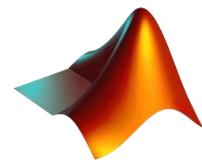


# RMXplorer



## LAB1 : Sensor Report

### Name

- นางสาวกฤติกา สุทธิผล 66340500001
- นายคุณานนต์ เศวตคชกุล 66340500006
- นางสาวนันท์นภัส วรานันต์ 66340500024

### Objectives

- สามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการสืบเสาะพัฒนาระบบ ประกอบการณ์ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เข้าใจหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทำงานทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สติติ และศาสตร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับ ตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเซ็นเซอร์ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายหลักการวัดความเร็วเชิงมุมของ Incremental Encoder และการอธิบายการวัดน้ำหนักของ Load Cell (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นน้ำหนักได้อย่างไร)
- สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลอง อธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่าเชื่อถือรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้อย่างทั้งหมดได้ด้วยตนเองอย่างถูกต้อง ตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง บันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มีกระบวนการทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองพร้อม บอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- สามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

## 1. การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Potentiometer

### 1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 ต้องสามารถทำตามการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลักได้
- 1.1.2 สามารถระบุชนิดของ Potentiometer ทั้งหมดในชุดการทดลองได้
- 1.1.3 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Potentiometer ทั้งหมดในชุดการทดลองได้ ตลอดจนสามารถอธิบายการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าข้าออกต่อระยะทาง หรือ องศาการหมุนของ Potentiometer

### 1.2 สมมติฐาน

หากเปลี่ยนระยะทางหรือองศาการหมุนของ Potentiometer แล้วจะส่งผลให้การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าข้าออกเปลี่ยนแปลงไป

### 1.3 ตัวแปรการศึกษา

#### 1.3.1 ตัวแปรต้น

ระยะทาง หรือ องศาการหมุนของ Potentiometer

#### 1.3.2 ตัวแปรตาม

การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าข้าออก

#### 1.3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า สายไฟ อุณหภูมิ สถานที่ทดสอบ และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

### 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.4.1 ระยะทางของ Potentiometer หมายถึง ระยะทางที่เลื่อน Linear Potentiometer ไปทางขวา ครั้งละ 10 มิลลิเมตร
- 1.4.2 องศาการหมุนของ Potentiometer หมายถึง การหมุน Potentiometer Knob ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ครั้งละ 10 Step โดยอ้างอิงจาก Scale ที่อยู่บนบอร์ด
- 1.4.3 การวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltage Measurement) หมายถึง การทำการวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและข้าออกของ Potentiometer เพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าข้าออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า หมายถึง การคำนวณโดยการนำค่า แรงดันไฟฟ้าข้าออกมาหารด้วยแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแล้วคูณด้วย 100 เพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลการทดลอง
- 1.4.4 การคำนวณเปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าข้าออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า หมายถึง การคำนวณโดยการนำค่า

1.4.5 การเก็บค่าจากการทดลอง หมายถึง การใช้ Simulink ในการเก็บข้อมูลเป็นชุดละ 500 ค่า ซึ่งคำนวนเพื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าตามระยะการหมุนของ Potentiometer

1.4.6 การเปรียบเทียบกราฟ หมายถึง นำค่าจากการทดลองมาเฉลี่ยแล้วทำการฟit เพื่อเปรียบเทียบกับกราฟจาก Datasheet เพื่อดูความสอดคล้องกัน

1.4.7 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Error Analysis) หมายถึง การใช้โปรแกรม Tracker ในการวัดตำแหน่งและใช้ Error Bar เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนของค่า

## 1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

1.5.1 Potentiometer A หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103A2 หรือ Rotary Potentiometer Type A Series

1.5.2 Potentiometer B หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103B หรือ Rotary Potentiometer Type B Series

1.5.3 Potentiometer C หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103C หรือ Rotary Potentiometer Type C Series

1.5.4 Linear Potentiometer A หมายถึง Potentiometer รุ่น PTA6043-2015DPA103 หรือ Low Profile Slide Potentiometer Type A

1.5.5 Linear Potentiometer B หมายถึง Potentiometer รุ่น PTA6043-2015DPB103 หรือ Low Profile Slide Potentiometer Type A

1.5.6 PotenXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer และมี 3D-Print ที่ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทร็กเตอร์

1.5.7 Potentiometer (โพแทโนซิโอมิเตอร์) หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าหรือความต้านทานได้โดยการเลื่อนขาสไลด์ไปบนตัวต้านทาน ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของขาสไลด์

1.5.8 Resistance Taper หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามการหมุนของ Potentiometer มีลักษณะเช่น Linear Taper (เส้นตรง) และ Audio Taper (ลอการิทึม)

1.5.9 Nucleo STM32G474RE หมายถึง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รองรับการควบคุมและการประมวลผลสัญญาณอย่างรวดเร็ว ใช้ในการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจาก Potentiometer

1.5.10 MATLAB หมายถึง โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้จาก Potentiometer สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองและสร้างกราฟผลการทดลอง

1.5.11 Tracker หมายถึง ซอฟต์แวร์ที่ใช้ติดตามและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ ใช้ในงานนี้เพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งจาก การเคลื่อนที่ของ Potentiometer กับข้อมูลจาก Datasheet

1.5.12 Error Bar หมายถึง ส่วนประกอบของกราฟที่แสดงช่วงความคลาดเคลื่อนของข้อมูลผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จาก Datasheet

1.5.13 Simulink หมายถึง ซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองและจำลองการแปลงข้อมูลจาก bit เป็นแรงดันไฟฟ้าช่วยในการประมวลผลสัญญาณจาก Potentiometer

1.5.14 Vcc หมายถึง แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้า

1.5.15 ADC หมายถึง อุปกรณ์หรือวงจรที่ใช้ในการแปลงสัญญาณอนาล็อก (Analog Signal) ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal)

1.5.16 trigger หมายถึง สัญญาณที่ใช้กระตุนให้วงจรเริ่มทำงาน

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.6.1 Potentiometer

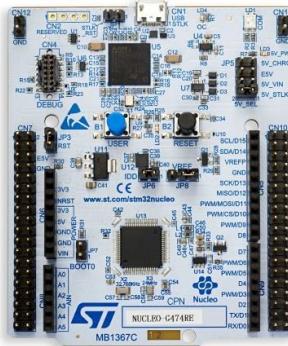
Potentiometer (โพเทนชิโอมิเตอร์) เป็นทรานซิสเตอร์วัดตำแหน่งและระยะทาง โดยอาศัยหลักการแปลงตำแหน่งและระยะการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งในโพเทนชิโอมิเตอร์มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน และหน้าสัมผัสที่สามารถเลื่อนไปมาบนตัวต้านทานได้ โดยค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นตามระยะการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกับขดลวด



รูปที่ 1 Potentiometer

### 1.6.2 Nucleo STM32G474RE

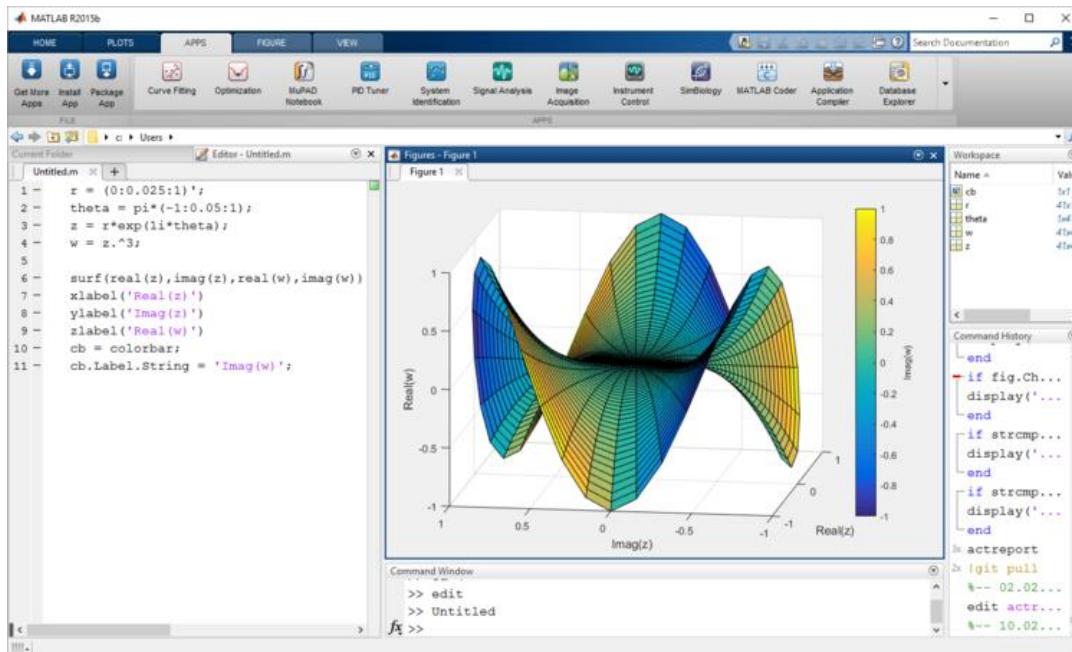
เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์จาก STMicroelectronics ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น การควบคุมมอเตอร์ การแปลงสัญญาอนาล็อก/ดิจิทัล การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 2 Nucleo STM32G474RE

### 1.6.3 MATLAB

MATLAB เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น วิเคราะห์ข้อมูลพัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอปพลิเคชัน การประมวลผลสัญญาณและการสื่อสาร การประมวลผลภาพและวิดีโอ เป็นต้น



รูปที่ 3 แสดงหน้าโปรแกรม MATLAB

## 1.6.4 Datasheet PDB18 Series 17 mm Rotary Potentiometer

1.6.4.1 ตารางแสดงรายละเอียดของลักษณะเฉพาะในส่วนต่าง ๆ ของ potentiometer ชนิด PDB18

### Electrical Characteristics

Taper.....	Linear, audio
Standard Resistance Range .....	1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance.....	±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.

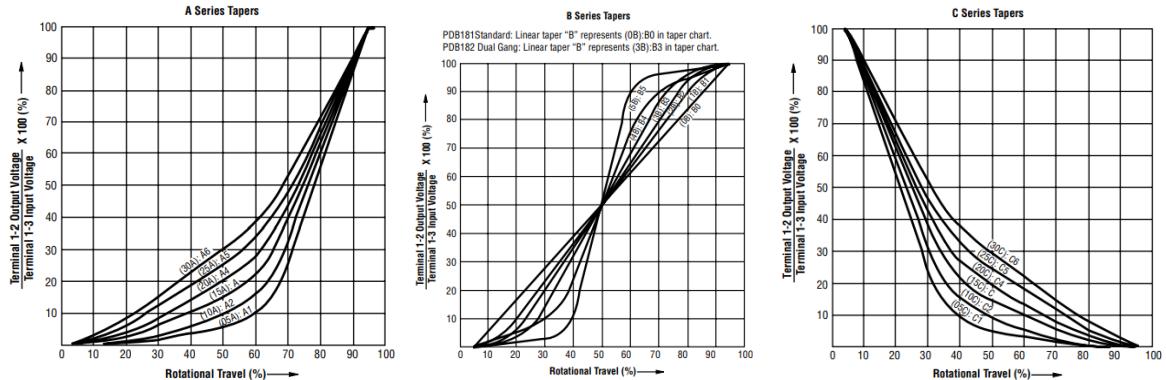
### Mechanical Characteristics

Mechanical Angle .....	300 ° ±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 ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของ potentiometer ชนิด PDB18

จากรูปที่ 4 ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะเฉพาะของ Potentiometer ชนิด PDB18 ทั้งในส่วนของ Electrical environment และ Mechanical ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ควรคำนึงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### 1.6.4.2 กราฟแสดง Potentiometer Taper Curve ของ A Series, B Series และ C Series



รูปที่ 5 กราฟ Potentiometer Taper Curve ของ A Series ,B Series และ C Series

จากรูปที่ 5 เป็นกราฟแสดง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ Potentiometer Taper Curve ของ Potentiometer โดยแต่ละเส้นโค้งแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับ Taper ประเภทต่าง ๆ ซึ่งในแนวแกน y นั้นจะเป็นการแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของ Potentiometer ซึ่งเทียบกับแรงดันไฟฟาระหว่าง Terminal 1 และ 3 (ข้อจ่ายไฟและข้อ梧กลางของ Potentiometer) และแนวแกน x เป็นการแสดงถึงมุมการหมุนของ Potentiometer (ตัวหมุนปรับ) ในรูป เปอร์เซ็นต์

#### 1.6.5 Datasheet PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

##### 1.6.5.1 ตารางแสดงรายละเอียดของลักษณะเฉพาะในส่วนต่าง ๆ ของ PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

### **Electrical Characteristics**

Taper.....	Linear, audio
Standard Resistance Range .....	1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance.....	±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

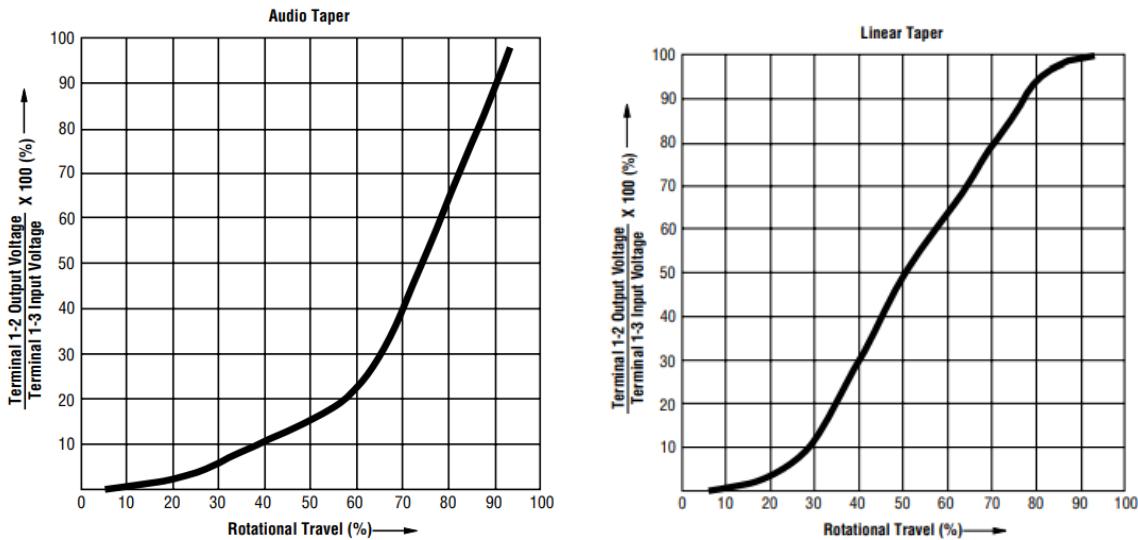
### **Mechanical Characteristics**

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 6 ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

จากรูปที่ 6 ประกอบไปด้วยข้อมูลถักข่ายของ potentiometer ชนิด Low Profile Slide Potentiometer ทั้งในส่วนของ Electrical ,Environment และ Mechanical ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ควรคำนึงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### 1.6.5.2 กราฟแสดง Potentiometer Taper Curve ของ Audio Taper และ Linear Taper

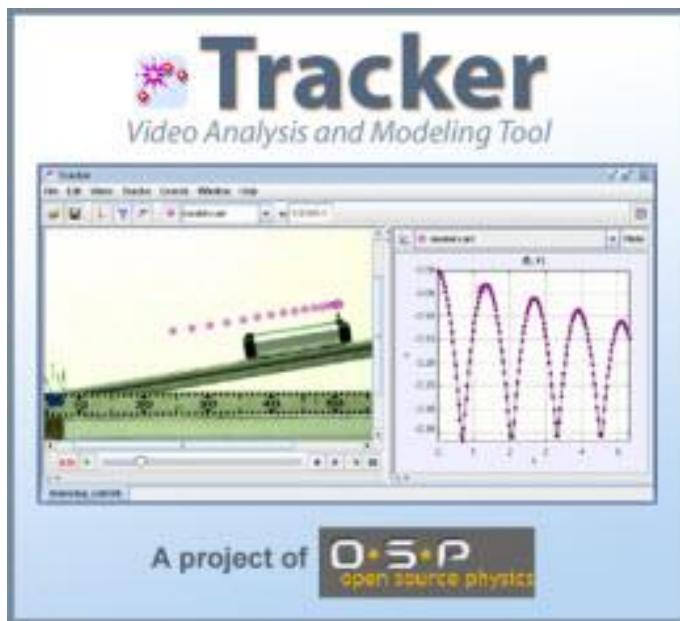


รูปที่ 7 กราฟ Potentiometer Taper Curve ของ Audio Taper และ Linear Taper

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ Potentiometer Taper Curve ของ Potentiometer โดยแต่ละเส้นโค้งแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับ Taper ประเภทต่าง ๆ ซึ่งในแนวแกน y นั้นจะเป็นการแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของ Potentiometer ซึ่งเทียบกับแรงดันไฟฟาระหว่าง Terminal 1 และ 3 (ขั้วจ่ายไฟและขั้วกลางของ Potentiometer) และแนวแกน x เป็นการแสดงถึงมุมการหมุนของ Potentiometer (ตัวหมุนปรับ) ในรูปเปอร์เซ็นต์ และการเลือกเปรียบเทียบกราฟนั้นสามารถแยกได้จากค่า Resistance Taper หากค่า Resistance taper คือ A ให้เปรียบเทียบกับกราฟ Audio Taper แต่หากค่า Resistance Taper คือ B ให้เปรียบเทียบกับกราฟ Linear Taper

### 1.6.6 Tracker

Tracker เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์วิดีโอและสร้างแบบจำลองหรือสมการที่สนใจ ซึ่งสามารถวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ คำนวนหาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และวัดกราฟ คุณสมบัติของโปรแกรม Tracker มีหลายอย่าง เช่น การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงกราฟ การใช้กฎฟิสิกส์เพื่อวิเคราะห์ การตั้งค่าระบบพิกัด



รูปที่ 8 แสดงหน้าโปรแกรม Tracker

### 1.6.7 Finite State Machines

Finite State Machines เป็นแบบจำลองการคำนวณที่ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีจำนวนสถานะจำกัด โดยส่วนประกอบของ Finite State Machines มีดังนี้

1. สถานะ (State) เป็นการกำหนดสถานะของระบบ โดยแต่ละสถานะจะมีการอธิบายเงื่อนไขของระบบ
2. การเปลี่ยน (Transitions) มีเงื่อนไขที่ทำให้สถานะเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง
3. เหตุการณ์ (Events) ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น การรับสัญญาณอินพุต
4. การกระทำ (Actions) การกระทำที่เกิดขึ้นตอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ
5. สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะที่ระบบจะอยู่ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
6. สถานะสุดท้าย (Final State) ระบบจะสิ้นสุดการทำงานที่สถานะนี้

## 1.7 วิธีดำเนินการทดลอง

- 1.7.1 ศึกษาข้อมูล Potentiometer แต่ละประเภทจาก Datasheet เพื่อทำความเข้าใจคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ค่า Resistance Taper และการแปลงแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อหมุน Potentiometer
- 1.7.2 เชื่อมต่อ Potentiometer เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยเชื่อม Terminal ขา 1 กับแหล่งจ่ายไฟ (Vcc) และขา 3 กับกราวด์ (GND) และขา 2 กับช่องรับสัญญาณของบอร์ดเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของ
- 1.7.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอปป์โหลด เพื่อให้สามารถส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB
- 1.7.4 สร้างโมเดลใน Simulink เพื่อแปลงค่าที่อ่านได้จาก ADC ของ Nucleo STM32G474RE ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าของ
- 1.7.5 เพิ่มส่วนการคำนวนเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าของเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเข้า
- 1.7.6 ใช้ State flow ใน Simulink เพื่อเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงการหมุนหรือการเลื่อนของ Potentiometer โดยกำหนดให้เก็บค่า 500 ครั้งต่อการหมุน 10 องศาสำหรับ Rotary Potentiometer หรือเลื่อน 10 มิลลิเมตรสำหรับ Linear Potentiometer และบันทึกค่าลงใน MATLAB
- 1.7.7 ใช้ MATLAB ในการคำนวนค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าของจากข้อมูลที่เก็บได้
- 1.7.8 สร้างกราฟที่แกน Y แสดงแรงดันเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง และแกน X แสดงระยะหมุนหรือเลื่อนของ Potentiometer เป็นเปอร์เซ็นต์
- 1.7.9 ใช้ Error Bar เพื่อแสดงช่วงค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 20\%$  ที่อิงตามค่ามาตรฐานจาก Datasheet
- 1.7.10 นำข้อมูลจากการทดลองเปรียบเทียบกับกราฟ Taper Curve จาก Datasheet ที่ได้สร้างใน Tracker
- 1.7.11 อภิปรายผลที่ได้ รวมถึงปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

## 1.8 วัสดุอุปกรณ์

1.8.1 PTA6043-2015DPA103	จำนวน 1 ตัว
1.8.2 PTA6043-2015DPB103	จำนวน 1 ตัว
1.8.3 PDB181-K420K-103A2	จำนวน 1 ตัว
1.8.4 PDB181-K420K-103B	จำนวน 1 ตัว
1.8.5 PDB181-K420K-103C	จำนวน 1 ตัว
1.8.6 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอปป์โหลด	จำนวน 1 ชุด
1.8.7 PotenXplorer	จำนวน 1 ชุด
1.8.8 สายจ้มเปอร์	จำนวน 3 เส้น

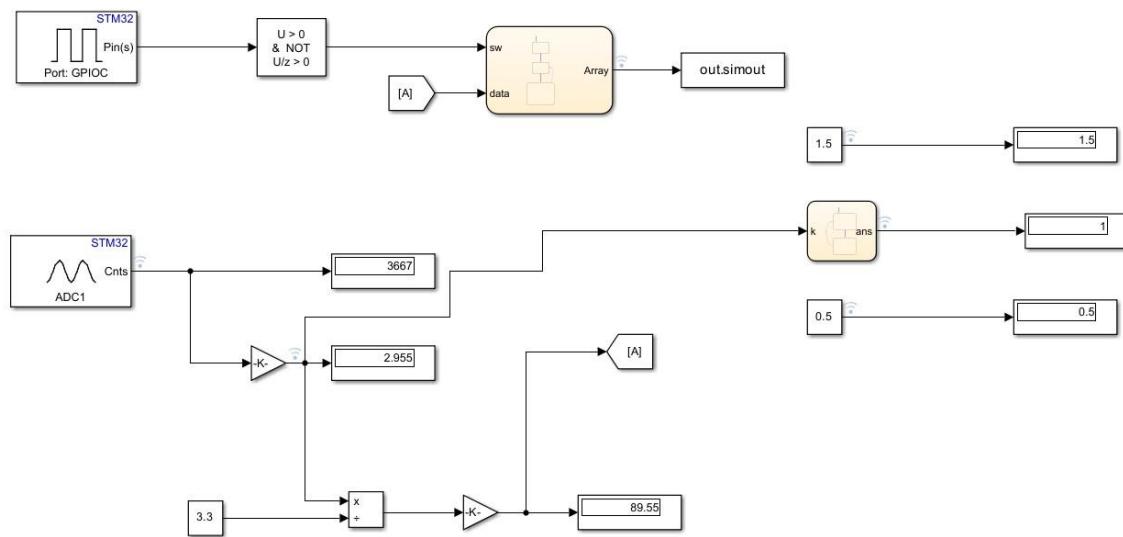
## 1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.9.1 ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Potentiometer แต่ละประเภทจาก Datasheet เพื่อทำความเข้าใจคุณลักษณะสำคัญ เช่น ค่า Resistance Taper (A, B, C) และลักษณะการตอบสนอง (Linear, Audio, Exponential)

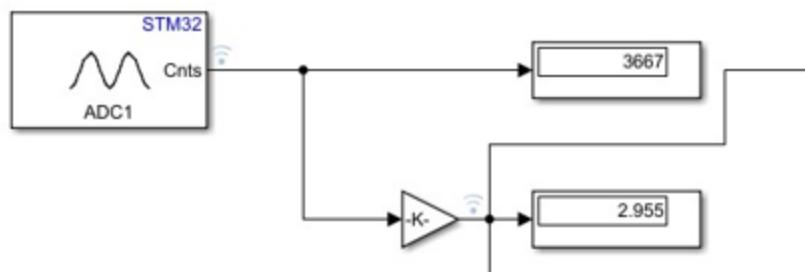
1.9.2 เชื่อม Terminal ของ potentiometer ขา 1 กับ Vcc (แรงดันไฟฟ้าขาเข้า) ขา 3 กับกราวด์ (GND) และขา 2 กับช่องรับสัญญาณของบอร์ด Nucleo STM32G474RE

1.9.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอป็อกซ์ิด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่ได้รับไปยัง MATLAB โดยตั้งค่าสายช่องรับสัญญาณให้เป็นโหมด Single-End

1.9.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink สำหรับการแปลงค่า และการเก็บค่า Potentiometer



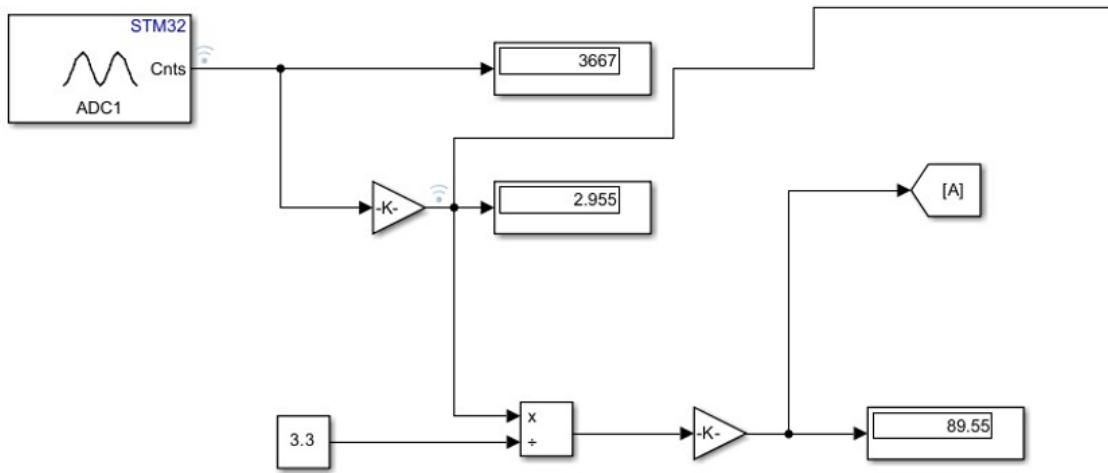
รูปที่ 9 ภาพรวมของ Simulink ที่ใช้ในการแปลงค่าและเก็บค่า Potentiometer



รูปที่ 10 ภาพ Simulink ในส่วนที่ใช้ในการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็น ค่าแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 10 เมื่อทำการรับสัญญาณมาจากบอร์ดแล้ว ค่าที่ได้จะเป็นค่า ADC ซึ่งอยู่ในช่วง 0 – 4095 แต่ค่าที่ต้องการเพื่อนำมาสร้างกราฟ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออก จึงทำการคูณค่า K เพื่อทำการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก ซึ่งค่า K นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$K = \frac{1}{4095} \times 3.3$$

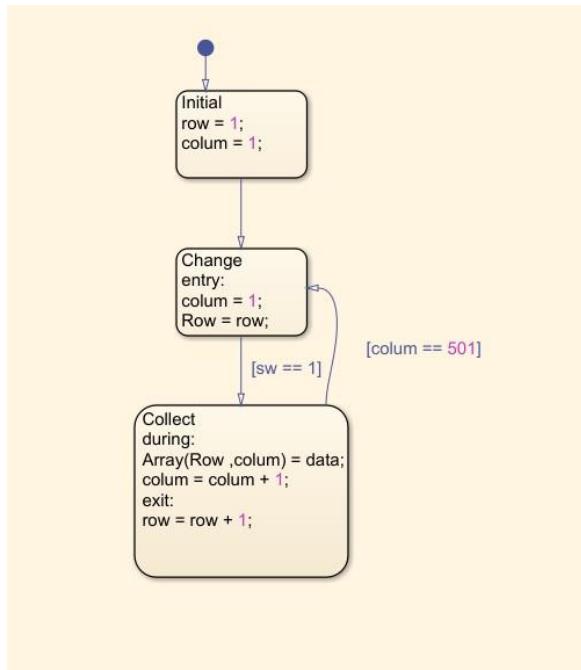


รูปที่ 11 ภาพ Simulink ในส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแรงดันขาออกต่อแรงดันขาเข้า

จากรูปที่ 11 หลังจากการแปลงค่าจำนวน bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแล้ว จะนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าขาออกเทียบกับแรงไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการสมการ ดังนี้

$$\frac{\text{Output Voltage}}{\text{Input Voltage}} \times 100 (\%)$$

เมื่อคำนวณค่าออกมาได้แล้ว จะทำการเก็บค่าโดยได้ใช้ State flow เข้ามาช่วยในส่วนนี้



รูปที่ 12 Chart ที่ใช้เก็บข้อมูล

จากรูปที่ 12 จะใช้ State flow ในการเก็บค่าจากการทดลอง โดยใน Chart จะมี Array ในการเก็บค่า ซึ่ง Array มีขนาด  $11 \times 500$  โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อมีการกดสวิตช์จะมีการเปลี่ยน State จาก State Change เข้าไปสู่ State Collect เพื่อทำการเก็บค่าจากแรงดันไฟฟ้าของหัววัดได้มา 500 ค่าใน colum ทั้ง 500 colum นี้ เมื่อเก็บครบแล้วจะกลับไปสู่ State Change เพื่อเปลี่ยนแผลในการเก็บค่า และจะต้องกดสวิตช์ เพื่อเป็นการ trigger ให้เข้าไปสู่ State Collect ในการเก็บค่าต่อไป

1.9.5 ทำการเก็บค่าโดยสำหรับ Potentiometer Knob จะทำการเก็บค่า 500 ค่าในการหมุนทุก 10 Step ส่วน Linear Potentiometer จะทำการเก็บค่า 500 ค่าในระยะทางทุก ๆ 10 มิลลิเมตร โดยจะทำการเก็บค่าเป็นตัวแปร Array ไว้ใน MATLAB เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ

1.9.6 นำค่าที่เก็บได้มาหาค่าเฉลี่ย และนำไปสร้างกราฟโดยทำการเขียนโปรแกรมใน MATLAB

```

1 arr_Poten_A = ones(1, 11);
2 arr_Poten_B = ones(1, 11);
3 arr_Poten_C = ones(1, 11);
4 arr_Per = [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100];
5
6 for i = 1:11
7     arr_Poten_A(i) = mean(A(i, :));
8     arr_Poten_B(i) = mean(B(i, :));
9     arr_Poten_C(i) = mean(C(i, :));
10 end
11
12 x = arr_Per;
13 y = [arr_Poten_A; arr_Poten_B; arr_Poten_C];
14
15 ax_1 = subplot(2, 2, [1, 2, 3, 4]);
16
17 c = 'rgb';
18 sr = {'Poten A', 'Poten B', 'Poten C'};
19
20 plot(ax_1, x, y(2, :), [c(1) '-'], 'LineWidth', 2);
21 hold(ax_1, 'on');
22
23 grid(ax_1, 'on');
24 xlabel(ax_1, 'Relational Travel [%]', 'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');
25 ylabel(ax_1, "Percent Voltage [%]", 'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');
26 legend(ax_1, sr{2});

```

รูปที่ 13 Code ส่วนหาค่าเฉลี่ยของค่าที่เก็บมา และในส่วนของการ Plot graph

จากรูป 13 จะสร้าง Array ใหม่ที่มีขนาด  $1 \times 11$  ที่มีค่าทั้งหมดเป็น 1 เพื่อใช้ในการเก็บค่า และใช้ For Loop ในการนำค่า 500 ค่าในแต่ละแกรมมาหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปเก็บ โดยการนำค่าที่เฉลี่ยได้มายังแทบที่ค่า 1 ใน Array ที่ตำแหน่งนั้น หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไป Plot graph โดยแกน y ของกราฟจะเป็นค่าเฉลี่ยที่นำมาได้ และแกน x ของกราฟจะเป็นร้อยละระยะทางของ Potentiometer

1.9.7 จากราฟผลการทดลองที่ได้ ทางคณะผู้จัดทำจะนำมาอภิปรายผลเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้ โดยการนำกราฟที่ได้ไปเทียบกับกราฟจาก Datasheet ของ Potentiometer แต่ละประเภท ซึ่งสร้างขึ้นโดยการเก็บค่าในแต่ละตำแหน่งด้วยโปรแกรม Tracker และสร้าง Error Bar ซึ่งอิงตามค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน (Standard Resistance Tolerance) ภายใน Potentiometer แต่ละชนิดโดยจะมีค่าอยู่ที่  $\pm 20\%$  เพื่อดูว่าผลการทดลองที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์หรือไม่

```

28 x1 = [5,10, 20,30,40,50,60,70,80,90,94];
29 y1 = [0,5,17,28,38,50,62,74,84,95,100];
30 plot(ax_1, x1, y1, 'k-', 'LineWidth', 2);
31 |
32 err1 = 0.2 * y1;
33 errorbar(ax_1, x1, y1, err1, err1, 'r', 'LineStyle', 'none');
34 legend(ax_1, sr{2}, 'Datasheet', 'Error Bar');
35
36 hold(ax_1, 'off');
--
```

รูปที่ 14 Code ส่วนวิเคราะห์กราฟ

จากรูปที่ 14 เป็นส่วนของการ Plot graph เพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยใช้ตัวแหน่งที่หามาจากโปรแกรม Tracker เพื่อใช้ในการ Plot graph ที่เป็นไปตาม Datasheet และจะมีการเขียนให้เส้นกราฟมี Error Bar เพื่อถือว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีเกินค่าความคลาดเคลื่อนที่ระบุใน Datasheet

1.9.8 ทำการทดลองและเก็บข้อมูลแบบเดิมดังข้อ 1.9.5 – 1.9.7 กับ Potentiometer ทั้ง 5 ตัว

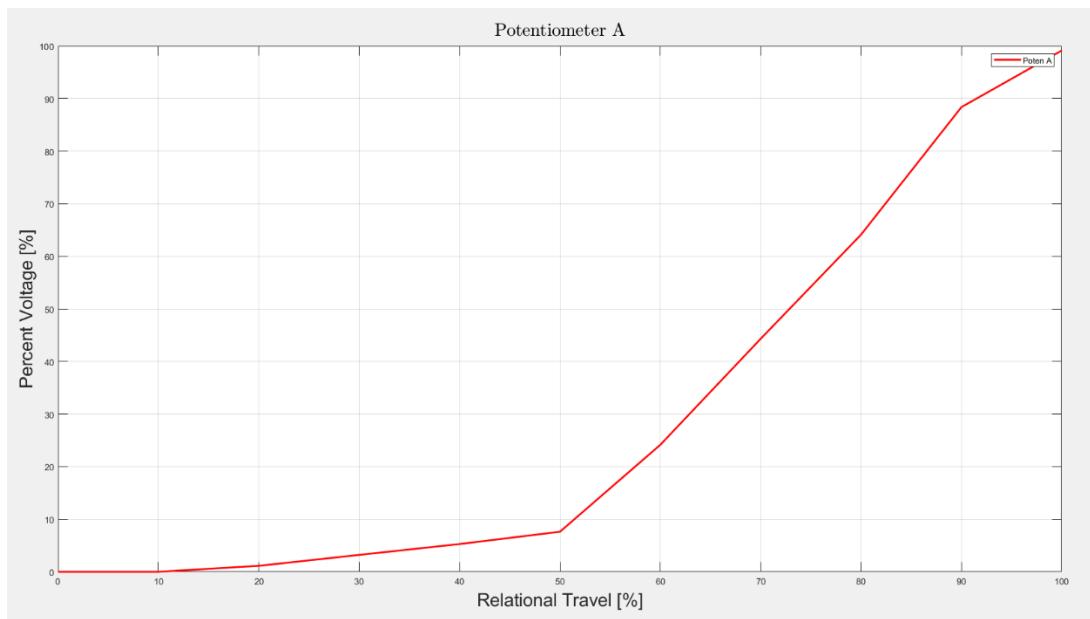
1.9.9 อภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน เช่น ความไม่เสถียรของการวัด อุปกรณ์ หรือสภาพแวดล้อม

## 1.10 ผลการทดลอง

### 1.10.1 ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ A

ตารางที่ 1 แสดงร้อยละการหมุนของ Potentiometer A เทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าข้าอกต่อขาเข้า

