	Ω	100	Ω																																																																																																																			
11 to 13	VDC	11 to 13	VDC																																																																																																																			
1 to 2	Sec	1 to 2	Sec																																																																																																																			
Case Grounded	GΩ,min	Case Grounded	GΩ,min																																																																																																																			
Model	Range F.S. (g)	Sensitivity (mV/g)	Time Constant (Sec)																																																																																																																			
3035B1G	± 500	10	1 to 2																																																																																																																			
3035B2G	± 100	50	1 to 2																																																																																																																			
3035B3G	± 1000	5	1 to 2																																																																																																																			



21592 Marilla Street, Chatsworth, California 91311 Phone: 818.700.7818 Fax: 818.700.7880 www.dytran.com  
For permission to reprint this content, please contact info@dytran.com

A-Tech Instruments Ltd. sales@a-tech.ca, www.a-tech.ca Toronto: 416 754 7008, Montreal: 514 695 5147, Toll Free: 1 888 754 7008



## ก.2 รายละเอียดของ Proximity Sensor

### Product data sheet Characteristics

### XS618B1MBL5

inductive sensor XS6 M18 - L62mm - brass -  
Sn8mm - 24..240VAC/DC - cable 5m



#### Main

Range of product	OsiSense XS
Series name	General purpose
Sensor type	Inductive proximity sensor
Device application	-
Sensor name	XS6
Sensor design	Cylindrical M18
Size	62 mm
Body type	Fixed
Detector flush mounting acceptance	Flush mountable
Material	Metal
Type of output signal	Discrete
Wiring technique	2-wire
[Sn] nominal sensing distance	8 mm
Discrete output function	1 NC
Output circuit type	AC/DC
Electrical connection	Cable
Cable length	5 m
[Us] rated supply voltage	24...240 V AC/DC 50/60 Hz
Switching capacity in mA	5...200 mA DC 5...300 mA AC
IP degree of protection	IP68 double insulation conforming to IEC 60529 IP69K conforming to DIN 40050

#### Complementary

Thread type	M18 x 1
Detection face	Frontal
Front material	PPS
Enclosure material	Nickel plated brass
Operating zone	0...6.4 mm
Differential travel	1...15% of Sr
Cable composition	2 x 0.34 mm <sup>2</sup>
Wire insulation material	PvR
Status LED	Output state: 1 LED (yellow)
Supply voltage limits	20...264 V AC/DC
Maximum residual current	0.8 mA open state
Switching frequency	<= 1000 Hz DC <= 25 Hz AC
Maximum voltage drop	<5.5 V (closed)
Maximum delay first up	25 ms
Maximum delay response	0.5 ms
Maximum delay recovery	0.5 ms
Marking	CE
Threaded length	52 mm
Length	62 mm
Net weight	0.24 kg

Nov 20, 2019

### Environment

Product certifications	CSA UL
Ambient air temperature for operation	-25...70 °C
Ambient air temperature for storage	-40...85 °C
Vibration resistance	25 gn amplitude = +/- 2 mm (f = 10...55 Hz) conforming to IEC 60068-2-6
Shock resistance	50 gn for 11 ms conforming to IEC 60068-2-27

### Offer Sustainability

Sustainable offer status	Green Premium product
REACH Regulation	<a href="#">REACH Declaration</a>
EU RoHS Directive	Pro-active compliance (Product out of EU RoHS legal scope) <a href="#">EU RoHS Declaration</a>
Mercury free	Yes
RoHS exemption information	<a href="#">Yes</a>
Environmental Disclosure	<a href="#">Product Environmental Profile</a>
Circularity Profile	<a href="#">End Of Life Information</a>

### Contractual warranty

Warranty	18 months
----------	-----------

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ก.3 รายละเอียดของ IEPE Measurement DAQ HAT for Raspberry Pi

## MCC 172

### Specifications



All specifications are subject to change without notice.  
Typical for 25 °C unless otherwise specified.

#### Analog input

Number of channels: 2  
ADC Resolution: 24 bits  
A/D converter type: Delta sigma  
Sampling mode: Simultaneous  
Master timebase ( $f_s$ ):  
Frequency: 26.2144 MHz  
Accuracy:  $\pm 50$  ppm max  
Master timebase sources  
Internal clock  
Shared clock from another MCC 172  
Data rates (fS)  
( $f_s / 512$ ) / n, n = 1, 2, ..., 256  
51.2 kS/s max  
200 S/s min  
Input coupling: AC  
AC cutoff frequency  
-3 dB: 0.78 Hz  
-0.1 dB: 5.2 Hz max

#### Input voltage range: $\pm 5$ V

#### Common-mode voltage range

CHx to AGND:  $\pm 2$  V max

#### Overvoltage protection

CHx+ to CHx-:  $\pm 35$  V

CHx- to ground:  $\pm 2.5$  V

#### IEPE compliance voltage: 23 V max

IEPE excitation current: 4.0 mA min, 4.1 mA typ

#### Input delay

1 kHz to 23 kHz input frequency:  $4.5 \mu\text{s} + 39 / f_s$

#### Channel-to-channel matching

Phase (200 Hz to 23 kHz): ( $f_s \cdot 0.022^\circ$ ) max

Gain (20 Hz to 23 kHz): 0.19 dB typ

#### Passband

Frequency:  $0.453 \cdot f_s$

Flatness (20 Hz to 23 kHz): 52 mdB (pk-to-pk max)

#### Phase nonlinearity

$f_s = 51.2$  kS/s, 200 Hz to 23 kHz input frequency:  $\pm 0.36^\circ$  max

#### Stopband

Frequency:  $0.547 \cdot f_s$

Rejection: 99 dB min

#### Alias-free bandwidth: $0.453 \cdot f_s$

Alias rejection: 100 dB @ 51.2 kS/s

#### Oversample rate: $128 \cdot f_s$

#### Crosstalk

1 kHz: -122 dB

#### SFDR

$f_m = 1$  kHz, -60 dBFS: 120 dB

#### Dynamic range

$f_m = 1$  kHz, -1 dBFS: 100 dB

#### Input impedance

Differential: 202 k $\Omega$

AI- (shield) to ground: 50  $\Omega$

#### Throughput

Single board: 102.4 kS/s max (51.2 kS/s  $\times$  2 channels)

Multiple boards: Up to 307.2 kS/s aggregate<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Depends on the load on the Raspberry Pi processor and the SPI interface.

