

# RMXplorer

## LAB1 : Sensor

---

### Name

- |                 |          |             |
|-----------------|----------|-------------|
| ● นางสาวณัฐณิชา | ณัดกิจ   | 66340500016 |
| ● นายณัฐพล      | อินคำดา  | 66340500017 |
| ● นางสาวเพลงพิณ | ขวัญจิรา | 66340500036 |

### Objective

- เพื่อออกแบบการทดลองโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการทดลองและวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง สมเหตุสมผล และน่าเชื่อถือ โดยสามารถเข้าใจหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง
- เพื่อออกแบบการทดลองโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการทดลองอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ โดยใช้อุปกรณ์เครื่องมือไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller
- เพื่อศึกษาความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางพิสิเก็ตของเซ็นเซอร์

## สารบัญ

## สารบัญภาพ

## สารบัญตาราง

## การทดลองที่ 1 Potentiometer

### 1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Potentiometer แต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลอง
- 1.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของกับระยะทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer

### 1.2 สมมติฐาน

- 1.2.1 ระยะทางการเคลื่อนที่ขององศาการหมุนของ Potentiometer แต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลอง ส่งผลต่อ แรงดันไฟฟ้าของ โดย Potentiometer แต่ละชนิดมีลักษณะการตอบสนองที่แตกต่างกัน
- 1.2.2 กราฟเบรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage กับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ Potentiometer เคลื่อนที่หรือหมุนไปจากการทดลองมีความสอดคล้องกับ กราฟที่ได้จาก Datasheet

### 1.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 1.3.1 ตัวแปรต้น : ระยะทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer, ชนิดของ Potentiometer
- 1.3.2 ตัวแปรตาม : เปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage
- 1.3.3 ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Potentiometer อยู่ที่ 3.3 V, อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะทดลอง, วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.4.1 เลื่อนหรือหมุน Potentiometer หมายถึง การเลื่อนหรือหมุน Potentiometer เพิ่มครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์

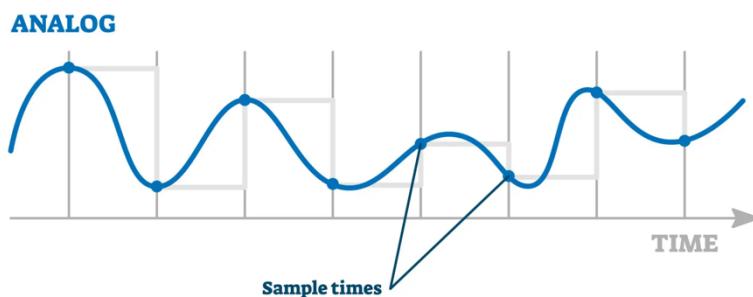
### 1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 1.5.1 Output Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น V
- 1.5.2 Input Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น V
- 1.5.3 Linear Potentiometer Type A หมายถึง Potentiometer PTA6043-2015DPA103
- 1.5.4 Linear Potentiometer Type B หมายถึง Potentiometer PTA6043-2015DPB103
- 1.5.5 Rotary Potentiometer Type A หมายถึง Potentiometer PDB181-K420K-103A2
- 1.5.6 Rotary Potentiometer Type B หมายถึง Potentiometer PDB181-K420K-103B
- 1.5.7 Rotary Potentiometer Type C หมายถึง Potentiometer PDB181-K420K-103C

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.1.1 สัญญาณแอนะล็อก

สัญญาณแอนะล็อก หมายถึง สัญญาณข้อมูลแบบต่อเนื่อง มีขนาดสัญญาณไม่คงที่ โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นโค้งต่อเนื่องกันไป



รูปที่ 1 สัญญาณแอนะล็อก

ที่มา : <https://crossroadenergy.com/understanding-the-difference-between-analog-and-digital-signals/>

### 1.6.1 สัญญาณดิจิทัล

สัญญาณดิจิทัล หมายถึง สัญญาณข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง มีขนาดสัญญาณคงที่ ซึ่งอาจมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบสลับไปมาระหว่างจำนวนไม่ต่อเนื่องของขนาดสัญญาณ โดยปกติมักแทนด้วยขนาดของสัญญาณที่แสดงสถานะเป็น 0 และ 1

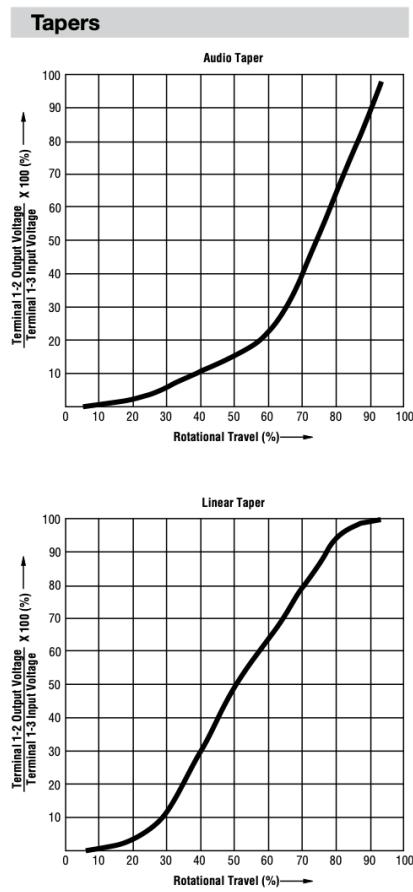


รูปที่ 2 สัญญาณดิจิทัล

ที่มา : <https://crossroadenergy.com/understanding-the-difference-between-analog-and-digital-signals/>

### 1.6.2 Linear Potentiometer

Electrical Characteristics	
Taper	..... Linear, audio
Standard Resistance Range	..... 1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance	..... $\pm 20\%$
Residual Resistance	..... 500 ohms or 1 % max.
Insulation Resistance	..... Min. 100 megohms at 250 V DC
Environmental Characteristics	
Operating Temperature	..... -10 °C to +50 °C
Power Rating, Linear	
15 mm	..... 0.05 W (0.025 W Dual Gang)
20 mm	..... 0.1 W (0.05 W)
30 mm	..... 0.2 W (0.1 W)
45 mm	..... 0.25 W (0.125 W)
60 mm	..... 0.25 W (0.125 W)
Power Rating, Audio	
15 mm	..... 0.025 W (0.015 W Dual Gang)
20 mm	..... 0.05 W (0.025 W)
30 mm	..... 0.1 W (0.05 W)
45 mm	..... 0.125 W (0.06 W)
60 mm	..... 0.125 W (0.06 W)
Maximum Operating Voltage, Linear	
15 mm	..... 100 V DC
20-60 mm	..... 200 V DC
Maximum Operating Voltage, Audio	
15 mm	..... 50 V DC
20-60 mm	..... 150 V DC
Withstand Voltage, Audio	
.....	1 Min. at 300 V AC
Sliding Noise	..... 100 mV maximum
Tracking Error	..... 3 dB at -40 to 0 dB
Mechanical Characteristics	
Operating Force	..... 30 to 250 gf
Stop Strength	..... 5 kgf min.
Sliding Life	..... 15,000 cycles
Soldering Condition	
.....	350 °C max. within 3 ± 0.5 seconds
Travel	..... 15, 20, 30, 45, 60 mm



รูปที่ 3 Datasheet ของ Linear Potentiometer

ที่มา : <https://www.mouser.com/datasheet/2/54/pta-778345.pdf>

#### 1.1.1.1. ประเภท : Low Profile Slide Potentiometer

#### 1.1.1.2. ความคลาดเคลื่อนจากตัวถ่วง : $\pm 20\%$

### 1.6.3 Rotary Potentiometer

#### Electrical Characteristics

Taper..... Linear, audio  
 Standard Resistance Range ..... 1 K ohms to 1 M ohms  
 Standard Resistance Tolerance..... $\pm 20\%$   
 Residual Resistance ..... 1 % max.

#### Environmental Characteristics

Operating Temperature ...-10 °C to +50 °C  
 Power Rating

Linear .....	0.2 watt
Dual Section.....	0.125 watt
Audio.....	0.1 watt
Dual Section.....	0.06 watt

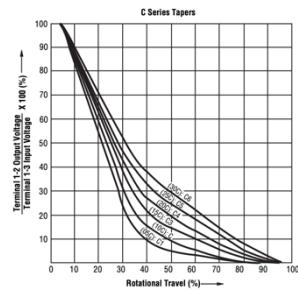
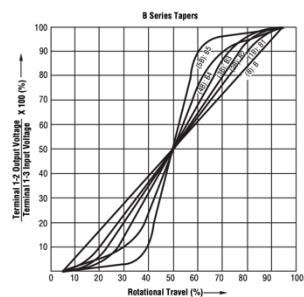
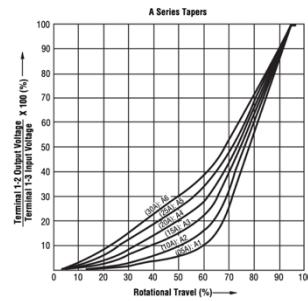
Maximum Operating Voltage

Linear .....	200 V
Audio.....	150 V

Sliding Noise ..... 47 mV max.

#### Mechanical Characteristics

Mechanical Angle ..... 300 °  $\pm 5$  °  
 Rotational Torque ..... 10 to 150 gf-cm  
 Detent Torque ..... 150 to 500 g-cm  
 Stop Strength ..... 5 kg-cm min.  
 Rotational Life ..... 15,000 cycles  
 Soldering Condition ..... 260 °C max. within 3 seconds  
 Hardware ..... One flat washer and mounting nut supplied per potentiometer with bushing



รูปที่ 4 Datasheet ของ Rotary Potentiometer

ที่มา : <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

#### 1.1.1.3. ประเภท : Rotary Potentiometer

1.1.1.4. ความคลาดเคลื่อนจากตัวต้านทาน :  $\pm 20\%$

1.1.1.5. ความคลาดเคลื่อนทางกลจากมุก :  $\pm 5\%$

### 1.7 วิธีดำเนินการทดลอง

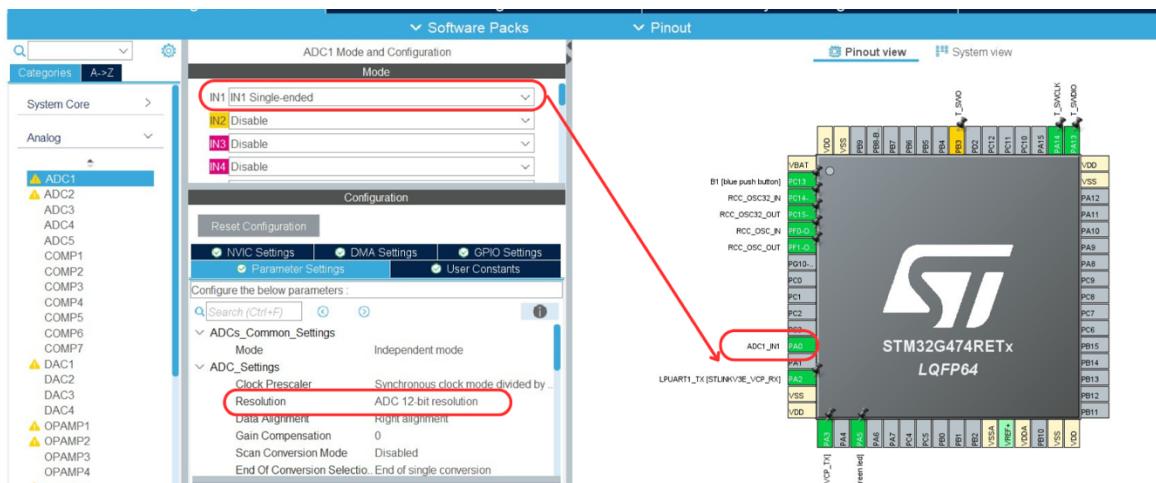
จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Potentiometer และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า ข้าวกับบรรยายทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer จึงทำการเก็บข้อมูลของเปอร์เซ็นต์ โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage จากโปรแกรม Simulink และ MATLAB และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage กับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ Potentiometer เคลื่อนที่หรือหมุนไป เพื่อทำการวิเคราะห์ผล และนำไปเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จาก Datasheet

## 1.8 วัสดุอุปกรณ์

- 1.8.1 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 1.8.2 Potentiometer PTA6043-2015DPA103
- 1.8.3 Potentiometer PTA6043-2015DPB103
- 1.8.4 Potentiometer PDB181-K420K-103A2
- 1.8.5 Potentiometer PDB181-K420K-103B
- 1.8.6 Potentiometer PDB181-K420K-103C
- 1.8.7 PotenXplorer จำนวน 1 ชุด – ฐานสามารถบรรจุอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer, 3D-Print, ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทกเตอร์
- 1.8.8 สายจ้มเปอร์

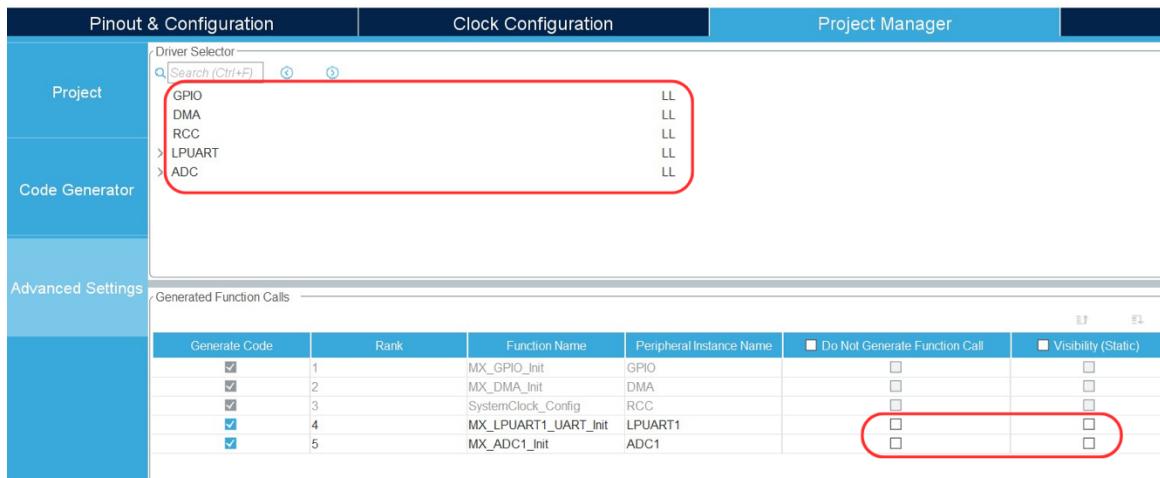
## 1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.9.1 ติดตั้งบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับบอร์ด PotenXplorer และจ่ายไฟขนาด 3.3 V จากบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้าที่ขา 1 ต่อ GND ที่ขา 3 และต่อ A0 ที่ขา 2 ของ Potentiometer
- 1.9.2 ตั้งค่า Nucleo STM32G474RE เพื่อใช้ในการอ่านค่าสัญญาณจาก Potentiometer โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5 การตั้งค่า Nucleo STM32G474RE

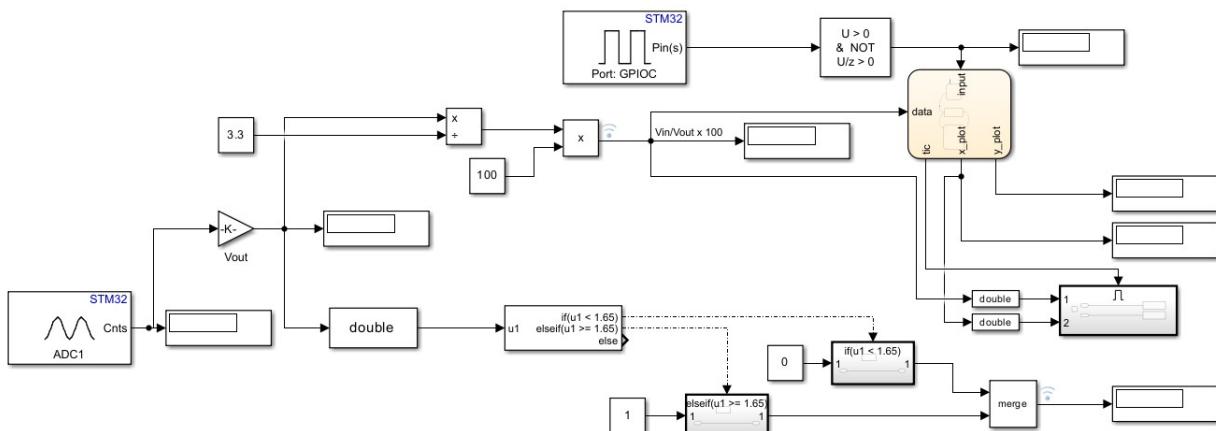
เริ่มจากการตั้งค่า Nucleo STM32G474RE ในโปรแกรม STM32CubeMX ให้สามารถอ่านค่าจาก Potentiometer ได้ โดยกำหนดให้รับข้อมูลเข้ามาผ่านขา PAC



รูปที่ 6 การกำหนดข้อมูลที่ Nucleo STM32G474RE รับเข้ามา

กำหนดให้ข้อมูลของ Potentiometer ที่ Nucleo STM32G474RE รับเข้ามาเป็นโหมด Low Power และเป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

1.9.3 เขียนโปรแกรมด้วย Simulink เพื่อเก็บเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ของ Potentiometer แต่ละรุ่นที่ได้จาก Nucleo STM32G474RE โดยกำหนดให้ เมื่อกดปุ่ม B1 บน STM32G474RE จะทำการเก็บค่าทุก ๆ 1 ms จากนั้นนำค่าที่เก็บได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage กับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ Potentiometer เคลื่อนที่หรือหมุนไป โดยมีรายละเอียดดังนี้



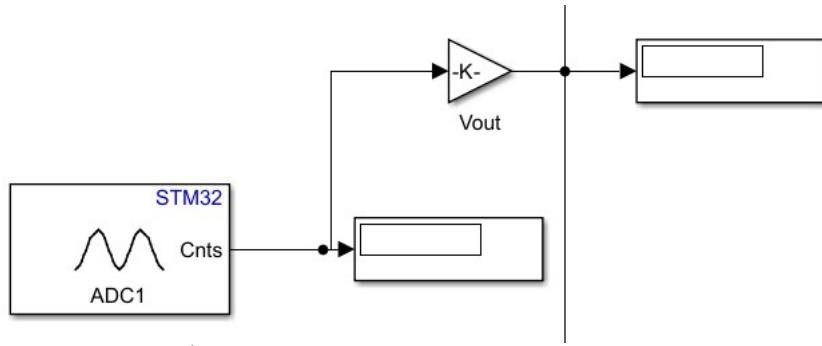
รูปที่ 7 โปรแกรม Simulink

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก Potentiometer เป็นสัญญาณแอนalog โดยมีความละเอียดสูงสุด 12 bits และ Nucleo STM32G474RE อ่านค่าสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัล จึงต้องแปลงค่าจาก 12 bits สู่ แรงดันไฟฟ้า 0-3.3 V โดยการเทียบบัญชีตรายางค์ และมีสมการคำนวณดังนี้

$$V_{out \text{ (analog)}} = \frac{V_{out \text{ (digital)}}}{2^n - 1} \times V_{in}$$

- โดยที่  $V_{out \text{ (analog)}}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบแอนะล็อก มีหน่วยเป็น V  
 $V_{out \text{ (digital)}}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัล มีหน่วยเป็น V  
 $V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น V  
 $n$  คือ ขนาด Bit ของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

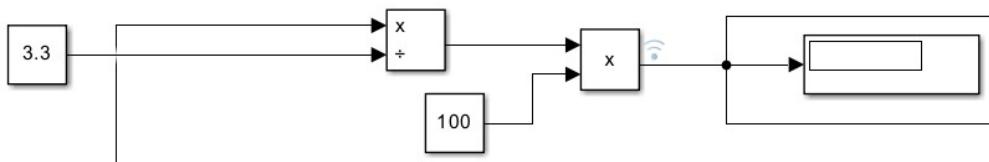
$$\text{จะได้ว่า } V_{out \text{ (analog)}} = \frac{V_{out \text{ (digital)}}}{4095} \times 3.3$$



รูปที่ 8 การหา Output Voltage ในรูปแบบแอนะล็อก

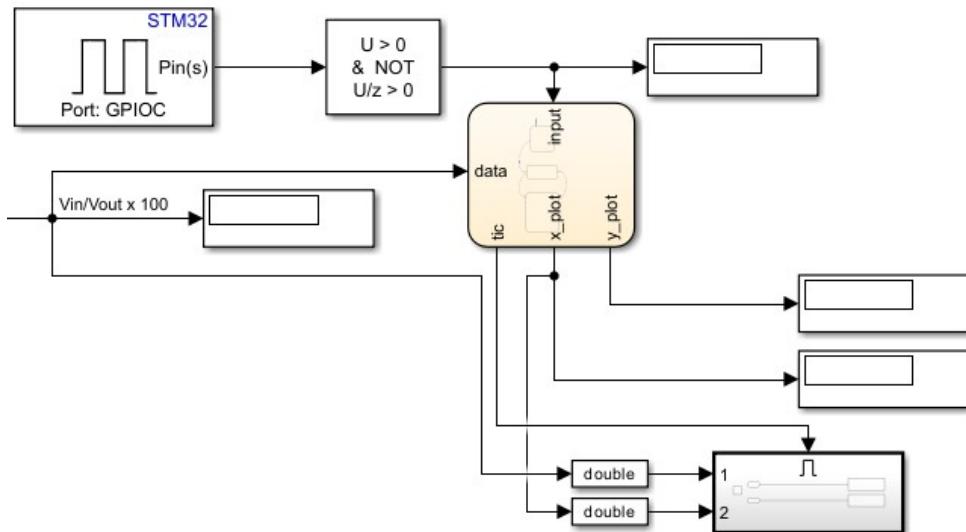
จาก Datasheet ที่แสดงถึงคุณลักษณะของ Potentiometer ด้วยการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage กับเบอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ Potentiometer เคลื่อนที่หรือหมุนไป จึงทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{V_{out \text{ (analog)}}}{V_{in}} \% = \frac{V_{out \text{ (analog)}}}{V_{in}} \times 100$$

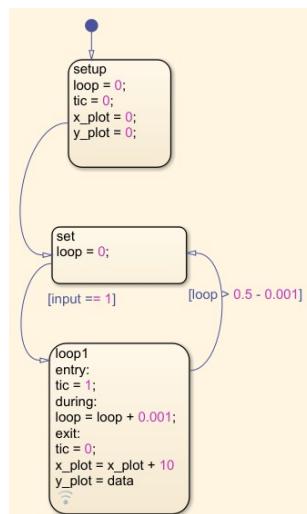


รูปที่ 9 การหาอัตราส่วนของ Output Voltage ต่อ Input Voltage

เนื่องจากค่า Output Voltage ที่อ่านได้มีค่าที่ไม่คงที่ จึงทำการเก็บค่าในแต่ละตำแหน่งเป็นจำนวน 500 ค่า โดยที่เก็บค่าทุก ๆ 1 ms และทำการหาค่าเฉลี่ยเมื่อเก็บค่าได้ครบ 500 ค่า เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นเฉลี่ยจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ที่ได้จากการหมุนกับระยะทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer เพื่อวิเคราะห์ผล



รูปที่ 10 การหาค่าเฉลี่ยอัตราส่วนของ Output Voltage ต่อ Input Voltage และสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผล



รูปที่ 11 Chart สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ

1.9.4 กดปุ่ม B1 บน Nucleo STM32G474RE เมื่อทำการเลื่อนหรือหมุน Potentiometer โดย Potentiometer แบบตรงเลื่อนตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ที่ Potentiometer สามารถเลื่อนได้ และ Potentiometer แบบหมุนเริ่มหมุนจากซ้ายสุด แล้วหมุนตามเข็มนาฬิกาไปจนสุด ซึ่งคือหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ที่ Potentiometer สามารถหมุนได้ เพื่อเก็บเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage และทำชาจันครบ 100 เปอร์เซ็นต์

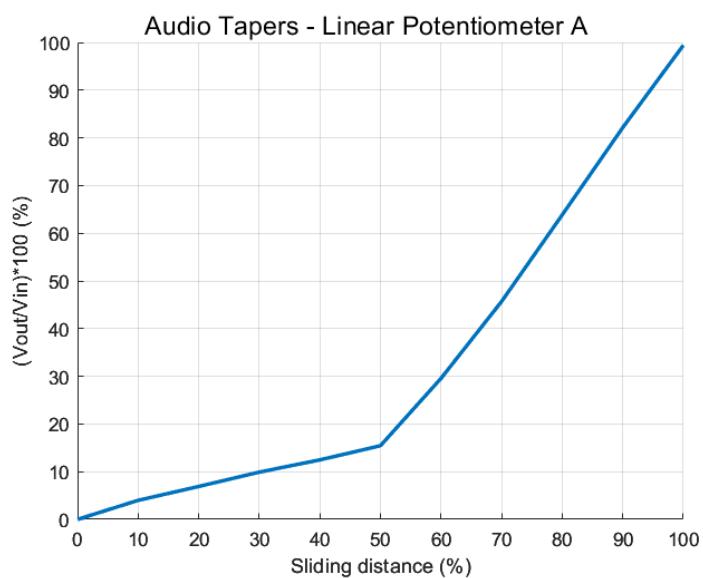
1.9.5 ทำชาจันครบทุกชนิดของ Potentiometer จากนั้นนำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟจาก Datasheet และนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