ร้อยละการหมุนของ Potentiometer A	ค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าข้าอกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
0	0
10	0
20	1.132
30	3.214
40	5.275
50	7.615
60	24.150
70	44.315
80	64.125
90	88.369
100	99.141

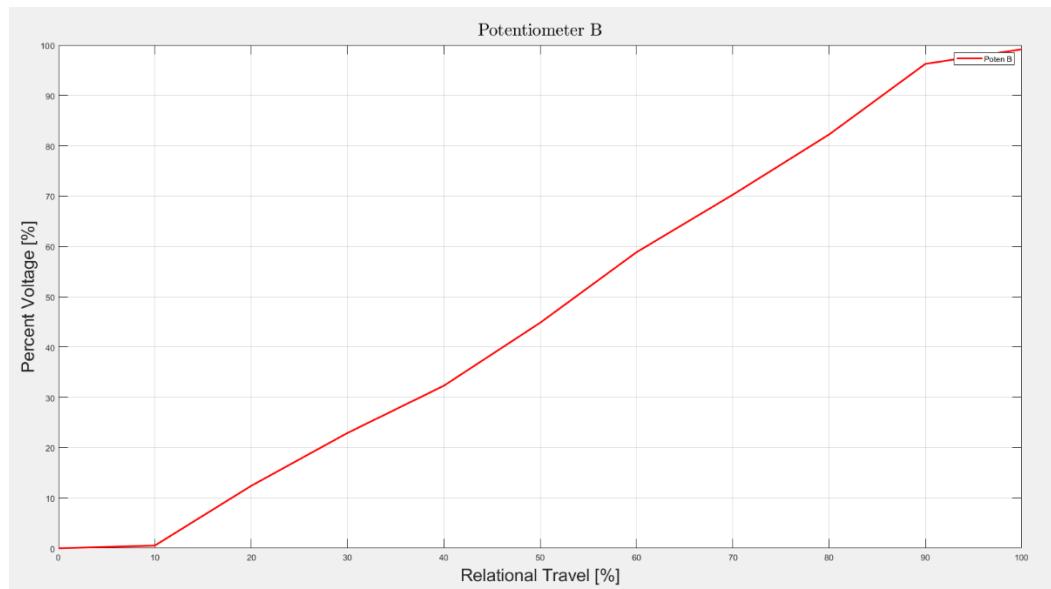


รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับร้อยละการหมุนของ Potentiometer A

### 1.10.2 ผลการทดลองที่ได้จาก Potentiometer B

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละการหมุนของ Potentiometer B เทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อขาเข้า

ร้อยละการหมุนของ Potentiometer B	ค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
0	0
10	0.526
20	12.394
30	22.908
40	32.289
50	44.806
60	58.819
70	70.251
80	82.228
90	96.266
100	99.162

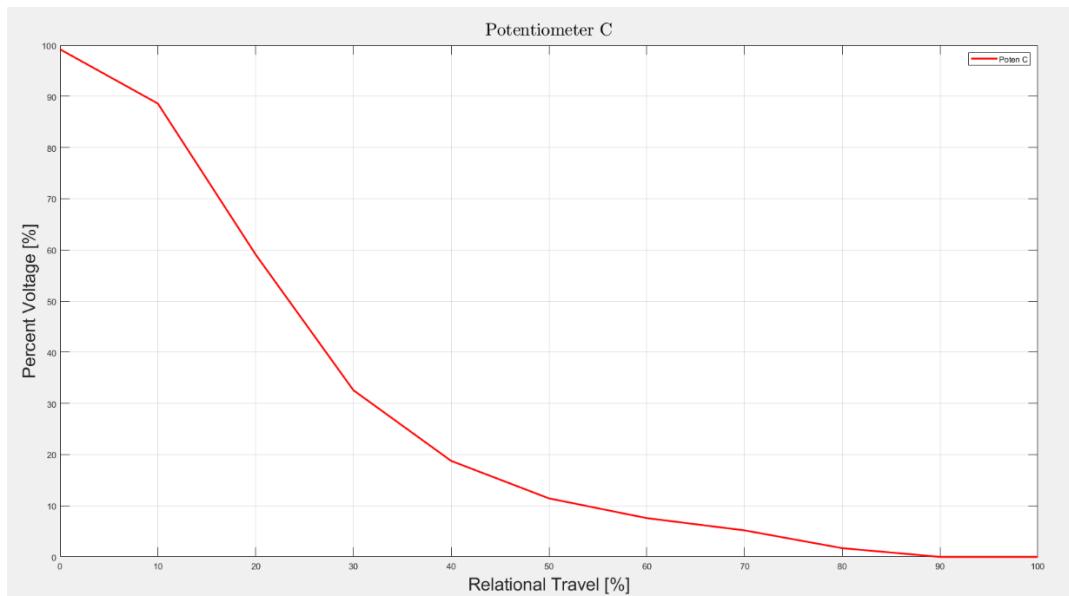


รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับร้อยละการหมุนของ Potentiometer B

### 1.10.3 ผลการทดลองที่ได้จาก Potentiometer C

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการหมุนของ Potentiometer C เทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อขาเข้า

ร้อยละการหมุนของ Potentiometer C	ค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
0	99.184
10	88.592
20	59.095
30	32.564
40	18.754
50	11.430
60	7.576
70	5.179
80	1.670
90	0
100	0

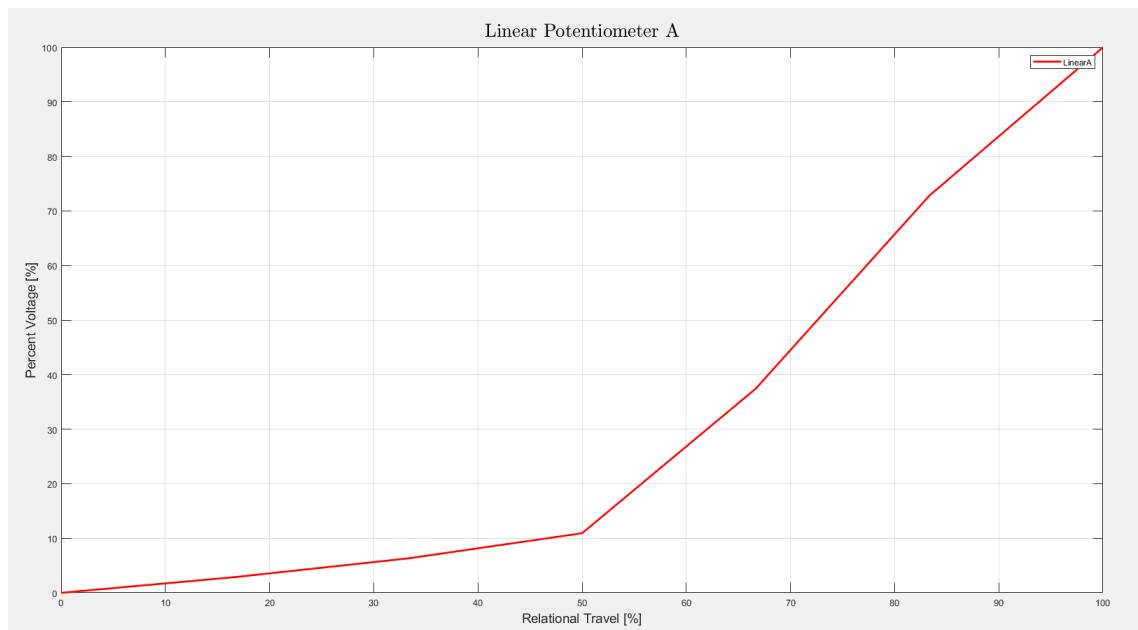


รูปที่ 17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับร้อยละการหมุนของ Potentiometer C

#### 1.10.4 ผลการทดลองที่ได้จาก Linear Potentiometer A

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละระยะทางของ Linear Potentiometer A เทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

ร้อยละของระยะทางของ Linear Potentiometer A	ค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
0.00	0
16.67	2.882
33.33	6.318
50.00	10.922
66.67	37.428
83.33	72.795
100.00	99.999

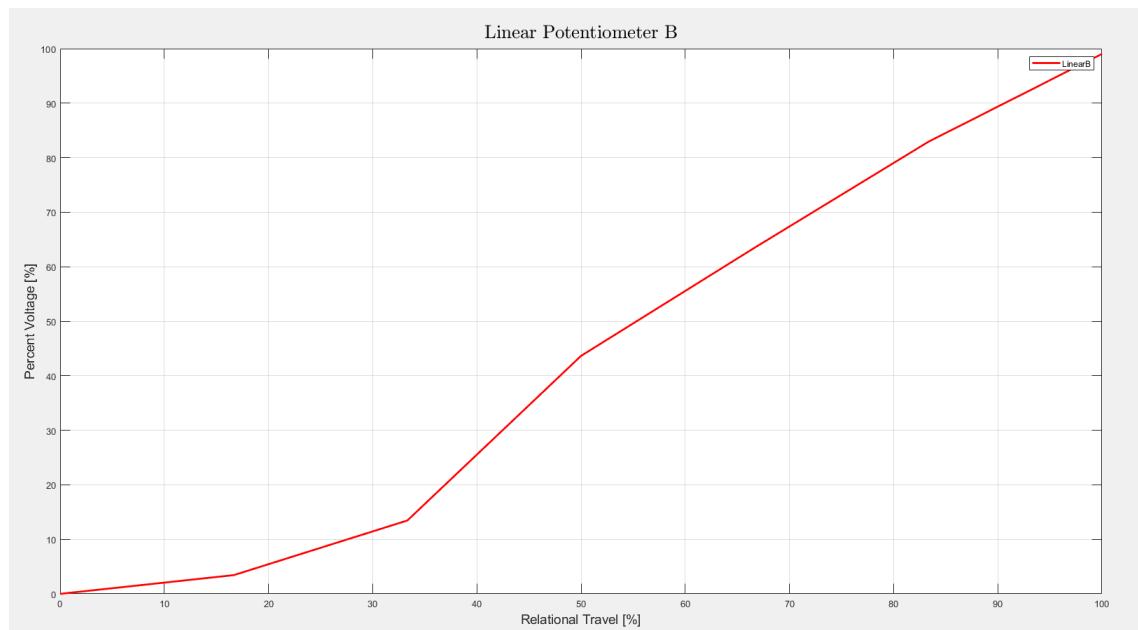


รูปที่ 18 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับร้อยละการหมุนของ Linear Potentiometer A

### 1.10.5 ผลการทดลองที่ได้จาก Linear Potentiometer B

ตารางที่ 5 แสดงร้อยละระยะทางของ Linear Potentiometer B เทียบกับค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

ร้อยละของระยะทางของ Linear Potentiometer B	ค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
0.00	0.000
16.67	3.435
33.33	13.455
50.00	43.648
66.67	63.501
83.33	82.910
100.00	99.042

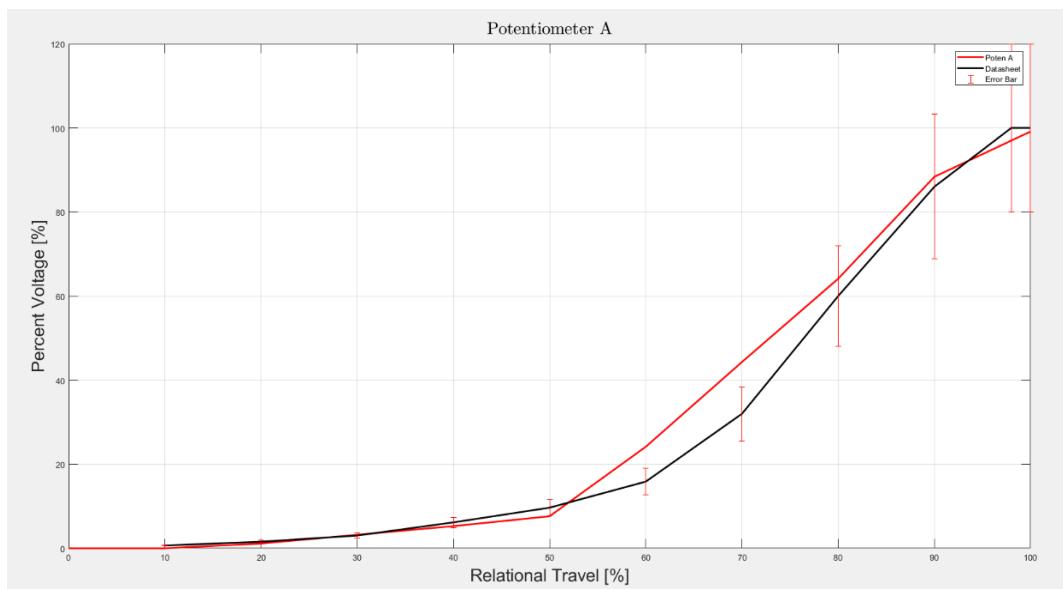


รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยร้อยละแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเทียบกับร้อยละการหมุนของ Linear Potentiometer B

## 1.11 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า แรงดันไฟฟ้าข้ออกของ Potentiometer แปรผันตามองศาสตร์หมุนหรือระยะทางของ Potentiometer อย่างมีนัยยะสำคัญ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ โดย Potentiometer แต่ละชนิด จะให้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าข้ออกที่แตกต่างกัน

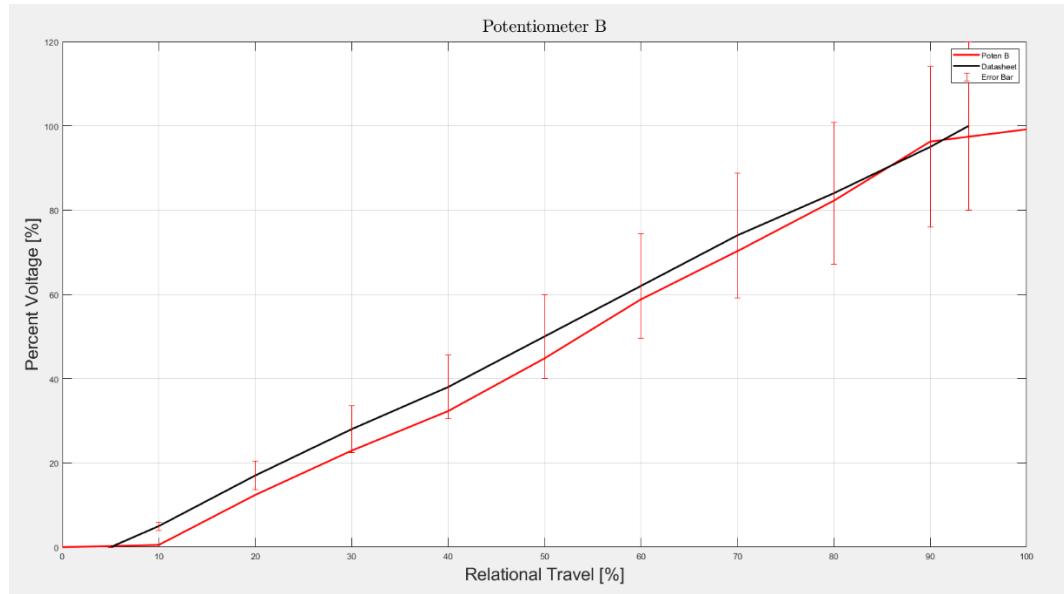
### 1.11.1 Potentiometer A



รูปที่ 20 กราฟที่แสดงการวิเคราะห์กราฟของ Potentiometer A เทียบกับกราฟของ Datasheet

จากราฟจะเห็นได้ว่า กราฟของ Potentiometer A เป็นกราฟตามสมการ Exponential Growth

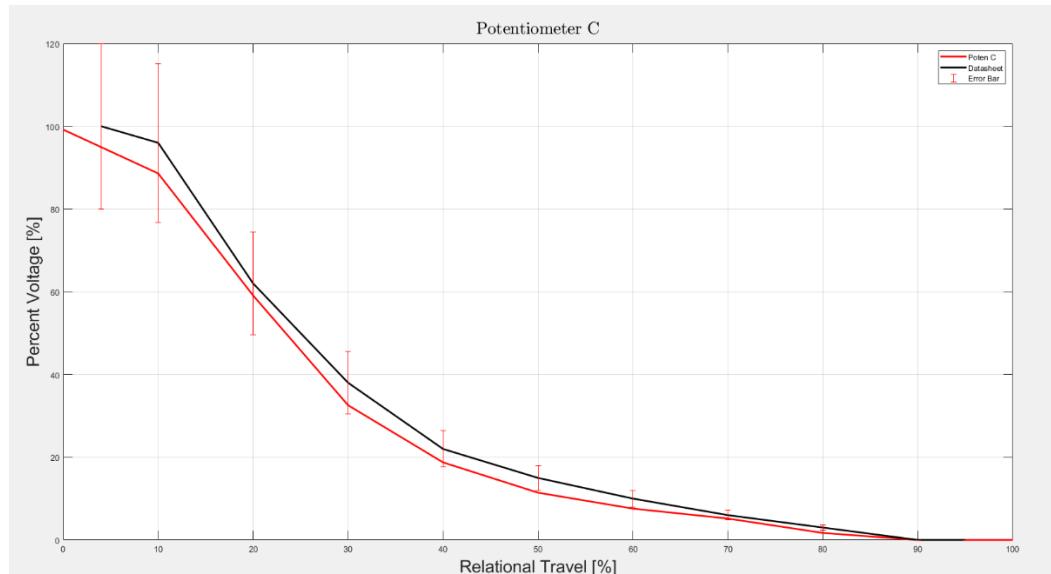
### 1.11.2 Potentiometer B



รูปที่ 21 กราฟที่แสดงการวิเคราะห์กราฟของ Potentiometer B เทียบกับกราฟของ Datasheet

จากราฟจะเห็นได้ว่ากราฟของ Potentiometer B เป็นกราฟตามสมการเชิงเส้น (Linear)

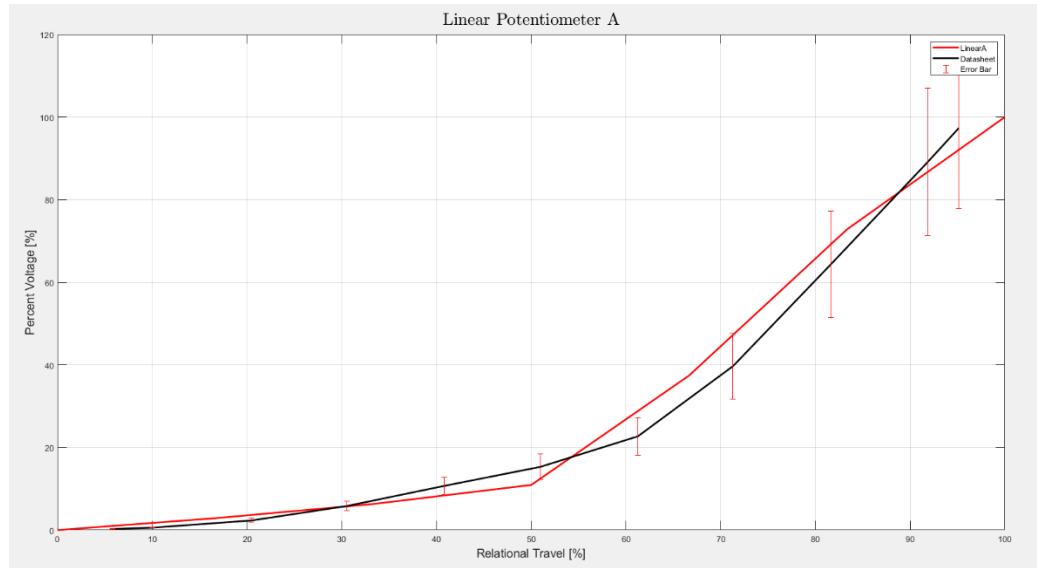
### 1.11.3 Potentiometer C



รูปที่ 22 กราฟที่แสดงการวิเคราะห์กราฟของ Potentiometer C เทียบกับกราฟของ Datasheet

จากราฟจะเห็นได้ว่ากราฟของ Potentiometer C เป็นกราฟตามสมการ Exponential Decay

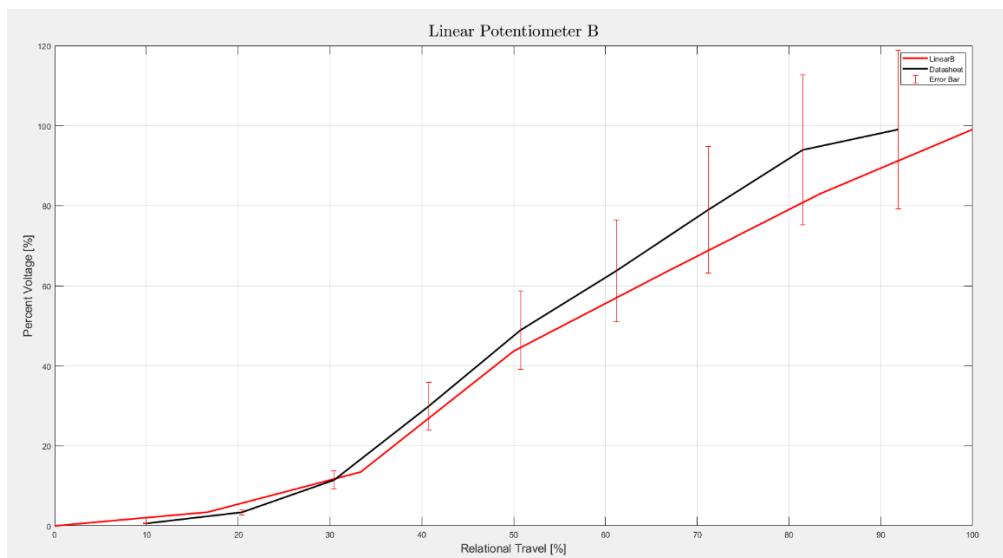
#### 1.11.4 Linear Potentiometer A



รูปที่ 23 กราฟที่แสดงการวิเคราะห์กราฟของ Linear Potentiometer A เทียบกับกราฟของ Datasheet

จากราฟจะเห็นได้ว่ากราฟของ Linear Potentiometer A เป็นกราฟตามสมการ Exponential Growth

#### 1.11.5 Linear Potentiometer B



รูปที่ 24 กราฟที่แสดงการวิเคราะห์กราฟของ Linear Potentiometer B เทียบกับกราฟของ Datasheet

จากราฟจะเห็นได้ว่ากราฟของ Linear Potentiometer B เป็นกราฟตามสมการ Sigmoid

## 1.12 อกิจกรรมการทดลอง

จากการสังเกต จะพบได้ว่า เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลของ Datasheet โดยอิงตามค่าเกณฑ์ (Error bar) ซึ่งมาจากค่า Standard Resistance Tolerance หรือค่ามาตรฐานความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทานอยู่ที่ซึ่งมีค่าอยู่ที่  $\pm 20\%$  จะมีทั้งค่าที่อยู่ในเกณฑ์เป็นส่วนมาก โดยสาเหตุที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากระยะทาง หรือองค์การหมุนของ Potentiometer ไม่ได้เป็นไปตามที่ออกแบบการทดลองไว้ เนื่องจาก Scale ที่มีบนบอร์ด อาจไม่ได้ตรงกับตำแหน่งของ Potentiometer พอดี และในการหมุนหรือขยับแต่ละครั้งจะใช้การมองด้วยตาเปล่าในการหมุนหรือขยับเท่านั้น รวมถึงอาจมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองได้ ด้วยปัจจัยเหล่านี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการจัดเก็บข้อมูลได้

นอกจากนี้แล้วจากการทดลองจะพบว่า Potentiometer แต่ละชนิดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายในโดยการปรับระยะทาง หรือองค์การหมุนของ Potentiometer จะมีรูปแบบการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โดย Potentiometer A จะมีการตอบสนองในรูปแบบตามสมการ Exponential Growth , Potentiometer B จะมีการตอบสนองในรูปแบบตามสมการ Exponential Decay และ Linear Potentiometer A จะมีการตอบสนองในรูปแบบตามสมการ Sigmoid

## 1.13 ข้อเสนอแนะ

- 1.13.1 ทำงาน Low-pass Filter เพิ่มในโปรแกรม Simulink เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้น
- 1.13.2 ทำ Scale ที่จะใช้ในการวัดระยะทาง หรือทิศทางในการหมุน Potentiometer ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อให้การปรับค่ามีความแม่นยำมากขึ้น
- 1.13.3 ทำการเก็บค่าให้ละเอียดมากขึ้น มีการแบ่งช่วงที่ละเอียดมากขึ้น

## 1.14 เอกสารอ้างอิง

- [1] Potentiometer / โพเทนชิโอมิเตอร์ - Food Wiki | Food Network Solution
- [2] <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/pta.pdf>
- [3] <https://www.bourns.com/pdfs/PDB18.pdf>
- [4] <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/pta-778345.pdf>
- [5] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html>
- [6] <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [7] <https://physlets.org/tracker/>

## 2. การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Schmitt-Trigger

### 2.1 วัตถุประสงค์

2.1.1 สามารถทำตามการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลักได้

2.1.2 สามารถแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt-Trigger ได้ โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสังหารหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจากการหมุน Potentiometer ด้วยมือเป็น Input และสัญญาณ Digital เป็น Output จากการ Log สัญญาณ แสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

### 2.2 สมมติฐาน

หากแปลงสัญญาณ Analog ที่เกิดจากการหมุน Potentiometer เป็นสัญญาณ Digital ด้วยวงจร Schmitt-Trigger แล้วสัญญาณ Digital ที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณ Analog แบบ Real Time

### 2.3 ตัวแปรการศึกษา

#### 2.3.1 ตัวแปรต้น

ระยะทาง หรือองศาการหมุนของ Potentiometer

#### 2.3.2 ตัวแปรตาม

สัญญาณ Digital จากการ Log สัญญาณ

#### 2.3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า สายไฟ อุณหภูมิ สถานที่ทดสอบ และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

### 2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

2.4.1 การแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital หมายถึง กระบวนการที่สัญญาณ Analog จาก Potentiometer ถูกแปลงเป็นสัญญาณ Digital โดยใช้ Simulink ในการแปลงค่า

2.4.2 การเปรียบเทียบสัญญาณจาก Data Inspector หมายถึง กระบวนการแสดงและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จาก การทดลอง โดยใช้ Data Inspector ใน MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกราฟสัญญาณ Analog และ Digital ก่อนและหลัง การแปลง เป็นการตรวจสอบคุณภาพของวงจร Schmitt Trigger และแสดงให้เห็นถึงความเสถียรของสัญญาณที่ได้

## 2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

2.5.1 Potentiometer A หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103A2 หรือ Rotary Potentiometer Type A Series

2.5.2 Potentiometer B หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103B หรือ Rotary Potentiometer Type B Series

2.5.3 Potentiometer C หมายถึง Potentiometer รุ่น PDB181-K420K-103C หรือ Rotary Potentiometer Type C Series

2.5.4 Linear Potentiometer A หมายถึง Potentiometer รุ่น PTA6043-2015DPA103 หรือ Low Profile Slide Potentiometer Type A

2.5.5 Linear Potentiometer B หมายถึง Potentiometer รุ่น PTA6043-2015DPB103 หรือ Low Profile Slide Potentiometer Type A

2.5.6 PotenXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer และมี 3D-Print ที่ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทร็กเตอร์

2.5.7 Potentiometer (โพเทนชิโอมิเตอร์) คือ อุปกรณ์ที่สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าหรือความต้านทานได้ โดยการเลื่อนขาสไลด์ไปบนตัวต้านทาน ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของขาสไลด์

2.5.8 Nucleo STM32G474RE คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่รองรับการควบคุมและการประมวลผลสัญญาณอย่างรวดเร็ว ใช้ในการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจาก Potentiometer

2.5.9 MATLAB คือ โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้จาก Potentiometer สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองและสร้างกราฟผลการทดลอง

2.5.10 Simulink คือ ซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองและจำลองการแปลงข้อมูลจาก bit เป็นแรงดันไฟฟ้า ช่วยในการประมวลผลสัญญาณจาก Potentiometer

2.5.11 Vcc คือ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้กับวงจรไฟฟ้า

## 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 Potentiometer

Potentiometer (โพเทนชิโอมิเตอร์) เป็นทรานซิสเตอร์วัดตำแหน่งและระยะทาง โดยอาศัยหลักการแปลงตำแหน่งและระยะการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งในโพเทนชิโอมิเตอร์มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน และหน้าสัมผัสที่สามารถเลื่อนไปมาบนตัวต้านทานได้ โดยค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นตามระยะการเคลื่อนที่ของหน้าสัมผัสที่สัมผัสกับขดลวด



รูปที่ 25 Potentiometer

### 2.6.2 Nucleo STM32G474RE

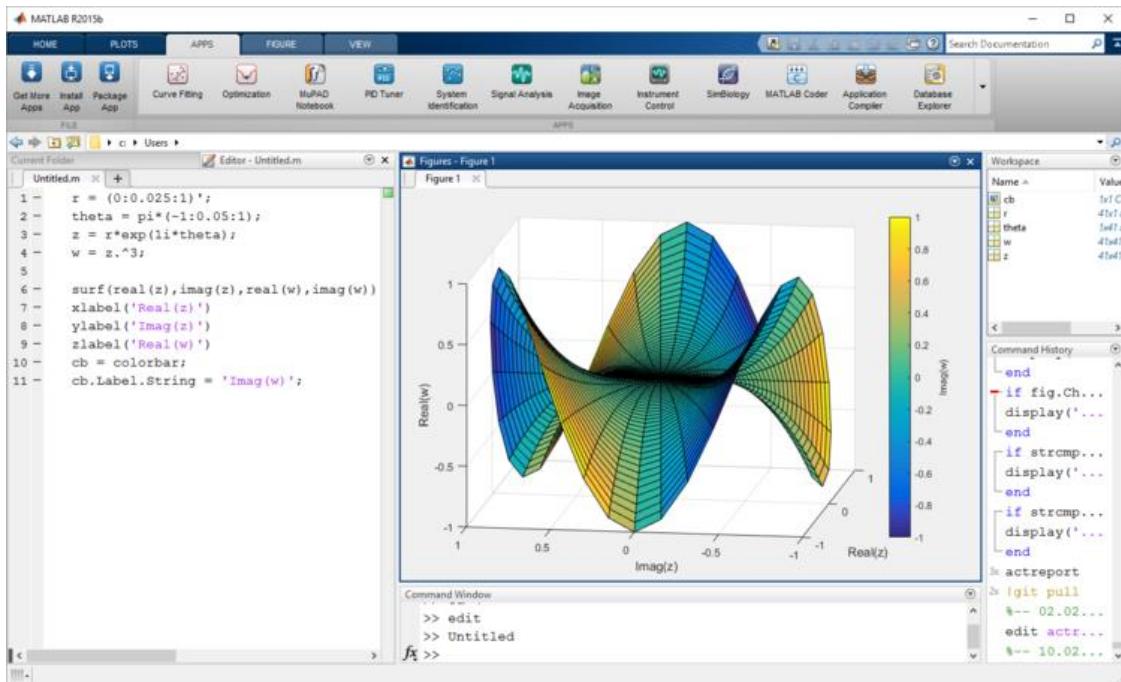
เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์จาก STMicroelectronics ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น การควบคุมมอเตอร์ การแปลงสัญญาณอนาล็อก/ดิจิทัล การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 26 Nucleo STM32G474RE

### 2.6.3 MATLAB

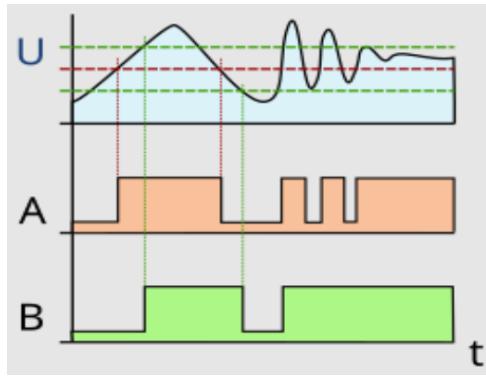
MATLAB เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น วิเคราะห์ข้อมูล พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอปพลิเคชัน การประมวลผลสัญญาณและการสื่อสาร การประมวลผลภาพและวิดีโอ เป็นต้น



รูปที่ 27 แสดงหน้าโปรแกรม MATLAB

### 2.6.4 Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger เป็นวงจรที่แปลงสัญญาณอินพุตแบบแอนalog เป็นสัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิทัลโดยวิธีนี้ใช้คุณสมบัติที่เรียกว่า ฮิสเทอเรชิส ซึ่งเป็นการคงค่าเอาต์พุตไว้จนกว่าอินพุตจะเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่เพียงพอที่จะทริกเกอร์การเปลี่ยนแปลง เมื่ออินพุตสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ เอาต์พุตจะเป็น High แต่เมื่ออินพุตสูงกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ เอาต์พุตจะเป็น Low ซึ่งการทำแบบนี้จะช่วยให้วงจรต้านทานสัญญาณรบกวนได้



รูปที่ 28 Schmitt-Trigger

## 2.6.5 Datasheet PDB18 Series 17 mm Rotary Potentiometer

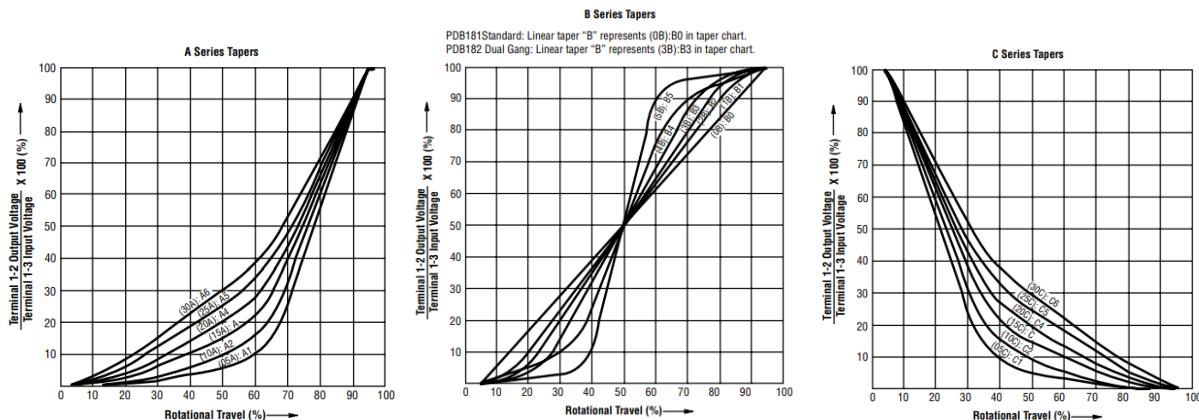
2.6.5.1 ตารางแสดงรายละเอียดของลักษณะเฉพาะในส่วนต่าง ๆ ของ Potentiometer ชนิด PDB18

Electrical Characteristics	
Taper.....	Linear, audio
Standard Resistance Range .....	1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance.....	±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 ° ±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 29 ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของ Potentiometer ชนิด PDB18

จากรูปที่ 29 ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะเฉพาะของ Potentiometer ชนิด PDB18 ทั้งในส่วนของ Electrical ,Environment และ Mechanical ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ควรคำนึงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

### 2.6.5.2 กราฟแสดง Potentiometer Taper Curve ของ A Series, B Series และ C Series



รูปที่ 30 กราฟ Potentiometer Taper Curve ของ A Series, B Series และ C Series

จากรูปที่ 30 เป็นกราฟแสดง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ Potentiometer Taper Curve ของ Potentiometer โดยแต่ละเส้นโค้งแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับ Taper ประเภทต่าง ๆ ซึ่งในแนวแกน Y นั้นจะเป็นการแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของ Potentiometer ซึ่งเทียบกับแรงดันไฟฟาระหว่าง Terminal 1 และ 3 (ขั้วจ่ายไฟและขั้วกลางของ Potentiometer) และแนวแกน X เป็นการแสดงถึงมุมการหมุนของ Potentiometer (ตัวหมุนปรับ) ในรูป เปอร์เซ็นต์

### 2.6.6 Datasheet PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

#### 2.6.6.1 ตารางแสดงรายละเอียดของลักษณะเฉพาะในส่วนต่าง ๆ ของ PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

### **Electrical Characteristics**

Taper.....	Linear, audio
Standard Resistance Range .....	1 K ohms to 1 M ohms
Standard Resistance Tolerance.....	±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

