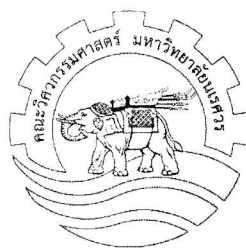




ปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง ระยะที่ 3
OVERHAUL THE CHASSIS DYNAMOMETER PHASE 3

นายจีระพงษ์	มานิตย์	รหัสนิสิต	57361920
นายชัยวิชญ์	รัศมีดารา	รหัสนิสิต	57361975
นายธนพงษ์	ชัตติยะ	รหัสนิสิต	57362125

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2560



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ	ปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง ระยะที่ 3		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายจิระพงษ์	มานิตย์	รหัสนิสิต 57361920
	นายชัยวิชญ์	รัศมีดารา	รหัสนิสิต 57361975
	นายธนพงษ์	ขัตติยะ	รหัสนิสิต 57362125
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2560		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....*ปองพันธ์ โอทกานนท์*.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์)

.....*อ.ชอุ่ม*.....กรรมการ

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....*อ.ชอุ่ม*.....กรรมการ

(อ.ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

ชื่อหัวข้อโครงการ	: ปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง ระยะที่ 3
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายจีระพงษ์ มานิตย์ รหัสสนិត 57361920
	: นายชัยวิชญ์ รัศมีดารา รหัสสนិត 57361975
	: นายธนพงษ์ ชัดิยะ รหัสสนិត 57362125
ที่ปรึกษาโครงการ	: ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2560

บทคัดย่อ

โครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 3 เป็นโครงการต่อเนื่องมาจากโครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1 และ ระยะที่ 2 เพื่อศึกษาและซ่อมแซมเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร ในระยะที่ 1 ได้มีการซ่อมแซมระบบการทำงานและวงจรทั้งหมดและสามารถทำให้เครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งสามารถทำงานได้แต่ยังมีปัญหาเรื่องโปรแกรมในการควบคุมและการแสดงผล ในระยะที่ 2 ได้ทำการปรับปรุงการทำงานของเครื่องวัดแรงม้าที่โครงการในระยะที่ 1 โดยได้แก้ไขจุดบกพร่องจากโครงการในระยะที่ 1 เช่นแก้ไขเสียงรบกวนขณะที่ทำการทดสอบและสร้างโปรแกรมเพื่อแสดงผลการทดสอบกับผู้ใช้งาน

โครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 3 ได้ทำการทดสอบการรับส่งข้อมูลและการบันทึกข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร็วและแรงบิด และในโครงการนี้ได้มีการปรับปรุงในส่วนของเอกสารที่ใช้อ้างอิงการทำงานของเครื่องวัดแรงม้าภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกล รวมทั้งข้อมูลทฤษฎีการรับส่งสัญญาณของเซนเซอร์ การนำสัญญาณไปใช้ และทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์ที่ใช้ทดสอบการรับข้อมูลในตัวเครื่องมีวัดวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งประกอบไปด้วยเซนเซอร์จำนวน 2 ชนิดคือ Magnetic pickup sensor และ load cell พบว่าทั้งสองเซนเซอร์ยังสามารถรับส่งสัญญาณได้เป็นอย่างดี

Project Title : Overhaul the classis dynamometer phase III
Project Manager : Mr. JEERAPONG MANIT ID : 57361920
Mr. CHAIVITH RATSAMEDARA ID : 57361975
Mr. THANAPHONG KHATTIYA ID : 57362125
Project Advisor : Dr. PONGPUN OTHAGANONT
Major : Mechanical Engineering
Department : Mechanical Engineering
Academic year : 2560

Abstract

The project of Overhaul the classis dynamometer phase 3 aims to improve the roller dynamometer located in Mechanical Engineering Laboratories at Naresuan University. The main progress in this 3rd phase include testing the Magnetic pickup sensor and load cell which are used to measure the roller speed and torque. The Arduino microcontroller was used to interface the signal between sensors and computer. The comparator circuit was used as a signal conditioner before interfacing to the microcontroller. Then all signals were recorded and displayed in the computer. Results from this 3rd phase show that two main sensors which are Magnetic pickup sensor and load cell are functioning normally.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะการให้คำแนะนำ การให้ความร่วมมือและการให้การสนับสนุนจากหลายฝ่าย ดังนี้

- | | | |
|--------------------|-----------|----------------------|
| 1. ดร.ปองพันธ์ | โศทกานนท์ | ที่ปรึกษาโครงการ |
| 2. ผศ.ดร.อนันต์ชัย | อยู่แก้ว | คณะกรรมการสอบโครงการ |
| 3. อาจารย์ชูพงศ์ | ช่วยเพ็ญ | คณะกรรมการสอบโครงการ |

และบุคคลท่านอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำโครงการฉบับนี้ ผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลและเป็นที่ปรึกษาในการจัดทำโครงการฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ผู้จัดทำขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

นายจีระพงษ์	มานิตย์
นายชัยวิญญ์	รัศมีดารา
นายธนพงษ์	ชติยะ

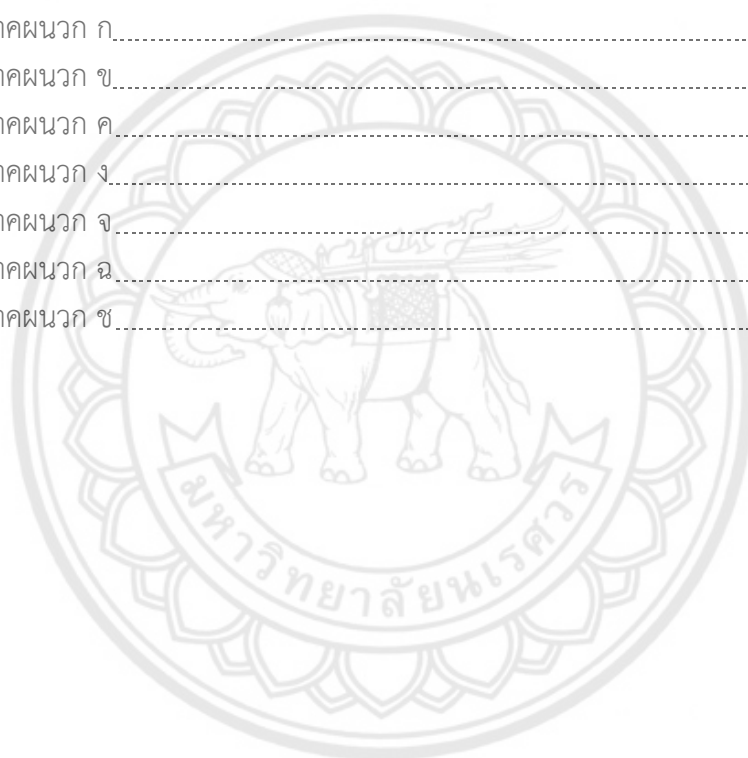


สารบัญ

เรื่อง	หน้าที่
ใบรับรองโครงงาน.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
สัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.4 ขอบเขตของโครงงาน.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน.....	4
2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	
3.1 การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ (Input).....	25
3.2 การเขียนโปรแกรมการรับค่าและคำนวณสำหรับ Arduino Board.....	41
3.3 การออกแบบการทดสอบการทำงานและรับค่าของเซนเซอร์.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการทดสอบ Magnetic pickup sensor.....	50
4.2 ผลการทดสอบโหลดเซลล์ (Load cell).....	57

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้าที่
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปการทำงานของไดนาโมมิเตอร์.....	60
5.2 สรุปการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกล.....	62
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	68
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	74
ภาคผนวก ค.....	89
ภาคผนวก ง.....	94
ภาคผนวก จ.....	97
ภาคผนวก ฉ.....	103
ภาคผนวก ช.....	105



สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้าที่
ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีข้อเสียของไดนาโมมิเตอร์แต่ละชนิด.....	9
ตารางที่ 2.2 อุปกรณ์และเซนเซอร์ในการรับส่งข้อมูลสำหรับ ไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake.....	11
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของตัวแปรในวงจร.....	31
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเซนเซอร์.....	46
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของความเร็วจากรถจักรยานยนต์ ความเร็วตามระบบ GPS และลูกกลิ้ง.....	51
ตารางที่ 4.2 น้ำหนักที่โหลดเซลล์สามารถตรวจวัดได้.....	58
ตารางที่ ฉ.1 ตารางการทดสอบโหลดเซลล์ด้วย Universal Testing Machine.....	104



สารบัญรูป

เรื่อง	หน้าที่
รูปที่ 2.1 การทำงานของ Prony brake.....	5
รูปที่ 2.2 Water - brake dynamometer.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake.....	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในของไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake.....	7
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างไดนาโมมิเตอร์แบบ Friction brakes.....	8
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของไดนาโมมิเตอร์แบบ AC Motor- Generators และ DC Motor- Generators.....	8
รูปที่ 2.7 ไดนาโมมิเตอร์ชนิด Eddy Current Brake ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยนเรศวร.....	10
รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของ Magnetic pickup sensor.....	11
รูปที่ 2.9 แสดง Magnetic pickup sensor สำหรับไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake.....	12
รูปที่ 2.10 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ.....	12
รูปที่ 2.11 การนำสเตรนเกจมาต่อในรูปแบบของวงจรบริดจ์.....	13
รูปที่ 2.12 โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ Kelba - KA 250.....	13
รูปที่ 2.13 Eddy Current Brake ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล.....	14
รูปที่ 2.14 แผนผังการทำงานของการควบคุมการทำงานไดนาโมมิเตอร์.....	14
รูปที่ 2.15 ลำดับการทำงานของไดนาโมมิเตอร์.....	15
รูปที่ 2.16 ความแตกต่างของสัญญาณดิจิทัลและอนาล็อก.....	16
รูปที่ 2.17 บอร์ดและวงจรมหาขยายสัญญาณโหลดเซลล์ (Load cell).....	17
รูปที่ 2.18 IC LM324.....	17
รูปที่ 2.19 วงจร Op-amp Comparator Circuit.....	18
รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานของวงจร Basic comparator.....	18
รูปที่ 2.21 วงจร Comparator with hysteresis.....	19
รูปที่ 2.22 แสดงการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณหาแรงบิด (Torque).....	20
รูปที่ 2.23 ระบบการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์.....	22
รูปที่ 2.24 แสดงหลักการการทำงานของ PWM.....	22
รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของ Thyristor.....	23

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้าที่
รูปที่ 2.26 แผนผังโดยรวมของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง.....	24
รูปที่ 3.1 Magnetic pickup sensor.....	25
รูปที่ 3.2 วงจรการใช้งาน Magnetic pickup sensor.....	26
รูปที่ 3.3 กราฟเส้นสีฟ้าแสดงสัญญาณที่ Magnetic pickup sensor ส่งออกมาโดยตรงขณะทำงาน.....	27
รูปที่ 3.4 Basic Comparator.....	27
รูปที่ 3.5 การติดตั้ง Magnetic pickup sensor กับลูกกลิ้ง.....	28
รูปที่ 3.6 ความห่างของ Magnetic pickup sensor กับลูกกลิ้ง.....	29
รูปที่ 3.7 การทำงานของวงจร Basic Comparator.....	29
รูปที่ 3.8 ความถี่ที่เกิดขึ้นของสัญญาณ out put.....	30
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบวงจร Comparator ที่มี hysteresis และไม่มี hysteresis.....	30
รูปที่ 3.10 วงจร Comparator with negative feedback.....	31
รูปที่ 3.11 เส้นสีเหลือง (CH1) คือสัญญาณที่มาจาก Basic Comparator เส้นสีฟ้า (CH2) คือสัญญาณที่มาจาก Comparator with negative feedback.....	32
รูปที่ 3.12 การต่อวงจร Basic Comparator เข้ากับวงจร comparator with negative feedback.....	32
รูปที่ 3.13 โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ Kelba – KA 250.....	33
รูปที่ 3.14 วงจรขยายแอมพลิฟิเคชัน (HX711 Amplifier Module).....	34
รูปที่ 3.15 บอร์ดและวงจรขยายสัญญาณโหลดเซลล์ (Load cell).....	34
รูปที่ 3.16 ทำการแก้ไขโปรแกรมสอบเทียบโหลดเซลล์อัตโนมัติ.....	35
รูปที่ 3.17 การหาค่า Zero Factor.....	35
รูปที่ 3.18 ลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัมที่ใช้สำหรับการสอบเทียบโหลดเซลล์.....	36
รูปที่ 3.19 การหาค่า Calibration Factor.....	36
รูปที่ 3.20 ผลจากการทดสอบการรับค่าของโหลดเซลล์ด้วยลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัม.....	37
รูปที่ 3.21 ระบบการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนามิเตอร์.....	37
รูปที่ 3.22 วงจร Low pass Filter.....	38
รูปที่ 3.23 รูปแบบของสัญญาณเมื่อผ่านวงจร Low pass Filter.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้าที่
รูปที่ 3.24 Phase angle และวงจรภายในที่ถูกใช้ร่วมกับ Crydom M505012F.....	38
รูปที่ 3.25 Crydom M505012F และวงจรภายใน Crydom M505012F.....	39
รูปที่ 3.26 การทำงานของวงจรแบบ Half wave vibrator.....	39
รูปที่ 3.27 การต่ออุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์.....	40
รูปที่ 3.28 Flowchart การทำงานของโปรแกรม Magnetic pickup sensor.....	41
รูปที่ 3.29 Flowchart การทำงานของโปรแกรมโหลดเซลล์ (Load cell).....	44
รูปที่ 3.30 แอปพลิเคชันที่ใช้เป็นเครื่องมือวัด GPS.....	48
รูปที่ 3.31 วิธีการตรวจสอบ data rate ของโปรแกรม.....	49
รูปที่ 3.32 หน้าต่างโปรแกรม PLX-DAQ.....	49
รูปที่ 3.33 ตัวอย่างข้อมูลที่ถูกรับที่กึ่งกลางใน Microsoft Excel ผ่านโปรแกรม PLX-DAQ.....	49
รูปที่ 4.1 การทดสอบการทำงานของ Magnetic pickup sensor.....	50
รูปที่ 4.2 ความเร็วที่ระบบ GPS สามารถตรวจวัดได้ขณะทำการทดสอบ.....	51
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็ว GPS และ Magnetic pickup sensor ที่อ่านได้.....	52
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 1).....	53
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 2).....	54
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 3).....	55
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงน้ำหนักเมื่อทำการเพิ่มมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์.....	57
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงน้ำหนักเมื่อทำการลดมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์.....	58
รูปที่ 4.9 นี้อัตยัตบุทยงท่เกดสนมท่ให้เคล่อนตัวได้ไม่อิสระ.....	59
รูปที่ ก.1 Kelba Load cell Data sheet.....	70
รูปที่ ก.2 Kelba Load cell Data sheet.....	71
รูปที่ ก.3 Kelba Load cell Data sheet.....	72
รูปที่ ก.4 Kelba Load cell Data sheet.....	73
รูปที่ ข.1 IC LM324 Data sheet.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

เรื่อง	หน้าที่
รูปที่ ข.2 IC LM324 Data sheet.....	76
รูปที่ ข.3 IC LM324 Data sheet.....	77
รูปที่ ข.4 IC LM324 Data sheet.....	78
รูปที่ ข.5 IC LM324 Data sheet.....	79
รูปที่ ข.6 IC LM324 Data sheet.....	80
รูปที่ ข.7 IC LM324 Data sheet.....	81
รูปที่ ข.8 IC LM324 Data sheet.....	82
รูปที่ ข.9 IC LM324 Data sheet.....	83
รูปที่ ข.10 IC LM324 Data sheet.....	84
รูปที่ ข.11 IC LM324 Data sheet.....	85
รูปที่ ข.12 IC LM324 Data sheet.....	86
รูปที่ ข.13 IC LM324 Data sheet.....	87
รูปที่ ข.14 IC LM324 Data sheet.....	88
รูปที่ ค.1 FC11AL data sheet.....	90
รูปที่ ค.2 FC11AL data sheet.....	91
รูปที่ ค.3 FC11AL data sheet.....	92
รูปที่ ค.4 FC11AL data sheet.....	93
รูปที่ ง.1 Crydom M505012F Data sheet.....	95
รูปที่ ง.2 Crydom M505012F Data sheet.....	96
รูปที่ ช.1 HX711 Data sheet.....	106
รูปที่ ช.2 HX711 Data sheet.....	107
รูปที่ ช.3 HX711 Data sheet.....	108
รูปที่ ช.4 HX711 Data sheet.....	109
รูปที่ ช.5 HX711 Data sheet.....	110
รูปที่ ช.6 HX711 Data sheet.....	111
รูปที่ ช.7 HX711 Data sheet.....	112
รูปที่ ช.8 HX711 Data sheet.....	113
รูปที่ ช.9 HX711 Data sheet.....	114

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
τ	ผลของแรงที่มากระทำและทำให้เกิดการหมุน	นิวตันเมตร (N·m)
F	แรงที่มากระทำต่อวัตถุในทิศตั้งฉากกับรัศมีของการหมุน	นิวตัน (N)
r	รัศมีการหมุนของวัตถุที่ออกแรง	เมตร (m)
P	กำลังของเครื่องยนต์	วัตต์ (w)
ω	ความเร็วเชิงมุม	เรเดียนต่อวินาที (Rad/s)
f	ความถี่ที่เซนเซอร์วัดได้	เฮิรตซ์ (Hz)
n	จำนวนฟิงของลูกกลิ้ง	-
T	คาบเวลาที่ลูกกลิ้ง 1 ลูกกลิ้งใช้ในการเคลื่อนที่	วินาที (s)
v	ความเร็วของลูกกลิ้ง	เมตรต่อวินาที (m/s)
R	ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน	โอห์ม (Ω)
C	ค่าความจุของตัวเก็บประจุ	ฟารัด (F)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากโครงการ “การปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1” และ “การปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 2” ทางผู้จัดทำมีความสนใจในหลักการทำงานของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งชนิด Eddy Current Brake จึงทำให้เป็นที่มาของโครงการ “การปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 3” โดยจะมีการศึกษาการทำงานของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร ทางผู้จัดทำเล็งเห็นว่าโครงการดังกล่าวยังสามารถที่จะพัฒนาต่อให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นได้ โดยจะมีการเพิ่มเติมทฤษฎีพื้นฐานให้กับเซนเซอร์แต่ละชนิดที่ใช้กับเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งเพื่อบุคคลอื่นที่มีความสนใจในโครงการนี้สามารถใช้งานเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลได้โดยไม่ต้องศึกษาหาข้อมูลใหม่ หรือสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ตามความสนใจและนำไปพัฒนาต่อได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานพื้นฐานของไดนาโมมิเตอร์
- 1.2.2 แสดงทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการใช้งาน Magnetic pickup sensor และโพลดเซลล์
- 1.2.3 ออกแบบวงจรที่สามารถใช้งานร่วมกับ Magnetic pickup sensor ได้
- 1.2.4 ทดสอบการทำงานและการเก็บข้อมูลของโพลดเซลล์เบื้องต้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 เข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานของไดนาโมมิเตอร์

- 1.3.2 ประยุกต์ใช้ Arduino Board ในการรับสัญญาณจากเซนเซอร์และสามารถนำข้อมูลไปใช้ได้
- 1.3.3 ทฤษฎีพื้นฐานและเอกสารประกอบการใช้ไดนาโมมิเตอร์มีความครบถ้วนและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
- 1.3.4 เพื่อผู้ที่มีความสนใจในโครงการฉบับนี้สามารถนำข้อมูลที่มีไปพัฒนาต่อได้

1.4 ขอบเขตของโครงการ

- 1.4.1 ปรับปรุงเอกสารประกอบการใช้งานไดนาโมมิเตอร์ให้ครบถ้วนและสมบูรณ์มากขึ้น
- 1.4.2 ทดสอบการทำงานของ Magnetic pickup sensor และโพลตเซลล์
- 1.4.3 เพิ่มเติมทฤษฎีพื้นฐานของ Magnetic pickup sensor โพลตเซลล์ และการควบคุมโพลต

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับไดนาโมมิเตอร์
- 1.5.2 ศึกษาข้อมูลและหลักการทำงานของ Magnetic pickup sensor
- 1.5.3 ศึกษาข้อมูลและหลักการทำงานของโพลตเซลล์
- 1.5.4 เขียนโปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลและใช้ในการทดสอบเซนเซอร์
- 1.5.5 ทดสอบการทำงานของ Magnetic pickup sensor และโพลตเซลล์
- 1.5.6 สรุปผล จัดทำรูปเล่มรายงาน และอภิปรายผลจากการปฏิบัติงาน

1.6 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานในช่วงเวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 1.1

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

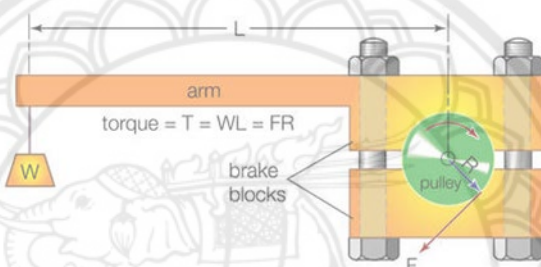
เนื่องจากผู้จัดทำสนใจในการทำงานของไดนาโมมิเตอร์เพราะเครื่องมือชนิดนี้โดยทั่วไปมีราคาที่สูงจึงได้เริ่มทำการศึกษาจากไดนาโมมิเตอร์ที่อยู่ภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร พบว่าไดนาโมมิเตอร์มีผู้ที่สนใจได้ทำวิทยานิพนธ์ไว้แล้วซึ่งมีชื่อวิทยานิพนธ์ว่า “ปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง” ได้มีการดำเนินงานมาแล้วทั้งหมด 2 ระยะ จากข้อมูลในระยะที่ 1 ได้มีการพัฒนาให้ไดนาโมมิเตอร์ภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกลสามารถกลับมาทำงานได้ โดยปัญหาของโครงการระยะที่ 1 คือวงจรการรับสัญญาณจากเซนเซอร์มีความเสียหายไม่สามารถซ่อมได้ จึงไม่สามารถใช้งานได้ ต่อจากนั้นในระยะที่ 2 ได้มีการพัฒนาในส่วนของการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Eddy Current ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สร้างความเหน็ดให้กับลูกกลิ้งของไดนาโมมิเตอร์ โดยได้เขียนโปรแกรมควบคุมโดย LabView จากข้อมูลทั้ง 2 ระยะที่ได้มีการศึกษา ทางผู้จัดทำจึงอยากพัฒนาในส่วนของคุณสมบัติพื้นฐานของไดนาโมมิเตอร์ภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกล เพื่อให้ผู้ที่มีความสนใจในไดนาโมมิเตอร์สามารถนำไปพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับทดสอบกำลัง แรงม้า แรงบิด และการทำงานในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ โดยทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อไดโน ซึ่งปัจจุบันมีให้เลือกใช้งานมากมายหลายประเภท โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ Engine Dynamometer, Classis Dynamometer, Roller Dynamometer ซึ่งในโครงการนี้จะทำการศึกษาในส่วนของไดนาโมมิเตอร์ประเภท Roller Dynamometer ชนิด Absorption Dynamometers ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

2.2.1 ไตนาโมมิเตอร์สำหรับทดสอบมอเตอร์และเครื่องยนต์

ไตนาโมมิเตอร์คือเครื่องมือวัดประสิทธิภาพและสมรรถนะของเครื่องยนต์หรือมอเตอร์โดยใช้หลักการจำลองแรงต้านการหมุนให้กับเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์มีพื้นฐานการทำงานมาจาก Prony brake [33] โดยแรงที่ส่งมายังเครื่องมือวัดจะถูกต้านการหมุนบริเวณ brake blocks ด้วยแรงเบรก ซึ่งแรงที่เป็นผลลัพธ์ของการหมุนคือ แรงบิด (Torque) ซึ่งไตนาโมมิเตอร์ทุกชนิดจะใช้หลักการพื้นฐานเดียวกันในการทดสอบโดยหลักการการทำงานของ Prony brake คือเมื่อใส่น้ำหนัก (w) ที่ปลายแขน จากนั้นน้ำหนักที่ถ่วงอยู่จะทำให้เกิดการบีบตัวของ brake blocks ทำให้แกนที่หมุนอยู่ หรือมู่เล่ย์ (Pulley) ถูก brake blocks บีบเกิดแรงต้านการหมุนที่เกิดจากแรงเสียดทาน และเมื่อแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับแรงที่ทำให้หมุน จะทำให้มู่เล่ย์หยุดหมุนแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทำงานของ Prony brake [33]

ไตนาโมมิเตอร์ในปัจจุบันโดยทั่วไปแล้วจะใช้ทดสอบแรงม้าของเครื่องยนต์และแรงบิดที่เครื่องยนต์สร้างขึ้นโดยจะแบ่งชนิดของไตนาโมมิเตอร์ตามทิศทางการไหลของพลังงานของไตนาโมมิเตอร์สามารถแบ่งได้ทั้งหมด 2 ชนิด ดังนี้

2.2.1.1 Driving Dynamometers คือ ไตนาโมมิเตอร์ที่ทำหน้าที่ออกแรงขับโหลด ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้จะสามารถสร้างแรงหมุนให้กับเพลาและถูกนำไปใช้ประโยชน์ในการทดสอบความสามารถของเบรก มีไตนาโมมิเตอร์อยู่ 1 ประเภทที่สามารถสร้างแรงขับได้คือ Motor generators

2.2.1.2 Absorption Dynamometers คือ ไตนาโมมิเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นโหลดของเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบโดยจะสร้างแรงต้านการหมุนให้กับแกนเพลลาของไตนาโมมิเตอร์ ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้เป็นไตนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยได้แบ่งประเภทของไตนาโมมิเตอร์ออกเป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ

ก. Eddy current โดยไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ และการระบายความร้อนด้วยน้ำ

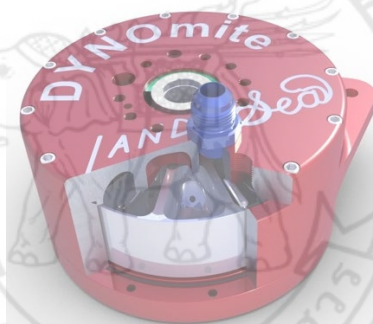
ข. Water brake

ค. Friction brakes

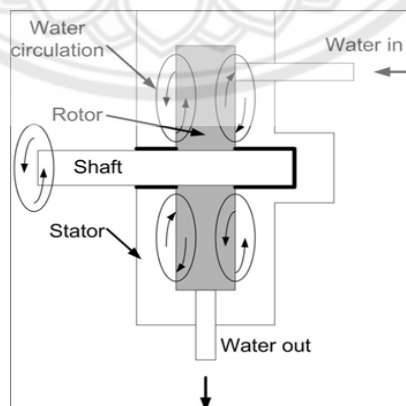
ง. Motor generators โดยไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แบบ AC Motor- Generators และ DC Motor- Generators

2.2.2 ประเภทของไดนาโมมิเตอร์

2.2.2.1 ไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake [1] ไดนาโมมิเตอร์ประเภทนี้มีราคาที่ถูกที่สุด และมีความสามารถในการทดสอบโดยรวมมากที่สุด ซึ่งหลักการทำงานจะทำงานคล้ายกับปั๊มสามารถควบคุมแรงต้านการหมุนหรือโหลดของไดนาโมมิเตอร์ได้โดยเพิ่มหรือลดปริมาณของน้ำภายในตัวไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งควบคุมโดยการใช้วาล์วน้ำดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน จึงมีถังเก็บน้ำขนาดใหญ่เพื่อเป็นที่พักน้ำให้กับตัวไดนาโมมิเตอร์ และส่งน้ำด้วยปั๊มน้ำให้กับตัวไดนาโมมิเตอร์ดังรูปที่ 2.3

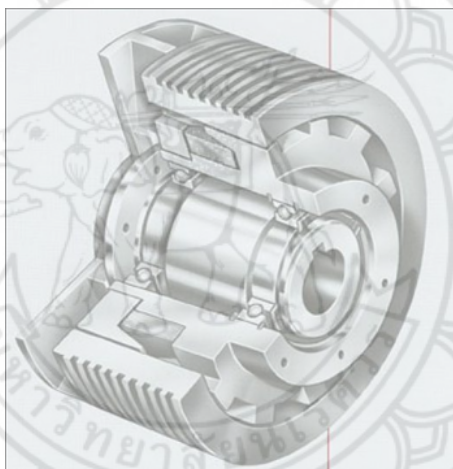


รูปที่ 2.2 Water-brake dynamometer [34]



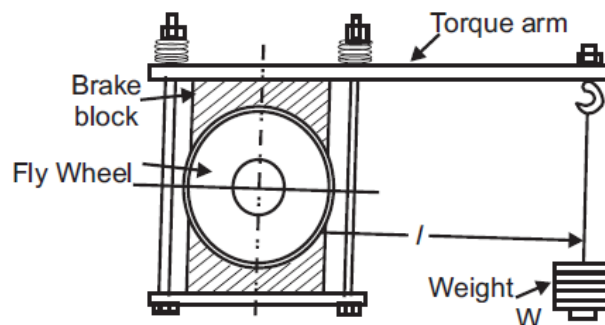
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake [1]

2.2.2.2 ไตนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake [35] ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ใช้หลักการทางไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในการสร้างแรงต้านการหมุน โดยจะใช้การเหนี่ยวนำที่ขดลวดทำให้เกิดเป็นกระแสไหลวน จนทำให้แกนหมุนของ Eddy Current ไม่สามารถหมุนอย่างอิสระได้ ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งเร็วกว่าไตนาโมมิเตอร์แบบ Water brake ความเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าโหลดของไตนาโมมิเตอร์จะมีค่าน้อยกว่า 0.1 วินาที ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้มีข้อจำกัดในส่วนของความร้อนจึงมีการพัฒนา Eddy current แบบระบายความร้อนด้วยน้ำขึ้น เนื่องจากเมื่อ Eddy current ร้อน ประสิทธิภาพในการทำงานก็จะลดลง ดังนั้น Eddy current ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศจะไม่สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลาที่ยาวนานเมื่อเทียบกับไตนาโมมิเตอร์แบบ Eddy current ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ ไตนาโมมิเตอร์ชนิดนี้ก่อนใช้งานต้องมีการอุ่นเครื่องอย่างน้อย 1 นาที Eddy current เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดขดลวดไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กซึ่งโครงสร้างภายในของไตนาโมมิเตอร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.4

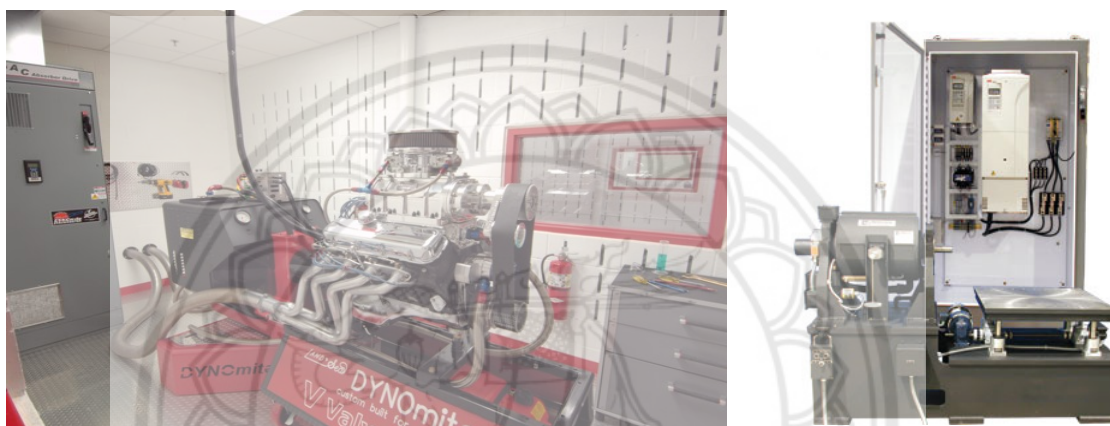


รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในของไตนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake [2]

2.2.2.3 ไตนาโมมิเตอร์แบบ Friction brakes [33] เรียกอีกชื่อว่า Prony brake ใช้หลักการในการสร้างแรงต้านการหมุนโดยใช้แรงเสียดทานของพื้นผิวหน้าสัมผัสระหว่างแกนหมุนของไตนาโมมิเตอร์โดยแรงที่สามารถชนะแรงต้านการหมุนได้นั้นเรียกว่าแรงบิด หาได้จากน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการหมุนคูณกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการหมุนถึงจุดที่รับน้ำหนัก โดยตัวอย่างไตนาโมมิเตอร์แบบ Friction brakes แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างไดนาโมมิเตอร์แบบ Friction brakes [33]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของไดนาโมมิเตอร์แบบ AC Motor- Generators และ DC Motor- Generators[1]

2.2.2.4 ไดนาโมมิเตอร์แบบ AC Motor- Generators, DC Motor- Generators [1]

เป็นไดนาโมมิเตอร์ประเภทมอเตอร์ที่มีความสามารถแตกต่างจากประเภทอื่น เนื่องจากตัวมันเองสามารถทำงานในรูปแบบ Absorption Mode และ Driving Mode ได้ โดยแรงบิดที่ใช้ในการเบรกสามารถส่งกลับในรูปแบบของกระแสไฟฟ้า ซึ่งไดนาโมมิเตอร์ชนิดอื่นพลังงานของแรงบิดจะถูกนำไปทิ้งในรูปแบบของพลังงานความร้อน ไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้สามารถจำลองแรงบิดในช่วงแรงบิดต่ำๆ จนถึงแรงบิดสูง และสามารถใช้งานต่อเนื่องเป็นระยะเวลาอันได้ดีกว่าไดนาโมมิเตอร์ทุกประเภท ซึ่งตัวอย่างของไดนาโมมิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.6