## 1.10 ผลการทดลอง

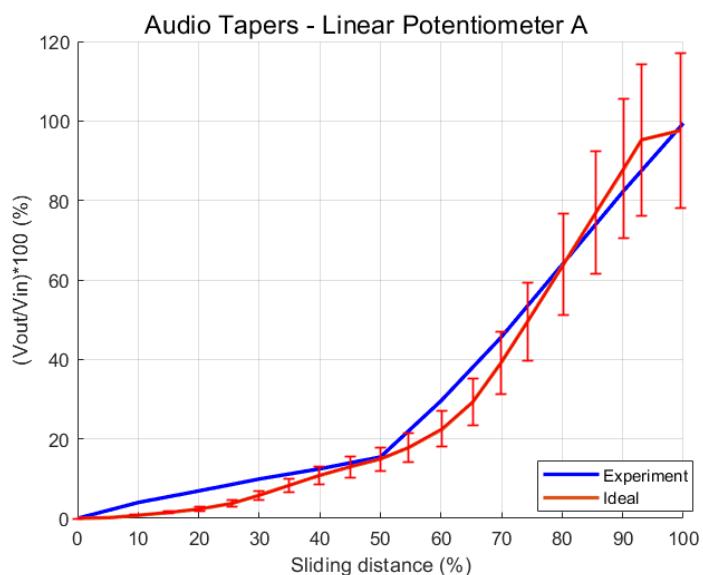
จากการเก็บค่าเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage จาก Potentiometer แต่ละชนิด และนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของตำแหน่งที่ Potentiometer เคลื่อนที่หรือหมุนไป ทำให้ได้ผลดังนี้

เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของ Potentiometer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$	0	3.987	6.897	9.906	12.472	15.443	29.570	45.693	63.838	82.159	99.422

ตารางที่ 1 ค่าของเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ในแต่ละตำแหน่งของ Linear Potentiometer Type A



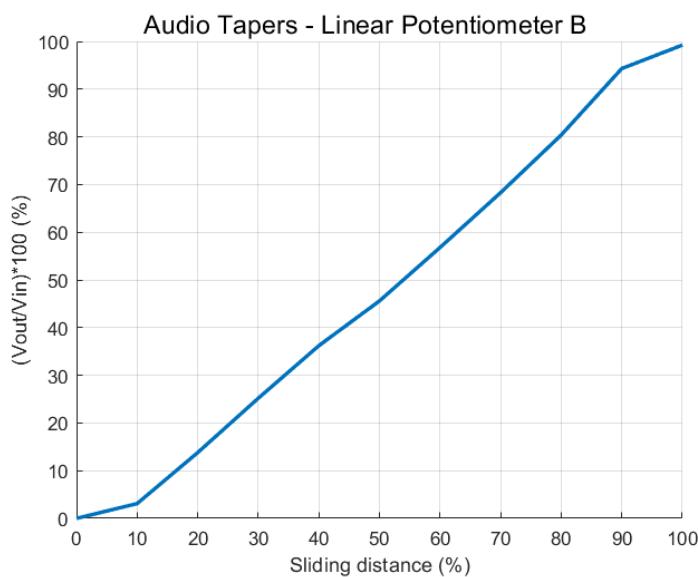
รูปที่ 12 กราฟของ Linear Potentiometer Type A



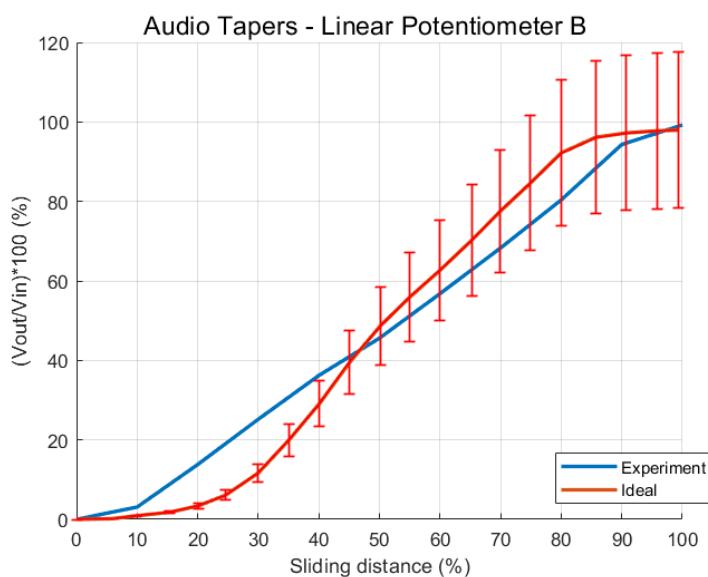
รูปที่ 13 กราฟของ Linear Potentiometer Type A เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Datasheet

เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของ Potentiometer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$	0	3.095	13.794	25.188	36.210	45.587	56.796	68.295	80.381	94.320	99.238

ตารางที่ 2 ค่าของเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ในแต่ละตำแหน่งของ Linear Potentiometer Type B



รูปที่ 14 กราฟของ Linear Potentiometer Type B

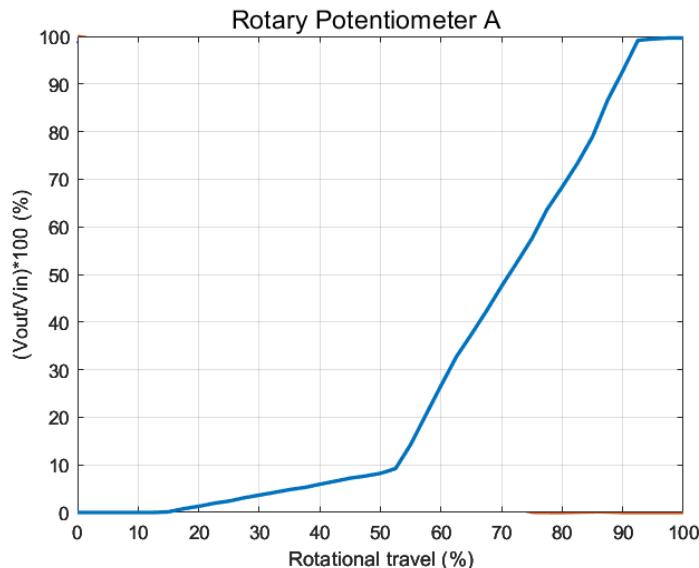


รูปที่ 15 กราฟของ Linear Potentiometer Type B เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Datasheet

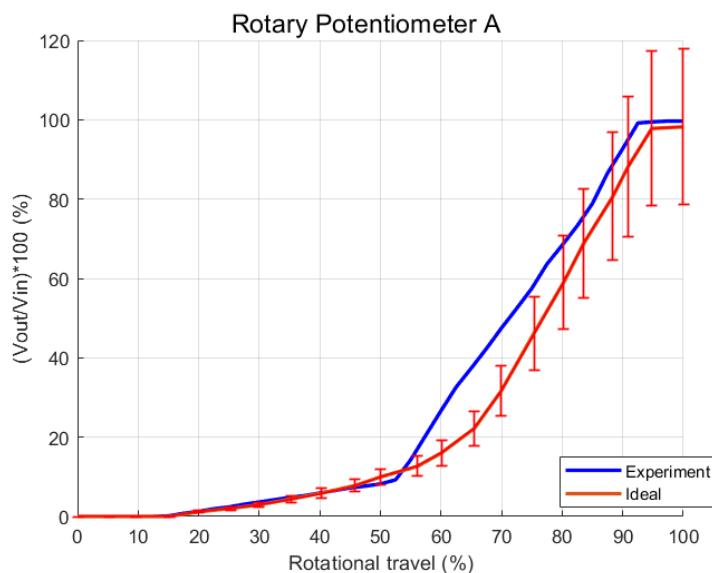
เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของ Potentiometer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-------------------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	1.298	3.645	5.924	8.210	26.652	47.536	68.365	92.734	99.663	
10											
20											
30											
40											
50											
60											
70											
80											
90											
100											

ตารางที่ 3 ค่าของเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ในแต่ละตำแหน่งของ Rotary Potentiometer Type A



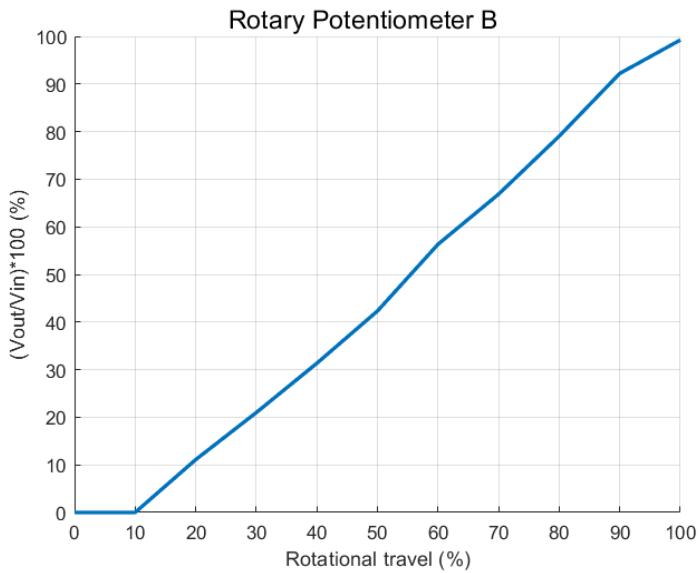
รูปที่ 16 กราฟของ Rotary Potentiometer Type A



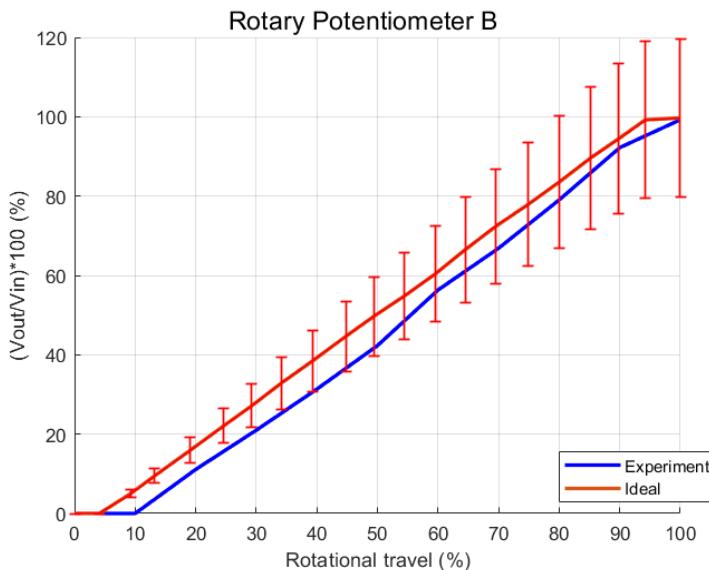
รูปที่ 17 กราฟของ Rotary Potentiometer Type A เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Datasheet

เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของ Potentiometer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$	0	0	11.100	20.986	31.342	42.315	56.331	66.858	79.041	92.041	99.242

ตารางที่ 4 ค่าของเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ในแต่ละตำแหน่งของ Rotary Potentiometer Type B



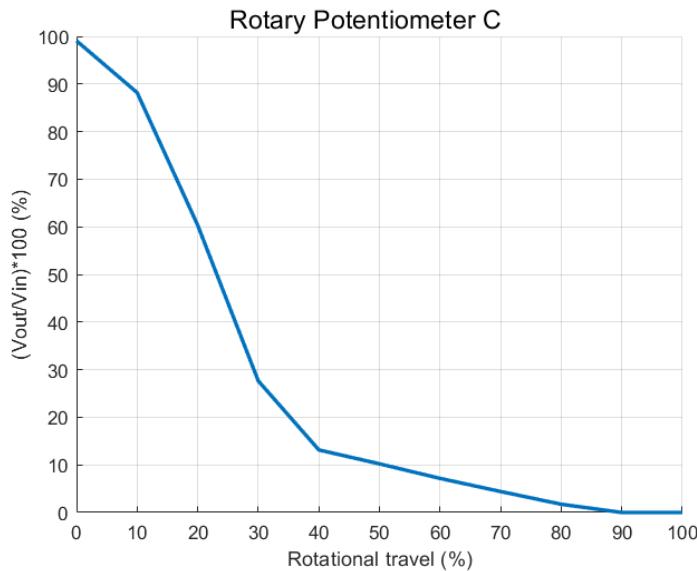
รูปที่ 18 กราฟของ Rotary Potentiometer Type B



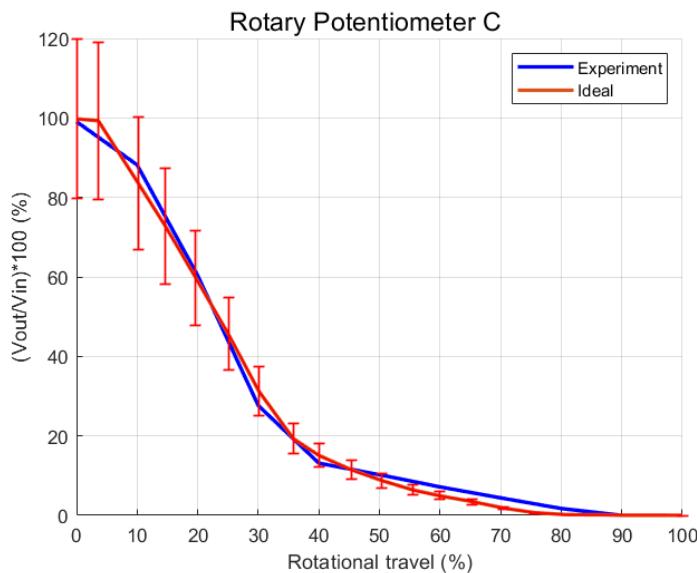
รูปที่ 19 กราฟของ Rotary Potentiometer Type B เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Datasheet

เปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของ Potentiometer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 \text{ (%)}$	99.070	88.189	60.331	27.640	13.138	10.218	7.159	4.403	1.728	0	0

ตารางที่ 5 ค่าของเปอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ในแต่ละตำแหน่งของ Rotary Potentiometer Type C



รูปที่ 20 กราฟของ Rotary Potentiometer Type C



รูปที่ 21 กราฟของ Rotary Potentiometer Type C เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ Datasheet

## 1.11 สรุปผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Potentiometer ที่มีขั้นิดแตกต่างกัน พบร่วมกันว่า Potentiometer แต่ละชนิดมีการตอบสนองของ Output Voltage แตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกรูปร่างของกราฟได้ดังนี้

1.11.1 Linear Potentiometer Type A และ Rotary Potentiometer Type A มีรูปร่างของกราฟเป็น Exponential Growth

1.11.2 Rotary Potentiometer Type C มีรูปร่างของกราฟเป็น Exponential Decay

1.11.3 Linear Potentiometer Type B และ Rotary Potentiometer Type B มีรูปร่างของกราฟเป็น Linear

## 1.12 อกิจกรรมผล

จากสมมติฐานที่ตั้งไว้ คือ ระยะทางการเคลื่อนที่และองศาการหมุนของ Potentiometer แต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลอง ส่งผลต่อ Output Voltage โดย Potentiometer แต่ละชนิดมีลักษณะการตอบสนองที่แตกต่างกัน และจากการทดลอง พบว่าเป็นจริงตามสมมติฐาน โดยสามารถจำแนกลักษณะการตอบสนองต่อระยะทางการเคลื่อนที่และองศาการหมุนได้จากรูปร่างของกราฟเปรียบเทียบระหว่างเบอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ที่ได้จากการหมุนกับระยะทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer ได้ 3 ประเภท ด้วยกัน คือ Exponential Growth, Exponential Decay และ Linear

จากการเปรียบเทียบกราฟเปรียบเทียบระหว่างเบอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ที่ได้จากการหมุนกับระยะทางการเคลื่อนที่หรือองศาการหมุนของ Potentiometer ทั้ง 5 ประเภท พบว่า กราฟของ Potentiometer ทั้ง 5 ชนิดที่ได้จากการทดลองและจาก Datasheet มีความสอดคล้องต่อกัน โดยที่บางตำแหน่งของกราฟมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า Standard Resistance Tolerance จาก Datasheet นั้นคือ  $\pm 20\%$  ซึ่งมีสาเหตุมาจากการ Mechanical Characteristics ที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนอยู่ที่  $\pm 5\%$  ความผิดพลาดจากการผลิตของมนุษย์ในการเลื่อนและหมุน Potentiometer และการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์จากการใช้งาน

## 1.13 ข้อเสนอแนะ

1.13.1 ควรเก็บข้อมูลของเบอร์เซ็นต์โดย Output Voltage ต่อ Input Voltage ให้มีความละเอียดมากขึ้น โดยการเลื่อนหรือหมุน Potentiometer เพิ่มครั้งละ 10 เบอร์เซ็นต์

1.13.2 ควรเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือวัดที่มีความจำเพาะมากขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้น เช่น มืออุปกรณ์บวกตำแหน่งการเลื่อนหรือหมุน Potentiometer

## 1.14 เอกสารอ้างอิง

1.14.1 <https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PTA6043-2015DPA103?qs=U%2FacTlguYxapXI1x524WqA%3D%3D&srltid=AfmBOorryz-SWg74J1volcZzjBdCK8QdFKVq7S1CmxSrnXtCNoyzrOK1>

1.14.2 [https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PDB181-K420K-103A2?qs=ZTdx6reOWK%2F91p994fqu2g%3D%3D&srltid=AfmBOoqCUuAHFx4S15DhmiLXMMVj2wv7ikMHvKpwJ8\\_OEwjlfM5YC5QA](https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PDB181-K420K-103A2?qs=ZTdx6reOWK%2F91p994fqu2g%3D%3D&srltid=AfmBOoqCUuAHFx4S15DhmiLXMMVj2wv7ikMHvKpwJ8_OEwjlfM5YC5QA)

## การทดลองที่ 2 Schmitt Trigger ของ Potentiometer

### 2.1 วัสดุประสงค์

2.1.1

### 2.2 สมมติฐาน

2.2.1

### 2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

2.3.1 ตัวแปรต้น :

2.3.2 ตัวแปรตาม :

2.3.3 ตัวแปรควบคุม :

### 2.4 นิยามคัพเพลฟะ

2.4.1

### 2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

2.5.1

### 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1

### 2.7 วิธีดำเนินการทดลอง

2.7.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Potentiometer ชนิด A และชนิด B

2.7.2 ติดตั้งและเชื่อมต่อบอร์ด Nucleo STM32G474RE บนบอร์ด PotenXplorer

2.7.3 เขียนโปรแกรมเพิ่มเติมด้วย MATLAB และ Simulink เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่ได้จากการหมุน Potentiometer เป็นสัญญาณดิจิทัลตามรูปแบบวงจร Schmitt Trigger

2.7.4 ทำการเคลื่อนหรือหมุน Potentiometer เพื่อบันทึกผลการทดลอง

### 2.8 วัสดุอุปกรณ์

2.8.1 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

2.8.2 Potentiometer PTA6043-2015DPA103

2.8.3 Potentiometer PTA6043-2015DPB103

2.8.4 Potentiometer PDB181-K420K-103A2

2.8.5 Potentiometer PDB181-K420K-103B

2.8.6 Potentiometer PDB181-K420K-103C

2.8.7 PotenXplorer จำนวน 1 ชุด – ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer, 3D-Print, ใช้สำหรับการวัดมุ่งการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทกเตอร์

2.8.8 สายจ้มเปอร์

## 2.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.9.1

## 2.10 ผลการทดลอง

2.10.1

## 2.11 สรุปผล

2.11.1

## 2.12 อภิปรายผล

2.12.1

## 2.13 ข้อเสนอแนะ

2.13.1

## 2.14 เอกสารอ้างอิง

## การทดลองที่ 3 Incremental Encoder

### 3.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและลักษณะสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder ในการวัดตำแหน่ง และความเร็วเชิงมุม
- 3.1.2 เพื่อศึกษาการอ่านสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder ด้วยวิธี QEI และ Polling Method และ ทำความสะอาดเข้าใจข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธี

### 3.2 สมมติฐาน

- 3.2.1 Incremental Encoder สามารถใช้วัดตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมได้อย่างแม่นยำ หากมีการคำนวณ Pulses Per Revolution และ Resolution อย่างถูกต้อง
- 3.2.2 QEI และ Polling Method สามารถอ่านค่า Encoder ได้ แม้ว่าทั้งสองวิธีจะมีข้อจำกัดที่ต่างกัน ซึ่งอาจ ส่งผลต่อความแม่นยำและความเร็วในการอ่านค่าขึ้นอยู่กับการตั้งค่าพารามิเตอร์และการใช้งาน

### 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 3.3.1 ตัวแปรต้น : การหมุน Rotary Encoder
- 3.3.2 ตัวแปรตาม : สัญญาณที่ได้จากการหมุน Rotary Encoder
- 3.3.3 ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Encoder อยู่ที่ 3.3 V, อุณหภูมิและสภาพแวดล้อมขณะทดลอง, วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง, การตั้งค่า STM32 และ Simulink

### 3.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

หมุน หมายถึง การหมุน Rotary Encoder หรือ BOURNS PEC11R-4220F-N0024

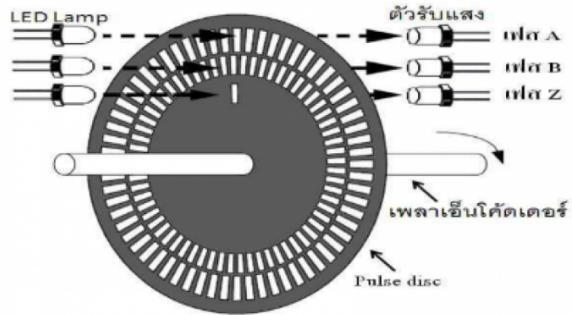
### 3.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 3.5.1 Encoder หมายถึง Incremental Encoder AMT103-V
- 3.5.2 Rotary Encoder หรือ ตัวหมุน หมายถึง BOURNS PEC11R-4220F-N0024
- 3.5.3 Persistent หมายถึง ความสามารถในการเก็บรักษาหรือคงอยู่ของข้อมูลหรือสถานะในระบบ

### 3.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

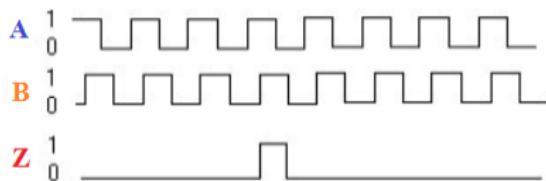
- 3.6.1 หลักการทำงานของ Incremental Encoder

Incremental Encoder คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดการหมุน และมีองค์ประกอบหลักคือ เเพล่า, Pulse Disc, Light Source และตัวรับแสง



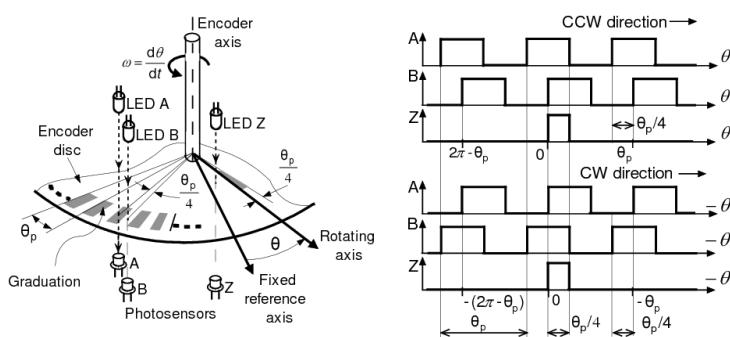
รูปที่ 22 องค์ประกอบของ Encoder

ทำงานโดยการสร้างสัญญาณพัลส์ตามการหมุนของเพลา ในแต่ละรอบการหมุน ชิ้ง Encoder จะสร้างพัลส์ที่มีรูปแบบเฉพาะซึ่งสามารถนับจำนวนได้เพื่อหาค่าตำแหน่ง โดยให้ข้อมูลในเชิงสัมพัทธ์ (Relative Position) หมายถึงการนับจำนวนพัลส์แทนตำแหน่งโดยรวม หากตำแหน่งถูกเรียกหรือหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม พัลส์จะถูกนับใหม่ การทำงานนี้ทำให้เหมาะสมกับการวัดการหมุนเป็นรอบ ๆ และการวัดความเร็วโดยการคำนวณจำนวนพัลส์ต่อหน่วยเวลา



รูปที่ 23 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ตามการหมุนของเพลา

ชิ้งเฟส A และ B จะห่างกัน 90 องศา ซึ่งทำให้ระบุทิศทางการหมุนได้ เช่น เมื่อเฟส A นำหน้าเฟส B หมายถึงการหมุนในทิศทางหนึ่ง และถ้าเฟส B นำหน้าแสดงว่าหมุนในอีกทิศทางหนึ่ง และ เฟส Z จะเป็นสัญญาณ 1 พัลส์ ต่อ 1 รอบ โดยสามารถนำไปอ้างอิงตำแหน่งได้