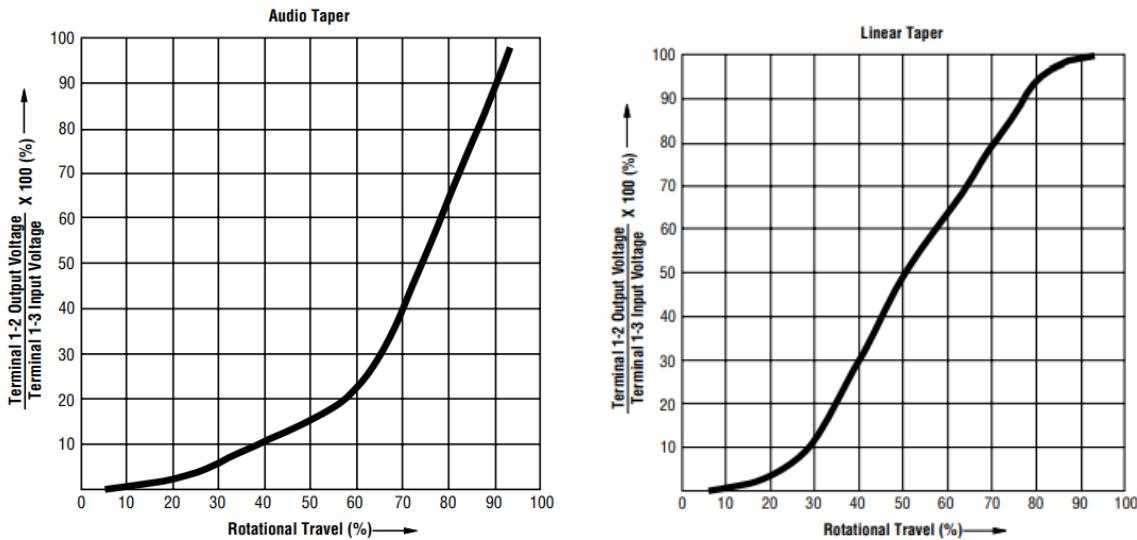
### **Mechanical Characteristics**

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 31 ข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ PTA Series Low Profile Slide Potentiometer

จากรูปที่ 31 ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะเฉพาะของ Potentiometer ชนิด Low Profile Slide Potentiometer ทั้งในส่วนของ Electrical Environment และ Mechanical ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ควรคำนึงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

#### 2.6.6.2 กราฟแสดง Potentiometer Taper Curve ของ Audio Taper และ Linear Taper



รูปที่ 32 กราฟ Potentiometer Taper Curve ของ Audio Taper และ Linear Taper

จากรูปที่ 32 เป็นกราฟแสดง ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน หรือ Potentiometer Taper Curve ของ Potentiometer โดยแต่ละเส้นโค้งแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสำหรับ Taper ประเภทต่าง ๆ ซึ่งในแนวแกน Y นั้นจะเป็นการแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของ Potentiometer ซึ่งเทียบกับแรงดันไฟฟาระหว่าง Terminal 1 และ 3 (ขั้วจ่ายไฟและขั้วกลางของ Potentiometer) และแนวแกน X เป็นการแสดงถึงมุกการหมุนของ Potentiometer (ตัวหมุนปรับ) ในรูปเปอร์เซ็นต์ และการเลือกเปรียบเทียบกราฟนั้นสามารถแยกได้จากค่า Resistance Taper หากค่า Resistance taper คือ A ให้เปรียบเทียบกับกราฟ Audio Taper แต่หากค่า Resistance taper คือ B ให้เปรียบเทียบกับกราฟ Linear Taper

### 2.6.7 Finite State Machines

Finite State Machines เป็นแบบจำลองการคำนวณที่ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีจำนวนสถานะจำกัด โดยส่วนประกอบของ Finite State Machines มีดังนี้

1. สถานะ (State) เป็นการกำหนดสถานะของระบบ โดยแต่ละสถานะจะมีการอธิบายเงื่อนไขของระบบ
2. การเปลี่ยน (Transitions) มีเงื่อนไขที่ทำให้สถานะเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง
3. เหตุการณ์ (Events) ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น การรับสัญญาณอินพุต
4. การกระทำ (Actions) การกระทำที่เกิดขึ้นตอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ
5. สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะที่ระบบจะอยู่ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
6. สถานะสุดท้าย (Final State) ระบบจะสิ้นสุดการทำงานที่สถานะนี้

## 2.7 วิธีดำเนินการทดลอง

2.7.1 ศึกษาการทำงานของวงจร Schmitt-Trigger และเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็นในการทดลอง

2.7.2 เปิด MATLAB และออกแบบ Simulink เพื่อรับสัญญาณ Analog จาก Potentiometer ผ่านบอร์ด Nucleo STM32G474RE

2.7.3 สร้างโมเดลใน Simulink เพื่อแปลงสัญญาณจากหน่วยบิตเป็นแรงดันไฟฟ้าในหน่วยโวลต์

2.7.4 การสร้างวงจร Schmitt-Trigger ใน Simulink โดยตั้งระดับแรงดันสำหรับ High ที่ 1.5 V และ Low ที่ 0.5 V เพื่อให้ได้สัญญาณ Digital ที่เสถียร

2.7.5 ทดสอบและเก็บค่า โดยการลองหมุน Potentiometer ให้ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงไป โดยบันทึกสัญญาณที่ได้ใน Simulink และส่งค่าไปยัง MATLAB Data Inspector

2.7.6 นำสัญญาณ Analog และสัญญาณ Digital ที่ผ่าน Schmitt-Trigger มาเปรียบเทียบใน Data Inspector เพื่อความเสถียรของสัญญาณหลังการแปลง

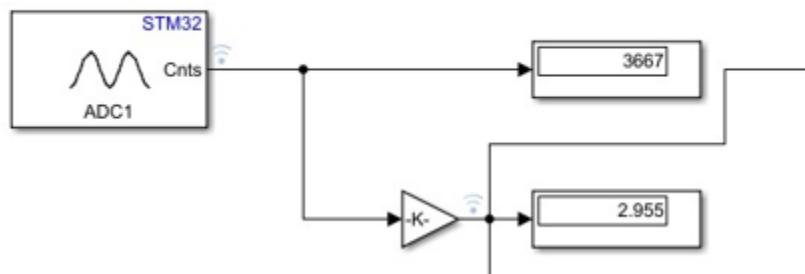
2.7.7 วิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพและความเสถียรของวงจร Schmitt-Trigger

## 2.8 วัสดุอุปกรณ์

2.8.1 PTA6043-2015DPA103	จำนวน 1 ตัว
2.8.6 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด	จำนวน 1 ชุด
2.8.7 PotenXplorer	จำนวน 1 ชุด
2.8.8 สายจัมเปอร์	จำนวน 3 เส้น

## 2.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

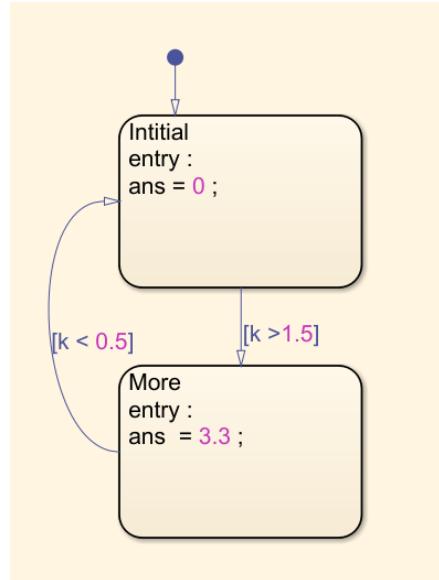
- 2.9.1 ศึกษาการทำงานของวงจร Schmitt-Trigger และ เตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น ได้แก่ Potentiometer, บอร์ด Nucleo STM32G474RE, สายจัมเปอร์, และอุปกรณ์เขื่อมต่อ
- 2.9.2 เชื่อม Terminal ของ Potentiometer ขา 1 กับ Vcc (แรงดันไฟฟ้าขาเข้า) ขา 3 กับกราวด์ (GND) และขา 2 กับช่องรับสัญญาณของบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 2.9.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอัปโหลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB โดยตั้งค่าสายช่องรับสัญญาณให้เป็นโหมด Single-End
- 2.9.4 ออกแบบและสร้างโมเดลสำหรับการแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital



รูปที่ 33 ภาพ Simulink ในส่วนที่ใช้ในการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็น ค่าแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 33 เมื่อทำการรับสัญญาณมาจากบอร์ดแล้ว ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 0 – 4095 ซึ่งคือค่าจำนวน bit แต่ค่าที่ต้องการเพื่อนำมาสร้างกราฟ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและแรงดันไฟฟ้าขาออก จึงทำการคูณค่า K เพื่อทำการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก (Volt) ซึ่งค่า K นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$K = \frac{1}{4095} \times 3.3$$



รูปที่ 34 Chart Schmitt-Trigger

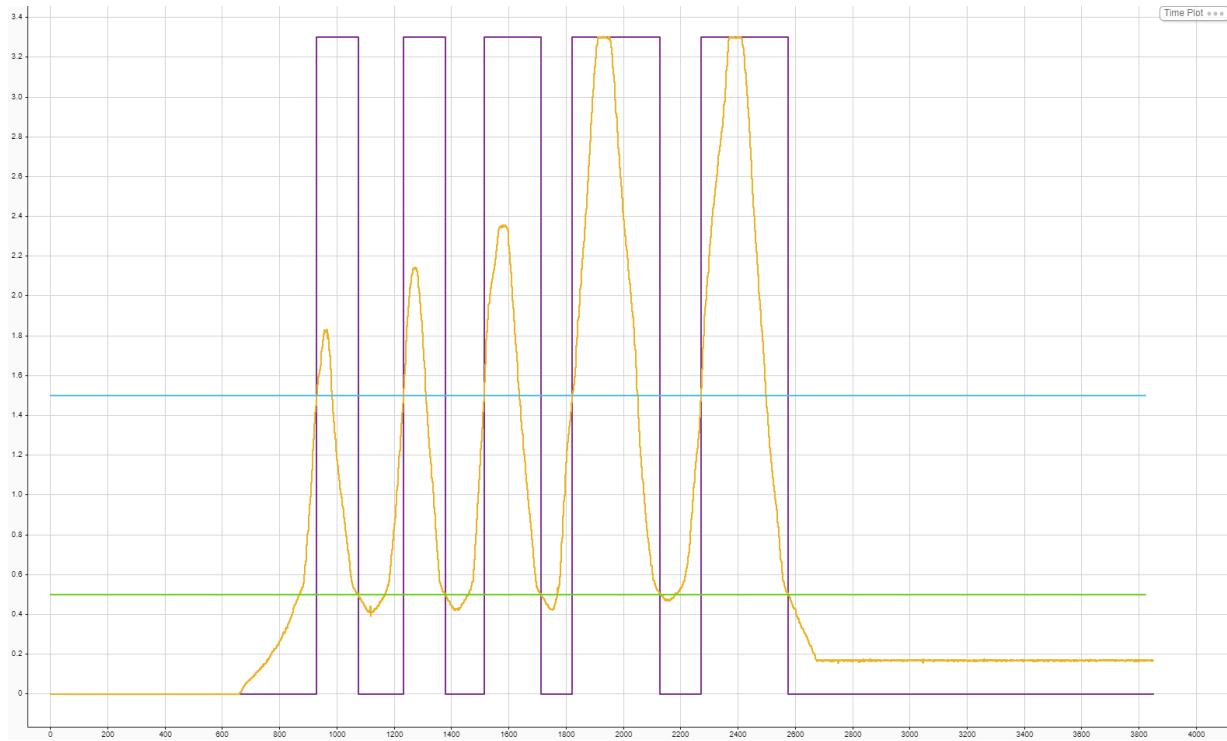
จากรูปที่ 34 ออกแบบ Schmitt-Trigger โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าข้าวอกที่วัดได้มีค่ามากกว่า 1.5 โวลต์ ก็จะจ่ายสัญญาณออกมานี้เป็น 3.3 V และเมื่อแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า 0.5 โวลต์ จะจ่ายสัญญาณออกมานี้เป็น Low (0)

2.9.5 ทดสอบและเก็บค่า โดยการลองหมุน Potentiometer ให้ค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงไป โดยบันทึกสัญญาณที่ได้ใน Simulink และส่งค่าไปยัง MATLAB Data Inspector

2.9.6 นำสัญญาณ Analog และสัญญาณ Digital ที่ผ่าน Schmitt-Trigger มาเปรียบเทียบใน Data Inspector เพื่อดูความเสถียรของสัญญาณหลังการแปลง

2.9.7 วิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับประสิทธิภาพและความเสถียรของวงจร Schmitt-Trigger

## 2.10 ผลการทดลอง



รูปที่ 35 กราฟจาก Data Inspector แบบ Real time เพื่อเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณก่อนแปลงและสัญญาณหลังแปลง

จากรูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบกราฟระหว่างสัญญาณก่อนแปลงและสัญญาณหลังแปลง โดยเส้นกราฟสีเหลืองแสดงสัญญาณก่อนแปลงซึ่งเป็นสัญญาณ Analog และเส้นกราฟสีม่วงแสดงสัญญาณหลังแปลงด้วยวงจร Schmitt-Trigger ซึ่งเป็นสัญญาณ Digital นอกจากนี้ในส่วนของเส้นกราฟสีเขียวและสีฟ้าแสดงถึงค่าขอบนและขอบล่างในการเปรียบเทียบ

## 2.11 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าวงจร Schmitt-Trigger สามารถแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ที่เสถียรได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อมีสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว

## 2.12 อภิปรายผลการทดลอง

วงจร Schmitt-Trigger จะทำการเปลี่ยนสัญญาณแรงดันที่มีค่ามากกว่า 1.5 โวลต์ให้เป็นสัญญาณ 3.3 V และเปลี่ยนสัญญาณแรงดันที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 โวลต์ให้เป็นสัญญาณ Low (0) จากกราฟผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าวงจร

Schmitt-Trigger เปลี่ยนแปลงในทันทีที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป แสดงว่าจะจرمีความเสถียรและ Output ตอบสนองต่อ Input ได้แบบ Real Time

### 2.13 ข้อเสนอแนะ

2.13.1 เพิ่มสัญญาณรบกวนเพื่อทดสอบและประเมินความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนของวงจร Schmitt-Trigger

2.13.2 ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำ้งจร Schmitt-Trigger ไปประยุกต์ใช้งานจริง

### 2.14 เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://th.fmuser.net/wap/content/?21083.html>
- [2] Potentiometer / โพเทนชิโอมิเตอร์ - Food Wiki | Food Network Solution
- [3] <https://www.bourns.com/pdfs/PDB18.pdf>
- [4] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html>
- [5] <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [6] <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/pta.pdf>

### 3. การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder

#### 3.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1 สามารถทำตามการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลัก
- 3.1.2 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Incremental Encoder ได้
- 3.1.3 สามารถอธิบายหลักการทำงาน และความหมายของการ config parameter ใน IOC ได้
- 3.1.4 สามารถอธิบายลักษณะสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder ได้ เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป เจ้าลีกไปที่รูปแบบเฟสของสัญญาณในแต่ละช่อง Output ของ Incremental Encoder
- 3.1.5 สามารถหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder ในการทดลองได้
- 3.1.6 สามารถอ่านค่าจาก Incremental Encoder ในรูปแบบการสัญญาณแบบ Quadrature encoder ได้ทุกรูปแบบ และทุกวิธีการ (QEI และ Polling Method)
- 3.1.7 สามารถอ่านค่า Raw Signal ของ QEI Method และแปลงเป็น Relative Position (pulses) ด้วยการ Integrate Discrete Velocity (diff\_counts) และแสดงผลพร้อมกันได้
- 3.1.8 สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจากการหมุน Incremental Encoder ด้วยมือเป็น Input และ แสดง สัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity ในหน่วย SI
- 3.1.9 สามารถวิเคราะห์ ข้อดี-เสีย ของการอ่านด้วย QEI และ Polling Method ได้
- 3.1.10 สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อ Homing Incremental Encoder ได้

#### 3.2 สมมติฐาน

ถ้าหากสัญญาณที่ได้จากการหมุน Incremental Encoder เป็นรูปแบบ Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity จะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยค่าของ Raw Signal จะเพิ่มหรือลดลงตามจำนวนพัลส์ที่เกิดจากการหมุนของ Encoder และทิศทางการหมุน ค่า Angular Position จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนพัลส์ที่สะสมได้ โดยค่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามทิศทางการหมุน และค่า Angular Velocity จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการหมุน Encoder โดยถ้าหมุนเร็วขึ้น ความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้น และถ้าหมุนช้าลง ความเร็วเชิงมุมจะลดลง

### 3.3 ตัวแปรการศึกษา

#### 3.3.1 ตัวแปรต้น

สัญญาณจากการหมุน Incremental Encoder

#### 3.3.2 ตัวแปรตาม

Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity

#### 3.3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า สายไฟ อุณหภูมิ สถานที่ทดสอบ และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

### 3.4 นิยามคัพเพิ่เฉพาะ

3.4.1 การหมุน Encoder ขึ้น หมายถึง การหมุน Encoder ตามเข็มนาฬิกา ซึ่งทำให้จำนวนพัลส์เพิ่มขึ้นในทิศทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ส่งผลให้ค่าของ Raw Signal และ Angular Position เพิ่มขึ้นตามลำดับ

3.4.2 การหมุน Encoder ลง หมายถึง การหมุน Encoder วนเข็มนาฬิกา ซึ่งทำให้จำนวนพัลส์ลดลงในทิศทางย้อนกลับ ส่งผลให้ค่าของ Raw Signal และ Angular Position ลดลงตามลำดับ

3.4.3 การวัดค่า Angular Position หมายถึง การอ่านค่าสะสมจากจำนวนพัลส์ของ Encoder เพื่อคำนวณตำแหน่งเชิงมุม โดยอาจแปลงเป็นหน่วยองศาหรือเรเดียนตามการกำหนด

3.4.4 การวัดค่า Angular Velocity หมายถึง การคำนวณความเร็วเชิงมุมจากจำนวนพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหนึ่ง โดยใช้ฟังก์ชันการวัดเวลาที่ตั้งค่าไว้และแสดงเป็นหน่วยองศาต่อวินาทีหรือเรเดียนต่อวินาที

3.4.5 การอ่านค่า Raw Signal ในรูปแบบ Quadrature Signal หมายถึง การอ่านสัญญาณจากช่องสัญญาณ A และ B ของ Encoder โดยการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ระหว่างสองช่องสัญญาณนี้เพื่อรับ��识ทางการหมุน

### 3.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

3.5.1 Encoder หมายถึง อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดตำแหน่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุม และทิศทางการหมุนของวัตถุ ซึ่งใช้สัญญาณพัลส์ในการแสดงผล

3.5.2 Incremental Encoder หมายถึง Encoder ที่ให้สัญญาณเป็นพัลส์ที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของมุมหรือระยะทาง โดยการนับพัลส์จะช่วยให้ทราบถึงตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่

3.5.3 Raw Signal หมายถึง สัญญาณที่ได้โดยตรงจาก Encoder ก่อนที่จะนำไปประมวลผลเพิ่มเติม เช่น สัญญาณดิจิตอลจากช่อง A และ B ของ Incremental Encoder

3.5.4 Angular Position หมายถึง ตำแหน่งเชิงมุมที่คำนวณจากจำนวน脉冲ของ Encoder ซึ่งจะบ่งบอกตำแหน่งปัจจุบันของวัตถุที่หมุน

3.5.5 Angular Velocity หมายถึง ความเร็วเชิงมุมที่แสดงถึงความเร็วในการหมุนของ Encoder โดยคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเชิงมุมในช่วงเวลาหนึ่ง

3.5.6 Quadrature Signal หมายถึง รูปแบบสัญญาณดิจิตอลจาก Incremental Encoder ที่ประกอบด้วยสองช่องสัญญาณ (A และ B) เพื่อระบุทิศทางและจำนวนพัลส์ได้อย่างละเอียด

3.5.7 Pulses Per Revolution (PPR) หมายถึง จำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการหมุน Encoder ซึ่งส่งผลต่อความละเอียดในการวัดตำแหน่ง

3.5.8 EncoderXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Incremental Encoder และ 3D-Print ที่ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไมโครแทกเตอร์

## 3.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 3.6.1 Incremental Encoder

Incremental Encoder คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและตรวจสอบการเคลื่อนไหวในรูปแบบของความเร็วและทิศทาง โดยการให้สัญญาณพัลส์ (Pulse) ออกมาในรูปแบบที่เป็นช่วง ๆ หรือเป็นแบบเพิ่มขึ้นทีละขั้น (Incremental) ตามจำนวนขั้นของการหมุน ซึ่งหมายความว่าการวัดตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ (Relative Position) มากกว่าการวัดตำแหน่งเชิงสัมบูรณ์ (Absolute Position)

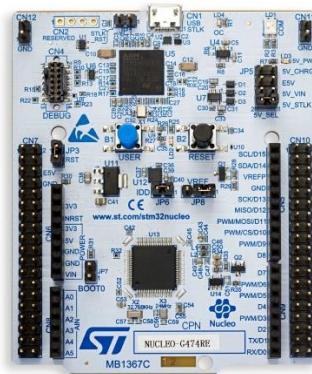
หลักการทำงานของ Incremental Encoder คือจะมีการสร้างพัลส์เมื่อมีการหมุนหรือการเคลื่อนที่ โดยสัญญาณทั้งหมดมี 2 ชุด คือ สัญญาณ A และ B ซึ่งจะมีเฟสต่างกัน 90 องศา เพื่อให้สามารถระบุทิศทางการหมุนได้ โดยวิธีการนับพัลส์คือพัลส์จะเกิดขึ้นทุกครั้งที่มีการหมุน Encoder และสามารถคำนวณตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์จากตำแหน่งเริ่มต้นได้



รูปที่ 36 Incremental Encoder

### 3.6.2 Nucleo STM32G474RE

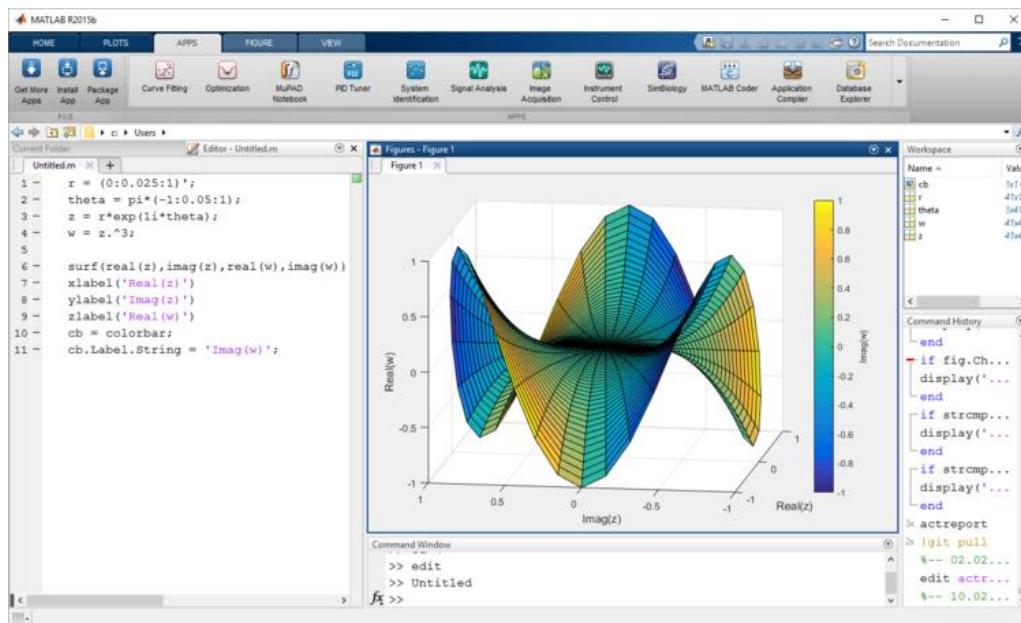
เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์จาก STMicroelectronics ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น การควบคุมมอเตอร์ การแปลงสัญญาณอนาล็อก/ดิจิทัล การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 37 บอร์ด Nucleo STM32G474RE

### 3.6.3 MATLAB

MATLAB เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น วิเคราะห์ข้อมูลพัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอปพลิเคชัน การประมวลผลสัญญาณและการสื่อสาร การประมวลผลภาพและวิดีโอ เป็นต้น



รูปที่ 38 แสดงหน้าโปรแกรม MATLAB

### 3.6.4 Finite State Machines

Finite State Machines เป็นแบบจำลองการคำนวณที่ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีจำนวนสถานะจำกัด โดยส่วนประกอบของ Finite State Machines มีดังนี้

- สถานะ (State) เป็นการกำหนดสถานะของระบบ โดยแต่ละสถานะจะมีการอธิบายเรื่องไข่ของระบบ
- การเปลี่ยน (Transitions) มีเงื่อนไขที่ทำให้สถานะเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง
- เหตุการณ์ (Events) ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น การรับสัญญาณอินพุต
- การกระทำ (Actions) การกระทำที่เกิดขึ้นตอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ
- สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะที่ระบบจะอยู่ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
- สถานะสุดท้าย (Final State) ระบบจะสิ้นสุดการทำงานที่สถานะนี้

### 3.6.5 Datasheet Incremental Encoder ATM103-V

#### ELECTRICAL SPECIFICATIONS

output phase difference	90° (A ch leads B ch in CW direction viewed from front)
output current	5 mA max.
output waveform	TTL voltage square wave
output signals	A, B, Z <sup>1</sup> phase ( $\bar{A}$ , $\bar{B}$ , $\bar{C}$ line driver available with CUI-10XE-10)
current consumption	6 mA typ., 10 mA max.
supply voltage	3.6 ~ 5.5 V dc
output resolution (ppr) <sup>2</sup>	48, 96, 100, 125, 192, 200, 250, 256, 384, 400, 500, 512, 800, 1000, 1024, 2048
frequency response	250 kHz max.
accuracy <sup>3</sup>	$\pm 15$ arcmin (at 192, 384, 400, 500, 800, 1000, 1024, 2048 ppr) $\pm 30$ arcmin (at 96, 200, 250, 512 ppr) $\pm 60$ arcmin (at 48, 100, 125, 256 ppr)
max. rotational speed	7500 rpm (at 2048, 1000, 800, 384 ppr) 15000 rpm (at 1024, 500, 400, 192 ppr) 30000 rpm (at 48, 96, 100, 125, 200, 250, 256, 512 ppr)

1. Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly.

2. All resolutions stated are before quadrature decoding. (example: 1000 ppr x 4 = 4000 counts)

3. Based on full production testing standards and includes all electronic and mechanical based errors, not a computed estimate.

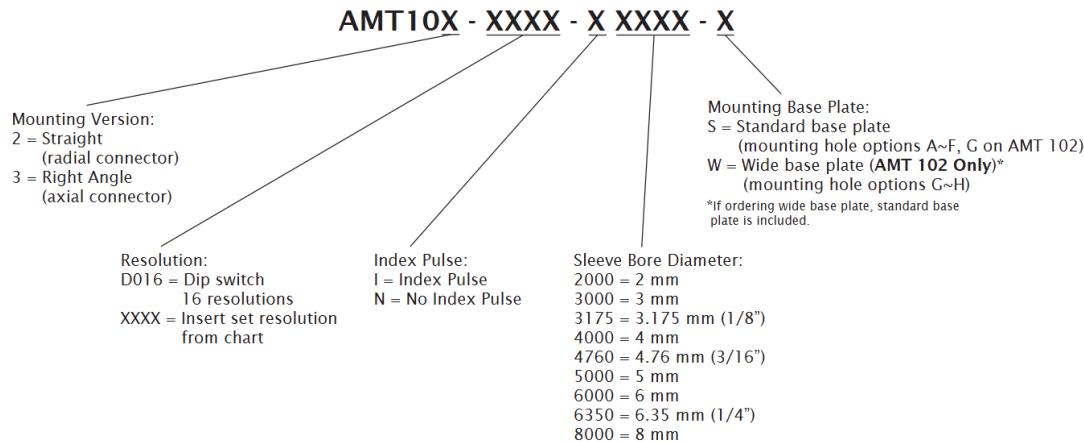
รูปที่ 39 แสดงรายละเอียดและข้อกำหนดในการใช้งาน Incremental Encoder ATM103-V

จากรูปที่ 39 ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะเฉพาะของ Incremental Encoder ATM103-V ในส่วนของ Electrical Specification ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ควรคำนึงในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยข้อมูลที่จะใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีดังนี้

- Output phase difference คือ สัญญาณ A จะนำสัญญาณ B อยู่ 90 องศา
- Supply Voltage ที่ต้องใช้คือตั้งแต่ 3.6 – 5.5 Vdc
- Output Resolution (PPR) จะอยู่ในช่วง 48 – 2048 Pulse Per Revolution

## CUSTOM CONFIG KEY

For customers that prefer a specific AMT10X configuration, please reference the custom configuration key below.



รูปที่ 40 แสดงวิธีการแยกประเภทของ Incremental Encoder

จากรูปที่ 40 เนื่องจาก Encoder ที่ใช้คือ ATM103-V แสดงว่า Mounting Version คือ Right Angle (axial connector) หมายความว่าขั้วต่อจะมีการออกแบบให้ชื่อมต่อที่มุ่ง 90 องศา ทำให้สามารถประยุกต์พิเศษได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วต่อที่ติดตั้งตรง ช่วยลดความยุ่งเหยิงของสายไฟและสามารถทำให้การเดินสายเรียบร้อยและง่ายต่อการเข้าถึง เหมาะสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัด เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแ朋คูบคุมที่มีพื้นที่จำกัด

### 3.7 วิธีดำเนินการทดลอง

- 3.7.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของ Incremental Encoder
- 3.7.2 เชื่อมต่อ Incremental Encoder เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 3.7.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอัปโหลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB
- 3.7.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink เพื่อเก็บค่าของ Encoder โดยจะอ่านค่าทั้งหมด 2 วิธีคือ QEI Method และ Polling Method และจะอ่านค่าทั้งหมด 3 แบบ คือแบบ X1, X2 และ X4
- 3.7.5 นำค่า Raw Signal ที่ได้ไปแปลงเป็นค่า Angular Position โดยเมื่อหมุน Encoder ตามเข็มนาฬิกา ค่าพัลส์จะเพิ่มขึ้น และเมื่อหมุน Encoder วนเข็มนาฬิกา ค่าพัลส์จะลดลง ทดสอบสัญญาณที่ได้โดยการลองหมุน Encoder และนำค่าที่ได้ไปแสดงบน MATLAB Data Inspector
- 3.7.6 หาค่า Angular Velocity ด้วยการ Integrate Discrete Velocity (diff\_counts) และนำไปแสดงผลพร้อมกับสัญญาณอื่น ๆ บน Data Inspector ทดสอบสัญญาณที่ได้โดยการลองหมุน Encoder และนำค่าที่ได้ไปแสดงบน MATLAB Data Inspector

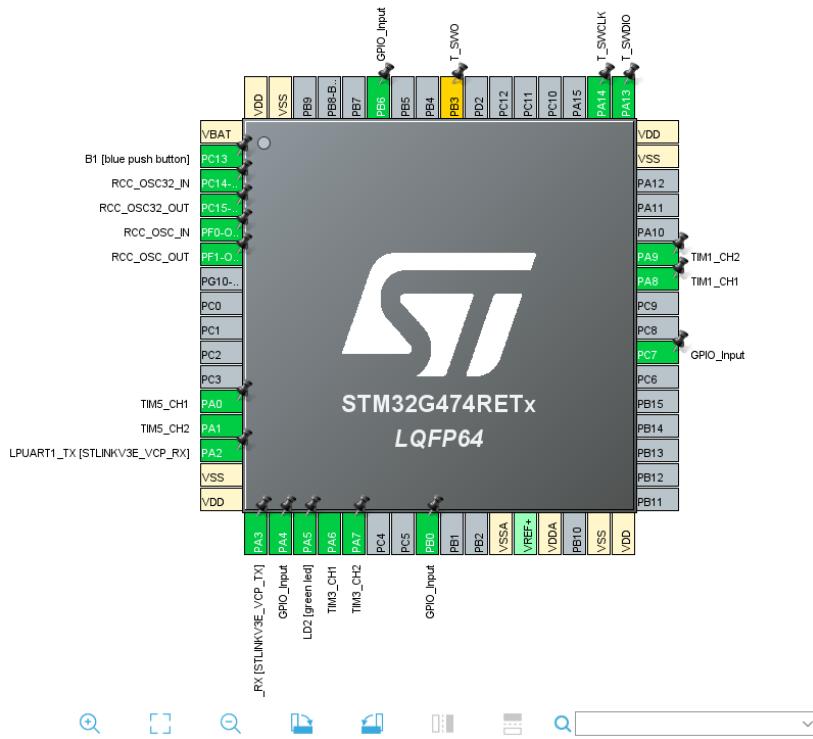
- 3.7.7 เขียนโปรแกรมเพื่อ Homing Incremental Encoder
- 3.7.8 ทำการทดลองตามข้อ 3.7.5 – 3.7.7 กับ Encoder ทั้ง 2 ตัว
- 3.7.9 อภิรายผลที่ได้ รวมถึงปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

### 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
3.8.5 สายจัมเปอร์	จำนวน 10 เส้น

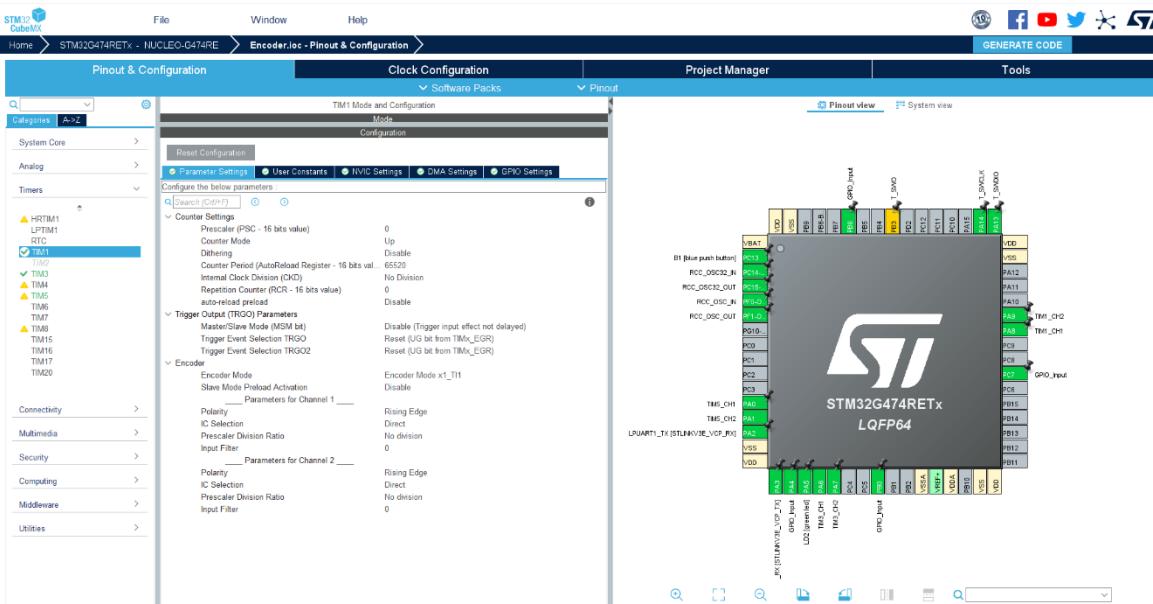
### 3.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 3.9.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของ Incremental Encoder เช่น ลักษณะสัญญาณที่อ่านได้จาก Encoder วิธีการอ่านค่าและแปลงสัญญาณ Encoder วิธีการเชื่อมต่อ Encoder เข้ากับบอร์ด เป็นต้น
- 3.9.2 เชื่อมต่อ Incremental Encoder เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยในการอ่านสัญญาณ Encoder จะต้องเชื่อมขา A และขา B เข้ากับขา Timer บนบอร์ด โดยในการอ่านค่าแบบ X1 และ X2 จะใช้ Timer 16 Bit และการอ่านค่าแบบ X4 จะใช้ Timer 32 Bit