Note: For best results, connect the signal source and the Raspberry Pi to a common ground. If a floating source is required, connect the MCC 172 to earth ground via the DGND screw terminal to minimize common mode noise.

#### Accuracy

Analog input AC voltage measurement accuracy (all values are $\pm$ ) and apply to calibrated readings)			
Gain error, max:	Offset error, max:	Gain temperature coefficient, max:	Gain temperature coefficient, max:
0.43%	5.10 mV	88 ppm/ $^\circ\text{C}$	184 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

#### Noise performance

Idle Channel	51.2 kS/s
Noise	33 $\mu\text{Vrms}$
Noise density	207 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$

#### Total harmonic distortion (THD)

Input Amplitude	1 kHz	8 kHz
-1 dBFS	-93 dB	-91 dB
-10.96 dBFS	-87 dB	-87 dB

#### External digital trigger

Trigger source: TRIG input

Trigger mode: Software configurable for rising or falling edge, or high or low level

Trigger latency: 1  $\mu\text{s}$  + 1 sample period (1/fS) max

Trigger pulse width: 100 ns min

Input type: Schmitt trigger, 100K pull-down to ground

Input high voltage threshold: 1.48 V min

Input low voltage threshold: 1.2 V max

Input hysteresis: 0.51 V min

Input voltage limits: 6.5 V absolute max, -0.5 V absolute min, 0 V recommended min

#### Memory

Data FIFO: 48 K (49,152) analog input samples

Non-volatile memory: 4 KB (ID and calibration storage, no user-modifiable memory)

#### Power

Supply current, 5 V supply

Typical: 100 mA

Maximum: 140 mA

#### Interface

Raspberry Pi GPIO pins used:

GPIO 8, GPIO 9, GPIO 10, GPIO 11 (SPI interface)

ID\_SD, ID\_SC (ID EEPROM)

GPIO 12, GPIO 13, GPIO 26 (Board address)

GPIO 5, 6, 19, 16, 20 (Clock / trigger sharing, Reset, IRQ)

Data interface type: SPI slave device, CE0 chip select

SPI mode: 1

SPI clock rate: 18 MHz, max

#### Environment

Operating temperature: 0  $^\circ\text{C}$  to 55  $^\circ\text{C}$

Storage temperature: -40  $^\circ\text{C}$  to 85  $^\circ\text{C}$  max

Relative humidity: 0% to 90% non-condensing

#### Mechanical

Dimensions (L  $\times$  W  $\times$  H): 65  $\times$  56.5  $\times$  12 mm (2.56  $\times$  2.22  $\times$  0.47 in.) max



## ก.4 รายละเอียดของ Raspberry Pi 4 Model B



Raspberry Pi 4 Model B Datasheet  
Copyright Raspberry Pi (Trading) Ltd. 2024

## 2 Features

### 2.1 Hardware

- Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 running at 1.5GHz
- 1, 2 and 4 Gigabyte LPDDR4 RAM options
- H.265 (HEVC) hardware decode (up to 4Kp60)
- H.264 hardware decode (up to 1080p60)
- VideoCore VI 3D Graphics
- Supports dual HDMI display output up to 4Kp60

### 2.2 Interfaces

- 802.11 b/g/n/ac Wireless LAN
- Bluetooth 5.0 with BLE
- 1x SD Card
- 2x micro-HDMI ports supporting dual displays up to 4Kp60 resolution
- 2x USB2 ports
- 2x USB3 ports
- 1x Gigabit Ethernet port (supports PoE with add-on PoE HAT)
- 1x Raspberry Pi camera port (2-lane MIPI CSI)
- 1x Raspberry Pi display port (2-lane MIPI DSI)
- 28x user GPIO supporting various interface options:
  - Up to 6x UART
  - Up to 6x I2C
  - Up to 5x SPI
  - 1x SDIO interface
  - 1x DPI (Parallel RGB Display)
  - 1x PCM
  - Up to 2x PWM channels
  - Up to 3x GPCLK outputs

### 2.3 Software

- ARMv8 Instruction Set
- Mature Linux software stack
- Actively developed and maintained





Symbol	Parameter	Conditions	Minimum	Typical	Maximum	Unit
$V_{IL}$	Input low voltage <sup>a</sup>	VDD.IO = 3.3V	0	-	0.8	V
$V_{IH}$	Input high voltage <sup>a</sup>	VDD.IO = 3.3V	2.0	-	VDD.IO	V
$I_{IL}$	Input leakage current	TA = +85°C	-	-	10	μA
$C_{IN}$	Input capacitance	-	-	5	-	pF
$V_{OL}$	Output low voltage <sup>b</sup>	VDD.IO = 3.3V, IOL = -2mA	-	-	0.4	V
$V_{OH}$	Output high voltage <sup>b</sup>	VDD.IO = 3.3V, IOH = 2mA	VDD.IO - 0.4	-	-	V
$I_{OL}$	Output low current <sup>c</sup>	VDD.IO = 3.3V, VO = 0.4V	7	-	-	mA
$I_{OH}$	Output high current <sup>c</sup>	VDD.IO = 3.3V, VO = 2.3V	7	-	-	mA
$R_{PU}$	Pullup resistor	-	18	47	73	kΩ
$R_{PD}$	Pulldown resistor	-	18	47	73	kΩ

<sup>a</sup> Hysteresis enabled

<sup>b</sup> Default drive strength (8mA)

<sup>c</sup> Maximum drive strength (16mA)

Table 3: DC Characteristics

Pin Name	Symbol	Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit
Digital outputs	$t_{rise}$	10-90% rise time <sup>a</sup>	-	TBD	-	ns
Digital outputs	$t_{fall}$	90-10% fall time <sup>a</sup>	-	TBD	-	ns

<sup>a</sup> Default drive strength, CL = 5pF, VDD.IO = 3.3V

Table 4: Digital I/O Pin AC Characteristics



Figure 2: Digital IO Characteristics

#### 4.1 Power Requirements

The Pi4B requires a good quality USB-C power supply capable of delivering 5V at 3A. If attached downstream USB devices consume less than 500mA, a 5V, 2.5A supply may be used.