รูปที่ 24 หลักการทำงานของ Incremental Encoder

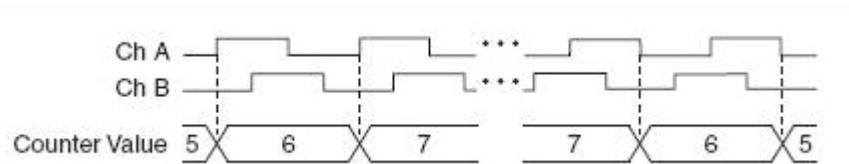
ความเร็วในการหมุนจะสัมพันธ์กับความถี่ของพัลส์ที่ออกมาก เมื่อหมุนเร็วจะเกิดพัลส์มากขึ้นและบ่อยขึ้น ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณความเร็วเชิงมุมได้ ทำให้มีอัตราจับการหมุนที่ความเร็วต่ำ สัญญาณอาจมีความกว้างของพัลส์ที่ชัดเจน ในขณะที่ความเร็วสูง สัญญาณอาจมีพัลส์ที่ใกล้กันมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในการนับพัลส์ถ้าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเร็วเกินไป นอกจากนี้ความละเอียดและจำนวนพัลส์ต่อการหมุน

(Pulses Per Revolution, PPR) เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้สามารถตรวจสอบการหมุนได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากถ้า PPR มีค่ามาก การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้เกิดพัลส์ใหม่ ทำให้สามารถติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุได้อย่างละเอียดและแม่นยำ จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการวัดตำแหน่งหรือความเร็วในระดับสูง นอกจากนี้ความละเอียดที่มากขึ้นยังทำให้การคำนวณความเร็วเชิงมุมแม่นยำยิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและคำนวณความเร็วได้ป้อยครั้งขึ้นตามจำนวนพัลส์ ทั้งนี้ สัญญาณดิจิตอลที่เกิดจาก Encoder ยังถูกออกแบบมาให้ทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดี จึงเหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง เช่น ระบบเครื่องจักรกลและหุ่นยนต์

### 3.6.2 รูปแบบการอ่านสัญญาณของ Quadrature Encoder

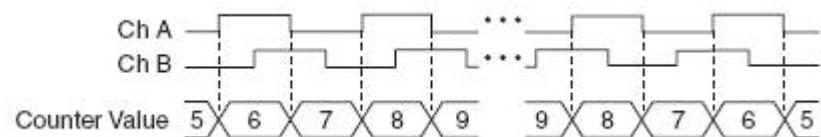
Quadrature Encoder สามารถอ่านค่าได้หลายรูปแบบ ได้แก่ x1 Encoding, x2 Encoding และ x4

3.6.2.1 x1 Encoding จะนับขอบสัญญาณขาขึ้นครั้งเดียวต่อรอบในช่องสัญญาณหนึ่ง เช่น ช่อง A เพื่อให้ได้ค่าความละเอียดต่ำสุด หมายความว่าใช้ในการที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง



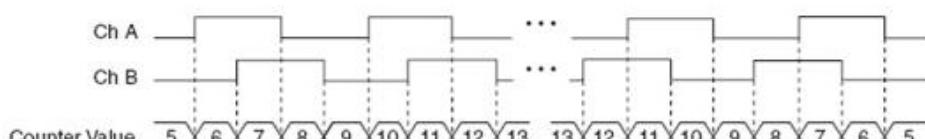
รูปที่ 25 การอ่านค่าแบบ x1 Encoding

3.6.2.2 X2 Encoding จะนับขอบสัญญาณทั้งขาขึ้นและขาลงของช่องสัญญาณหนึ่ง เช่น ช่อง A ทำให้ได้ความละเอียดเพิ่มขึ้นสองเท่าเมื่อเทียบกับ X1



รูปที่ 26 การอ่านค่าแบบ x2 Encoding

3.6.2.3 X4 Encoding จะนับขอบสัญญาณทั้งขาขึ้นและขาลงของทั้งสองช่อง (A และ B) รวมสี่ครั้งต่อรอบ ซึ่งทำให้ได้ค่าความละเอียดสูงสุด หมายความว่าใช้ในการที่ต้องการตรวจสอบตำแหน่งและความเร็วอย่างละเอียดและแม่นยำ



รูปที่ 27 การอ่านค่าแบบ x4 Encoding

โดย Incremental Encoder AMT103-V มีความละเอียดหรือ Quadrature Resolutions หลายระดับ เช่น 48, 96, 100, 125, 192 จนถึง 2048 PPR โดย Quadrature Resolutions คือค่าที่บอกจำนวนพัลส์ที่ Encoder สร้างขึ้นเมื่อหมุนไปหนึ่งรอบ โดยค่าพัลส์จะสัมพันธ์กับความละเอียดในการตรวจจับตำแหน่งการหมุน ถ้ามีจำนวนพัลส์มากก็จะสามารถระบุตำแหน่งได้ละเอียดมากขึ้น แต่ถ้าจำนวนน้อยการระบุตำแหน่งจะ helyab กว่า เช่น 48 PPR หมายถึงในหนึ่งรอบจะมี 48 ตำแหน่งที่ Encoder สามารถระบุตำแหน่งได้ หรือแต่ละพัลส์จะเกิดขึ้นทุกๆ 7.5 องศา หรือ 2048 PPR หมายถึงในหนึ่งรอบจะมี 2048 ตำแหน่ง ซึ่งละเอียดกว่ามาก หรือแต่ละพัลส์จะเกิดขึ้นทุกๆ 0.176 องศาซึ่งค่าที่แสดงนี้เป็นค่าก่อนนำไปคูณตามการนับแบบ Quadrature ซึ่งหากใช้การนับแบบ X4 Encoding จะได้จำนวนพัลส์เพิ่มขึ้น 4 เท่า

### INCREMENTAL CHARACTERISTICS

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
channels	quadrature A, B, and X index				
waveform	CMOS voltage square wave				
phase difference	A leads B for CCW rotation [viewed from front]	90			degrees
quadrature resolutions <sup>1</sup>	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048				PPR
index <sup>2</sup>	one pulse per 360 degree rotation		0.25		degrees
accuracy					
quadrature duty cycle [at each resolution]	256, 512, 1024, 2048 48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 384, 400, 500 800, 1000	49 47 43	50 50 50	51 53 56	%

Notes:  
1. Resolution selected via adjustable DIP switch, pre-set to 2048 PPR. All resolutions are listed as pre-quadrature, meaning the final number of counts is PPR x 4.  
2. Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly (non-magnetic version available with 8 pulses per revolution).

รูปที่ 28 Datasheet ของ Incremental Encoder AMT103-V

### 3.6.1 Encoder mode บน Nucleo STM32G474RE

Encoder Mode บน STM32 เป็นโหมดที่ใช้สำหรับอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ Incremental Encoder ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับตำแหน่งและทิศทางการหมุน โดยปกติ Incremental Encoder จะมีสองช่องสัญญาณคือ ช่อง A และ ช่อง B ที่ส่งสัญญาณพัลส์แบบสี่เหลี่ยมออกมานะ เมื่อเวลาของ Encoder หมุน สัญญาณเหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามทิศทางและตำแหน่งการหมุน

Nucleo STM32G474RE มี Timer ที่สามารถตั้งค่าให้ทำงานในโหมด Encoder ได้ โดยโหมดนี้จะช่วยให้ STM32 สามารถนับพัลส์จากสัญญาณ A และ B ของ Encoder ได้ ทำให้สามารถคำนวณตำแหน่งและทิศทางการหมุนได้อย่างแม่นยำ ซึ่งหมายความว่าการใช้งานที่ต้องการควบคุมการหมุน เช่น ระบบควบคุมมอเตอร์ หรือ การวัดตำแหน่งเชิงกลของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถตั้งค่าได้หลายรูปแบบตามที่ต้องการใช้งาน

Timer type	Timer	Counter resolution	Counter type	Prescaler factor	DMA request generation	Capture/compare channels	Complementary outputs
High resolution timer	HRTIM	16-bit	Up	/1 /2 /4 (x2 x4 x8 x16 x32, with DLL)	Yes	12	Yes
Advanced motor control	TIM1, TIM8, TIM20	16-bit	Up, down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	4
General-purpose	TIM2, TIM5	32-bit	Up, down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	No

Timer type	Timer	Counter resolution	Counter type	Prescaler factor	DMA request generation	Capture/compare channels	Complementary outputs
General-purpose	TIM3, TIM4	16-bit	Up, down, Up/down	Any integer between 1 and 65536	Yes	4	No
General-purpose	TIM15	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	Yes	2	1
General-purpose	TIM16, TIM17	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	Yes	1	1
Basic	TIM6, TIM7	16-bit	Up	Any integer between 1 and 65536	Yes	0	No

รูปที่ 29 Datasheet ของ Nucleo STM32G474RE

โดยทั่วไปจะคำนวณหาตำแหน่ง (Position) จากจำนวนพลัสร์ที่นับได้จาก Encoder ซึ่งสามารถแปลงเป็นตำแหน่งเชิงมุมหรือระยะทาง โดยสามารถคำนวณได้จากการดังนี้

$$P = \frac{N_{\text{pulses}}}{PPR} \times \text{Gear Ratio}$$

เมื่อ  $P$  คือ ตำแหน่ง มีหน่วยเป็น รอบ

$N_{\text{pulses}}$  คือ จำนวนพลัสร์ที่ Encoder สร้างขึ้น ที่ถูกนับโดย Timer

$PPR$  คือ จำนวนพลัสร์ที่ Encoder จะสร้างขึ้นเมื่อหมุน 1 รอบเต็ม มีหน่วยเป็น PPR

*Gear Ratio* คือ อัตราทดเกียร์ที่ใช้กับระบบขับเคลื่อน

คำนวณความเร็วได้จาก

$$V = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

เมื่อ  $V$  คือ ความเร็ว มีหน่วยเป็น RPS

$\Delta P$  คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างการอ่านค่าใน 2 ช่วงเวลา หน่วย รอบ

$\Delta t$  คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง มีหน่วยเป็น s

ใน Nucleo STM32G474RE การเข้าถึงข้อมูลจาก Quadrature Encoder สามารถทำได้ด้วยสองวิธีหลัก ๆ คือ Quadrature Encoder Interface (QEI) และ Polling Method

Quadrature Encoder Interface (QEI) จะต้องกำหนดขา (Pins) ที่เชื่อมต่อกับสัญญาณ A และ B ของ encoder จากนั้นจะสามารถอ่านสัญญาณได้ โดยเมื่อ encoder หมุน สัญญาณ A และ B จะมีการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ Rising Edge และ Falling Edge ซึ่งจะทำการนับจำนวนการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ A และ B เพื่อรับตำแหน่งและทิศทางของการหมุนของ encoder

Polling Method ทำงานโดยการตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์หรือเซนเซอร์ในลูปซอฟต์แวร์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งต้องกำหนดขา GPIO สำหรับสัญญาณ A และ B ของ Encoder โดยตั้งค่าขาเหล่านี้เป็นพอร์ตอินพุต ซึ่งใน

แต่ละรอบของลูป Nucleo STM32G474RE จะใช้คำสั่งในการอ่านค่าจากขาสัญญาณ A และ B เพื่อตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ หากสัญญาณ A เปลี่ยนก่อน B แสดงว่าการหมุนเป็นไปในทิศทางหนึ่ง และถ้า B เปลี่ยนก่อน A แสดงว่าการหมุนเป็นไปในทิศทางอีกทิศทางหนึ่ง และระบบจะทำการนับตำแหน่งของ Encoder โดยขึ้นอยู่กับลำดับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ A และ B หากมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่ตั้งไว้ ระบบจะเพิ่มหรือลดค่าตำแหน่งตามการหมุน

โดยสามารถเปรียบเทียบระหว่าง Quadrature Encoder Interface (QEI) และ Polling Method ในการอ่านค่าจาก Encoder ได้ดังนี้

คุณสมบัติ	QEI	Polling Method
การทำงาน	อ่านค่าจาก encoder โดยอัตโนมัติในชาร์ดแวร์	อ่านค่าจาก encoder ในซอฟต์แวร์ในลูป
การใช้ทรัพยากร CPU	น้อย	สูง
การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง	เร็ว	ข้ามขึ้นอยู่กับความถี่ในการอ่าน
ความซับซ้อน	ซับซ้อนมากขึ้นในการตั้งค่า	ง่ายต่อการพัฒนา
ความแม่นยำ	สูง	อาจต่ำกว่า ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าการอ่าน

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบระหว่าง Quadrature Encoder Interface (QEI) และ Polling Method ในการอ่านค่าจาก Encoder

การใช้ MATLAB Simulink ร่วมกับ Polling Method ในการอ่านค่าจาก Encoder มีข้อจำกัดและข้อพิจารณาหลายข้อ โดย MATLAB Simulink อาจมีการจำกัดไฟล์เครื่องหรือบล็อกที่ไม่รองรับการใช้งานกับ Hardware หรือ Peripheral บางประเภท ซึ่งในบางกรณีอาจไม่มีบล็อกที่พร้อมใช้สำหรับการอ่านค่าจาก encoder โดยตรง อาจต้องใช้โค้ดที่กำหนดเอง (Custom Code) หรือการใช้บล็อกที่ไม่เหมาะสม และ Simulink อาจไม่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลที่ต้องการความเร็วสูง เช่น การอ่านค่าจาก Encoder ในเวลาจริง เนื่องจากการทำงานของ Simulink อาจมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการประมวลผลหากมีหลายโมดูล หรือบล็อกทำงานร่วมกัน อาจทำให้เกิดความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ ดังนั้นหากใช้ Polling Method ควรใช้ interrupts ร่วมด้วย ซึ่งอาจทำให้การตอบสนองดีกว่า ลดการใช้งาน CPU และช่วยให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น

การอ่านค่า Encoder ทั้ง 2 แบบ อาจเกิดการอ่านค่าที่ผิดพลาด โดยค่าที่ผิดพลาดจาก Quadrature Encoder Interface (QEI) สามารถเกิดได้จากการตั้งค่าที่ผิดพลาด การหมุนที่รวดเร็วเกินไปทำให้ QEI ตอบสนองไม่ทัน และอาจมีปัญหาจากชาร์ดแวร์ เช่น encoder เสียหายหรือมีการขัดข้องที่ตัวเชื่อมต่อ ทำให้ข้อมูลที่ส่งไปยัง QEI ผิดพลาด

ค่าที่ผิดพลาดจาก Polling Method สามารถเกิดได้จากการตั้งค่าที่ผิดพลาด เช่น การตั้งค่า GPIO Pins ไม่ถูกต้อง หรือการตั้งค่าความเร็วของ Timer และการตั้งค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการอ่านค่าอาจไม่เหมาะสม ทำ

ให้ข้อมูลที่อ่านไม่ถูกต้อง การหมุน Encoder ที่เร็วเกินไป ทำให้ระบบอาจไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ A และ B ได้ ทำให้สูญเสียพลัง

### 3.6.2 Home Configuration for Incremental Encoder

Home Configuration สำหรับ incremental encoder เป็นกระบวนการตั้งค่าระบบเพื่อให้รู้ตำแหน่งเริ่มต้น (หรือ Home Position) ของ Actuator หรือระบบที่ใช้ Encoder ในการวัดตำแหน่ง สามารถทำได้โดยการตั้งค่าให้ Actuator ไปยังจุดที่รู้จัก (Home Position) ซึ่งอาจใช้สวิตช์หรือเซ็นเซอร์ในการกำหนดตำแหน่งนี้ เมื่อสวิตช์ถูกเปิด เครื่องจักรจะหยุดและทำการบันทึกตำแหน่งนั้นเป็น Home Position ขณะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง Home ระบบจะใช้ encoder เพื่ออ่านค่าตำแหน่งที่แท้จริง และบันทึกค่าพลังที่นั้นไป เมื่อสวิตช์ Home ถูกกระตุ้น ระบบจะบันทึกค่าพลังในตำแหน่งนี้ไว้เพื่อใช้อ้างอิงในอนาคต หลังจากกำหนดตำแหน่ง Home เรียบร้อย ระบบสามารถใช้ค่าที่บันทึกได้ในการคำนวณตำแหน่งอื่น ๆ ในการทำงานต่อไป โดยการนำค่าที่อ่านได้จาก encoder มาลบค่าที่บันทึกไว้ในตำแหน่ง Home ดังสมการ

$$C_P = P_R - P_H$$

เมื่อ  $C_P$  คือ ตำแหน่งปัจจุบัน มีหน่วยเป็น รอบ

$P_R$  คือ จำนวนพลังที่ถูกนับได้ มีหน่วยเป็น Pulses

$P_H$  คือ จำนวนพลังที่ถูกนับได้เมื่อ Encoder ไปถึงตำแหน่ง Home หน่วย Pulses

Home Configuration เป็นสิ่งสำคัญในระบบที่ต้องการความแม่นยำและการควบคุมที่สอดคล้องโดยเฉพาะในเครื่องจักรที่ต้องกลับไปยังจุดเริ่มต้นก่อนเริ่มการทำงาน เช่น ในระบบ CNC ที่ต้องการกลับไปที่ตำแหน่ง Home เพื่อเริ่มการตัดเยื่อนใหม่

### 3.7 วิธีดำเนินการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Encoder และศึกษาความแตกต่างของการอ่านค่าที่ความละเอียดต่างกัน จึงทำการเก็บข้อมูลและนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณหาอัตราเร็ว และตำแหน่งจากการหมุนของ Encoder จากโปรแกรม Simulink และ MATLAB เพื่อทำการวิเคราะห์

### 3.8 วัสดุอุปกรณ์

3.8.1 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน

3.8.2 BOURNS PEC11R-4220F-N0024 จำนวน 1 อัน

3.8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

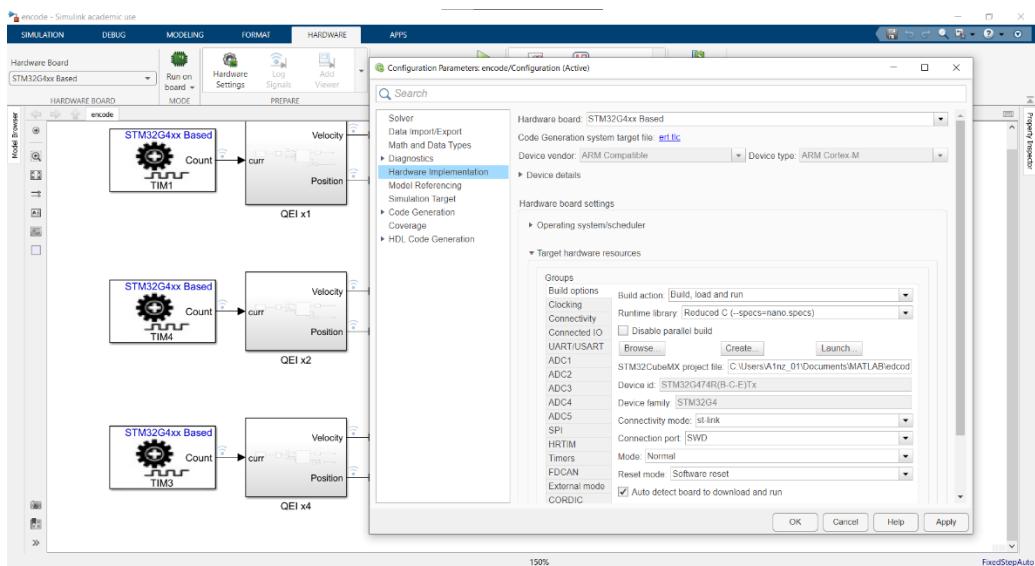
3.8.4 EncoderXplorer จำนวน 1 ชุด-ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Incremental Encoder,

3D-Print สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไม้ไผ่แทกเตอร์

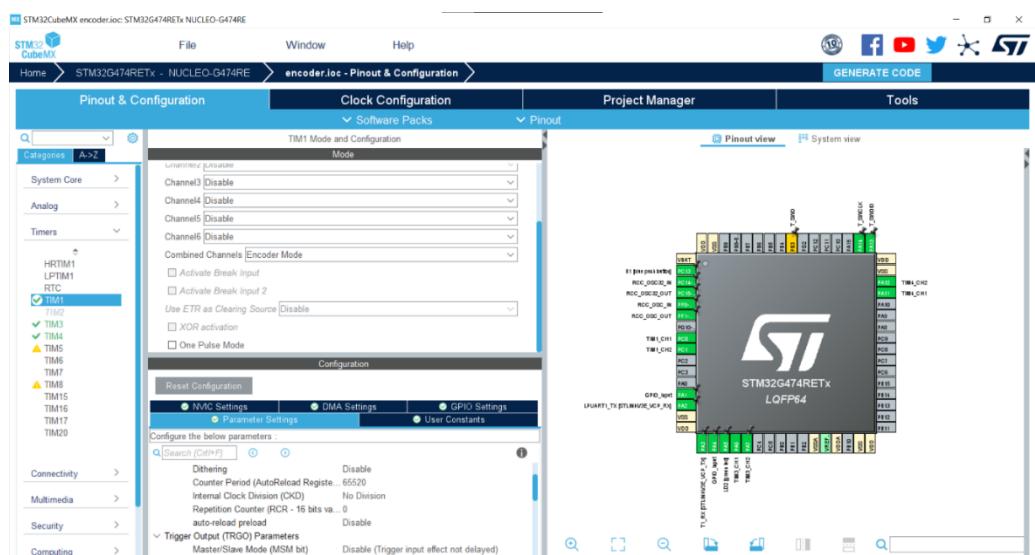
### 3.8.5 สายจำเปอร์

## 3.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.9.1 สร้างโปรเจค Simmulink และเปิดเข้าไปตั้งค่าบอร์ด Nucleo STM32G474RE

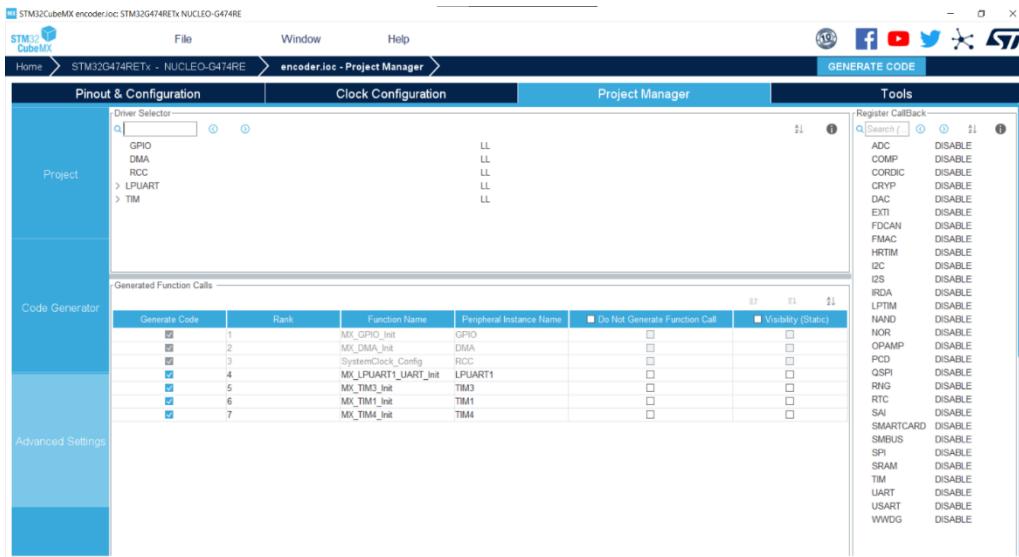


รูปที่ 30 การสร้างโปรเจค Simmulink



รูปที่ 31 การตั้งค่าบอร์ด Nucleo STM32G474RE

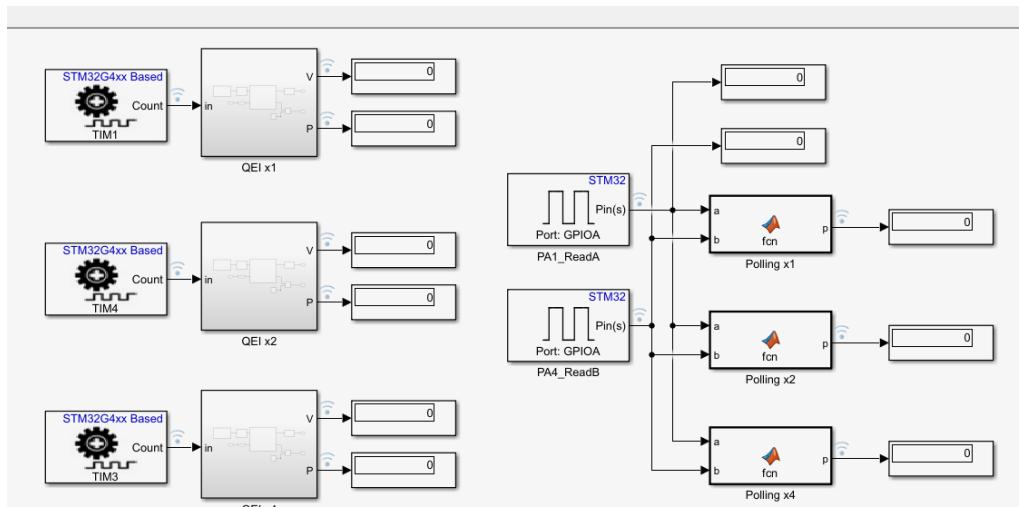
ตั้งค่าขาที่ต้องการใช้ในการอ่าน Encoder x1 x2 x4 และ A B โดยการเข้าไปยัง Timers และเลือก TIM ที่จะใช้ ตั้งค่า Combined Channels เป็น Encoder Mode จากนั้นเลือกชนิดของสัญญาณ Encoder ที่จะอ่าน และปรับค่าสูงสุดที่ Encoder อ่านได้เป็นค่ามากสุดที่ 1 รอบ ของ Encoder หารได้ลงตัว นั่นคือ 65520 และเสียบขาของ Encoder ตามช่องที่ระบุใน TIM