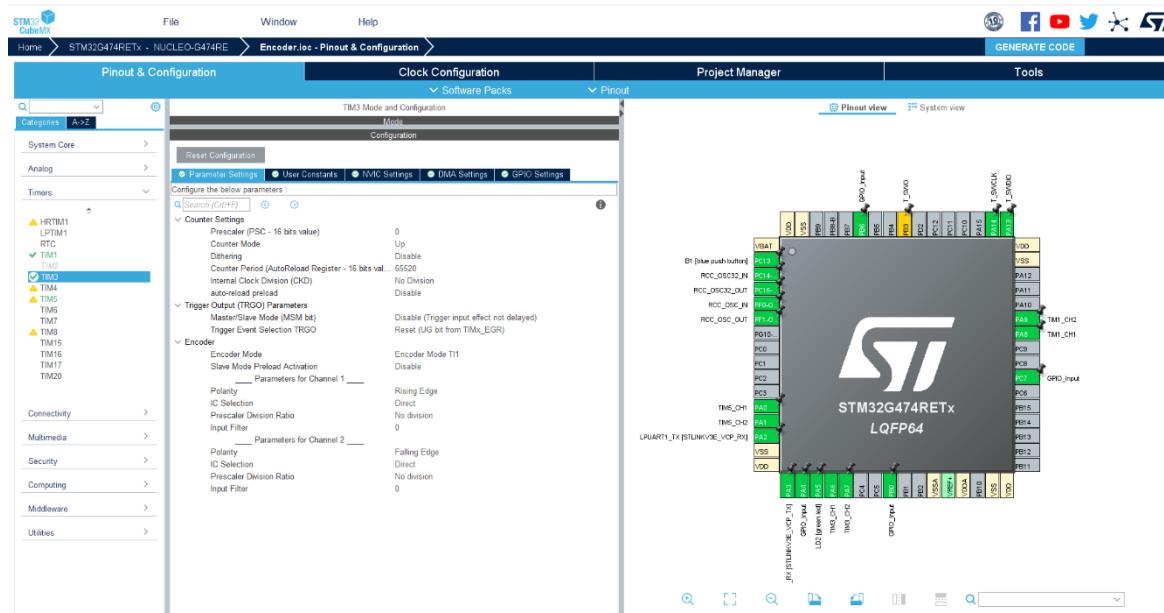


รูปที่ 41 ภาพแสดงขาของ STM32G474RE ที่ใช้ในการทดลอง

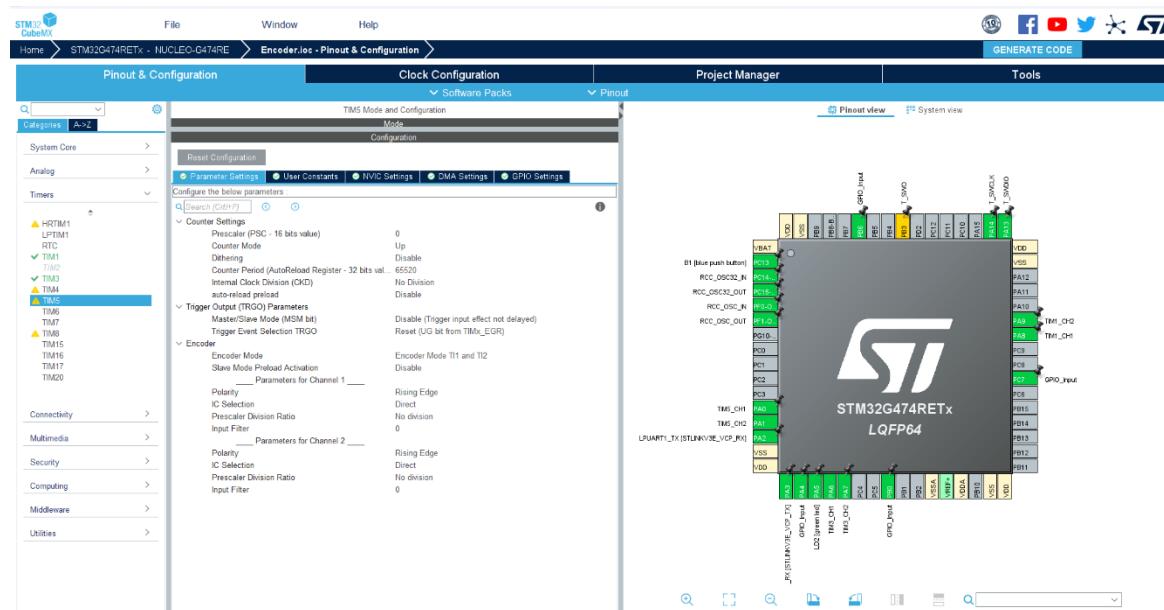
จากรูปที่ 41 จะใช้ขา PA8 กับ PA9 เป็นขา TIM1, PA6 กับ PA7 เป็นขา TIM3 และ PA0 กับ PA1 เป็นขา TIM5 สำหรับใช้ในการอ่านค่า Encoder โดยที่ TIM1 และ TIM3 จะอ่านค่าได้ 16 bit ส่วน TIM5 จะอ่านค่าได้ 32 bit



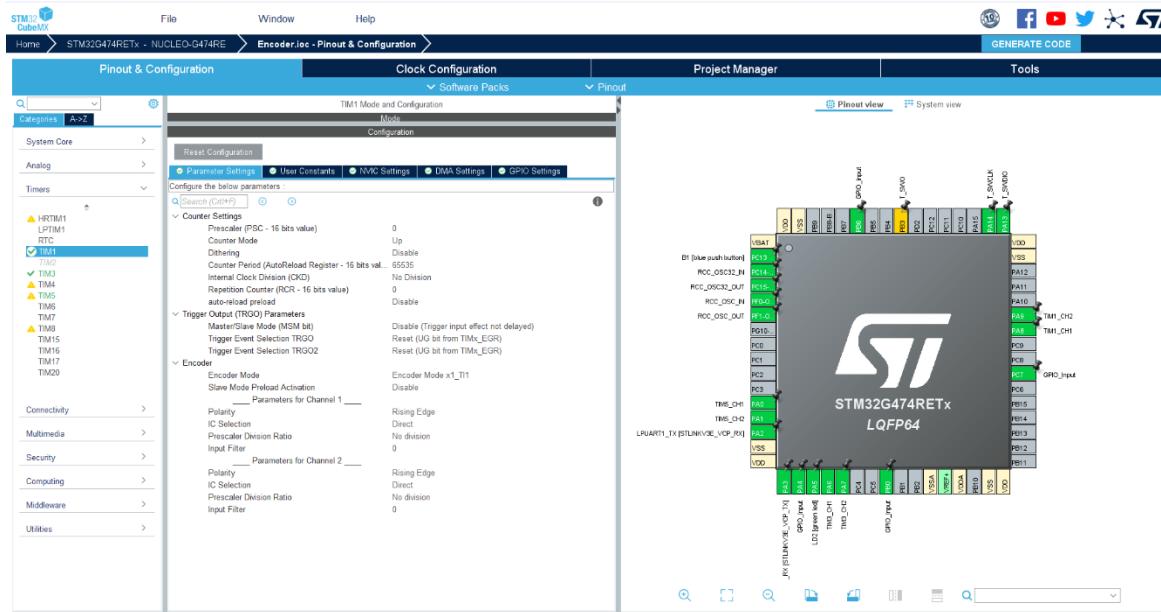
รูปที่ 42 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ที่ขา TIM1



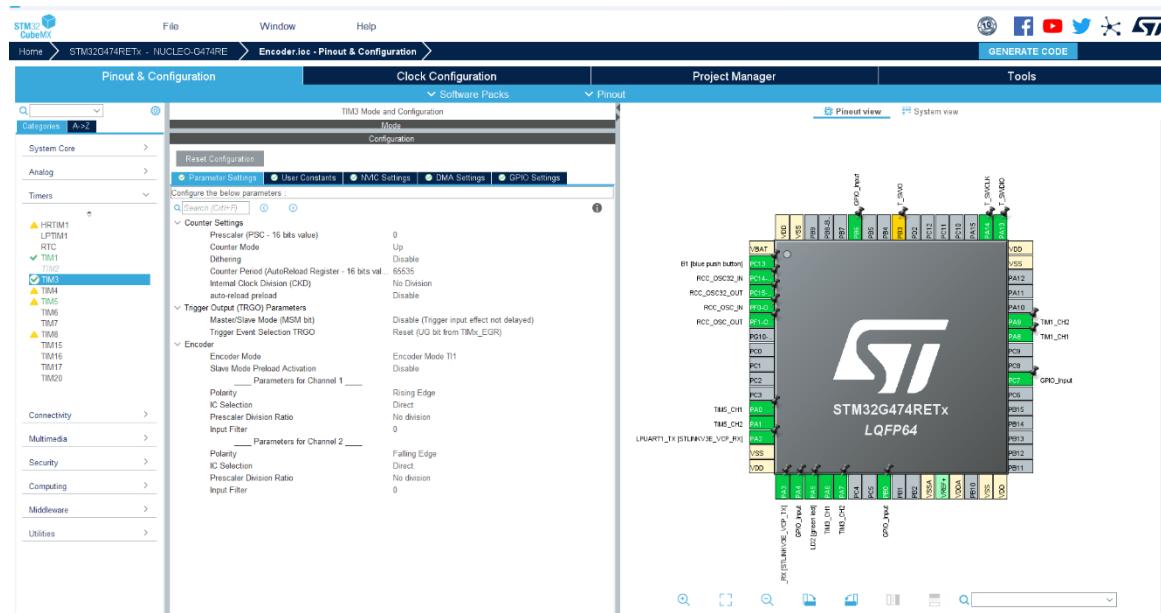
รูปที่ 43 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ที่ขา TIM3



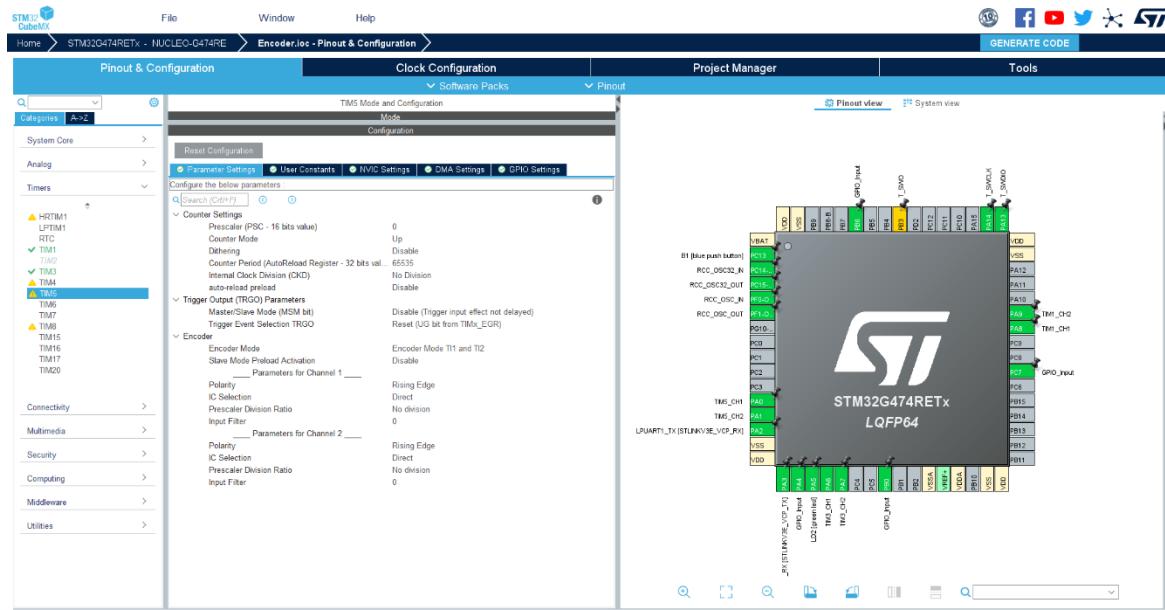
รูปที่ 44 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ที่ขา TIM5



รูปที่ 45 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ Incremental Encoder AMT103-V ที่ขา TIM1

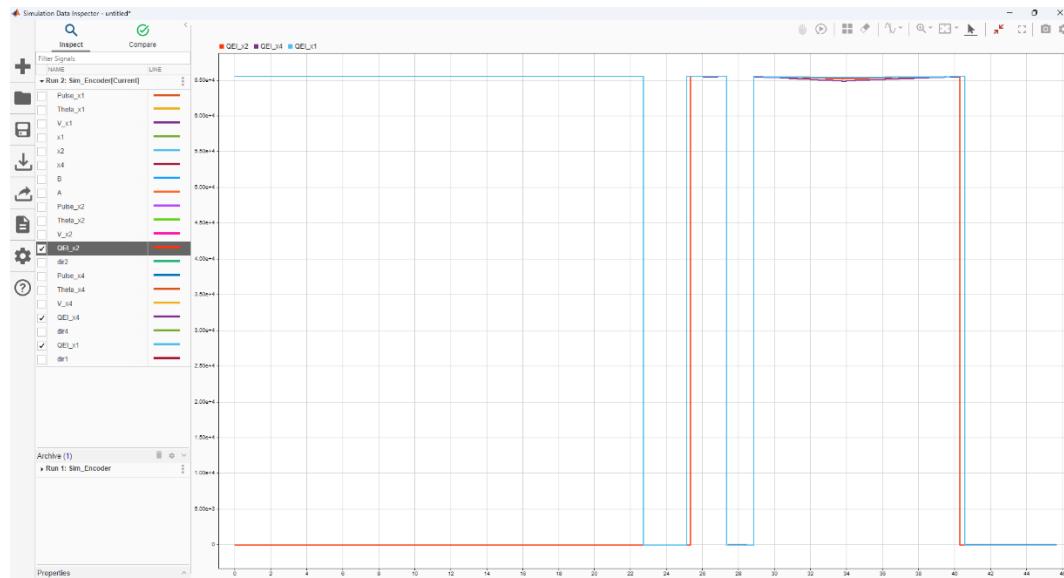


รูปที่ 46 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ Incremental Encoder AMT103-V ที่ขา TIM3

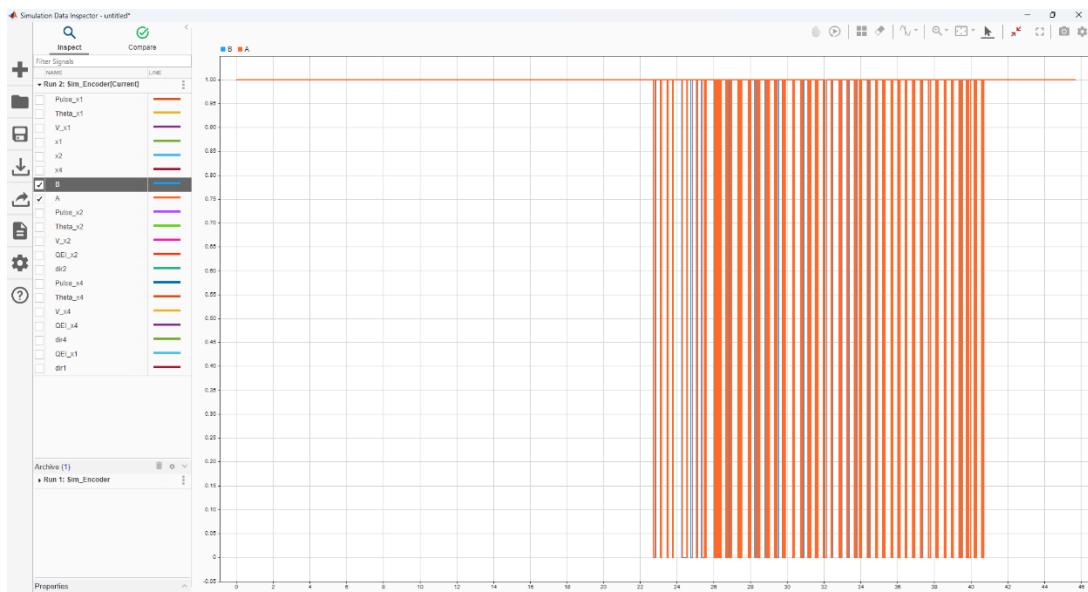


รูปที่ 47 ภาพการตั้งค่า Counter Period ให้ลงตัวกับ PPR ของ Incremental Encoder AMT103-V ที่ขา TIM5

3.9.3 เข้ามบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอัปโหลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB หลังจากนั้นแสดงสัญญาณ Raw Signal แต่ละแบบใน Data Inspector

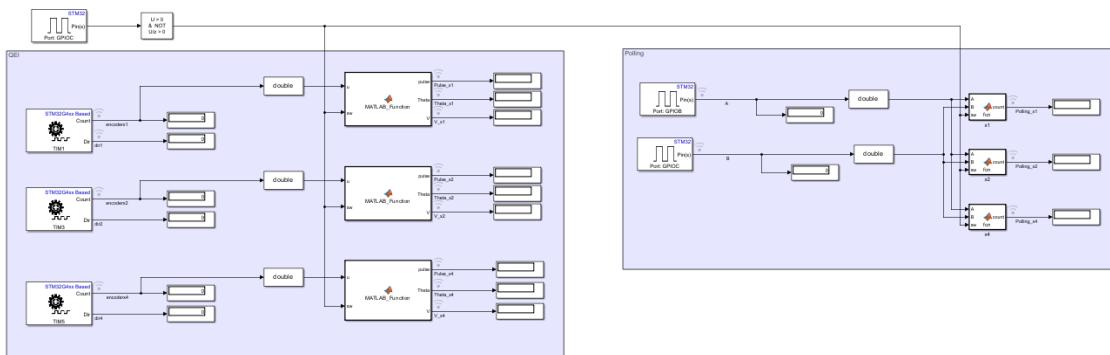


รูปที่ 48 แสดงให้เห็นค่า Raw Signal ในการอ่านแบบ QEI ผ่าน Data Inspector

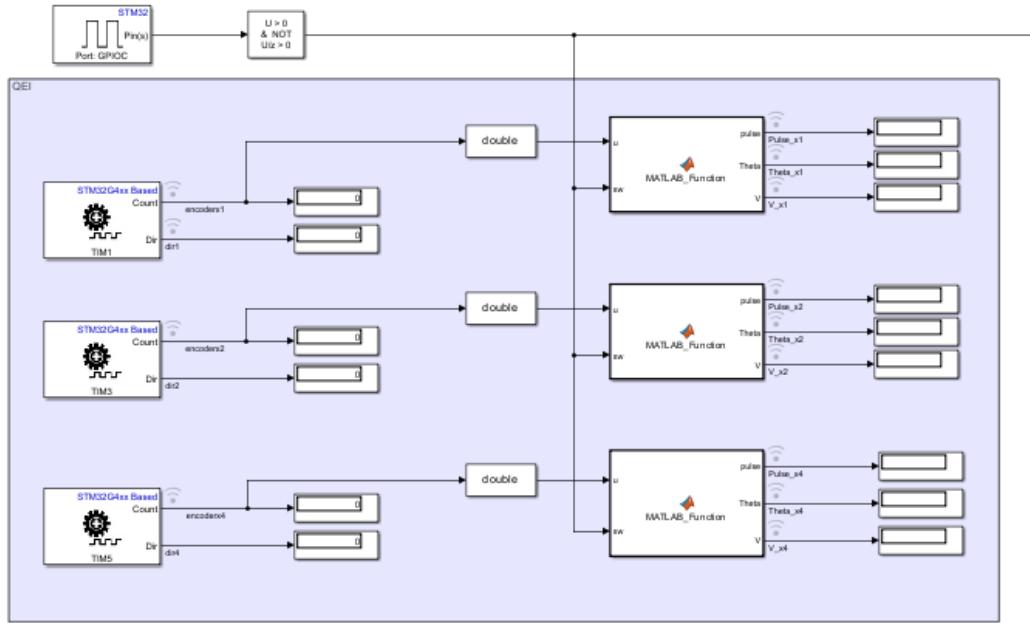


รูปที่ 49 แสดงให้เห็นค่า Raw Signal ในการอ่านแบบ Polling ผ่าน Data Inspector

3.9.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink เพื่อเก็บค่าของ Encoder โดยจะอ่านค่าทั้งหมด 2 วิธีคือ QEI Method และ Polling Method และจะอ่านค่าทั้งหมด 3 แบบ คือแบบ X1, X2 และ X4



รูปที่ 50 ภาพรวมของ Simulink สำหรับการอ่านค่า Encoder



รูปที่ 51 ภาพ Simulink ในส่วนของการอ่านค่า Encoder แบบ QEI

จากรูปที่ 51 รับค่าที่ได้จากการอ่านค่า Encoder จากขา Timer ของ STM32G474RE เพื่อทำการปรับปรุงค่า Pulse ให้อ่านได้อย่างต่อเนื่อง และถูกต้องทั้งในทิศทางการหมุนแบบวนเข็มและตามเข็ม และใช้ในการคำนวณหาค่า Angular Position และ Angular Velocity

3.9.5 เนื่องจาก Encoder จะมีการ Wrap around ซึ่งหมายความว่า เมื่อหมุน Encoder ครบตามจำนวนรอบ ค่า จะกลับไปเริ่มที่ 0 ใหม่อีกครั้ง แต่ค่าพัลส์ที่ต้องการ คือค่าที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และลดลงเรื่อยๆ โดยไม่กลับไปเริ่มที่ 0 จึงทำการเขียนโปรแกรมใน MATLAB Function เพื่อแก้ไขค่าให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยเมื่อหมุน Encoder ขึ้น ค่าพัลส์ จะเพิ่มขึ้น และเมื่อหมุน Encoder ลง ค่าพัลส์จะลดลง จากนั้นนำค่า Signal ที่ได้ไปแปลงเป็นค่า Angular Position ทดสอบสัญญาณที่ได้ โดยการลองหมุน Encoder และนำค่าที่ได้ไปแสดงบน MATLAB Data Inspector

```

1      function [pulse,Theta,V] = MATLAB_Function(u, sw)
2
3          persistent Pulse
4          persistent LastPulse
5          persistent res
6          persistent theta
7          persistent Theta_prev
8          persistent v
9
10         if sw == 1
11             Pulse = 0;
12         end
13
14         if isempty(LastPulse)
15             LastPulse = u;
16             Pulse = 0;
17             res = ((2*pi) / 24);
18             theta = 0;
19             Theta_prev = 0;
20             v = 0;
21         end
22
23         diff = u - LastPulse;
24
25         if diff == 65520
26             diff = 1 ;
27         end
28
29         if diff == -65520
30             diff = 1;
31         end
32
33         Pulse = Pulse + diff;
34
35         theta = res * Pulse;
36
37         v = (theta - Theta_prev) / 0.01;
38
39         V = v;
40         LastPulse = u;
41         pulse = Pulse;
42         Theta_prev = theta;
43         Theta = theta;
44     end

```

รูปที่ 52 Code สำหรับคำนวณหาค่า Angular Position

รูปที่ 52 จะทำการสร้างตัวแปรขึ้นมาเพื่อเก็บค่าต่าง ๆ และกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งการคำนวณ Angular Position จะเริ่มโดยการหา Resolution จากสูตร

$$res = \frac{2\pi}{PPR}$$

โดย  $res$  คือ ค่าความละเอียดของ Encoder (rad/pulse)  
 $PPR$  คือ จำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นเมื่อหมุนครบหนึ่งรอบ

หลังจากที่ได้ค่า Resolution จะนำคำนวณหา Angular Position จากสูตร

$$\theta = res \times n_{pulse}$$

โดย  $\theta$  คือ ค่า Angular Position (rad)  
 $n_{pulse}$  คือ จำนวนพัลส์ที่ได้จากการหมุน

3.9.6 หาก Angular Velocity ด้วยการ Integrate Discrete Velocity (diff\_counts) และนำไปแสดงผลพร้อมกับสัญญาณอื่น ๆ บน Data Inspector ทดสอบสัญญาณที่ได้ โดยการลองหมุน Encoder และนำค่าที่ได้ไปแสดงบน MATLAB Data Inspector

```

1      function [pulse,Theta,V] = MATLAB_Function(u, sw)
2
3          persistent Pulse
4          persistent LastPulse
5          persistent res
6          persistent theta
7          persistent Theta_prev
8          persistent v
9
10         if sw == 1
11             Pulse = 0;
12         end
13
14         if isempty(LastPulse)
15             LastPulse = u;
16             Pulse = 0;
17             res = ((2*pi) / 24);
18             theta = 0;
19             Theta_prev = 0;
20             v = 0;
21         end
22
23         diff = u - LastPulse;
24
25         if diff == 65520
26             diff = 1 ;
27         end
28
29         if diff == -65520
30             diff = 1;
31         end
32
33         Pulse = Pulse + diff;
34
35         theta = res * Pulse;
36
37         v = (theta - Theta_prev) / 0.01;
38
39         V = v;
40         LastPulse = u;
41         pulse = Pulse;
42         Theta_prev = theta;
43         Theta = theta;
44     end

```

รูปที่ 53 Code ส่วนการคำนวณหาค่า Angular Velocity

รูปที่ 53 หลังจากคำนวณ Angular Position ได้แล้วก็จะนำมาคำนวณต่อเพื่อคำนวณหา Angular Velocity โดยการนำตำแหน่งปัจจุบันลบด้วยตำแหน่งก่อนหน้า แล้วหารด้วย Sample time ก็จะได้ค่า Angular Velocity ออกมากยกตัวอย่างเช่น  $res = 0.261799 \text{ rad/pulse}$  ถ้าหมุน Encoder หนึ่งครั้งจะนับพลส์ได้ 1 และนำไปหารค่า  $\theta$  จะได้ค่า  $\theta = 0.261699 \text{ rad}$  และนำไปหารค่า Angular Velocity โดยหาได้จาก การเอา  $\theta$  ปัจจุบัน ลบ  $\theta$  ก่อนหน้าซึ่งเป็น 0 ดังนั้น จะได้ว่า  $v = (0.261799 - 0)/0.01$  จะได้ค่า  $v = 26.1799 \text{ rad/s}$

### 3.9.7 เจียนโปรแกรมเพื่อ Homing Incremental Encoder

```
1      function [pulse,Theta,V] = MATLAB_Function(u, sw)
2
3          persistent Pulse
4          persistent LastPulse
5          persistent res
6          persistent theta
7          persistent Theta_prev
8          persistent v
9
10         if sw == 1
11             Pulse = 0;
12         end
13
14         if isempty(LastPulse)
15             LastPulse = u;
16             Pulse = 0;
17             res = ((2*pi) / 24);
18             theta = 0;
19             Theta_prev = 0;
20             v = 0;
21         end
22
23         diff = u - LastPulse;
24
25         if diff == 65520
26             diff = 1 ;
27         end
28
29         if diff == -65520
30             diff = 1;
31         end
32
33         Pulse = Pulse + diff;
34
35         theta = res * Pulse;
36
37         v = (theta - Theta_prev) / 0.01;
38
39         V = v;
40         LastPulse = u;
41         pulse = Pulse;
42         Theta_prev = theta;
43         Theta = theta;
44     end
```

รูปที่ 54 Code ส่วนการทำ Homing Incremental Encoder

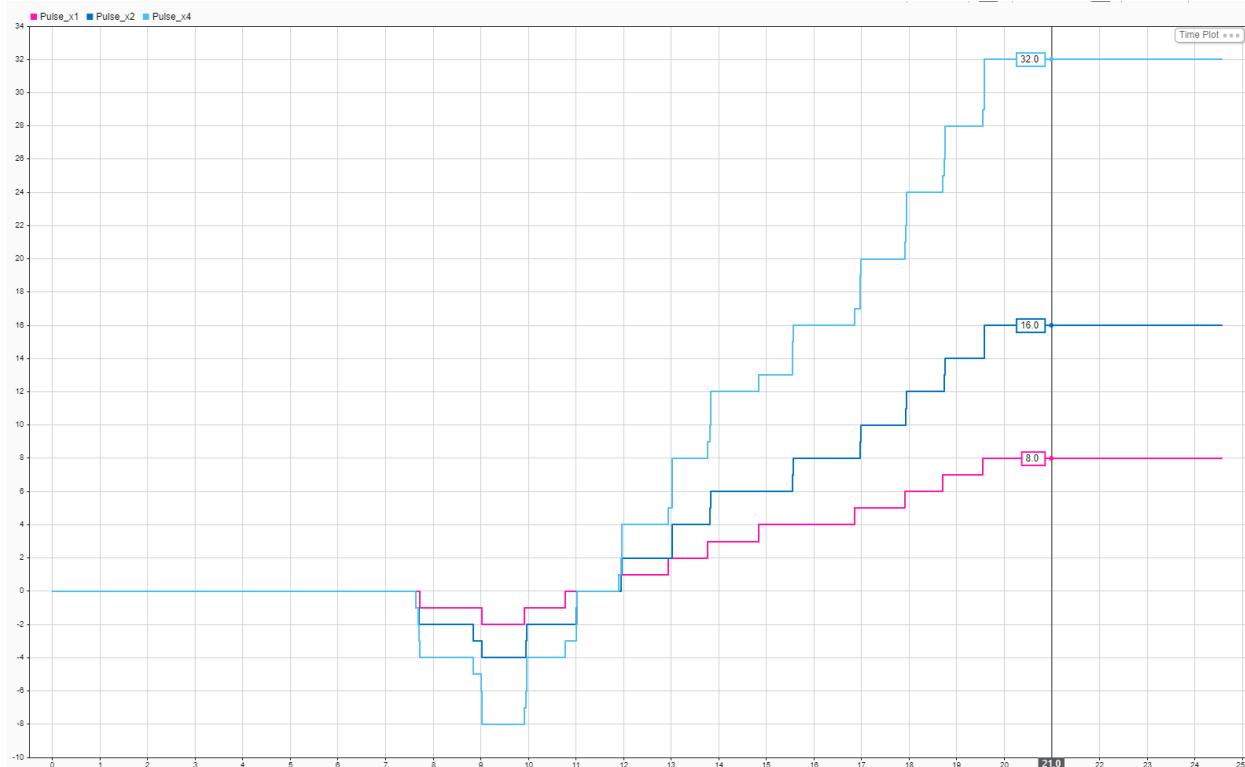
รูปที่ 54 ส่วนของการ Reset ค่าพัลส์ที่สะสมไว้ให้เป็นศูนย์ โดยเมื่อมีการกดสวิตช์สีฟ้าบนบอร์ด STM32G474RE ค่าพัลส์ที่สะสมไว้ก็จะ Reset เป็นศูนย์ทันที

3.9.8 ทำการทดลองตามข้อ 3.7.5 – 3.7.7 กับ Encoder ทั้ง 2 ตัว

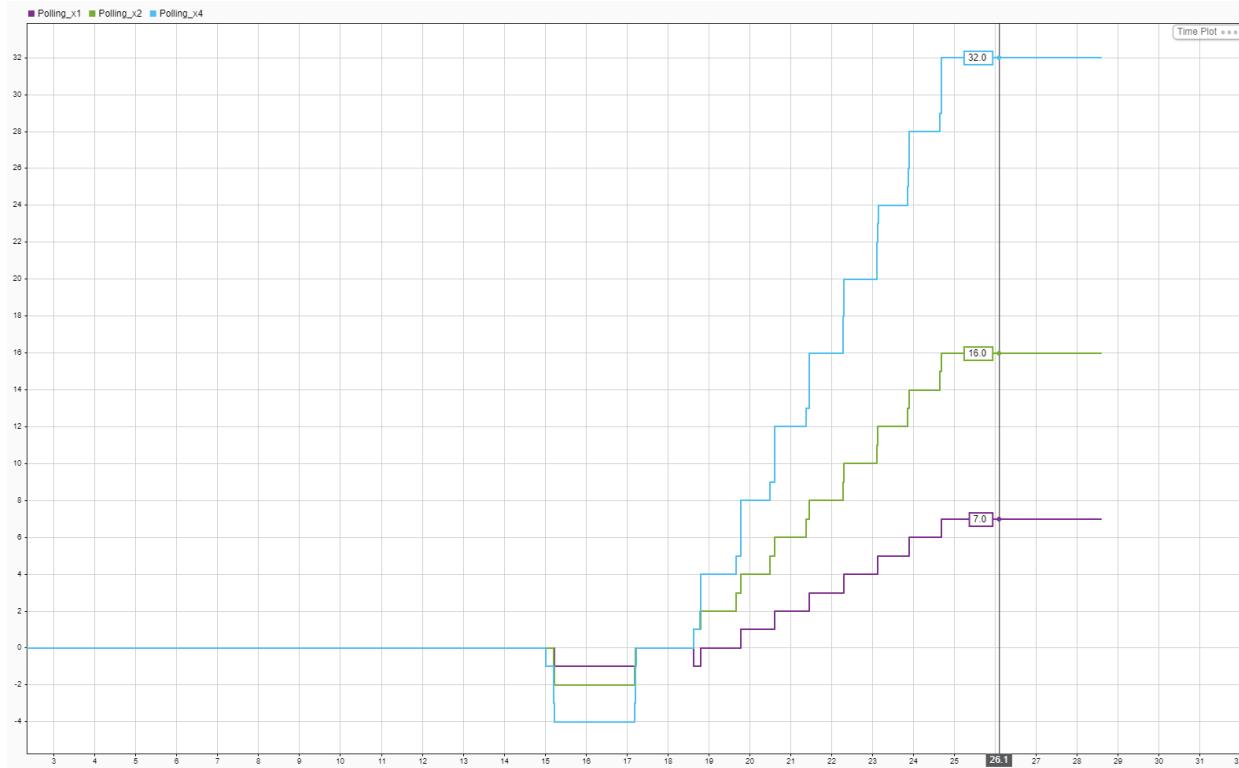
3.9.9 อภิรายผลที่ได้ รวมถึงปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

### 3.9 ผลการทดลอง

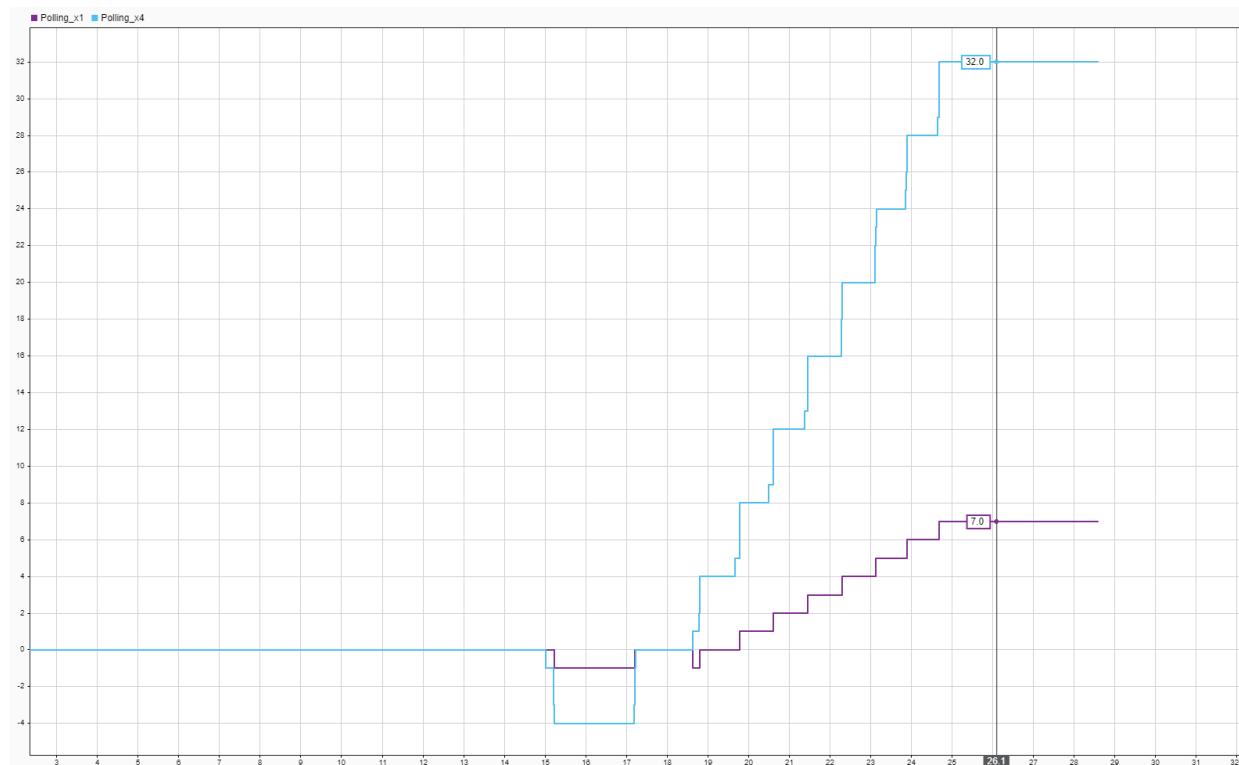
#### 3.9.1 Incremental Encoder 24 PPR



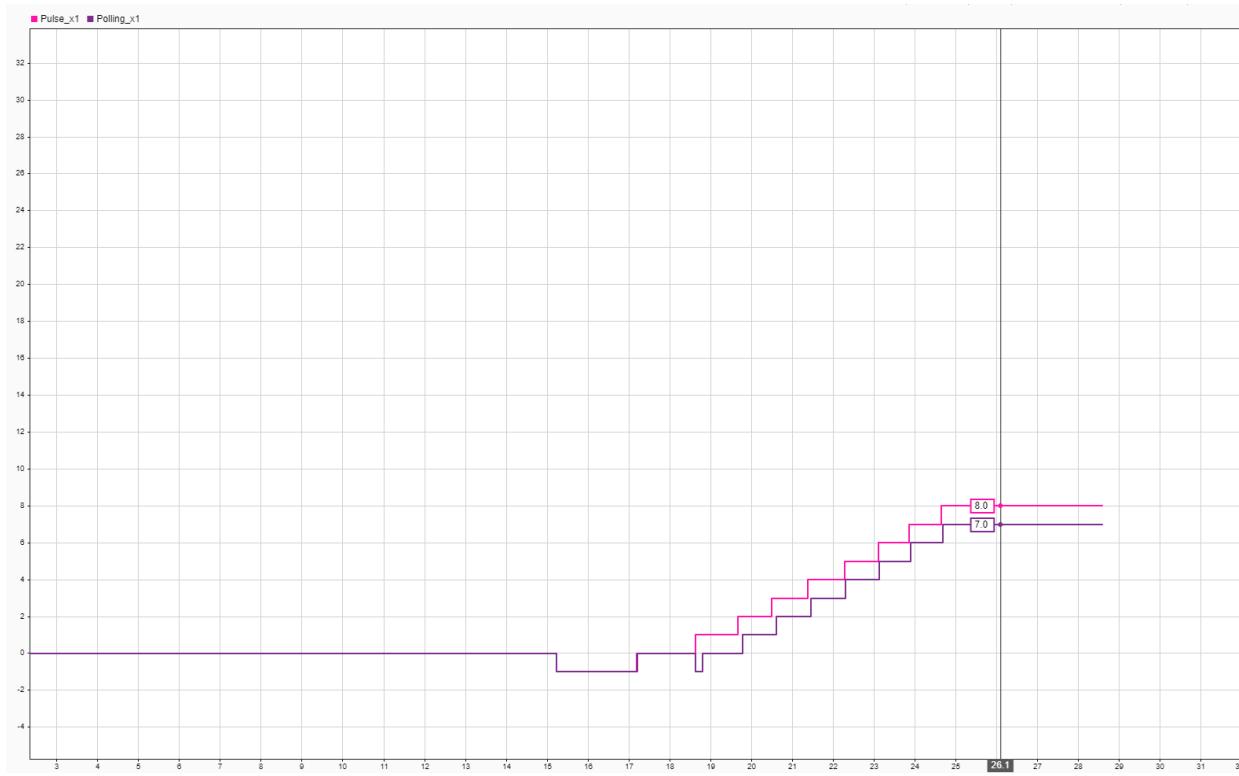
รูปที่ 55 ค่า X1, X2 และ X4 ที่ได้จากการอ่านแบบ QEI