2.2.3 สรุปข้อดีข้อเสียของไดนาโมมิเตอร์แต่ละชนิด

จากตารางที่ 2.1 ไดนาโมมิเตอร์แต่ละชนิดมีข้อดีและข้อเสียและจุดเด่นในการทำงานที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งที่เหมือนกันคือการสร้างแรงต้านการหมุนเพื่อทำให้เกิดแรงบิด ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดชนิดหนึ่งซึ่งใช้วัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแล้วไดนาโมมิเตอร์ที่นิยมใช้มาก

ที่สุดคือ ไดนาโมมิเตอร์แบบ Water brake เนื่องจากมีราคาที่ถูก บำรุงรักษาง่ายและใช้งานได้ง่ายเมื่อเทียบกับไดนาโมมิเตอร์ชนิดอื่น แต่มีข้อเสียคือการตอบสนองต่อการควบคุมโหลดค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับไดนาโมมิเตอร์ชนิดอื่น ถ้ากล่าวถึงความรวดเร็วในการควบคุมโหลด ไดนาโมมิเตอร์ชนิด Eddy current และ Motor generators มีจุดเด่นในด้านนี้ เนื่องจากเป็นไดนาโมมิเตอร์ที่มีการตอบสนองต่อการควบคุมโหลดที่รวดเร็วและมีการตอบสนองต่อโหลดที่การเปลี่ยนแปลงมีความหน่วงน้อยกว่า 0.1 วินาที (Eddy current) และที่ 0.01 วินาที (Motor generators) [27] ในส่วนของการใช้งานไดนาโมมิเตอร์ชนิด Water brake และ Eddy current นิยมใช้ทั่วไปแต่ในส่วนของ Motor generators นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากสามารถทดสอบแบบละเอียดได้ เพราะมีความแม่นยำและตอบสนองต่อความเร็วรอบต่างๆ ได้ดี และสามารถนำพลังงานกลับกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ข้อเสียคือสามารถใช้ทดสอบได้ในความเร็วรอบที่ไม่สูงเท่า Eddy current และ Water brake

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีข้อเสียของไดนาโมมิเตอร์แต่ละชนิด [1]

คุณสมบัติของไดนาโมมิเตอร์	ความสามารถ
ปริมาณแรงม้าที่สามารถทดสอบได้	1≈2>4>3
ความสามารถในการทดสอบที่รอบต่ำ	4≈3>2>1
เสถียรภาพในการทดสอบ	4>2>1>3
ความเร็วสูงสุด	1≈2>3>4
การจ่ายพลังงานคืนสู่แหล่งจ่าย	4> (1,2,3ทำไม่ได้)
การตอบสนองต่อการควบคุม	4 (0.01s) >2 (0.1s) >1(0.5s)>3 (1.0s)
ความสามารถในการทดสอบที่ระยะเวลาที่ต่อเนื่อง	1,3,4 สามารถใช้งานต่อเนื่องระยะเวลานานได้ ยกเว้น Eddy Current Brake และ Friction Brakes ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ
สร้างแรงขับ	4. Motor generators เป็นเพียงชนิดเดียวที่สามารถสร้างแรงขับได้

- หมายเหตุ
- 1 คือ Water Brake
 - 2 คือ Eddy Current Brake
 - 3 คือ Friction Brakes
 - 4 คือ Motor generators

2.2.4 ไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake ที่ทำการศึกษา

ไดนาโมมิเตอร์ที่ได้ทำการศึกษาเป็นไดนาโมมิเตอร์ชนิด Absorption Dynamometers ประเภท Eddy current brake ชนิดที่ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งอยู่ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลมหาวิทยาลัยนเรศวรดังรูปที่ 2.7 เป็นเครื่องวัดแรงม้าชนิดขับเคลื่อน 2 ล้อ ยี่ห้อ Dyno Max งบประมาณในการจัดซื้อประจำปี 2543 และ Eddy current ที่ใช้อยู่ไม่บอกรหัสและข้อมูลทางเทคนิคทางผู้จัดทำจึงได้ทำการเปรียบเทียบจากรูปร่างภายนอกกับไดนาโมมิเตอร์ชนิดเดียวกันกับยี่ห้อ Dyno Mite เนื่องจาก แบริน Dyno Max ไม่มีข้อมูลที่สามารถนำมาอ้างอิงได้ จากการเก็บข้อมูลไดนาโมมิเตอร์พบว่าโดยทั่วไปไดนาโมมิเตอร์ชนิด Eddy current จะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 240-volt 60-Hz (or 50-Hz) AC เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับ Eddy current



รูปที่ 2.7 ไดนาโมมิเตอร์ชนิด Eddy Current Brake ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร

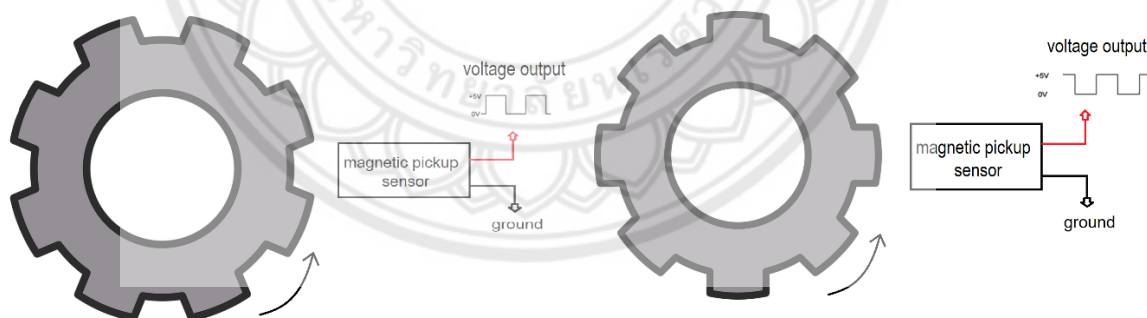
Eddy Current Brake เป็นไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้หลักการของการสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเพื่อต้านแรงหมุน หรือเรียกได้ว่าเป็นเบรกไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่สร้างแรงเบรกด้วยสนามแม่เหล็ก Eddy Current Brake ระหว่างทำงานจะไม่มีสัมผัสพื้นผิวซึ่งกันและกันและมีเพียงแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อกัน ภายในของ Eddy Current Brake จะประกอบไปด้วยขดลวดและฟลายวีลขดลวดภายใน Eddy current จะทำงานเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามาเลี้ยงขดลวดเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นภายใน และฟลายวีลทำหน้าที่กักเก็บพลังงานที่ได้จากเพลาส่งกำลังมายัง Eddy current เมื่อมีแรงต้านการหมุนและมีแรงที่พยายามจะทำให้แกนเพลามหมุน ก่อให้เกิดแรงบิดเกิดขึ้นที่จุดยึดของ Eddy current บริเวณจุดยึดจะมี load cell ที่เป็นตัววัดแรงที่เป็นผลลัพธ์ของแรงที่ Eddy current กระทำ ไดนาโมมิเตอร์ชนิดนี้เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในลักษณะของการเคลื่อนที่เสมือนจริง โดยจะมีอุปกรณ์และเซนเซอร์ในการรับและส่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของตัวไดนาโมมิเตอร์ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อุปกรณ์และเซนเซอร์ในการรับส่งข้อมูลสำหรับไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake

ชื่อของอุปกรณ์	ลักษณะการทำงาน
Magnetic pickup sensor	Input
Load cell	Input
Eddy Current Brake	Output
Box control	Controller

2.2.5 หลักการทำงานของอุปกรณ์และเซนเซอร์แต่ละชนิด

2.2.5.1 Magnetic pickup sensor คือ เซนเซอร์ที่วัดความเร็วรอบให้กับตัวเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง โดยหลักการทำงานคือเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัว Magnetic pickup sensor จะเกิดปรากฏการณ์ Hall Effect* [5] และสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมา เมื่อนำไปติดตั้งในส่วนด้านข้างของลูกกลิ้ง ซึ่งลูกกลิ้งจะเป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นฟันเฟือง ระหว่างที่ลูกกลิ้งของไดนาโมมิเตอร์หมุนไปจะเกิดการเคลื่อนที่ของฟันเฟืองและจะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของเซนเซอร์และเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ในลักษณะของสัญญาณ sine wave ซึ่งรูปแบบการทำงานแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงการทำงานของ Magnetic pickup sensor

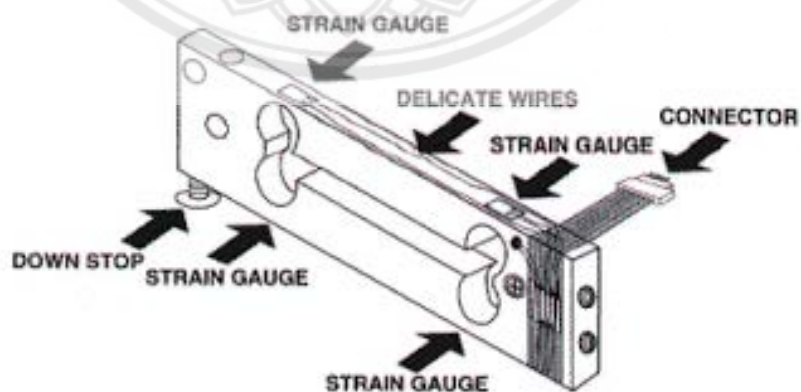
หมายเหตุ* ปรากฏการณ์ Hall Effect คือปรากฏการณ์ที่ประจุที่เคลื่อนที่ในวัสดุตัวนำ ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก เคลื่อนที่ไปรวมกันอยู่บนฝั่งใดฝั่งหนึ่งของวัสดุตัวนำ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองฝั่งของตัวนำ ซึ่งสามารถวัดได้



รูปที่ 2.9 แสดง Magnetic pickup sensor สำหรับไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake

จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าเมื่อจังหวะที่ฟันเฟืองหมุนไปจะทำให้ Voltage Output จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะของลูกคลื่น โดย 1 ลูกคลื่นเทียบกับเวลาจะเท่ากับฟันเฟืองมีการเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์

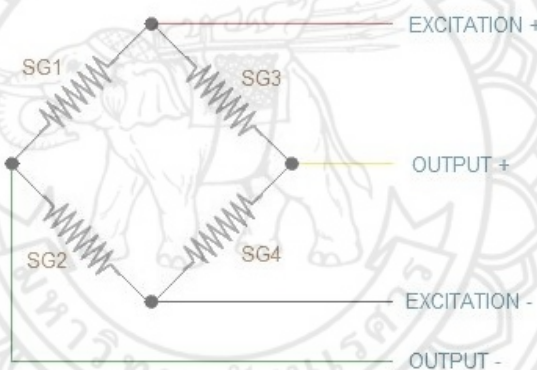
2.2.5.2 โหลดเซลล์ (Load cell) [6] ที่ใช้สำหรับเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคาร ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลนั้น คือ โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell) ประเภท Single End Shear Beam โดยการใช้งานจะทำการติดตั้งโดยยึดปลายด้านหนึ่งไว้กับรากฐาน และอีกด้านหนึ่งจะเอาไว้ใช้ในการรับแรงกดตั้งรูปที่ 2.10 โดยโหลดเซลล์ประเภทนี้จะนิยมใช้มากในเครื่องมือชั่งน้ำหนักต่างๆ [44] ซึ่งโหลดเซลล์ประเภทนี้จะสามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงให้อยู่ในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.10 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ [6]

หลักการการทำงานของโหลดเซลล์ประเภทนี้คือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียด (Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ โดยปกติแล้วมักจะใช้สเตรนเกจในการวัดแรงดึงและแรงกดจำนวน 4 ตัว มาต่อในรูปแบบของวงจรบริดจ์ ดังรูปที่ 2.11 โดยวงจรแบบบริดจ์จะทำงานโดยใช้หลักการ บริดจ์สมดุล (Bridge Balance) ซึ่งหลักการนี้จะทำให้กระแสไฟฟ้าภายในวงจรมีค่าเป็นศูนย์

สเตรนเกจทั้ง 4 ตัวนั้นจะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการแปลงแรงที่กระทำกับตัวโหลดเซลล์ไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง โดยจะทำการส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็น mV/V หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับโหลดเซลล์ที่มี Spec 2 mV/V ที่โหลดสูงสุด สมมุติว่าถ้าโหลดสูงสุดเป็น 100 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ที่น้ำหนัก 100 กิโลกรัม แรงดันที่วัดได้ก็จะเท่ากับ 20 mV [46] โดยการศึกษาโครงงานนี้จะใช้โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ Kelba - KA 250 [6] ในการศึกษา แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 การนำสเตรนเกจมาต่อในรูปแบบของวงจรบริดจ์ [45]



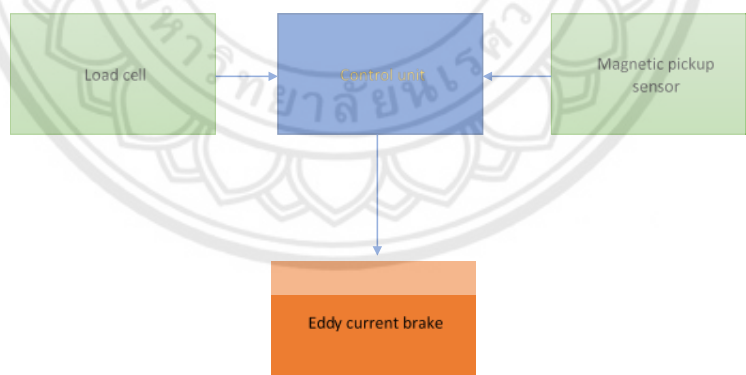
รูปที่ 2.12 โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ Kelba - KA 250

2.2.5.3 Eddy current brake เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ โดยจะใช้กระแสไฟฟ้าสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาซึ่งแรงต้านการหมุน ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยัง Eddy current และเกิดการสลายพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุนไปเป็นพลังงานความร้อน [2] มีหลักการทำงานคล้ายกับรางรถไฟฟ้าซึ่งใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตัวควบคุมการทำงานของ Eddy current brake โดยจากรูปที่ 2.13 จะเป็น Eddy current brake ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 2.13 Eddy Current Brake ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

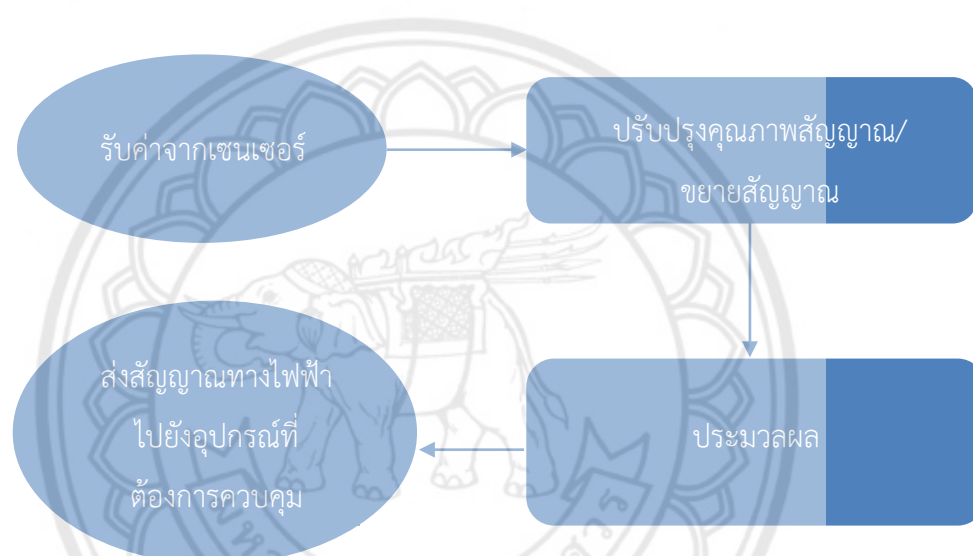
2.2.5.4 Control unit ทำหน้าที่ในส่วนของการรับข้อมูลและสั่งการคำนวณค่าที่รับมาจากเซนเซอร์ (Sensor) โดยจะมีองค์ประกอบหลักๆ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการทำงานของไดนาโมมิเตอร์

โดยที่มีเซนเซอร์ Load cell และ Magnetic pickup sensor เป็นเซนเซอร์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูล (input) เพื่อนำไปเข้ากระบวนการคำนวณภายใน Control unit ซึ่ง load cell จะส่งข้อมูลเข้ามายัง Control unit ในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแสดงผลในหน่วยกิโลกรัมและ Magnetic pickup

sensor ได้ส่งข้อมูลในรูปแบบของสัญญาณ sine wave และถูกวงจรขยายสัญญาณ Op-am Comparator แปลงรูปแบบของสัญญาณออกมาอยู่ในรูปแบบ square wave โดยค่าที่เปลี่ยนแปลงคือ ความถี่ของสัญญาณแสดงผลในรูปแบบความเร็ว กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr) ในส่วนของ Eddy current จากวงจรเดิมที่ทางผู้จัดทำในระยะที่ 1 และ 2 ได้จัดทำไว้ นั้น พบว่า Eddy current brake ใช้ไฟฟ้าขนาด 220-240 V @50Hz หรือ 60Hz เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักและควบคุมด้วยสัญญาณ PWM จาก Arduino เนื่องจาก Arduino เป็นวงจรควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสต่ำ (5V DC) จึงมีอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณควบคุมจาก 5V Dc เป็น 12 V AC จากนั้นได้ใช้แรงดันไฟฟ้าขนาด 12 V AC ไปควบคุมไทรสเตอร์เพื่อปรับเฟสของแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V AC

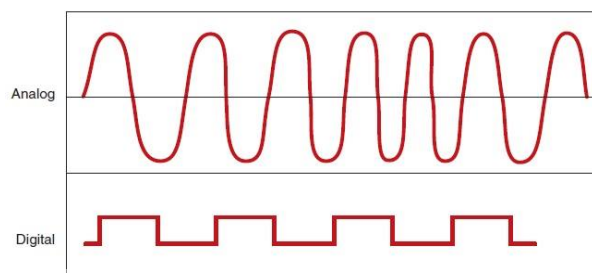


รูปที่ 2.15 ลำดับการทำงานของไดนาโมมิเตอร์

จากรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 การรับค่าจากเซนเซอร์ต่างๆ จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ Digital signal [7] และ Analog signal [8] ซึ่งความแตกต่างของสัญญาณทั้ง 2 ชนิดแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.16

ก. Digital signal [37] คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่มี ความต่อเนื่องของข้อมูลและมีขนาดของสัญญาณที่แน่นอนที่จุดสูงสุดและจุดต่ำสุดเสมอ โดยทั่วไปจะแทนสถานะของสัญญาณเป็น “0” และ “1” ซึ่งสัญญาณที่ส่งออกมาจะเป็นค่า “0”, “1” หรือเปิด - ปิด

ข. Analog signal [38] คือ รูปแบบของสัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทุกๆ การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันมีผลต่อการแสดงผลของข้อมูล

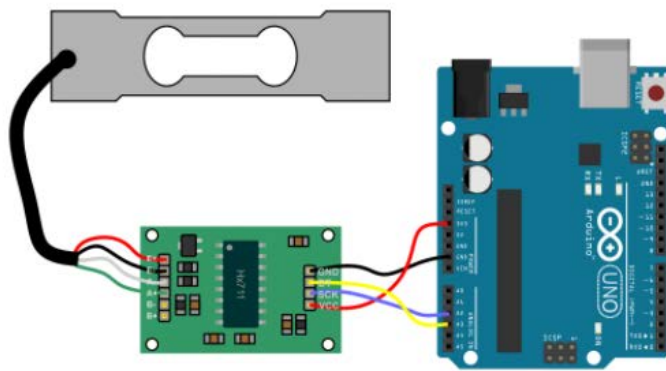


รูปที่ 2.16 ความแตกต่างของสัญญาณดิจิทัลและอนาล็อก

2.2.6 การปรับปรุงคุณภาพสัญญาณและขยายสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์แต่ละชนิด

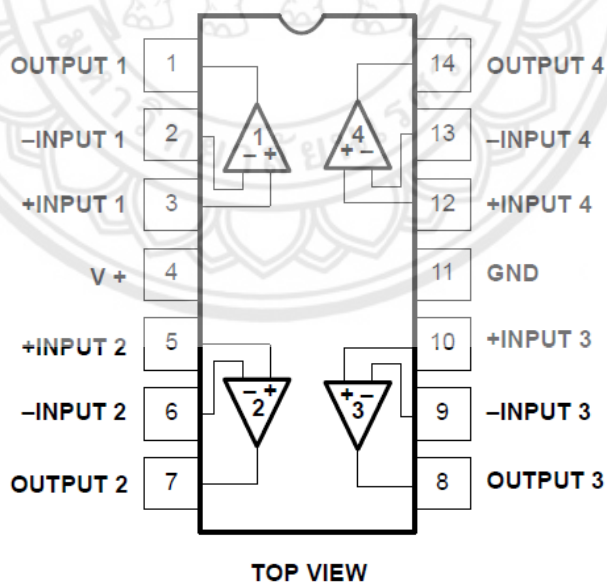
สัญญาณที่มาจากเซนเซอร์จำนวน 2 ตัว คือ โหลดเซลล์ (Load cell) และ Magnetic pickup Sensor เมื่อเซนเซอร์ส่งสัญญาณออกมาจะนำค่าไปเข้าสู่กระบวนการคำนวณเพื่อความแม่นยำของระบบจึงต้องมีการปรับปรุงสัญญาณทั้งสองก่อน

2.2.6.1 โหลดเซลล์ (Load cell) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อโหลดเซลล์เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า [9] แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกมาจากโหลดเซลล์ (Load cell) โดยตรง จะมีแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยมาก การที่จะนำมาใช้งานนั้นจึงต้องอาศัยวงจรขยายแอมพลิฟิแคเตอร์ (HX711 Amplifier Module) เข้ามาช่วยในการขยายแรงดันไฟฟ้าของโหลดเซลล์ ซึ่งวงจรดังกล่าวจะนำมาเชื่อมต่อกับโหลดเซลล์และ Arduino Board ดังรูปที่ 2.17 โดยตัวบอร์ดที่ใช้สามารถรองรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ตั้งแต่ 2.7V - 5V ความถี่สูงสุดที่ 80 Hz [18] และสัญญาณขาออกเป็นแบบดิจิทัล [19] ซึ่งในที่นี้จะนำมาใช้งานที่แรงดัน 3.3V และหากจะนำวงจรขยายแอมพลิฟิแคเตอร์ (HX711 Amplifier Module) นี้ไปใช้งานจริงร่วมกับไดนาโมมิเตอร์นั้นอาจจะเป็นข้อจำกัดของวงจร เนื่องจากที่ได้ทำการศึกษามานั้น หากจะให้ไดนาโมมิเตอร์สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ วงจรขยายแอมพลิฟิแคเตอร์ที่ใช้ส่งข้อมูลของโหลดเซลล์จะต้องรองรับความถี่อย่างน้อย 1000 Hz วงจรนี้จึงเหมาะสำหรับใช้ในการทดลองการรับค่าของโหลดเซลล์เท่านั้น

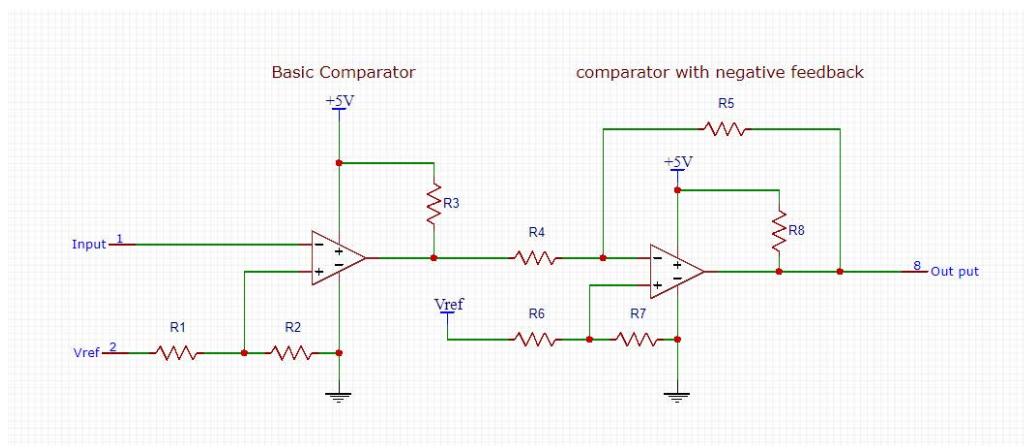


รูปที่ 2.17 บอร์ดและวงจรขยายสัญญาณโหลดเซลล์ (Load cell) [20]

2.2.6.2 Magnetic pickup sensor หรือเซนเซอร์แม่เหล็ก เซนเซอร์ประเภทนี้จะใช้หลักการการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าในการส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่ส่งออกมาจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงช่วง มิลลิโวลต์ (10^{-3}) จึงใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีชื่อว่า Op-amp เข้ามาขยายแรงดันไฟฟ้า Op-amp เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถออกแบบให้วงจรมีเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ได้ ซึ่งวงจรที่ได้นำมาใช้ร่วมกับ Magnetic pickup sensor คือวงจรแบบ basic comparator และ non-inverting hysteresis comparator และ Op-amp โดย Op-amp ที่นำมาใช้จะเป็นโมเดล LM324 ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วย Op-amp ทั้งหมด 4 ตัว ดังรูปที่ 2.18 และจะถูกนำมาใช้งาน ดังรูปที่ 2.19



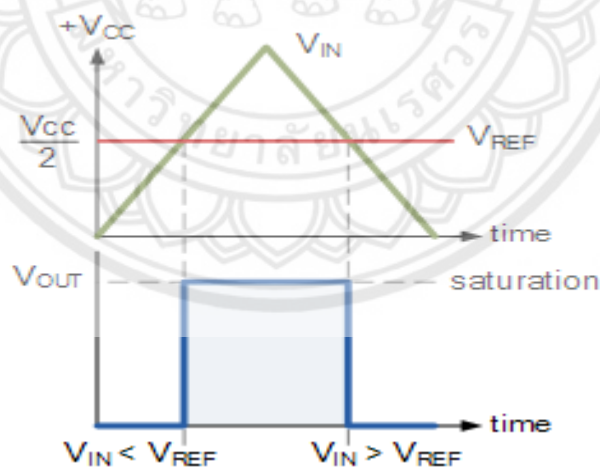
รูปที่ 2.18 IC LM324 [30]



รูปที่ 2.19 วงจร Op-amp Comparator Circuit

ก. คุณสมบัติของวงจร

ก.1 Basic comparator [39] คือวงจรขยายแรงดันแบบธรรมดา (รูปที่ 2.19) สามารถเลือกแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ในการขยายสัญญาณได้เพียงค่าเดียว โดยตัว Op-amp จะมีเงื่อนไขคือ เมื่อ $V_{in} < V_{ref}$ จะได้ $V_{out} = -V_{cc(5v)}$ และถ้าเมื่อ $V_{in} > V_{ref}$ จะได้ $V_{out} = V_{cc(5v)}$ ดังรูปที่ 2.20
 หมายเหตุ* = แรงดันไฟฟ้าของ output
 หมายเหตุ** = แรงดันไฟฟ้าของ input



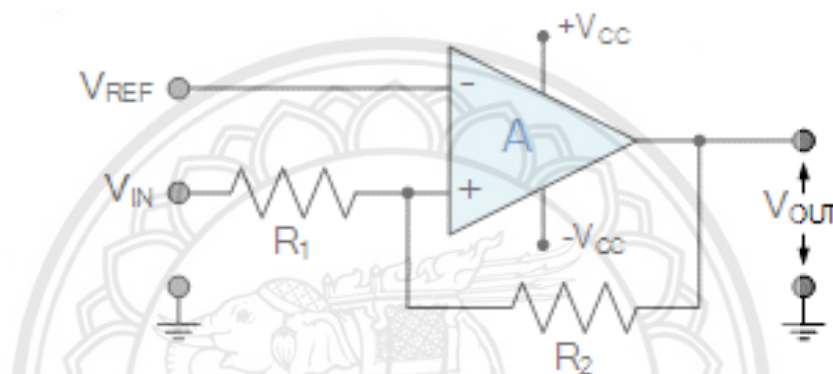
รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานของวงจร Basic comparator [40]

ก.2 Comparator with hysteresis [41] จะมีลักษณะของวงจรดังรูปที่ 2.21 ซึ่งวงจรนี้ คือ วงจรขยายแรงดันที่สามารถเลือกแรงดันอ้างอิงในการขยายแรงดัน V_+ และ V_- ได้

โดยที่แรงดันอ้างอิงจะมี 2 ค่า ซึ่งแรงดันที่ทำให้ $V_{out} = +V_{(5V)}$ เรียกว่า V_{ThH} และ $V_{out} = -V_{(5V)}$ เรียกว่า V_{ThL} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 และ สมการที่ 2.2

$$V_{ThH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times (+V_{CC}) \quad (2.1)$$

$$V_{ThL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times (-V_{CC}) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.21 วงจร Comparator with hysteresis [42]

2.2.7 การคำนวณแรงบิดและแรงม้า

ในส่วนของการคำนวณผลเป็นส่วนที่นำค่าต่างๆที่รับจากเซนเซอร์นำไปคำนวณหาค่าแรงบิด (Torque) และจำนวนรอบที่ลูกกลิ้งหมุนเพื่อหาค่าแรงม้าหรือกำลัง (Power) ของเครื่องยนต์ที่ทำกรทดสอบ

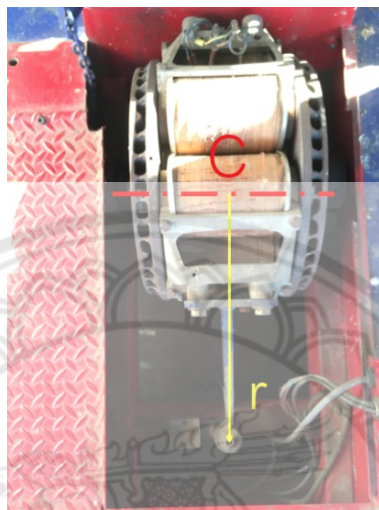
2.2.7.1 แรงบิด (Torque) [12] คือ ผลของแรงที่มากกระทำและทำให้เกิดการหมุน มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร ($N \cdot m$) หาได้จาก

$$\tau = F \times r \quad (2.3)$$

F คือ แรงที่มากกระทำต่อวัตถุในทิศตั้งฉากกับรัศมีของการหมุน (N)

r คือ รัศมีการหมุนของวัตถุที่ออกแรง (m)

ซึ่งแรงที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะนำมาจากโหลดเซลล์ (Load cell) ที่วัดค่าออกมาและรัศมีการหมุนคือระยะห่างของโหลดเซลล์ (Load cell) และจุดศูนย์กลางของ Eddy current หรือเพลาหมุนของลูกกลิ้งดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาคำนวณหาแรงบิด (Torque)

หมายเหตุ r คือ รัศมีของลูกกลิ้ง (m) , C คือ จุดหมุน

2.2.7.2 แรงม้า คือ ค่าที่บอกกำลังของเครื่องยนต์โดยเป็นผลมาจากแรงบิดและความเร็วรอบของการหมุนมีหน่วยคือ Watts หรือ HP 1 HP มีค่าเท่ากับ 735.5 watts [14] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$P = \tau \times \omega \quad (2.4)$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุม (Rad/s) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 และสมการ 2.6

$$\omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

$$f = \frac{1}{T \times n} \quad (2.6)$$

เมื่อ

T คือ คาบเวลาที่ลูกคลื่น 1 ลูกคลื่นใช้ในการเคลื่อนที่ (s)

f คือ ความถี่ที่เซนเซอร์วัดได้ (Hz)

n คือ จำนวนฟันของลูกกลิ้ง (ลูกกลิ้งที่ใช้งานอยู่มีจำนวนฟันอยู่ที่ 96 ดังนั้น $n=96$)

และความเร็วของลูกกลิ้งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$v = \omega r \quad (2.7)$$

เมื่อ

v คือ ความเร็วของลูกกลิ้ง (m/s)

r คือ รัศมีของลูกกลิ้ง (m)

ค่าที่ได้จากการคำนวณกำลังและแรงบิด จะถูกนำเสนอในรูปแบบของกราฟเทียบกับความเร็วเชิงมุมของลูกกลิ้งและส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม

2.2.7.3 การคำนวณหาความถี่ที่สามารถผ่านวงจร ที่ถูกใช้ในชุดการควบคุมการทำงานของ Eddy current brake low pass Filter โดยวงจรดังกล่าวจะยอมให้สัญญาณที่ผ่านได้ไม่เกินความถี่ที่กำหนด [25] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.8)$$

f คือ ความถี่ของคลื่นที่ตัดผ่าน (Hz)

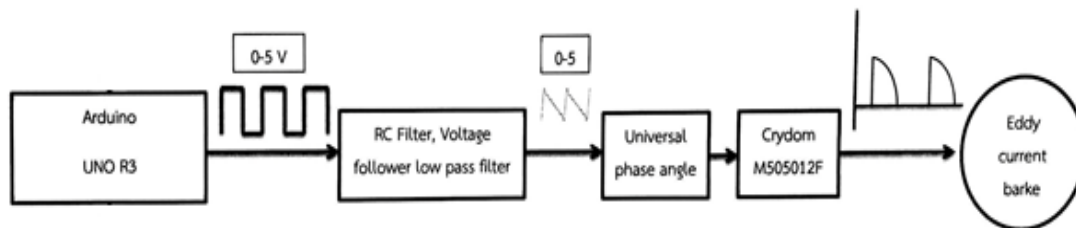
π คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.142

R คือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทาน (โอห์ม) ในที่นี้จะใช้ที่ 10 K Ω

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (F) ในที่นี้จะใช้ที่ 0.1 μ F