รูปที่ 32 การตั้งค่า Nucleo STM32G474RE ในการอ่าน Encoder วิธีต่าง ๆ

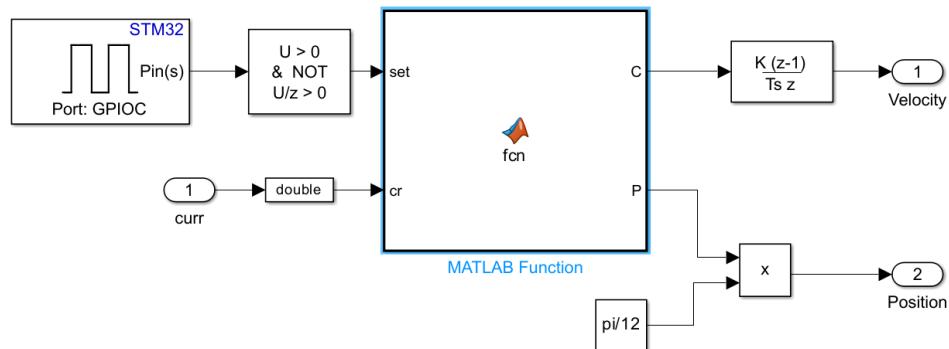
จากนั้นเข้าไปใน Project Manager เลือก Advanced Settings ทำการปิด Visibility (Static) เลือก TIM เป็น LL และเลือก GENERATE CODE

3.9.2 นำค่าที่ TIM1 มาเข้า Subsystem QEI x1 ที่กำหนดให้คำนวนหาค่า อัตราเร็ว และ ตำแหน่งโดยที่ตำแหน่งจะถูก set zero โดยการกดปุ่ม GPIOA13 บน Nucleo STM32G474RE



รูปที่ 33 นำค่า TIM1 เข้า Subsystem QEI x1

3.9.3 ทำการหมุน Rotary Encoder เพื่อรับค่าจาก Encoder มา และเก็บค่าเป็น Persistent ซึ่งค่าจะสามารถเก็บต่อไปได้เรื่อย ๆ ทำให้สามารถบุ๊คตำแหน่งแบบต่อเนื่องได้ และเมื่อกดปุ่มนบอร์ด set จะทำให้ตำแหน่งเป็น 0 และจะหาอัตราเร็วได้จากการ นำตำแหน่งปัจุบันมาเข้าสมการเพื่อหาอนุพันธ์ไม่ต่อเนื่อง Discrete Derivative โดยเทียบกับเวลาที่ Nucleo STM32G474RE ทำงาน



รูปที่ 34 การเก็บค่าแบบต่อเนื่อง

```

MATLAB Function
function [C,P] = fcn(set,cr)
persistent pr;
persistent hom;
persistent ps;
max = 2048;

if isempty(pr)
    pr = cr;
    hom = 0;
    ps = 0;
end

delta = cr - pr;

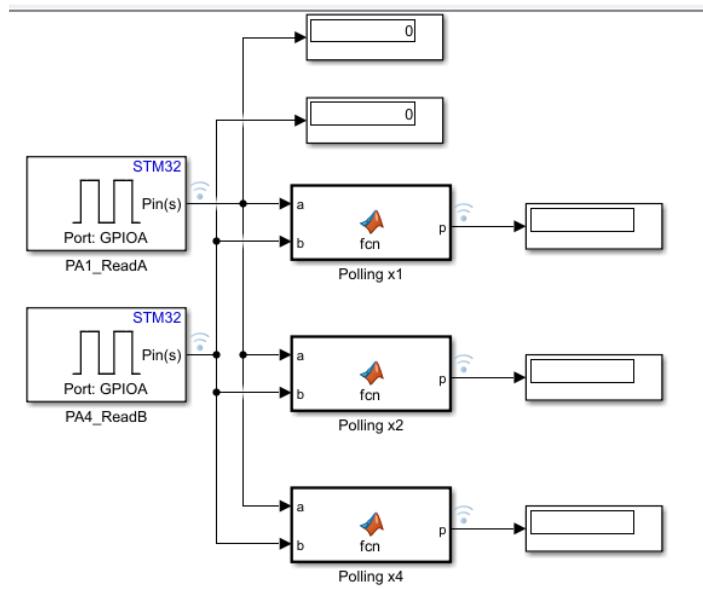
if delta <= -1*(max/2)
    delta = delta + max + 1;
elseif delta >= max/2
    delta = delta -max - 1;
end

if set
    hom = ps;
end
ps = ps + delta;
C = ps - hom;
pr = cr;
P = C;
end

```

รูปที่ 35 MATLAB Code ใน MATLAB Function

จากนั้นรับค่า A และ B ของ Encoder ผ่านขา PA1 กับ PA4 เข้ามาคำนวณตำแหน่ง โดยผ่าน Function Polling x1, Polling x2 และ Polling x4 ซึ่ง Function ทำงานโดยนับสัญญาณ A B และคำนวณอุกมาเป็นตำแหน่ง



รูปที่ 36 การรับค่า A และ B จาก Encoder เข้ามาคำนวณทำเห็น

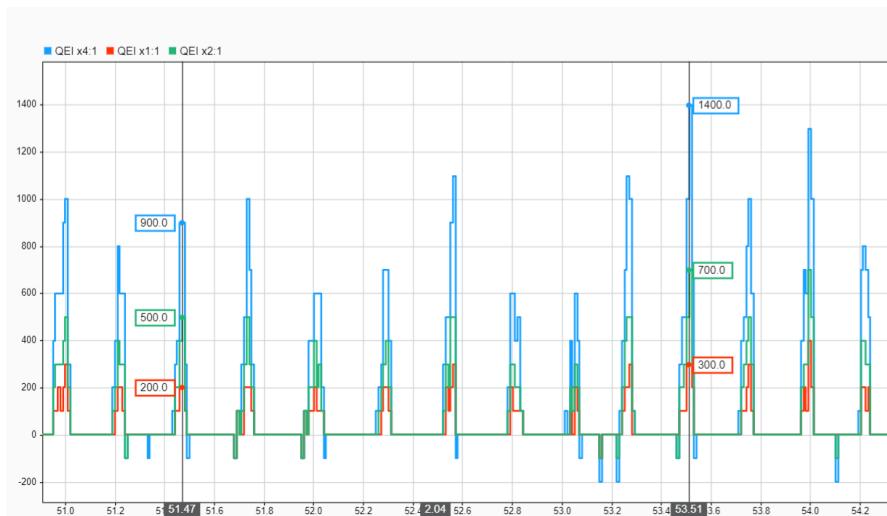
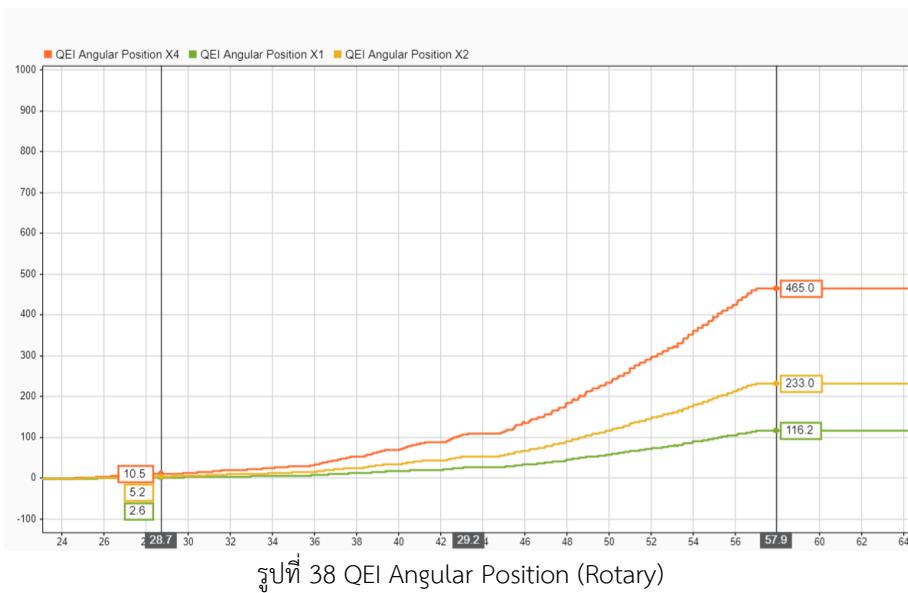
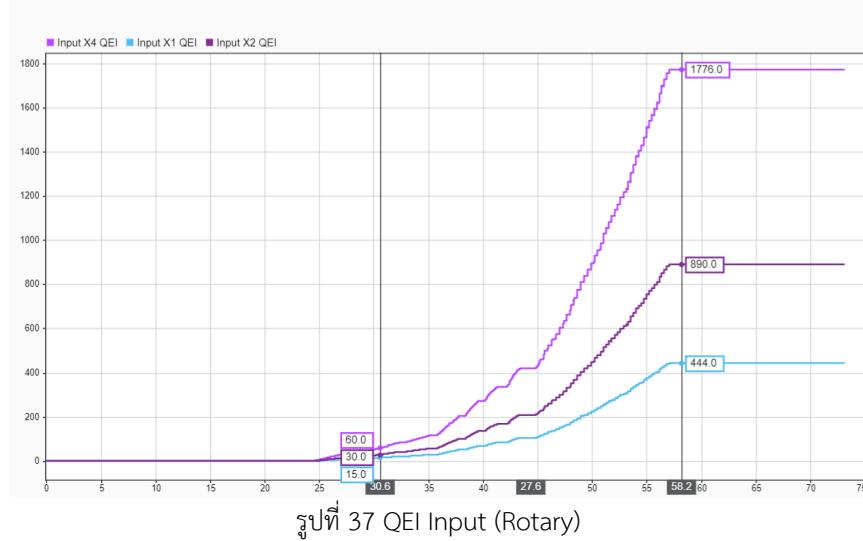
ใน Function X1 จะนับแค่ขอบขาขึ้นสัญญาณ A เมื่อสัญญาณนำหน้าจะบวกค่า

ใน Function X2 ใช้ทั้งขอบขึ้นและขอบลงของสัญญาณ A ในการนับจำนวนการหมุน ซึ่งจะเพิ่มความละเอียดเป็นสองเท่าของ X1 และใช้สถานะของสัญญาณ B ในการกำหนดทิศทาง

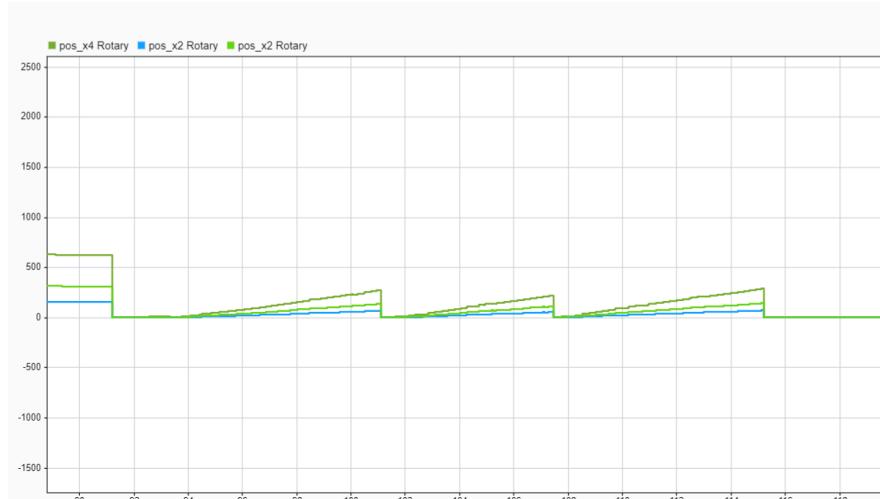
ใน Function X4 ใช้ทั้งขอบขึ้นและขอบลงของสัญญาณ A และสัญญาณ B โดยใช้ทั้งขอบขึ้นและขอบลงของสัญญาณ A ในการนับจำนวนการหมุนเพิ่ม และใช้สถานะของสัญญาณ B ในการกำหนดทิศทาง จากนั้นใช้ทั้งขอบขึ้นและขอบลงของสัญญาณ B ในการนับจำนวนการหมุน เพิ่มและใช้สถานะของสัญญาณ A ในการกำหนดทิศทาง ด้วยวิธีนี้จะสามารถเพิ่มความละเอียดได้ถึง 4 เท่า

### 3.9.4 เมื่อคำนวณหาอัตราเร็ว และคำนวณอุกਮากำหนดค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกันระหว่างความละเอียด X1 X2 และ X4

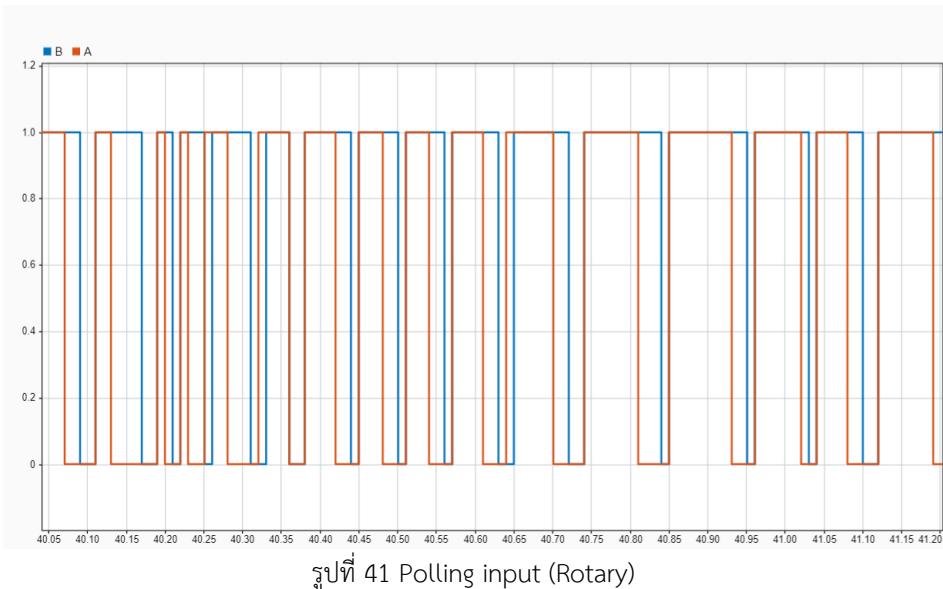
### 3.10 ผลการทดลอง



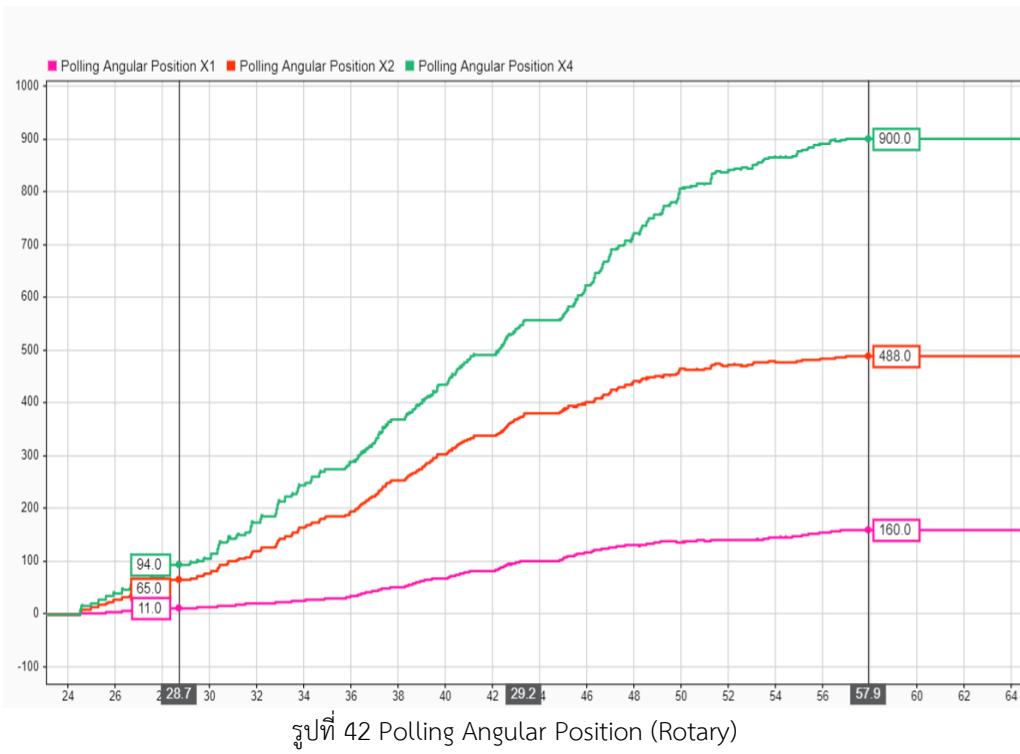
รูปที่ 39 QEI Angular Velocity (Rotary)



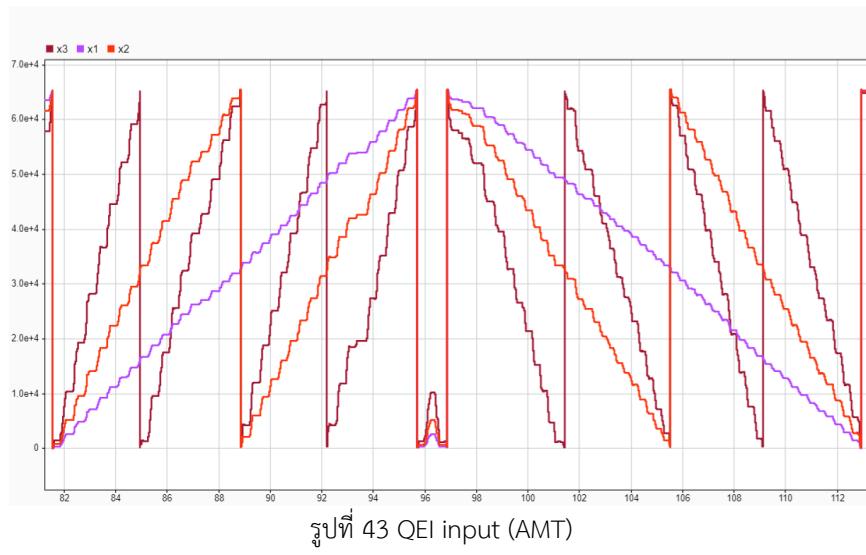
รูปที่ 40 Position set zero (Rotary)



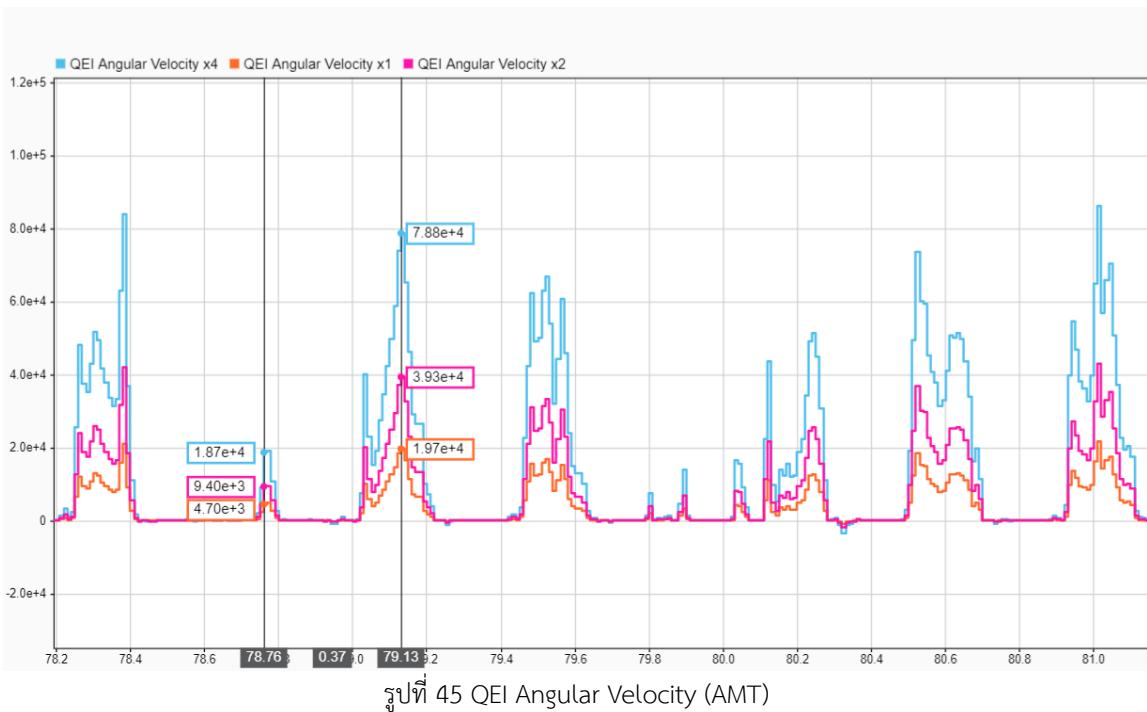
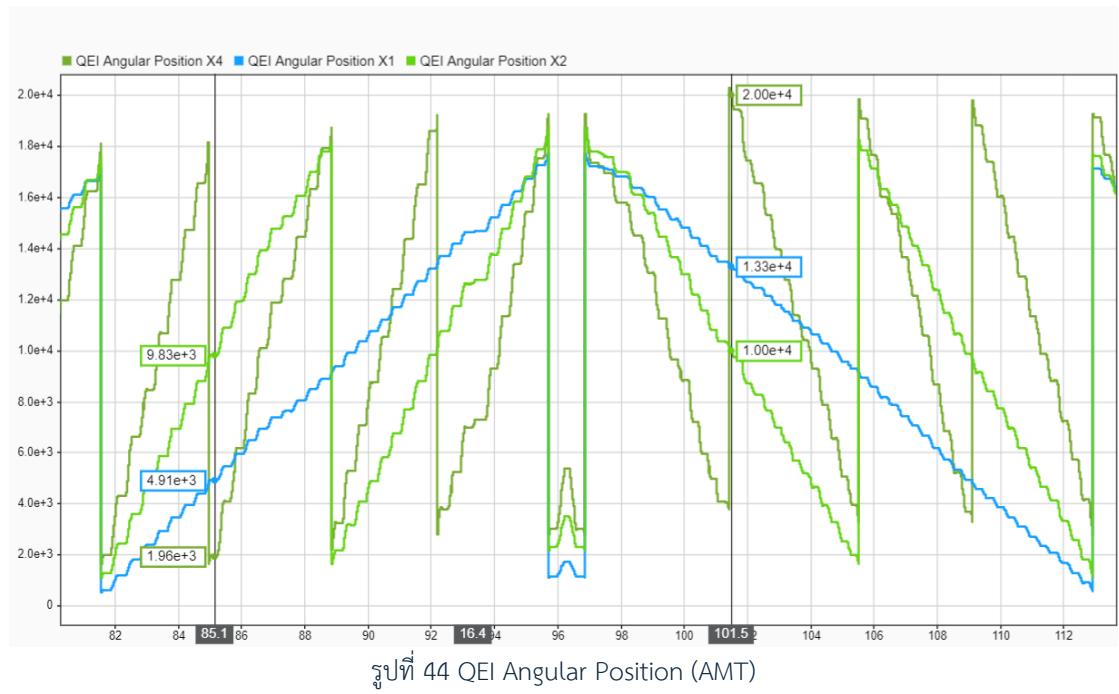
รูปที่ 41 Polling input (Rotary)

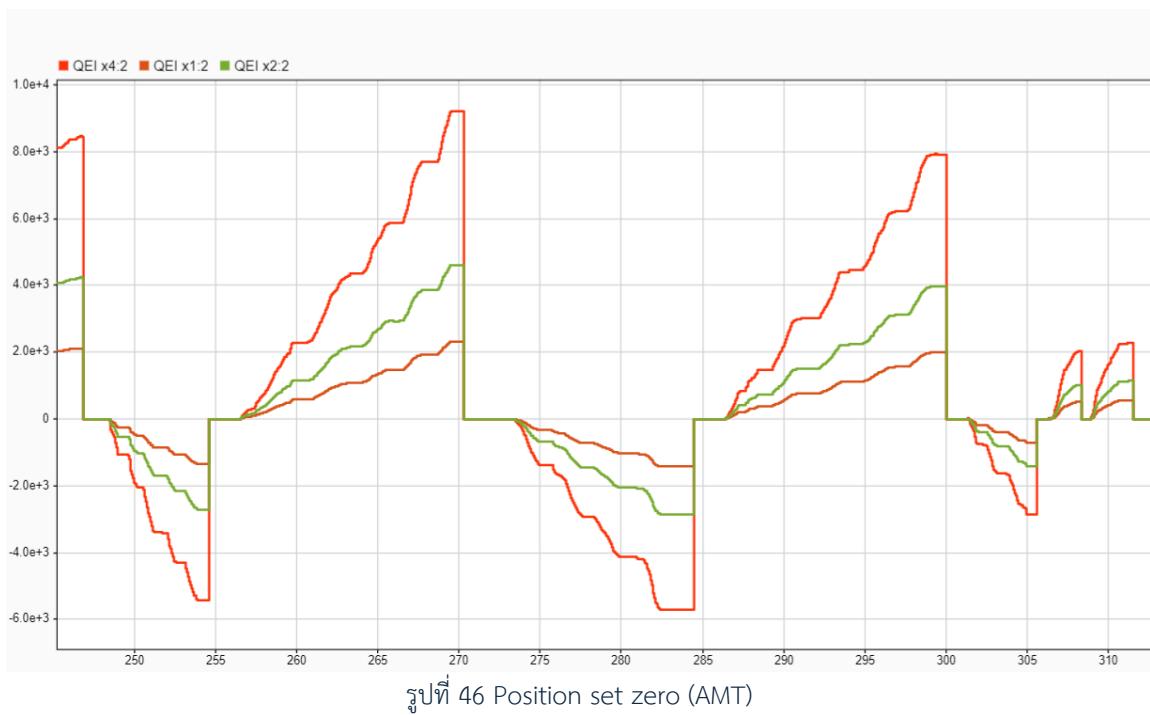


รูปที่ 42 Polling Angular Position (Rotary)