## 5 Peripherals

### 5.1 GPIO Interface

The Pi4B makes 28 BCM2711 GPIOs available via a standard Raspberry Pi 40-pin header. This header is backwards compatible with all previous Raspberry Pi boards with a 40-way header.

#### 5.1.1 GPIO Pin Assignments

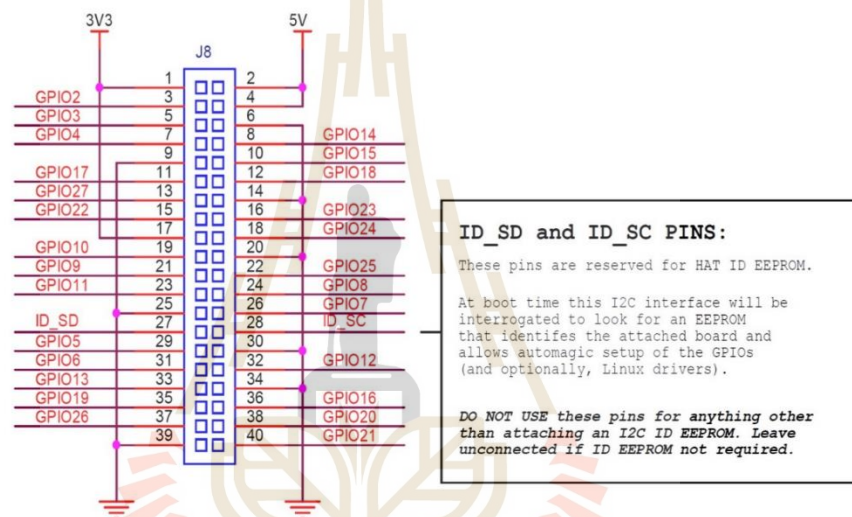


Figure 3: GPIO Connector Pinout

As well as being able to be used as straightforward software controlled input and output (with programmable pulls), GPIO pins can be switched (multiplexed) into various other modes backed by dedicated peripheral blocks such as I2C, UART and SPI.

In addition to the standard peripheral options found on legacy Pis, extra I2C, UART and SPI peripherals have been added to the BCM2711 chip and are available as further mux options on the Pi 4. This gives users much more flexibility when attaching add-on hardware as compared to older models.



### 5.1.2 GPIO Alternate Functions

GPIO	Default						
	Pull	ALT0	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5
0	High	SDA0	SA5	PCLK	SPI3_CE0_N	TXD2	SDA6
1	High	SCL0	SA4	DE	SPI3_MISO	RXD2	SCL6
2	High	SDA1	SA3	LCD_VSYNC	SPI3_MOSI	CTS2	SDA3
3	High	SCL1	SA2	LCD_HSYNC	SPI3_SCLK	RTS2	SCL3
4	High	GPCLK0	SA1	DPLD0	SPI4_CE0_N	TXD3	SDA3
5	High	GPCLK1	SA0	DPLD1	SPI4_MISO	RXD3	SCL3
6	High	GPCLK2	SOE_N	DPLD2	SPI4_MOSI	CTS3	SDA4
7	High	SPI0_CE1_N	SWE_N	DPLD3	SPI4_SCLK	RTS3	SCL4
8	High	SPI0_CE0_N	SD0	DPLD4	-	TXD4	SDA4
9	Low	SPI0_MISO	SD1	DPLD5	-	RXD4	SCL4
10	Low	SPI0_MOSI	SD2	DPLD6	-	CTS4	SDA5
11	Low	SPI0_SCLK	SD3	DPLD7	-	RTS4	SCL5
12	Low	PWM0	SD4	DPLD8	SPI5_CE0_N	TXD5	SDA5
13	Low	PWM1	SD5	DPLD9	SPI5_MISO	RXD5	SCL5
14	Low	TXD0	SD6	DPLD10	SPI5_MOSI	CTS5	TXD1
15	Low	RXD0	SD7	DPLD11	SPI5_SCLK	RTS5	RXD1
16	Low	FL0	SD8	DPLD12	CTS0	SPI1_CE2_N	CTS1
17	Low	FL1	SD9	DPLD13	RTS0	SPI1_CE1_N	RTS1
18	Low	PCM_CLK	SD10	DPLD14	SPI6_CE0_N	SPI1_CE0_N	PWM0
19	Low	PCM_FS	SD11	DPLD15	SPI6_MISO	SPI1_MISO	PWM1
20	Low	PCM_DIN	SD12	DPLD16	SPI6_MOSI	SPI1_MOSI	GPCLK0
21	Low	PCM_DOUT	SD13	DPLD17	SPI6_SCLK	SPI1_SCLK	GPCLK1
22	Low	SD0_CLK	SD14	DPLD18	SD1_CLK	ARM_TRST	SDA6
23	Low	SD0_CMD	SD15	DPLD19	SD1_CMD	ARM_RTCK	SCL6
24	Low	SD0_DAT0	SD16	DPLD20	SD1_DAT0	ARM_TDO	SPI3_CE1_N
25	Low	SD0_DAT1	SD17	DPLD21	SD1_DAT1	ARM_TCK	SPI4_CE1_N
26	Low	SD0_DAT2	TE0	DPLD22	SD1_DAT2	ARM_TDI	SPI5_CE1_N
27	Low	SD0_DAT3	TE1	DPLD23	SD1_DAT3	ARM_TMS	SPI6_CE1_N

Table 5: Raspberry Pi 4 GPIO Alternate Functions

Table 5 details the default pin pull state and available alternate GPIO functions. Most of these alternate peripheral functions are described in detail in the BCM2711 Peripherals Specification document which can be downloaded from the hardware documentation section of the website.