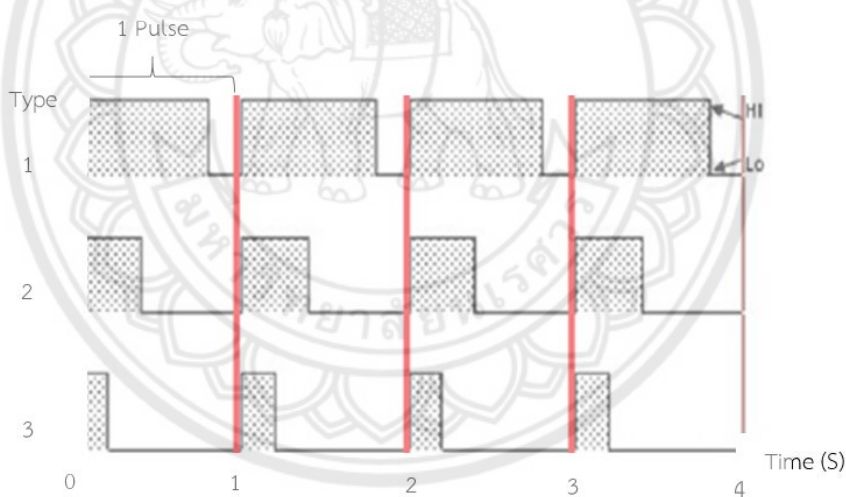
2.2.8 ลักษณะการควบคุมการสร้างกระแสเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.23 แสดงแผนผังการทำงานโดยรวมของภาคการควบคุมการทำงานของ Eddy current brake ที่ถูกสร้างขึ้นในโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าระยะที่ 1



รูปที่ 2.23 ระบบการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์ [47]

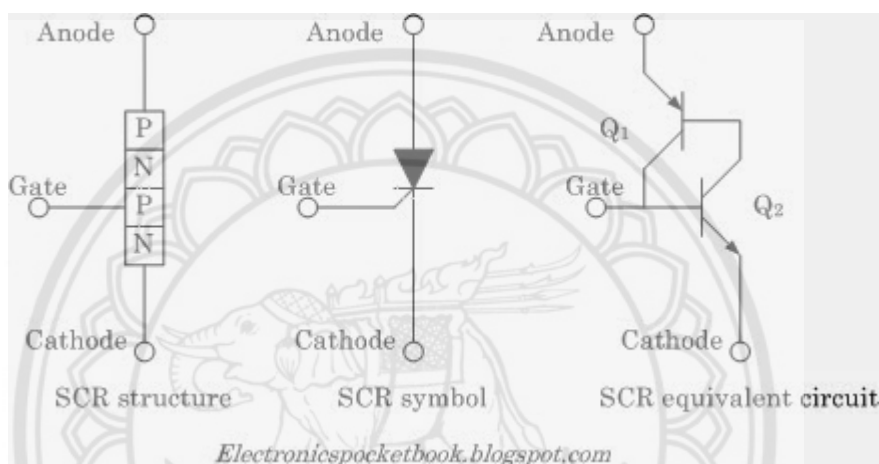
ในส่วนการควบคุมการทำงานของ Eddy Current Brake มีวงจรการควบคุมการจ่ายกระแสไฟโดยใช้ Pulse Width Modulation เป็นตัวควบคุมการทำงาน ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยตรงจากสัญญาณขาออกแบบ Digital ในบอร์ด Arduino โดยการทำงานคือปรับความกว้างของพัลส์ (Pulse) ซึ่งลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเป็นลูกคลื่นแบบสี่เหลี่ยม เมื่อความกว้างของ pulse เปลี่ยนแรงดันเฉลี่ยที่ส่งออกมาจะเปลี่ยนแปลงตาม ขนาดของของสัญญาณ PWM จะมีผลต่อการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับ Eddy current brake



รูปที่ 2.24 แสดงหลักการทำงานของ PWM [11]

จากรูปที่ 2.24 สมมุติว่าถ้ากราฟที่ 1 คือการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 90 % กราฟที่ 2 มีการลดความกว้างของพัลส์ ลงไปที่ 50 % และกราฟที่ 3 คือ 25 % จะเห็นได้ว่าภายใน 1 วินาที มี Pulse อยู่ 1 ลูก นั่นคือความถี่ยังคงที่อยู่ 1 Hz เท่ากันทุกกราฟ แต่มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของ Pulse โดยจุดประสงค์ในการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Eddy Current Break ซึ่งในส่วนการทำงานของ Eddy Current Break เป็นการใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการทำงาน แต่สัญญาณที่มา

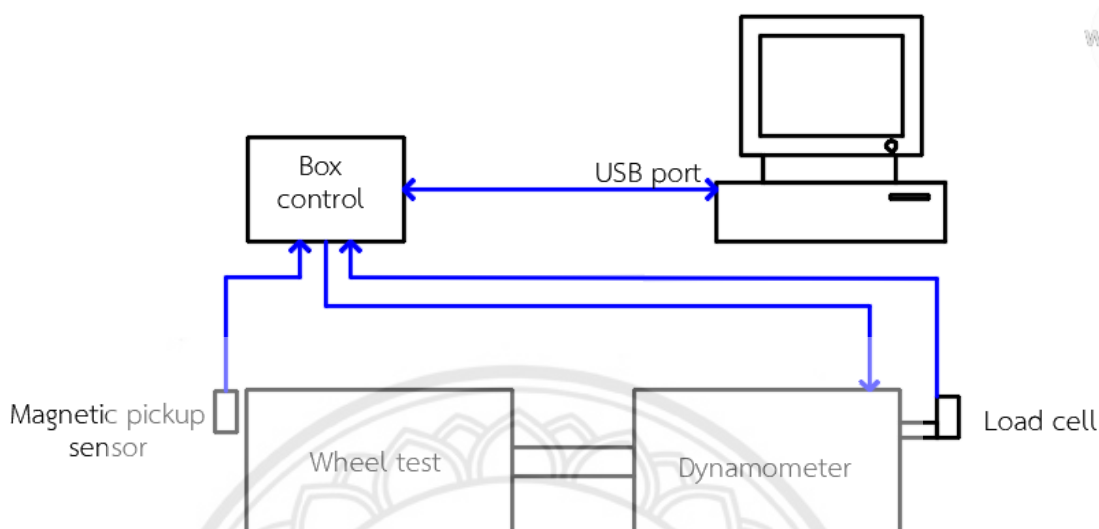
จากวงจรควบคุมจากบอร์ด Arduino เป็นกระแสไฟฟ้ากระแสตรง จึงได้ใช้ Universal phase angle trigger module คือ "ไทรสเตอร์" (Thyristor) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางไฟฟ้าซึ่งประกอบไปด้วยขั้ว Anode , Cathode และ Gate ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งสามารถนำแรงดันไฟฟ้าปริมาณน้อยไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าแรงดันมากได้โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่จะนำมาควบคุมจะถูกต่อเข้ากับขั้ว Gate แรงดันที่ต้องการควบคุมจะถูกป้อนเข้ากับขั้ว Anode และ Cathode โดยที่มีเงื่อนไขของ Gate คือต้องมีกระแสที่จ่ายให้ Gate มากกว่ากระแสโฮลดิ้ง (holding current) [43] ซึ่งไทรสเตอร์แต่ละโมเดลจะมีกระแสโฮลดิ้งไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.25 หลักการทำงานของ Thyristor

จากโครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าระยะที่ 1 และ 2 พบว่า Universal phase angle trigger module ได้ใช้สัญญาณรูปสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณที่ใช้ปรับเฟสและแรงดันไฟฟ้าขนาด 12V AC เป็นสัญญาณที่ถูกปรับเฟส Universal phase angle trigger module สามารถนำไปใช้งานได้ 2 แบบคือการใช้งานแบบ Full wave ซึ่งก็คือการปรับเฟสของแรงดันทั้งแรงดันฝั่งบวก ฝั่งลบและแบบ Half wave คือการปรับเฟสแรงดันเฉพาะฝั่งบวก ในที่นี้ได้ใช้งานแบบ Half wave ดังนั้น จะมีแรงดันเฉพาะฝั่งบวกที่ออกจากอุปกรณ์ชนิดนี้ ซึ่งมีแรงดัน Gate ชนิดสามเหลี่ยม หลังจากนั้นแรงดันแบบ Half wave 12V AC จะถูกนำไปควบคุมแรงดันขนาด 220V โดยแรงดันขนาด 220V จะถูกปรับเฟสตามแรงดัน Half wave 12V AC

2.2.9 สรุปการทำงานของไดนาโมมิเตอร์แบบลูกกลิ้ง



รูปที่ 2.26 แผนผังโดยรวมของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง

จากรูปที่ 2.26 เครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งชนิด Eddy Current Break ที่ถูกปรับปรุงแล้วใน ระยะเวลาที่ 1 และ 2 มีองค์ประกอบในการทำงานหลักๆ อยู่ 4 ส่วน คือ การรับค่าจากเซนเซอร์ การ ปรับแต่งสัญญาณจากเซนเซอร์ ส่วนการคำนวณ และส่วนการส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ ในส่วนของการรับค่ามีอยู่ 2 เซนเซอร์คือ magnetic pickup sensor และโหลดเซลล์ ถูกขยายแรงดันด้วยวงจร Comparator with หลังจากนั้นส่งค่าที่มีการขยายสัญญาณแล้วไปคำนวณหาค่าแรงบิด (Torque) และแรงม้า จากนั้นข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ในรูปแบบกราฟเทียบกับความเร็วของลูกกลิ้ง ในส่วนของการสร้างแรงต้านการหมุน Eddy current break จะเริ่มจากบอร์ด Arduino สร้าง PWM จากนั้นถูกแปลงสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของ square wave ไปเป็น triangle wave นำไปปรับเฟสของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับขนาด 12 V และนำ แรงดันขนาด 12 V ไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V AC ที่จ่ายให้กับ Eddy current break

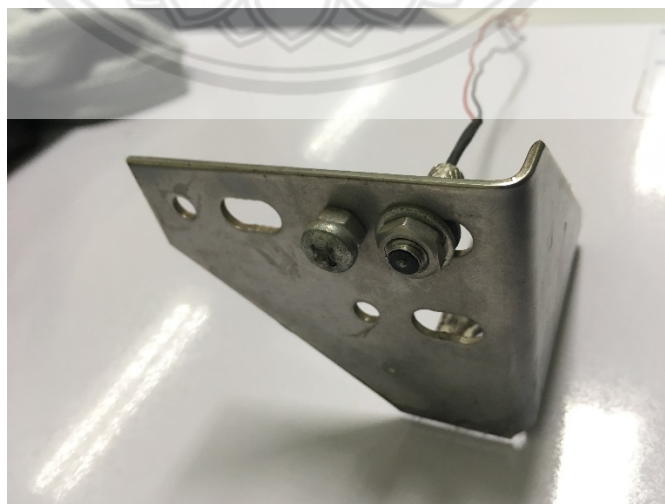
บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

ไดนาโมมิเตอร์ภายในอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลได้ดำเนินการปรับปรุงมาทั้งหมด 2 ระยะ ซึ่งการปรับปรุงระยะที่ 3 นี้ยังใช้โครงสร้างการทำงานในส่วนของอุปกรณ์เดิมอยู่ คือ โหลดเซลล์ (Load cell) และ magnetic pickup sensor แต่ได้มีการเปลี่ยนวงจรขยายแอมพลิฟายด์ของโหลดเซลล์ เนื่องจากวงจรเดิมมีความชำรุด โดยเปลี่ยนมาใช้วงจรขยายแอมพลิฟายด์ (HX711 Amplifier Module) แทนวงจรเดิม ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีการส่งข้อมูลแบบดิจิตอล และวงจร Comparator ที่ได้ใช้ขยายสัญญาณจาก Magnetic pickup sensor ในส่วนนี้ผู้จัดทำได้ทำการทดลองการใช้งานเซนเซอร์ว่ายังสามารถใช้งานได้หรือไม่ และได้มีการเก็บข้อมูลในส่วนของารรับข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อให้ผู้ที่สนใจในโครงการนี้สามารถนำข้อมูลไปพัฒนาต่อไปได้

3.1 การรับข้อมูลจากเซนเซอร์ (Input)

การรับข้อมูลจากเซนเซอร์สำหรับเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งชนิด Eddy current นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ในการนำข้อมูลเข้ามาใช้ประมวลผล คือ Magnetic pickup sensor และ Load cell



รูปที่ 3.1 Magnetic pickup sensor [32]

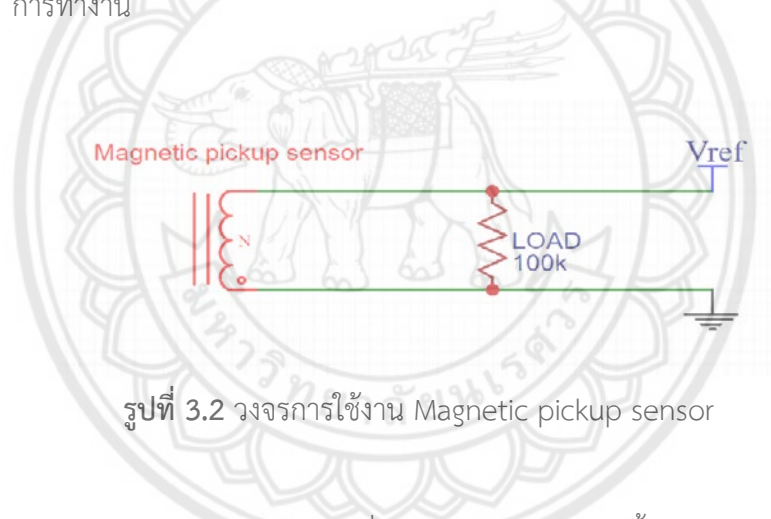
3.1.1 Magnetic pickup sensor

จากรูปที่ 3.1 เซนเซอร์ชนิดนี้คือเซนเซอร์ทางไฟฟ้าที่มีหลักการทำงานโดยใช้สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำกับวัตถุที่เป็นโลหะส่งสัญญาณออกมาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้า ในที่นี่ได้ใช้ Magnetic pickup sensor ยี่ห้อ RS Pro Analogue Magnetic Pickup 10V [32] ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่เหมาะสมกับการนำมานับจำนวนรอบของฟันเฟืองหรือการหมุนและมีราคาไม่แพง ใช้งานง่ายไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวเซนเซอร์ซึ่งตัวเซนเซอร์สามารถสร้างสัญญาณส่งออกได้โดยอาศัยการตัดของสนามแม่เหล็กกับโลหะสร้างแรงดันส่งออก ออกมาอยู่ในรูปแบบของสัญญาณ sine wave

คุณสมบัติ

1. ระยะการติดตั้งที่เหมาะสม 2.5 มิลลิเมตร
2. อุณหภูมิการทำงาน -40 ถึง 100 องศาเซลเซียส
3. ความยาว 22 มิลลิเมตร

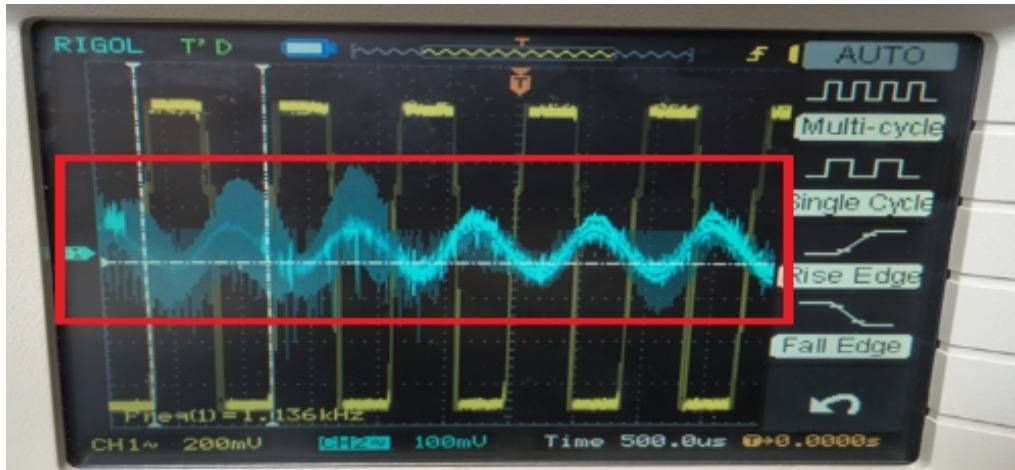
การทำงาน



รูปที่ 3.2 วงจรการใช้งาน Magnetic pickup sensor

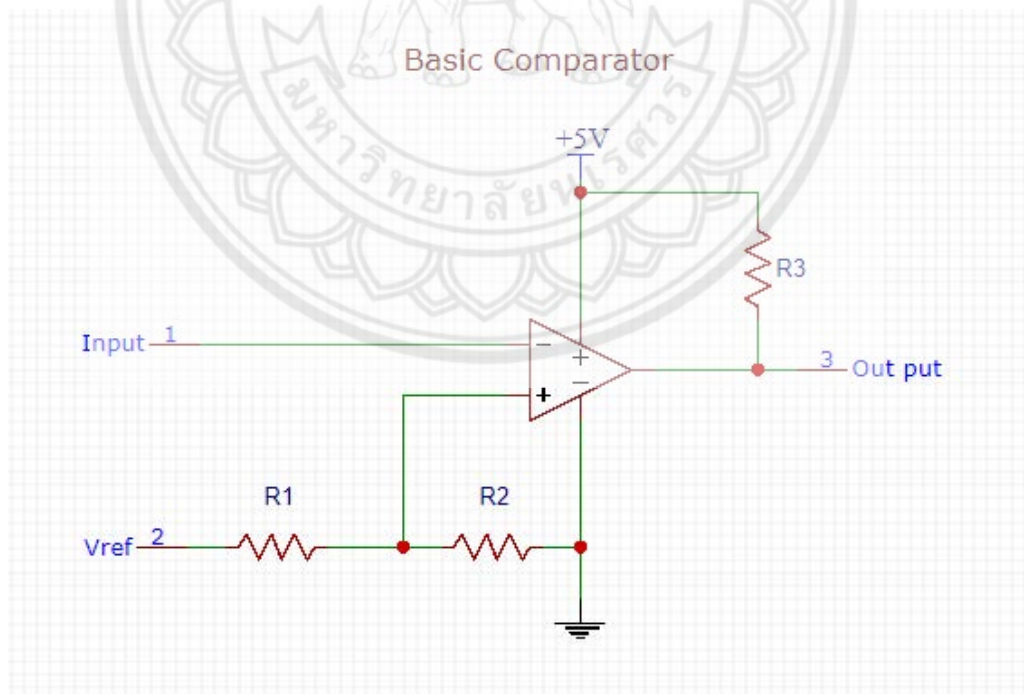
Magnetic pickup sensor ที่ใช้กับไดนาโมมิเตอร์ตัวนี้สามารถทำงานได้ต้องมีโหลดให้กับตัวเซนเซอร์โดยการต่อตัวต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม ขนานกับสัญญาณที่ออกจากเซนเซอร์ ดังรูปที่ 3.2

สัญญาณที่ Magnetic pickup sensor ส่งออกมาโดยตรงจะเป็นสัญญาณรูปแบบของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ลักษณะเป็นลูกคลื่นแบบ sine wave ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟเส้นสีฟ้าแสดงสัญญาณที่ Magnetic pickup sensor ส่งออกมาโดยตรงขณะทำงาน

3.1.1.1 การนำสัญญาณไปใช้ การจะนำสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์ Magnetic pickup sensor ไปใช้ได้ จะต้องนำสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของ sine wave แปลงเป็นสัญญาณ Pulse เพื่อให้ Arduino รับสัญญาณโดยใช้ช่องรับสัญญาณดิจิทัลได้ โดยการนำสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบของ sine wave เข้าไปยังวงจรรขยายสัญญาณที่มีชื่อ Basic Comparator [16]



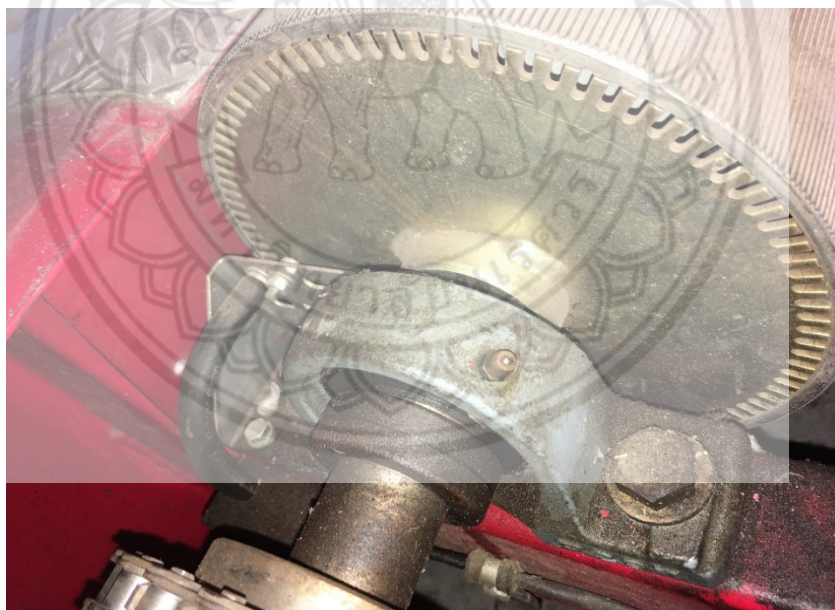
รูปที่ 3.4 Basic Comparator [16]

ในวงจร Basic Comparator นี้ได้มีการออกแบบวงจรให้ใช้แรงดันอ้างอิง $V_{ref}=0$ ดังนั้น สัญญาณที่ส่งออกจากวงจร Basic Comparator จะมีลอจิกเป็น 1 เมื่อสัญญาณที่เข้ามายังวงจรมีแรงดันมากกว่า 0 และ R1 คือตัวต้านทานที่เป็นตัวกำหนดแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ดังรูปที่ 3.4

3.1.1.2 การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์เบื้องต้นจะใช้อุปกรณ์ ดังนี้

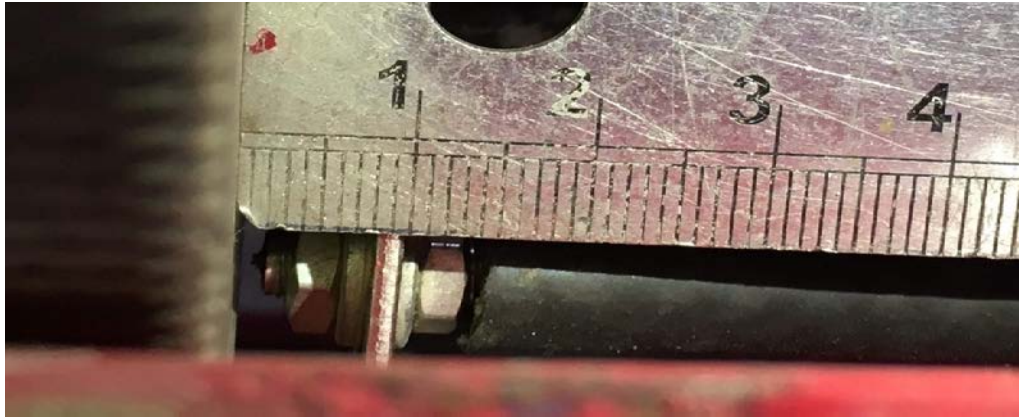
- ก. Rigol DS1022CD Digital Oscilloscope
- ข. RS Pro Analogue Magnetic Pickup
- ค. วงจร Basic Comparator
- ง. วงจร Comparator with negative feedback
- จ. รถจักรยานยนต์
- ฉ. คอมพิวเตอร์แบบพกพา

ในการทดสอบการทำงานของ Magnetic pickup sensor ได้ทดสอบโดยการนำรถจักรยานยนต์ขึ้นไปหมุนลูกกลิ้งเพื่อทดสอบว่าเซนเซอร์สามารถใช้งานได้หรือไม่ และหลังจากนั้นได้ต่อเซนเซอร์เข้ากับวงจร Basic Comparator เพื่อทำการขยายสัญญาณทางไฟฟ้าที่เซนเซอร์ได้ส่งสัญญาณออกมาให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณ Pulse เพื่อให้ได้ความถี่ในการหมุนของลูกกลิ้ง



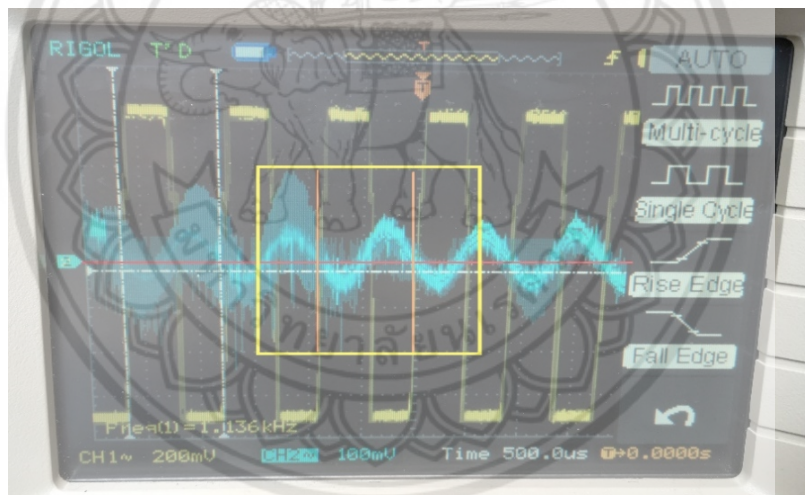
รูปที่ 3.5 การติดตั้ง Magnetic pickup sensor กับลูกกลิ้ง

ในการติดตั้ง Magnetic pickup sensor ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 ตามสเปคของ sensor จะติดตั้งห่างได้ไม่เกิน 2.5 mm ในการทดลองนี้จึงได้ทำการติดตั้งไว้ที่ระยะประมาณ 1.0 mm เพราะถ้าหากติดตั้งห่างเกินระยะ 2.5 mm เซนเซอร์จะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้



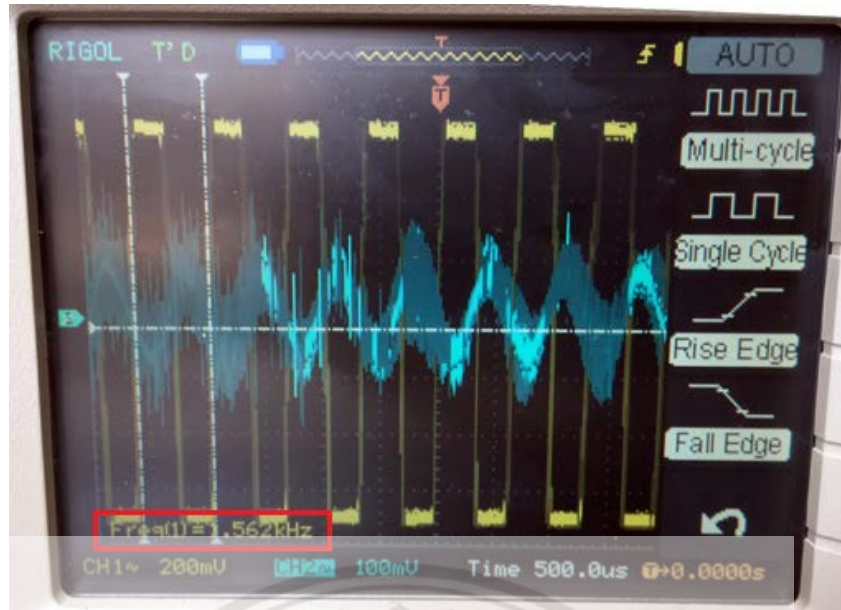
รูปที่ 3.6 ความห่างของ Magnetic pickup sensor กับลูกกลิ้ง

3.1.1.3 ผลที่ได้หลังจากทำการทดสอบ เมื่อวงจร Basic Comparator ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่เซนเซอร์ส่งมาให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณ Push หลักการคือ เมื่อ Sine wave มีการเคลื่อนที่ผ่านที่ 0 V จะตัดเป็น 1 Push หรือลูกคลื่นแบบ สี่เหลี่ยม (square wave) ดังรูปที่ 3.7



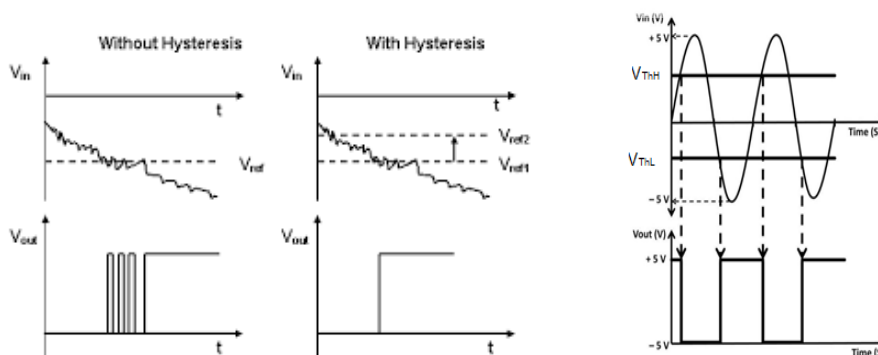
รูปที่ 3.7 การทำงานของวงจร Basic Comparator

โดยจะเห็นได้ว่าเส้นสีฟ้า (CH2) ที่อยู่ในรูปแบบของ sine wave เมื่อมีการเคลื่อนที่ตัดที่ 0 V จะเกิด out put เส้นสีเหลือง (CH1) เป็นกราฟรูปแบบ square wave ซึ่งจะสามารถนับความถี่ที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 3.8

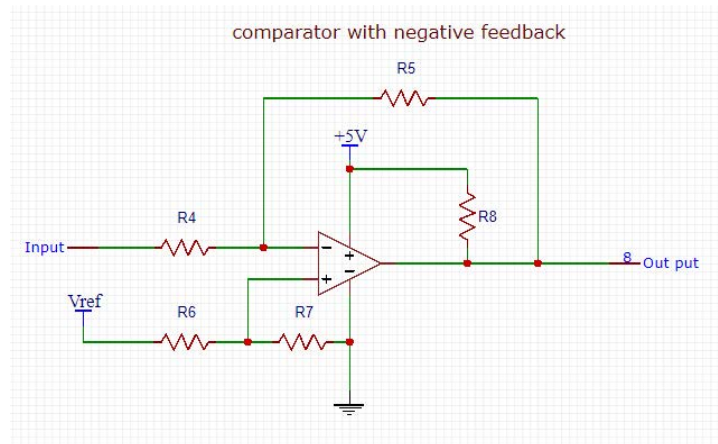


รูปที่ 3.8 ความถี่ที่เกิดขึ้นของสัญญาณ out put

หลังจากนั้นสัญญาณที่ออกจากวงจร Basic Comparator จะถูกนำไปขยายสัญญาณโดย วงจร comparator with negative feedback [17] เพื่อให้สัญญาณมีลักษณะที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยที่วงจร comparator with negative feedback จะมีเงื่อนไขของวงจรคือ Basic Comparator เป็นวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าที่ไม่มี Hysteresis ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะมีแรงดันอ้างอิงที่ใช้ขยายแรงดันเพียงค่าเดียวคือ $V_{ref Input}$ ของสัญญาณที่มาจาก Magnetic pickup sensor เป็นสัญญาณรูป Sine wave ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่ผ่าน 0 ทุกครั้งรอบ โดยมีเงื่อนไขของวงจร Basic Comparator V_{ref} มีค่าเท่ากับ 0 V วงจรจะแปลงสัญญาณจาก sine wave เป็น square wave จากนั้น สัญญาณ square wave จาก Basic Comparator จะเข้าวงจร Comparator with negative feedback ซึ่งเป็นวงจรที่มี Hysteresis จะมีแรงดันอ้างอิง 2 จุด คือ V_{TH} และ V_{TL} โดยที่จะขยายแรงดันขาเข้า (V_{in}) ให้มีแรงดันขาออกเท่ากับ V_{CC}



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบวงจร Comparator ที่มี hysteresis และไม่มี hysteresis [17]

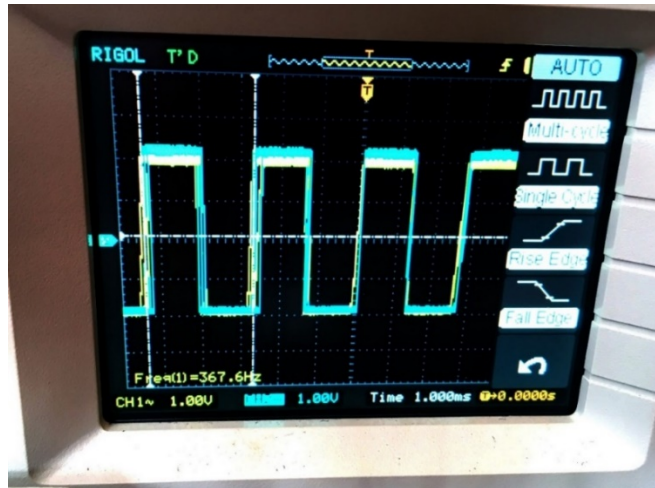


รูปที่ 3.10 วงจร Comparator with negative feedback [17]

หมายเหตุ ทางผู้จัดทำได้ใช้ตัวต้านทานทุกตัวเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ทำให้สามารถเปลี่ยนแรงดันอ้างอิงได้ตามต้องการ ซึ่งตัวต้านทาน R_4 และ R_5 , R_6 และ R_7 เป็นอัตราส่วนของกันและกันเนื่องจาก R_6 และ R_7 มีความต้านทานที่เท่ากัน $V_{CC} (+5V)$ จะถูกหาร 2 ดังนั้น V_{CC} ที่ใช้ในการคำนวณคือ $2.5 V$ โดยที่วงจรมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 3.1 และทำให้แรงดันอ้างอิง V_{THH} และ V_{THL} มีค่าเท่ากับ $\pm 1.35 V$