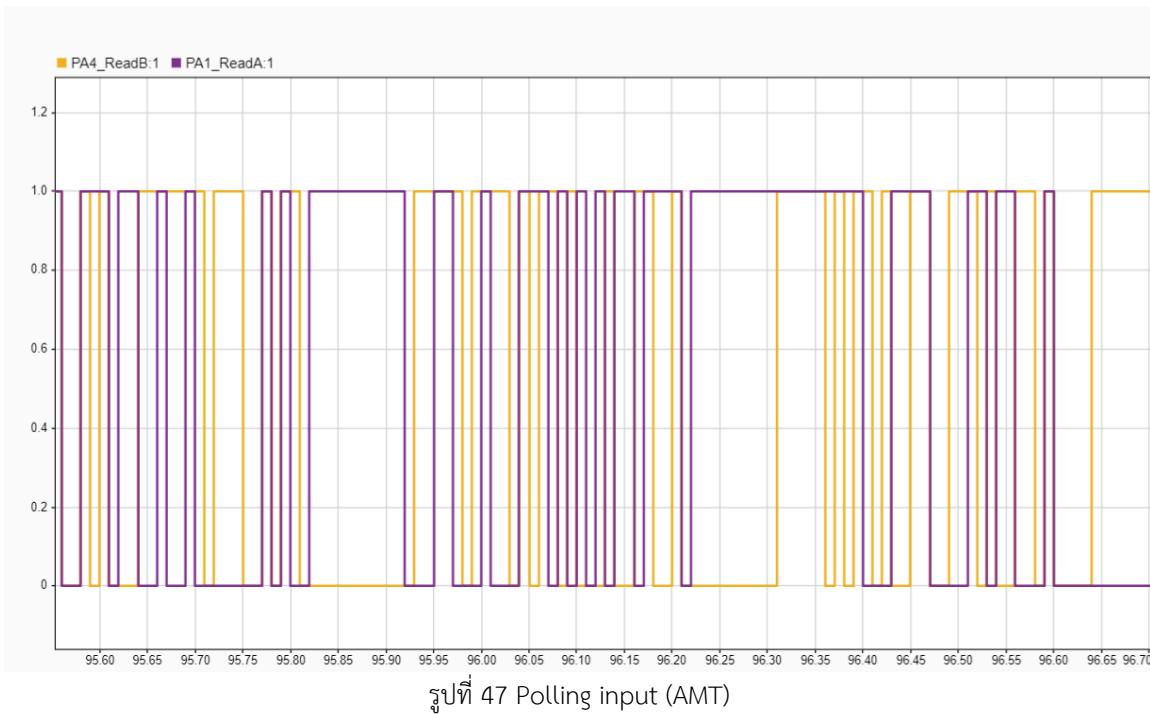


รูปที่ 43 QEI input (AMT)

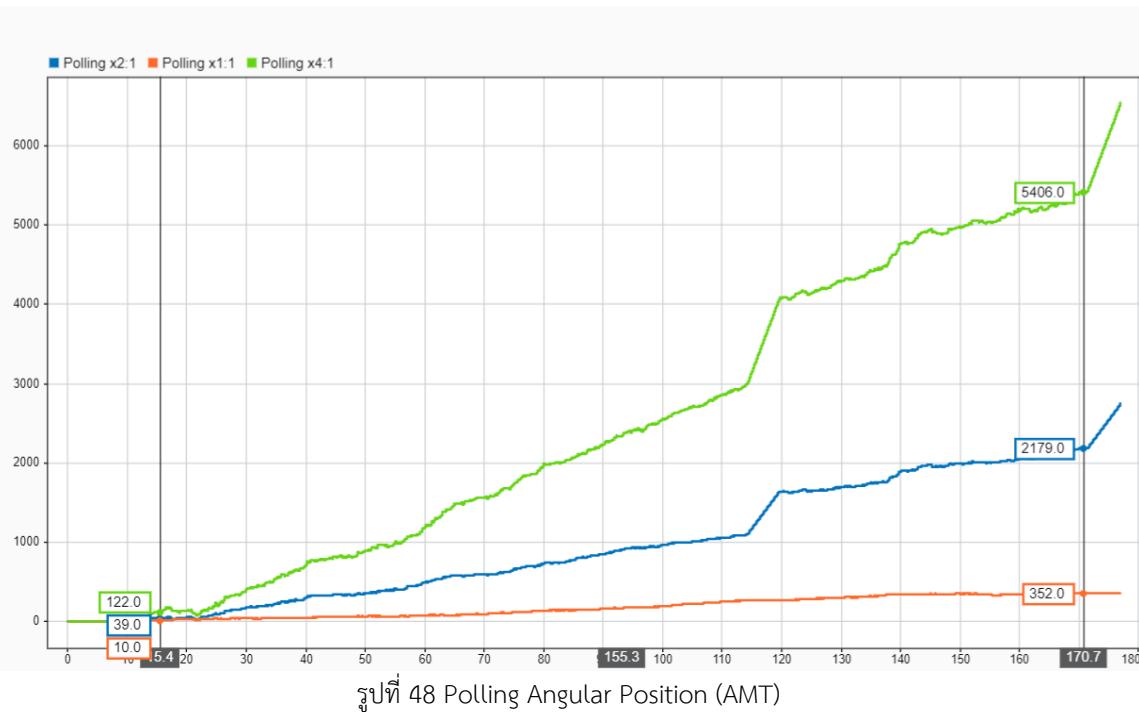




รูปที่ 46 Position set zero (AMT)



รูปที่ 47 Polling input (AMT)



### 3.11 สรุปผล

เมื่อพิจารณาค่าจากการอ่าน Encoder แบบ QEI พบร่วมตำแหน่งของการอ่านแบบ X4 มีค่าเป็น 4 เท่าของการอ่านแบบ X1 และเป็น 2 เท่าของการอ่านแบบ X2 แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราเร็วพบว่าการอ่านแบบ X4 มีความเร็วแนวยที่สุดรองลงมา คือ X2 และ X1 ดังนั้นความละเอียดในการประมวลผล X4 จะมีความถี่ในการประมวลผลมากที่สุดรองลงมาคือ X2 และ X1

และเมื่อพิจารณาค่าจากการอ่าน Encoder แบบ Polling พบร่วมตำแหน่งของการอ่านแบบ X4 มีค่าเป็น 2 เท่าของการอ่านแบบ X2 ทว่า X1 มีค่าที่ต่างออกไปจาก X4 และ X2 แต่ยังคงมีค่าที่แปรผันตามกัน และในช่วงต้น X4 มีค่าเป็น 4 เท่าของ X1 จนถึงช่วง 20 วินาทีหลังจากนั้นเมื่อค่าเพิ่มขึ้น X1 จึงเริ่มมีค่าที่ต่างออกไป

### 3.12 อภิปรายผล

จากสมมติฐานแรกที่ระบุว่า Incremental Encoder สามารถใช้วัดตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมได้อย่างแม่นยำ หากมีการคำนวน Pulses Per Revolution และ Resolution อย่างถูกต้อง ข้อมูลที่ได้จากการอ่าน Encoder แบบ QEI แสดงให้เห็นว่า การอ่านแบบ X4 มีความละเอียดสูงสุดและสามารถให้ค่าตำแหน่งที่แม่นยำกว่าการอ่านแบบ X2 และ X1 ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานนี้ การมีค่าตำแหน่งที่สัมพันธ์กันตามอัตราส่วน 4:2:1 ทำให้การวัดตำแหน่งในกรณีนี้มีความแม่นยำตามที่สมมติฐานได้ตั้งไว้ การพิจารณาค่าจากการอ่าน Encoder โดยคำนึงถึง Pulses Per Revolution และ Resolution จึงทำให้สามารถยืนยันสมมติฐานนี้ได้ว่าเป็นจริง

ในทางกลับกันสมมติฐานที่สองกล่าวว่า QEI และ Polling Method สามารถอ่านค่า Encoder ได้แม่นว่าทั้งสองวิธีจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำและความเร็วในการอ่านค่า ขึ้นอยู่กับการตั้งค่าพารามิเตอร์และการใช้งาน ข้อมูลที่ได้จากการอ่านแบบ Polling แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของการอ่านแบบ X4 มีค่าเป็น 2 เท่าของ X2 แต่ X1 มีค่าที่แตกต่างออกไปในบางช่วง แสดงให้เห็นว่าการอ่านค่าผ่าน Polling อาจมีความไม่เสถียร และอาจเกิดจากความล่าช้าในการ

ประมวลผลข้อมูล ซึ่งไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวไว้ว่า QEI และ Polling Method ควรมีความสามารถในการอ่านค่าที่สอดคล้องกันในทุกรูปนี้ โดยเฉพาะในช่วงเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ ยังพบว่าช่วงเริ่มต้น X4 มีค่าเป็น 4 เท่าของ X1 และถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจน แต่เมื่อเวลาผ่านไป ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเริ่มมีการแปรผันมากขึ้น ทำให้สามารถเห็นได้ว่าการอ่านแบบ Polling อาจมีข้อจำกัดในด้านความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำของการอ่านในระยะยาว

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการอ่านค่า Encoder แบบ QEI มีความละเอียดและเสถียรมากกว่าการแบบ Polling เพราะ การอ่านแบบ QEI จะรับค่าจาก Encoder และนำไปประมวลผลผ่าน Microcontroller ก่อนจะนำค่ามาใช้งาน ทำให้มีความละเอียด และเสถียรมากกว่าแบบ Polling ที่เป็นการรับค่าโดยตรงจาก Encoder มาใช้งานโดยไม่ได้ผ่านการ Filter จาก Microcontroller ส่งผลให้ค่าที่อ่านจากการอ่านแบบ Polling มีความเสถียรที่ต่ำ และทำให้ค่าตำแหน่งที่อ่านออกมายังไนแต่ ละความละเอียดมีค่าที่แตกต่างกันมากกว่าการอ่านแบบ QEI นำมาซึ่งเหตุผลที่ว่า ทำไม่ค่า X1 จากการอ่านแบบ Polling จึงมีค่าที่แตกต่างออกไป เนื่องจากค่า X1 มีความล่าในการอ่านต่ำที่สุดทำให้ส่งผลต่อการคำนวณค่าตำแหน่งในช่วงความถี่ต่ำที่ไม่มีการอ่านค่า โดยค่าที่ต้องคำนวณอาจถูกมองข้ามได้ ซึ่งที่ X4 และ X2 มีค่าที่แปรผันได้ตรงตามกันเป็นเพราะมีความถี่ในการอ่านสูงขึ้น

### 3.13 ข้อเสนอแนะ

- 3.13.1 การหมุน Encoder แบบ AMT103-V จะต้องใช้ความระมัดระวังในการหมุน เพราะหากหมุนอย่างไม่ระวัง
- 3.13.2 ค่าที่อ่านได้จะขาดหายได้ ซึ่งเกิดจากการออกแบบหรือการประกอบที่ผิดพลาด

### 3.14 เอกสารอ้างอิง

## การทดลองที่ 4 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

### 4.1 วัตถุประสงค์

- 4.1.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Hall Effect Magnetic Sensor แบบมี Shield และไม่มี Shield
- 4.1.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าข้ามกับระยะห่างของแม่เหล็ก และแรงดันไฟฟ้าข้ามกับ Magnetic Flux

### 4.2 สมมติฐาน

- 4.2.1 เมื่อแม่เหล็กขั้ว South เข้าใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้สนามแม่เหล็กบวกที่วัดได้เพิ่มมากขึ้น
- 4.2.2 เมื่อแม่เหล็กขั้ว North เข้าใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้สนามแม่เหล็กลบที่วัดได้เพิ่มมากขึ้น
- 4.2.3 เมื่อไม่มีแม่เหล็กเข้าใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้สนามแม่เหล็กที่วัดได้เท่ากับค่าตรงกลางระหว่าง ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดและต่ำสุด

### 4.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 4.3.1 ตัวแปรต้น : ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Magnetic Sensor
- 4.3.2 ตัวแปรตาม : ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ Hall Effect Magnetic Sensor อ่านได้
- 4.3.3 ตัวแปรควบคุม : อุณหภูมิที่ใช้วัดค่าในขณะนั้น ค่าความผิดพลาด และ Sensitivity ของ Hall Effect Magnetic Sensor

### 4.4 นิยามคัพเพลฟาระ

เลื่อนแม่เหล็กขึ้น หมายถึง เลื่อนแม่เหล็กขึ้นครั้งละ 0.5 cm

### 4.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

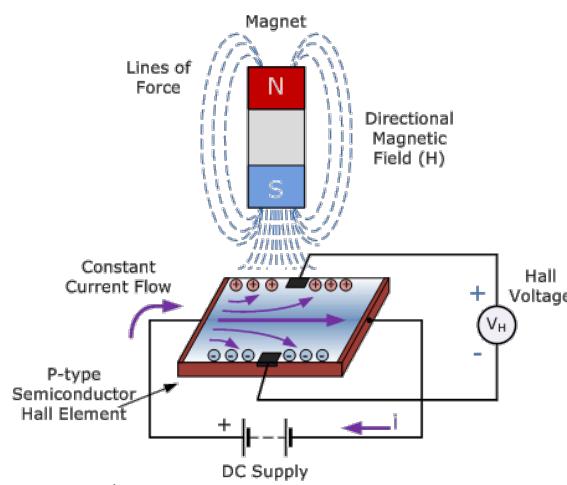
- 4.5.1 Hall Effect Magnetic Sensor หมายถึง DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
- 4.5.2 Output Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากรุ่น มีหน่วยเป็น V
- 4.5.3 Input Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เข้ารุ่น มีหน่วยเป็น V
- 4.5.4 ขั้ว S หมายถึง แม่เหล็กขั้วใต้
- 4.5.5 ขั้ว N หมายถึง แม่เหล็กขั้วเหนือ
- 4.5.6 Magnetic Flux หมายถึง ปริมาณของสนามแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดที่กำหนดในทิศทางที่ต้องจำกัด

## 4.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 4.6.1 หลักการทำงานของ Magnetic Sensor

Magnetic Sensor เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้เพื่อตรวจจับหรือวัดสนามแม่เหล็กและแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดย Magnetic Sensor จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม โดยการวัดความแรงและทิศทางของสนามแม่เหล็กนั้น ซึ่งสนามแม่เหล็กอาจเกิดจากแม่เหล็กถาวร การไหลของกระแสไฟฟ้าในตัวนำ หรือสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์อื่น ๆ โดย Magnetic Sensor มีหลายประเภท เช่น Magnetic Sensor ที่ใช้ชุดลวด หรือที่รู้จักกันคือ Hall Effect Sensor และ Magnetic Sensor ที่ใช้ Reed Switch

Hall Effect Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ Hall Effect ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กอยู่ในชุดลวดที่มีการนำไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่อมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดลวด จะเกิดแรงผลักดันที่ทำให้ประจุไฟฟ้าในชุดลวดเกิดการเบี่ยงเบนจากตำแหน่งเดิม ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า ที่เรียกว่า Hall Voltage ที่สามารถนำมาใช้ในการวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 49 การทำงานของ Hall Effect Sensor

ลักษณะสัญญาณ Output ของ Magnetic Sensor เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงถึงความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เป็น Output มักจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ Output ก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ใช้เซ็นเซอร์รับรู้ได้ ลักษณะการตอบสนองนี้สามารถมีทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่เชิงเส้น (Non-Linear) ขึ้นอยู่กับชนิดของเซ็นเซอร์ที่ใช้งาน หากเซ็นเซอร์แสดงผลในลักษณะเชิงเส้น จะทำให้สามารถคำนวณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ในขณะที่การตอบสนองแบบไม่เชิงเส้นอาจต้องใช้วิธีการปรับเทียบหรือคำนวณเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) ได้จากการดังนี้

$$V_H = R_H \left( \frac{I}{t} \times B \right)$$

เมื่อ  $V_H$  คือ Hall Voltage มีหน่วยเป็น V

$R_H$  คือ Hall Effect Coefficient มีหน่วยเป็น  $\text{m}^3/\text{C}$

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น Amps

$t$  คือ ความหนาของ Sensor มีหน่วยเป็น mm

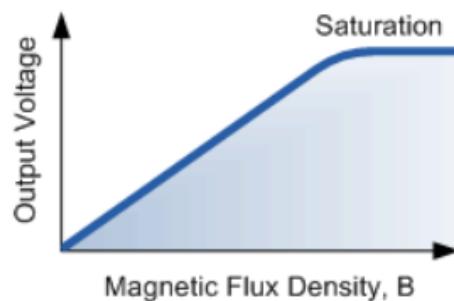
$B$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla

โดยที่สามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$B = \frac{\emptyset}{A}$$

เมื่อ  $\emptyset$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

$A$  คือ พื้นที่ที่ติดตั้งจาก มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2$



รูปที่ 50 กราฟเมื่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear)

Magnetic Flux Direction หรือ ทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นแนวทางที่ฟลักซ์แม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หนึ่ง และทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็กถูกสร้างขึ้นจากการกระแสไฟฟ้าหรือจากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Field Lines) ที่แสดงให้เห็นถึงทิศทางที่แรงแม่เหล็กกระทำกับประจุไฟฟ้าหรือวัสดุแม่เหล็ก เส้นแรงจะออกจากขั้วเหนือ (North Pole) ของแม่เหล็กและเข้าหาขั้วใต้ (South Pole) โดยสามารถคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กได้จากสมการดังนี้

$$\emptyset = AB \cos \theta$$

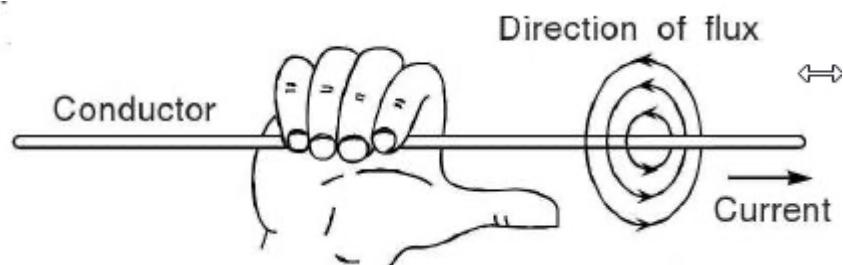
เมื่อ  $\emptyset$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Wb

$A$  คือ พื้นที่ที่ติดตั้งจาก มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2$

$B$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla

$\theta$  คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็กกับแนวตั้งจากของพื้นที่ที่วัด มีหน่วยเป็น องศา

โดยที่สามารถหาทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กได้จากการกู้มือขวา



รูปที่ 51 การหาทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก

ดังนั้นใน *Magnetic Sensor* จะต้องมีความสามารถในการให้สัญญาณออกที่เป็นเชิงเส้นตรงกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เข้ามา โดยเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูงจะสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมักจะมีลักษณะการตอบสนองที่เชื่อมโยงกันอย่างแน่นหนาระหว่างสัญญาณที่ส่งออก และความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กที่วัดได้ ซึ่งจะถูกเรียกว่า *Sensitivity Linearity* หรือ ความเป็นเชิงเส้นของความไว (*Sensitivity*) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

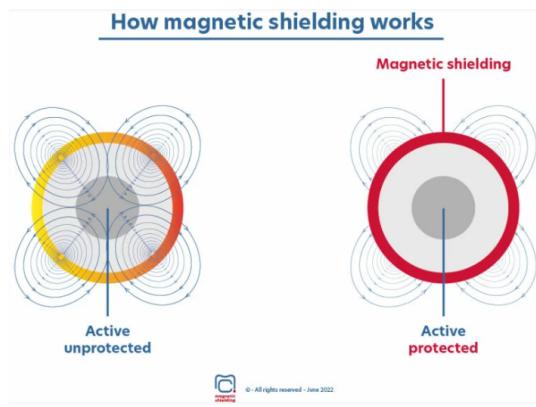
$$Sensitivity = \frac{\Delta V}{\Delta B}$$

เมื่อ *Sensitivity* คือ ความไวของเซ็นเซอร์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น V/T

$\Delta V$  คือ การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออก มีหน่วยเป็น V

$\Delta B$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น T

นอกจากนี้เพื่อให้ได้สัญญาณที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงมีการใช้ Shield เข้ามาช่วย เรียกว่า Magnetic Field Shielding คือ การป้องกันหรือลดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการ หรือการลดความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กในพื้นที่เฉพาะ โดยการใช้วัสดุหรือโครงสร้างที่สามารถดูดซับหรือเบี่ยงเบนสัมผัสแม่เหล็ก โดยมี 2 ชนิด ได้แก่ Passive Shielding ที่ใช้วัสดุโลหะ เช่น แผ่นโลหะหรือโครงสร้างที่ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับสนามแม่เหล็ก เพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน และ Active Shielding ที่ใช้เครื่องมือที่ปล่อยสนามแม่เหล็กในทิศทางตรงข้าม ซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการ เพื่อทำการทำลายสนามแม่เหล็กที่ไม่ต้องการภายในพื้นที่กำหนด



รูปที่ 52 หลักการทำงานของ Magnetic Shielding

#### 4.7 วิธีดำเนินการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Hall Effect Magnetic Sensor และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกกับระยะห่างของแม่เหล็ก และแรงดันไฟฟ้าขาออกกับ Magnetic Flux จึงทำการเก็บข้อมูล Output Voltage จากโปรแกรม Simulink และ MATLAB และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage กับระยะห่างของแม่เหล็กที่ถูกเลื่อนขึ้น และสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage กับ Magnetic Flux เพื่อทำการวิเคราะห์ผล

#### 4.8 วัสดุอุปกรณ์

4.8.1 DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor จำนวน 1 อัน

4.8.2 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

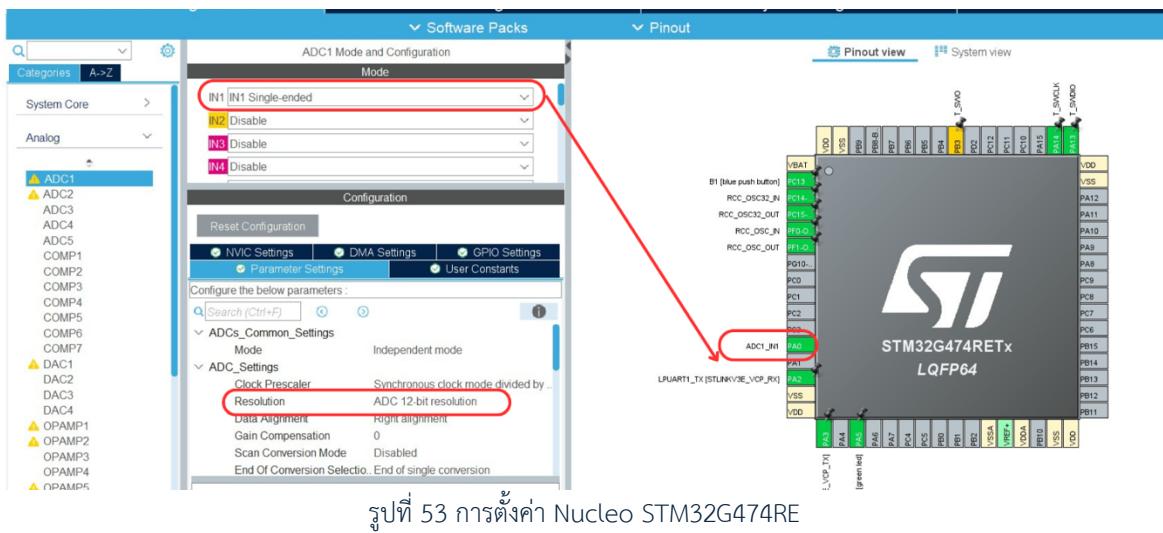
4.8.3 MagneticXplorer จำนวน 1 ชุด–ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, DRV5055A2, 3D-Print ใช้สำหรับการปรับระยะแม่เหล็กกับ Sensor