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างโค้ดการทำงานของซอฟต์แวร์

### ข.1 โปรแกรมตัวกรองความถี่(Band Pass Filter)

```

from scipy import signal
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
from matplotlib import rcParams
rcParams.update({'figure.autolayout': True})
get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'inline')
#set-up
rpm_min=450
rpm_max=3800
axis='y'
s='045-38'
u='045 38'
max_frequency=rpm_max/60
min_frequency=rpm_min/60
print(max_frequency)
print(min_frequency)
for j in range(1,4):
    if j==1:
        case='normal'
    elif j==2:
        case='flywheel'
    elif j==3:
        case='balancer'
    if axis=='x'and case=='normal':
        xy=35
    elif axis=='x'and case=='flywheel':
        xy=40
    elif axis=='x'and case=='balancer':
        xy=38

```

```

elif axis=='y'and case=='normal':
    xy=36
elif axis=='y'and case=='flywheel':
    xy=39
elif axis=='y'and case=='balancer':
    xy=35
for i in range(1,xy):
    df = pd.read_excel('C:\\Users\\ROG
STRIX\\Desktop\\excal_real\\sin_wave\\{case}_{axis}_all.xlsx')
    d=df['data{0}']
    fs = 1000 # Sample rate
    low = min_frequency # Cutoff frequency low
    high = max_frequency # Cutoff frequency high
    # Create a bandpass filter
    b, a = signal.butter(3, [low, high], btype='band', fs=fs)
    # Generate a test signal
    t = np.linspace(0, 1, 1000, endpoint=False)
    # Apply the filter to the signal
    y = signal.lfilter(b, a, d)
#####
#####
    sample_rate=1000
    y_fft = np.fft.fft(y)
    y_fft_shifted = np.fft.fftshift(y_fft)
    positive_frequencies = y_fft_shifted[len(y_fft_shifted)//2:]
    negative_frequencies = y_fft_shifted[:len(y_fft_shifted)//2]
    # Get the frequency axis
    frequency_axis = np.fft.fftfreq(len(y_fft), d=1/sample_rate)
    frequency_axis = np.fft.fftshift(frequency_axis)
#####
#####

```



```

data_t = {'time':t, 'amplitude':y}
df = pd.DataFrame(data_t)
df.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\bandpass{s}\\data_bandpass\\data
bandpass {axis}\\bp {case} {u} {axis}{i}.csv', index=False)
data_f = {'frequency': frequency_axis[len(frequency_axis)//2:], 'amplitude':
np.abs(positive_frequencies)}
df = pd.DataFrame(data_f)
df.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\fft-filter{s}\\data_fft_filter\\data fft
filter {axis}\\fft {case} {u} {axis}{i}.csv', index=False)
#####
#####
fig = plt.figure(figsize=(12,4))
plt.plot(t, y)
plt.xlabel('time')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'{case}_time_{axis}_{i}')
fig.savefig(f'C:\\Users\\ROG
STRIX\\Desktop\\bandpass{s}\\image_bandpass\\image bandpass {axis}\\bp {case} {u}
{axis}{i}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')
plt.figure(figsize=(12, 4))
plt.plot(frequency_axis[len(frequency_axis)//2:], np.abs(positive_frequencies))
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'{case}_Frequencies_{axis}_{i}')
plt.savefig(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\fft-filter{s}\\image_fft_filter\\image
fft filter {axis}\\fft {case} {u} {axis}{i}.jpg',dpi=300,bbox_inches='tight')

```

## ข.2 โปรแกรมตัวคัดแยกลักษณะเด่นของข้อมูลที่โดเมนเวลา

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import math
import array
from scipy.stats import kurtosis
from matplotlib import rcParams
rcParams.update({'figure.autolayout': True})
get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'inline')
from scipy.stats import skew

#set-up
axis='y'
if axis=='x':
    xy1=35
    xy2=40
    xy3=38
else:
    xy1=36
    xy2=39
    xy3=33
s='045-38'
u='045 38'
pwm='450-3800'

#RMS
def root_mean_square(data):
    squares_sum = sum(x**2 for x in data)
    return math.sqrt(squares_sum/len(data))

#sinad
fs=1000
def sinad(signal, fs):

```

```

rms_signal = np.sqrt(np.mean(signal**2))
noise_and_distortion = np.sqrt(np.mean((signal - rms_signal)**2))
sinad = 20 * np.log10(rms_signal / noise_and_distortion)
return sinad
data1_nomal=[]
data2_nomal=[]
data3_nomal=[]
data4_nomal=[]
data5_nomal=[]
data6_nomal=[]
i1=[]
for i in range(1,xy1):
    df = pd.read_csv(f'C:\\Users\\ROG
STRIX\\Desktop\\bandpass{s}\\data_bandpass\\data bandpass {axis}\\bp normal {u}
{axis}{i}.csv')
    data=df['amplitude']
#kurtosis
    result = kurtosis(data)
    data1_nomal.append(result)
#MEAN
    mean = sum(data) / len(data)
    data2_nomal.append(mean)
#peakvalue
    peak_value = np.amax(abs(data))
    data3_nomal.append(peak_value)
#RMS
    rms = root_mean_square(data)
    data4_nomal.append(rms)
#SINAD
    sinad_value = sinad(data, fs)
    data5_nomal.append(sinad_value)

```

```

#Skewness
    skewness = skew(data)
    data6_nomal.append(skewness)
data1_fly=[]
data2_fly=[]
data3_fly=[]
data4_fly=[]
data5_fly=[]
data6_fly=[]
i1=[]
for i in range(1,xy2):
    df = pd.read_csv(f'C:\\Users\\ROG
STRIX\\Desktop\\bandpass{s}\\data_bandpass\\data bandpass {axis}\\bp flywheel {u}
{axis}{i}.csv')
    data=df['amplitude']
#kurtosis
    result = kurtosis(data)
    data1_fly.append(result)
#MEAN
    mean = sum(data) / len(data)
    data2_fly.append(mean)
#peakvalue
    peak_value = np.amax(abs(data))
    data3_fly.append(peak_value)
#RMS
    rms = root_mean_square(data)
    data4_fly.append(rms)
#SINAD
    sinad_value = sinad(data, fs)
    data5_fly.append(sinad_value)
#Skewness

```