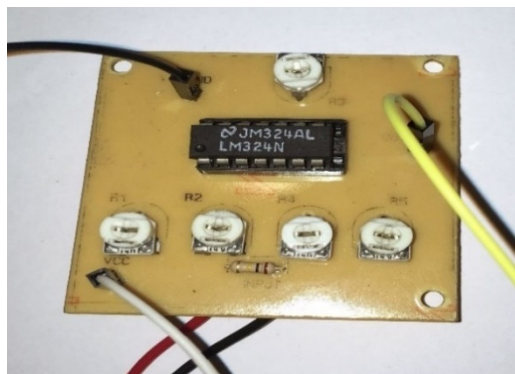
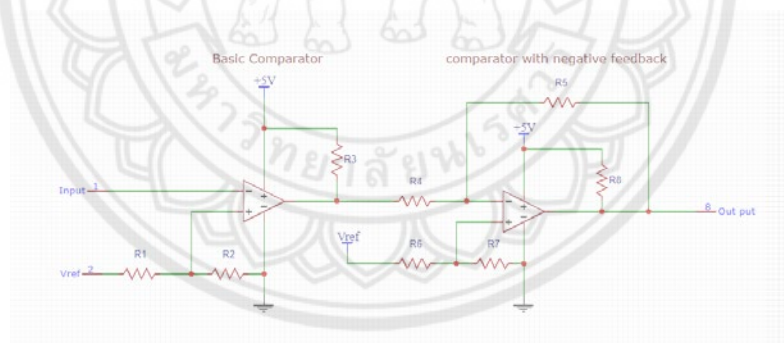
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของตัวแปรในวงจร

ตัวแปร	ขนาด
V_{CC}	+5 V
R_4	5.25 Ω
R_5	4.48 Ω
R_6	4.98 Ω
R_7	4.97 Ω
R_8	4.48 Ω



รูปที่ 3.11 เส้นสีเหลือง (CH1) คือสัญญาณที่มาจาก Basic Comparator เส้นสีฟ้า (CH2) คือสัญญาณที่มาจาก Comparator with negative feedback

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าลักษณะของสัญญาณที่ออกจากวงจร Comparator with negative feedback มีลูกคลื่นที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการอ่านค่าสัญญาณจะอ่านระยะเวลาที่ลูกคลื่นขึ้นและลง (Pulse In) [17] ดังนั้นรูปแบบสัญญาณลูกคลื่นที่สมบูรณ์ชัดเจนมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้การอ่านค่าของสัญญาณมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะใช้สัญญาณที่ออกจากวงจร comparator with hysteresis เข้าไปประมวลผลต่อยัง Arduino



รูปที่ 3.12 การต่อวงจร Basic Comparator เข้ากับวงจร comparator with negative feedback

3.1.2 Load cell

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงกดหรือแรงดึง นิยมใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงานที่ทำงานโดยอาศัย แรงกด (Compression), แรงดึง (Tension) และแรงเฉือน (Shear) โดยหลักการทำงานของมันคือ เมื่อมีแรงกดหรือแรงดึงมากระทำต่อตัวมัน จะทำให้ความต้านทานของสเตรนเกจที่อยู่ภายในโหลดเซลล์มีการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานนี้สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงได้โดยใช้วงจรรีดิค ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งในที่นี้หน้าที่ของมันเมื่ออยู่ในเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งก็คือ การรับสัญญาณที่เกิดจากแรงกระทำของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งที่กดลงไปบนโหลดเซลล์ ระหว่างการทดสอบ ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นมาคำนวณหาค่าแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์ที่ทำการทดสอบต่อไปได้ โดยโหลดเซลล์ที่ใช้กับเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งชนิด Eddy current ที่ทำการศึกษานั้นจะใช้ยี่ห้อ Kelba - KA 250 แสดงดังรูปที่ 3.13

คุณสมบัติ [29]

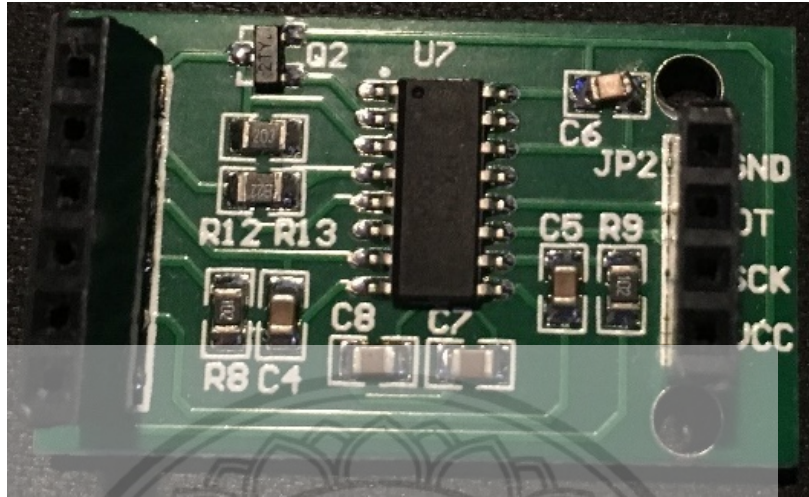
1. รองรับแรงกดและแรงดึงได้สูงสุด 250 กิโลกรัม
 2. แรงดันไฟฟ้าที่สามารถรองรับได้ 10-15 โวลต์ กระแสตรงและกระแสสลับ
 3. แรงดันของสัญญาณไฟฟ้าขาออก 2.2 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์
- รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.13 โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ Kelba - KA 250

3.1.2.1 การนำสัญญาณจากโหลดเซลล์ไปใช้ จะต้องใช้วงจรรขยายแอมพลิฟิเจอร์ (HX711 Amplifier Module) ดังรูปที่ 3.14 เข้ามาช่วย เนื่องจากสัญญาณที่ออกมาจากโหลดเซลล์โดยตรงนั้นมีสัญญาณทางไฟฟ้าที่ต่ำมากที่จะสามารถตรวจวัดได้ ซึ่งตัววงจรรขยายสัญญาณนั้นสามารถรองรับสัญญาณไฟฟ้าที่มีค่าต่ำกว่า 10 มิลลิแอมป์ได้ และจะทำการเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้กลายเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบอนุกรม (Serial interface) [20] และส่งสัญญาณไปยัง Arduino Board เพื่อทำการประมวลผลต่อไป

หมายเหตุ วิธีส่งข้อมูลระหว่าง HX711 กับวงจรควบคุม Arduino จะใช้ช่องสัญญาณอนาล็อกของ Arduino เป็นช่องรับสัญญาณจากนั้นในฐานข้อมูลของฟังก์ชัน HX711 ได้มีการแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (ADC=Analog to Digital Converter)

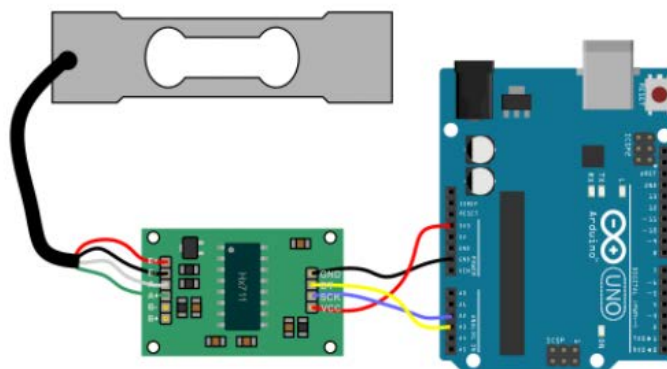


รูปที่ 3.14 วงจรขยายแอมพลิฟิเจอร์ (HX711 Amplifier Module)

3.1.2.2 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์เบื้องต้น ใช้อุปกรณ์ในการทดสอบดังนี้

- ก. โหลดเซลล์ (Load cell)
- ข. วงจรขยายแอมพลิฟิเจอร์ (HX711 Amplifier Module)
- ค. Arduino Board
- ง. คอมพิวเตอร์แบบพกพา
- จ. ลูกตุ้มเหล็กขนาด 1 กิโลกรัม

ในการทดสอบการทำงานของโหลดเซลล์นั้นจะทดสอบโดยการนำโหลดเซลล์ต่อเข้ากับวงจรขยายแอมพลิฟิเจอร์ (HX711 Amplifier Module) และต่อไปยัง Arduino Board ดังรูปที่ 3.1 เพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.15 บอร์ดและวงจรขยายสัญญาณโหลดเซลล์ (Load cell) [21]

จากนั้นเปิดโปรแกรมสอบเทียบโหลดเซลล์อัตโนมัติขึ้นมาและทำการแก้ไข โดยการใส่ค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่เราทราบลงในโปรแกรมโดยในที่นี้จะใช้ลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัม และทำการอัปเดตโค้ดลงบน Arduino Board [21] ดังรูปที่ 3.16

```
#include "HX711.h"
#include <Wire.h>

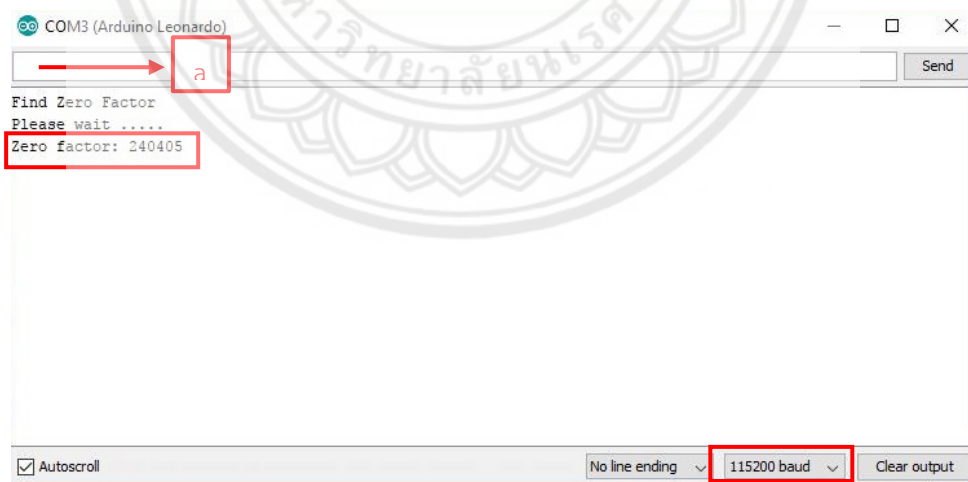
#define DOUT A3
#define CLK A2

#define DEC_POINT 2
#define STABLE 1

float offset=0;
float calibration_factor = 1;
float real weight = 1;//kg
```

รูปที่ 3.16 ทำการแก้ไขโปรแกรมสอบเทียบโหลดเซลล์อัตโนมัติ

เมื่อทำการอัปเดตโค้ดเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการเปิด หน้าต่าง Serial Monitor ขึ้นมา และตั้งค่า Baud rate เป็น 115200 และส่งค่า a ลงไปเพื่อหาค่า Zero Factor โปรแกรมจะทำการคำนวณสักครู่และให้ทำการจดบันทึกค่า Zero Factor ไว้ใช้งาน (ในที่นี้คือ 240405) [21] ดังรูปที่ 3.17

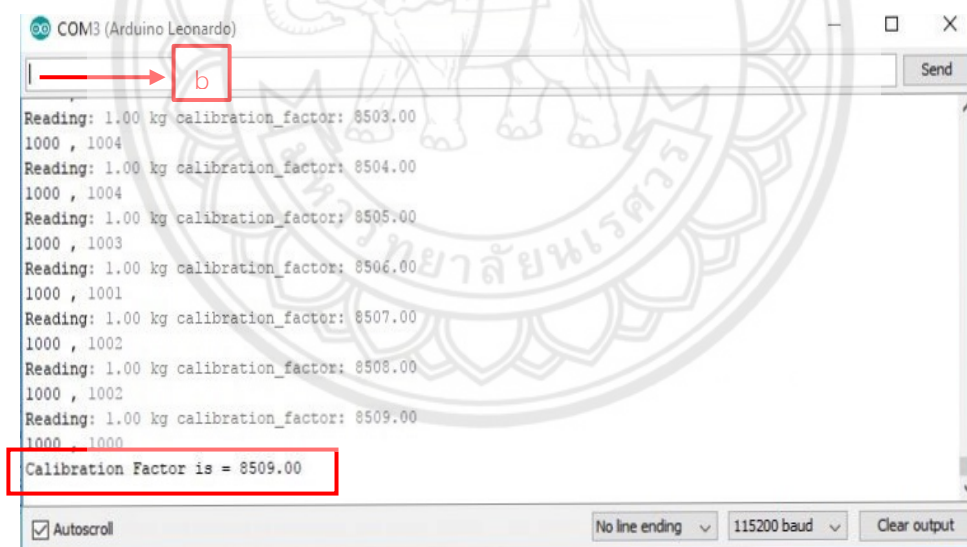


รูปที่ 3.17 การหาค่า Zero Factor

เมื่อได้ค่า Zero Factor แล้วให้ทำการวางลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัม ลงบนโหลดเซลล์ดังรูปที่ 3.18 จากนั้นส่งค่า b ลงไปเพื่อหาค่า Calibration Factor เมื่อโปรแกรมทำการสอบเทียบเสร็จเรียบร้อยแล้วให้ทำการจดบันทึกค่า Calibration Factor ไว้ใช้งาน (ในที่นี้คือ 8509) ดังรูปที่ 3.19

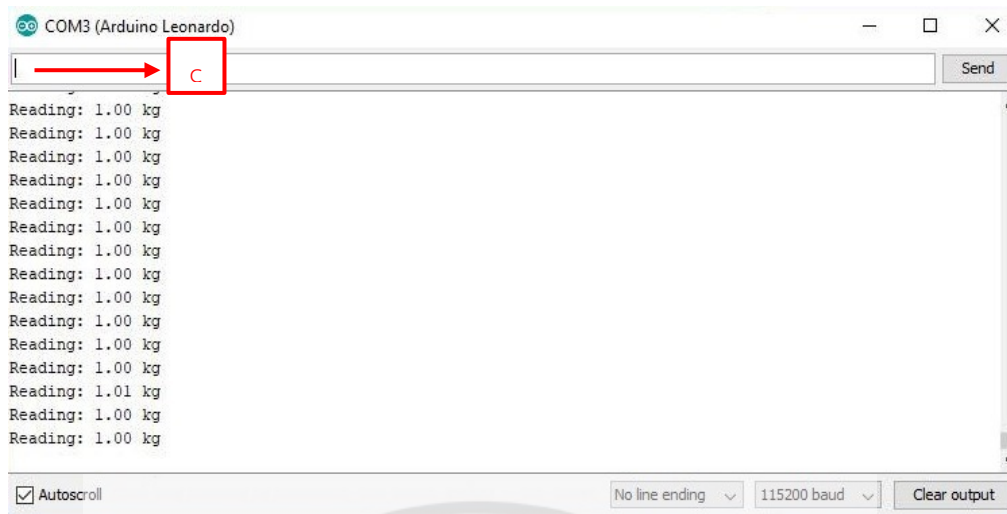


รูปที่ 3.18 ลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัมที่ใช้สำหรับการสอบเทียบโหลดเซลล์



รูปที่ 3.19 การหาค่า Calibration Factor

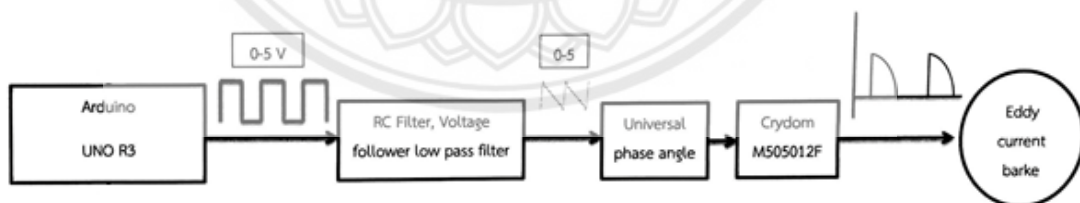
3.1.2.3 ผลที่ได้จากการทดสอบ จะเป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังจากทำการจดบันทึกค่า Zero Factor และ Calibration Factor เรียบร้อยแล้ว ซึ่งค่าที่ได้จะสามารถนำไปใช้ได้ภายหลังจากโดยไม่ต้องทำการสอบเทียบซ้ำ ซึ่งสามารถทดสอบความแม่นยำของโหลดเซลล์ได้โดยการส่งค่า c ลงไปเพื่อทดลองอ่านค่าน้ำหนักที่โหลดเซลล์สามารถตรวจวัดได้ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ผลจากการทดสอบการรับค่าของโหลดเซลล์ด้วยลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัม

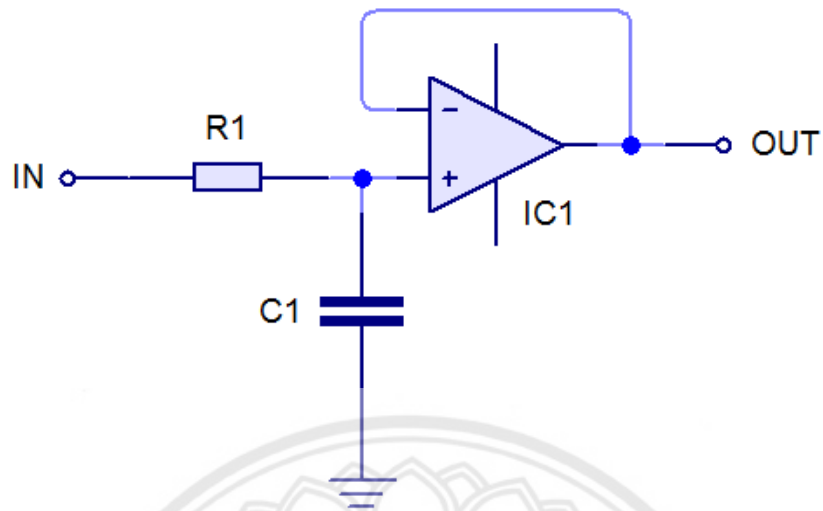
3.1.3 การควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์

จากรูปที่ 3.21 การควบคุมการทำงาน Eddy current เริ่มจาก Arduino ส่งออก PWM ไปยังวงจร RC Filter ชนิด Low pass filter ดังรูปที่ 3.22 วงจรนี้จะทำหน้าที่เหมือนกับวงจร integrator ซึ่งให้ผลลัพธ์ของลักษณะสัญญาณเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมเหมือนกัน แต่สิ่งที่ต่างกันคือ วงจร low pass filter สามารถจำกัดความถี่ที่ส่งเข้ามายังวงจรได้ดังรูปที่ 3.23 แต่วงจร integrator ไม่สามารถควบคุมหรือจำกัดความถี่ของสัญญาณที่เข้ามายังวงจรได้ จากนั้นสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบสามเหลี่ยมจะถูกนำไปใช้ควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 12 V ภายในอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Universal phase angle ซึ่งมีการใช้งานแบบ Half wave ดังรูปที่ 3.24

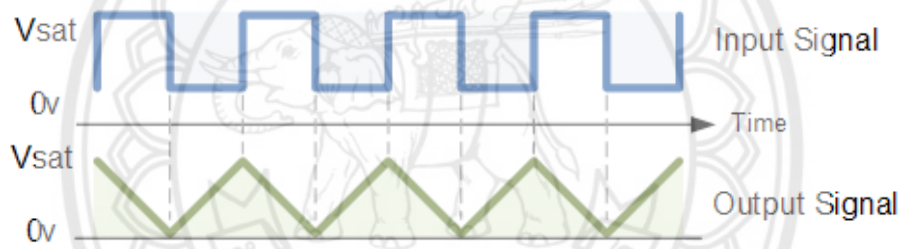


รูปที่ 3.21 ระบบการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์

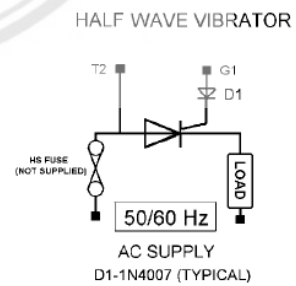
[โครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่1]



รูปที่ 3.22 วงจร Low pass Filter

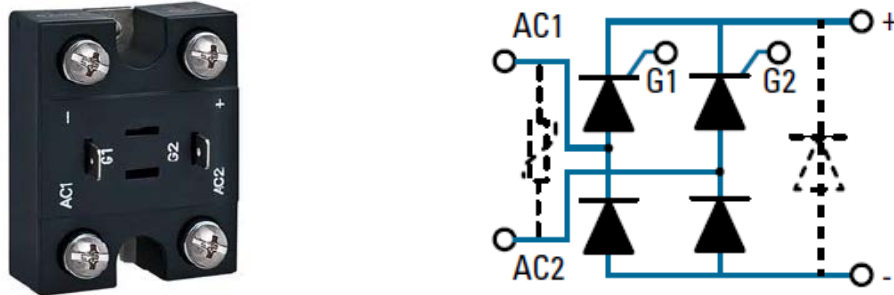


รูปที่ 3.23 รูปแบบของสัญญาณเมื่อผ่านวงจร Low pass Filter



รูปที่ 3.24 Phase angle และวงจรภายในที่ถูกใช้ร่วมกับ Crydom M505012F [31]

สัญญาณที่ออกจาก Universal phase angle จะมีลักษณะลูกคลื่นฝั่งบวกฝั่งเดียว จากนั้นจะนำแรงดันต่ำ 12 V ไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าขนาด 220 V ภายในอุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Crydom M505012F ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 Crydom M505012F และวงจรภายใน Crydom M505012F [32]

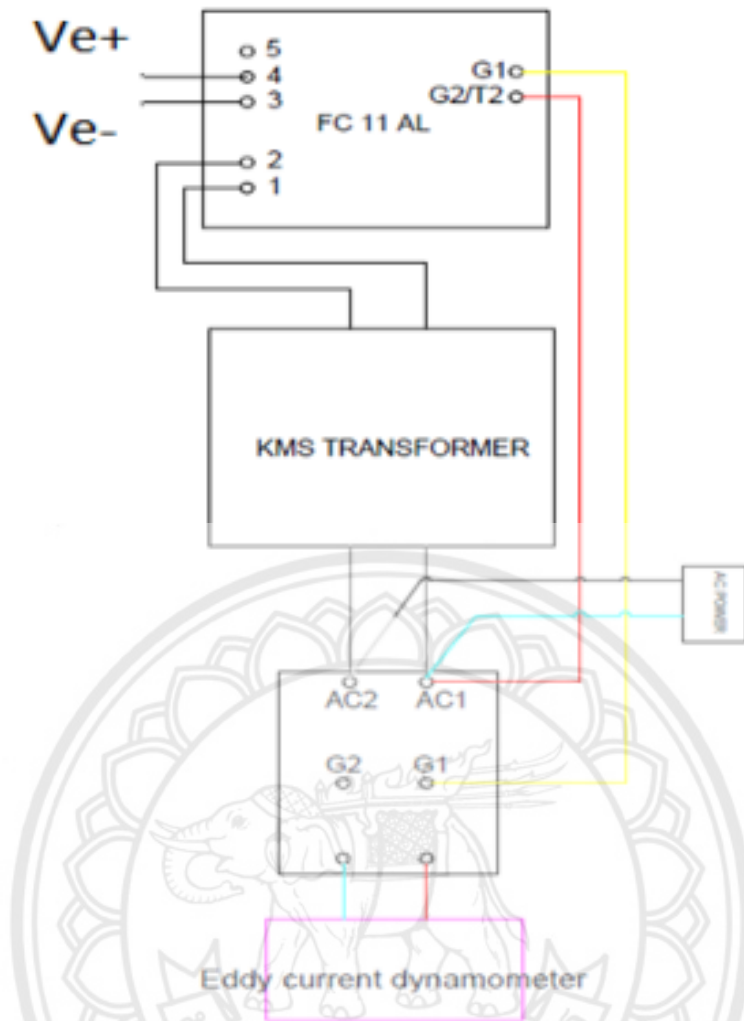
จากนั้นลักษณะของสัญญาณที่ออกจาก Crydom M505012F จะมีรูปร่างเหมือนกับรูปแบบของสัญญาณที่มาจาก Universal phase angle คือจะมีแรงดันไฟฟ้าฝั่งบวกเพียงฝั่งเดียวที่ขนาดแรงดัน 220 V ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 การทำงานของวงจรแบบ Half wave vibrator

หมายเหตุ การต่อวงจรอ้างอิงจาก โครงการงานการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง

ระยะที่ 1



รูปที่ 3.27 การต่ออุปกรณ์ในส่วนของการควบคุมการสร้างโหลดให้กับไดนาโมมิเตอร์

3.1.4 สรุปการควบคุมการทำงานของ Eddy current brake

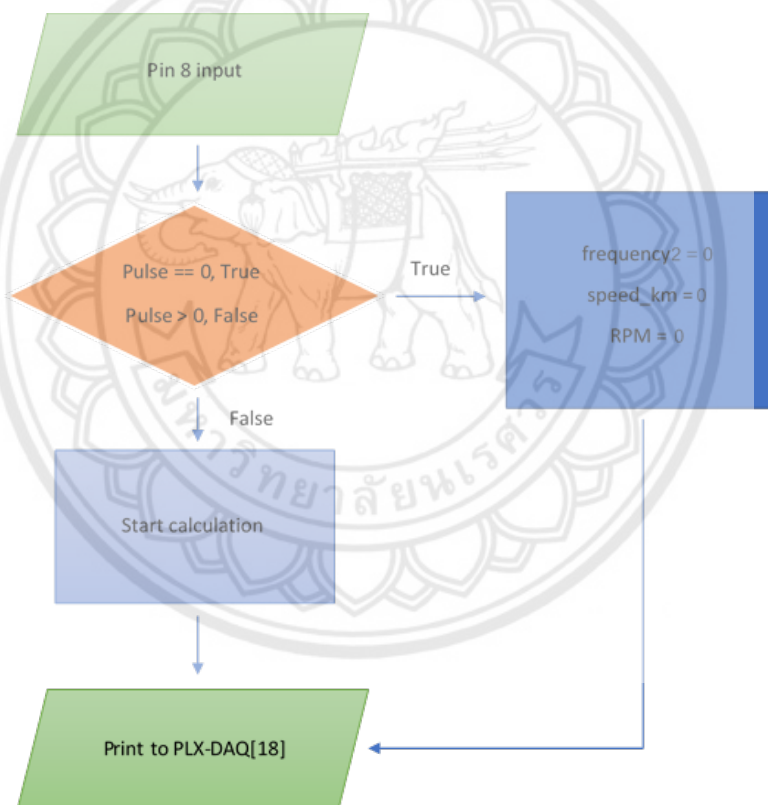
จากรูปที่ 3.27 กระแสไฟฟ้าหลักที่ใช้ควบคุม Eddy current brake เป็นกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสสลับและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ควบคุม Eddy current brake เป็นวงจรควบคุม Arduino ซึ่งมีแรงดันส่งออกอยู่ที่ 5 V กระแสตรง ซึ่งไม่สามารถนำไปควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้กระแสไฟฟ้าแรงดันสูง 220 V ได้โดยตรง จึงใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Universal phase angle และ Crydom M505012F ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองทำหน้าที่เป็นไทรสเตอร์ โดยสัญญาณที่นำมาควบคุมขาเกต (Gate) ของไทรสเตอร์ คือสัญญาณ PWM ที่มาจาก Arduino ที่ผ่านการกรองสัญญาณจากวงจร RC Filter ชนิด Low pass Filter มาแล้ว ดังนั้นความสามารถในการต้านการหมุนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสัญญาณ PWM ที่ส่งออกมาจาก Arduino

3.2 การเขียนโปรแกรมการรับค่าและคำนวณสำหรับ Arduino Board

ในส่วนของการเขียนโปรแกรมการรับค่าและการคำนวณค่าที่ได้รับมาจากตัวเซนเซอร์จะมีโปรแกรมอยู่ 2 โปรแกรม คือ

3.2.1 โปรแกรมของ Magnetic pickup sensor

โปรแกรมการอ่านข้อมูล Magnetic pickup sensor เป็นโปรแกรมการอ่านข้อมูลชนิด Digital โดยใช้ฟังก์ชัน Pulse In [17] เป็นฟังก์ชันการอ่านสัญญาณที่เซนเซอร์ได้ทำการส่งมา โดย Pulse In [17] จะอ่านสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบ Pulse ที่ส่งเข้ามายัง Arduino Board ซึ่งสัญญาณที่เข้ามาจะอยู่ในรูปแบบของคาบเวลา หลังจากนั้นจะใช้สมการที่ 2.5, 2.6 และ 2.7 ในการคำนวณและทำการแปลงค่าเป็นความถี่และนำค่าความถี่ที่ได้ไปคำนวณเป็นความเร็วของลูกกอล์ฟและนำมาเขียนโปรแกรม ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 Flowchart การทำงานของโปรแกรม Magnetic pickup sensor

3.2.1.1 ประกาศตัวแปรและช่องสัญญาณที่ใช้

```
int pin = 8; //ประกาศ PIN8 รับสัญญาณเข้าของ magnetic sensor
```

```
float durationH; //ประกาศตัวแปรคาบเวลาช่วง HIGH
```

```

float durationL; //ประกาศตัวแปรคาบเวลาช่วง LOW
float pulseTotal; //ประกาศตัวแปรคาบเวลาของ pulse ทั้งหมด
float frequency; //ประกาศตัวแปรความถี่ที่เซนเซอร์สามารถอ่านได้
float frequency2; //ประกาศตัวแปรความถี่ที่ลูกกลิ้งหมุน รอบต่อวินาที
float R=0.10828025; //รัศมีของลูกกลิ้งหน่วยเมตร
float pi=3.142857142857143; //pi=3.14
float velocity; //ประกาศตัวแปรความเร็วของลูกกลิ้ง (m/s)
float RPM; //ประกาศตัวแปรความเร็วรอบของลูกกลิ้ง (รอบต่อนาที)
float speed_k; //ประกาศตัวแปรความเร็วของลูกกลิ้ง (m/s)

```

3.2.1.2 การตั้งค่าตามจุดประสงค์ของฟังก์ชันที่ต้องการทำงาน

```

void setup()
{
  pinMode(pin, INPUT);
  Serial.begin(19200); // opens serial port, sets data rate to 19200 bps
  //ส่วนที่ส่งข้อมูลและติดต่อกับเครื่องมือ PLX-DAQ[18] เพื่อทำการบันทึกข้อมูลไปยัง
  โปรแกรม Microsoft Excel
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,frequency2,speed_k,RPM");
}

```

3.2.1.3 คำสั่งการทำงานซ้ำของชุดข้อมูลของระบบ

```

void loop()
{
  Serial.print( " DATA,TIME," ); Serial.print( frequency2 ); Serial.print( " ," );
  Serial.print(speed_k); Serial.print(","); Serial.println(RPM);
  frequency2++;
  speed_k++;
  RPM++;
  durationH = pulseIn(pin,HIGH); // อ่านคาบของสัญญาณ pulse ช่วง high

```

```

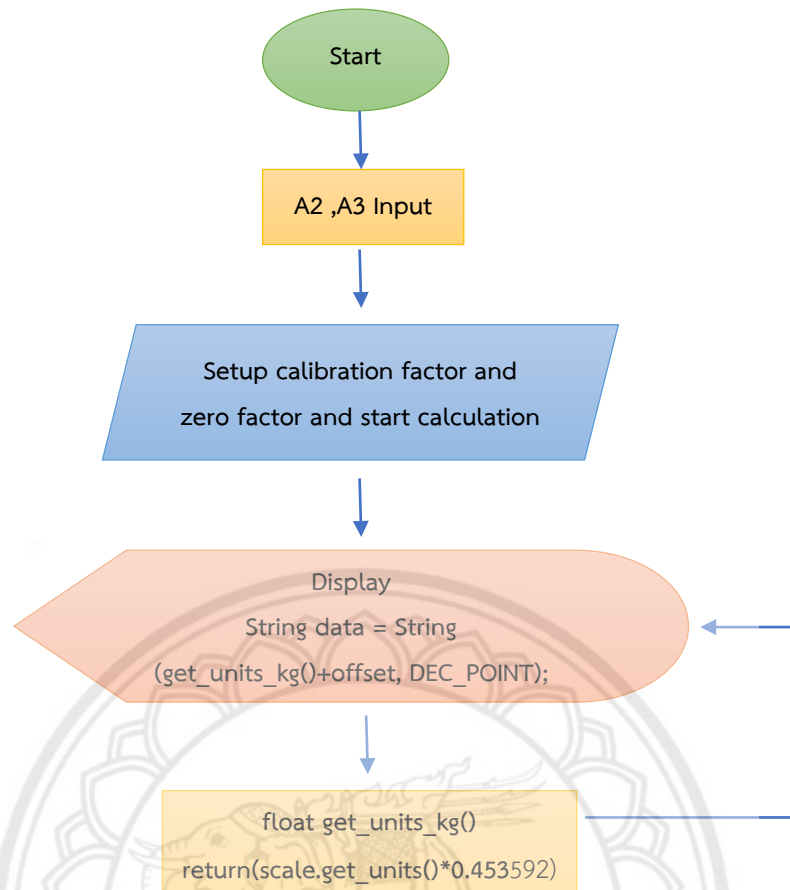
durationL = pulseIn(pin,LOW); // อ่านคาบของสัญญาณ pulse ช่วง low
if (durationH,durationL == 0) //ถ้าไม่มีสัญญาณจาก input พารามิเตอร์ทุกตัวจะมีค่า
เป็น 0
{
frequency2 = 0 ;
speed_km = 0 ;
RPM = 0 ;
delay(200);
}
else //ถ้ามีสัญญาณเข้ามาโปรแกรมจะเข้าสู่การคำนวณ
{
pulseTotal=durationH+durationL;
frequency = 1000000 / pulseTotal; // Frequency in Hertz (Hz) f=1000000/T.
frequency2=frequency/96; //ลูกกลิ้งหมุนครบ 1 รอบมีทั้งหมด 96 ฟัน
velocity=2*pi*R*frequency2; //calculate velocity(m/s).
speed_km=velocity*3.6;
RPM=frequency2*60;
//Serial.print("RPM= ");
//Serial.println(RPM);
delay(200);
}
}

```

3.2.2 โปรแกรมการรับค่าของโหนดเซลล์

ในส่วนของโปรแกรมการรับค่าที่มาจากโหนดเซลล์ เป็นโปรแกรมที่รับข้อมูลชนิดอนาล็อก (Analog) ซึ่งเมื่อข้อมูลผ่านการประมวลผลออกมาจะได้ข้อมูลออกมาอยู่ในหน่วยกิโลกรัม ดังรูปที่