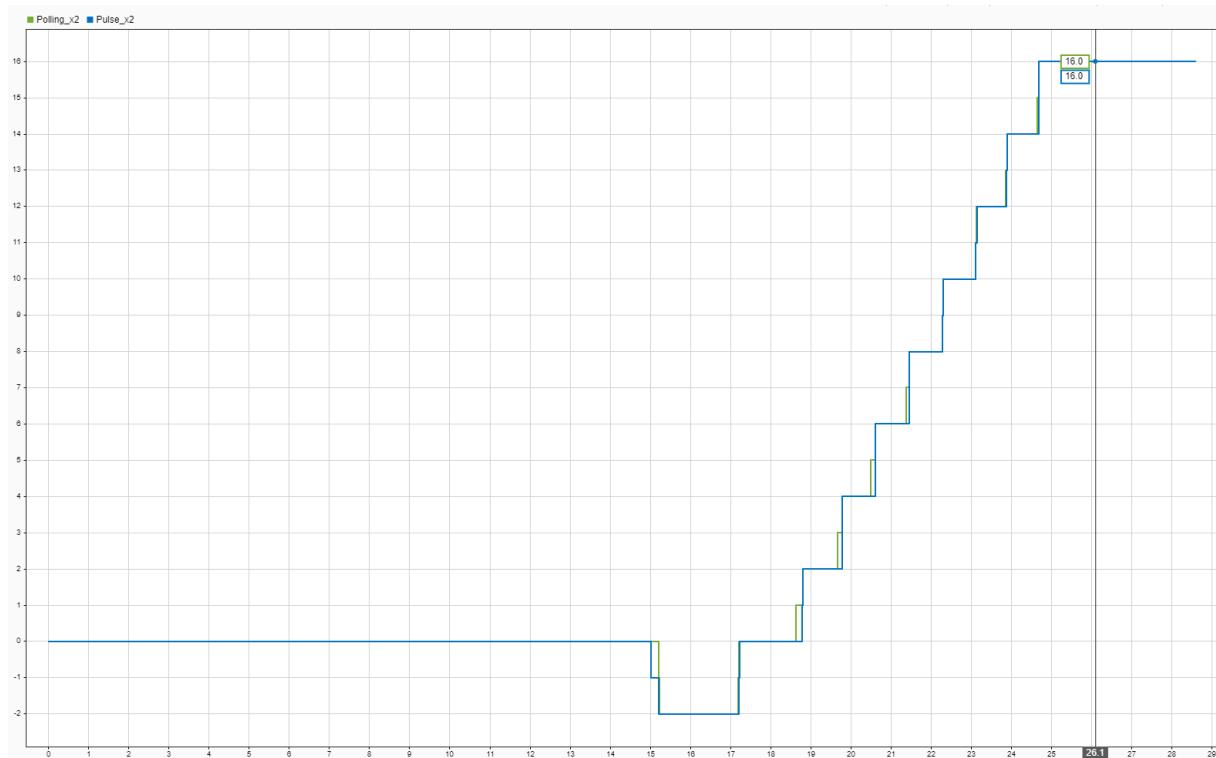
รูปที่ 56 ค่า X1, X2 และ X4 ที่ได้จากการอ่านแบบ Polling



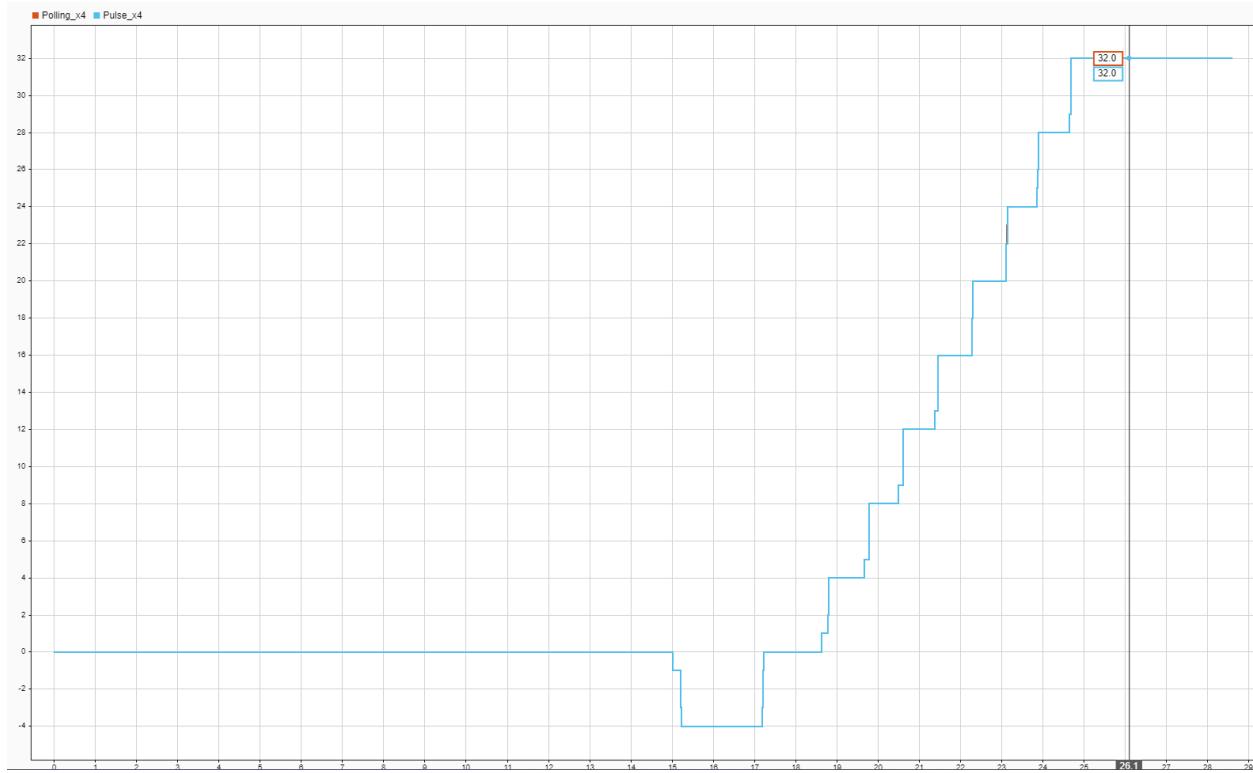
รูปที่ 57 เปรียบเทียบค่า X1 และ X4 โดยการอ่านแบบ Polling ใน Real time



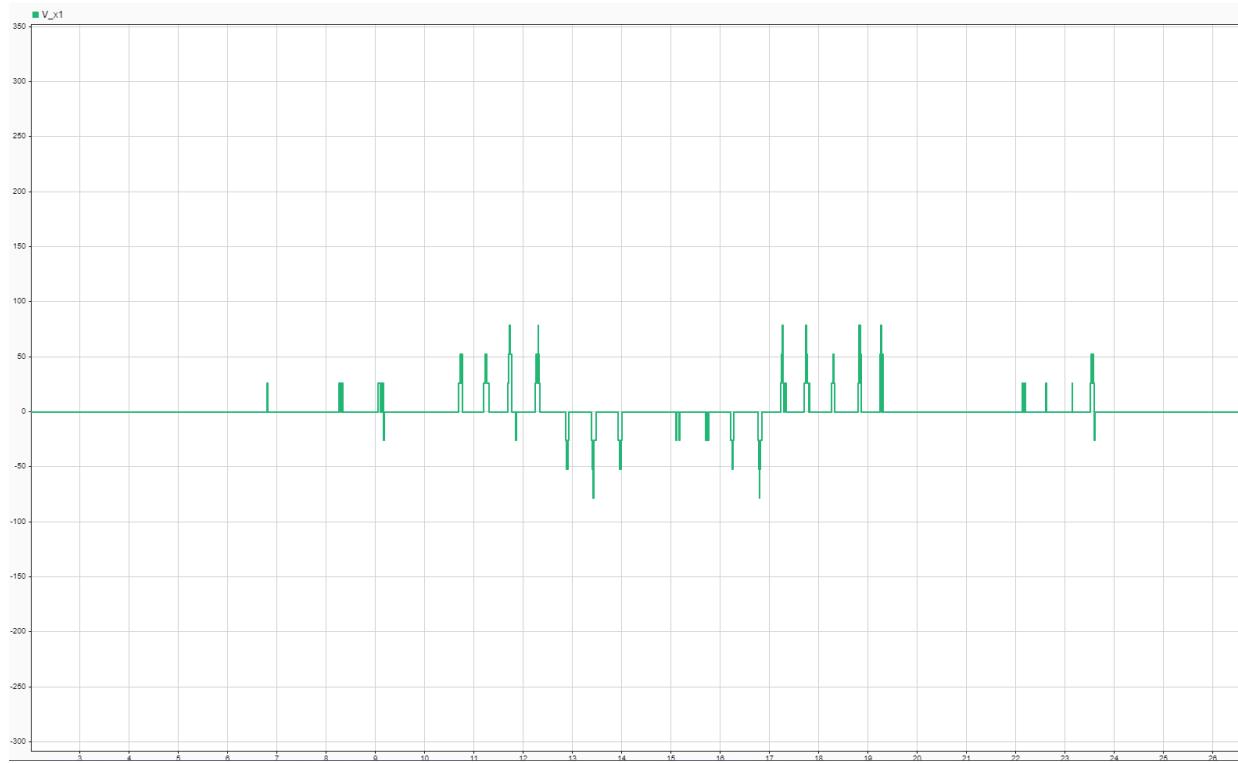
รูปที่ 58 เปรียบเทียบค่า X1 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



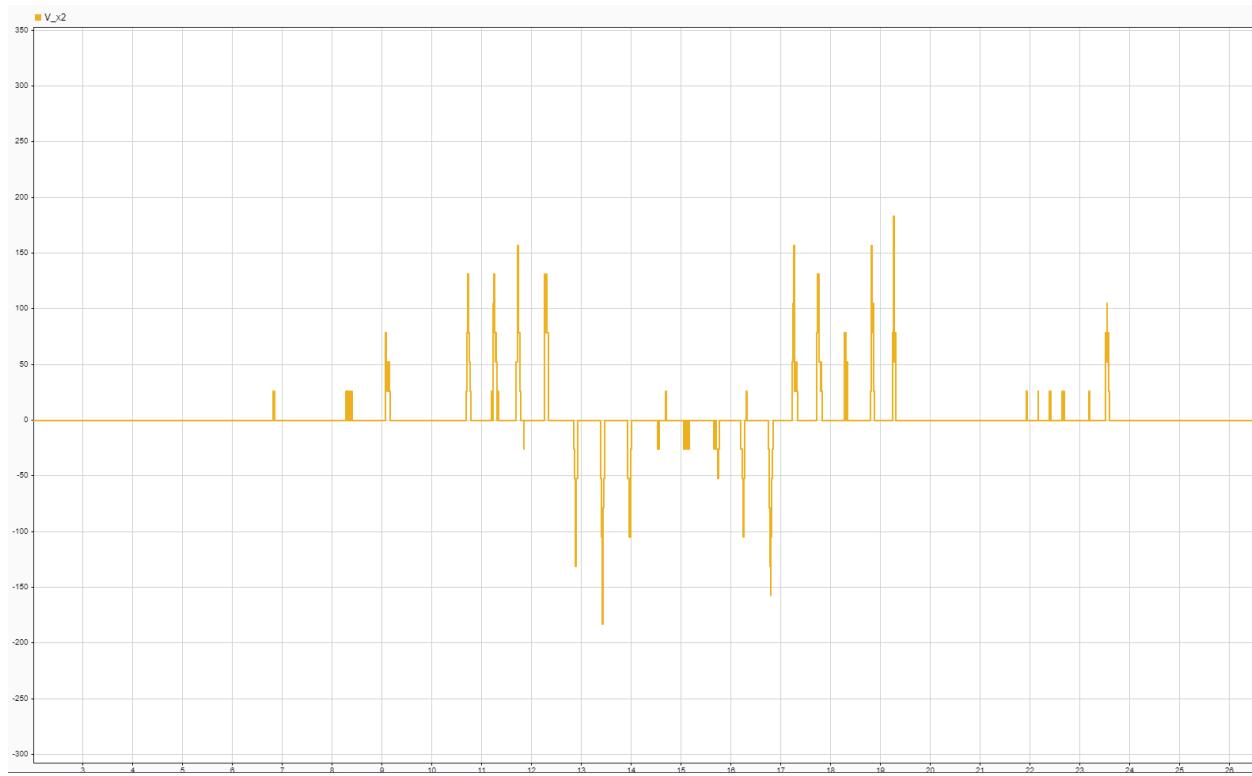
รูปที่ 59 เปรียบเทียบค่า X2 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



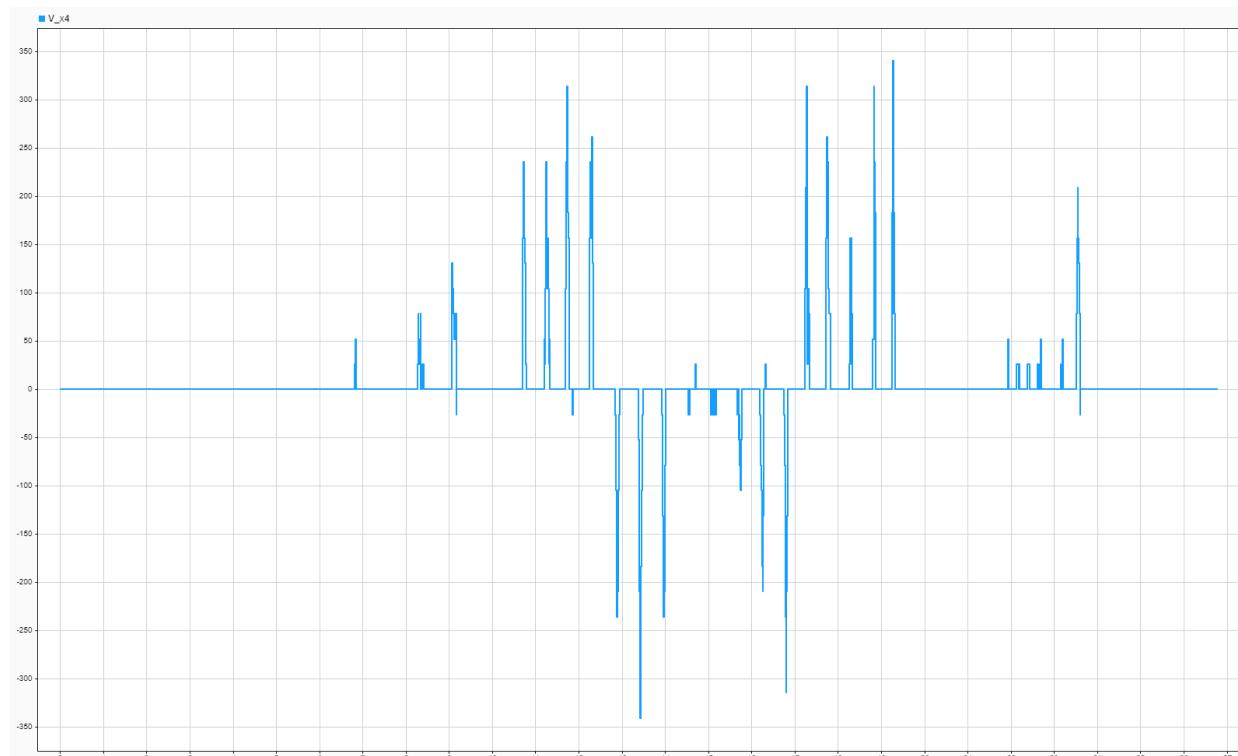
รูปที่ 60 เปรียบเทียบค่า X4 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



รูปที่ 61 ค่าความเร็วของ X1 โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time

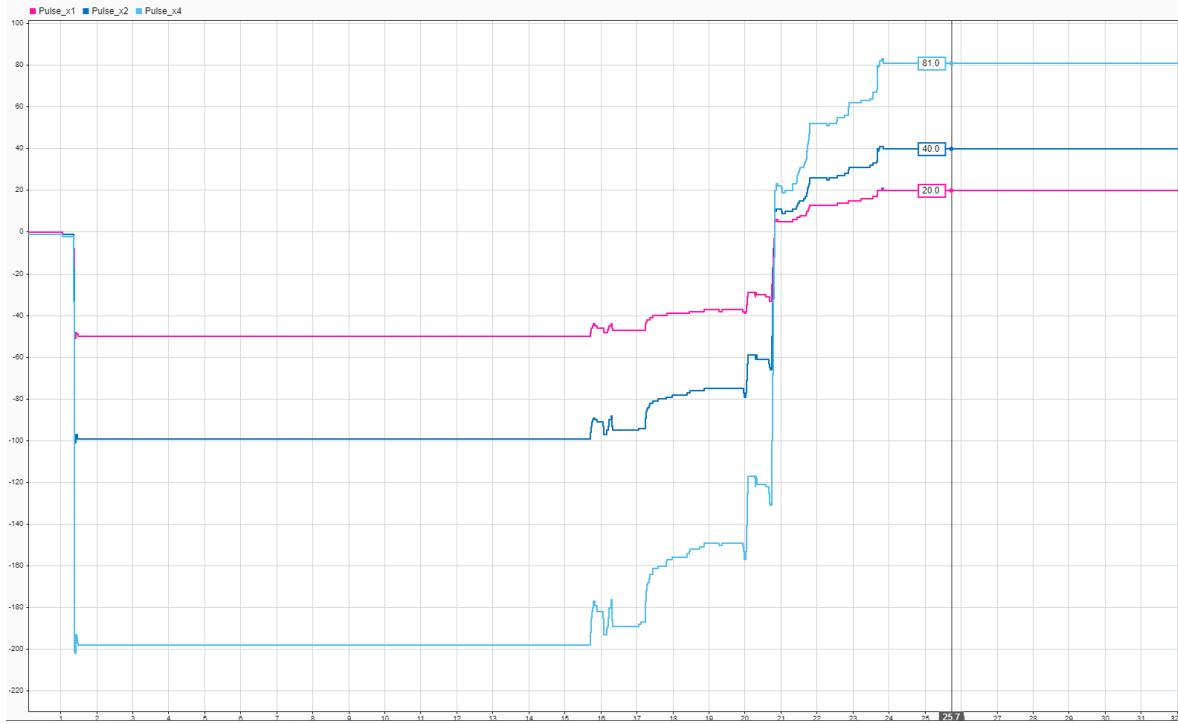


รูปที่ 62 ค่าความเร็วของ X2 โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time



รูปที่ 63 ค่าความเร็วของ X4 โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time

### 3.9.2 Incremental Encoder 2048 PPR



รูปที่ 64 ค่า X1, X2 และ X4 ที่ได้จากการอ่านแบบ QEI ใน Real time



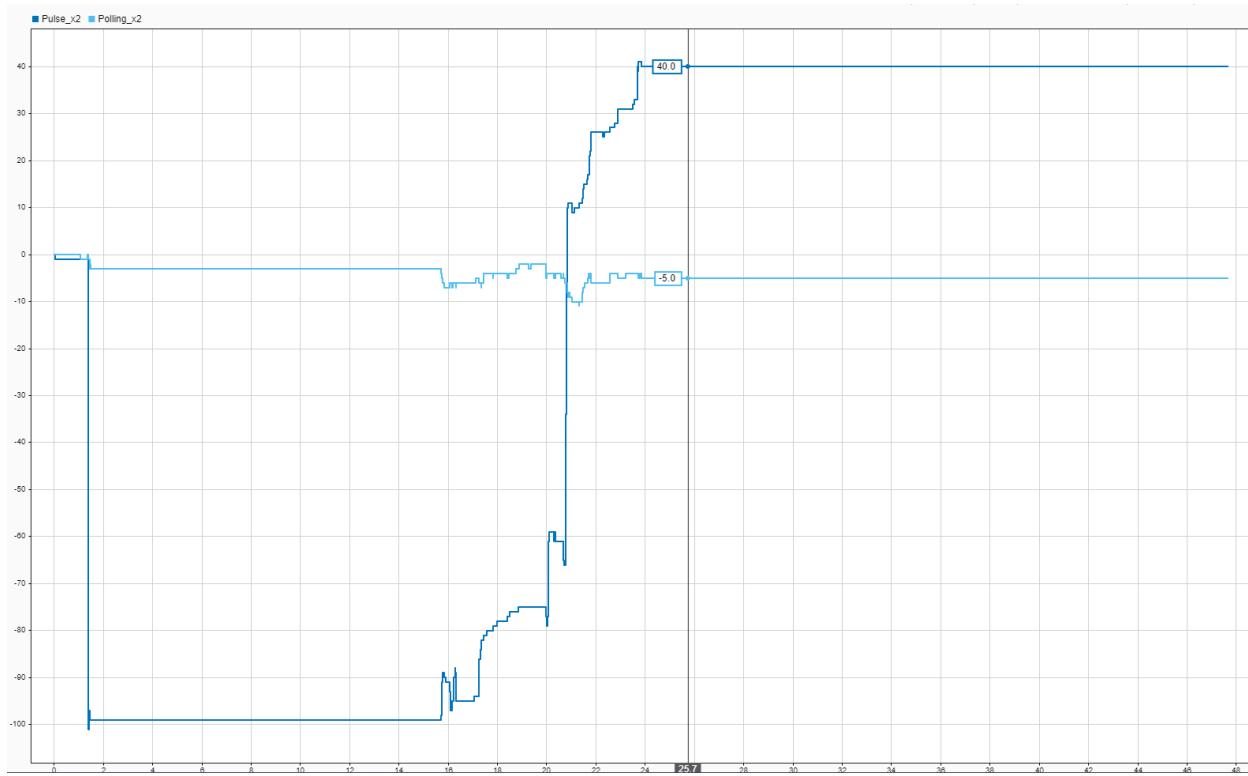
รูปที่ 65 ค่า X1, X2 และ X4 ที่ได้จากการอ่านแบบ Polling ใน Real time



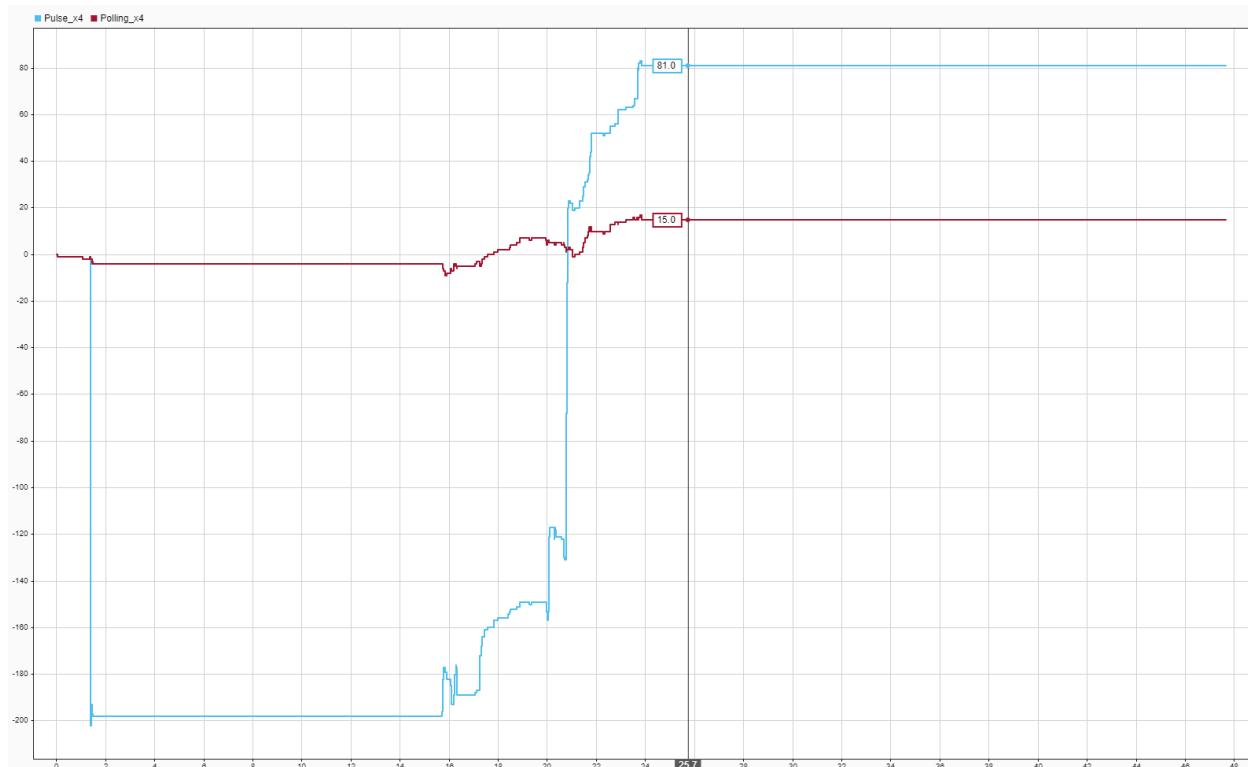
รูปที่ 66 เปรียบเทียบค่า X1 และ X4 โดยการอ่านแบบ Polling ใน Real time



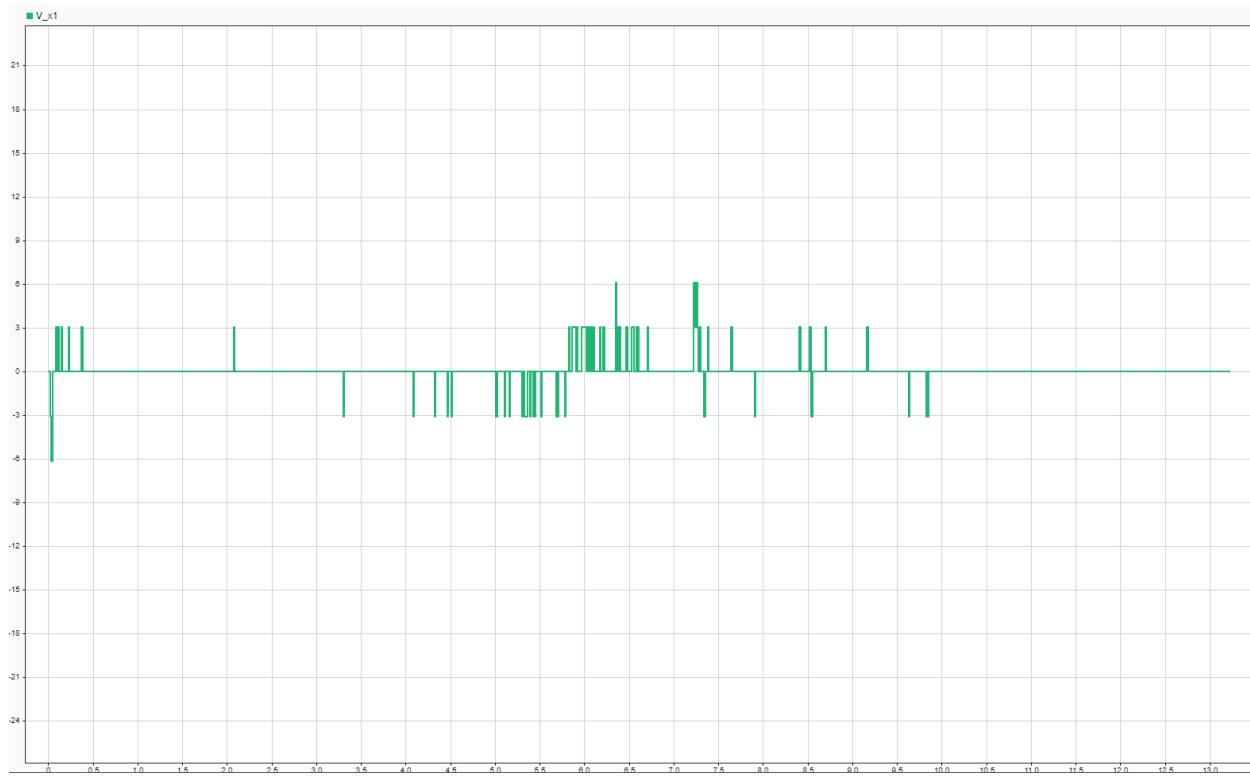
รูปที่ 67 เปรียบเทียบค่า X1 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



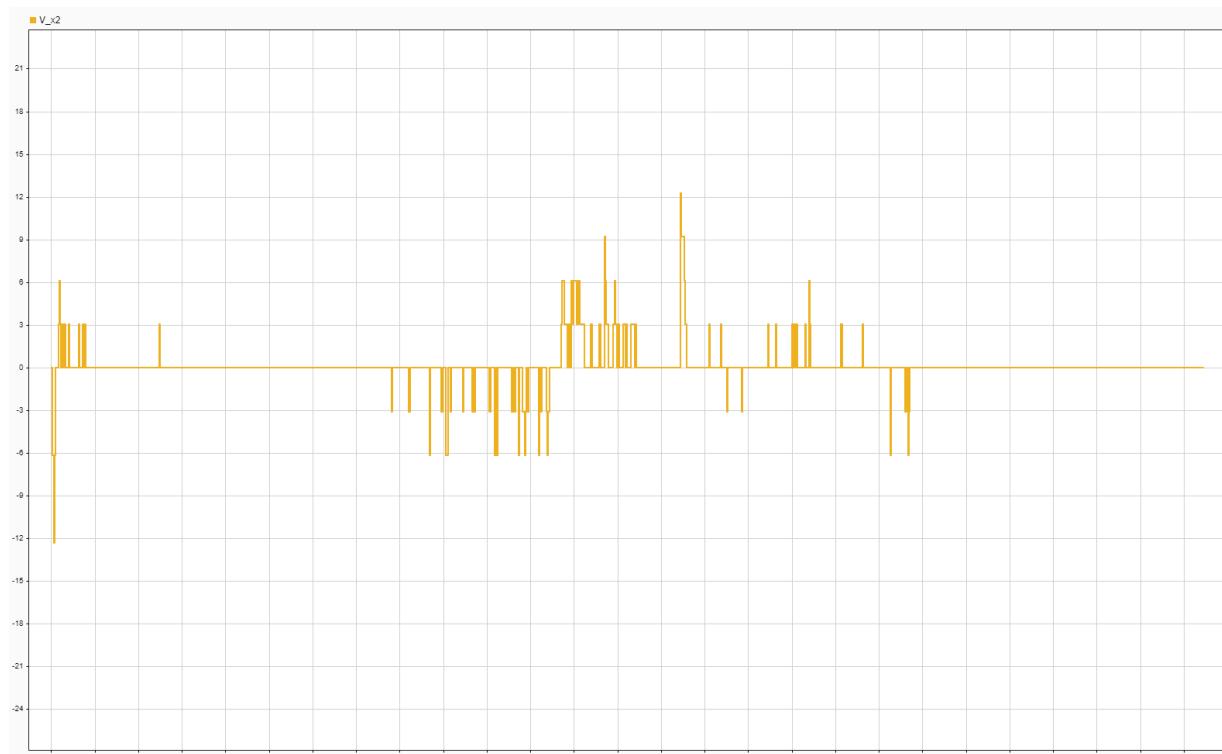
รูปที่ 68 เปรียบเทียบค่า X2 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



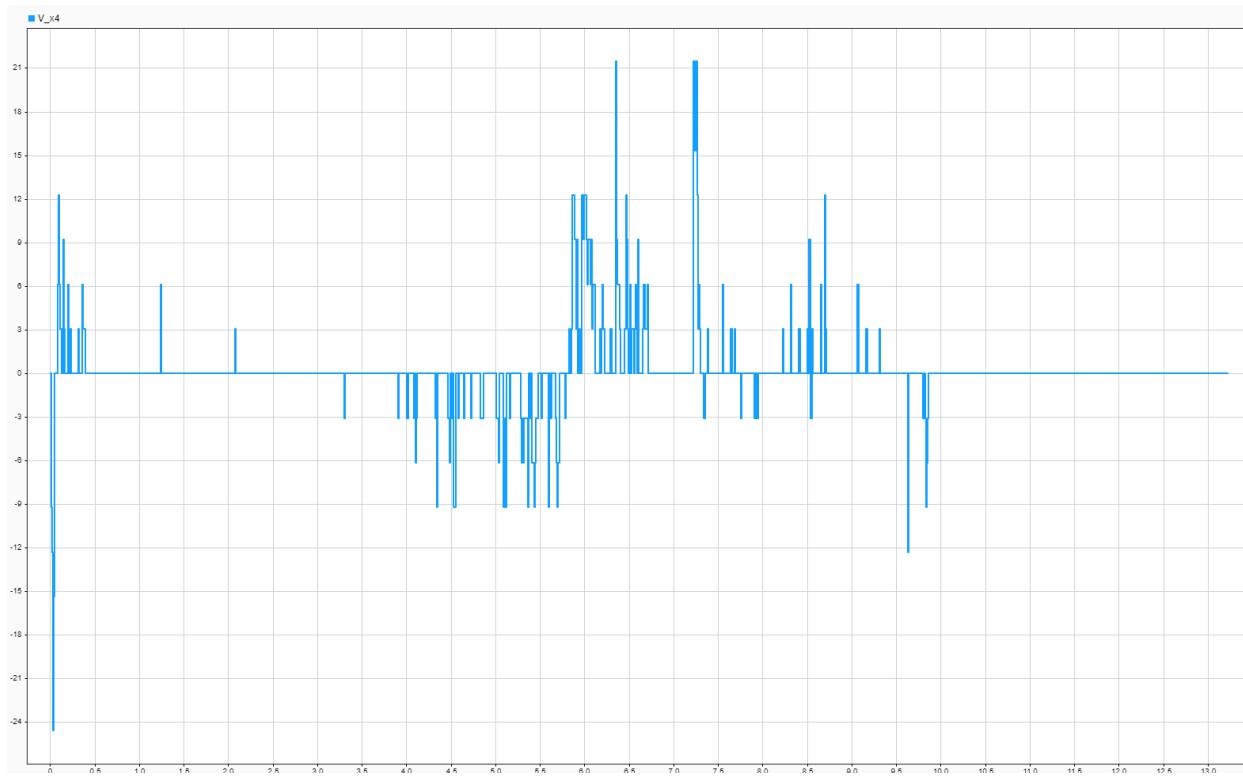
รูปที่ 69 เปรียบเทียบค่า X4 โดยการอ่านแบบ QEI เทียบกับ Polling ใน Real time