```

skewness = skew(data)
data6_fly.append(skewness)
data1_balancer=[]
data2_balancer=[]
data3_balancer=[]
data4_balancer=[]
data5_balancer=[]
data6_balancer=[]
i1=[]
for i in range(1,xy3):
    df = pd.read_csv(f'C:\\Users\\ROG
STRIX\\Desktop\\bandpass{s}\\data_bandpass\\data bandpass {axis}\\bp balancer {u}
{axis}{i}.csv')
    data=df['amplitude']
#kurtosis
    result = kurtosis(data)
    data1_balancer.append(result)
#MEAN
    mean = sum(data) / len(data)
    data2_balancer.append(mean)
#peakvalue
    peak_value = np.amax(abs(data))
    data3_balancer.append(peak_value)
#RMS
    rms = root_mean_square(data)
    data4_balancer.append(rms)

#SINAD
    sinad_value = sinad(data, fs)
    data5_balancer.append(sinad_value)
#Skewness

```

```

skewness = skew(data)
data6_balancer.append(skewness)

#Kurtosis
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data1_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data1_fly, label='fly wheel',marker='*')
plt.plot(data1_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'kurtosis {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f"C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\kurtosis {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')

#MEAN
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data2_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data2_fly, label='fly wheel',marker='*')
plt.plot(data2_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'MEAN {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f"C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\MEAN {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')

#peakvalue
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data3_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data3_fly, label='fly wheel',marker='*')
plt.plot(data3_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')

```

```
plt.title(f'peakvalue {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\peakvalue {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')
```

```
#RMS
```

```
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data4_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data4_fly, label='fly wheel',marker='*')
plt.plot(data4_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'RMS {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\RMS {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')
```

```
#SINAD
```

```
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data5_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data5_fly, label='fly wheel',marker='*')
plt.plot(data5_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'SINAD {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\SINAD {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')
```

```
#Skewness
```

```
plt.figure(figsize=(15, 5))
plt.plot( data6_nomal, label='nomal',marker='*')
plt.plot(data6_fly, label='fly wheel',marker='*')
```

```

plt.plot(data6_balancer, label='balancer',marker='*')
plt.xlabel('Data')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.title(f'Skewness {axis}')
plt.legend()
plt.savefig(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature Attraction
{pwm} rpm\\Skewness {s} {axis}.jpg",dpi=300,bbox_inches='tight')
#Kurtosis
data_t = {'nomal':data1_nomal,'fly_wheel':data1_fly,'balancer':data1_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\kurtosis {s} {axis}.csv', index=False)
#MEAN
data_t = {'nomal':data2_nomal,'fly_wheel':data2_fly,'balancer':data2_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\MEAN {s} {axis}.csv', index=False)
#peakvalue
data_t = {'nomal':data3_nomal,'fly_wheel':data3_fly,'balancer':data3_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\peakvalue {s} {axis}.csv', index=False)

```