3.29



รูปที่ 3.29 Flowchart การทำงานของโปรแกรมโหลดเซลล์ (Load cell)

```

#include "HX711.h"
String data;
float calibration_factor =8509; //ตัวเลขคือค่าที่ได้จากโปรแกรม Calibrate โหลดเซลล์
อัตรโนมัติ [ภาคผนวก จ]
#define zero_factor 240405 //ตัวเลขคือค่าที่ได้จากโปรแกรม Calibrate โหลดเซลล์
อัตรโนมัติ [ภาคผนวก จ]
#define DOUT A3
#define CLK A2
#define DEC_POINT 2
float offset=0;
float get_units_kg();
HX711 scale(DOUT, CLK);
  
```

```

void setup()
{
  Serial.begin(19200);
  Serial.println("Load Cell");
  scale.set_scale(calibration_factor);
  scale.set_offset(zero_factor);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,data");
}

void loop()
{
  String data = String (get_units_kg()+offset, DEC_POINT);
  Serial.print("DATA,TIME,"); Serial.println(data.toFloat());
  delay(500);
}

float get_units_kg()
{
  return(scale.get_units()*0.453592); }

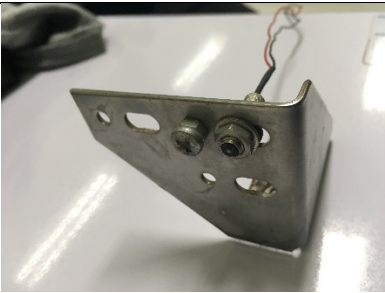




```


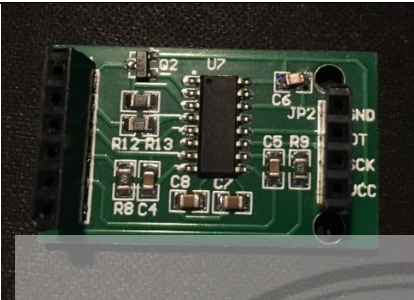
หมายเหตุ เครื่องมือที่ถูกนำมาเข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูลลงไปยัง Microsoft Excel คือ โปรแกรม PLX-DAQ* ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ฟรี โดยใช้โค้ดการแสดงผล Serial.print ใน Arduino ide เป็นเงื่อนไขในการบันทึกข้อมูล

3.3 การออกแบบการทดสอบการทำงานและรับค่าของเซนเซอร์

ขั้นตอนการทดสอบเซนเซอร์ได้ทำการแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วน ในส่วนแรกจะทำการทดสอบการอ่านค่าของโปรแกรม (software) และ Magnetic pickup sensor (hardware) โดยจะทำการหมุนลูกกลิ้งและหลังจากนั้นทำการเก็บข้อมูล ในส่วนที่สองจะเป็นการเก็บข้อมูลในส่วนของ โหลดเซลล์ (Load cell) จะทำการทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักทดสอบการทำงานของตัว load cell (hardware) และบันทึกการอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบของโหลดเซลล์ (software) โดยมีรายละเอียดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเซนเซอร์

	<p>1. Magnetic pickup sensor</p>
	<p>2. โหลดเซลล์ (Load cell)</p>
	<p>3. รถจักรยานยนต์นำมาสร้างการหมุนของลูกกลิ้ง</p>
	<p>4. คอมพิวเตอร์แบบพกพา</p>
	<p>5. ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม และ 2 กิโลกรัม</p>

	<p>6. วงจร comparator with hysteresis</p>
	<p>7. วงจรขยายแอมพลิฟิแคเตอร์ (HX711 Amplifier Module)</p>

3.3.1 วิธีการทดสอบการทำงานและรับค่าของเซนเซอร์

วิธีการทดสอบการทำงานและรับค่าของเซนเซอร์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

3.3.1.1 Magnetic pickup sensor โดยขั้นตอนแรกของการทดลองเริ่มจากการต่อวงจร comparator with hysteresis เข้ากับตัวเซนเซอร์ จากนั้นเตรียมรถจักรยานยนต์เพื่อใช้หมุนลูกกลิ้ง หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการเก็บข้อมูลที่ตัวเซนเซอร์สามารถอ่านค่าออกมาได้โดยทำการเปิดโปรแกรมสำหรับ Arduino Board ที่มีชื่อไฟล์ ProgramDynotest_V.1.1.2 เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูลที่ Magnetic pickup sensor ส่งออกมาและผ่านการประมวลผลด้วย Arduino Board

โดยเงื่อนไขในการทดสอบคือ จะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้งโดยจะวัดความเร็วที่ Magnetic pickup sensor ที่อ่านค่าได้เทียบกับความเร็วที่ GPS ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลที่ความเร็วเดียวกันคือ 20, 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยทั้งสองจะถูกเปรียบเทียบกับความเร็วไมล์ของรถจักรยานยนต์

โดยที่มาของความเร็วตามระบบ GPS นั้นผู้จัดทำได้ใช้โทรศัพท์มือถือเป็นเครื่องตรวจวัดโดยการดาวน์โหลดแอปพลิเคชันที่มีชื่อว่า “GPS เครื่องวัดความเร็ว [22]” ดังรูปที่ 3.30 และใช้โทรศัพท์มือถือยี่ห้อ Apple รุ่น iPhone se [23] เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วตามระบบ GPS



รูปที่ 3.30 แอปพลิเคชันที่ใช้เป็นเครื่องมือวัด GPS

3.3.1.2 โหลดเซลล์ (Load cell) เมื่อสั่งให้โปรแกรมสอบเทียบโหลดเซลล์อัตโนมัติ [21] เริ่มทำงานเรียบร้อยแล้ว เราจะได้ค่า Zero Factor และ Calibration Factor ซึ่งเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้กับโปรแกรมสำหรับการวัดแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์ในหน่วยกิโลกรัมได้โดยไม่ต้องสอบเทียบซ้ำ

โดยการทดลองจะเริ่มจากการสั่งการโปรแกรมสำหรับการวัดแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์ให้เริ่มทำงาน จากนั้นจะทดสอบความแม่นยำของโปรแกรมโดยการใส่มวลที่ทราบค่าลงไปบนเซนเซอร์ ในที่นี้จะเลือกใช้ลูกตุ้มเหล็กขนาด 1 กิโลกรัม ใส่ลงไปบนตัวโหลดเซลล์แล้วปล่อยให้โปรแกรมประมวลผลเพื่อตรวจสอบน้ำหนักที่วัดได้ จากนั้นเพิ่มมวลขึ้นอีกโดยการใส่ลูกตุ้มขนาด 2 กิโลกรัม ลงไปและเอามวลขนาด 2 กิโลกรัม และ 1 กิโลกรัมออกตามลำดับ จนไม่มีมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์ จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีก 1 ครั้งและบันทึกผล

3.3.2 วิธีการที่ใช้เก็บข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลจากโปรแกรม

การเก็บข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลผ่านโปรแกรมที่มีชื่อว่า PLX-DAQ เป็นโปรแกรมฟรีที่สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรม Arduino ide และ Microsoft Excel ได้ ซึ่งโปรแกรมนี้อจะเป็นโปรแกรมที่สามารถใช้บันทึกข้อมูลหรือตัวแปรใดก็ได้ ที่ผ่านการประมวลผลจากโปรแกรม Arduino ide โดยรูปแบบในการเก็บข้อมูลจะเก็บในรูปแบบของไฟล์ .xlsx ซึ่งเป็นไฟล์ของโปรแกรม Microsoft Excel โดยการใช้งานโปรแกรม PLX-DAQ* ร่วมกับโปรแกรม Microsoft Excel ได้มีขั้นตอนดังนี้

3.3.2.1 ทำการตรวจสอบ data rate ของโปรแกรมที่กำลังทำงานให้ตรงกัน โดยทำการแก้ไขในส่วนของโปรแกรมและในส่วนของ Serial Monitor แสดงดังรูปที่ 3.31

```

ProgramDynamotest_V.1.1.2 | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help

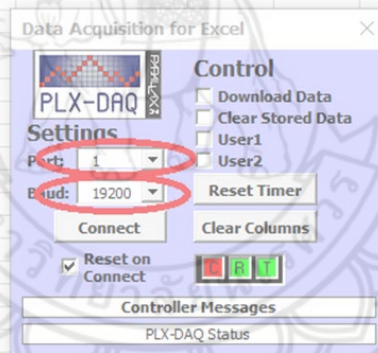
ProgramDynamotest_V.1.1.2
int pin = 8; //ประกาศ PINS ขึ้นอยู่กับขาของ magnetic sensor
float durationH; //ประกาศค่าเวลามาเวลาช่วง HIGH
float durationL; //ประกาศค่าเวลามาเวลาช่วง LOW
float pulseTotal; //ค่ามาของพัลส์ทั้งหมด
float frequency; //ค่ามาที่เซนเซอร์สามารถอ่านได้
float frequency2; //ค่ามาที่ลูกกลิ้งหมุน รอบต่อวินาที
float R=0.10929025; //เส้นรอบวงของลูกกลิ้งหน่วยเมตร
float pi=3.142857142857143; //pi=3.14
float velocity;
float RPM;
float speed_km;

void setup()
{
  pinMode(pin, INPUT);
  Serial.begin(19200); // opens serial port, sets data rate to 19200 bps
  Serial.println("CLEAR DATA");
  Serial.println("LABEL, Time, frequency2, speed_km, RPM");
}

```

รูปที่ 3.31 วิธีการตรวจสอบ data rate ของโปรแกรม

3.3.2.2 ทำการเปิดโปรแกรม PLX-DAQ* ขึ้นมา จากนั้นตรวจสอบช่อง Port ให้หมายเลขของพอร์ทที่ Arduino board เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และ Baud เลือกให้ตรงกับ data rate ที่ตั้งค่าไว้ในโปรแกรม Arduino ide ดังรูปที่ 3.32 เมื่อสั่งการให้โปรแกรมเริ่มทำงานโปรแกรม ข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านการประมวลผล จะถูกบันทึกลงใน Microsoft Excel ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.32 หน้าต่างโปรแกรม PLX-DAQ

Test	Time	Frequency
1	15:23:54	0.01
2	15:23:55	0.02
3	15:23:55	0.01
4	15:23:56	0.01
5	15:23:56	0.01
6	15:23:56	0.01
7	15:23:57	0.02
8	15:23:57	0.01
9	15:23:58	0.01
10	15:23:58	0.01
11	15:23:59	0.02
12	15:23:59	0.02
13	15:24:00	0.01
14	15:24:00	0.90

รูปที่ 3.33 ตัวอย่างข้อมูลที่ถูกรบันทึกลงใน Microsoft Excel ผ่านโปรแกรม PLX-DAQ

* สามารถดาวน์โหลดโปรแกรม PLX-DAQ ได้ที่ <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การทดสอบเซนเซอร์ที่ใช้งานร่วมกับไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy current จะมีเซนเซอร์ที่ใช้ในการรับข้อมูลอยู่ 2 เซนเซอร์ คือ Magnetic pickup sensor และ โหลดเซลล์ (Load cell) โดยจะทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิดว่ายังสามารถใช้งานได้หรือไม่ จึงทำการทดสอบและทดลองเก็บข้อมูลผ่าน Arduino board โดยใช้การเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการทดสอบชื่อว่า ProgramDynotest_V.1.1.2 ในการทดสอบ Magnetic pickup sensor และเขียนโปรแกรมชื่อว่า Dyno_load_cell เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของโหลดเซลล์ (Load cell) ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังรูปที่ 4.1 และมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบ Magnetic pickup sensor

ในโปรแกรมนี้จะใช้หลักการในการอ่านคาบของลูกคลื่นและโปรแกรมจะแสดงผลลัพธ์อยู่ในรูปแบบของความถี่ที่ลูกคลื่นหมุนต่อวินาทีและความเร็วในการหมุนของลูกคลื่น (km/h), ความเร็วรอบของลูกคลื่น (รอบต่อวินาที) และเก็บข้อมูลผ่านโปรแกรม Microsoft excel หลังจากนั้นความเร็วที่อ่านค่าได้จากโปรแกรม ProgramDynotest_V.1.1.2 นำไปเปรียบเทียบกับความเร็วที่ GPS สามารถอ่านค่าได้เพื่อใช้ข้อมูลจาก GPS เป็นตัวอ้างอิงเพื่อดูความคลาดเคลื่อนของข้อมูล



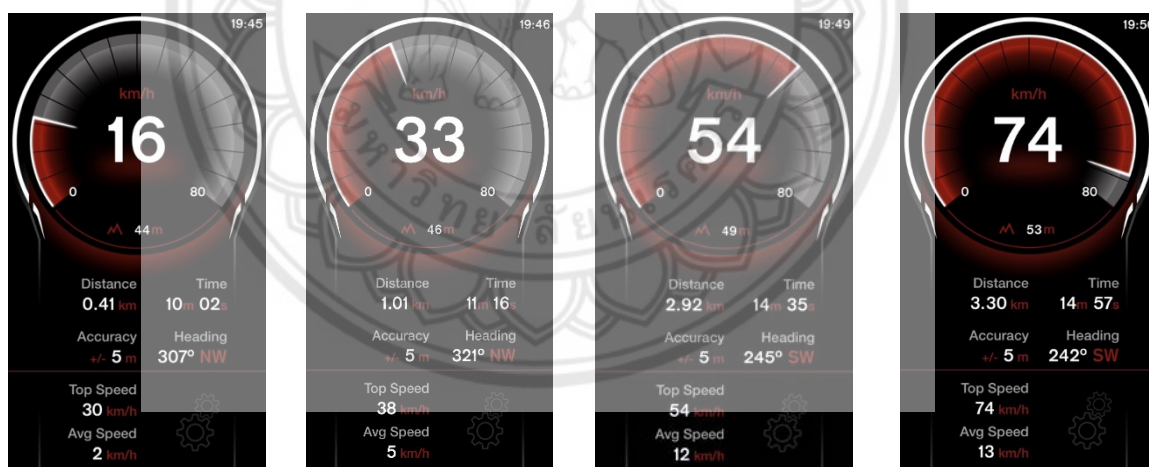
รูปที่ 4.1 การทดสอบการทำงานของ Magnetic pickup sensor

4.1.1 ผลจากการทดสอบการวัดความเร็วของ GPS

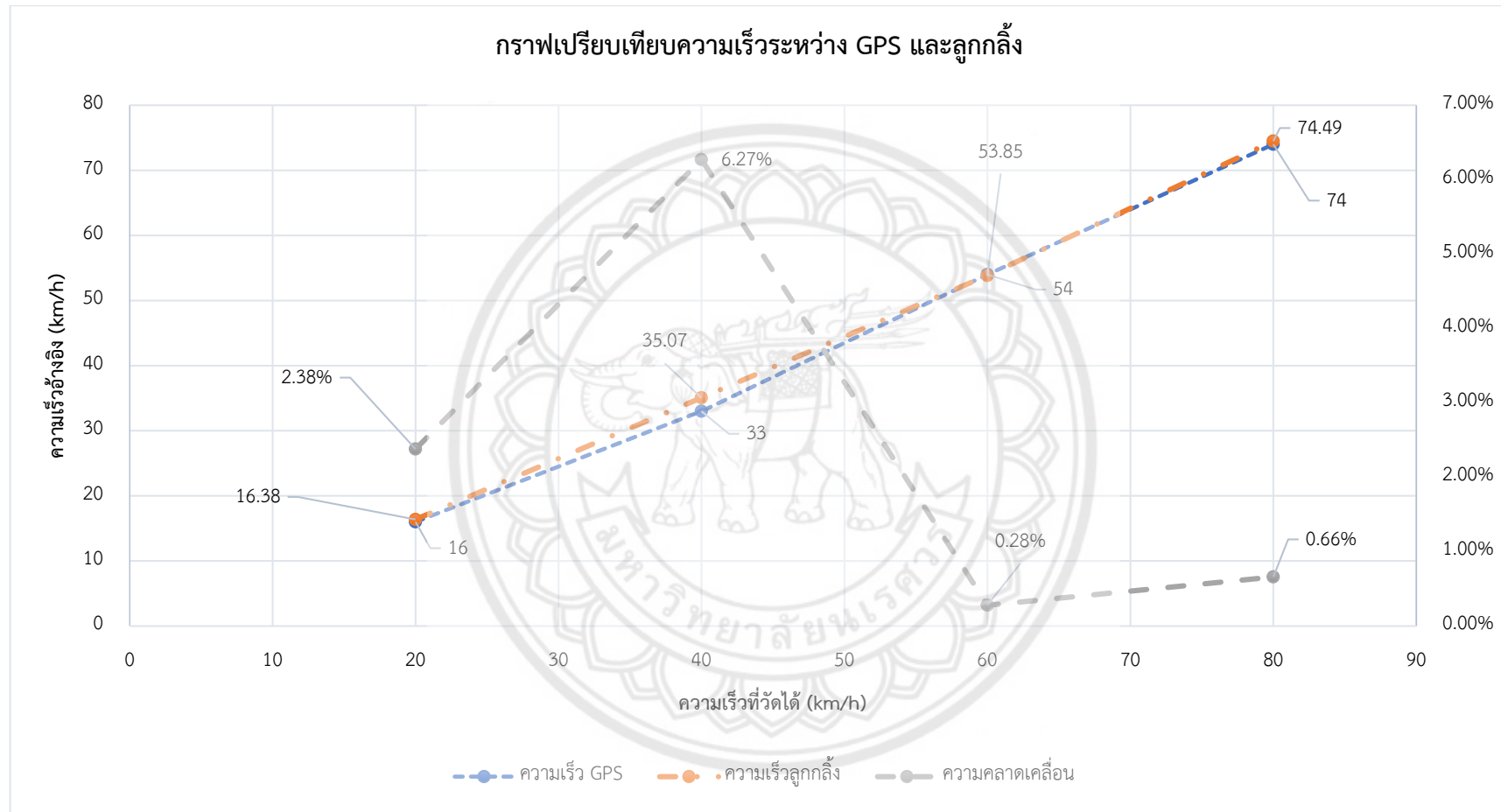
ทำการเก็บข้อมูลขณะที่ความเร็วบนหน้าปัดจักรยานยนต์ 20,40,60,80 เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ลูกกล้องอ่านได้เทียบกับความเร็ว GPS ดังรูปที่ 4.2 ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง เพื่อดูความแตกต่างของข้อมูลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลของความเร็วจากรถจักรยานยนต์ ความเร็วตามระบบ GPS และลูกกล้อง

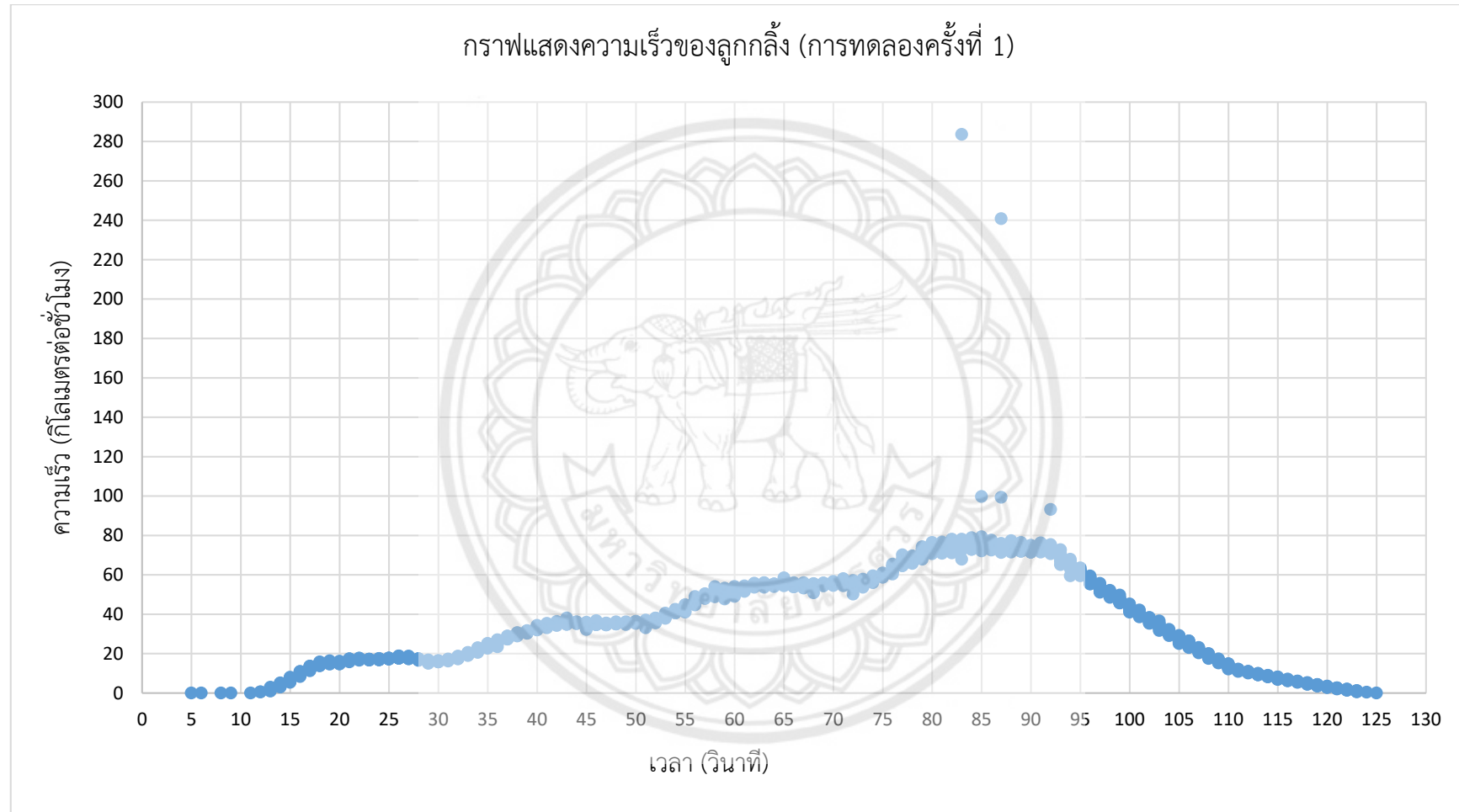
ที่ความเร็ว หน้าปัด รถจักรยานยนต์	ความเร็ว GPS (km/h)	ความเร็วบนลูกกล้อง (km/h)				ความคลาด เคลื่อน (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
20	16	16.6	15.49	17.06	16.38	2.38%
40	33	35	34.17	36.05	35.07	6.27%
60	54	53.28	54.3	53.96	53.85	0.28%
80	74	74.85	74.41	74.2	74.49	0.66%



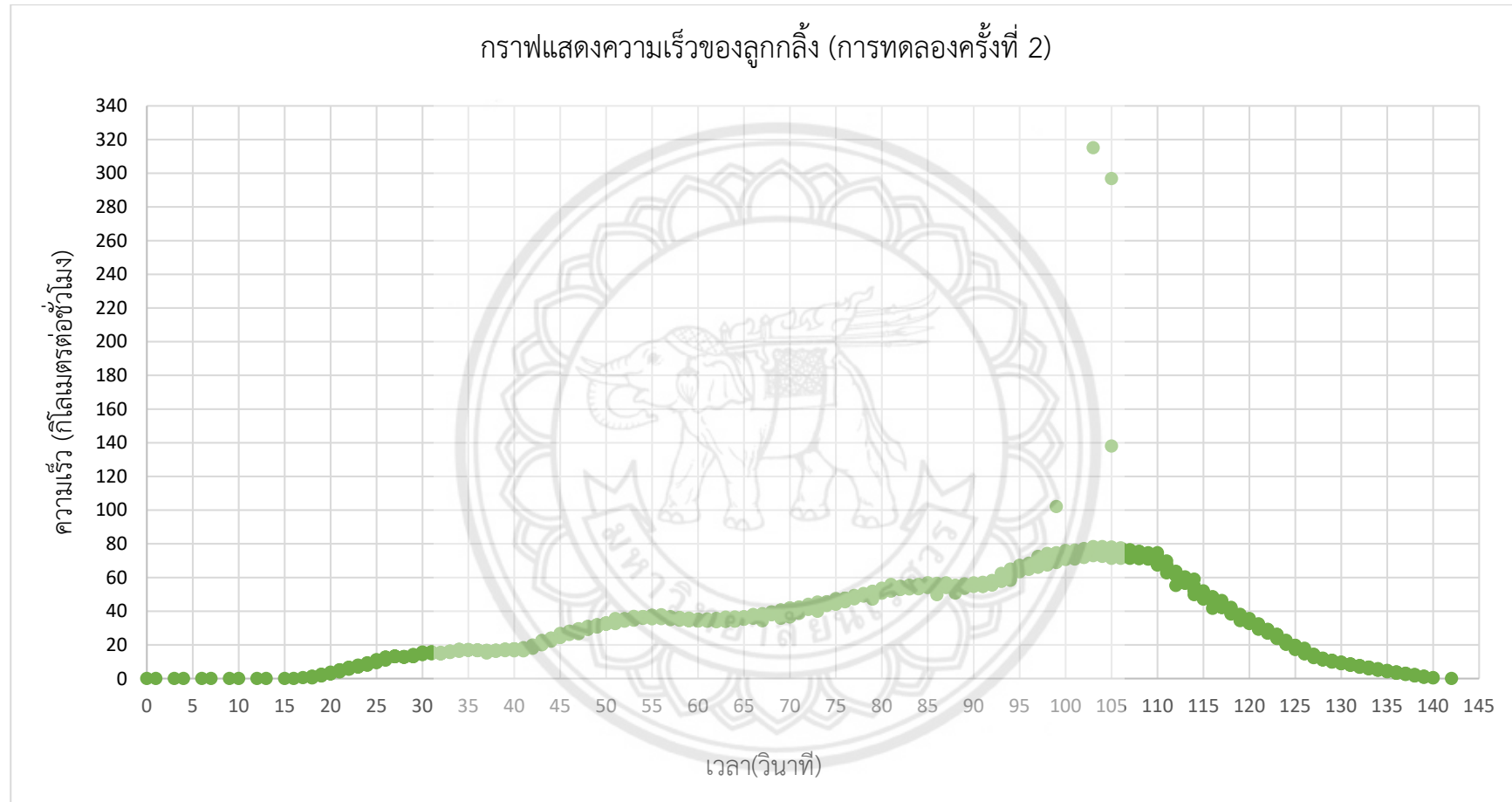
รูปที่ 4.2 ความเร็วที่ระบบ GPS สามารถตรวจวัดได้ขณะทำการทดลอง



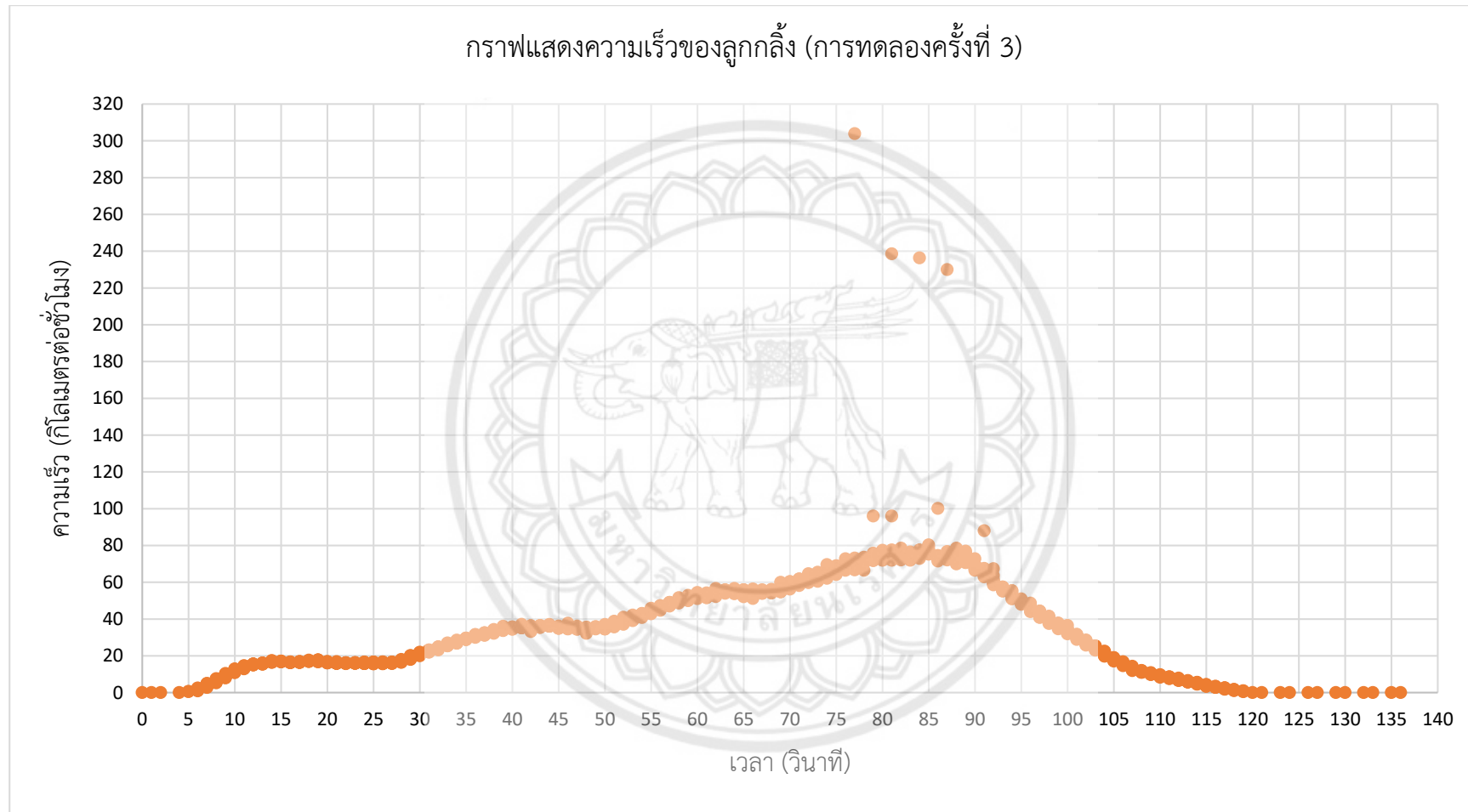
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็ว GPS และ Magnetic pickup sensor ที่อ่านได้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 1)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 2)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาขณะที่ทำการทดสอบ (การทดสอบครั้งที่ 3)

จากรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงผลข้อมูลที่ Magnetic pickup sensor ได้เก็บข้อมูลความเร็วเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับ GPS เพื่อความถูกต้องละเอียดแม่นยำจึงได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง โดยที่แต่ละครั้งได้เริ่มจากความเร็วที่ 0 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นเริ่มเพิ่มความเร็วไปที่ 20,40, 60 และ 80 คงความเร็วไว้ช่วงประมาณ 10 วินาที จากนั้น นำไปหาค่าเฉลี่ยของความเร็วในแต่ละช่วงทั้ง 3 กราฟและนำความเร็ว เฉลี่ยในแต่ละช่วงทั้ง 3 กราฟมาหาค่าเฉลี่ยอีกครั้ง จะได้ความเร็วเฉลี่ยที่ 20,40,60,80 คือ 16.38, 35.07, 53.85, 74.49 ตามลำดับ

หมายเหตุ จุดที่เกิดการรับข้อมูลที่ผิดพลาดคือจุดที่การกระโดดของสัญญาณที่อ่านค่าจะไม่นำมาทำการคำนวณ

4.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลอง Magnetic pickup sensor เป็นการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเร็วของลูกกลิ้งโดยได้ใช้รถจักรยานยนต์เป็นต้นกำลังในการหมุน จากการเก็บข้อมูลทั้งหมด 3 ครั้งที่ความเร็ว 20, 40, 60 และ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าข้อมูลทั้ง 3 ชุดมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันซึ่งสามารถเฉลี่ยข้อมูลที่แต่ละความเร็วได้ที่ 16.38, 35.07, 53.85, 74.49 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ และนำข้อมูลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับความเร็ว GPS ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลมาจากรถจักรยานยนต์ที่ใช้ทำการทดสอบคันเดียวกันจะได้ความต่างของข้อมูลในขณะความเร็วที่ 20, 40, 60, 80 คือ 2.38%, 6.27%, 0.28%, 0.66% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่มาจาก Magnetic pickup sensor และ GPS มีความใกล้เคียงกันมากแต่มีความต่างของข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ 6.27% จากนั้นลดลงตามลำดับ และถ้านำข้อมูลที่ได้จาก Magnetic pickup sensor ทั้ง 3 ชุดมารวมกันจะพบว่ามีข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นที่ความเร็ว 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเป็นต้นไป

4.1.3 สรุปผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จาก Magnetic pickup sensor เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ GPS พบว่ามีความใกล้เคียงกันของข้อมูลเป็นอย่างมากโดยในช่วงของการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบช่วงความเร็ว 4 ช่วง พบว่าช่วงที่มีความต่างของข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ความเร็วประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ความต่างของข้อมูล 6.27% และมีความต่างของข้อมูลโดยรวมอยู่ที่ประมาณ 2.40%