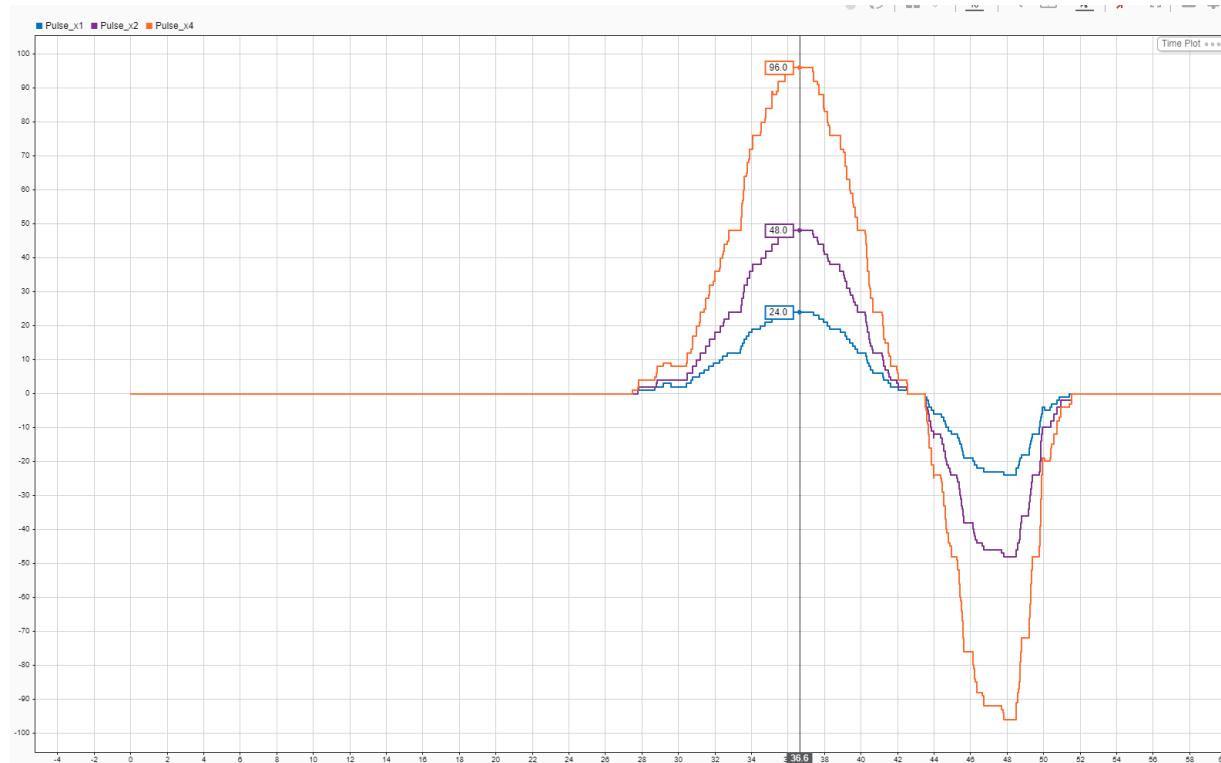
รูปที่ 70 ค่าความเร็วของ  $X_1$  โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time



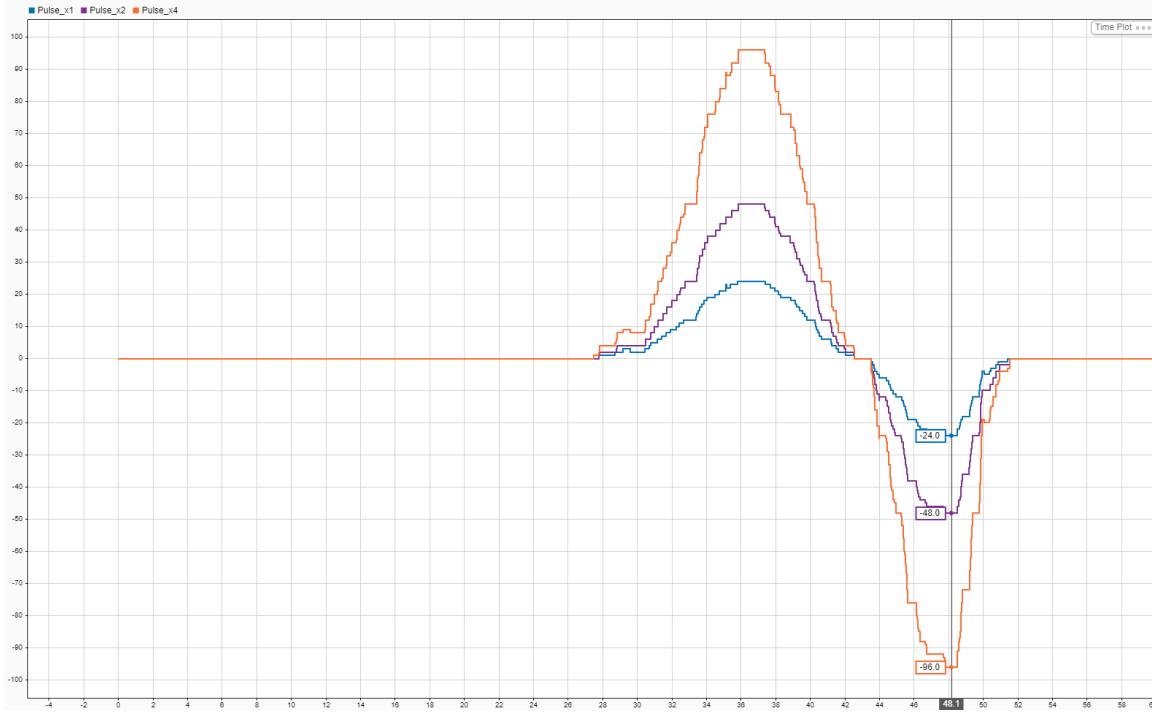
รูปที่ 71 ค่าความเร็วของ  $X_2$  โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time



รูปที่ 72 ค่าความเร็วของ X4 โดยการอ่านแบบ QEI ใน Real time



รูปที่ 73 แสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่าที่ความเร็ว X1, X2 และ X4 แบบ QEI ช่วงค่าบวก ใน Real time



รูปที่ 74 แสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่าที่ความเร็ว X1, X2 และ X4 แบบ QEI ช่วงค่าลบ ใน Real time

### 3.10 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหุ่น Incremental Encoder พบร่วมกับการหุ่น Encoder ค่าของ Raw Signal, Angular Position และ Angular Velocity มีการเปลี่ยนแปลงตามสมมติฐาน ดังนี้

1. Raw Signal จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามจำนวนพัลส์ที่เกิดจากการหุ่น Encoder ซึ่งจำนวนพัลส์จะสมจะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการหุ่น โดยเมื่อหุ่น Encoder ตามเข็มนาฬิกา ค่า Raw Signal จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และหากหุ่น Encoder ทวนเข็มนาฬิกา ค่า Raw Signal จะลดลงเรื่อยๆ

2. Angular Position จะเปลี่ยนแปลงตามจำนวนพัลส์ของ Encoder ซึ่งจะสะท้อนตำแหน่งเชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางการหุ่น โดยการหุ่นในทิศทางหนึ่งจะทำให้ค่ามุมสะสมเพิ่มขึ้น และหุ่นในทิศทางตรงข้ามจะทำให้ค่ามุมสะสมลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) สามารถออกตำแหน่งตามจำนวนพัลส์ที่นับได้จากการหุ่นของ Encoder

3. Angular Velocity จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการหุ่น Encoder โดยหากการหุ่นมีความเร็วสูงขึ้น ค่า Angular Velocity จะมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และหากการหุ่นมีความเร็วลดลง ค่า Angular Velocity จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานว่าค่า Angular Velocity จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของการหุ่น Encoder

### 3.11 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองและผลการทดลอง ทำให้เห็นว่า Incremental Encoder ทำงานโดยการส่งสัญญาณ 2 ช่องทาง คือ สัญญาณ A และสัญญาณ B ซึ่งมีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา เพื่อรับ��ตำแหน่งและทิศทางของการหมุน Encoder โดย พบร่วมกับการเปลี่ยนแปลงทิศทางและความเร็วในการหมุนจะส่งผลให้สัญญาณ Output เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยพัลส์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามทิศทางการหมุน Angular Position จะคำนวณจากค่าพัลส์สะสม และ Angular Velocity จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการหมุน Encoder ซึ่งใช้ค่า Pulses Per Revolution (PPR) และ Resolution ของ Encoder ในการคำนวณ โดยในการทดลองสามารถหาค่า Pulse Per Revolution (PPR) ได้จากการลองหมุน Encoder ให้ครบ 1 รอบและดูค่าพัลส์ที่ได้ ส่วนค่า Resolution คำนวณได้จากสูตร  $Resolution = \frac{2\pi}{PPR}$  เพื่อแสดง เป็นค่าเชิงมุม

โดยในการอ่านค่า Encoder ในการทดลองนี้มีอยู่ 2 วิธี คือ QEI Method และ Polling Method ซึ่งมีข้อดี-ข้อเสียต่างกันไป ข้อดีของ QEI คือ QEI สามารถอ่านค่าตำแหน่งของ Encoder ได้แบบเรียลไทม์ มีการอัปเดตค่าทันทีที่ ตำแหน่งของ Encoder เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ข้อมูลมีความแม่นยำและสม่ำเสมอ และ QEI สามารถทำงานได้ดีแม้ใน กรณีที่ Encoder หมุนเร็ว จึงช่วยลดปัญหาการอ่านค่าผิดพลาด ในส่วนของข้อเสียของ QEI คือมีความซับซ้อนในการตั้ง ค่า Parameter ต่าง ๆ ใน IOC เนื่องจาก QEI ต้องอาศัย Timer ในการอ่านค่า ส่วนข้อดีของ Polling คือใช้งานได้ง่าย เนื่องจาก Polling จะรับสัญญาณจาก A และ B โดยตรง และใช้การเขียนโปรแกรมในการตรวจจับสัญญาณ ทำให้การ ตั้งค่าไม่ซับซ้อน ในส่วนของข้อเสียก็คือ Polling จะมีความแม่นยำต่ำกว่า QEI เนื่องจากหาก Encoder หมุนเร็ว การ อ่านค่าแบบ Polling จะผิดพลาดได้ เพราะไม่สามารถจับการเปลี่ยนแปลงของพัลส์ได้อย่างต่อเนื่อง กล่าวโดยสรุปได้ว่า QEI เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและตอบสนองแบบเรียลไทม์ ส่วน Polling เหมาะสำหรับการทดลอง หรือการใช้งานทั่วไปที่ไม่ต้องการความเร็วในการประมวลผลสูง

ซึ่งจากการทดลอง จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดจากการอ่านแบบ QEI มีความแม่นยามากกว่าแบบ Polling ในทั้งการ อ่านแบบ X1, X2 และ X4 และเมื่อลองเทียบค่าที่ได้จากการวัด X1 และ X4 แบบ Polling จะเห็นว่า Polling X4 มี ความแม่นยามากกว่า Polling X1 เนื่องจากการอ่านค่าทุกข้อใน Polling X4 ลดโอกาสเกิดการสูญหายของพัลส์ เมื่อ ตรวจสอบการหมุนที่ความเร็วสูง หรือเมื่อ Encoder มีความละเอียดสูง ทำให้การประมวลผลข้อมูลละเอียดมากขึ้นและ แม่นยามากขึ้นเมื่อเทียบกับ Polling X1

นอกจากนี้ในการทดลองได้มีการเขียนโปรแกรมเพื่อ Homing Incremental Encoder ซึ่งเป็นการทำให้ตำแหน่ง ของ Encoder กลับไปยังจุดเริ่มต้น หรือก็คือการ Reset ค่าพัลส์ที่สะสมไว้ให้กลับเป็น 0 โดยการใช้ Homing จะช่วย ให้การใช้งาน Encoder มีความสะดวกในการเริ่มต้นตำแหน่งใหม่ เมื่อต้องการเก็บค่าใหม่หรือนำไปใช้งานอีก ๆ

### 3.12 ข้อเสนอแนะ

3.12.1 วิเคราะห์การตอบสนองของระบบเมื่อมีการหมุนเร็วมากขึ้น เพื่อศึกษาว่าความเร็วส่งผลต่อการอ่านสัญญาณของ Encoder อย่างไร และนำไปปรับปรุง เพื่อให้อุปกรณ์สามารถตอบสนองโดยไม่เกิดความผิดพลาดหรือการขาดหายของสัญญาณ

3.12.2 ใช้งานร่วมกันสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้ค่าที่มีความเสถียรและแม่นยำมากขึ้นในการนำไปใช้งานจริง

### 3.13 เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>
- [2] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/432661/CUI/AMT103-V.html>
- [3] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html>
- [4] <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [5] <https://www.mindphp.com/คู่มือ/73-คืออะไร/4043-what-is-matlab.html>
- [6] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html>

## 4. การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Magnetic Sensor

### 4.1 วัตถุประสงค์

- 4.1.1 สามารถทำการวิเคราะห์ผลการเรียนรู้หลัก
- 4.1.2 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ได้
- 4.1.3 สามารถอธิบายลักษณะสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ได้เมื่อ Magnetic Flux Density เปลี่ยนแปลงไป
- 4.1.4 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Field Shielding และ Magnetic Flux Density
- 4.1.5 สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และดึงให้เห็นว่าสัญญาณ Output ปรับผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Magnetic Flux Density ในหน่วย SI derived

### 4.2 สมมติฐาน

หากระยะห่างระหว่างเซนเซอร์และแม่เหล็กเพิ่มขึ้นหรือลดลง หรือมีการเปลี่ยนขั้วของแม่เหล็ก จะมีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าออกของเซนเซอร์ โดยค่าแรงดันจะเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็กเนื่องจากเซนเซอร์มีการตอบสนองต่อความเข้มของ Magnetic Flux Density โดยตรง

### 4.3 ตัวแปรการศึกษา

#### 4.3.1 ตัวแปรต้น

ระยะห่างระหว่างสนามแม่เหล็กกับ Sensor และขั้วของแม่เหล็ก

#### 4.3.2 ตัวแปรตาม

การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าออก

#### 4.3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า แม่เหล็ก สายไฟ อุณหภูมิ สถานที่ทดสอบ และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

#### 4.4 นิยามคัพท์เฉพาะ

4.4.1 ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์และแม่เหล็ก หมายถึง ระยะห่างที่เลื่อนแม่เหล็กขึ้นให้ออกห่างจากเซนเซอร์เป็นระยะทางครั้งละ 5 มิลลิเมตร

4.4.2 การวัด Magnetic Flux Density ด้วย Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor หมายถึง การวัดสนามแม่เหล็กโดยเซนเซอร์ Hall Effect ซึ่งทำการแปลงสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้าออก ที่สัมพันธ์กับค่า Magnetic Flux Density โดยตรง

4.4.3 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์ หมายถึง การเคลื่อนตำแหน่งของแม่เหล็กที่อยู่ใกล้กับเซนเซอร์ เพื่อเปลี่ยนค่า Magnetic Flux Density ที่เซนเซอร์รับรู้ ทำให้แรงดันไฟฟ้าข้าออก เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งแม่เหล็ก ซึ่งสามารถสังเกตได้ผ่าน Data Inspector ใน MATLAB/Simulink

#### 4.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

4.5.1 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor หมายถึง เเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการ Hall Effect ซึ่งแปลงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยสัญญาณแรงดันเอาต์พุตจะแปรผันตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาทำให้ได้สัญญาณที่เป็นอัตราส่วนต่อ Vcc นั้น

4.5.2 Magnetic Flux Density หมายถึง ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็นเทสลา (T)

4.5.3 Magnetic Field Shielding หมายถึง กระบวนการหรือวัสดุที่ใช้ในการป้องกันหรือปิดกั้นสนามแม่เหล็กจากภายนอก เพื่อควบคุมไม่ให้สนามแม่เหล็กกระทบต่อเซนเซอร์โดยตรง หรือเพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กอื่น

4.5.4 แรงดันไฟฟ้าข้าออก หมายถึง สัญญาณไฟฟ้าที่ส่งออกมายังเซนเซอร์ Hall Effect และแสดงถึงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตรวจจับได้ โดยค่าแรงดันนี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์เป็นสัญญาณ Raw Signal หรือแปลงเป็น Magnetic Flux Density

4.5.5 Nucleo STM32G474RE หมายถึง ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดจาก STMicroelectronics ซึ่งรองรับการใช้งานร่วมกับ MATLAB และ Simulink ในการรับสัญญาณจากเซนเซอร์หรือส่งสัญญาณควบคุมแบบ Real-Time

4.5.6 Data Inspector หมายถึง ฟังก์ชันใน MATLAB/Simulink ที่ใช้ในการแสดงผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองในลักษณะกราฟหรือข้อมูลแบบ Real-Time

4.5.7 MagneticXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, DRV5055A2 และ 3D-Print ที่ใช้สำหรับการปรับระยะแม่เหล็กทราบกับเซนเซอร์

4.5.8 Hall Effect Sensor หมายถึง DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

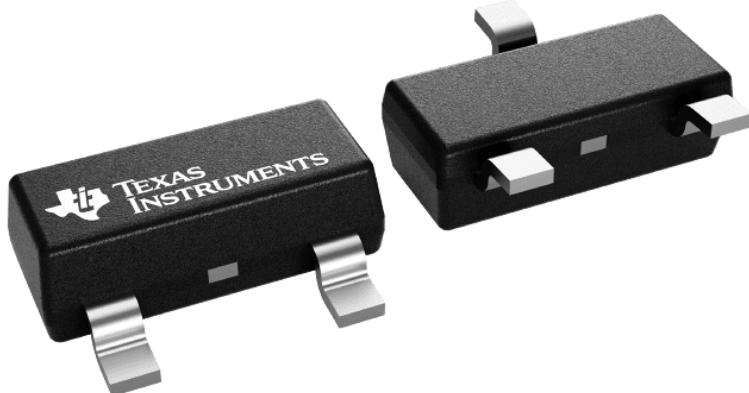
## 4.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 4.6.1 Hall Effect Sensor

Hall Effect Sensor เป็นหนึ่งในประเภทของ Magnetic Sensor โดยที่ Hall Effect Sensor เป็นเซนเซอร์ที่ใช้หลักการของ Hall Effect เพื่อวัดสนามแม่เหล็กและแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุที่เป็นเชมิคอลดักเตอร์ในสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เรียกว่า Hall Voltage

หลักการอ่านค่าของ Hall Effect Sensor คือ ภายใน Hall Effect Sensor จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัสดุเชมิคอลดักเตอร์หรือแผ่นบาง ๆ ในทิศทางที่กำหนด เมื่อมีสนามแม่เหล็กภายในก็จะมีแรงต้านกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน วัสดุภายในเซนเซอร์จะเกิดการสะสมของประจุไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่มากระทำจะทำให้อิเล็กตรอนในเซนเซอร์เคลื่อนที่เบี่ยงเบนไปในทิศทางอื่น ซึ่งการเบี่ยงเบนของประจุไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า Hall ในทิศทางตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

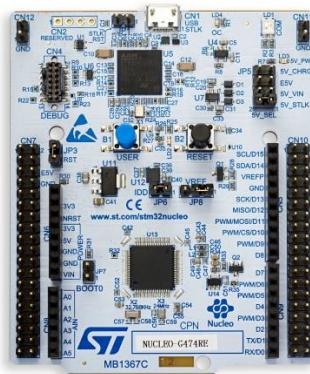
Hall Sensor ถูกนำไปใช้ในการทำงานหลายรูปแบบ เช่น ใช้ในเครื่องวัดความเร็วล้อรถ หรืออุปกรณ์มอเตอร์ไฟฟ้า ใช้ในอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนไหวของชิ้นส่วน เช่น หุ่นยนต์ หรือใช้ในเครื่องวัดกระแสโดยการตรวจจับสนามแม่เหล็กรอบสายไฟที่มีกระแสไฟไหลผ่าน



รูปที่ 75 Hall Effect Sensor

#### 4.6.2 Nucleo STM32G474RE

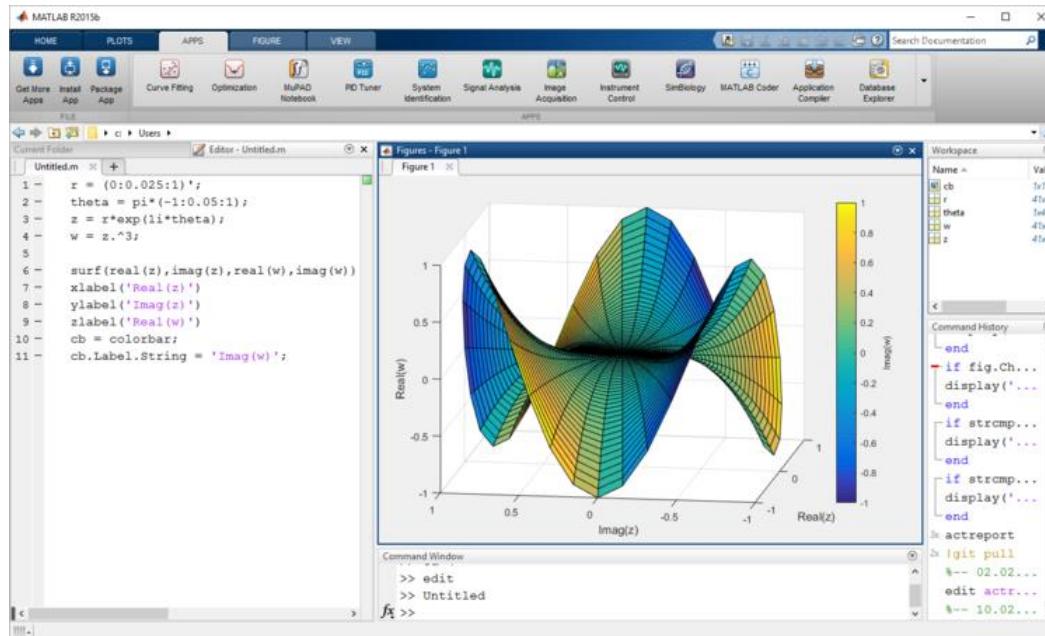
เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์จาก STMicroelectronics ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น การควบคุมมอเตอร์ การแปลงสัญญาณอนาล็อก/ดิจิทัล การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 76 บอร์ด Nucleo STM32G474RE

#### 4.6.3 MATLAB

MATLAB เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น วิเคราะห์ข้อมูลพัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอปพลิเคชัน การประมวลผลสัญญาณและการสื่อสาร การประมวลผลภาพและวิดีโอ เป็นต้น



รูปที่ 77 แสดงหน้าโปรแกรม MATLAB

#### 4.6.4 Finite State Machines

Finite State Machines เป็นแบบจำลองการคำนวณที่ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีระบบที่มีจำนวนสถานะจำกัด โดยส่วนประกอบของ Finite State Machines มีดังนี้

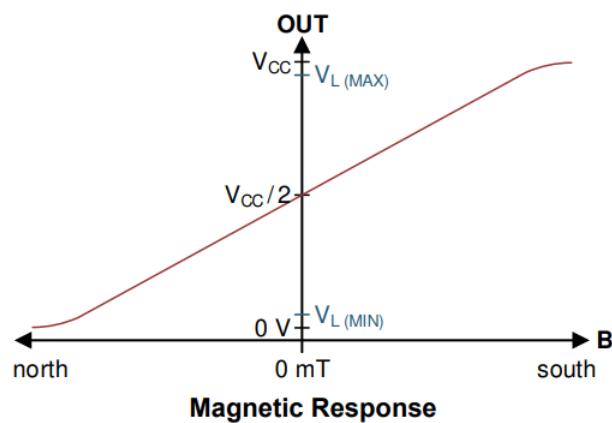
- สถานะ (State) เป็นการกำหนดสถานะของระบบ โดยแต่ละสถานะจะมีการอธิบายเงื่อนไขของระบบ
- การเปลี่ยน (Transitions) มีเงื่อนไขที่ทำให้สถานะเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง
- เหตุการณ์ (Events) ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น การรับสัญญาณอินพุต
- การกระทำ (Actions) การกระทำที่เกิดขึ้นตอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ
- สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะที่ระบบจะอยู่ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
- สถานะสุดท้าย (Final State) ระบบจะสิ้นสุดการทำงานที่สถานะนี้

#### 4.6.5 Datasheet DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

4.6.5.1 กราฟการตอบสนองทางแม่เหล็ก (Magnetic Response) ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor รุ่น DRV5055

Device Information <sup>(1)</sup>		
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV5055	SOT-23 (3)	2.92 mm × 1.30 mm
	TO-92 (3)	4.00 mm × 3.15 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



รูปที่ 78 แสดงกราฟการตอบสนองทางแม่เหล็กของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor รุ่น DRV5055

รูปที่ 78 แสดงถึงพฤติกรรมการตอบสนองทางแม่เหล็กของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor รุ่น DRV5055 ซึ่งทางแกนแนวอนแทนค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยมีหน่วยเป็น mT (milliTesla) โดยแกนซ้ายแสดงทิศทางแม่เหล็กไปทางทิศเหนือ แกนขวาแสดงทิศทางแม่เหล็กไปทางทิศใต้ และแกนในแนวตั้งแทนค่าของแรงดันไฟฟ้าข้ออกของเซนเซอร์ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าข้ออกสามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังนี้

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

โดย	$V_{out}$	คือ แรงดันไฟฟ้าข้อออก
	$V_Q$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าข้ออกที่ไม่มีสนามแม่เหล็กกระทำอยู่ โดยทั่วไปจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
	$B$	คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำ
	$Sensitivity_{(25^{\circ}C)}$	คือ ค่าความไวในการตอบสนอง (ชั้นอยู่กับรุ่นของอุปกรณ์)
	$S_{TC}$	คือ Sensitivity Temperature Coefficient หรือ สัมประสิทธิ์ความไวต่ออุณหภูมิ โดยทั่วไปมีค่า 0.12 %/°C สำหรับรุ่น DRV5055A1 - DRV5055A4)
	$T_A$	คือ อุณหภูมิเวลาล้อม

#### 4.6.5.2 สูตรการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กต่ำสุดที่สามารถตรวจจับได้โดยเซนเซอร์

$$B_{L(MIN)} = \frac{V_{L(MAX)} - V_{Q(MAX)}}{S_{(MAX)}}$$

โดย	$V_{L(MAX)}$	คือ ค่าความต่างศักย์สูงสุดของเอาต์พุต (Output Voltage) เมื่อสนามแม่เหล็กอยู่ในระดับที่สามารถตรวจจับได้สูงสุด
	$V_{Q(MAX)}$	ค่าความต่างศักย์สูงสุดของเอาต์พุตเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก (ค่าแรงดันที่ตำแหน่ง $B = 0$ )
	$S_{(MAX)}$	ค่าความไวในการตอบสนองสูงสุดของเซนเซอร์

#### 4.6.5.3 ตารางแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์ DRV5055

PARAMETER	TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup>	MIN	TYP	MAX	UNIT
V <sub>Q</sub> Quiescent voltage	B = 0 mT, T <sub>A</sub> = 25°C V <sub>CC</sub> = 5 V V <sub>CC</sub> = 3.3 V	2.43	2.5	2.57	V
V <sub>QΔT</sub> Quiescent voltage temperature drift		1.59	1.65	1.71	
V <sub>QRE</sub> Quiescent voltage ratiometry error <sup>(2)</sup>			±0.2%		
V <sub>QΔL</sub> Quiescent voltage lifetime drift	High-temperature operating stress for 1000 hours		< 0.5%		
S Sensitivity	V <sub>CC</sub> = 5 V, T <sub>A</sub> = 25°C	DRV5055A1/Z1	95	100	105
		DRV5055A2/Z2	47.5	50	52.5
		DRV5055A3/Z3	23.8	25	26.2
		DRV5055A4/Z4	11.9	12.5	13.2
	V <sub>CC</sub> = 3.3 V, T <sub>A</sub> = 25°C	DRV5055A1/Z1	57	60	63
		DRV5055A2/Z2	28.5	30	31.5
		DRV5055A3/Z3	14.3	15	15.8
		DRV5055A4/Z4	7.1	7.5	7.9
B <sub>L</sub> Linear magnetic sensing range <sup>(3) (4)</sup>	V <sub>CC</sub> = 5 V, T <sub>A</sub> = 25°C	DRV5055A1/Z1	±21		mV/mT
		DRV5055A2/Z2	±42		
		DRV5055A3/Z3	±85		
		DRV5055A4/Z4	±169		
	V <sub>CC</sub> = 3.3 V, T <sub>A</sub> = 25°C	DRV5055A1/Z1	±22		
		DRV5055A2/Z2	±44		
		DRV5055A3/Z3	±88		
		DRV5055A4/Z4	±176		
V <sub>L</sub> Linear range of output voltage <sup>(4)</sup>			0.2	V <sub>CC</sub> – 0.2	V
S <sub>TC</sub> Sensitivity temperature compensation for magnets <sup>(5)</sup>	DRV5055A1, DRV5055A2, DRV5055A3, DRV5055A4			0.12	%/°C

รูปที่ 79 แสดงตารางคุณสมบัติทางไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซนเซอร์ DRV5055

จากรูปที่ 79 เป็นตารางแสดงข้อมูลที่ประกอบไปด้วยข้อมูลลักษณะเฉพาะของเซนเซอร์ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ชนิด DRV5055 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญสำหรับการนำไปวิเคราะห์ข้อมูลในการทดลอง

#### 4.7 วิธีดำเนินการทดลอง

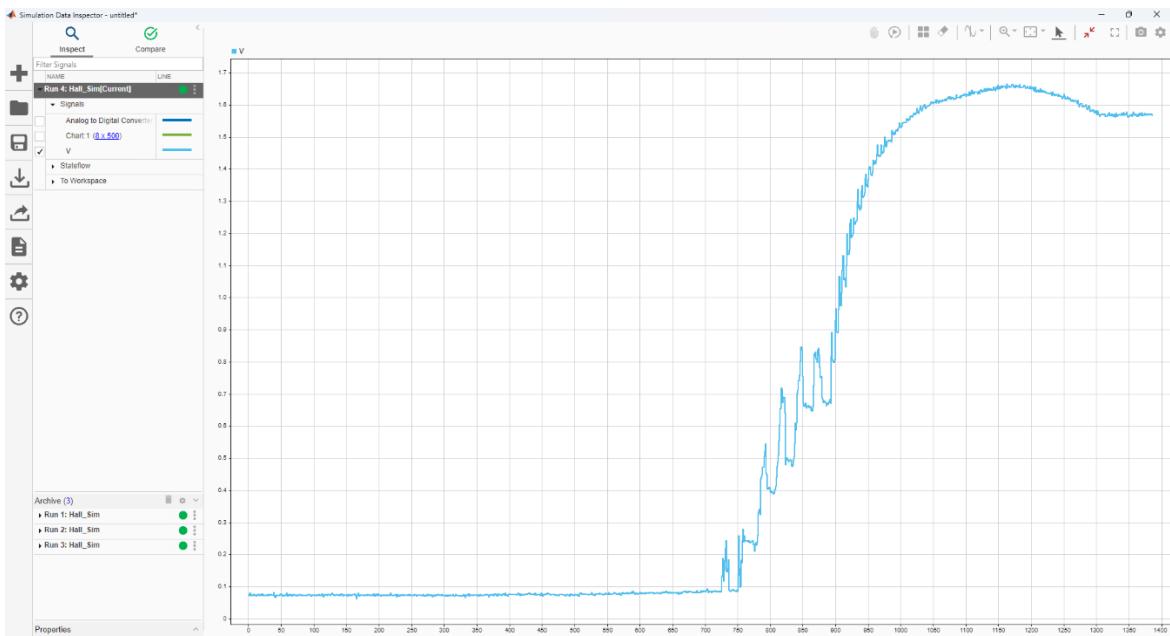
- 4.7.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ Hall Effect Sensor
- 4.7.2 เชื่อมต่อ Hall Effect Sensor เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 4.7.3 เชื่อมต่อบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอัปโหลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB
- 4.7.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink เพื่อทำการแปลงค่าและเก็บค่า Hall Effect Sensor
- 4.7.5 ใช้ State flow ใน Simulink เพื่อเก็บข้อมูลในแต่ละระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้เก็บค่า 500 ค่าต่อระยะห่าง 5 มิลลิเมตร และบันทึกค่าลงใน MATLAB
- 4.7.6 ใช้ MATLAB ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าจากจากข้อมูลที่เก็บได้
- 4.7.7 สร้างกราฟที่แกน X แสดงแรงดันเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละระยะห่าง และแกน Y แสดงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์
- 4.7.8 วิเคราะห์และอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง

#### 4.8 วัสดุอุปกรณ์

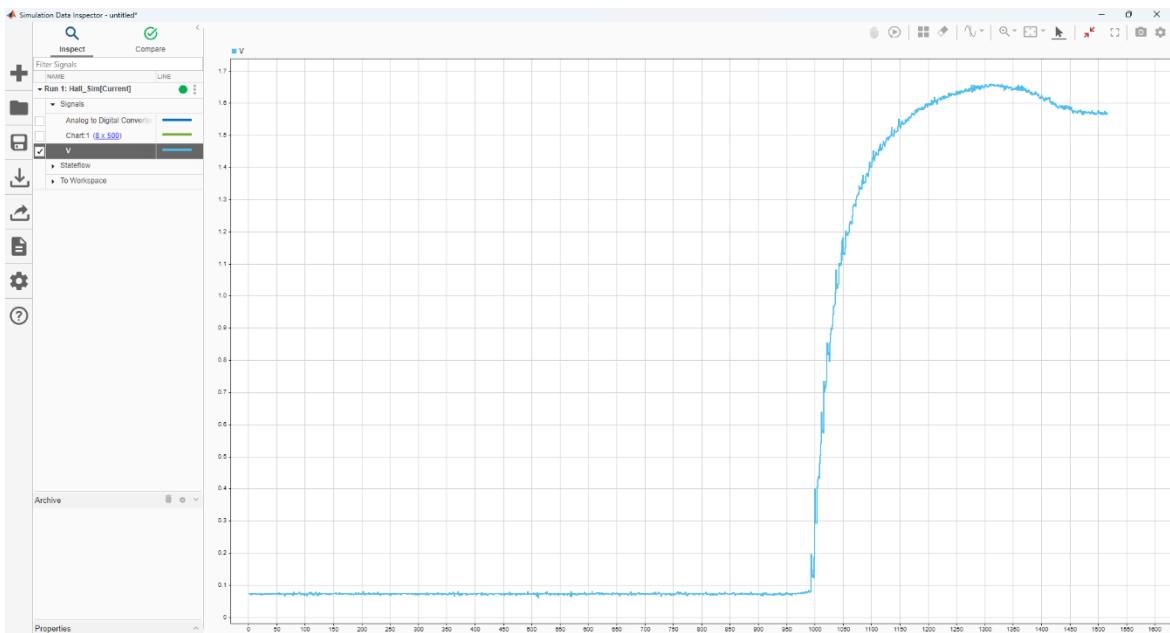
- |  |              |
|--|--------------|
| 4.8.1 DRV5055A2 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor | จำนวน 1 อัน  |
| 4.8.2 Nucleo STM32G474RE                                       | จำนวน 1 ชุด  |
| 4.8.3 MagneticXplorer  | จำนวน 1 ชุด  |
| 4.8.4 สายจัมเปอร์  | จำนวน 3 เส้น |