```
#RMS
data_t = {'nomal':data4_nomal,'fly_wheel':data4_fly,'balancer':data4_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\RMS {s} {axis}.csv', index=False)
#SINAD
data_t = {'nomal':data5_nomal,'fly_wheel':data5_fly,'balancer':data5_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\SINAD {s} {axis}.csv', index=False)
#Skewness
data_t = {'nomal':data6_nomal,'fly_wheel':data6_fly,'balancer':data6_balancer}
s1 = pd.DataFrame(data_t['nomal'], columns=['nomal'])
s2 = pd.DataFrame(data_t['fly_wheel'], columns=['fly_wheel'])
s3 = pd.DataFrame(data_t['balancer'], columns=['balancer'])
df_final = pd.concat([s1,s2,s3],axis=1,sort=False)
df_final.to_csv(f'C:\\Users\\ROG STRIX\\Desktop\\Feature Attraction\\Feature
Attraction {pwm} rpm\\Skewness {s} {axis}.csv', index=False)
```



ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

อภิศักดิ์ ทองมี, จิระพล ศรีเสริฐผล, อัษฎายุธ รอดพ่าย, วินัย ตุ่มทอง และ ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง.  
(2566) “โปรแกรมการวัดการสั่นและวิเคราะห์สภาพเครื่องยนต์ดีเซลในกระบวนการทดสอบโดยประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ยานยนต์ไฟฟ้าและรถไฟฟ้าระบบราง อนาคตการเดินทางใหม่ของประเทศไทย วันที่ 1 - 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์วิว นครพนม จังหวัด นครพนม จำนวน 4 หน้า



## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



### โปรแกรมการวัดการสั่นและวิเคราะห์สภาพเครื่องยนต์ดีเซลในกระบวนการทดสอบโดย ประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

Vibration measurement and status analysis of diesel engine in test process  
by artificial intelligence technique

อภิศักดิ์ ทองมี<sup>1</sup>, จิระพล ศรีเสริฐผล<sup>2</sup>, อัญญาธร รอดพ่าย<sup>2</sup>, วินัย ตุ่มทอง<sup>2</sup> และ ธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 E-mail: ka1669900377411@gmail.com

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 E-mail: jiraphon@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

เครื่องยนต์ดีเซล มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในงานเกษตรกรรม เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องตัดหญ้า ฯลฯ ปัจจุบันในการผลิตพบปัญหาทางด้านคุณภาพของชิ้นส่วนที่ส่งเข้ามาจากต่างประเทศในบางชิ้นมีความบกพร่อง เช่น ส่วนเพลาคือเพลาช่วยแรงเครื่องยนต์ที่ไม่ได้สมดุล เป็นต้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์ดีเซลมีลักษณะเฉพาะตัว สามารถแยกแยะความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้เฉพาะที่จะนำมาตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งความบกพร่องที่สนใจมีอยู่ 2 ความบกพร่องคือ ความไม่สมดุลของมวล และ ความเสียหายเพลาล่วงสมดุล ในการทดลองจะมีการกำหนดความเร็วรอบไว้ที่ 1700 rpm และใส่โหลด 75 kg/cm<sup>2</sup> เพื่อเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้และนำไปประยุกต์ใช้ (AI : Artificial Intelligence) มา ประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซลผลการวิจัยพบว่าสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้มีความถูกต้องของการจำแนกประเภท 90.9% ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานจริง

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม, เครื่องยนต์ดีเซล, การวัดการสั่นสะเทือน

#### Abstract

The use of diesel engines is widespread in agricultural applications, including water pumps and grass cutters. However, the quality of some imported parts used in their manufacturing processes has become a concern. Defective crankshafts and unbalanced engine flywheels are among the quality issues encountered. To address these problems, a research study has proposed a technique for measuring and analyzing engine vibration. The study highlights that diesel engine vibration has

unique characteristics that can be utilized to detect abnormalities, with flywheel unbalance and balancer defects being the two defects of interest. The experiment utilized a controllable speed of 1700 rpm and a load of 75 kg/cm<sup>2</sup>, Artificial Intelligence (AI) being employed for defect detection. The results showed an accuracy rate of 90.9% in classifying the types of defects, making this method suitable for practical use.

Keywords: artificial neural network, diesel engine, vibration measurement

#### 1. บทนำ

เครื่องยนต์ดีเซล มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในงานเกษตรกรรม เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องตัดหญ้า ฯลฯ ปัจจุบันในการผลิตพบปัญหาทางด้านคุณภาพของชิ้นส่วนที่ส่งเข้ามาจากต่างประเทศในบางชิ้นมีความบกพร่อง เช่น เพลาช่วยแรงจากชิ้นคอนการผลิตค้างจำนวนมากอยู่ในชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ที่ส่งเข้ามา ส่วนเพลาคือเพลาช่วยแรงเครื่องยนต์ที่ไม่ได้สมดุล เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำชิ้นส่วนดังกล่าวมาประกอบแล้วทำให้พบข้อบกพร่องของเครื่องยนต์ดีเซลจึงไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานของโรงงาน จึงส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขเป็นอย่างมาก ซึ่งความผิดปกติที่ตรวจพบประกอบไปด้วยความไม่สมดุลของมวล (flywheel unbalance) และ ความเสียหายเพลาล่วงสมดุล (Balancer fault) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เชิงกลที่หมุนได้ ซึ่งสังเกต ความผิดปกติเหล่านี้ได้จากการทดสอบด้วยไดนาโมมิเตอร์ และฟังเสียงที่ผิดปกติโดยเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญ เพื่อประเมินคุณภาพการประกอบของเครื่องยนต์ดีเซลก่อนส่งมอบให้ลูกค้า เนื่องจากต้องอาศัยความชำนาญของเจ้าหน้าที่ที่มีประสบการณ์สูงในการประเมินคุณภาพ หากเจ้าหน้าที่คนดังกล่าวไม่สามารถมาทำงานได้ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการประเมินคุณภาพ หากต้องการฝึกฝนเจ้าหน้าที่ใหม่ก็มีความจำเป็นต้องใช้ระยะเวลา

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