4.8.4 สายจัมเปอร์

#### 4.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

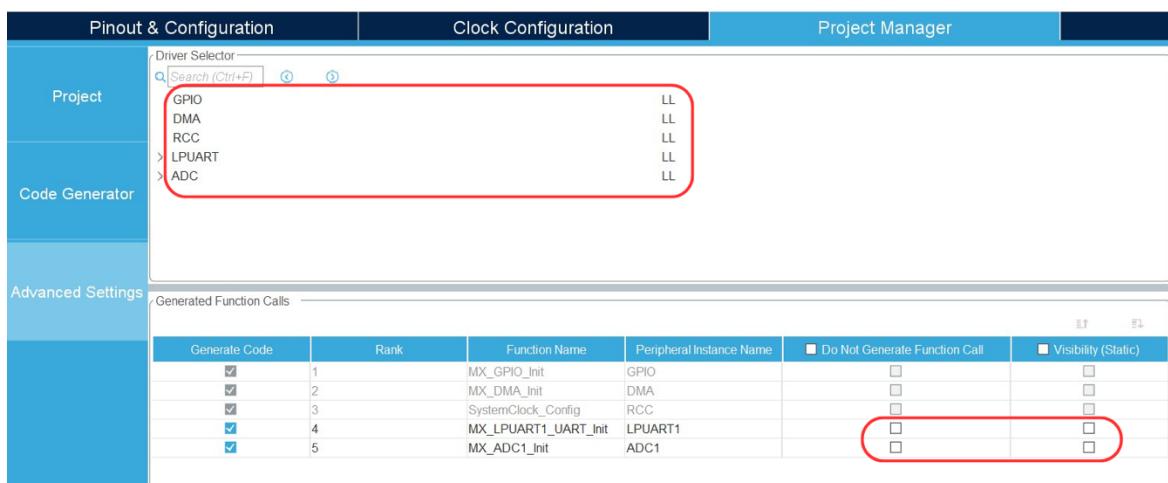
4.9.1 ติดตั้งบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับบอร์ด MagneticXplorer และจ่ายไฟขนาด 3.3 V จากบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้าที่ขา 1 ต่อ GND ที่ขา 3 และต่อ A0 ที่ขา 2 ของ Hall Effect Magnetic Sensor

4.9.2 ตั้งค่า Nucleo STM32G474RE เพื่อใช้ในการอ่านค่าสัญญาณจาก Hall Effect Magnetic Sensor โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 53 การตั้งค่า Nucleo STM32G474RE

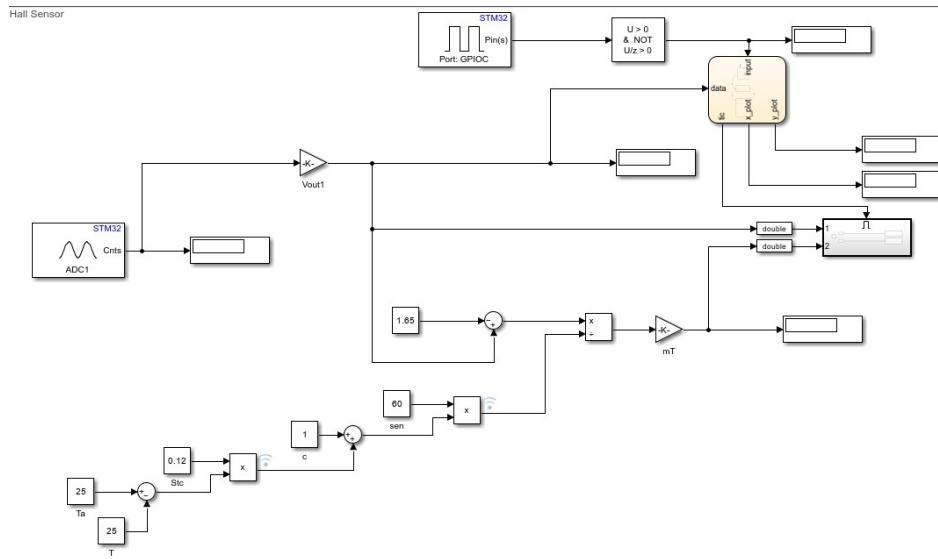
เริ่มจากการตั้งค่า Nucleo STM32G474RE ในโปรแกรม STM32CubeMX ให้สามารถอ่านค่าจาก Hall Effect Magnetic Sensor ได้ โดยกำหนดให้รับข้อมูลเข้ามาผ่านขา PAC



รูปที่ 54 การกำหนดข้อมูลที่ Nucleo STM32G474RE รับเข้ามา

กำหนดให้ข้อมูลของ Hall Effect Magnetic Sensor ที่ Nucleo STM32G474RE รับเข้ามาเป็นโหมด Low Power และเป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

4.9.3 เขียนโปรแกรมด้วย Simulink และ MATLAB เพื่อเก็บ Output Voltage ของ Hall Effect Magnetic Sensor ที่ได้จาก Nucleo STM32G474RE โดยกำหนดให้มีอุดปุ่ม B1 บน Nucleo STM32G474RE จะทำการเก็บค่า จนกว่าค่าที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อความหนาแน่นของฟลักซ์ แม่เหล็ก โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 55 โปรแกรม Simulink

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก Potentiometer เป็นสัญญาณแอนะล็อก โดยมีความละเอียดสูงสุด 12 bits และ Nucleo STM32G474RE อ่านค่าสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัล จึงต้องแปลงค่าจาก 12 bits สู่ แรงดันไฟฟ้า 0-3.3 V โดยการเทียบบัญญต์ตรายางศ์ และมีสมการคำนวณดังนี้

$$V_{out \text{ (analog)}} = \frac{V_{out \text{ (digital)}}}{2^n - 1} \times V_{in}$$

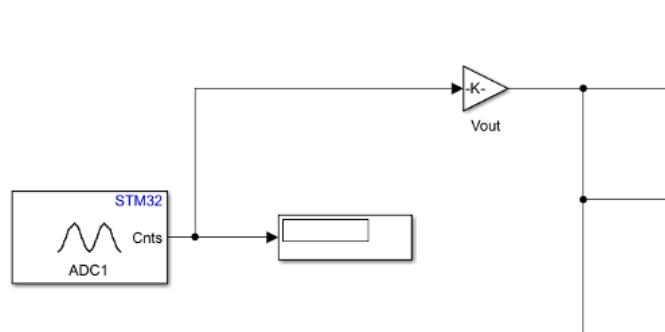
โดยที่  $V_{out \text{ (analog)}}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากการอุปกรณ์ในรูปแบบแอนะล็อก มีหน่วยเป็น V

$V_{out \text{ (digital)}}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากการอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัล มีหน่วยเป็น V

$V_{in}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น V

$n$  คือ ขนาด Bit ของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{จะได้ว่า } V_{out \text{ (analog)}} = \frac{V_{out \text{ (digital)}}}{4095} \times 3.3$$



รูปที่ 56 การหา Output Voltage ในรูปแบบแอนะล็อก

หลังจากที่ได้ Output Voltage จึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กต่อไป โดยสามารถหาค่าต่าง ๆ และสมการคำนวณได้จาก Datasheet และสามารถคำนวณได้จากการดังนี้

$$V_{OUT} = V_Q + B \times (Sensitivity_{(25^{\circ}C)} \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25^{\circ}C)))$$

เมื่อ  $V_{OUT}$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_Q$  คือ แรงดันไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของ Input Voltage ของ Hall Effect Magnetic Sensor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.65 V

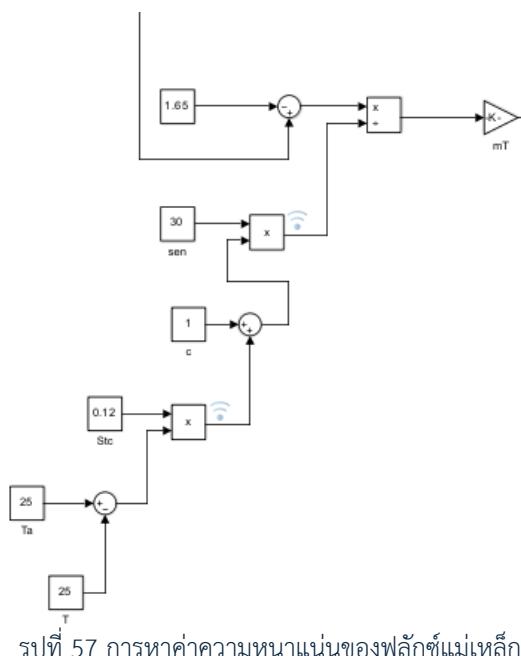
$B$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Tesla

$S_{TC}$  คือ ค่าทั่วไปของ Hall Effect Magnetic Sensor ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.12 %/ $^{\circ}C$

$T_A$  คือ อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25  $^{\circ}C$

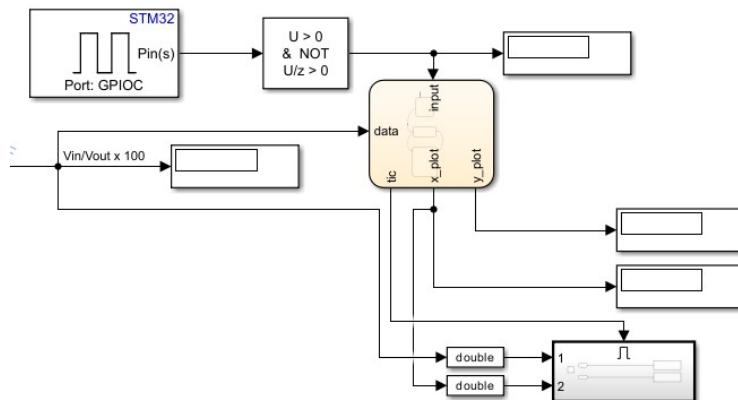
$Sensitivity_{(25^{\circ}C)}$  คือ ความไวของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ 25  $^{\circ}C$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 30 mV/mT

จะได้ว่า  $V_{OUT} = 1.65 + B \times (30 \times (1 + 0.12 \times (25 - 25)))$

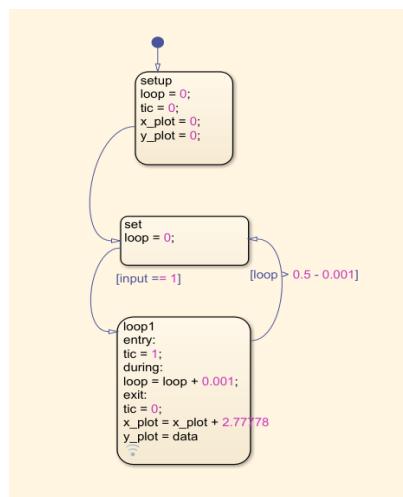


รูปที่ 57 การหาค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

เนื่องจากค่า Output Voltage ที่อ่านได้มีค่าที่ไม่คงที่ จึงทำการเก็บค่าในแต่ละตำแหน่งเป็นจำนวน 500 ค่า โดยที่เก็บค่าทุก ๆ 1 ms จากนั้นส่งค่าที่ได้ไปยัง Workspace ของ MATLAB เพื่อหาค่าเฉลี่ยต่อไป



รูปที่ 58 การหาค่าของ Output Voltage และส่งค่าไปยัง Workspace ของ MATLAB



รูปที่ 59 Chart สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อส่งค่าไปยัง Workspace ของ MATLAB

เมื่อได้ค่า Output Voltage จำนวน 500 ค่า ในแต่ละตำแหน่งของแม่เหล็กแล้ว จึงนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อกำหนดแนวโน้มของฟลักซ์แม่เหล็ก ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยที่แกน X คือค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และแกน Y คือ Output Voltage

```

addpath('C:\Users\Ainz_01\Documents\MATLAB\function');
% load('Vout_N.mat');
load('Vout_S.mat');

Vout_S = out.simout1;
mT_S = out.simout2;

% Vout_N = out.simout1;
% mT_N = out.simout2;

chunkSize = 500;

y = calculateChunkAverages(Vout_S, chunkSize);

x = calculateChunkAverages(mT_S, chunkSize);

ax = axes;
plot(x,y, 'LineWidth', 2);
grid('on');
xlabel(ax, "Magnetic flux (mT)");
ylabel(ax, "Vout (V)");
% sgtitle(' (North) Magnetic Response ');
sgtitle(' (South) Magnetic Response ');
ax.YAxisLocation = 'origin';

```

รูปที่ 60 MATLAB สำหรับหาค่าเฉลี่ยของ Output Voltage และสร้างกราฟเปรียบเทียบความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

จากนั้นนำค่า Output Voltage จำนวน 500 ค่า ในแต่ละตำแหน่งของแม่เหล็กแล้ว จึงนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ย และนำค่าเฉลี่ยไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อระยะของแม่เหล็กที่มีหน่วยเป็น cm ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยที่แกน X คือ Output Voltage และแกน Y คือ ค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก

```

addpath('C:\Users\Ainz_01\Documents\MATLAB\function');
% load('Vout_N.mat');
load('Vout_S.mat');

Vout_S = out.simout1;
mT_S = out.simout2;

% Vout_N = out.simout1;
% mT_N = out.simout2;

chunkSize = 500;

y = calculateChunkAverages(Vout_S, chunkSize);

x = calculateChunkAverages(mT_S, chunkSize);

ax = axes;
plot(x,y, 'LineWidth', 2);
grid('on');
xlabel(ax, "Magnetic flux (mT)");
ylabel(ax, "Vout (V)");
% sgtitle(' (North) Magnetic Response ');
sgtitle(' (South) Magnetic Response ');
ax.YAxisLocation = 'origin';

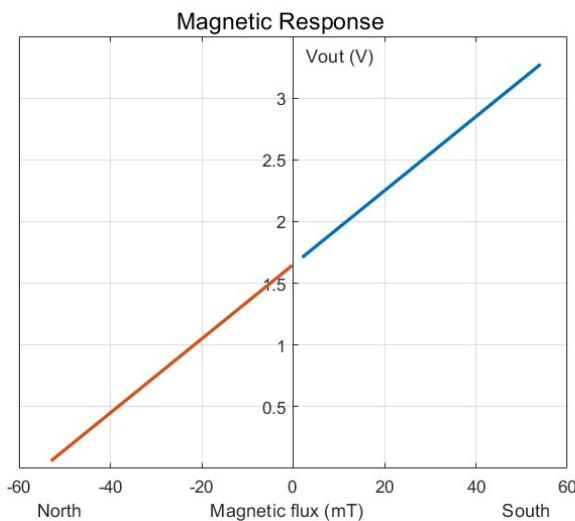
```

รูปที่ 61 MATLAB สำหรับหาค่าเฉลี่ยของ Output Voltage และสร้างกราฟเปรียบเทียบระยะของแม่เหล็ก

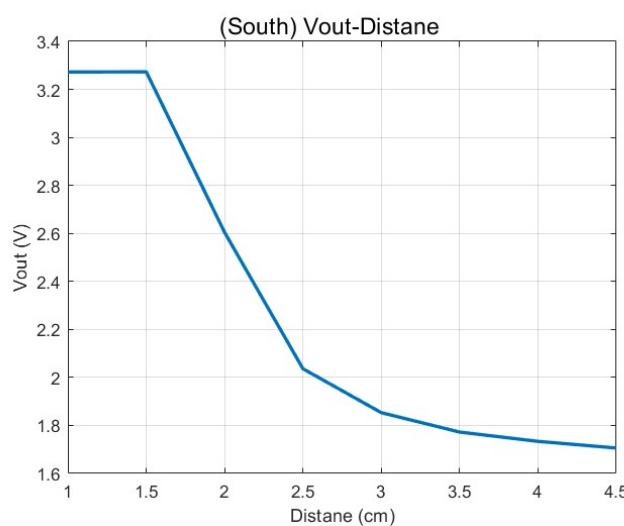
4.9.4 กดปุ่ม B1 บน Nucleo STM32G474RE เมื่อทำการเลื่อนแม่เหล็กขึ้นตั้งแต่ 0.9 cm ถึง 4.5 cm เพื่อเก็บค่า Output Voltage

4.9.5 ทำจำลองครบทุกชนิดของ Hall Effect Magnetic Sensor

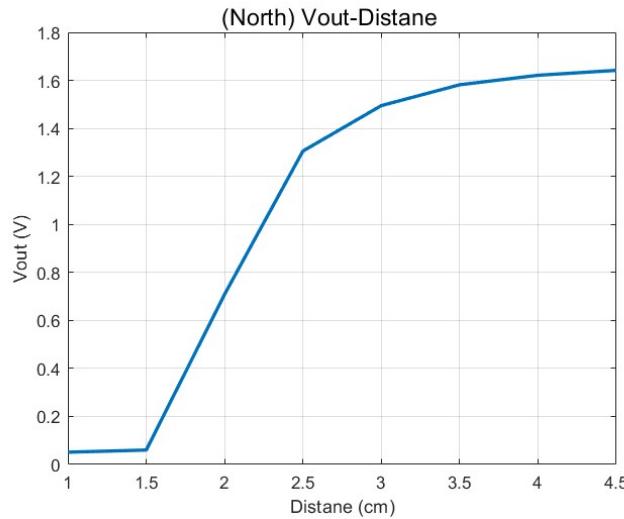
#### 4.10 ผลการทดลอง



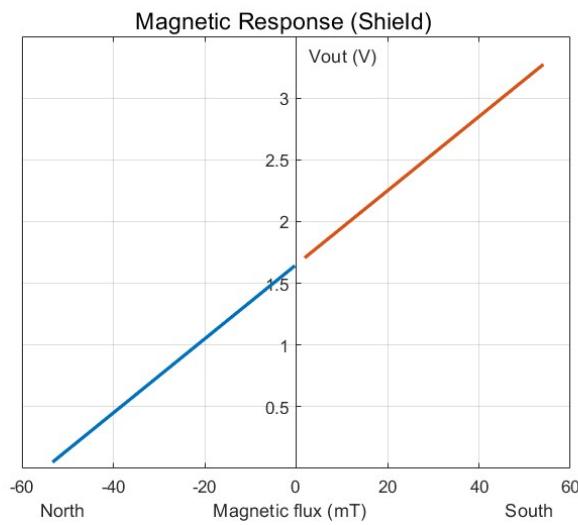
รูปที่ 62 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดไม่มี Shield



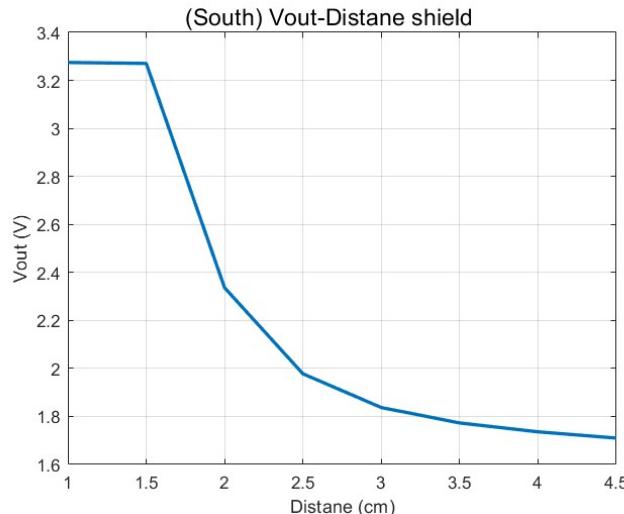
รูปที่ 63 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อระยะของแม่เหล็กข้าม S ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดไม่มี Shield



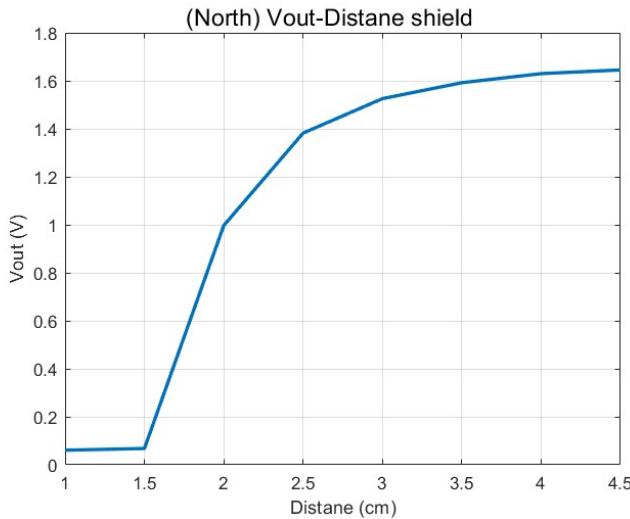
รูปที่ 64 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อระยะของแม่เหล็กข้าว N ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดไม่มี Shield



รูปที่ 65 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดมี Shield



รูปที่ 66 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อระยะของแม่เหล็กข้าว S ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดมี Shield



รูปที่ 67 กราฟเปรียบเทียบ Output Voltage ต่อระยะของแม่เหล็กขั้ว N ใน Hall Effect Magnetic Sensor ชนิดมี Shield

## 4.11 สรุปผล

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Hall Effect Magnetic Sensor ที่มีชนิดแตกต่างกัน พบว่า Hall Effect Magnetic Sensor แต่ละชนิดมีการตอบสนองของ Output Voltage ต่อความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และขั้วของแม่เหล็กแตกต่างกัน ทำให้สามารถจำแนกรูปร่างของกราฟได้ดังนี้

## 4.12 อกิจกรรม

เมื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กขั้ว South จะทำให้แรงดันมีการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 1.6v ถึง 3.2v เพราะสนามแม่เหล็กที่ขั้วของแม่เหล็กมีค่าเป็นบวกทำให้เมื่อนำแม่เหล็กไปใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้ค่าที่อ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนใกล้กับแรงดัน Vcc แต่เมื่อนำแม่เหล็กออกห่างจาก Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้ค่าที่อ่านได้ลดลงเรื่อยๆจนถึงค่า 12bit/2 และคำนวนหา Vout ได้ประมาณค่า Vcc/2 เพราะเป็นค่าที่ Hall Effect Magnetic Sensor อยู่ในสถานะปกติหรือไม่มีค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้ นั้นคือ Vcc/2 ซึ่งตรงกับสมมติฐานว่า เมื่อแม่เหล็กขั้ว South เข้าใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้สนามแม่เหล็ก บวกที่รัดได้เพิ่มมากขึ้น

เมื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กขั้ว North จะทำให้แรงดันมีการลดลงอยู่ในช่วงประมาณ 1.6 ถึง 0v เพราะสนามแม่เหล็กที่ขั้วของแม่เหล็กมีค่าเป็นลบทำให้เมื่อนำแม่เหล็กไปใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้ค่าที่อ่านได้มีค่าลดน้อยลงเรื่อยๆจนใกล้กับแรงดัน Vcc แต่เมื่อนำแม่เหล็กออกห่างจาก Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้ค่าที่อ่านได้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงค่า 12bit/2 และคำนวนหา Vout ได้ประมาณค่า Vcc/2 เพราะเป็นค่าที่ Hall Effect Magnetic Sensor อยู่ในสถานะปกติหรือไม่มีค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้ นั้นคือ Vcc/2

ซึ่งไม่ตรงกับสมมติฐานว่า เมื่อแม่เหล็กชี้ North เข้าใกล้กับ Hall Effect Magnetic Sensor จะทำให้สนามแม่เหล็กลบที่วัดได้เพิ่มมากขึ้น

แรงดันที่วัดได้จากการทดลอง Magnetic Sensor ที่มี Shield จะมีค่าแรงดันน้อยกว่า Magnetic Sensor ที่ไม่มี Shield

#### 4.13 ข้อเสนอแนะ

4.13.1 ควรทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในสถานการณ์ที่มี Shield และไม่มี Shield อย่างละเอียด เพื่อวิเคราะห์ว่ามีผลกระทบต่อแรงดันที่วัดได้อย่างไร โดยอาจจะต้องทดลองในหลายสภาพแวดล้อมหรือด้วยวัสดุ Shield ที่แตกต่างกัน

4.13.2 ควรตรวจสอบให้แน่ใจว่าเซ็นเซอร์ได้รับการปรับตั้งให้ไวต่อสนามแม่เหล็กอย่างเหมาะสมและทิศทางการติดตั้งเซ็นเซอร์ควรมีความถูกต้องเพื่อให้สามารถวัดได้อย่างแม่นยำ

#### 4.14 เอกสารอ้างอิง

4.14.1 [https://www.ti.com/lit/ta/sszt164/sszt164.pdf?ts=1730388204952&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ta/sszt164/sszt164.pdf?ts=1730388204952&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

4.14.2 <https://www.ablic.com/en/semicon/products/sensor/magnetism-sensor-ic/intro3/>

4.14.3 <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>

4.14.4 [https://engineeringlab.com/tutorial\\_electrical/direction-of-magnetic-flux-44.htm](https://engineeringlab.com/tutorial_electrical/direction-of-magnetic-flux-44.htm)

4.14.5 <https://www.test-and-measurement-world.com/Terminology/Difference-between-Linearity-and-Sensitivity.html>

4.14.6 <https://www.mecamagnetic.com/magnetic-shielding/>

## การทดลองที่ 5 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

### 5.1 วัตถุประสงค์

- 5.1.1 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจการทำงานของ Load Cell แบบ Strain Gauge และวงจรที่เกี่ยวข้อง เช่น Wheatstone bridge, Strain Gauge, และ Two Op-amps Differential Amplifier
- 5.1.2 เพื่อทดสอบและวิเคราะห์การแปรผันของสัญญาณ Output ของ Load Cell ที่เปลี่ยนแปลงตามแรงที่กระทำ และทำการ Signal Conditioning เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องก่อนและหลังการ Calibrate
- 1.1.2 เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของสัญญาณ Output ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