#### 4.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

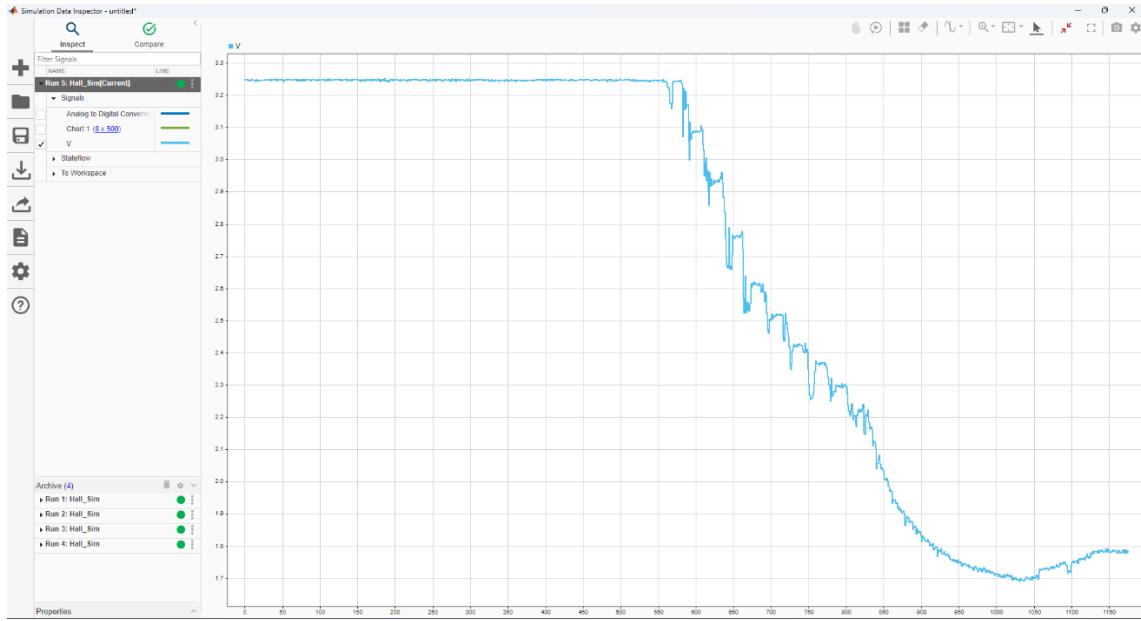
- 4.9.1 ศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของ Hall Effect Sensor จาก Datasheet เพื่อทำความเข้าใจคุณลักษณะสำคัญ
- 4.9.2 เชื่อมขา Vcc ของ Hall Effect Sensor เข้ากับ Vcc, ขา GND กับกราวด์ (GND) และขา OUT กับช่องรับสัญญาณ ของบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 4.9.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอัปโหลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB โดยตั้งค่าสายช่องรับสัญญาณให้เป็นโหมด Single-End หลังจากนั้นแสดงสัญญาณ Raw Signal แต่ละแบบ ใน Data Inspector



รูปที่ 80 กราฟแสดง Raw Signal ของการวัดแม่เหล็กขั้วเหนือแบบไม่มี Shield ผ่าน Data Inspector



รูปที่ 81 กราฟแสดง Raw Signal ของการวัดแม่เหล็กขั้วเหนือแบบมี Shield ผ่าน Data Inspector

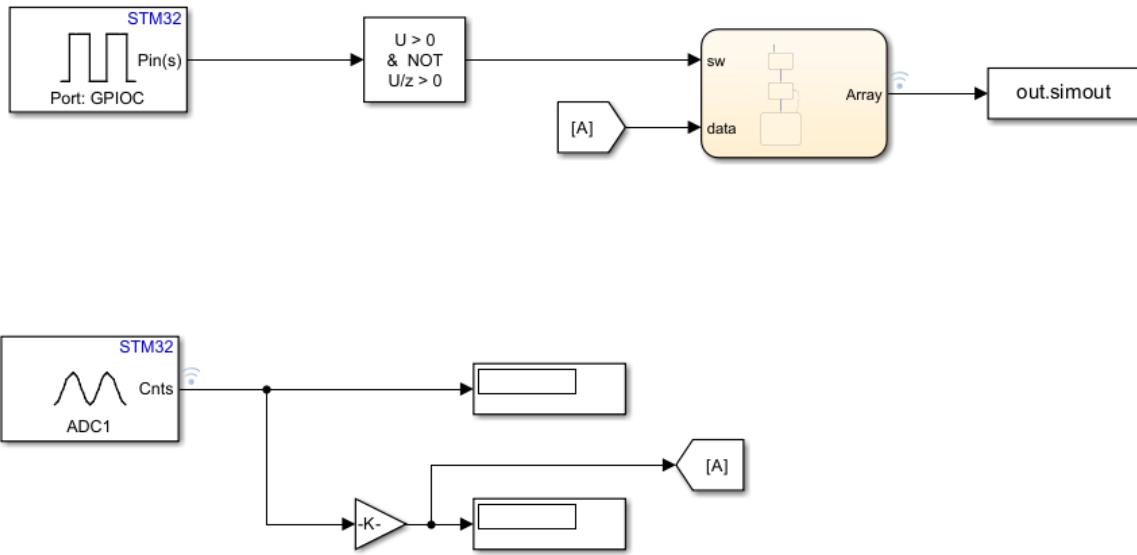


รูปที่ 82 กราฟแสดง Raw Signal ของการวัดแม่เหล็กขั้วใต้แบบไม่มี Shield ผ่าน Data Inspector

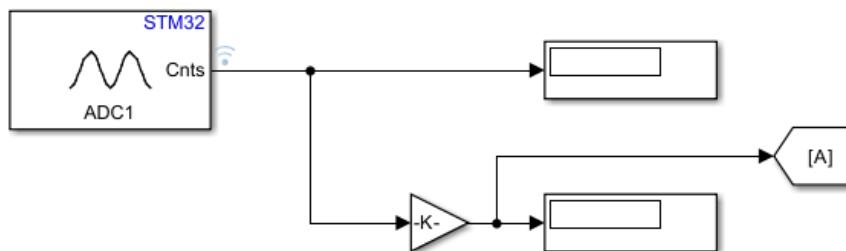


รูปที่ 83 กราฟแสดง Raw Signal ของการวัดแม่เหล็กขั้วใต้แบบมี Shield ผ่าน Data Inspector

#### 4.9.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink สำหรับการแปลงค่า และเก็บค่า Hall Effect Sensor



รูปที่ 84 ภาพรวมของ Simulink ที่ใช้ในการแปลงค่าและเก็บค่า Hall Effect Sensor

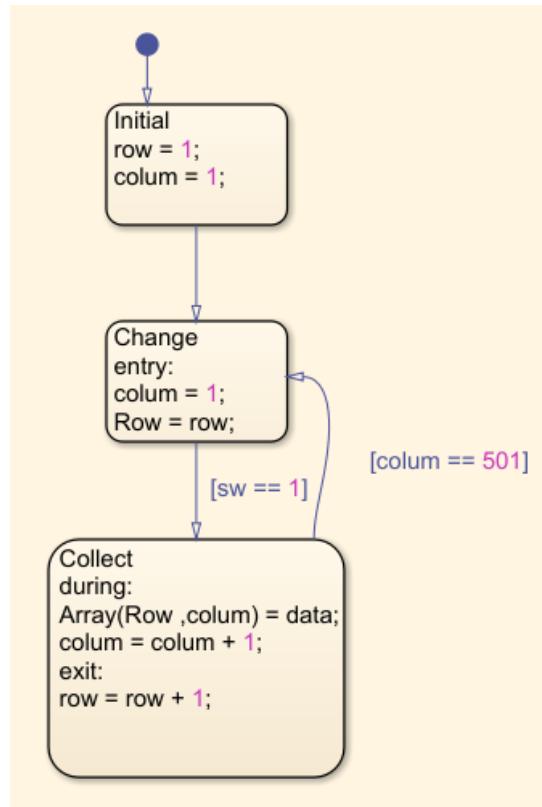


รูปที่ 85 การออกแบบ Simulink สำหรับการแปลงค่าจากหน่วย bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 85 เมื่อรับค่าสัญญาณจากบอร์ด STM32G474RE แล้ว ค่าที่ได้จะอยู่ในหน่วย bit ซึ่งอยู่ในช่วง 0 - 4095 แต่ค่าที่ต้องการเพื่อใช้ในการสร้างกราฟเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าข้าอก ก็จำเป็นต้องแปลงค่า bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt) ด้วยการคูณค่า K ซึ่งค่า K คำนวณได้จาก

$$K = \frac{1}{4095} \times 3.3$$

4.9.5 ทำการเก็บค่า 500 ค่าในการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor ที่ละ 5 มิลลิเมตร โดยจะทำการเก็บค่าเป็นตัวแปร Array ไว้ใน MATLAB



รูปที่ 86 State Flow ที่ใช้เก็บข้อมูล

จากรูปที่ 86 จะใช้ State Flow ในการเก็บค่าจากการทดลอง ซึ่งจะเก็บค่าไว้ใน Array ที่มีขนาด  $7 \times 500$  โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อกดสวิตช์จะมีการเปลี่ยน State จาก State Change ไปสู่ State Collect เพื่อเก็บค่า แรงดันไฟฟ้าจากที่วัดมา 500 ค่าในคอลัมน์ทั้ง 500 คอลัมน์ เมื่อเก็บค่าครบแล้วจะกลับไปสู่ State Change เพื่อทำการเปลี่ยนเวลา Array ในการเก็บ และจะต้องกดสวิตช์ เพื่อเป็นการ trigger ให้เข้าไปสู่ State Collect ในการเก็บค่าต่อไป

#### 4.9.6 นำค่าที่เก็บมาหาค่าเฉลี่ย และนำไป Plot Graph โดยทำการเขียนโปรแกรมใน MATLAB

```

1 arr_s = ones(1,8);
2 arr_N = ones(1,8);
3 arr_s_Sheild = ones(1,8);
4 arr_N_Sheild = ones(1,8);
5 arr_S_Sheild = ones(1,8);
6 arr_S = ones(1,8);
7 arr_Per1 = [22.22; 33.33; 44.44; 55.56; 66.67; 77.78; 88.89; 100];
8 arr_B1 = ones(1,8);
9 arr_B1_Sheild = ones(1,8);
10 arr_B = ones(1,8);
11 arr_B_Sheild = ones(1,8);
12
13 for i = 1:8
14     arr_s(i) = mean(S(i,:));
15     arr_N(i) = mean(N(i,:));
16     arr_s_Sheild(i) = mean(S_Sheild(i,:));
17     arr_N_Sheild(i) = mean(N_Sheild(i,:));
18 end
19
20 for i = 8:-1:1
21     arr_S_Sheild((length(arr_s_Sheild))-(i-1)) = arr_s_Sheild(i);
22     arr_S((length(arr_s))-i) = arr_s(i);
23 end
24
25 for i = 1:8
26     arr_B(i) = ((arr_N(i)-1.65)/30);
27     arr_B_Sheild(i) = ((arr_N_Sheild(i)-1.65)/30);
28     arr_B1(i) = ((arr_S(i)-1.65)/30);
29     arr_B1_Sheild(i) = ((arr_S_Sheild(i)-1.65)/30);
30 end
31
32 x = {arr_Per1, arr_Per1, arr_Per1, arr_Per1, arr_B, arr_B1, arr_B_Sheild, arr_B1_Sheild};
33 y = {arr_N, arr_S, arr_N_Sheild, arr_S_Sheild, arr_N, arr_S, arr_N_Sheild, arr_S_Sheild};
34
35 ax_1 = subplot(2,4,1);
36 ax_2 = subplot(2,4,2);
37 ax_3 = subplot(2,4,3);
38 ax_4 = subplot(2,4,4);
39 ax_5 = subplot(2,4,5);
40 ax_6 = subplot(2,4,6);
41 ax_7 = subplot(2,4,7);
42 ax_8 = subplot(2,4,8);
43 ax = {ax_1, ax_2, ax_3, ax_4, ax_5, ax_6, ax_7, ax_8};
44
45 c = 'rgrgrgrg';
46 label_x = {'S [%]', 'S [%]', 'S [%]', 'S [%]', 'B [T]', 'B [T]', 'B [T]', 'B [T]'};
47 TT = {'N', 'S', 'N With Shield', 'S With Shield', 'N', 'S', 'N With Shield', 'S With Shield'};
48
49 for i = 1:9
50     plot(ax{i}, x{i}, y{i}, [c(i) '-'], 'LineWidth', 2);
51     grid(ax{i}, 'on');
52     xlabel(ax{i}, label_x{i}, 'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');
53     ylabel(ax{i}, "Vout [V]", 'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');
54     title(ax{i}, TT{i}, 'FontSize', 14, 'Interpreter', 'latex');
55 end

```

รูปที่ 87 Code ส่วนหาค่าเฉลี่ยที่เก็บมา และในส่วนการ Plot Graph

จากรูปที่ 87 จะสร้าง Array ใหม่ที่มีขนาด  $1 \times 7$  ที่มีค่าทั้งหมดเป็น 1 เพื่อใช้ในการเก็บค่า และใช้ For Loop ใน การนำค่า 500 ค่าในแต่ละแถวมาหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปเก็บโดยการนำค่าที่เฉลี่ยได้มาไปแทนที่ค่า 1 ใน Array ที่ ตำแหน่งนั้น และนำค่าแรงดันไฟฟ้าข้ออกของขัวเหนือของที่ไม่มี Shield, ขัวใต้ขณะที่ไม่มี Shield, ขัวเหนือของที่มี Shield, ขัวใต้ขณะที่มี Shield เพื่อนำมาหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยใช้ค่า Sensitivity = 30 ตามข้อมูลจาก Data sheet หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟ โดยแกน Y ของกราฟจะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันข้ออกที่นำมาได้ ส่วนแกน X ของกราฟคือระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor, ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตอนไม่มี Shield และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กตอนมี Shield

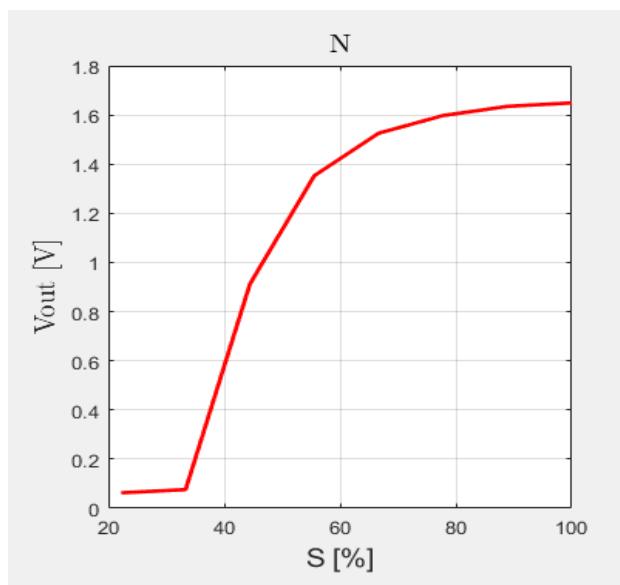
#### 4.9.7 นำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์และอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง รวมถึงปัจจัยที่อาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน

## 4.10 ผลการทดลอง

### 4.10.1 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวเหนียวของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 6 แสดงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ข้าวเหนียวของแม่เหล็ก

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (mm)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ข้าวเหนียวของแม่เหล็ก (V)
10	0.063
15	0.076
20	0.913
25	1.353
30	1.526
35	1.598
40	1.635
45	1.649

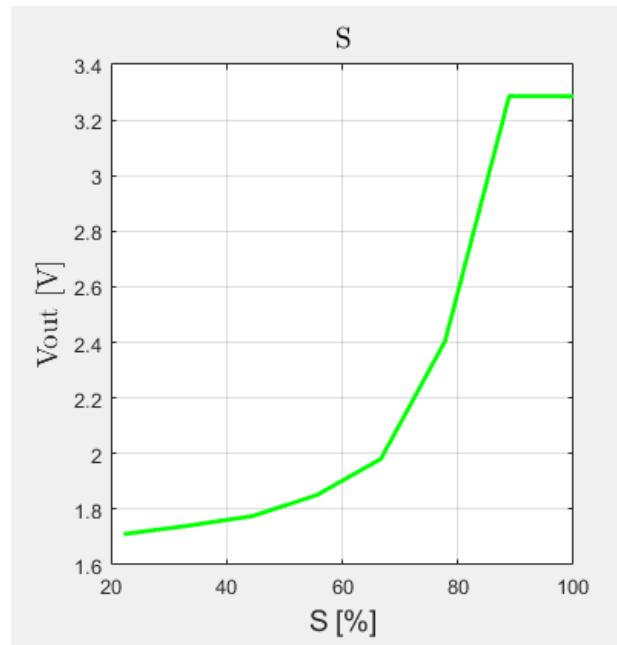


รูปที่ 88 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ข้าวเหนียวของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

#### 4.10.2 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวตัวของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 7 แสดงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตัวของแม่เหล็ก

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (mm)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตัวของแม่เหล็ก (V)
10	1.711
15	1.740
20	1.775
25	1.850
30	1.981
35	2.404
40	3.286
45	3.286

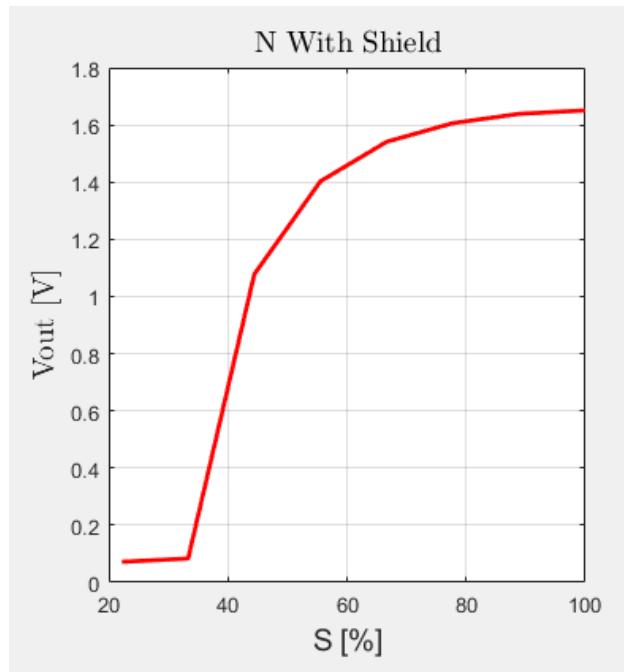


รูปที่ 89 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ต่อร้อยละระยะห่างระหว่าง Hall Effect Sensor กับข้าวตัวของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

#### 4.10.3 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวเหนียวของแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 8 แสดงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ข้าวเหนียวของแม่เหล็ก

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (mm)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ข้าวเหนียวของแม่เหล็ก (V)
10	0.072
15	0.083
20	1.078
25	1.403
30	1.541
35	1.606
40	1.639
45	1.651

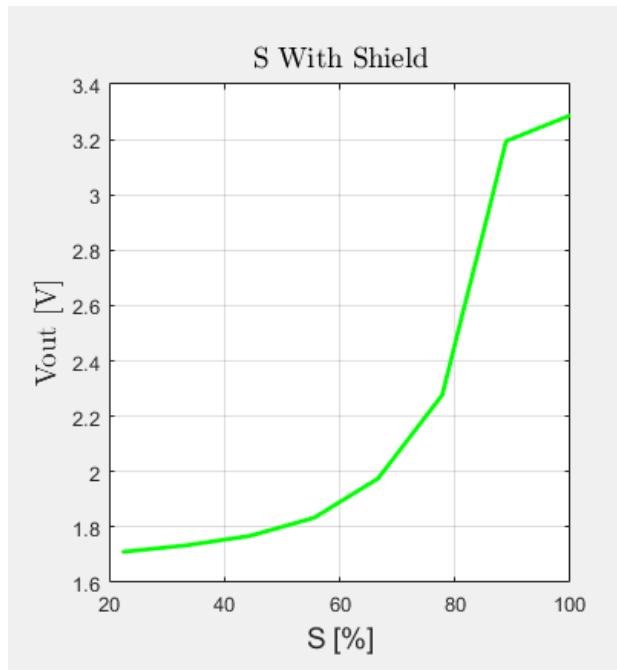


รูปที่ 90 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ระยะห่างระหว่าง Hall Effect Sensor กับข้าวเหนียวของแม่เหล็กตอนมี Shield

#### 4.10.4 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวตี้ของแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 9 แสดงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุกขัวตี้ของแม่เหล็ก

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (mm)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากอุกขัวตี้ของแม่เหล็ก (V)
10	1.710
15	1.734
20	1.768
25	1.833
30	1.976
35	2.277
40	3.194
45	3.287

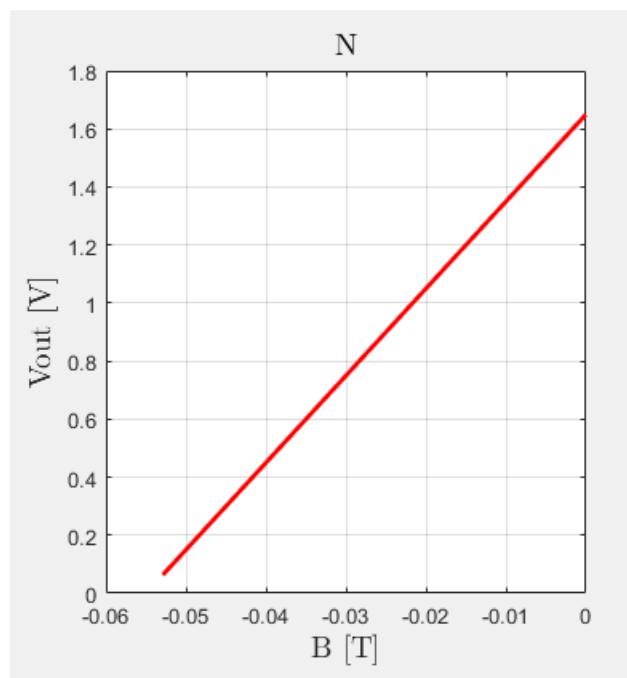


รูปที่ 91 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุกต์ออร์อยล์ระยะห่างระหว่าง Hall Effect Sensor กับขัวตี้ของแม่เหล็กตอนมี Shield

#### 4.10.5 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดขั้วเหนือของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 10 แสดงค่าความเข้มแม่เหล็ก เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกขั้วเหนือของแม่เหล็ก

ค่าความเข้มแม่เหล็กขั้วเหนือ (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกขั้วเหนือของแม่เหล็ก (V)
-0.05290	0.063
-0.05247	0.076
-0.02458	0.913
-0.00989	1.353
-0.00414	1.526
-0.00175	1.598
-0.00050	1.635
-0.00003	1.649

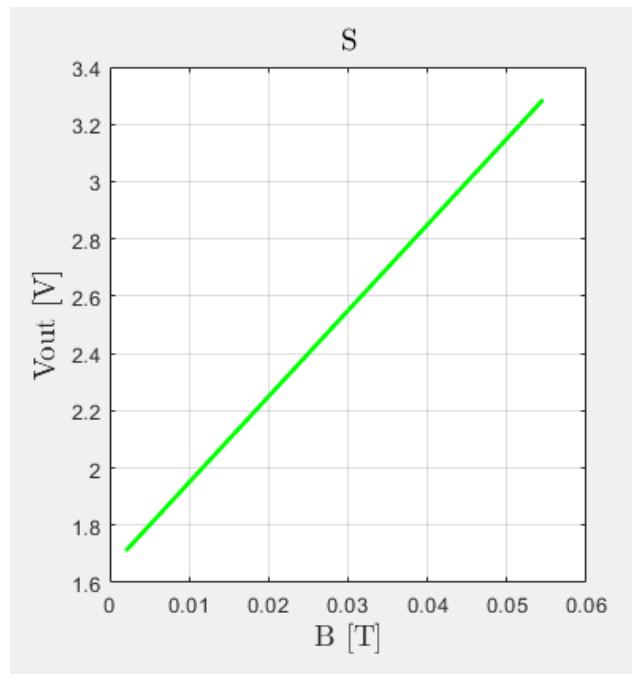


รูปที่ 92 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อค่าความเข้มแม่เหล็กกับขั้วเหนือของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

#### 4.10.6 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวตี้ของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 11 แสดงค่าความเข้มแม่เหล็ก เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าวตี้ของแม่เหล็ก

ค่าความเข้มแม่เหล็กข้าวตี้ (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าวตี้ของแม่เหล็ก (V)
0.00202	1.711
0.00302	1.740
0.00416	1.775
0.00668	1.850
0.01102	1.981
0.02514	2.404
0.05455	3.286
0.05453	3.286

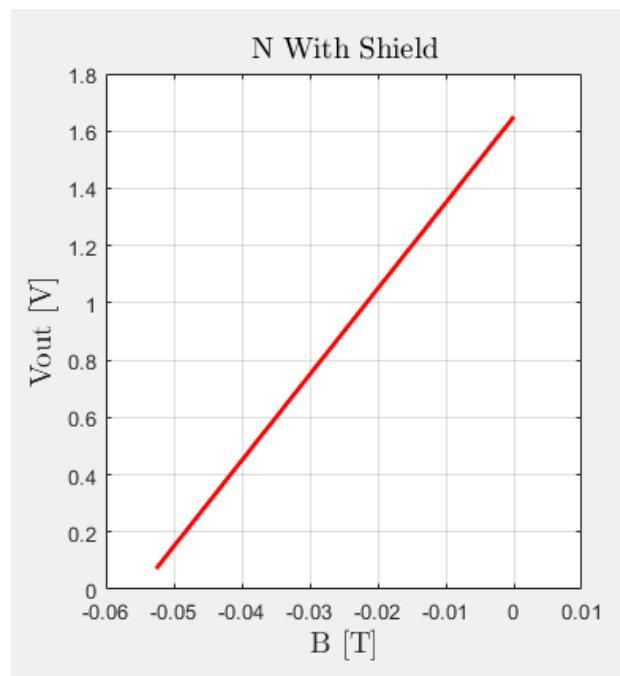


รูปที่ 93 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อค่าความเข้มแม่เหล็กกับข้าวตี้ของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

#### 4.10.7 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดขั้วเหนือของแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 12 แสดงค่าความเข้มแม่เหล็ก เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกขั้วเหนือของแม่เหล็ก

ค่าความเข้มแม่เหล็กขั้วเหนือ	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกขั้วเหนือของแม่เหล็ก (V)
-0.05260	0.072
-0.05222	0.083
-0.01907	1.078
-0.00822	1.403
-0.00363	1.541
-0.00146	1.606
-0.00037	1.639
0.00003	1.651

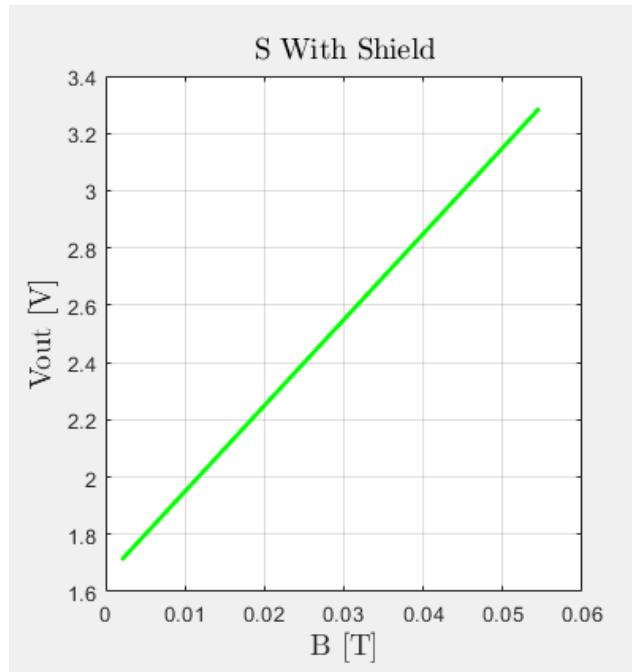


รูปที่ 94 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อค่าความเข้มแม่เหล็กกับขั้วเหนือของแม่เหล็กตอนมี Shield

#### 4.10.8 ผลการทดลองที่ได้จากการวัดข้าวตัวของแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 13 แสดงค่าความเข้มแม่เหล็ก เทียบกับค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าวตัวของแม่เหล็ก

ค่าความเข้มแม่เหล็กข้าวตัว	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าวตัวของแม่เหล็ก (V)
0.00200	1.710
0.00279	1.734
0.00393	1.768
0.00611	1.833
0.01085	1.976
0.02089	2.277
0.05148	3.194
0.05458	3.287



รูปที่ 95 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อค่าความเข้มแม่เหล็กกับข้าวตัวของแม่เหล็กตอนมี Shield

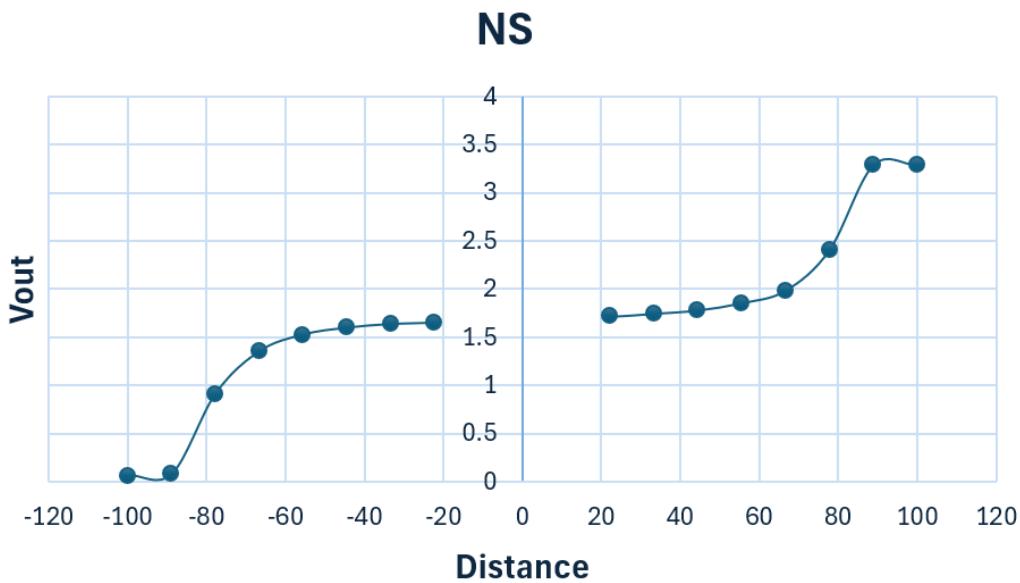
#### 4.11 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าข้าออกของ Hall Effect Sensor แปรผันตามระยะห่างระหว่าง Hall Effect Sensor กับแม่เหล็กถาวร และแปรผันตามค่าความเข้มแม่เหล็ก อีกทั้งการเปลี่ยนขั้วของแม่เหล็กก็มีผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าข้าออก

##### 4.11.1 ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าข้าออกขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็กเทียบกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก กับ Hall Effect Sensor ขณะที่ไม่มี Shield

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (มิลลิเมตร)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าข้าออกขั้วเหนือของแม่เหล็ก (V)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าข้าออกขั้วใต้ของแม่เหล็ก (V)
10	0.063	1.711
15	0.076	1.740
20	0.913	1.775
25	1.353	1.850
30	1.526	1.981
35	1.598	2.404
40	1.635	3.286
45	1.649	3.286



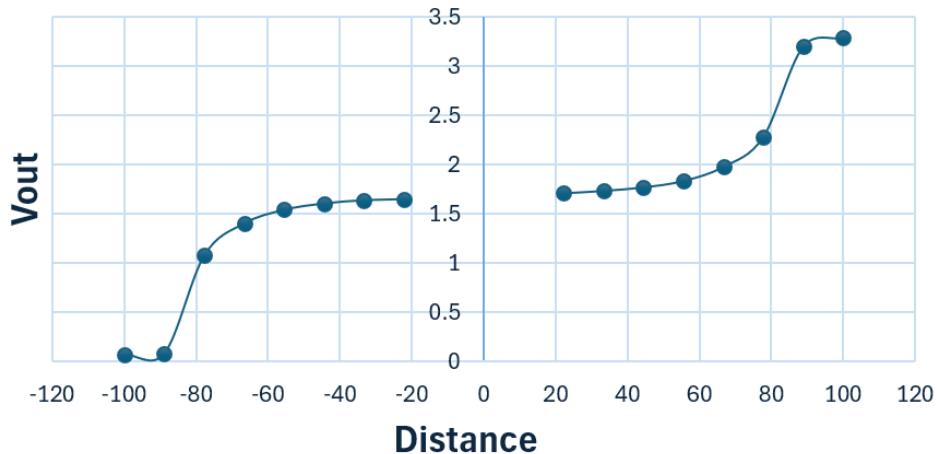
รูปที่ 96 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก กับระยะห่าง (Distance) ของเซนเซอร์ Hall Effect จากแหล่งกำเนิด  
สนามแม่เหล็กในสองทิศทาง (NS)

#### 4.11.2 ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดข้าวเหนียวและข้าวตีข้องแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 15 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าจากข้าวเหนียวและข้าวตีข้องแม่เหล็กเทียบกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก กับ Hall Effect Sensor ขณะที่มี Shield

ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Hall Effect Sensor (มิลลิเมตร)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากข้าวเหนียวของแม่เหล็ก (V)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากข้าวตีข้องแม่เหล็ก (V)
10	0.072	1.710
15	0.083	1.734
20	1.078	1.768
25	1.403	1.833
30	1.541	1.976
35	1.606	2.277
40	1.639	3.194
45	1.651	3.287

## NS With Shield

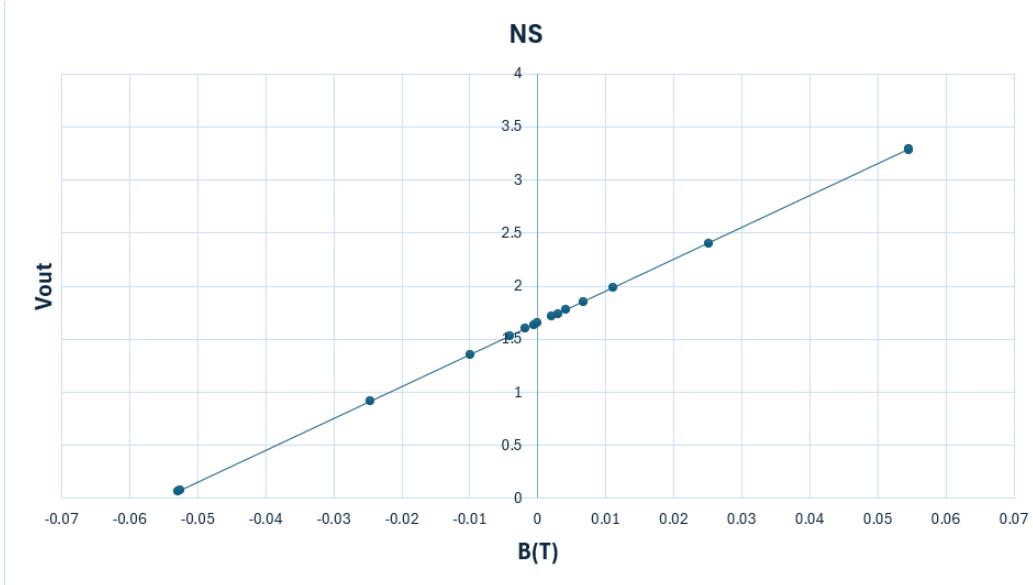


รูปที่ 97 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออก กับระยะห่าง (Distance) ของเซนเซอร์ Hall Effect ขณะที่ไม่มี Shield จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในสองทิศทาง (NS)

### 4.11.3 ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดข้าวเหนียวและข้าวใต้ของแม่เหล็กตอนไม่มี Shield

ตารางที่ 16 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าวเหนียวและข้าวใต้ของแม่เหล็กเทียบกับค่าความเข้มแม่เหล็กข้าวเหนียวและข้าวใต้ ขณะที่ไม่มี Shield

ค่าความเข้มแม่เหล็ก ข้าวเหนียว (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าขาออกข้าว เหนียวของแม่เหล็ก (V)	ค่าความเข้มแม่เหล็กข้า ใต้ (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้า ออกข้าวใต้ของแม่เหล็ก (V)
-0.05290	0.063	0.00202	1.711
-0.05247	0.076	0.00302	1.740
-0.02458	0.913	0.00416	1.775
-0.00989	1.353	0.00668	1.850
-0.00414	1.526	0.01102	1.981
-0.00175	1.598	0.02514	2.404
-0.00050	1.635	0.05455	3.286
-0.00003	1.649	0.05453	3.286