ในการฝึกฝนเป็นเวลานาน จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็น อย่างยิ่งที่ ต้องหาอุปกรณ์และกระบวนการตรวจเช็คเครื่องยนต์ที่มีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิเคราะห์ การสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนในเครื่องยนต์มีลักษณะ เฉพาะตัว สามารถแยกแยะความผิดปกติของเครื่องยนต์ได้เหมาะที่จะ นำมาตรวจสอบสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์และนำปัญญาประดิษฐ์ (AI : Artificial Intelligence) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่อง ของเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการตรวจจับข้อบกพร่อง ของเครื่องยนต์

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน (Vibration) คือการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่รอบจุด สมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาหรือจะเป็นการแกว่ง (Oscillation) รอบจุดสมดุลก็ตาม

ถ้าเราสามารถมองเห็นการเคลื่อนที่แบบสั่นในลักษณะที่ช้าลง ได้เราจะพบรูปแบบของการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต่างกันขึ้นอยู่กับความ ท่างไกลหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัววัตถุที่รอบตำแหน่งสมดุลซึ่ง จะทำให้เราเห็นลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่แบบสั่น องค์ประกอบที่ใช้ ในการอธิบายการเคลื่อนที่ แบบสั่นนี้ได้แก่ แอมพลิจูด (Amplitude) ความเร่ง (Acceleration) ความถี่ (Frequency) และ ความเร็ว (Velocity)

### 2.2 การแปลงสัญญาณแบบฟูเรียร์

การหาวิธีในการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้สำหรับการ วิเคราะห์สัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นจาก สัญญาณในรูปลักษณะเป็นคาบมา เป็นสัญญาณในรูปแบบของความถี่เพื่อให้ง่ายในการแปรผลโดยอาศัย คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือช่วยการอธิบายความหมายของสมการฟูเรียร์นั้น จะใช้กราฟการเคลื่อนที่ ลักษณะเป็นคาบ เพื่อให้ง่ายในการอธิบาย ความหมาย ซึ่งการเคลื่อนที่เป็นคาบนี้เมื่อ นำสมการมาใช้ในการแยก สัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ ออกจากกัน โดยกำหนดให้  $f(t)$  เป็นการเคลื่อนที่ แบบ เป็นคาบแล้วจะทำให้สามารถเขียนสมการของฟูเรียร์ (Fourier Transform) ได้ดังนี้

### 2.3 การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณเป็นวิธีมาตรฐานในการจัดการข้อมูลที่ได้ จากการวัด โดยมีวิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในโดเมนเวลาและความถี่ขึ้นอยู่กับ ลักษณะของสัญญาณ สัญญาณรบกวนนั้นเป็นสัญญาณปกติที่มาพร้อมกับ ข้อมูลจากการวัดและจำเป็นต้องลดทอนลงเพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีคุณภาพใน การใช้งาน บทความนี้ใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ (Low-pass filter) และตัว กรองแบนด์พาส (Band-pass filter) เพื่อลดอิทธิพลของสัญญาณรบกวน

หลังจากการประมวลผลข้อมูลแล้ว ได้ใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ ได้แก่ mean, kurtosis, root mean square และ Peak Value สูตรทาง คณิตศาสตร์เป็นไปตามสมการ (1) ถึง (3) เพื่อแยกคุณลักษณะสำคัญที่จะ นำไปใช้สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

mean

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

kurtosis

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^4 \quad (2)$$

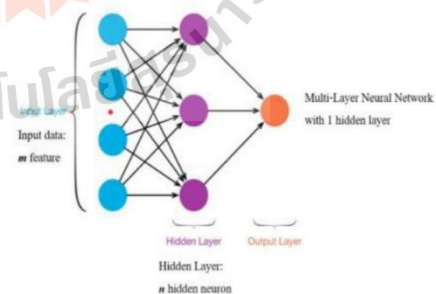
root mean square

$$rms = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3)$$

### 2.4 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมจัดอยู่ในอัลกอริทึมของ Machine learning คือการใช้ คอมพิวเตอร์ในการจำลองการทำงานของเซลล์ ประสาทภายในสมองของมนุษย์ ที่มีการเรียนรู้ จำแนก และจดจำข้อมูล

โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาทเทียม หรือ โหนดจำนวนมากเชื่อมต่อกัน ซึ่งการเชื่อมต่อแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย เรียกว่า ชั้น (layer) ชั้นแรกจะเป็นชั้นนำข้อมูลเข้า เรียกว่า ชั้นรับข้อมูล ป้อนเข้า (input layer) ส่วนชั้นสุดท้ายเรียกว่า ชั้นส่งข้อมูลออก (output layer) และชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นรับข้อมูลป้อนเข้าและชั้นส่งออกข้อมูล เรียน กว่า ชั้นแบบแฝง (hidden layer) ซึ่งโดยทั่วไปชั้น hidden layer อาจจะมีมากกว่า 1 ชั้นก็ได้ ชั้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลและการนำไปใช้งาน ดัง รูปที่ 1. เพราะฉะนั้นจึงสามารถแบ่งประเภทของโครงข่ายประสาทเทียม ตามจำนวนชั้นของโครงข่ายได้ 2 แบบ คือ โครงข่ายแบบชั้นเดียว (single layer) และ โครงสร้างแบบหลายชั้น (multi-layer)



รูปที่ 1. ลักษณะของโครงข่ายประสาทเทียม

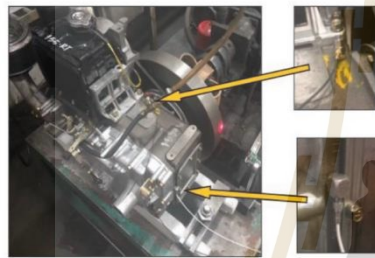
**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครื่องจักรวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15  
 15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



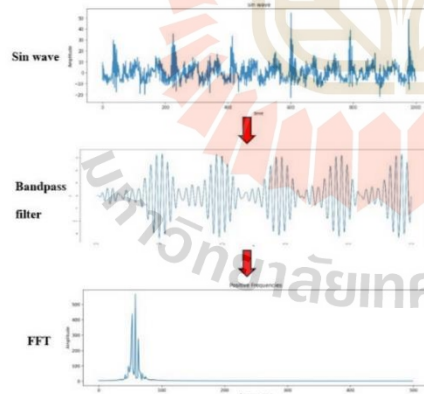
**3. วิธีการดำเนินงาน**

นำเครื่องยนต์ดีเซล มาทำให้เกิดความเสียหายที่สนใจ คือ เครื่องยนต์ที่ปกติ, ความไม่สมดุลของมูเล่ และ ความเสียหายเพลาล่วง สมดุล เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ซึ่งในการทดลองจะนำ เครื่องมาติดตั้งกับเครื่องทดสอบประสิทธิภาพยานยนต์ (Dynamometer) และติดตั้งเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน 2 ตำแหน่งคือ บริเวณด้านบนของ เครื่องยนต์และ บริเวณด้านหน้าของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2. มีการกำหนด ความเร็วรอบไว้ที่ 1700 rpm และใส่โหลด 75 kg/cm<sup>2</sup> เพื่อเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้



รูปที่ 2. ตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์

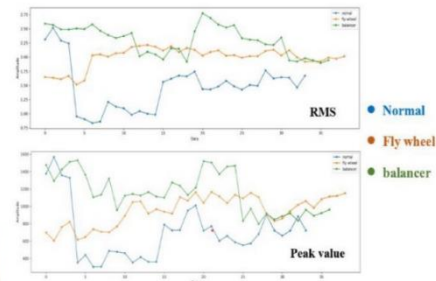
จากนั้นก็เก็บข้อมูลทั้ง 3 สภาวะ สภาวะละ 30 ข้อมูล จากนั้นนำ ข้อมูลมาทำ Bandpass filter เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ได้สนใจออกไป แล้วจึง นำข้อมูลที่มาทำ Fast Fourier Transform (FFT) ดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3. ทำ Bandpass filter และ Fast Fourier transform (FFT)