### 5.2 สมมติฐาน

- 5.2.1 เมื่อแรงที่กระทำต่อ Load Cell เพิ่มขึ้น สัญญาณ Output หรือแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell จะเพิ่มขึ้นตามแรงที่กระทำ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่าที่กำหนดไว้จะเปลี่ยนจาก Low เป็น High
- 1.1.3 ค่า Gain ของ INA125 จะส่งผลโดยตรงต่อค่าสัญญาณ Output จาก Load Cell เมื่อค่า Single External Resistor เปลี่ยนแปลง และเมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่าที่กำหนดไว้จะเปลี่ยนจาก Low เป็น High

### 5.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

- 5.3.1 ตัวแปรต้น : แรงที่กระทำต่อ Load Cell
- 5.3.2 ตัวแปรตาม : แรงดันไฟฟ้าขาออกที่วัดได้จาก Load Cell, พลังงานเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าขาออกของ Load Cell
- 5.3.3 ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Load Cell อยู่ที่ 3.3 V, ค่า Single External Resistor ที่ต่อเข้ากับ INA125 เพื่อกำหนดค่า Gain, แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ หรือ  $V_{threshold}$  1.65 V, อุณหภูมิ และสภาพแวดล้อมขณะทดลอง, วิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

### 5.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

เพิ่มน้ำหนัก หมายถึง การเพิ่มน้ำหนักบน Load Cell ครั้งละ 1 kg

### 5.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 5.5.1 Output Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากรุ่น มีหน่วยเป็น V
- 5.5.2 Input Voltage หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น V
- 5.5.3 Load Cell หมายถึง Single Point Load Cell YZC-131A
- 5.5.4 INA125 หมายถึง INA125 Instrumentation Amplifier

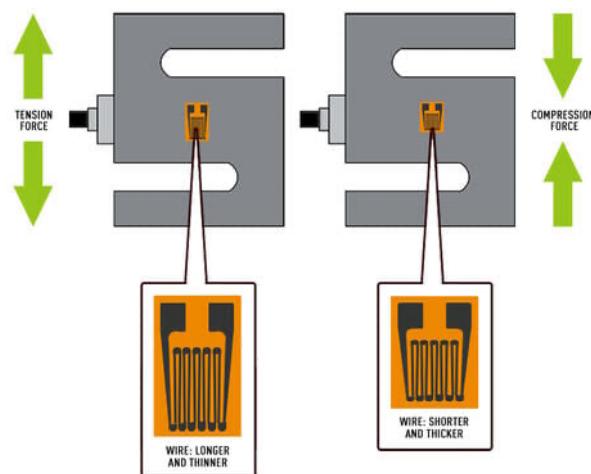
## 5.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 5.6.1 Load Cell แบบ Strain Gauge

Load Cell คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแรงหรือน้ำหนักเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งสัญญาณนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หรือแสดงผลในรูปของค่าที่ใช้งานได้จริง โดยผ่านไปยังระบบวัดที่เรียกว่า Signal Conditioning เช่น ค่าน้ำหนักในหน่วยต่าง ๆ โดยกระบวนการนี้ทำให้ Load Cell เป็นอุปกรณ์สำคัญในการวัดและควบคุมแรงหรือน้ำหนักในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เครื่องซั่งน้ำหนัก ระบบควบคุมแรงดึง หรือกระบวนการผลิตที่ต้องการการวัดน้ำหนักแบบแม่นยำ

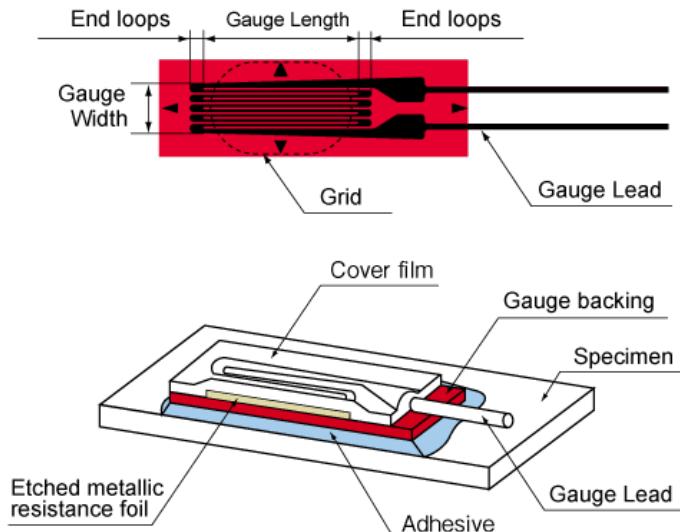
Load Cell มีหลากหลายชนิด เช่น Load Cell แบบ Strain Gauge, Load Cell แบบ Hydraulic และ Load Cell แบบ Pneumatic เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน Load Cell แบบ Strain Gauge เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีความแม่นยำสูง ราคาถูก และเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการความเที่ยงตรงในการวัดน้ำหนัก

Load Cell แบบ Strain Gauge เป็น Load Cell ที่ทำงานโดยใช้หลักการวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีแรงกระทำ ซึ่งมักทำจากลวดหรือฟอยล์บาง ๆ ในรูปแบบตาราง โดยจะเปลี่ยนแปลงความต้านทานในแนวเส้นตรงเมื่อได้รับแรงตามแกนหนึ่ง เมื่อแรงกระทำต่อตัว Load Cell เช่น แรงดึงหรือแรงอัด Strain Gauge ที่ติดบน Load Cell จะเกิดการยืดหรือหดตัว ทำให้ความต้านทานเปลี่ยนแปลง



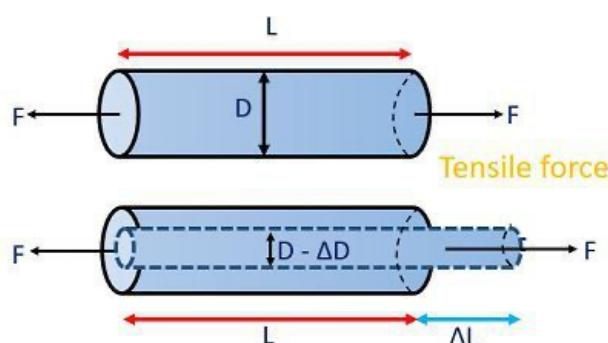
รูปที่ 68 Load Cell แบบ Strain Gauge

Strain Gauge เป็นอุปกรณ์วัดความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเมื่อมีแรงมากระทำโดย Strain Gauge ถูกออกแบบให้远离ฟอยล์เหละบาง ๆ หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น และมีสายไฟเล็ก ๆ เรียงอยู่เป็นรูปตาข่าย



รูปที่ 69 Strain Gauge

หลักการทำงานของ Strain Gauge อ้างอิงจาก原理การณ์ที่เรียกว่า Piezoresistive Effect หรือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในรูปทรงหรือแรงที่กระทำเมื่อ Strain Gauge ถูกยืดออก ความยาวของสายไฟจะเพิ่มขึ้นและพื้นที่หน้าตัดลดลง ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อ Strain Gauge ถูกบีบ ความยาวจะลดลงและพื้นที่หน้าตัดลดลง ทำให้ความต้านทานเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อ Strain Gauge ถูกบีบ ความยาวจะลดลงและพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง



Dimensional changes in strain gauge on application of force

Electronics Coach

รูปที่ 70 Piezoresistive Effect

จากสมการหาค่าความต้านทาน

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

โดยที่  $R$  คือ ความต้านทานของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $\Omega$

$\rho$  คือ ความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $\Omega \cdot m$

$L$  คือ ความยาวของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $m$

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ มีหน่วยเป็น  $m^2$

จากสมการหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานใน Strain Gauge

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{RG}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{RG}}{\varepsilon}$$

$$\therefore \Delta R = GF \times RG \times \varepsilon$$

โดยที่  $GF$  คือ Gauge Factor หรือความไวของ Strain Gauge ต่อ Strain

$\Delta R$  คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็น  $\Omega$

$RG$  คือ ความต้านทานพื้นฐานของ Strain Gauge (มีค่าระหว่าง 120 - 1000  $\Omega$ )

$\Delta L$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความยาว มีหน่วยเป็น  $m$

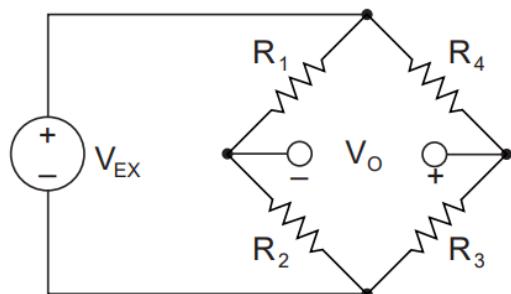
$L$  คือ ความยาวเริ่มต้น มีหน่วยเป็น  $m$

$\varepsilon$  คือ Strain (การเปลี่ยนแปลงความยาวเป็นเศษส่วน  $\frac{\Delta L}{L}$ )

ความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายใน Strain Gauge ยังสามารถวัดได้โดยวงจร Wheatstone Bridge เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น และลดการรบกวนจากปัจจัยภายนอก

#### 1.1.4 Wheatstone bridge

Wheatstone Bridge เป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้วัดความต้านทานไฟฟ้าอย่างแม่นยำ โดยอาศัยหลักการปรับสมดุลในวงจร ซึ่งวงจร Wheatstone Bridge ประกอบด้วยตัวต้านทานสี่ตัวจัดเรียงในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีแรงดัน ( $V_{EX}$ ) ป้อนเข้าจากด้านหนึ่งของวงจร



รูปที่ 71 Wheatstone Bridge

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในความต้านทานของแขนข้างใดข้างหนึ่งของวงจรหรือคู่ของตัวต้านทานสองตัวที่ต่ออยู่ในแต่ละฝั่งของวงจร ค่าแรงดันเอกสารพุตของวงจรก็จะเปลี่ยนไป ทำให้สามารถวัดความเปลี่ยนแปลงนั้นได้ซึ่งมักนิยามาใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของความต้านทาน โดยแรง Output Voltage ( $V_O$ ) ของวงจร Wheatstone Bridge จะเป็นศูนย์เมื่อวงจรอยู่ในสภาพ平衡 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  และ Output Voltage ( $V_O$ ) สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$V_O = \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot V_{EX}$$

โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_{EX}$  คือ Input Voltage มีหน่วยเป็น V

$R_n$  คือ ตัวต้านทานในตำแหน่ง n

หากความต้านทานตัวใดตัวหนึ่งเปลี่ยนไป เช่น เปลี่ยน  $R_4$  เป็น Strain Gauge ซึ่งจะزنน้ำหนักเรียกว่า Quarter-Bridge Circuit ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อมีความตึงเครียด (Strain) ทำให้แรงดัน Output Voltage ไม่เป็นศูนย์ และสามารถวัดค่าความเปลี่ยนแปลงนั้นได้ โดยจะได้ Output Voltage ดังนี้

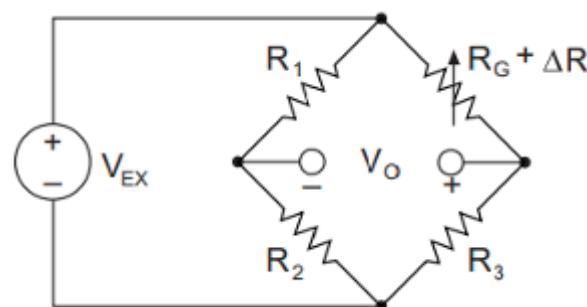
$$\frac{V_O}{V_{EX}} = \frac{GF \cdot \varepsilon}{4 + 2GF \cdot \varepsilon}$$

โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_{EX}$  คือ Input Voltage มีหน่วยเป็น V

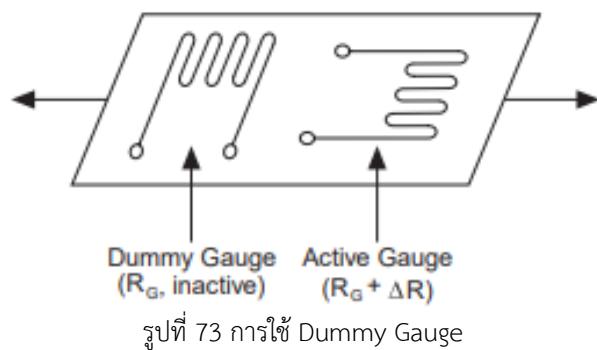
$GF$  คือ Gauge Factor หรือความไวของ Strain Gauge ต่อ Strain

$\varepsilon$  คือ Strain (การเปลี่ยนแปลงความยาวเป็นเศษส่วน  $\frac{\Delta L}{L}$ )



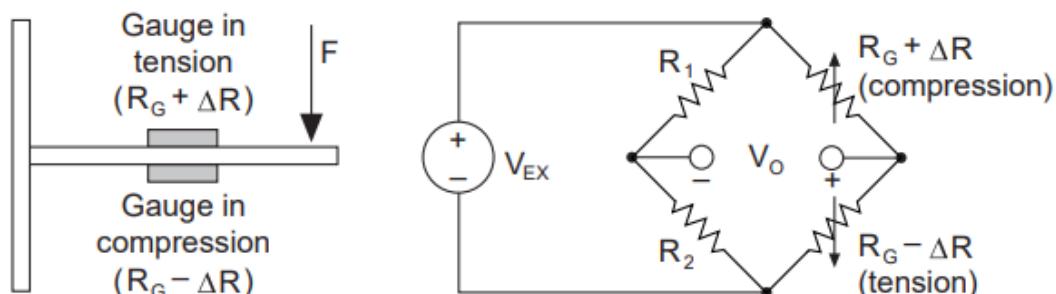
รูปที่ 72 Quarter-Bridge Circuit

Quarter-Bridge Circuit ไม่เหมาะสมสำหรับการวัดความตึงเครียดในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือสภาพทางกายภาพที่ไม่แน่นอน ซึ่งอาจทำให้วงจรปกติทำงานได้ไม่ดี โดย Strain Gauge จะถูกเปลี่ยนค่าความต้านทานตามอุณหภูมิ ส่งผลให้ Output Voltage ที่ได้มาไม่แม่นยำ ดังนั้นจึงมีการออกแบบวงจรที่เรียกว่า Quarter-Bridge Circuit ซึ่งใช้ Strain Gauge สองตัว เพื่อทำให้การวัดมีความแม่นยำมากขึ้น โดยจะมี Active Strain Gauge หนึ่งตัวที่ทำการวัดความตึงเครียดจริง และ Dummy Gauge อีกหนึ่งตัวที่ถูกวางในทิศทางของแรงต่อต้านความตึงเครียดที่ใช้ ดังภาพที่ xx โดยที่ Active Gauge จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดจากความตึงเครียด ขณะที่ Dummy Gauge จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานน้อยมาก เนื่องจากไม่ถูกกระทำโดยแรงที่วัด



การใช้ Dummy Gauge มีประโยชน์ในการลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่อาจเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมการทำงาน โดยอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อความต้านทานของทั้ง Active Gauge และ Dummy Gauge ในลักษณะเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนความต้านทานของทั้งสอง Gauge จะปรับตัวไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้อัตราส่วนของความต้านทานระหว่าง Gauge ทั้งสองไม่เปลี่ยนแปลง และแรงดันขาออก ( $V_O$ ) จะไม่เปลี่ยนแปลง

หากต้องการเพิ่มความไว (Sensitivity) ของ Wheatstone Bridge ในการวัดความตึงเครียด (Strain) สามารถทำได้โดยการใช้ Strain Gauge สองตัวที่ทำงานเป็น Active Gauge ในทิศทางที่ต่างกัน ซึ่งเรียกว่า Half-Bridge Circuit



รูปที่ 74 การใช้ Half-Bridge Circuit

การใช้ Half-Bridge Circuit ช่วยเพิ่มความไวของการวัด โดยแรงดันขาออก ( $V_O$ ) จะสูงขึ้นเป็นสองเท่าของ Quarter-Bridge Circuit ซึ่งหมายความว่าการเปลี่ยนแปลงความตึงเครียดสามารถตรวจจับได้ดีขึ้น ทำให้การวัดความตึงเครียดมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และสามารถหา Output Voltage ได้จากสมการดังนี้

$$\frac{V_O}{V_{EX}} = -\frac{GF \cdot \varepsilon}{2}$$

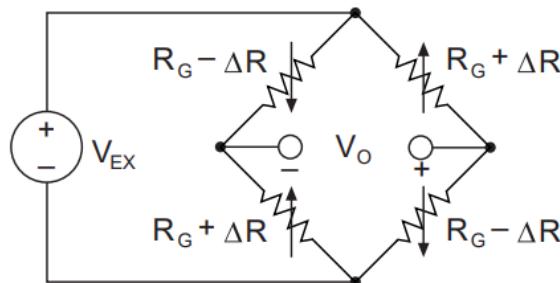
โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_{EX}$  คือ Input Voltage มีหน่วยเป็น V

$GF$  คือ Gauge Factor หรือความไวของ Strain Gauge ต่อ Strain

$\varepsilon$  คือ Strain (การเปลี่ยนแปลงความยาวเป็นเศษส่วน  $\frac{\Delta L}{L}$ )

แม้ว่า Half-Bridge Circuit จะมีความไวในการวัดที่สูงกว่าการใช้งานในรูปแบบ Quarter-Bridge Circuit แต่การใช้ Strain Gauge เพียงสองตัวยังคงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และหากมีปัญหาหรือข้อผิดพลาดในเซนเซอร์ใดเซนเซอร์หนึ่ง อาจทำให้ผลการวัดไม่ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีการใช้ Full-Bridge Circuit ที่ประกอบด้วย Strain Gauge 4 ตัว ซึ่งแต่ละตัวทำหน้าที่เป็น Active Gauge ที่มีทิศทางตรงข้ามกัน



รูปที่ 75 Full-Bridge Circuit

Full-Bridge Circuit จะทำให้แรงดันขาออก ( $V_O$ ) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในความต้านทานของ Strain Gauge ทั้ง 4 ตัวสูงขึ้นกว่าการใช้ Quarter-Bridge หรือ Half-Bridge โดยการวัดจาก Full-Bridge จะสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่ละเอียดได้ดี ซึ่งสามารถหา Output Voltage ได้ดังนี้

$$\frac{V_O}{V_{EX}} = -GF \cdot \varepsilon$$

โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_{EX}$  คือ Input Voltage มีหน่วยเป็น V

$GF$  คือ Gauge Factor หรือความไวของ Strain Gauge ต่อ Strain

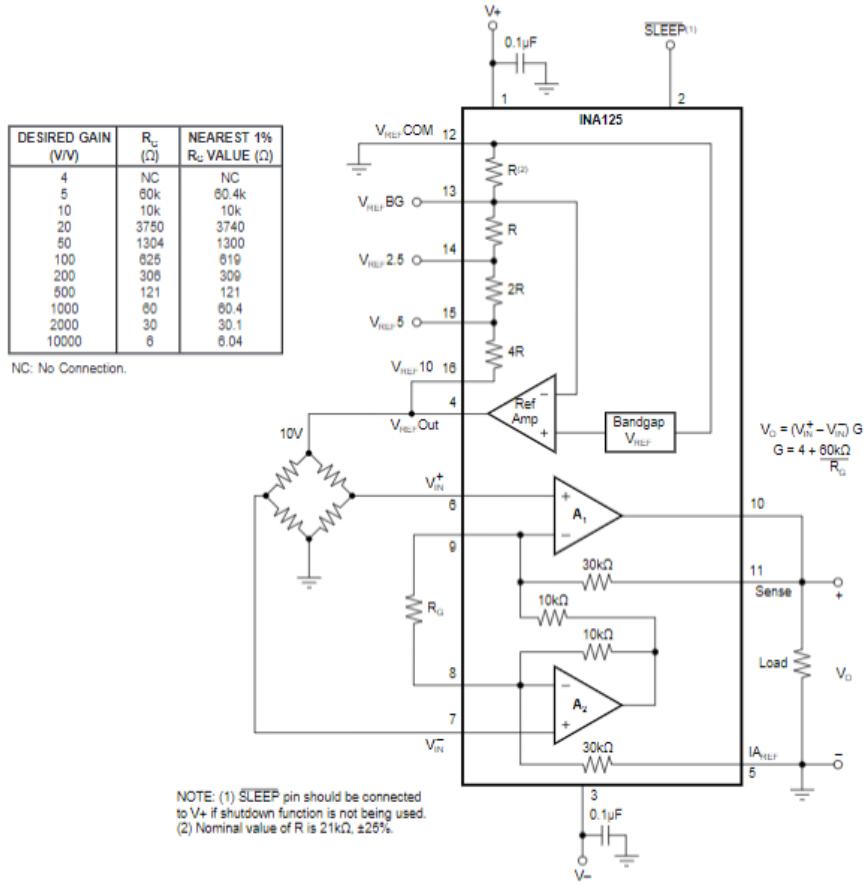
$$\varepsilon \text{ คือ Strain (การเปลี่ยนแปลงความยาวเป็นเศษส่วน } \frac{\Delta L}{L} \text{ )}$$

### 5.6.2 Signal Conditioning and Two Op-amps Differential Amplifier

Signal Conditioning คือ กระบวนการปรับแต่งและจัดการสัญญาณให้มีคุณภาพและลักษณะที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปยังการประมวลผลหรืออุปกรณ์อื่นๆ เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ ADC (Analog-to-Digital Converter) ซึ่ง Signal Conditioning มีหลายขั้นตอน ตั้งแต่การขยายสัญญาณ (Amplification), การกรองสัญญาณ (Filtering), การแปลงสัญญาณเป็นเชิงเส้น (Linearization) และการแยกสัญญาณเพื่อลบการรบกวนและป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร (Isolation) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความแม่นยำและปราศจากสัญญาณรบกวน (Noise) ที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในข้อมูล

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก Strain Gauge มักมีแรงดันต่ำมากและเต็มไปด้วยสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมที่แวดล้อม ทำให้ต้องใช้ Signal Conditioning เพื่อให้สามารถประมวลผลได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ โดยจะผ่านกระบวนการขยายสัญญาณ (Amplification) และ การกรองสัญญาณ (Filtering) เป็นหลัก

Two Op-amps Differential Amplifier เป็นวงจรที่ใช้ขยายสัญญาณหรือแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างจุดสองจุด และตัดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาพร้อมกันออกไป ซึ่งทำให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการความแม่นยำในการขยายสัญญาณ โดยวงจรนี้ประกอบด้วย Op-amp 2 ตัวที่ทำงานร่วมกัน และมีตัวต้านทานที่ปรับค่าอย่างแม่นยำเพื่อช่วยในการขยายสัญญาณ ( $R_G$ ) ซึ่ง Op-amp ตัวแรกทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ Input Voltage โดยการขยาย Gain ที่ตั้งไว้ตามตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ และช่วยเพิ่มความแม่นยำของสัญญาณที่รับเข้ามา และ Op-amp ตัวที่สอง ทำงานคล้ายกับ Op-amp ตัวแรก แต่รับสัญญาณ Input จากอีกจุดหนึ่งเพื่อขยายสัญญาณในลักษณะที่ต่างกัน และส่งแรงดันที่ได้ไปยังจุดรวมเพื่อให้ได้ค่าแรงดันผลต่างที่ Output ( $V_O$ ) โดยจะใช้ INA125 เป็น Two Op-amps Differential Amplifier



รูปที่ 76 INA125

INA125 สามารถขยายแรงดันไฟฟ้าออกหรือ Output Voltage ได้ถึง 2.5V, 5V และ 10V หากได้จาก การเทียบกับวงจรภายในของ INA125 ดังภาพที่ xx จะเห็นว่า บริเวณวงจร Wheatstone Bridge จะมีส่วนที่ เชื่อมต่อกับ GND และ V<sub>REF OUT</sub> ซึ่งเมื่อวัดแรงดันตกคร่อมระหว่าง 2 จุด จะได้แรงดันไฟฟ้าที่ INA125 ขยายได้ โดย INA125 สามารถหาค่าแรงดันผลต่างที่ Output (V<sub>O</sub>) ได้จากการดังนี้

$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-)G$$

โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$V_{IN}^+$  คือ แรงดันจากขา  $V_{IN}^+$  หรือขาที่ 6 เทียบ GND ของ INA125 มีหน่วยเป็น V

$V_{IN}^-$  คือ แรงดันจากขา  $V_{IN}^-$  หรือขาที่ 7 เทียบ GND ของ INA125 มีหน่วยเป็น V

$G$  คือ Gain หรืออัตราขยายสัญญาณ

จากการหา Gain

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

โดยที่  $G$  คือ Gain หรืออัตราขยายสัญญาณ

$R_G$  คือ ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ มีหน่วยเป็น Ω

Gain มีบทบาทที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของ Differential Amplifier ซึ่งมีผลต่อการขยายสัญญาณ ความไว และความแม่นยำในการวัด โดยหาก Gain ถูกตั้งค่าไม่เหมาะสม อาจทำให้สัญญาณที่ขยายออกมามากเกิดการคลาดเคลื่อนหรือเสียงหายได้ เช่น การตั้งค่า Gain ที่สูงจะช่วยให้วงจรสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในสัญญาณนำเข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กหรือมี Noise ค่อนข้างมากจึงสามารถทำได้ดียิ่งขึ้น แต่การตั้งค่า Gain ที่สูงเกินไปอาจทำให้วงจรไม่เกินไป จนทำให้สัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่ไม่เกี่ยวข้องเข้ามาใน Output ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการวัด นอกจากนี้เมื่อ Gain สูงขึ้น แรงดันที่ออกมายังคงจะมีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์หรือวงจรที่รับสัญญาณ Output ดังนั้นจึงควรปรับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ หรือ Single External Resistor ( $R_G$ ) ให้ถูกต้องเพื่อให้มีค่า Gain ที่เหมาะสม และได้ Output Voltage ตามที่ต้องการ