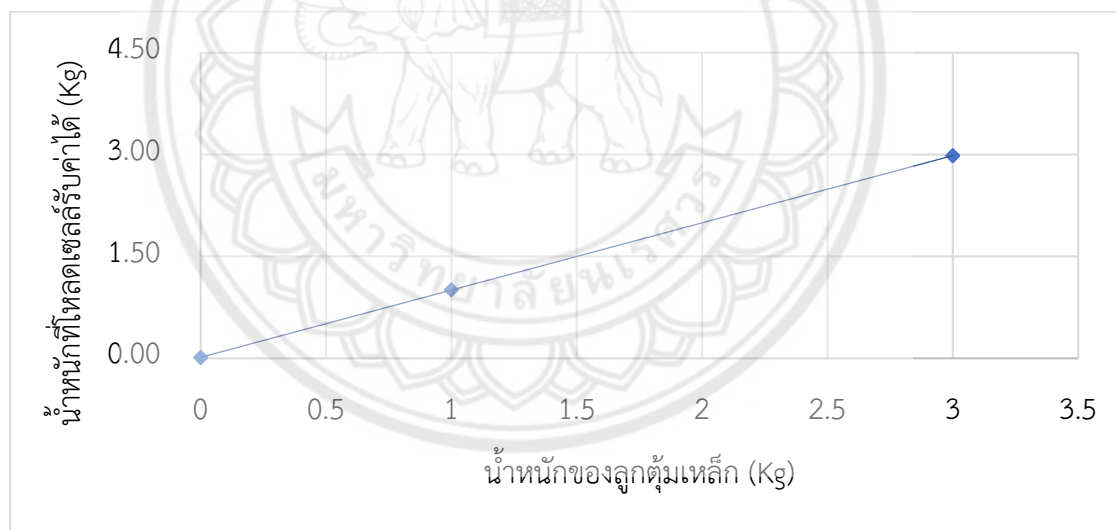
4.1.4 ปัญหาที่พบ

ในการทดสอบ Magnetic pickup sensor ที่ได้ใช้วงจรควบคุม Arduino ที่ใช้รับข้อมูลจากเซนเซอร์พบว่าในช่วงความเร็ว 70 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไปหรือที่ความถี่ของลูกกลิ้งประมาณ

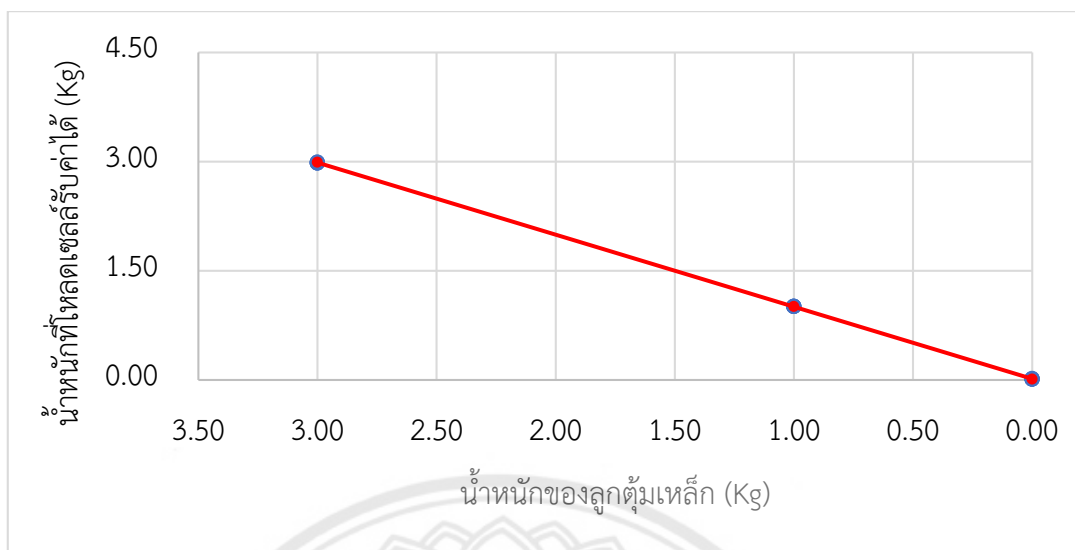
30 รอบต่อวินาที เซนเซอร์ได้ส่งข้อมูลที่ความถี่ประมาณ 2880 Hz ขึ้นไปพบว่ามี Error ในส่วนของการรับค่าเกิดขึ้นซึ่งในการทดสอบ 3 ครั้งมีข้อมูลที่ถูกอ่านทั้งหมด 3328 ครั้ง มีการรับข้อมูลที่ผิดพลาดทั้งหมด 17 ครั้งคิดเป็นอัตราส่วนความผิดพลาดอยู่ที่ 0.0051 หรือที่ 0.51% ที่ความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

4.2 ผลการทดสอบโหลดเซลล์

หลังจากที่ได้ทำการสอบเทียบโปรแกรมที่ใช้สำหรับวัดค่าแรงที่กระทำต่อโหลดเซลล์ได้แล้ว เราจะทดลองเก็บข้อมูลโดยการใช้ลูกตุ้มขนาด 1 กิโลกรัมวางบนโหลดเซลล์ แล้วทำการใส่ลูกตุ้มน้ำหนักขนาด 2 กิโลกรัมเพิ่มเข้าไปอีก แล้วทำการสังเกตการประมวลผลของโปรแกรมโดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกจัดเก็บลงในโปรแกรม Microsoft Excel ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือวิเคราะห์ผลต่อไปได้ ในที่นี้จะนำข้อมูลมาแสดงให้เห็นในรูปแบบของกราฟดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงน้ำหนักเมื่อทำการเพิ่มมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงน้ำหนักเมื่อทำการลดมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักที่โหลดเซลล์สามารถตรวจวัดได้

มวลที่วัดได้ขณะเพิ่มมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์		มวลที่วัดได้ขณะลดมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์	
มวลลูกตุ้มเหล็ก	มวลที่โหลดเซลล์วัดได้	มวลลูกตุ้มเหล็ก	มวลที่โหลดเซลล์วัดได้
1	1.01	3	2.99
3	2.99	1	1.01

4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองการทำงานของโหลดเซลล์และการทำงานของโปรแกรมที่ใช้วัดค่ามวลที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์นั้นพบว่า ค่าที่โหลดเซลล์สามารถตรวจวัดได้นั้นมีความแม่นยำในระดับหนึ่ง เพราะได้ทำการสอบเทียบในช่วงก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงแค่ ± 0.01 กิโลกรัมเท่านั้น ทั้งในช่วงของการเพิ่มมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์และในช่วงลดมวลที่กระทำต่อโหลดเซลล์ ข้อมูลจากการทดลองนี้เป็นเพียงการทดสอบการทำงานของและเก็บข้อมูลของโหลดเซลล์ในเบื้องต้นเท่านั้นว่ายังสามารถใช้งานได้อย่างปกติหรือไม่ ซึ่งจากโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1 ได้มีการนำโหลดเซลล์ไปทำการทดสอบอย่างละเอียดไว้แล้วโดยเครื่อง Universal testing machine เพื่อทำการสอบเทียบหาค่าต่างๆ โดยการกำหนดโหลดที่กระทำต่อโหลดเซลล์ไว้ที่ 0 ถึง 200 กิโลกรัมและจดบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลทั้งหมดจากการทดสอบเดิมแสดงดังภาคผนวก ฉ

4.2.2 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าโหลดเซลล์ (Load cell) เมื่อทำงานร่วมกับ วงจรขยายแอมพลิฟิแคชัน (HX711 Amplifier Module) และ Arduino Board แล้ว ตัวโหลดเซลล์ยังสามารถใช้งานและส่งข้อมูลได้อย่างปกติ แต่วงจรขยายแอมพลิฟิแคชัน (HX711 Amplifier Module) ไม่สามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริงเนื่องจากความถี่ในการส่งข้อมูลมีค่าที่ต่ำเกินไปดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 วงจรชนิดนี้จึงเหมาะกับการทดสอบการทำงานของโหลดเซลล์ในเบื้องต้นที่ไม่ต้องการเก็บข้อมูลด้วยความถี่สูงเท่านั้น

4.2.3 ปัญหาที่พบ

ระหว่างทำการสอบเทียบการรับค่าของโหลดเซลล์ ในช่วงแรกเซนเซอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมากเนื่องจากตัวยึดแกนกลางของโหลดเซลล์ ที่กดลงบนตัวโหลดเซลล์ เกิดสนิมเนื่องจากไม่ได้ใช้งานในระยะเวลาอันยาวนานดังรูปที่ 4.9 ทำให้เมื่อรับน้ำหนักแล้วค่าของน้ำหนักค้างอยู่ถึงแม้จะนำมวลออกจากโหลดเซลล์ แล้วก็ตาม ผู้ทำการทดสอบจึงต้องทำการพ่นน้ำยากัดสนิมเพื่อให้แกนกลางที่ยึดโหลดเซลล์ สามารถเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ แล้วจึงทำการสอบเทียบใหม่ จึงทำให้มีค่าความแม่นยำที่มากขึ้น



รูปที่ 4.9 น็อตยึดบูทอยางที่เกิดสนิมทำให้เคลื่อนตัวได้ไม่อิสระ

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทำงานของไดนาโมมิเตอร์

เนื่องจากไดนาโมมิเตอร์ภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกลมีอายุของเครื่องจักรที่มากและขาดการบำรุงรักษาเป็นระยะเวลาที่ยาวนานจึงเกิด โครงการงานการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1 ขึ้นมา ภายในตัวโครงการในระยะเวลาที่ 1 ได้พบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวงจรการควบคุมหรือชุดควบคุมการทำงานของไดนาโมมิเตอร์มีความเสียหาย ไม่สามารถซ่อมชุดแผงวงจรควบคุมได้ ผู้จัดทำโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1 จึงได้จัดทำชุดควบคุมและวงจรที่ใช้รับคำสั่งค่าด้วย Arduino ซึ่งจากการศึกษาพบว่าชุดควบคุม ในโครงการระยะที่ 1 สร้างขึ้นมาสามารถทำงานได้แต่ยังขาดความแม่นยำ และต่อมาได้เกิดโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 2 ในโครงการได้ทำการทดสอบการทำงานของเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งที่ทางผู้จัดทำในระยะเวลาที่ 1 ได้ทำการปรับปรุงไว้ พบว่าเครื่องมือวัดสามารถทำงานได้แต่ยังคงมีปัญหาคือข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือแรงบิดและแรงม้า ที่ทำการทดสอบมีค่าไม่เป็นไปตามที่ควรจะเป็น ผู้จัดทำโครงการในระยะเวลาที่ 2 ได้ใช้ข้อมูลจากรถที่นำมาทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้ จึงเกิดโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 3 ขึ้นมา ในโครงการนี้ได้มีการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ที่ใช้รับข้อมูลที่ทางผู้จัดทำในระยะเวลาที่ 1 และ 2 ได้ทำการปรับปรุงมาเนื่องจากสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อมูลที่ผิดพลาดหรือไม่ตรงตามที่ควรจะเป็นอาจจะเกิดได้จากหลายปัจจัยเช่น เซนเซอร์เสียหรือโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณมีปัญหา เป็นต้น ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการทดสอบเซนเซอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยเซนเซอร์ที่ใช้รับข้อมูลทั้งหมด 2 ตัวคือ Magnetic pickup sensor และ load cell และในส่วนของ การควบคุมการทำงาน Eddy current ทางผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารประกอบการใช้งานของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรพบว่า

5.1.1 Magnetic pickup sensor

เซนเซอร์ชนิดนี้จะอยู่บริเวณลูกกลิ้งมีหน้าที่วัดการเคลื่อนที่ของลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นเซนเซอร์ทางไฟฟ้าที่มีรูปแบบสัญญาณเป็น Sine wave ทำงานคู่กับวงจร comparator with hysteresis เพื่อแปลงสัญญาณจาก Sine wave ให้เป็น Square wave เพื่อจะสามารถสั่งให้วงจรควบคุม

Arduino สามารถอ่านความถี่ของสัญญาณได้ หลังจากนั้นได้แปลงความถี่เป็นค่าความเร็วเชิงเส้น ในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมงเพื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับความเร็วที่ใช้อ้างอิงจาก GPS เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของข้อมูล พบว่า Magnetic pickup sensor มีความต่างของข้อมูลอยู่ที่ 2.40% และความผิดพลาดของการอ่านค่าอยู่ที่ 0.51% เมื่อเทียบกับ GPS

5.1.2 โหลดเซลล์ (Load cell)

มีการติดตั้งอยู่บริเวณจุดยึดของ Eddy current ทำหน้าที่วัดแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมุน ซึ่งในที่นี้ผู้ทดสอบได้ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ว่ายังสามารถใช้งานได้หรือไม่ โดยได้ทำการทดลองโดยใช้ลูกตุ้มน้ำหนักวางบริเวณจุดยึดซึ่ง load cell ต้องมีการทำงานคู่กับวงจรขยายสัญญาณ load cell จะต้องทำการสอบเทียบก่อนใช้งานทุกครั้งเพื่อความแม่นยำของข้อมูลที่ได้ พบว่าเซนเซอร์ยังสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีโดยที่ข้อมูลดังกล่าวมีความผิดพลาดอยู่ที่ ± 0.01 กิโลกรัม

5.1.3 การควบคุมโหลด

ในส่วนของการควบคุมโหลดของไดนาโมมิเตอร์ชนิด Eddy current ภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกลมหาวิทยาลัยนเรศวรจากโครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง ระยะที่ 1 ได้ใช้วงจร Arduino เป็นวงจรควบคุมที่ใช้สร้างสัญญาณ PWM จากนั้นจะถูกรวมวงจร Low pass filter แปลงลักษณะของสัญญาณจาก PWM ไปเป็นสัญญาณรูปฟันเลื่อยเพื่อใช้งานกับ Phase angle หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบการสั่งการแบบไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อสามารถใช้งานร่วมกับ Eddy current ที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับทำงาน

จากข้อมูลข้างต้นปัญหาการอ่านข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในระยะที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าตัวเซนเซอร์ยังมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีสามารถใช้งานได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดอาจจะเกิดมาจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่ามีปัญหา load cell ที่ใช้ในการทดสอบไม่ได้ทำการสอบเทียบก่อนใช้งานหรือเกิดจากการที่ Arduino มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลไม่เพียงพอต่อจำนวนข้อมูลที่มีจำนวนมาก

5.2 สรุปการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกล

การเริ่มพัฒนาปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งภายในอาคารปฏิบัติการเครื่องกลตั้งแต่ระยะที่ 1-3 สามารถทำให้เครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง มีความสามารถในการอ่านข้อมูลที่มาจากเซนเซอร์ได้มีข้อมูลอ้างอิงเบื้องต้นในการควบคุมการสร้างโหลดให้กับ Eddy current brake ในอนาคตสิ่งที่ยังต้องพัฒนาคือ การคุมโหลดของ Eddy current brake ให้สามารถคุมโหลดได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากในโครงการระยะที่ 3 ได้ทำการทดลองยืนยันแล้วว่าเซนเซอร์สามารถทำงานได้ค่อนข้างที่จะมีประสิทธิภาพ เพื่อจะสามารถหาข้อผิดพลาดในการอ่านค่าที่ผู้จัดทำในระยะที่ 1 และ 2 ได้ประสบปัญหา จากนั้นรวมโปรแกรมที่ใช้ ในโครงการระยะสุดท้าย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตถ้าหากมีการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะถัดไปผู้จัดทำโครงการยังสามารถใช้งานเซนเซอร์เดิมที่มีอยู่ได้ ในส่วนของการควบคุมการทำงานของ Eddy current brake อยากให้มีการทดสอบการทำงานของชุดควบคุม Eddy current brake เพื่อจะสามารถนำมาประกอบเหตุผลของสาเหตุที่ไดนามิเตอร์อ่านค่าได้ไม่ตรงตามที่ควรจะเป็น โดยข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับชุดควบคุม Eddy current brake นี้ได้ถูกรวบรวมไว้ภายในโครงการการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าระยะที่ 3 หลังจากนั้นเมื่อทดสอบที่ทำงานของ Eddy current brake แล้วในโครงการในระยะต่อไปจะเป็นการรวมการทำงานของเซนเซอร์ทั้งหมดรวมไปถึงการควบคุมโหลดให้สามารถใช้งานร่วมกันได้

ในส่วนของการรับค่าที่ผิดพลาดของ Magnetic pickup sensor อาจเกิดจาก Arduino Uno ที่ใช้งานอยู่มีความไวของสัญญาณนาฬิกาที่ค่อนข้างต่ำ ความถี่ที่ส่งมาจาก Magnetic pickup sensor ค่อนข้างสูง จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขณะที่รับค่าเข้ามา ในอนาคตควรใช้อุปกรณ์ที่มีหน่วยประมวลผลที่เร็วกว่า Arduino Uno เพื่อความสามารถในการอ่านข้อมูลที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยุทธชัย ศิลปวิจารณ์. **ไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake**. (26 กรกฎาคม 2554). สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2560, จาก http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=14555.
- [2] วิศิษฐ์ วิวัฒน์เกษมสุข. การควบคุมและการวัดแรงบิดของไดนาโมมิเตอร์แบบกระแสหมุนวน. (2552). **ไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake**. สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2560, จาก <http://www.thaithesis.org/detail.php?id=1082547001382>.
- [3] **การใช้งานของไดนาโมมิเตอร์แบบ Hysteresis Brake**. สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2560, จาก http://www.magtrol.com/motortest/hd_dynamometers.html.
- [4] **การใช้งานของไดนาโมมิเตอร์แบบ Water Brake**. สืบค้นเมื่อ 21 กันยายน 2560, จาก <http://gopowersystems.com/engine-testing>.
- [5] บุณทริกา จำรูญศิริ พิมพ์กานต์ ดิณสิริสุข และภรณ์พรรณนา จางนิตวิชัย. (8 กุมภาพันธ์ 2558). **Hall Effect**. สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2560, จาก <https://303739ene.wordpress.com/2015/02/08/hall-effect-sensor/>.
- [6] **เครื่องมือวัดและควบคุม**. (2554). **โหลดเซลล์สำหรับเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้ง**. สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2560, จาก <http://ins-rayong.blogspot.com/2014/06/load-cell.html>.
- [7] รัชชัย ตระกูลเลิศยศ. (6 กันยายน 2559). ความแตกต่างของ Analog และ Digital. **Digital signal**. สืบค้นเมื่อ 30 กันยายน 2560, จาก <http://www.scimath.org/article/item/4819-analog-digital>.
- [8] รัชชัย ตระกูลเลิศยศ. (6 กันยายน 2559). ความแตกต่างของ Analog และ Digital. **Analog signal**. สืบค้นเมื่อ 2 ตุลาคม 2560, จาก <http://www.scimath.org/article/item/4819-analog-digital>.
- [9] **ความหมายของโหลดเซลล์**. สืบค้นเมื่อ 6 ตุลาคม 2560, จาก <https://www.factomart.com/th/load-cell/>.

- [10] **Control system.** สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2560, จาก <http://www.electronics-tutorials.ws/systems/feedback-systems.html>.
- [11] (23 กันยายน 2550). **การทำงานของ Pulse Width Modulation.** สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560, จาก <http://introduction-pwm.blogspot.com/2007/09/pwm.html>.
- [12] **ทอร์ก (Torque).** สืบค้นเมื่อ 16 ตุลาคม 2560, จาก <http://pirun.kps.ku.ac.th/~b5321600538/torque.html>.
- [13] ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ. **Block Diagrams Controller system.** เอกสารประกอบการเรียน วิชา 302424 Automatic Control Engineering Block Diagrams and Steady State Errors. สืบค้นเมื่อ 7 ธันวาคม 2560.
- [14] Gitano Horizon. Key sight Technologies Small Engine Dynamometer Testing. **Torque Voltage.** สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2560.
- [15] **Op-amp Comparator Circuit.** สืบค้นเมื่อ 12 มกราคม 2561, จาก <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>.
- [16] Craig. (21 ธันวาคม 2557). Comparator Basics. **Basic comparator.** สืบค้นเมื่อ 19 มกราคม 2561, จาก <http://www.analogzoo.com/2014/12/comparator-basics/>.
- [17] pulseln. **PluseIn Arduino.** สืบค้นเมื่อ 24 มกราคม 2561, จาก <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/advanced-io/pulsein/>.
- [18] Loadcell sensor 24 bit ADC – HX711. **HX711 Amplifier Module.** สืบค้นเมื่อ 7 กุมภาพันธ์ 2561, จาก <https://www.sunrom.com/p/loadcell-sensor-24-bit-adc-hx711>.
- [19] **HX711 Amplifier Module with digital output.** สืบค้นเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2561, จาก <https://www.openimpulse.com/blog/products-page/product-category>.
- [20] Load Cell Amplifier 24-Bit ADC Weighing Sensor Module HX711. **HX711 Amplifier Module.** สืบค้นเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2561, จาก <http://qqtrading.com.my/load-cell-amplifier-weighing-sensor-module-hx711>.

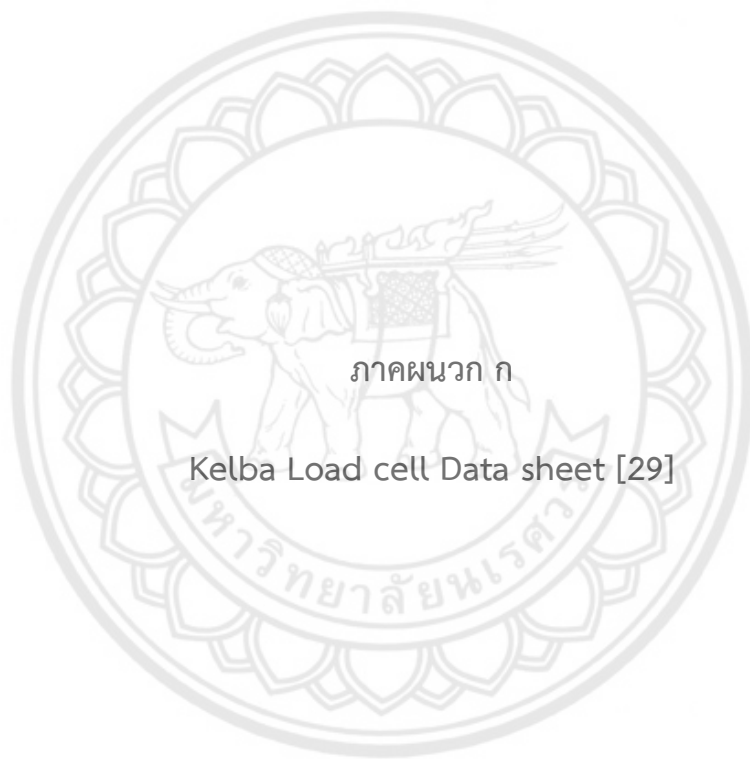
- [21] **HX711 Amplifier Module.** สืบค้นเมื่อ 8 มีนาคม 2561, จาก <http://thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/how-to-use-load-cell-and-hx711-amplifier-module.html>.
- [22] **GPS เครื่องวัดความเร็ว.** สืบค้นเมื่อ 15 มีนาคม 2561, จาก <https://itunes.apple.com/th/app/gps-เครื่องวัดความเร็ว/id901574501?l=th&mt=8>.
- [23] **IPhone SE.** สืบค้นเมื่อ 30 มีนาคม 2561, จาก <https://www.apple.com/th/iphone-se/specs/>.
- [24] Ken Shirriff และ Paul Badger. **Secrets of Arduino PWM. การใช้ Arduino Board สร้างความถี่.** สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2561, จาก <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SecretsOfArduinoPWM>.
- [25] **Changing PWM Frequency on the Arduino. การใช้ Arduino Board สร้างความถี่.** สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2561, จาก <https://arduino-info.wikispaces.com/Arduino-PWM-Frequency>.
- [26] **Low pass filter.** สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2561, จาก <http://www.elec-za.com/วงจรกรองความถี่-filter-circuit/>.
- [27] Chatchai Naeake. **วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit).** (9 สิงหาคม 2555). **Low pass filter.** สืบค้นเมื่อ 18 เมษายน 2561, จาก <http://chatchaispu.blogspot.com/2012/08/filter-circuit.html>.
- [28] **การควบคุมความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับ.** สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2561, จาก http://www.inverter.co.th/Home/index.php?option=com_content&view=article&id=110:inverter&catid=46:news-info&Itemid=83.
- [29] KA250 or KA125 Kelba Load Cell. (7 กรกฎาคม 2560). **Kelba Loadcells Data sheet.** สืบค้นเมื่อ 25 เมษายน 2561, จาก <https://www.andweighing.com.au/clearance/kelba-load-cell>.
- [30] **IC LM324 Data sheet.** สืบค้นเมื่อ 27 เมษายน 2561, จาก <http://www.datasheetspdf.com/pdf/49374/ONSemiconductor/LM324/2>.
- [31] **FC11AL data sheet.** สืบค้นเมื่อ 27 เมษายน 2561, จาก http://www.datasheetlib.com/datasheet/1154804/fc11al_united-automation.html.

- [32] Crydom M505012F Data sheet. สืบค้นเมื่อ 27 เมษายน 2561, จาก <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=M505012F&sField=4>.
- [33] The Editors of Encyclopaedia Britannica. Dynamometer. **การทำงานของ Prony brake.** สืบค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.britannica.com/technology/dynamometer#ref110230>.
- [34] **Water-brake dynamometer.** สืบค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2561, จาก https://www.dynomitedynamometer.com/absorber/dynamometer_waterbrake_absorber.htm.
- [35] **ไดนาโมมิเตอร์แบบ Eddy Current Brake.** สืบค้นเมื่อ 7 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.dynomitedynamometer.com/eddy-current-dynamometer/eddy-current-dynamometer.htm>.
- [36] **การตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงของ Eddy current และ Motor generators.** สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.dynomitedynamometer.com/dynamometer/dynamometer-comparison.htm>.
- [37] ธีชชัย ตระกูลเลิศยศ. (6 กันยายน 2559). ความแตกต่างของ Analog และ Digital. **Digital signal.** สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <http://www.scimath.org/article/item/4819-analog-digital>.
- [38] ธีชชัย ตระกูลเลิศยศ. (6 กันยายน 2559). ความแตกต่างของ Analog และ Digital. **Analog signal** สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <http://www.scimath.org/article/item/4819-analog-digital>.
- [39] Op-amp Comparator. **Basic comparator.** สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>.
- [40] Op-amp Comparator. **ลักษณะการทำงานของวงจร Basic comparator.** สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>.

- [41] Op-amp Comparator. **Comparator with hysteresis**. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>.
- [42] Op-amp Comparator. **วงจร Comparator with hysteresis**. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/op-amp-comparator.html>.
- [43] Thirawat Rattiyod. (30 พฤศจิกายน 2555). หน่วยที่ 3 อุปกรณ์ไทรสเตอร์. **กระแสโหดตั้ง**. สืบค้นเมื่อ 8 พฤษภาคม 2561, จาก <http://thirawatrattiyod.blogspot.com>.
- [44] HX711 - Mouser Electronics .(6 กุมภาพันธ์ 2561). HX711 Data sheet. สืบค้นเมื่อ 9 มิถุนายน 2561, จาก https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf.







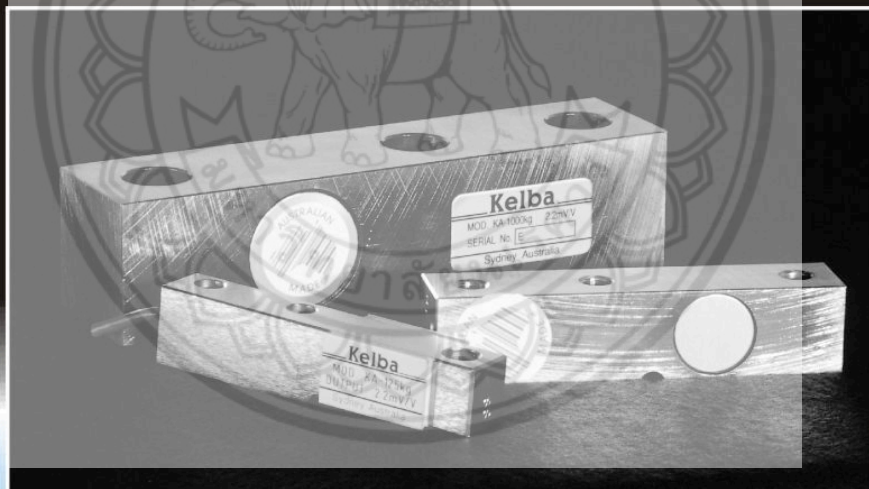
ภาคผนวก ก

Kelba Load cell Data sheet [29]

Kelba

LOADCELLS

'K' SERIES



FOR OTHER LOADCELL TYPES SEE FULL KELBA BINDER

- *Proven Performance*
- *Ready Availability*
- *Rugged Construction*
- *Economically Priced*
- *Excellent Reliability*
- *NSC Approved Models*

รูปที่ ก.1 Kelba Load cell Data sheet

THE LOADCELL SPECIALISTS

Kelba are specialist loadcell designers and manufacturers with over 15 years of experience.

PROVEN DESIGN

Kelba 'K' Series shearbeam type loadcells have inherent low deflection, high rejection of side loads, and exhibit excellent cyclic load performance.

EXCELLENT RELIABILITY

Subject to continuous detailed development in Australia over a 20 year period, all Kelba loadcells exhibit proven dependable performance in a wide range of precision weighing applications and across a broad range of industry.

VERSATILE

The Kelba 'K' Series range of shearbeam loadcells is widely suitable for applications ranging from precision scales to heavy industrial weighing.

ECONOMICAL PRICING

Continually increasing demand for Kelba loadcells has enabled us to achieve economies of scale with the result that we are able to provide extremely competitive pricing across the complete range.

QUALITY STANDARDS

Kelba loadcells are subject to rigorous inspection and monitoring during every stage of the manufacturing process. In addition, we are in the process of obtaining certification to International Standard ISO 9000.

ENVIRONMENTAL

Particular attention is paid to the environmental sealing of all Kelba loadcells in order to provide a product with good field performance and reliability.

EX-STOCK AVAILABILITY

In order to provide the service our clients need Kelba has a policy of supplying most standard type product from extensive stocks maintained in our Sydney based manufacturing facility.

RUGGED CONSTRUCTION

Kelba 'K' Series loadcells are precision machined from specially selected steels and then heat treated to a precise toughness. Tool steel models are then heavily zinc plated to give a tough corrosion resistant finish. Stainless steel is also available.

STANDARDISED OUTPUT

Multiple cell installations are easily accomplished as each cell is standardised to give the same change in output for a given load change.

NSC APPROVED

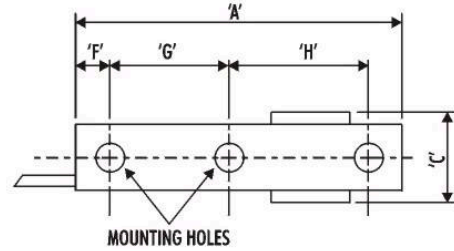
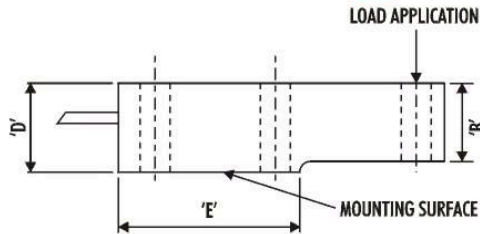
Proof of our ability to repeatably produce high quality loadcells is certification by National Standards Commission for loadcells for use in Weights and Measures approved trade use scales, weighbridges, etc.