นำข้อมูลที่ทำ Bandpass filter และ Fast Fourier transform (FFT) ทำการประมวลผลสัญญาณ (Feature Attraction) โดยใช้ พารามิเตอร์ทางสถิติ ได้แก่ mean, kurtosis, root mean square และ

Peak Value แต่ที่สามารถนำมาจำแนกได้จะมีอยู่ 2 ตัว คือ root mean square และ Peak Value ดังรูปที่ 4.



รูปที่ 4. ทำ Feature Attraction RMS และ Peak Value

ในกระบวนการสร้าง Artificial Neural Network (ANN) จะมีการแบ่งชุดข้อมูลออก 3 ส่วน คือ 70% สำหรับการฝึกสอนและสร้างค่าน้ำหนักของการเรียนรู้ในโมเดล 15% กระบวนการตรวจสอบโมเดล วัตถุประสงค์ของโมเดล และหยุดการปรับค่าน้ำหนัก ขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบโมเดล จะใช้ข้อมูล 15% สำหรับวัดประสิทธิภาพของการจำแนกข้อมูลที่ไม่เคยเรียนรู้ โดยให้ผลการจำแนกคือ สภาวะของเครื่องยนต์ และได้มีการทดสอบเพื่อหาค่าความถูกต้องสูงสุด โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวน Hidden layer 5 แบบ คือ , 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของจำนวน Hidden layer 5 แบบ

จำนวนของ Hidden layer	%ความถูกต้อง
10	86.4
20	89.1
30	90.9
40	87.3
50	89.1

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการเพิ่ม Hidden layers นั้นมีค่าที่เหมาะสมที่สุดคือจำนวนเท่ากับ 30 ซึ่งให้ความแม่นยำของโมเดล 90.9%

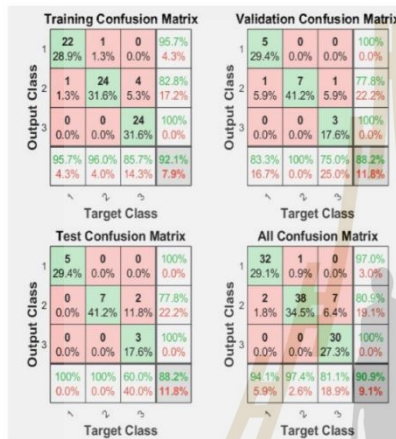
**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครื่องจักรวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15

15<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network 2023 (EENET 2023)



เมทริกซ์คอนฟิวชัน ดังแสดงในรูปที่ 5. รวบรวมรายละเอียดของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อจำแนกสภาพของเครื่องยนต์ดีเซล หมายเลข 1, 2 และ 3 แสดงถึงสภาพปกติ ความไม่สมดุลของมุม และ ความเสียหายเพลาล่วงสมดุค เมทริกซ์การฝึกอบรม การตรวจสอบความ ถูกต้อง และการทดสอบพบว่ามีความถูกต้องมากกว่า 90% และโดยรวม ทั้งหมดมีความแม่นยำ 90.9%



รูปที่ 5. เมทริกซ์คอนฟิวชันของแบบจำลองการจำแนกประเภทความ

ผิดปกติ

**4. สรุป**

บทความนี้เสนอการจำแนกสภาพเครื่องยนต์ดีเซลใน กระบวนการทดสอบโดยใช้เทคนิคการวัดและวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและ การประมวลผลสัญญาณมาใช้ในการจำแนกสภาพของเครื่องยนต์ดีเซล คือ สภาวะปกติ, สภาวะไม่สมดุล และ ความเสียหายเพลาล่วงสมดุค ด้วย การนำข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการวัดที่ผ่านการทำ bandpass filter และ Fast Fourier transform (FFT) มาทำการประมวลผลสัญญาณ (Feature Attraction) โดยใช้พารามิเตอร์ทางสถิติ ได้แก่ mean, kurtosis, root mean square และ Peak Value โดยที่ พารามิเตอร์ที่สามารถ จำแนกได้คือ root mean square และ Peak Value แล้วนำข้อมูลที่ ประมวลผลสัญญาณแล้ว มาสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) การสร้างโมเดลได้เปลี่ยนจำนวนชั้นซ่อนเพื่อตรวจสอบแบบจำลองที่ เหมาะสมและให้ค่าความถูกต้องสูงสุดในกระบวนการฝึก ผลการวิจัยพบว่า สามารถใช้ข้อมูลตัวแปรสถานะจากการประมาณด้วยตัวสังเกต และการ ประมวลผลสัญญาณ เพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ในการ การตรวจจับ และจำแนกข้อบกพร่องของตลับลูกปืน ที่จำนวนชั้นซ่อนของ โมเดลเท่ากับ 30 ให้ความแม่นยำสูงสุดเท่ากับ 90.9%

**5. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ RAP Enterprise and Services Co.Ltd. ในการสนับสนุนทุนและเครื่องมือใน การทำวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] ประดิษฐ์หมู่ เมืองสอง (2556).การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Analysis) กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [2] ทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. (2552). การตรวจสอบความสั่นสะเทือน เครื่องจักร.กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- [3] K. Wang and P. S. Heyns, "A comparison between two conventional order tracking techniques in rotating machine diagnostics," in 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, 17-19 June 2011, pp. 478-481, doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976657.
- [4] K. Wang, W. Yaohui, L. Dashuang, and H. Qianhong, "Application of order tracking rationale to non-rotating cantilever beam analysis," in 2014 International Conference on Prognostics and Health Management, 22-25 June 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPHM.2014.7036365.
- [5] D. Hu, X. Dai, Z. Niu, Y. Xu, and H. Chen, "Unbalance Response Analysis on the High Speed Flywheel Motor Supported by Active Magnetic Bearings," in 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 30 Oct.-1 Nov. 2020, pp. 3745-3748, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346804.
- [6] A. Moosavian, G. Najafi, H. Nadimi, and M. Arab, "Estimation of engine friction using vibration analysis and artificial neural network," in 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSE), 19-21 May 2017, pp. 130-135, doi: 10.1109/ICMSE.2017.7959457.



**ประวัติผู้เขียนบทความ**

อภิศักดิ์ ทองมี

นักศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## ประวัติผู้เขียน

นายอภิศักดิ์ ทองมี เกิดเมื่อวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ.2541 ที่ตำบลหนองพระ อำเภอวังทรายพูน จังหวัดพิจิตร เริ่มเข้าศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นประถมศึกษาที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านยางสามต้น และเข้าศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนวังทรายพูนวิทยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2563 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ขณะศึกษาระดับปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการจำนวน 1 เรื่องในการประชุมวิชาการ ได้แก่

1) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 ยานยนต์ไฟฟ้าและรถไฟฟ้าระบบราง อนาคตการเดินทางใหม่ประเทศไทย วันที่ 1 - 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2566 ณ โรงแรมฟอร์จูน ริเวอร์วิว นครพนม จังหวัดนครพนม รายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ค.