## 5.7 วิธีดำเนินการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Load Cell และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกกับน้ำหนักที่ถูกวางบน Load Cell จึงทำการเก็บข้อมูลของ Output Voltage และนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบ Output Voltage กับน้ำหนักบน Load Cell ที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อทำการวิเคราะห์ผล และศึกษาการทำงานของ Load Cell แบบ Strain Gauge และวงจรที่เกี่ยวข้อง เช่น Wheatstone bridge, Strain Gauge, และ Two Op-amps Differential Amplifier

## 5.8 วัสดุอุปกรณ์

- 5.8.1 Single Point Load Cell YZC-131A จำนวน 1 อัน
- 5.8.2 INA125 Instrumentation Amplifier จำนวน 1 อัน
- 5.8.3 Trimpot 100 K 25 Turns จำนวน 1 อัน
- 5.8.4 Resistor 4.7K Ohm จำนวน 1 อัน
- 5.8.5 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด
- 5.8.6 LoadCellXplorer จำนวน 1 ชุด – ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ Load Cell
- 5.8.7 สายจัมเปอร์

## 5.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 5.9.1 ติดตั้ง Nucleo STM32G474RE กับ LoadCellXplorer และจ่ายไฟขนาด 3.3 V จาก Nucleo STM32G474RE ให้แก่วงจร จากนั้นต่อ GND จาก Nucleo STM32G474RE กับ GND ของวงจร และต่อ

A0 ที่ขา OUT ของ INA125 จะนั่นต่อสายสีเขียว สีแดง สีขาว และสีดำจาก Load Cell เข้าที่ขา Green, White, Red และขา Black บน LoadCellXplorer ตามลำดับ



รูปที่ 77 การต่อวงจร LoadCellXplorer

1.1.5 หา Single External Resistor ( $R_G$ ) เพื่อนำไปปรับตัวอันทานที่ปรับค่าได้ให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ค่า Gain ที่เหมาะสม และได้ Output Voltage ตามที่ต้องการ โดยการใช้สมการที่ได้จาก Datasheet และวัดแรงดันตกคร่อมแต่ละขาตามสมการ ขณะที่มีน้ำหนัก 10 kg หรือน้ำหนักสูงที่สุดที่ Load Cell รับได้ อุปกรณ์ Load Cell ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการผ่าน INA125 และเข้าบอร์ด หรือ Output Voltage มีค่าสูงสุด 2.5 V หากได้จากการวัดแรงดันตกคร่อมระหว่างขา GND และ  $V_{REF\ OUT_f}$  ของ INA125 จึงสามารถวัดน้ำหนัก 10 kg เป็น Output Voltage 2.5 V และนำไปหา Gain ได้จากสมการดังนี้

$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-)G$$

โดยที่  $V_O$  คือ Output Voltage 2.5 V

$V_{IN}^+$  คือ แรงดันจากขา  $V_{IN}^+$  หรือขาที่ 6 เทียบ GND ของ INA125 1.205 V

$V_{IN}^-$  คือ แรงดันจากขา  $V_{IN}^-$  หรือขาที่ 7 เทียบ GND ของ INA125 1.200 V

$G$  คือ Gain

$$\text{จะได้ว่า } 2.5 = (1.205 - 1.200)G$$

$$G = 488$$

5.9.2 หา Single External Resistor ( $R_G$ ) จากสมการดังนี้

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

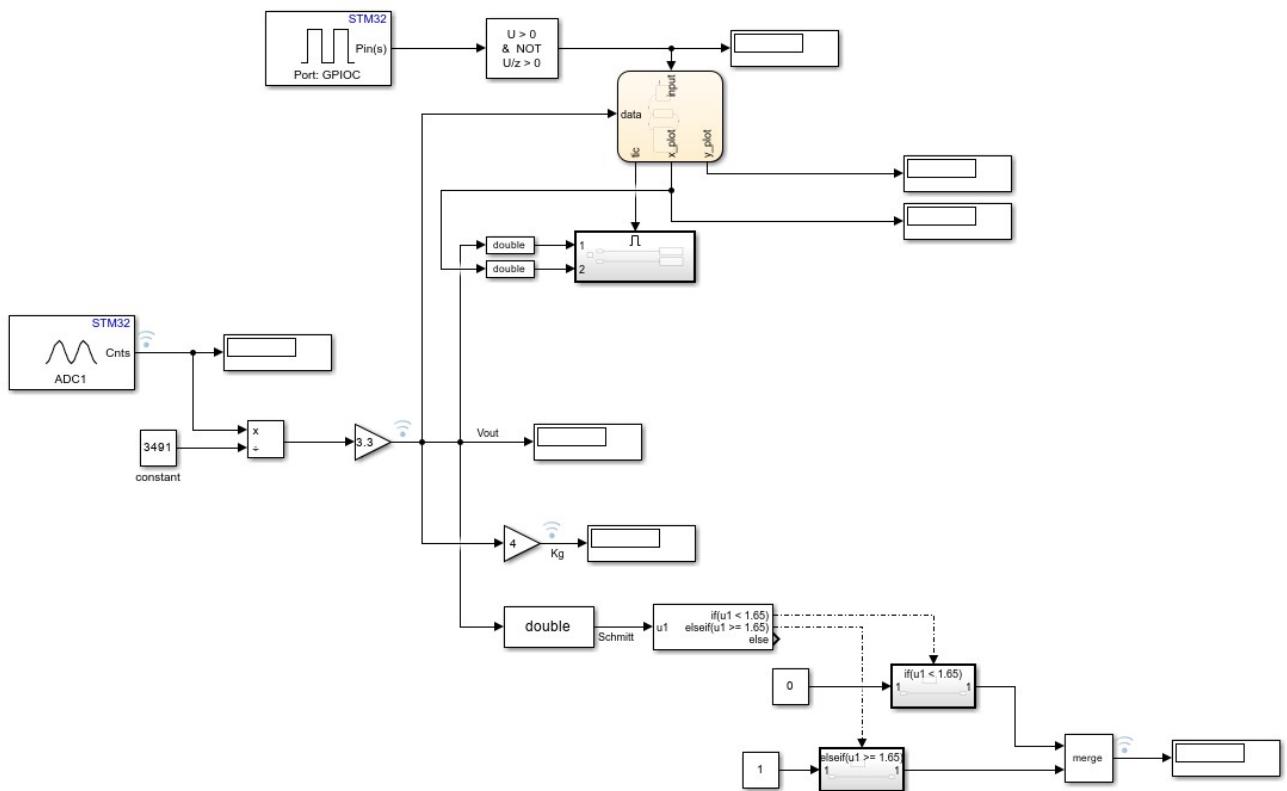
โดยที่  $G$  คือ Gain หรืออัตราขยายสัญญาณ

$R_G$  คือ ตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ มีหน่วยเป็น Ω

$$\text{จะได้ว่า } 488 = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

$$R_G = 123.967 \Omega$$

1.1.6 เขียนโปรแกรมด้วย Simulink เพื่อเก็บ Output Voltage ของ Load Cell ที่ผ่าน INA125 และ Nucleo STM32G474RE โดยกำหนดให้ เมื่อกดปุ่ม B1 บน STM32G474RE จะทำการเก็บค่าทุก ๆ 1 ms จากนั้นนำค่าที่เก็บได้มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell กับ Output Voltage โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 78 โปรแกรม Simulink

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก Load Cell เป็นสัญญาณแอนะล็อก และ Nucleo STM32G474RE อ่านค่าสัญญาณเป็นสัญญาณดิจิทัล และมีความละเอียดสูงสุด 12 bits จึงต้องแปลงค่าจาก 12 bits สู่ แรงดันไฟฟ้า 0-3.3 V แต่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการผ่าน INA125 และเข้าบอร์ดมีค่าสูงสุด 2.5V ซึ่งจะสามารถวัดน้ำหนัก 10 kg เป็น Output Voltage 2.5 V จากนั้นจึงหา Output Voltage โดยการนำไปเทียบกับค่าต่อร่างกาย และมีสมการคำนวณดังนี้

$$V_{out(a\_max)} = \frac{V_{out(d\_10kg)}}{V_{out(d\_constant)}} \times V_{in}$$

โดยที่ $V_{out(a\_max)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบแอนะล็อกสูงที่สุด 2.5 V
$V_{out(d\_10kg)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัลเมื่อมีน้ำหนัก 10 kg วางบน Load Cell มีค่า 2645 V
$V_{out(d\_constant)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัล ที่นำมาใช้ในการแปลง แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัลเมื่อมีน้ำหนัก 10 kg เป็น 2.5 V
$V_{in}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่เข้าอุปกรณ์ 3.3 V

จะได้ว่า

$$2.5 = \frac{2645}{V_{out(d\_constant)}} \times 3.3$$

$$V_{out(d\_constant)} = 3491 V$$

ซึ่งสามารถหาสมการ Output Voltage ได้โดย

$$V_{out(analog)} = \frac{V_{out(digital)}}{V_{out(d\_constant)}} \times V_{in}$$

โดยที่ $V_{out(analog)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบแอนะล็อก มีหน่วยเป็น V
$V_{out(digital)}$	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอุปกรณ์ในรูปแบบดิจิทัล มีหน่วยเป็น V

จะได้ว่า  $V_{out(analog)} = \frac{V_{out(digital)}}{3491} \times 3.3$

จากนั้นจึงนำไปเปรียบเทียบเพื่อวัดน้ำหนัก โดย 2.5 V เป็นแรงดันสูงที่สุดเมื่อมีน้ำหนัก 10 kg วางบน Load Cell จะได้สมการดังนี้

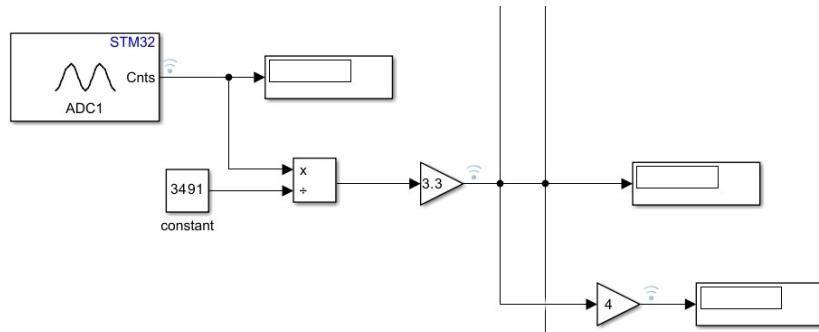
$$w_{max} = V_{out(a\_max)} \times c$$

โดยที่ $w_{max}$	คือ น้ำหนักของวัตถุที่มีค่ามากที่สุด 10 kg
$c$	คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็น 10 kg

จะได้ว่า  $10 = 2.5 \times c$

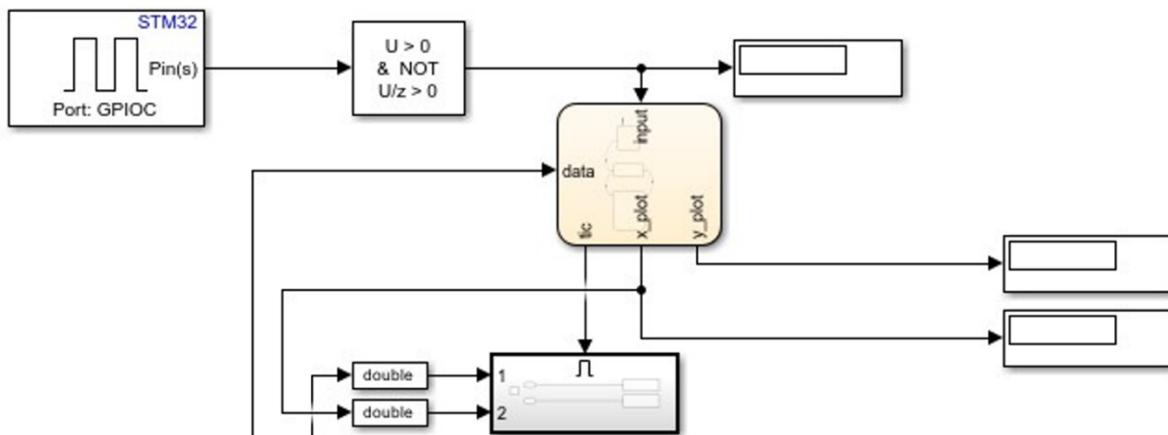
$$c = 4$$

จะได้ว่า  $w = V_{out(analog)} \times 4$

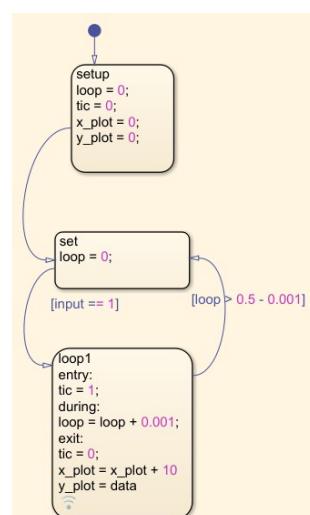


รูปที่ 79 การหา Output Voltage ในรูปแบบแอนะล็อก และการหาหน้าหนัก

เนื่องจากค่า Output Voltage ที่อ่านได้มีค่าที่ไม่คงที่ จึงทำการเก็บค่าในแต่ละตำแหน่งเป็นจำนวน 500 ค่า โดยที่เก็บค่าทุก ๆ 1 ms และทำการหาค่าเฉลี่ยเมื่อเก็บค่าได้ครบ 500 ค่า เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นเฉลี่ยจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างหน้าหนัก และ Output Voltage



รูปที่ 80 การหาค่าเฉลี่ยระหว่างหน้าหนัก กับ Output Voltage และสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ผล



รูปที่ 81 Chart สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปสร้างกราฟเปรียบเทียบ

### 5.9.3 เขียนโปรแกรมด้วย MATLAB เพื่อนำข้อมูลที่ได้จาก Simulink ไปสร้างกราฟ

```

1 addpath('C:\Users\user\Documents\FRA231_RMX\lab1_poten\Load_cell');
2 load(['0_kg.mat']);
3 load(['Load_value.mat']);
4
5 A = out.simout1;
6 chunkSize = 500;
7 avg0 = mean(out0_kg.simout1); % average Vout when 0 kg
% disp(avg0)
8
9
10 y = calculateChunkAverages(A, chunkSize); % average Vout when 1- 10 kg

```

รูปที่ 82 Code ใน MATLAB เพื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟ บรรทัดที่ 1-10

บรรทัดที่ 1-3 เป็นการเรียกข้อมูลที่ได้จาก Simulink และ MATLAB ที่ถูกสร้าง Function ไว้เพื่อใช้งาน และ บรรทัดที่ 5-6 เป็นการนำค่าไปแทนในตัวแปรเพื่อให่ง่ายต่อการเรียกใช้งาน ซึ่งบรรทัดที่ 7 เป็นการหา แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดจากการชั่งน้ำหนักที่ 0 kg

บรรทัดที่ 10 เป็นการเรียกใช้ฟังก์ชัน calculateChunkAverage เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตั้งแต่น้ำหนักที่ 1-10 kg โดยข้อมูลที่ได้จาก Simulink เป็น Array ขนาด 5000x1 ซึ่งทุก ๆ 500 ตัวจะเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการชั่งน้ำหนักบน Load Cell ที่เพิ่มครั้งละ 1 kg และเทบค่าไว้ในตัวแปร y

```

1 function avg_values = calculateChunkAverages(A, chunkSize)
2 % ตรวจสอบขนาดของ array
3 if isempty(A)
4     avg_values = []; % ถ้า array ว่าง ให้สินค้าเป็น array ว่าง
5     return;
6 end
7
8 % คำนวณจำนวนกลุ่มที่สามารถแบ่งได้
9 numGroups = floor(length(A) / chunkSize);
10
11 % สร้าง array สำหรับเก็บค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม
12 avg_values = zeros(1, numGroups);
13
14 % Loop เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม
15 for i = 1:numGroups
16     % ถึงข้อมูลของแต่ละกลุ่ม
17     groupData = A((i-1)*chunkSize + 1 : i*chunkSize);
18
19     % หาค่าเฉลี่ยของกลุ่มนั้น
20     avg_values(i) = mean(groupData);
21 end
22

```

รูปที่ 83 Code calculateChunkAverage

calculateChunkAverage ใช้ For Loop เพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่ม และส่งออกเป็น Array ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม โดยกลุ่มเกิดจากการนำจำนวนข้อมูลที่ได้จาก Simulink มาแบ่งตาม chunkSize

```

11 y = [avg0, y]; % add average 0 in average Vout when 1- 10 kg
12 y = y - avg0; % adjust offset"
13
14 % Define x for the plot
15 x = linspace(0, 10, length(y));
16 ax = axes;
17
18 % Plot the main data (y) in black or any other color
19 hold on; % Allows overlaying multiple plots
20 plot(x, y, 'LineWidth', 2);
21
22 % Enable grid
23 grid on;
24
25 % Labeling the axes
26 xlabel(ax, "Weight (%)");
27 ylabel(ax, "Vout (V)");
28 sgttitle('Load Cell Output and Applied Force');

```

รูปที่ 84 Code ใน MATLAB เพื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟ บรรทัดที่ 1-10

บรรทัดที่ 11 เป็นการนำแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการซั่งน้ำหนักบน Load Cell ที่ 0 kg กลับเข้าไปรวมใน Array เดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการซั่งน้ำหนักบน Load Cell ที่ 1-10 kg

บรรทัดที่ 12 คือการเลื่อน Offset เพื่อให้กราฟในแกน y เริ่มต้นที่ 0 และบรรทัดที่ 15 เป็นการกำหนดค่าในแกน x ตั้งแต่ 1-10 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 1

บรรทัดที่ 16-28 เป็นการสร้างกราฟ โดยสร้างกราฟในแกน x เป็นน้ำหนักตั้งแต่ 1-10 kg และแกน y เป็น Output Voltage

5.9.4 เพิ่มน้ำหนักที่วางบน Load Cell ครั้งละ 1 kg

5.9.5 กดปุ่ม B1 บน Nucleo STM32G474RE เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักที่วางบน Load Cell 1 kg

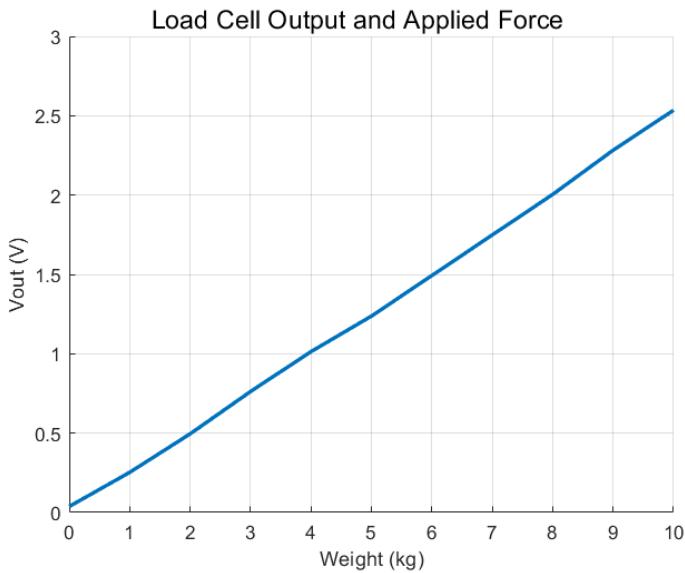
5.9.6 เพื่อเก็บ Output Voltage และทำข้า江南ครบ 10 kg จากนั้นจึงนำไปสร้างกราฟบน MATLAB

## 5.10 ผลการทดลอง

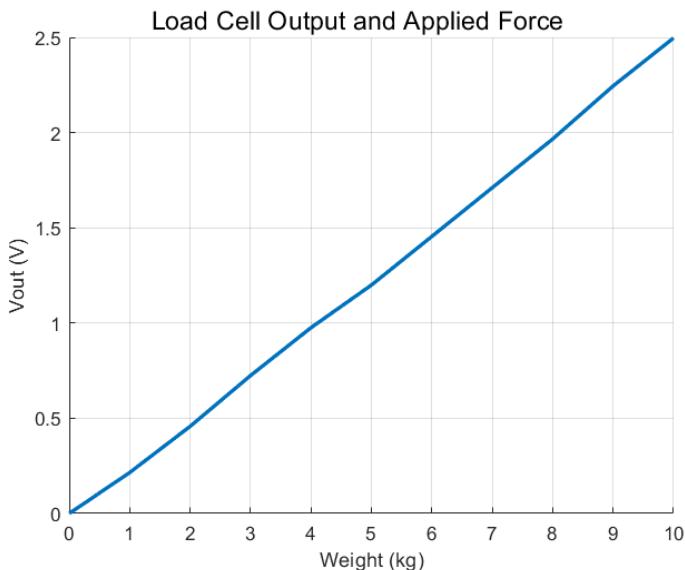
จากการเก็บค่า Output Voltage ที่ได้จากสัญญาณของ Load Cell ที่ผ่าน INA125 และนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่วางบน Load Cell ทำให้ได้ผลดังนี้

น้ำหนัก (kg)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_o$ (V)	0.038	0.253	0.495	0.762	1.013	1.237	1.493	1.749	2.004	2.283	2.534

ตารางที่ 7 ค่าของ Output Voltage ที่ได้จากสัญญาณของ Load Cell ที่ผ่าน INA125 ในแต่ละน้ำหนักที่วางบน Load Cell



รูปที่ 85 กราฟของ Load Cell Output Voltage และ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 86 กราฟของ Load Cell Output Voltage และ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการเลื่อน Offset

## 5.11 สรุปผล

จากการทดลองเพื่อทดสอบและวิเคราะห์การแปรผันของสัญญาณ Output ของ Load Cell ที่เปลี่ยนแปลงตามแรงที่กระทำ พบว่า Output Voltage ที่ได้เทียบกับน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปมีรูปร่างของกราฟเป็น Linear

โดยหลังจากเลื่อน Offset ให้แกน x และ y เริ่มต้นที่ 0 ทำให้ได้สมการ ดังนี้

$$y = 0.259x$$

โดยที่  $y$  คือ Output Voltage มีหน่วยเป็น V

$$x \quad \text{คือ} \quad \text{น้ำหนัก มีหน่วยเป็น kg}$$

## 5.12 อกิประายผล

จากสมมติฐานที่ตั้งไว้ เมื่อแรงที่กระทำต่อ Load Cell เพิ่มขึ้น สัญญาณ Output หรือแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก Load Cell จะเพิ่มขึ้นตามแรงที่กระทำ และจากการทดลอง พบว่าเป็นจริงตามสมมติฐาน โดยสามารถสังเกต ลักษณะการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักได้จากรูปร่างของกราฟเปรียบเทียบกับ Output Voltage ที่ มีลักษณะของกราฟเป็น Linear

จากการเปรียบเทียบกราฟเปรียบเทียบระหว่าง Output Voltage ที่ได้จากการการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพบว่า กราฟที่ 0 kg ไม่ได้มี Output Voltage ที่ 0 V ซึ่งมีสาเหตุมาจากการปรับค่า Single External Resistor ( $R_G$ ) ที่ไม่ แม่นยำตามที่คำนวณไว้ เนื่องจากความผิดพลาดของมนุษย์ ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ค่า Gain ของ INA125 จะ ส่งผลโดยตรงต่อค่าสัญญาณ Output จาก Load Cell เมื่อค่า Single External Resistor เปลี่ยนแปลง และเกิด ความผิดพลาดจากวัตถุที่นำมาชั่งน้ำหนักที่มีน้ำหนักไม่ตรงตามที่ต้องการซึ่ง และการสื่อสารของอุปกรณ์จากการใช้งาน

## 5.13 ข้อเสนอแนะ

- 5.13.1 ปรับ Single External Resistor ให้มีความแม่นยำมากขึ้น
- 5.13.2 ตรวจสอบการใช้งานของ Load Cell เพื่อให้แน่ใจว่ายังคงอยู่ในสภาพที่ดี
- 5.13.3 ควรทำการทดลองหลาย ๆ ครั้งในสภาวะที่แตกต่างกันเพื่อให้แน่ใจว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกัน

## 5.14 เอกสารอ้างอิง

- 5.14.1 <https://www.800loadcel.com/load-cell-and-strain-gauge-basics.html>
- 5.14.2 [https://tmi.jp/e/knowledge/strain\\_gauge/about.html](https://tmi.jp/e/knowledge/strain_gauge/about.html)
- 5.14.3 [http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap\\_notes/ni\\_an078\\_strain\\_gauge\\_meas.pdf](http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/ni_an078_strain_gauge_meas.pdf)
- 5.14.4 <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-062.pdf>