TYPICAL LOADCELL SPECIFICATIONS	MODEL KA-125	MODEL KA-250	MODEL KA-500	MODEL KA1000	MODEL KL-1000
Loadcell Type	Shearbeam	Shearbeam	Shearbeam	Shearbeam	Shearbeam
Material of Construction	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel
**Optional Material	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	Stainless Steel	N/A
Mounting Bolt Size	M 8	M 8	M 10	M 10	M 10
Recommended Torque (8.8 grade bolts)	22NM	22NM	44NM	44NM	44NM
Load Hole	Tapped M10 x 1.5	Tapped M10 x 1.5	Tapped M12 x 1.75	Tapped M12 x 1.75	3/8" UNF
Loadfitting Contact Area	18mm Dia.	18mm Dia.	24mm Dia.	24mm Dia.	24mm Dia.
Rated Capacity (R.C.)	125 Kg	250 Kg	500 Kg	1000 Kg	1000 Kg
Safe Load Limit	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.
Max. Excitation Voltage	15V DC	15V DC	15V DC	15V DC	15V DC
Rec. Excitation Voltage	10V DC	10V DC	10V DC	10V DC	10V DC
Output at Rated Capacity (nominal)	2.2 mV per Volt \pm 0.5%	2.2 mV per Volt \pm 0.5%	2.2 mV per Volt \pm 0.5%	2.2 mV per Volt \pm 0.5%	1.5 mV per Volt \pm 0.5%
Standard Cable Length	2 M	2 M	3 M	3 M	3 M
Temperature Range	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C
Input Resistance	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)
Output Resistance	350 Ω \pm 0.2%	350 Ω \pm 0.2%	350 Ω \pm 0.2%	350 Ω \pm 0.2%	350 Ω \pm 0.2%
Non-Linearity	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap
Hysteresis	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap
Non-Repeatability	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap
Creep (after 30 min)	< 0.04% of reading	< 0.03% of reading	< 0.03% of reading	< 0.02% of reading	< 0.02% of reading
Span/Temperature Effect	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C
Environmental Protection	IP67	IP67	IP67	IP67	IP67
Weight	0.4 Kg	0.4 Kg	0.7 Kg	0.7 Kg	0.7 Kg

รูปที่ ก.2 Kelba Load cell Data sheet

MECHANICAL

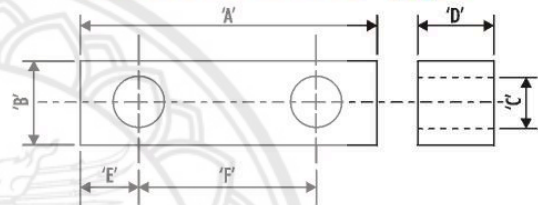
Shear Beam Type



Shear Beam Dimensions

MODEL	A	B	C	D	E	F	G	H
KA-125	110	21	28 max	25	54	10	33	57
KA-250	110	21	28 max	25	54	10	33	57
KA-500	125	28	33 max	32	63	12.5	38	61.5
KA-1000	125	28	33 max	32	63	12.5	38	61.5
KL-1000	125	28	31	28	66.5	12.5	38	61.5
KA-2500	190	45	51	50	108	20	60	88
KA-5000	190	45	51	50	108	20	60	88
KA-10000	227	56	56	66	117	25	60	117

Tension Force Type



Tension Force Dimensions

MODEL	A	B	C	D	E	F
KT-6000	124	42	27φ	36	23.5	77
KT-12000	193	51	36φ	51	38	117

Special note: KA-125 / 250 mtg holes offset 2.5mm from centre line towards non-cable side

** In the interests of development and improvement, the specifications contained herein are subject to change without notice.*

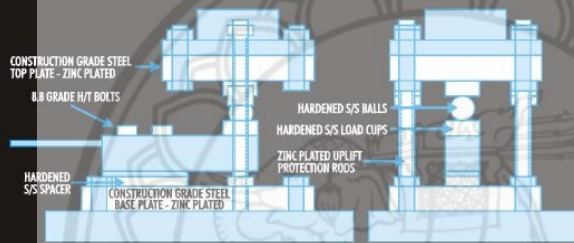
TYPICAL LOADCELL SPECIFICATIONS	MODEL KA-2500	MODEL KA-5000	MODEL KA-10000	MODEL KT6000	MODEL KT-12000
Loadcell Type	Shearbeam	Shearbeam	Shearbeam	Tension Force	Tension Force
Material of Construction	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel	Tool Steel
**Optional Material	Stainless Steel	Stainless Steel	No Option	No Option	No Option
Mounting Bolt Size	M 20	M 20	25mm	Green Shackel Pin	Green Shackel Pin
Recommended Torque (8.8 grade bolts)	380NM	380NM	660NM	N/A	N/A
Load Hole	M 20 Clearance	M 20 Clearance	25mm Clearance	Green Shackel Pin	Green Shackel Pin
Loadfitting Contact Area	46mm Dia.	46mm Dia.	50mm Dia.	N/A	N/A
Rated Capacity (R.C.)	2500 Kg	5000 Kg	10000 Kg	6000 Kg	12000 Kg
Safe Load Limit	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.	150 % of R.C.
Max. Excitation Voltage	15V DC	15V DC	15V DC	10V DC	10V DC
Rec. Excitation Voltage	10V DC	10V DC	10V DC	10V DC	10V DC
Output at Rated Capacity	2.2 mV per Volt ± 0.5%	2.2 mV per Volt ± 0.5%	2.2 mV per Volt ± 0.5%	1.0 mV per Volt ± 0.5%	1.5 mV per Volt ± 0.5%
Standard Cable Length	5 M	5 M	5 M	5 M	5 M
Temperature Range	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C	minus 10 to + 50°C
Input Resistance	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)	385 Ω (nom)
Output Resistance	350 Ω ± 0.2%	350 Ω ± 0.2%	350 Ω ± 0.2%	350 Ω ± 0.2%	350 Ω ± 0.2%
Non-Linearity	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.05% of rated cap	< 0.5% of rated cap	< 0.5% of rated cap
Hysteresis	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.03% of rated cap	< 0.5% of rated cap	< 0.5% of rated cap
Non-Repeatability	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap	< 0.01% of rated cap	< 0.1% of rated cap	< 0.1% of rated cap
Creep (after 30 min)	< 0.03% of reading	< 0.04% of reading	< 0.04% of reading	< 0.1% of reading	< 0.1% of reading
Span/Temperature Effect	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C	0.0015% of reading / degree C
Environmental Protection	IP67	IP67	IP67	IP67	IP67
Weight	2.8 Kg	2.8 Kg	4.4 Kg	1.2 Kg	2.9 Kg

รูปที่ ก.3 Kelba Load cell Data sheet

INSTALLATION

- Loadcells are precision built transducers and should be treated with care.
- Install multiple loadcells with equal distribution of the total load.
- Ensure that the mounting surface for the loadcell is flat and of sufficient strength to bear the load to be applied without distortion.
- Mount loadcells securely using high tensile bolts only, grade 8.8 minimum.
- Recommended torque for mounting bolts as per bolt manufacturers' specifications.
- The contact area between loadfittings and the surface of any loadcell should not exceed that nominated in the table within.
- DO NOT apply a torque to the load end of a loadcell.
- Use overload protection if appropriate for the system.
- Be extra careful when welding around loadcells. DO NOT allow welding currents to pass through a loadcell. (Earth straps are available from Kelba as an option.)

LOADCELL MOUNTING KITS

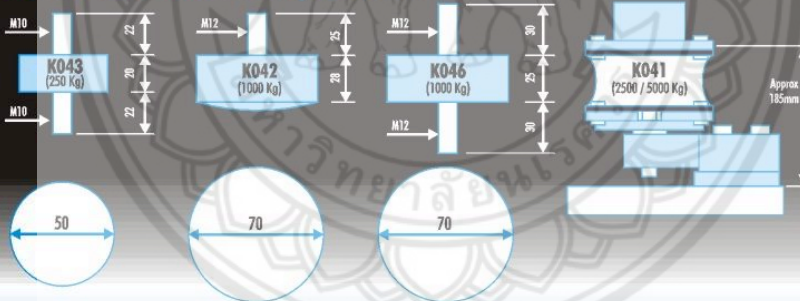


Features

Designed for loadcell capacities from 125kg up to 10,000kg. Load cups, balls, spacers and buttons are all through-hardened stainless steel. Kits available in both zinc plated steel and stainless steel.

Mounts are high performance ball and cup design. Top and bottom plates are manufactured from construction grade steel. Uplift and overload protection system also simplifies installation and maintenance.

Elastomeric Loadcell Interface Mounts



Electrical Connections

EX +	RED
SIG +	GREEN
SIG -	WHITE
EX -	BLACK
SHIELD	SILVER

Designed and Manufactured by Kelba (Australia) Pty Ltd
 7 Leonard Street, Hornsby NSW 2077 Australia — Tel: (02) 9476 4544 — Fax: (02) 9477 7974
 International Tel: 612 9476 4544 — International Fax: 612 9477 7974
 E-mail: kelba@bigpond.net.au — Web Site: www.kelba.com

Distributed by:

WARRANTY (Partial) (Refer to Kelba for full warranty statement)
 Kelba (Australia) Pty Limited warrants that the equipment manufactured by the company is free from defects in workmanship and materials under normal use and service. Equipment returned to us, transport prepaid, within 3 years of original shipment, and found, after examination, to be so defective and has not been subject to improper use, will, at the option of the company, be repaired, or replaced, free of charge, ex factory Sydney.

REV 7/98

รูปที่ ก.4 Kelba Load cell Data sheet



ภาคผนวก ข

IC LM324 Data sheet [30]

มหาวิทยาลัยบูรพา

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

Single Supply Quad Operational Amplifiers

The LM324 series are low-cost, quad operational amplifiers with true differential inputs. They have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. The quad amplifier can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

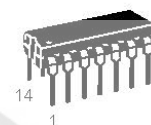
Features

- Short Circuited Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents: 100 nA Maximum (LM324A)
- Four Amplifiers Per Package
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Industry Standard Pinouts
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness without Affecting Device Operation
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free/BFR Free and are RoHS Compliant



ON Semiconductor®

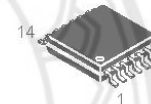
www.onsemi.com



PDIP-14
N SUFFIX
CASE 646

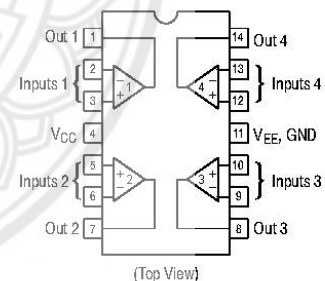


SOIC-14
D SUFFIX
CASE 751A



TSSOP-14
DTB SUFFIX
CASE 948G

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 10 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 11 of this data sheet.

รูปที่ ข.1 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages Single Supply Split Supplies	V_{CC} V_{CC}, V_{EE}	32 ± 16	Vdc
Input Differential Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	± 32	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	t_{SC}	Continuous	
Junction Temperature	T_J	150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air (Note 2)	$R_{\theta JA}$	Case 646 Case 751A Case 948G 118 156 190	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A	LM224 LM324, LM324A, LM324E LM2902, LM2902E LM2902V, NCV2902 (Note 3) -25 to +85 0 to +70 -40 to +105 -40 to +125	$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

1. Split Power Supplies.
2. All $R_{\theta JA}$ measurements made on evaluation board with 1 oz. copper traces of minimum pad size. All device outputs were active.
3. NCV2902 is qualified for automotive use.

ESD RATINGS

Rating	HBM	MM	Unit
ESD Protection at any Pin (Human Body Model - HBM, Machine Model - MM)			
NCV2902 (Note 3)	2000	200	V
LM324E, LM2902E	2000	200	V
LM324DR2G, LM2902DR2G	200	100	V
All Other Devices	2000	200	V

รูปที่ ข.2 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $V_{EE} = \text{GND}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	LM224			LM324A			LM324, LM324E			LM2902, LM2902E			LM2902V/NCV2902			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ to 30 V $V_{ICR} = 0\text{ V}$ to $V_{CC} - 1.7\text{ V}$, $V_O = 1.4\text{ V}$, $R_S = 0\ \Omega$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ (Note 4) $T_A = T_{\text{low}}$ (Note 4)	V_{IO}	-	2.0	5.0	-	2.0	3.0	-	2.0	7.0	-	2.0	7.0	-	2.0	7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Notes 4 and 6)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	7.0	-	-	7.0	30	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 4)	I_{IO}	-	3.0	30	-	5.0	30	-	5.0	50	-	5.0	50	-	5.0	50	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Notes 4 and 6)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	10	-	-	10	300	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 4)	I_B	-	-90	-150	-	-45	-100	-	-90	-250	-	-90	-250	-	-90	-250	nA
Input Common Mode Voltage Range (Note 5) $V_{CC} = 30\text{ V}$ $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 4)	V_{ICR}	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	28.3	V
Differential Input Voltage Range	V_{IDR}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$, for Large V_O Swing $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 4)	A_{VOL}	50	100	-	25	100	-	25	100	-	25	100	-	25	100	-	V/mV
Channel Separation $10\text{ kHz} \leq f \leq 20\text{ kHz}$, Input Referenced	CS	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	dB
Common Mode Rejection, $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	CMR	70	85	-	65	70	-	65	70	-	50	70	-	50	70	-	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	-	65	100	-	65	100	-	50	100	-	50	100	-	dB

4. LM224: $T_{\text{low}} = -25^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$
 LM324/LM324A/LM324E: $T_{\text{low}} = 0^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +70^\circ\text{C}$
 LM2902/LM2902E: $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +105^\circ\text{C}$
 LM2902V & NCV2902: $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +125^\circ\text{C}$
 NCV2902 is qualified for automotive use.

5. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is $V_{CC} - 1.7\text{ V}$, but either or both inputs can go to +32 V without damage, independent of the magnitude of V_{CC} .

6. Guaranteed by design.

รูปที่ ข.3 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $V_{EE} = \text{GND}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	LM224			LM324A			LM324, LM324E			LM2902, LM2902E			LM2902V/NCV2902			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage – High Limit $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ ($T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}) (Note 7)	V_{OH}	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	V
Output Voltage – Low Limit $V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 7)	V_{OL}	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	100	-	5.0	100	mV
Output Source Current ($V_{ID} = +1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 7)	I_{O+}	20	40	-	20	40	-	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
Output Sink Current ($V_{ID} = -1.0\text{ V}$, $V_{CC} = 15\text{ V}$) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 7)	I_{O-}	10	20	-	10	20	-	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 8)	I_{SC}	-	40	60	-	40	60	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Power Supply Current ($T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}) (Note 7)	I_{CC}	-	-	3.0	-	1.4	3.0	-	-	3.0	-	-	3.0	-	-	3.0	mA
$V_{CC} = 30\text{ V}$ $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$		-	-	3.0	-	1.4	3.0	-	-	3.0	-	-	3.0	-	-	3.0	
$V_{CC} = 5.0\text{ V}$, $V_O = 0\text{ V}$, $R_L = \infty$		-	-	1.2	-	0.7	1.2	-	-	1.2	-	-	1.2	-	-	1.2	

7. LM224: $T_{\text{low}} = -25^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$
 LM324/LM324A/LM324E: $T_{\text{low}} = 0^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +70^\circ\text{C}$
 LM2902/LM2902E: $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +105^\circ\text{C}$
 LM2902V & NCV2902: $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +125^\circ\text{C}$
 NCV2902 is qualified for automotive use.

8. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is $V_{CC} - 1.7\text{ V}$, but either or both inputs can go to +32 V without damage, independent of the magnitude of V_{CC} .

รูปที่ ข.4 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

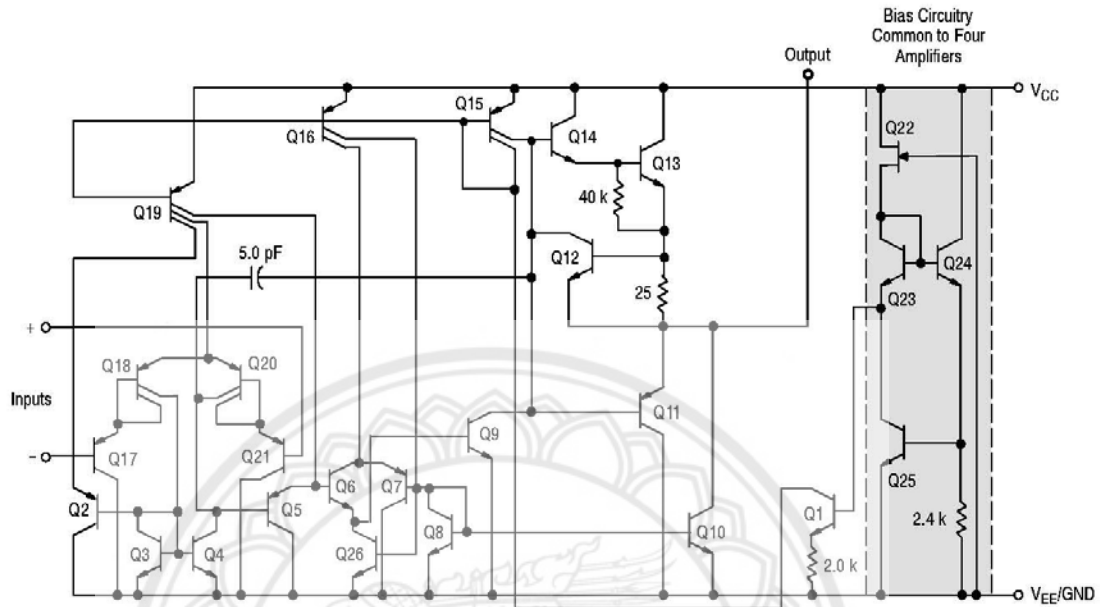


Figure 1. Representative Circuit Diagram
(One-Fourth of Circuit Shown)

รูปที่ ข.5 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

CIRCUIT DESCRIPTION

The LM324 series is made using four internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage of each consists of differential input devices Q20 and Q18 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance, a smaller compensation capacitor (only 5.0 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

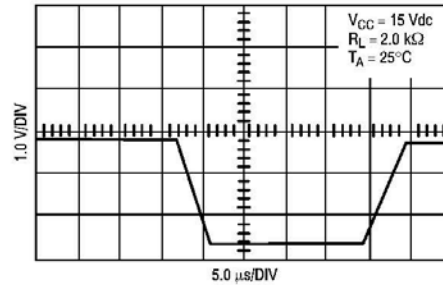


Figure 2. Large Signal Voltage Follower Response

Each amplifier is biased from an internal-voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.



Figure 3.

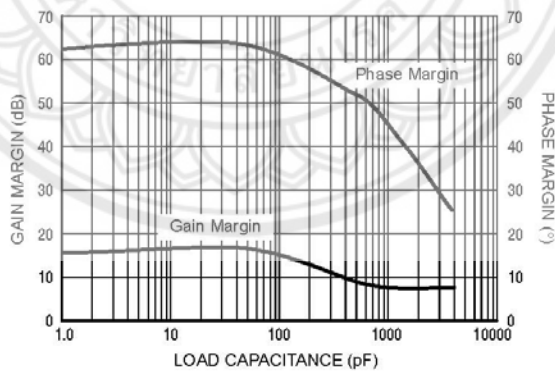


Figure 4. Gain and Phase Margin

รูปที่ ข.6 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

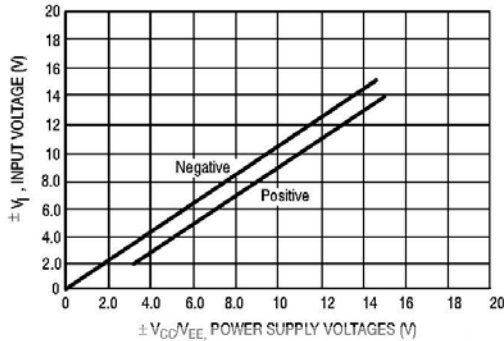


Figure 5. Input Voltage Range

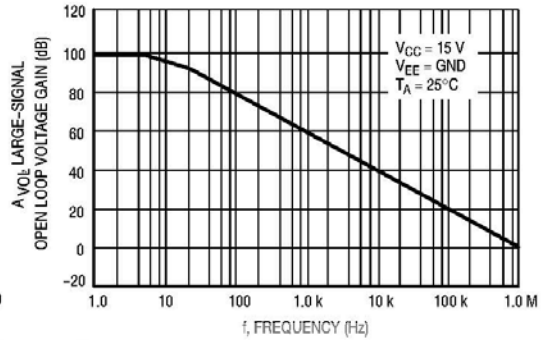


Figure 6. Open Loop Frequency

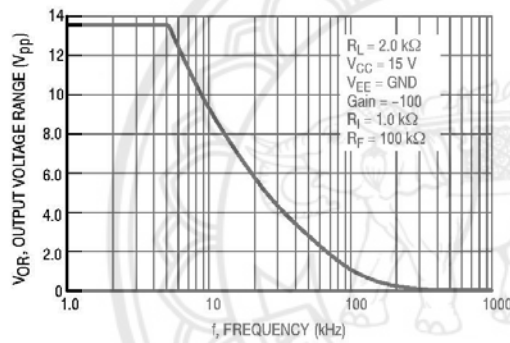


Figure 7. Large-Signal Frequency Response

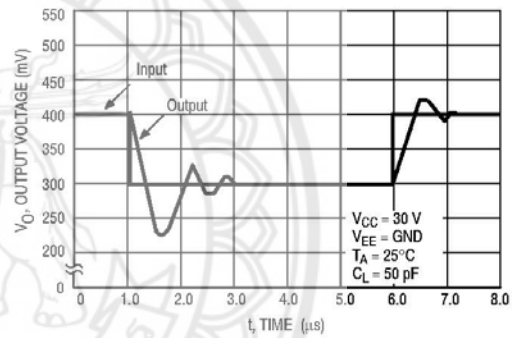


Figure 8. Small-Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

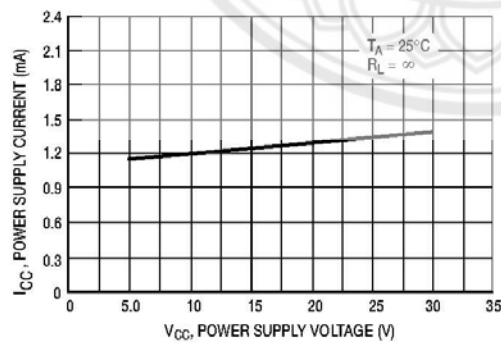


Figure 9. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

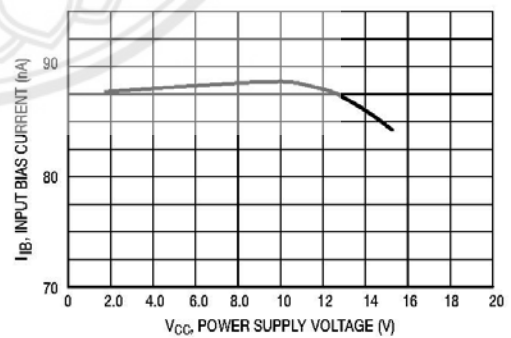


Figure 10. Input Bias Current versus Power Supply Voltage

รูปที่ ข.7 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

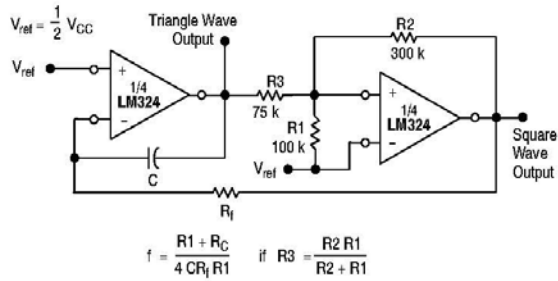


Figure 16. Function Generator

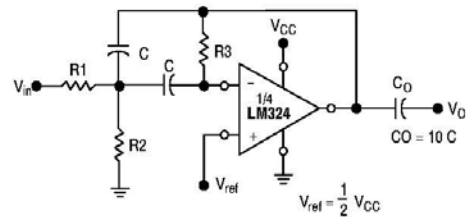


Figure 17. Multiple Feedback Bandpass Filter



Given: f_o = center frequency
 $A(f_o)$ = gain at center frequency

Choose value f_o, C

Then: $R3 = \frac{Q}{\pi f_o C}$

$R1 = \frac{R3}{2 A(f_o)}$

$R2 = \frac{R1 R3}{4Q^2 R1 - R3}$

For less than 10% error from operational amplifier, $\frac{Q_o f_o}{BW} < 0.1$
 where f_o and BW are expressed in Hz.

If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters.

รูปที่ ข.8 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

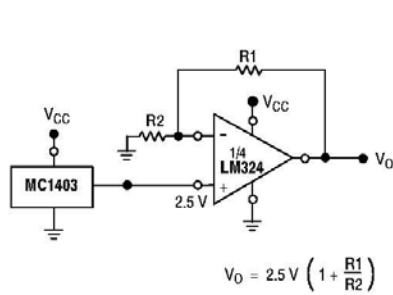


Figure 11. Voltage Reference

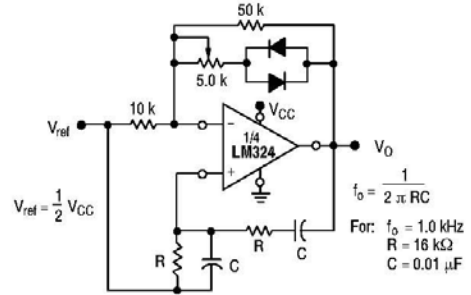


Figure 12. Wien Bridge Oscillator

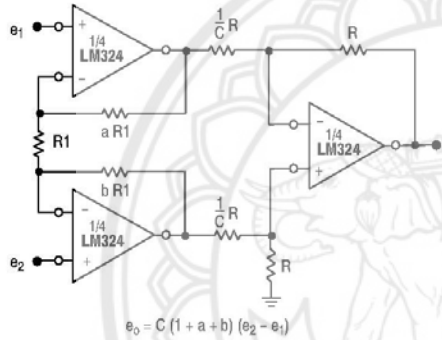


Figure 13. High Impedance Differential Amplifier

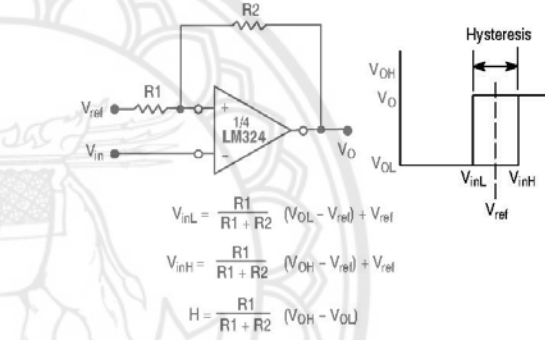


Figure 14. Comparator with Hysteresis

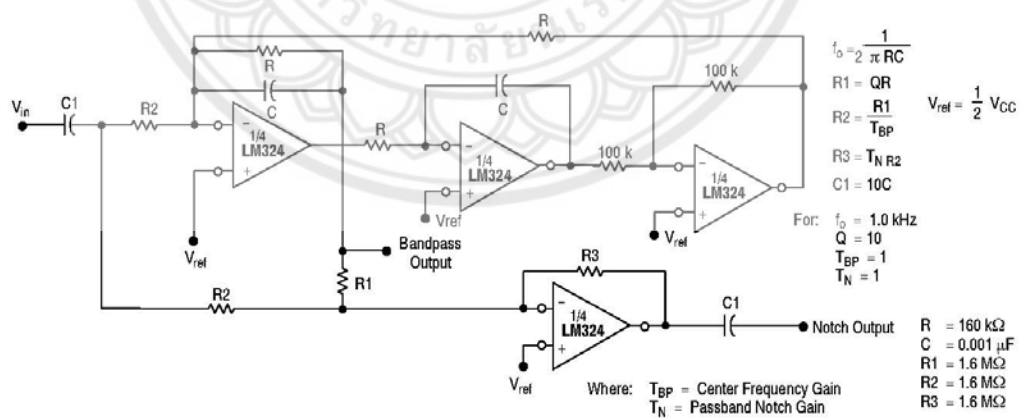


Figure 15. Bi-Quad Filter

รูปที่ ข.9 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package	Shipping†	
LM224DG	-25°C to +85°C	SOIC-14 (Pb-Free)	55 Units/Rail	
LM224DR2G		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM224DTBG		TSSOP-14 (Pb-Free)	96 Units/Tube	
LM224DTBR2G		TSSOP-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM224NG		PDIP-14 (Pb-Free)	25 Units/Rail	
LM324DG	0°C to +70°C	SOIC-14 (Pb-Free)	55 Units/Rail	
LM324DR2G		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM324EDR2G		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM324DTBG		TSSOP-14 (Pb-Free)	96 Units/Tube	
LM324DTBR2G		TSSOP-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM324NG		PDIP-14 (Pb-Free)	25 Units/Rail	
LM324ADG		SOIC-14 (Pb-Free)	55 Units/Rail	
LM324ADR2G		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM324ADTBG		TSSOP-14 (Pb-Free)	96 Units/Tube	
LM324ADTBR2G		TSSOP-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM324ANG		PDIP-14 (Pb-Free)	25 Units/Rail	
LM2902DG		-40°C to +105°C	SOIC-14 (Pb-Free)	55 Units/Rail
LM2902DR2G			SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel
LM2902EDR2G	SOIC-14 (Pb-Free)		2500/Tape & Reel	
LM2902DTBG	TSSOP-14 (Pb-Free)		96 Units/Tube	
LM2902DTBR2G	TSSOP-14 (Pb-Free)		2500/Tape & Reel	
LM2902NG	PDIP-14 (Pb-Free)		25 Units/Rail	
LM2902VDG	-40°C to +125°C	SOIC-14 (Pb-Free)	55 Units/Rail	
LM2902VDR2G		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM2902VDTBG		TSSOP-14 (Pb-Free)	96 Units/Tube	
LM2902VDTBR2G		TSSOP-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
LM2902VNG		PDIP-14 (Pb-Free)	25 Units/Rail	
NCV2902DR2G*		SOIC-14 (Pb-Free)	2500/Tape & Reel	
NCV2902DTBR2G*	TSSOP-14 (Pb-Free)			

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our **Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D**.

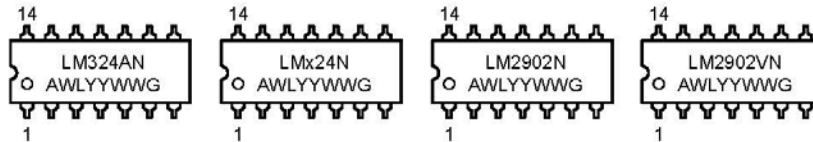
*NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

รูปที่ ข.10 IC LM324 Data sheet

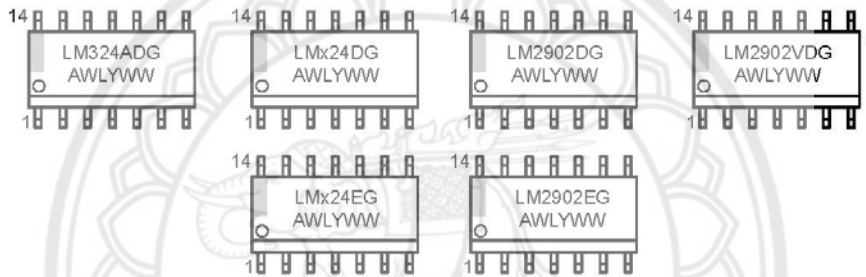
LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

MARKING DIAGRAMS

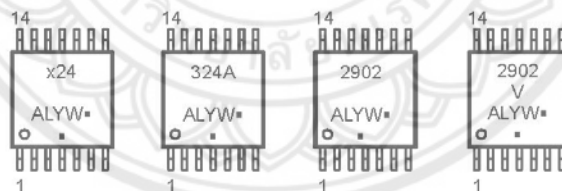
**PDIP-14
N SUFFIX
CASE 646**



**SOIC-14
D SUFFIX
CASE 751A**



**TSSOP-14
DTB SUFFIX
CASE 948G**



- x = 2 or 3
- A = Assembly Location
- WL, L = Wafer Lot
- YY, Y = Year
- WW, W = Work Week
- G or • = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

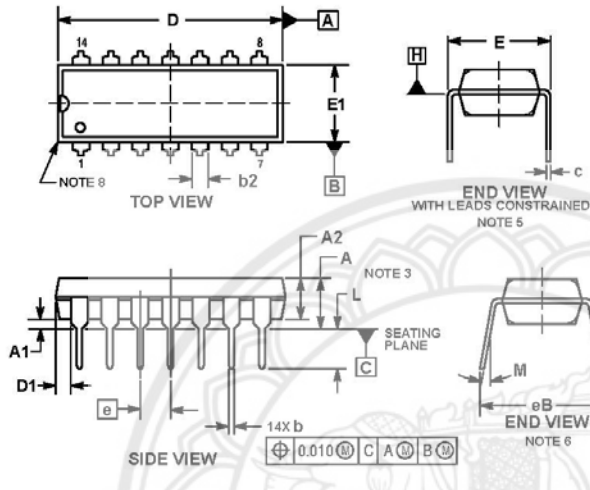
*This marking diagram also applies to NCV2902.

รูปที่ ข.11 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

PACKAGE DIMENSIONS

PDIP-14
CASE 646-06
ISSUE S



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
 3. DIMENSIONS A, A1 AND L ARE MEASURED WITH THE PACKAGE SEATED IN JEDEC SEATING PLANE GAUGE GS-3.
 4. DIMENSIONS D, D1 AND E1 DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS ARE NOT TO EXCEED 0.10 INCH.
 5. DIMENSION E IS MEASURED AT A POINT 0.015 BELOW DATUM PLANE H WITH THE LEADS CONSTRAINED PERPENDICULAR TO DATUM C.
 6. DIMENSION eB IS MEASURED AT THE LEAD TIPS WITH THE LEADS UNCONSTRAINED.
 7. DATUM PLANE H IS COINCIDENT WITH THE BOTTOM OF THE LEADS, WHERE THE LEADS EXIT THE BODY.
 8. PACKAGE CONTOUR IS OPTIONAL (ROUNDED OR SQUARE CORNERS).

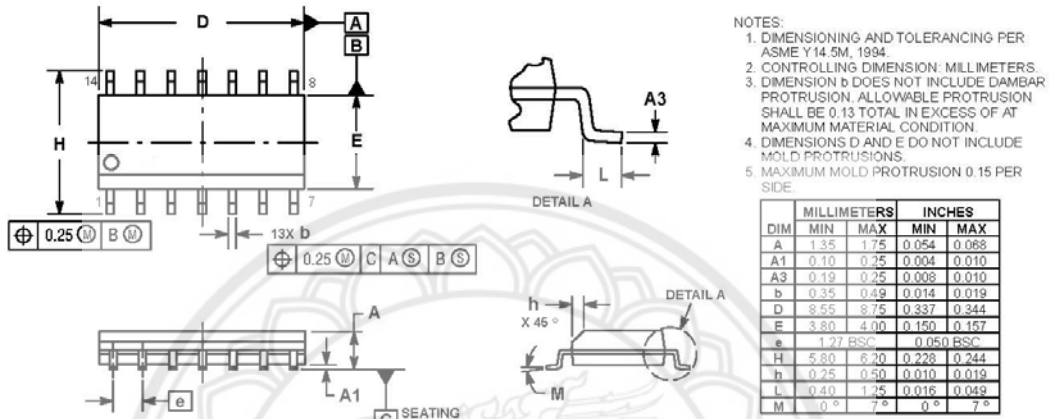
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	---	0.210	---	5.33
A1	0.015	---	0.38	---
A2	0.115	0.165	2.92	4.95
b	0.014	0.022	0.35	0.56
b2	0.060 TYP	---	1.52 TYP	---
C	0.036	0.014	0.91	0.35
D	0.732	0.775	18.67	19.69
D1	0.005	---	0.13	---
E	0.300	0.325	7.62	8.26
E1	0.240	0.280	6.10	7.11
e	0.100 BSC	---	2.54 BSC	---
eB	---	0.430	---	10.92
L	0.115	0.150	2.92	3.81
M	---	10°	---	10°

รูปที่ ข.12 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

PACKAGE DIMENSIONS

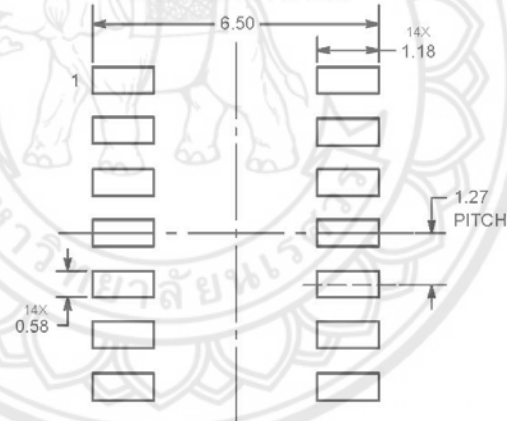
SOIC-14
CASE 751A-03
ISSUE K



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETERS.
 3. DIMENSION b DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE PROTRUSION SHALL BE 0.13 TOTAL IN EXCESS OF AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
 4. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSIONS.
 5. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.35	1.75	0.054	0.068
A1	0.10	0.25	0.004	0.010
A3	0.19	0.25	0.008	0.010
b	0.35	0.49	0.014	0.019
D	8.55	8.75	0.337	0.344
E	3.80	4.00	0.150	0.157
e	1.27 BSC		0.050 BSC	
H	5.80	6.20	0.228	0.244
h	0.25	0.50	0.010	0.019
L	0.40	1.25	0.016	0.049
M	0° - 7°		0° - 7°	

SOLDERING FOOTPRINT*



DIMENSIONS: MILLIMETERS

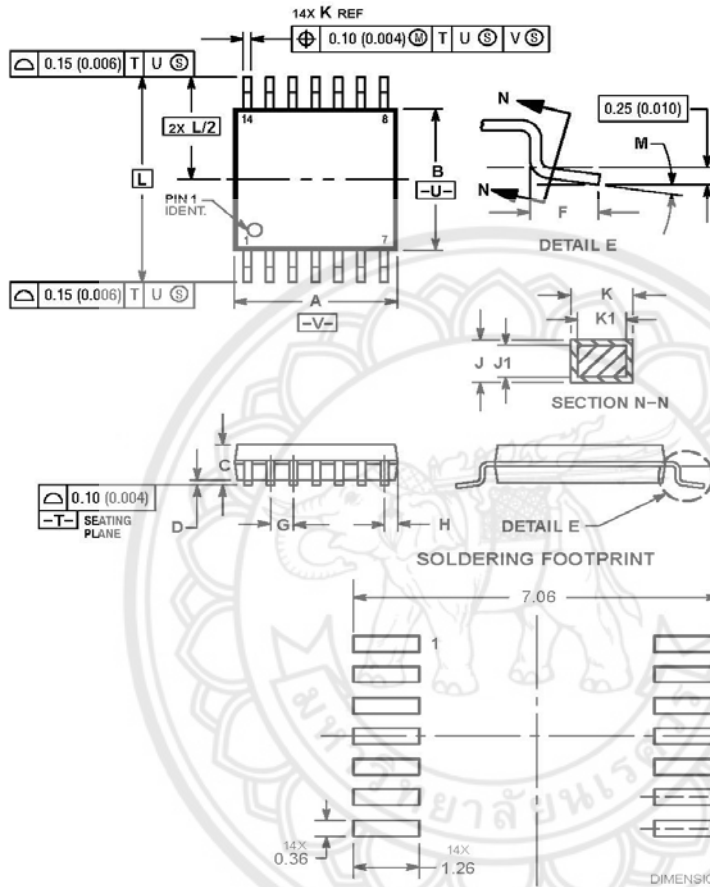
*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

รูปที่ ข.13 IC LM324 Data sheet

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

PACKAGE DIMENSIONS

TSSOP-14
CASE 948G
ISSUE B



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
 3. DIMENSION A DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS. MOLD FLASH OR GATE BURRS SHALL NOT EXCEED 0.15 (0.006) PER SIDE.
 4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION. INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED 0.25 (0.010) PER SIDE.
 5. DIMENSION K DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.08 (0.003) TOTAL IN EXCESS OF THE K DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
 6. TERMINAL NUMBERS ARE SHOWN FOR REFERENCE ONLY.
 7. DIMENSION A AND B ARE TO BE DETERMINED AT DATUM PLANE -W-.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.90	5.10	0.193	0.200
B	4.30	4.50	0.169	0.177
C	---	1.20	---	0.047
D	0.05	0.15	0.002	0.006
F	0.50	0.75	0.020	0.030
G	0.25 BSC	0.26 BSC		
H	0.50	0.60	0.020	0.024
J	0.09	0.20	0.004	0.008
J1	0.09	0.16	0.004	0.006
K	0.19	0.30	0.007	0.012
K1	0.19	0.25	0.007	0.010
L	6.40 BSC	0.252 BSC		
M	0°	8°	0°	8°

ON Semiconductor and the ON logo are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC) or its subsidiaries in the United States and/or other countries. SCILLC owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of SCILLC's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marketing.pdf. SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

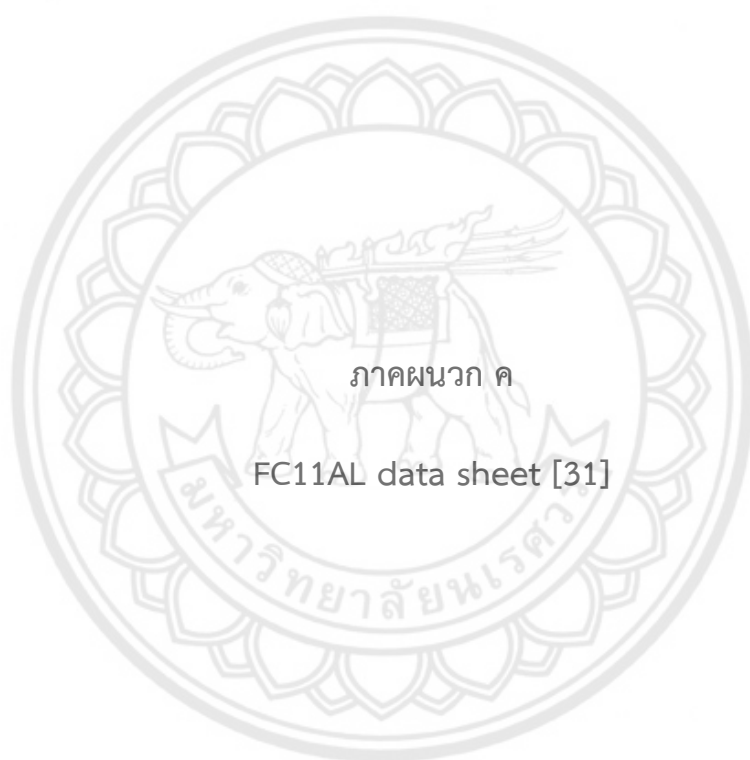
PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
19521 E. 32nd Pkwy, Aurora, Colorado 80011 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support: Phone: 421 33 789 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com
Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>
For additional information, please contact your local Sales Representative

LM324/D



ภาคผนวก ค

FC11AL data sheet [31]



UNIVERSAL PHASE ANGLE TRIGGER MODULE

FC11AL

X10222

INTRODUCTION

This single phase or phase to phase firing module uses variable phase-angle control with adjustable signal matching and adjustable **soft-start**. The power transformer is remote for increased reliability and wide operational voltage capacity. The unique **MONO-LINK** firing system is ideal for use with inductive loads and requires minimal wiring to the power devices. The module is fully enclosed for safety and eligibility in industrial environments.

APPLICATIONS

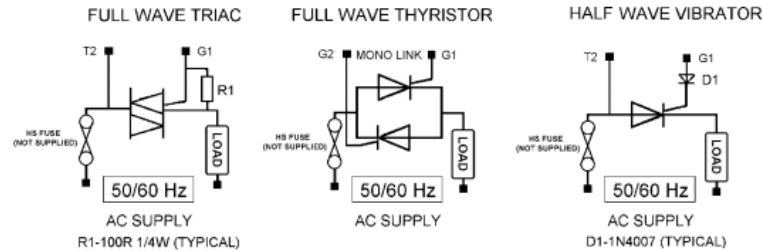
Applicable to most AC resistive or inductive loads via a triac or thyristor, on single phase to neutral or phase to phase supplies, within voltage limits. Also suitable for half-wave vibrator control.

FEATURES

- Fires triacs or thyristors up to 440V (50/60 Hz) supplies.
- MONO-LINK™ - Gate to Gate firing.
- High Isolation opto-coupled output.
- Status LED giving output level indication.
- Adjustable Soft Start Function.



รูปที่ ค.1 FC11AL data sheet

POWER CONNECTIONS**SPECIFICATION**

Signal Span Minimum	0 to 2V dc	AC input supply	12 to 18V ac @ 65mA
Signal Span Maximum	0 to 25V dc	Auxiliary output	5V dc
Signal zero offset	0 to 30% of span	Line Frequency	50/60 Hz
dV/dt rating	100V/ μ s	Operating temperature range	0 to +65°C
Max. Gate/Line voltage	440V ac	Adjustable soft start	0-20 seconds
Trigger isolation voltage	4000Vrms	Mono-link fuse	F100mA (HRC)
Trigger output rating	0.8A	Manual potentiometer	2K, 5K or 10K
Storage temperature range	-20 to +85°C	Power connections	6.3mm Amp tags

FUSING

It is recommended to use semiconductor (fast acting) type fuses or circuit breakers (semiconductor- MCB) for unit protection and appropriate protection for unit supply (HRC F1A). On initial 'switch on' some loads need an increased Factor of Safety (F of S) for unit and/or device protection. See SRA Data sheet for further information.

รูปที่ ค.3 FC11AL data sheet

CE MARKING

This product family carries a "CE marking". These phase angle controllers need a suitable remote filter.
For information see recommendation section and contact our sales desk. (See Declaration of Conformity)

RECOMMENDATION

Other documents available on request, which may be appropriate for your applications.

CODE	IDENTITY	DESCRIPTION
X10229	RFI	Filtering recommendation - addressing EMC Directive
X10213	ITA	Interaction, uses for phase angle and for burst fire control.
X10255	SRA	Safety requirements - addressing the Low Voltage Directive (LVD) including :- Thermal data/cooling ; "Live" parts warning & Earthing requirements; Fusing recommendations.
AP02/4	COS	UAL Conditions of sale

NOTE It is recommended that installation and maintenance of this equipment should be done with reference to the current edition of the I.E.E. regulations (BS7671) by suitably qualified/trained personnel. The regulations contain important requirements regarding safety of electrical equipment. (For International standards refer to I.E.C. directive I.E.C. 950).

ORDER CODE:

State part number: FC11AL + Signal option.
Optional extras include Potentiometer, and Supply transformer.

**UNITED AUTOMATION LIMITED**

1 Southport Business Park
Kew
Southport, PR8 4HQ
ENGLAND

Tel: 0044 (0) 1704 - 516500 Main
Tel: 0044 (0) 1704 - 516516 Sales
Fax: 0044 (0) 1704 - 516501
Enquiry@united-automation.com
www.united-automation.com

Page No. 2 of 2

Issue 5

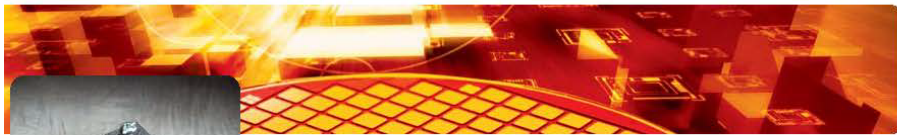
Date 28/11/01



รูปที่ ค.4 FC11AL data sheet



Crydom M505012F Data sheet [32]

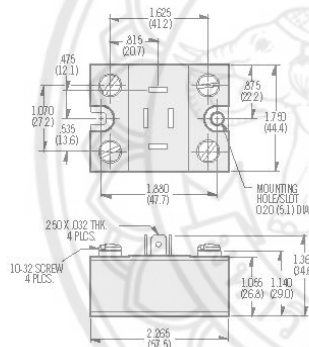


The M50 Series modules utilize highly efficient thermal management to provide high surge capability, long lifetime and reliable performance. Available in eight standard circuits, all models come in an industry standard package, provide 2500Vrms from all terminals to the baseplate and are UL recognized E72445.

■ **Over 40KW Output Capability**

Mechanical Dimensions

All dimensions are in inches (millimeters)



Electrical Specifications

	M5050	M50100
I_D Maximum DC Output Current @ $T_c = 85^\circ\text{C}$ (A)	50	100
V_F Maximum Voltage Drop @ Amps Peak	1.7V @ 50A	1.4V @ 100A
T_J Operating Junction Temperature Range	-40°C to +125°C	
di/dt Critical Rate of Rise of On-State Current @ $T_J = 125^\circ\text{C}$ (A/us)	100	
dv/dt Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	500	
V_{RMS} Repetitive Peak Reverse Voltage (AC Line Input Voltage)	400 (120Vac) 600 (240Vac) 800 (280Vac) 1000 (380Vac) 1200 (480Vac)	
I_{SM} Maximum Non-Repetitive Surge Current (A) [$1/2$ Cycle, 60Hz]	600	1500
IT Maximum I^2T for Fusing (A ² sec) [$T = 0.3ms$]	1500	9350
I_{GT} Maximum Required Gate Current to Trigger @ 25°C (mA)	150	
V_{GT} Maximum Required Gate Voltage to Trigger @ 25°C (V)	3.0	
P_{GAV} Average Gate Power	0.5W	
V_{GR} Maximum Peak Gate Voltage (Reverse)	5.0V	
$R_{\theta JC}$ Maximum Thermal Resistance Junction to Ceramic Base per Chip	0.7°C/W	0.36°C/W
V_{ISOL} Isolation Voltage	2500V _{RMS}	

Mechanical Specifications

Weight (Typical)	4.5 oz (128g)
------------------	---------------

iso9001 CERTIFIED

Competitive part number cross-reference available at www.cynergy3.com

Approvals

UL - E72445

USA

Sales & Tech Support (866) 258-5057
 Email: sales@cynergy3.com
 Cynergy3 Components
 2320 Paseo de las Americas, Suite 104
 San Diego, CA 92154

EUROPE - UK

Telephone +44 (0) 1202 897969
 Fax +44 (0) 1202 891918
 Email: sales@cynergy3.com
 Cynergy3 Components Ltd.
 7 Cobham Road
 Ferndown Industrial Estate
 Wimborne, Dorset BH21 7PE

ASIA - Thailand

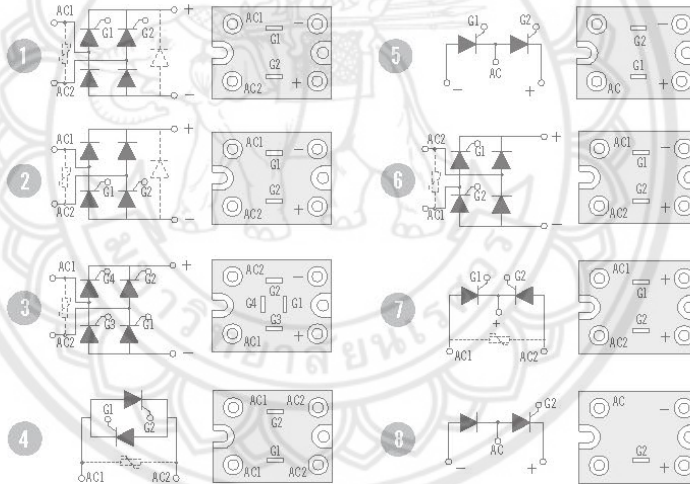
Telephone +66 (0)2 665 2517
 Fax +66 (0)2 665 2588
 Cynergy 3 Components, Asia
 18/8 Fico Place 12th Floor
 Soi Sukhumvit 21 (Asoke)
 Klongtoey Nua, Wattana
 Bangkok, Thailand 10110



Part Number Identification

Series	Current	Circuit Type	AC Line Voltage	Options*
M50	50 - 50 Amps	1 - 8	1 - 120 Vac	F - Free
	100 - 100 Amps	(see schematic diagrams)	2 - 240 Vac	Wheeling Diode
			3 - 280 Vac	V - External Suppressor
			4 - 380 Vac	
			5 - 480 Vac	

Example: M505012FV



iso9001 **CERTIFIED**

Competitive part number cross-reference available at: www.cynergy3.com

Approvals

UL - E72445

USA

Sales & Tech Support (866) 258-5057
 Email: sales@cynergy3.com
 Cynergy3 Components
 2320 Paseo de las Americas, Suite 104
 San Diego, CA 92154

EUROPE - UK

Telephone +44 (0) 1202 897969
 Fax +44 (0) 1202 891918
 Email: sales@cynergy3.com
 Cynergy3 Components Ltd.
 7 Cobham Road
 Ferndown Industrial Estate
 Wimborne, Dorset BH21 7PE

ASIA - Thailand

Telephone +66 (0)2 665 2517
 Fax +66 (0)2 665 2588
 Cynergy 3 Components, Asia
 18/8 Fico Place 12th Floor
 Soi Sukhumvit 21 (Asoke)
 Klongtoey Nua, Wattana
 Bangkok, Thailand 10110

© 2006 Cynergy3 components, All Rights Reserved. Specifications are subject to change without prior notice. Cynergy3 components and the Cynergy3 components logo are trademarks of Cynergy3 components Corp.



ภาคผนวก จ

โปรแกรมสอบเทียบโพลีเซลล์อัตโนมัติ [21]

มหาวิทยาลัยนเรศวร

โปรแกรมสอบเทียบโหลดเซลล์อัตโนมัติ

```

#include "HX711.h"
#include <Wire.h>
#define DOUT A3
#define CLK A2
#define DEC_POINT 2
#define STABLE 1
float offset=0;
float calibration_factor = 1;
float real_weight = 1;//kg
HX711 scale(DOUT, CLK);
unsigned char state=0;
long FindZeroFactor();
float get_units_kg();
void ReadWeight();
void FindCalibrationFactor();
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  Serial.println();
  Serial.println("Auto Calibrate Program");
  Serial.println("Send 'a' to Find Zero Factor (Please Remove all weight from scale)");
  Serial.println("Send 'b' to Find Calibration Factor (Please insert know the weight on the scales)");
  Serial.println("Send 'c' Show weight on the scales");
}
void loop()
{
  if(Serial.available())
  {
    char temp = Serial.read();

```

```
if(temp=='a')
state=1;
if(temp=='b')
state=2;
f(temp=='c')
state=3;
}
switch(state)
{
case 0:
break;
case 1:
FindZeroFactor();
//ReadWeight();
state=0;
break;
case 2:
FindCalibrationFactor();
state=0;
break;
case 3:
ReadWeight();
delay(200);
break;
case 4:
break;
}
}
long FindZeroFactor()
{
Serial.println("Find Zero Factor");
```




```

Serial.println("Please wait .....");
scale.set_scale();
scale.tare();
long zero_factor = scale.read_average(20);
Serial.print("Zero factor: ");
Serial.println(zero_factor);
return(zero_factor);
}
void FindCalibrationFactor()
{
unsigned char flag_stable=0;
unsigned int decpoint=1;
for(unsigned char i=0;i<DEC_POINT+1;i++ )
decpoint = decpoint*10;
while(1)
{
scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor
Serial.print("Reading: ");
float read_weight = get_units_kg();
String data = String(read_weight, DEC_POINT);
Serial.print(data);
Serial.print(" kg");
Serial.print(" calibration_factor: ");
Serial.print(calibration_factor);
Serial.println();
long r_weight    = (real_weight*decpoint);
long int_read_weight = read_weight*decpoint;
Serial.print(r_weight);
Serial.print(" , ");
Serial.println(int_read_weight);
long x;

```

```
if(r_weight == int_read_weight)
{
flag_stable++;
if(flag_stable>=STABLE)
{
Serial.print("Calibration Factor is = ");
Serial.println(calibration_factor);
break;
}
}
if(r_weight > int_read_weight)
{
x = r_weight - int_read_weight;
if(x > 100)
calibration_factor -= 1000;
else if(x > 10)
calibration_factor -= 10;
else
calibration_factor -= 1;
flag_stable=0;
}
if(r_weight < int_read_weight)
{
x = int_read_weight-r_weight;
if(x > 100)
calibration_factor += 1000;
else if(x > 10)
calibration_factor += 10;
else
calibration_factor += 1;
flag_stable=0;
```

```
}  
}  
}  
float get_units_kg()  
{  
    return(scale.get_units()*0.453592);  
}  
void ReadWeight()  
{  
    scale.set_scale(calibration_factor); //Adjust to this calibration factor  
    Serial.print("Reading: ");  
    String data = String(get_units_kg()+offset, DEC_POINT);  
    Serial.print(data);  
    Serial.println(" kg");  
}
```





ตารางที่ ๑.1 ตารางการทดสอบโหลดเซลล์ด้วย Universal Testing Machine

V_{\max} (V)	V_{avg} (V)	V_{rms} (V)	Force (N)
0.8	0.409	0.4	0
0.8	0.432	0.4	100
0.8	0.483	0.4	200
0.8	0.58	0.566	300
1.2	0.624	0.566	400
1.2	0.905	0.894	500
1.2	1	0.98	600
1.6	1.26	1.2	700
1.6	1.4	1.39	800
1.6	1.57	1.55	900
2	1.66	1.65	1000
2.4	1.8	1.79	1100
2.4	1.98	1.96	1200
2.8	2.2	2.19	1300
2.8	2.51	2.5	1400
2.8	2.61	2.59	1500
3.2	2.76	2.74	1600
3.2	2.9	2.9	1700
3.2	3.01	2.99	1800
3.2	3.19	3.18	1900
3.6	3.21	3.2	2000

ที่มา : โครงการปรับปรุงเครื่องวัดแรงม้าแบบลูกกลิ้งระยะที่ 1, 2557



ภาคผนวก ช

HX711 Data sheet [44]

มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

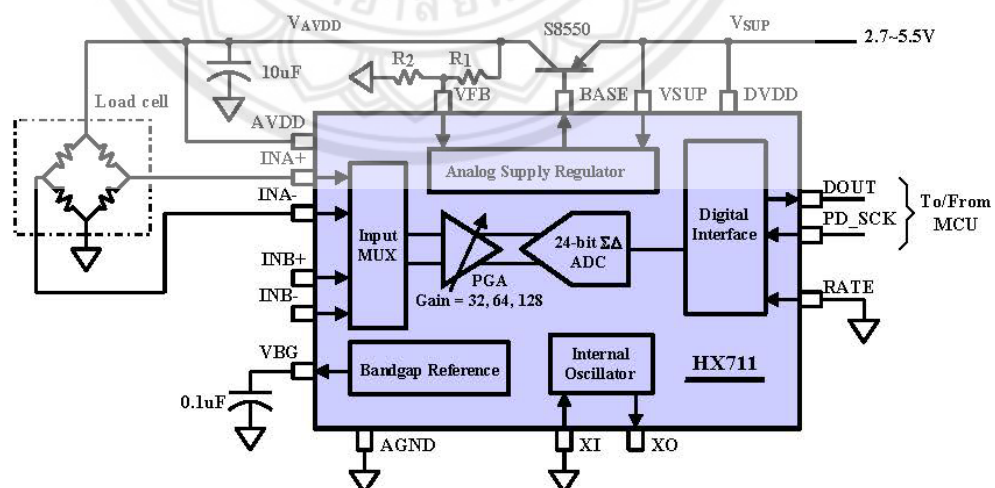
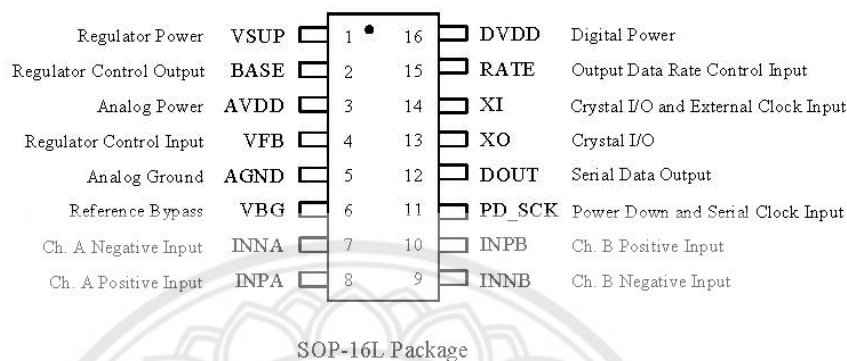


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

รูปที่ ข.1 HX711 Data sheet

Pin Description

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

รูปที่ ข.2 HX711 Data sheet

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)	$\pm 0.5(AVDD/GAIN)$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{clk}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{clk}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		± 6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		± 5		ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Reference bypass (V _{BG})			1.25		V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		μ A
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μ A
	Power down		0.2		

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

รูปที่ ๓.3 HX711 Data sheet

Analog Inputs

Channel A differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It can be programmed with a gain of 128 or 64. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When 5V supply is used at the AVDD pin, these gains correspond to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively.

Channel B differential input has a fixed gain of 32. The full-scale input voltage range is $\pm 80\text{mV}$, when 5V supply is used at the AVDD pin.

Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) should be the same power supply as the MCU power supply.

When using internal analog supply regulator, the dropout voltage of the regulator depends on the external transistor used. The output voltage is equal to $V_{AVDD} = V_{BG} * (R1+R2) / R1$ (Fig. 1). This voltage should be designed with a minimum of 100mV below VSUP voltage.

If the on-chip analog supply regulator is not used, the VSUP pin should be connected to either AVDD or DVDD, depending on which voltage is higher. Pin VFB should be connected to Ground and pin BASE becomes NC. The external 0.1uF bypass capacitor shown on Fig. 1 at the VBG output pin is then not needed.

Clock Source Options

By connecting pin XI to Ground, the on-chip oscillator is activated. The nominal output data rate when using the internal oscillator is 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

If accurate output data rate is needed, crystal or external reference clock can be used. A crystal can be directly connected across XI and XO pins. An external clock can be connected to XI pin, through a 20pF ac coupled capacitor. This external clock is not required to be a square wave. It can come directly from the crystal output pin of the MCU chip, with amplitude as low as 150 mV.

When using a crystal or an external clock, the internal oscillator is automatically powered down.

Output Data Rate and Format

When using the on-chip oscillator, output data rate is typically 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

When using external clock or crystal, output data rate is directly proportional to the clock or crystal frequency. Using 11.0592MHz clock or crystal results in an accurate 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1) output data rate.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24 bit range, the output data will be saturated at 80000h (MIN) or 7FFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

Serial Interface

Pin PD_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, gain selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25th pulse at PD_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input and gain selection is controlled by the number of the input PD_SCK pulses (Table 3). PD_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input channel	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 3 Input Channel and Gain Selection

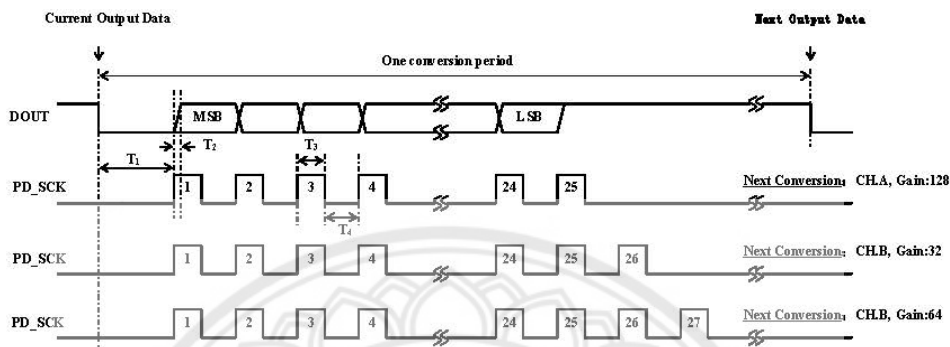


Fig.2 Data output, input and gain selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T ₁	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T ₂	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T ₃	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T ₄	PD_SCK low time	0.2	1		μs

Reset and Power-Down

When chip is powered up, on-chip power on rest circuitry will reset the chip.

Pin PD_SCK input is used to power down the HX711. When PD_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

powered down. When PD_SCK returns to low, chip will reset and enter normal operation mode.

After a reset or power-down event, input selection is default to Channel A with a gain of 128.

Application Example

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX711. It uses on-chip oscillator (XI=0), 10Hz output data rate (RATE=0). A Single power supply (2.7~5.5V) comes directly from MCU power supply. Channel B can be used for battery level detection. The related circuitry is not shown on Fig. 1.

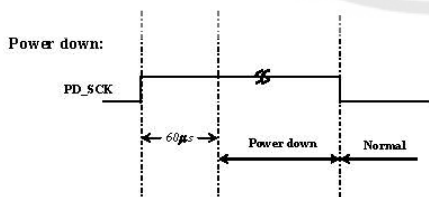


Fig.3 Power down control

When PD_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX711 enters power down mode (Fig.3). When internal regulator is used for HX711 and the external transducer, both HX711 and the transducer will be

Reference PCB Board (Single Layer)

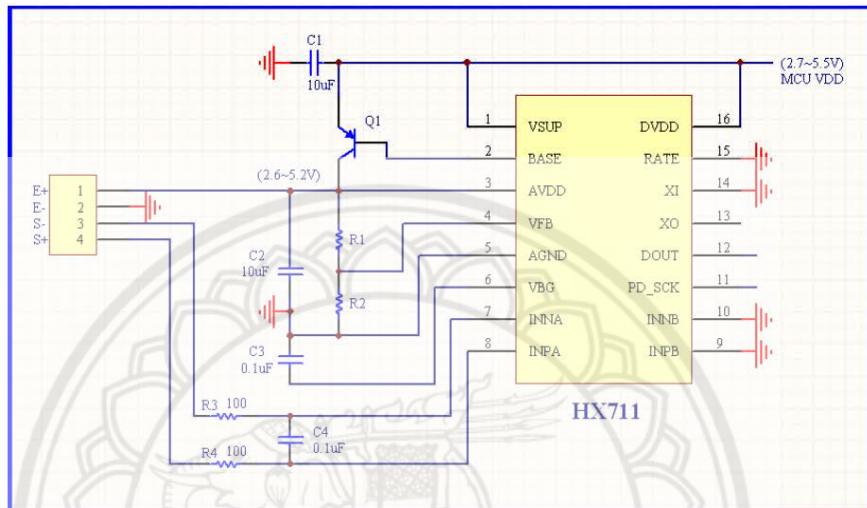


Fig.4 Reference PCB board schematic

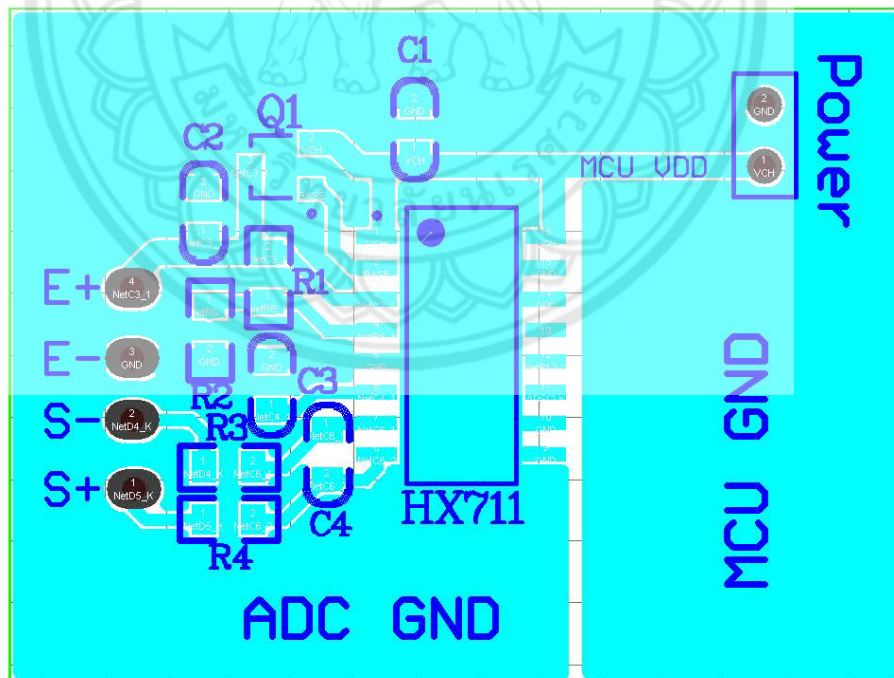


Fig.5 Reference PCB board layout

รูปที่ ๖.6 HX711 Data sheet

Reference Driver (Assembly)

```

/*-----*/
Call from ASM:      LCALL  ReaAD
Call from C:      extern unsigned long ReadAD(void);
                  :
                  :
                  unsigned long data;
                  data=ReadAD();
                  :
                  :
/*-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX711ROM    segment code
rseg       HX711ROM

sbit       ADDO = P1.5;
sbit       ADSK = P0.0;
/*-----*/
OUT:      R4, R5, R6, R7  R7=>LSB
/*-----*/

ReadAD:
  CLR  ADSK      //AD Enable (PD_SCK set low)
  SETB ADDO      //Enable 51CPU I/O
  JB   ADDO,$    //AD conversion completed?
  MOV  R4,#24
ShiftOut:
  SETB ADSK      //PD_SCK set high (positive pulse)
  NOP
  CLR  ADSK      //PD_SCK set low
  MOV  C,ADD0    //read on bit
  XCH  A,R7      //move data
  RLC  A
  XCH  A,R7
  XCH  A,R6
  RLC  A
  XCH  A,R6
  XCH  A,R5
  RLC  A
  XCH  A,R5
  DJNZ R4,ShiftOut //moved 24BIT?
  SETB ADSK
  NOP
  CLR  ADSK
  RET
  END

```

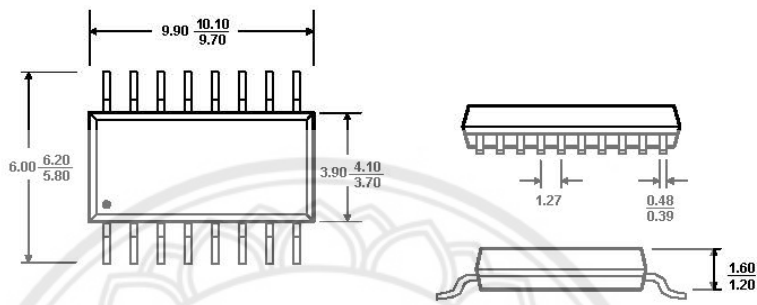
รูปที่ ๗.7 HX711 Data sheet

Reference Driver (C)

```
//-----
sbit ADDO = P1^5;
sbit ADSK = P0^0;
unsigned long ReadCount(void) {
    unsigned long Count;
    unsigned char i;
    ADDO=1;
    ADSK=0;
    Count=0;
    while(ADDO);
    for (i=0;i<24;i++) {
        ADSK=1;
        Count=Count<<1;
        ADSK=0;
        if(ADDO) Count++;
    }
    ADSK=1;
    Count=Count^0x800000;
    ADSK=0;
    return (Count);
}
```

รูปที่ ซ.8 HX711 Data sheet

Package Dimensions



Typ MAX Unit: mm
MIN

SOP-16L Package

รูปที่ ช.9 HX711 Data sheet