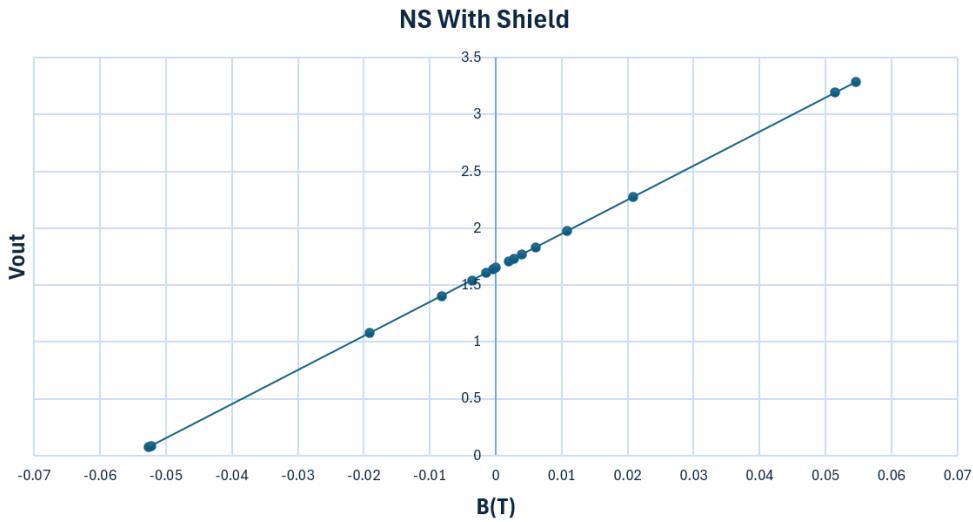


รูปที่ 98 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของ กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ของ Hall Effect Sensor จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในสองทิศทาง (NS)

#### 4.11.4 ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการวัดขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็กตอนมี Shield

ตารางที่ 17 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าของขั้วเหนือและขั้วใต้ของแม่เหล็กเทียบกับค่าความเข้มแม่เหล็กขั้วเหนือและขั้วใต้ ขณะที่มี Shield

ค่าความเข้มแม่เหล็กขั้วเหนือ (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของขั้วเหนือของแม่เหล็ก (V)	ค่าความเข้มแม่เหล็กขั้วใต้ (Tesla)	ค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของขั้วใต้ของแม่เหล็ก (V)
-0.05260	0.072	0.00200	1.710
-0.05222	0.083	0.00279	1.734
-0.01907	1.078	0.00393	1.768
-0.00822	1.403	0.00611	1.833
-0.00363	1.541	0.01085	1.976
-0.00146	1.606	0.02089	2.277
-0.00037	1.639	0.05148	3.194
0.00003	1.651	0.05458	3.287



รูปที่ 99 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าข้าวอก กับค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (B) ของ Hall Effect Sensor ชนิดที่มี shield จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กในสองทิศทาง (NS)

#### 4.12 อภิปรายผลการทดลอง

จากการสังเกตผลการทดลอง พบร่วมกันที่อ่านได้จากแรงดันไฟฟ้าข้าวอกของ Hall Effect Sensor มีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มากระทำกับเซนเซอร์ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจาก Hall Effect ที่เกิดขึ้นเมื่อทิศทางสัมพันธ์กับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เข้ามาระยะห่าง ไม่สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ได้รับ นั่นคือสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือหรือขั้วใต้เคลื่อนที่ในแนวตั้งจะกระทำต่อแรงดันไฟฟ้า Hall แบบเดียวกัน แต่แรงดันไฟฟ้าข้าวอกมีความสัมพันธ์กับระยะห่างระหว่าง Hall Effect Sensor กับแม่เหล็กทราบ

โดยหลักการทำงานของ Hall Effect Sensor คือ ถ้าหากมีสนามแม่เหล็กมากระทำตัวจากกับทิศทางกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะเบี่ยงเบนการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในตัวเซนเซอร์ ทำให้เกิดการสะสมตัวของประจุไฟฟ้าทางด้านหนึ่งและทิศทางของสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือและขั้วใต้จะทำให้การสะสมตัวของประจุไฟฟ้าในเซนเซอร์เกิดในทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า Hall ที่แตกต่างกันตามขั้วแม่เหล็กที่มากระทำของเซนเซอร์ โดยหากสนามแม่เหล็กมาจากขั้วเหนือ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจาก Hall Effect อ่านค่าออกมากได้น้อย และหากสนามแม่เหล็กมาจากขั้วใต้ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจาก Hall Effect จะอ่านค่าออกมากกว่าขั้วเหนือ ทำให้เราสามารถแยกแยะทิศทางของสนามแม่เหล็กและขั้วของแม่เหล็กที่กระทำกับเซนเซอร์ได้อย่างชัดเจน

นอกจากนั้นแล้วจากผลการทดลองการอ่านค่าแรงดันขาออกของแม่เหล็กภารตอนมี Sheild และตอนไม่มี Sheild นั้นมีค่าที่ไม่ต่างกันมาก อาจจะมีสาเหตุมาจากการแม่เหล็กมีสนามแม่เหล็กที่เข้มข้นสูงและสามารถทะลุผ่านเหล็กได้ดี และทำให้การอ่านค่าจาก Hall Effect Sensor มีค่าที่ไม่ต่างกันมาก หรือคุณสมบัติของเหล็กที่นำพาทดลองนั้นมีคุณสมบัติในการดูดซับสนามแม่เหล็กที่ไม่มากนัก จึงทำให้มีเกิดผลกระทบต่อการอ่านค่าจาก Hall Effect Sensor

#### 4.13 ข้อเสนอแนะ

4.13.1 ทำการเก็บค่าให้ละเอียดมากขึ้น มีการแบ่งช่วงที่ละเอียดมากขึ้น เพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องมากขึ้น

#### 4.14 เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://th.ahest.org/info/hall-sensor-purpose-83350346.html>
- [2] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g474re.html>
- [3] <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [4] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1002835/TI1/DRV5055.html>
- [5] วิธีการทำงานของเซ็นเซอร์ Hall Effect - คู่มือฉบับสมบูรณ์
- [6] [nectec.or.th/schoolnet/library/snet3/saowalak/hall/hall.html](http://nectec.or.th/schoolnet/library/snet3/saowalak/hall/hall.html)

## 5. การทดลองเพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Single Point Load Cell with INA125 Instrument Amplifier

### 5.1 วัตถุประสงค์

5.1.1 สามารถอธิบายหลักการทำงานของ Load cell, วงจร Wheatstone bridge, Strain Gauge, 2 Op-amps Differential Amplifier ได้

5.1.2 สามารถอธิบายค่าสัญญาณ Output ของ Load Cell ได้ เมื่อแรงที่กระทำต่อ Load Cell เปลี่ยนแปลงไป

5.1.3 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Gain และ ค่าความต้านทานของ Single External Resistor และ ส่งผลอย่างไรกับการวัดค่าของ Load Cell

5.1.4 สามารถอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning ทั้งหมดได้ดังแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้จาก Load Cell มีที่มาอย่างไร อธิบายให้เห็นถึงวิธีคิดและขั้นตอนทั้งหมด ทั้งก่อนและหลัง Calibrate Sensor หรือ วิธี จัดการข้อมูลที่ได้มา จัดการอย่างไร รวมถึงความสามารถความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อ Load Cell และดันไฟฟ้าที่ ออกมายจาก Load Cell ทั้งแบบที่ยังไม่ผ่าน INA125 และผ่าน INA125

5.1.5 สามารถเขียนโปรแกรม โดยประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก INA125 Instrumentation Amplifier ที่ต่อเข้ากับ Single Point Load Cell เป็น Input และ แสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ แสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และดึงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็นน้ำหนัก ในหน่วย SI derived

### 5.2 สมมติฐาน

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell จะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าข้าวอก ของ Load Cell มีการเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนเช่นเดิมที่ชัดเจน ซึ่งสามารถวัดได้และแสดงเป็นน้ำหนักในหน่วย SI derived ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ

### 5.3 ตัวแปรการศึกษา

#### 5.3.1 ตัวแปรต้น

น้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell

#### 5.3.2 ตัวแปรตาม

การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าข้าวอก

#### 5.3.3 ตัวแปรควบคุม

แรงดันไฟฟ้าขาเข้า สายไฟ อุณหภูมิ สถานที่ทดสอบ และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

## 5.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

5.4.1 การเพิ่มน้ำหนัก หมายถึง การเพิ่มน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell ครั้งละ 1 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม

5.4.2 การคำนวณและตั้งค่า Gain ของวงจรขยายสัญญาณ INA125 หมายถึง การเลือกค่าความต้านทานที่ขา  $R_G$  ของ INA125 เพื่อปรับค่า Gain ให้แรงดันข้าออกจาก Load Cell ตรงตามช่วงที่ต้องการ

5.4.3 การเก็บข้อมูลด้วย Stateflow ใน Simulink หมายถึง การออกแบบโครงสร้าง Stateflow สำหรับการเก็บค่าข้อมูลใน MATLAB/Simulink โดยใช้ Array ขนาด  $11 \times 500$  เพื่อเก็บค่าน้ำหนักและค่าแรงดันข้าออกที่ได้รับจากการทดลอง

5.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย MATLAB หมายถึง การคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันข้าออกที่ได้ในแต่ละน้ำหนัก เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับแรงดันข้าออกที่วัดได้ ผลลัพธ์ที่ได้จะช่วยในการประเมินความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบวัดน้ำหนัก

## 5.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

5.5.1 LoadCellXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard และ 3D-Print ที่ใช้สำหรับการประกอบกับ Load Cell

5.5.2 Single Point Load Cell YZC-131A หมายถึง อุปกรณ์สำหรับวัดแรงกดหรือแรงดึง โดยเฉพาะการวัดน้ำหนักในจุดเดียว สามารถแปลงแรงที่กระทำให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งไปยังอุปกรณ์ประมวลผล โดยในการทดลองนี้ใช้ YZC-131A ซึ่งมีความไวสูงและใช้ในการทดลองเพื่อวัดน้ำหนักระหว่าง 0 ถึง 10 กิโลกรัม

5.5.3 MATLAB และ Simulink หมายถึง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและจำลองระบบ โดย MATLAB ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จาก Load Cell ในขณะที่ Simulink ใช้ในการออกแบบและจำลองระบบการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Load Cell

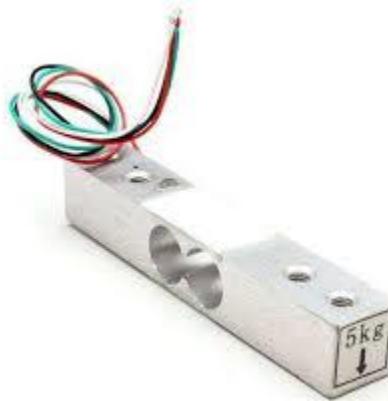
5.5.4 Gain หมายถึง ตัวคูณหรือตัวขยายสัญญาณที่ใช้เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าข้าออกของ Load Cell ให้ตรงกับช่วงที่ต้องการ คำนวณจากความต้านทานที่เชื่อมต่อกับขา  $R_G$  ของวงจรขยายสัญญาณใน INA125

5.5.5 INA125 หมายถึง IC (Integrated Circuit) สำหรับขยายสัญญาณแรงดันจาก Load Cell โดยสามารถรับค่า Gain ได้ผ่านการเพิ่มหรือลดความต้านทานที่ขา  $R_G$  ซึ่งใช้เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าข้าออกให้ตรงตามช่วงที่ต้องการ

## 5.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 5.6.1 Load Cell

Load Cell คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งโหลดเซลล์สร้างมาจาก Strain Gauge ที่จัดเรียงวงจรในรูปแบบวงจร Wheatstone Bridge ซึ่งสามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โหลดเซลล์มีหลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทมีการออกแบบ สำหรับการใช้งานที่ต่างกันไป โหลดเซลล์นั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น การนำไปประยุกต์ใช้ในงานผสมปูนสำหรับคอนกรีตผสมเสร็จต่างๆ รวมทั้งการใช้ทดสอบความแข็งและแรงดึงของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลาสติก หรือแท่นปูนซีเมนต์ รวมทั้งนำไปใช้ช่วงวัตถุดิบต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 100 Load Cell

#### ประเภทของโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell)

##### 1. โหลดเซลล์แบบ Single-Point (Single-Point Load Cell)

- ใช้สำหรับการวัดน้ำหนักในเครื่องซึ่งที่มีน้ำหนักเบาถึงปานกลาง เช่น เครื่องซั่งอาหารหรือเครื่องซั่งในห้องแลบ
- มีความแม่นยำสูงแม้แรงที่กระทำจะไม่ได้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางของโหลดเซลล์ (Off-center Load)

##### 2. โหลดเซลล์แบบ S-Beam (S-Beam Load Cell)

- มีรูปร่างคล้ายตัวอักษร S และสามารถใช้ในการวัดแรงดึงและแรงกดได้
- เหมาะสำหรับการใช้งานในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนทานและแม่นยำสูง เช่น การทดสอบแรงดึงหรือการวัดแรงในกระบวนการผลิต

### 3. โหลดเซลล์แบบ Shear Beam และ Double-Ended Shear Beam (Shear Beam & Double-Ended Shear Beam Load Cells)

- Shear Beam ใช้ในเครื่องชั่งที่มีน้ำหนักมาก เช่น เครื่องชั่งแท่นที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีความสามารถในการรับน้ำหนักสูงและทนทาน
- Double-Ended Shear Beam มักใช้ในแอปพลิเคชันที่ต้องการรองรับแรงจากหลายทิศทาง หรือในการวัดแรงที่กระทำกับแท่นชั่งหรือเครื่องชั่งขนาดใหญ่

### 4. โหลดเซลล์แบบ Column (Column Load Cell)

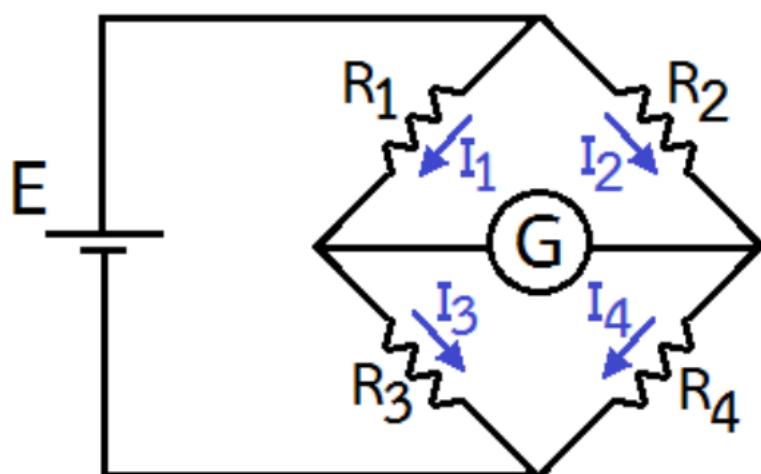
- มีลักษณะเป็นทรงกระบอก เหมาะกับการวัดน้ำหนักที่มีปริมาณสูง เช่น การซั่งในเครื่องซั่ง บรรทุกหรือรถบรรทุก
- มีความสามารถในการรองรับแรงกดสูงมากและมีความทนทานสูง

### 5. โหลดเซลล์แบบ Pancake หรือ Low Profile (Pancake Load Cell)

- มีรูปร่างแบนและกว้าง นิยมใช้ในการวัดแรงกดในงานที่มีข้อจำกัดด้านความสูง
- ใช้ในงานที่ต้องการความละเอียดสูงและมีพื้นที่จำกัด เช่น ระบบทดสอบแรงในงานวิจัยและอุตสาหกรรม

#### 5.6.2 วงจร Wheatstone bridge

วงจร Wheatstone Bridge เป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการวัดความต้านทานที่ไม่ทราบค่า โดยอาศัยการปรับสมดุลของวงจร ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวที่ต่อในลักษณะรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยมีจุดเชื่อมต่อระหว่างตัวต้านทานทั้งสี่ที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าและจุดกลางวงจรที่ใช้ในการวัดค่าความต้านทาน



รูปที่ 101 วงจร Wheatstone bridge

## หลักการทำงาน

ในวงจร Wheatstone Bridge ถ้าจะจ่ายอยู่ในสมดุล (Balance) จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุด B และ D (แรงดันระหว่างจุดนี้จะเป็นศูนย์) ดังนั้นความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานจะเป็น:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4}$$

## การใช้งานวงจร Wheatstone Bridge

วงจนี้มักใช้ในงานวัดค่าความต้านทานที่ไม่ทราบค่าในทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่นในเซนเซอร์วัดความต้าน (strain gauge), เซนเซอร์อุณหภูมิ, และเซนเซอร์วัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่มีความละเอียดสูง

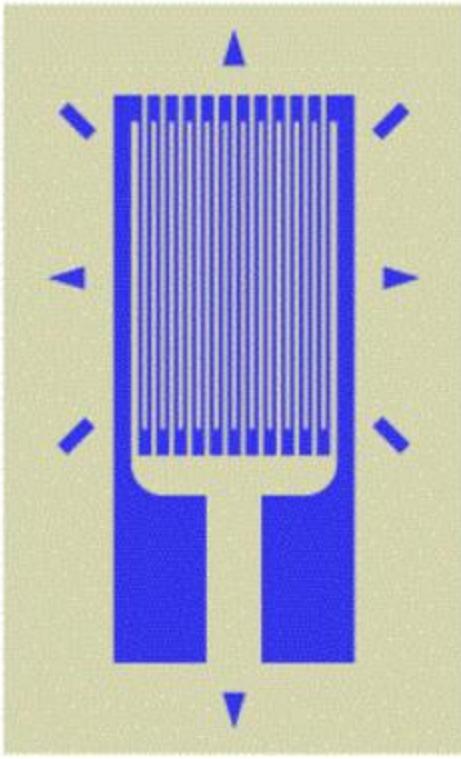
### 5.6.3 Strain Gauge

Strain Gauge (สเตตวนเกจ) คือ เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงตึงเครียด (Strain) ของวัตถุ คิดค้นโดยเอ็ดเวิร์ด อี ชิมมอนส์ และ อาร์เทอร์ ซี รูค ในปี ค.ศ. 1938 ส่วนใหญ่สเตตวนเกจ จะทำจากเส้นโลหะขนาดเล็กขนาดรูปทรงต่าง ๆ อยู่บนแผ่นชนวน นอกเหนือนั้นยังมีสเตตวนเกจแบบอุปกรณ์กึ่งตัวนำด้วย ซึ่งมีความไวสูงกว่าและขนาดเล็กกว่าแบบโลหะ แต่ก็มีราคาแพงกว่าเช่นกัน

## หลักการทำงาน

เมื่อสเตตวนเกจถูกแรงกระทำ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไป(ยืด หด บิด งอ) ทำให้ความต้านทานของวัตถุนั้นเปลี่ยนไปตามแรงที่กระทำ การนำไปใช้จะใช้การต่อวงจร Wheatstone bridge เพื่อหาความแตกต่างของแรงต้านไฟฟ้าเมื่อความต้านทานเปลี่ยนแปลงไป

ตัวอย่างการใช้สเตตวนเกจ ในทางวิศวกรรมชีวภาพ ส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแรงต่างๆ เช่น ใช้เป็นเซ็นเซอร์ชั้นนำหนัก เซ็นเซอร์วัดแรงกดของฝ่าเท้า เซ็นเซอร์วัดความดันเลือด เป็นต้น



รูปที่ 102 Strain Gauge

#### 5.6.4 2 Op-amps Differential Amplifier

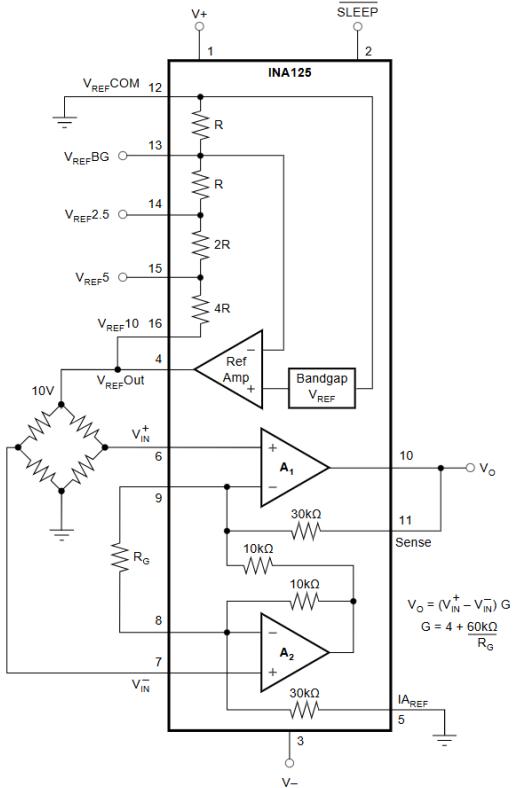
Op-amps Differential Amplifier คือ วงจรขยายสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ขยายความต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสองค่า วงจรขยายสัญญาณแบบ Differential เป็นวงจรอนาล็อกที่มีอินพุตสองค่า ( $V_{IN}^+$  และ  $V_{IN}^-$ ) และเอาต์พุตหนึ่งค่า ( $V_0$ ) ซึ่งเอาต์พุตจะปรับผันตามความต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าทั้งสองค่าอย่างเหมาะสม

สูตรสำหรับวงจรขยายสัญญาณเป็นดังนี้

$$V_0 = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \times G$$

โดย $V_0$	คือ แรงดันไฟฟ้าออก (V)
$V_{IN}^+$ และ $V_{IN}^-$	คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (V)
$G$	คือ ค่า Gain

### 5.6.5 Datasheet INA125



รูปที่ 103 แสดง Schematic Diagram ของ INA125

เนื่องจากแรงดันที่ได้จาก Load Cell จะมีค่าน้อยมาก ๆ จึงต้องใช้ INA125 เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณของ Load Cell โดยการปรับ Gain เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ออกมามีค่าที่ต้องการ โดยจะสามารถคำนวณค่า Gain ได้จากสูตร

$$G = 4 + \frac{60000}{R_G}$$

โดย  $G$  คือ ค่า Gain

$R_G$  คือ ค่าความต้านทานที่เมื่อเปลี่ยนแล้ว จะทำให้ค่า Gain เปลี่ยนตาม ( $\Omega$ )

### 5.6.6 Nucleo STM32G474RE

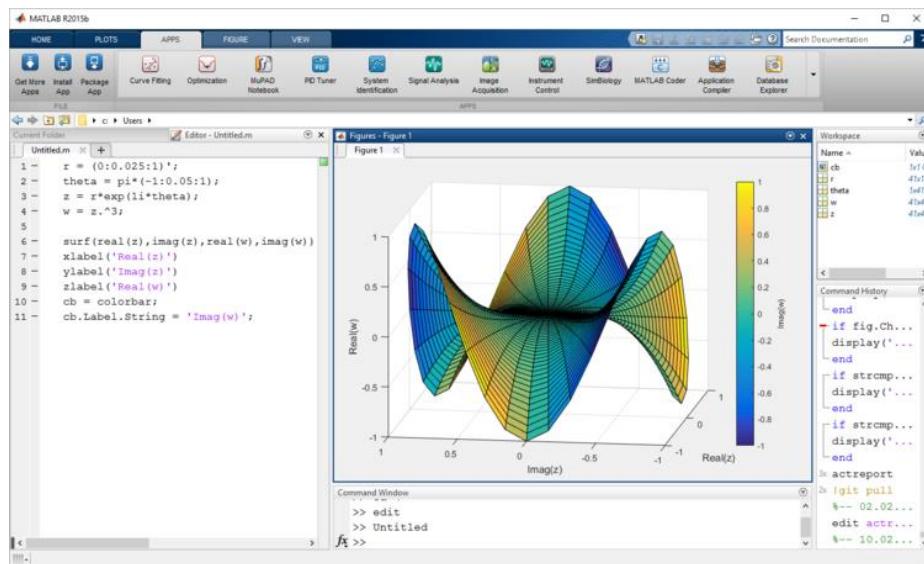
เป็นบอร์ดพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์จาก STMicroelectronics ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วและประสิทธิภาพสูง เช่น การควบคุมมอเตอร์ การแปลงสัญญาณอนาล็อก/ดิจิทัล การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ



รูปที่ 104 บอร์ด Nucleo STM32G474RE

### 5.6.7 MATLAB

MATLAB เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรม ซึ่งสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย เช่น วิเคราะห์ข้อมูลพัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลองและแอปพลิเคชัน การประมวลผลสัญญาณและการสื่อสาร การประมวลผลภาพและวิดีโอ เป็นต้น



รูปที่ 105 แสดงหน้าโปรแกรม MATLAB

### 5.6.8 Finite State Machines

Finite State Machines เป็นแบบจำลองการคำนวณที่ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบที่มีระบบที่มีจำนวนสถานะจำกัด โดยส่วนประกอบของ Finite State Machines มีดังนี้

1. สถานะ (State) เป็นการกำหนดสถานะของระบบ โดยแต่ละสถานะจะมีการอธิบายเงื่อนไขของระบบ
2. การเปลี่ยน (Transitions) มีเงื่อนไขที่ทำให้สถานะเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง
3. เหตุการณ์ (Events) ตัวกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ เช่น การรับสัญญาณอินพุต
4. การกระทำ (Actions) การกระทำที่เกิดขึ้นตอนที่อยู่ในสถานะนั้นๆ
5. สถานะเริ่มต้น (Initial State) สถานะที่ระบบจะอยู่ในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ
6. สถานะสุดท้าย (Final State) ระบบจะสิ้นสุดการทำงานที่สถานะนี้

## 5.7 วิธีดำเนินการทดลอง

- 5.7.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ Single Point Load Cell YZC-131A
- 5.7.2 เชื่อมต่อ Single Point Load Cell YZC-131A เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 5.7.3 เชื่อมต่อบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอปโภลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่วัดได้เข้าสู่ MATLAB
- 5.7.4 ออกแบบและสร้างโมเดล Simulink เพื่อทำการแปลงค่าและเก็บค่า Hall Effect Sensor
- 5.7.5 คำนวณหาค่าความต้านทานและค่า Gain ที่เหมาะสม จากสูตรใน Datasheet ของ INA125 และนำค่าที่ได้ไปปรับค่าต้านทานปรับค่าได้ และทำการเก็บข้อมูล
- 5.7.6 ใช้ State flow ใน Simulink เพื่อเก็บข้อมูลในแต่ละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้เก็บค่า 500 ค่า ต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มน้ำหนักระหว่าง 1 กิโลกรัม และบันทึกค่าลงใน MATLAB
- 5.7.7 ใช้ MATLAB ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าจากข้อมูลที่เก็บได้
- 5.7.8 สร้างกราฟที่แกน X แสดงน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell และแกน Y แสดงค่าเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าออก
- 5.7.9 วิเคราะห์และอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง

## 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 Trim pot 100 K 25 Turns	จำนวน 1 อัน
5.8.4 Resistor 4.7K Ohm	จำนวน 1 อัน
5.8.5 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอปโปโลด	จำนวน 1 ชุด
5.8.6 LoadCellXplorer	จำนวน 1 ชุด
5.8.7 สายจ้มเปอร์	จำนวน 1 ชุด

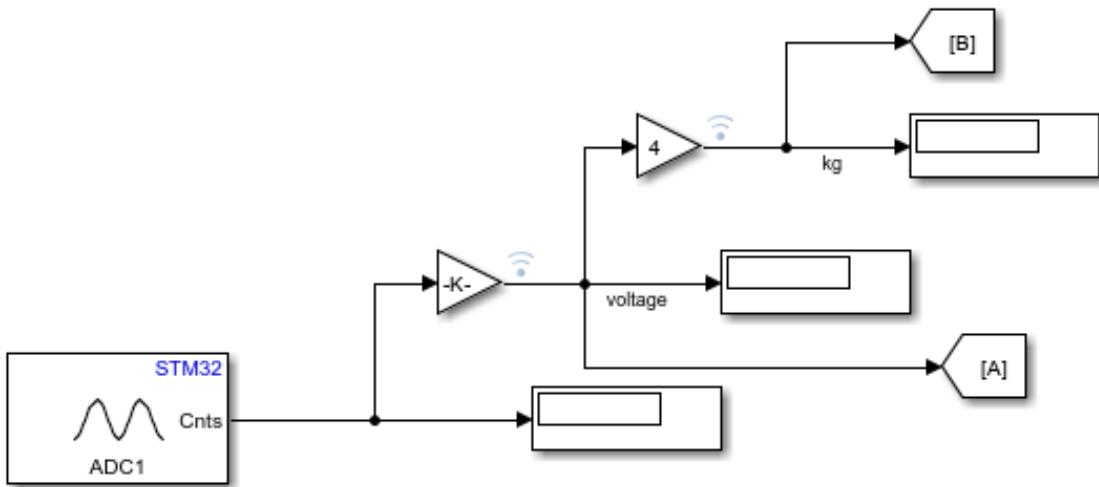
## 5.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 5.9.1 ศึกษาข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ของ Single Point Load Cell YZC-131A เพื่อนำมาออกแบบการทดลอง
- 5.9.2 เชื่อมต่อ Single Point Load Cell YZC-131A เข้ากับบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 5.9.3 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE กับคอมพิวเตอร์ผ่านสายอปโปโลด เพื่อส่งข้อมูลสัญญาณที่รับได้เข้าสู่ MATLAB โดยตั้งค่าสายช่องรับสัญญาณให้เป็นโหมด Single-End หลังจากนั้นแสดงสัญญาณ Raw Signal ที่ได้ใน Data Inspector



รูปที่ 106 แสดงค่า Raw Signal ของสัญญาณผ่าน Data Inspector

#### 5.9.4 ออกแบบ Simulink ที่จะใช้ในการแปลงค่าและเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจากของ Load Cell



รูปที่ 107 แสดงภาพ Simulink ในส่วนที่ใช้ในการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าออกและน้ำหนัก

จากรูปที่ 107 เมื่อทำการรับสัญญาณมาจากบอร์ดแล้ว ค่าที่ได้จะเป็นค่า ADC ซึ่งอยู่ในช่วง 0 – 4095 แต่ค่าที่ต้องการเพื่อนำมาสร้างกราฟ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าออก จึงทำการคูณค่า K เพื่อทำการแปลงค่าจากจำนวน bit เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าออก ซึ่งค่า K นั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$K = \frac{1}{4095} \times 3.3$$

เมื่อทำการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าออกได้แล้ว จะทำการแปลงค่าที่ได้ให้กล้ายเป็นน้ำหนัก โดยจะนำค่าที่ได้ไปคูณค่า K ซึ่ง K สามารถคำนวณได้จาก

$$K = \frac{10}{2.5}$$

เนื่องจากต้องการให้มีแรงดันไฟฟ้าออกเท่ากับ 2.5 น้ำหนักที่ได้จะเป็น 10 กิโลกรัม ดังนั้นค่า K จะเท่ากับ 4

5.9.5 ในการเก็บค่า ค่าที่ต้องการคือเมื่อน้ำหนักเท่ากับ 0 กิโลกรัม แรงดันไฟฟ้าออกที่ได้จะต้องเป็น 0 โวลต์ และเมื่อน้ำหนักเท่ากับ 10 กิโลกรัม แรงดันไฟฟ้าออกที่ได้จะต้องเป็น 2.5 จึงทำการคำนวณหาค่าความต้านทานที่ควรจะใช้ จากสูตรการหา Gain ใน Datasheet ของ INA125 โดยจากการวัดค่าที่ขา 6 และ 7 ของ IC จะได้ 0.7 มิลลิโวลต์ และแรงดันข้าออกที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ เมื่อมีน้ำหนัก 10 กิโลกรัมมากระทำกับ Load Cell คือ 2.5 โวลต์ จะได้ว่า

$$2.5 = (0.7 \times 10^{-3}) \times G$$

$$G = 3571$$

และจากสูตรหาค่าความต้านทานจะได้ว่า

$$3571 = 4 + \frac{60000}{R_G}$$

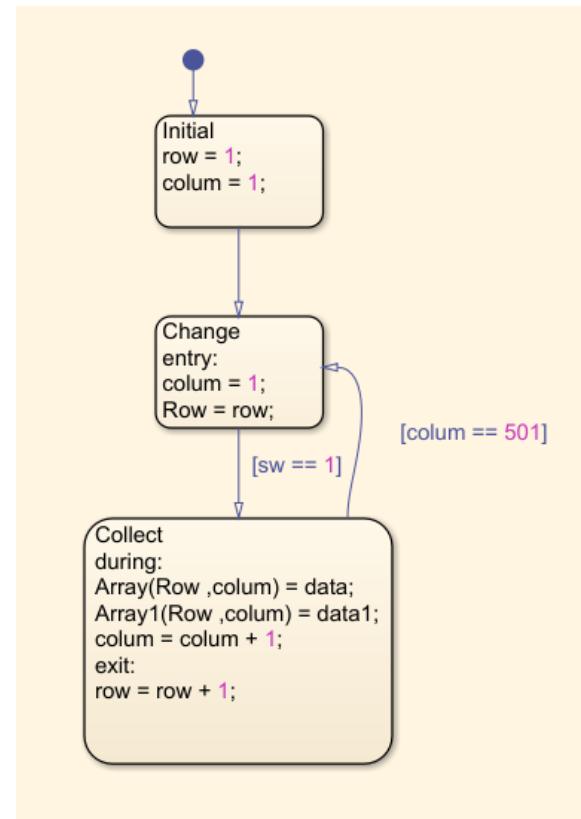
$$R_G = 17 \Omega$$

จากการคำนวณจะได้ค่าความต้านทานที่ต้องใช้เป็น 17 โอห์ม จึงนำไปปรับกับตัวต้านทานปรับค่าได้ และทำการทดลองโดยการลองดูค่าแรงดันไฟฟ้าออกที่ได้จากการเพิ่มน้ำหนักที่มากระทำกับ Load Cell แต่จากการทดลองค่าที่ได้ยังไม่ตรงตามที่ต้องการ จึงได้ลองทำการปรับหมุนค่าตัวต้านทานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ค่าตรงตามที่ต้องการ โดยค่าที่ได้จากการปรับค่าตัวต้านทานมีค่า 104.2 โอห์ม ดังนั้นค่า Gain ที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ

$$G = 4 + \frac{60000}{104.2}$$

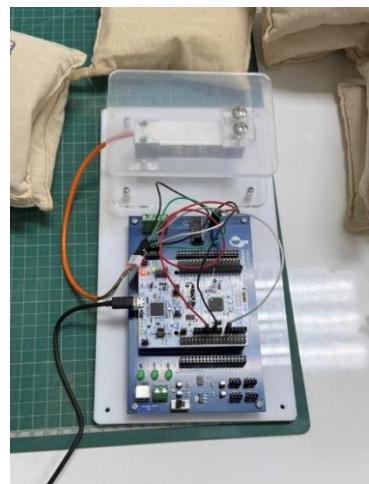
$$G = 580$$

5.9.6 เมื่อได้ค่าความต้านทานที่ต้องการแล้ว จะทำการเก็บค่าทั้งหมด 500 ค่าในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนค่าน้ำหนักที่กระทำกับ Load Cell เริ่มจาก 0 กิโลกรัม – 10 กิโลกรัม โดยเพิ่มขึ้นครั้ง 1 กิโลกรัม



รูปที่ 108 State flow ที่ใช้เก็บข้อมูล

จากรูปที่ 108 จะใช้ State Flow ในการเก็บค่าจากการทดลอง ซึ่งจะเก็บค่าไว้ใน Array 2 Array ที่มีขนาด 11x500 Array อันที่หนึ่งมีไว้เก็บค่าน้ำหนัก และอีกอันมีไว้เก็บค่าแรงดันจาก การทดลอง โดยหลักการทำงาน คือ เมื่อกดสวิตซ์จะมีการเปลี่ยน State จาก State Change ไปสู่ State Collect เพื่อเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าจาก และค่าน้ำหนักพร้อมกันทั้ง 2 ค่าขณะเดียวกันมาอย่างละ 500 ค่าในคอลัมน์ทั้ง 500 คอลัมน์ทั้ง 2 Array เมื่อเก็บค่าครบแล้ว จะกลับไปสู่ State Change เพื่อทำการเปลี่ยนแก้ Array ในการเก็บ และจะต้องกดสวิตซ์ เพื่อเป็นการ trigger ให้เข้าไปสู่ State Collect ในการเก็บค่าต่อไป



รูปที่ 109 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 0 กิโลกรัม



รูปที่ 110 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 1 กิโลกรัม



รูปที่ 111 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 2 กิโลกรัม



รูปที่ 112 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 3 กิโลกรัม



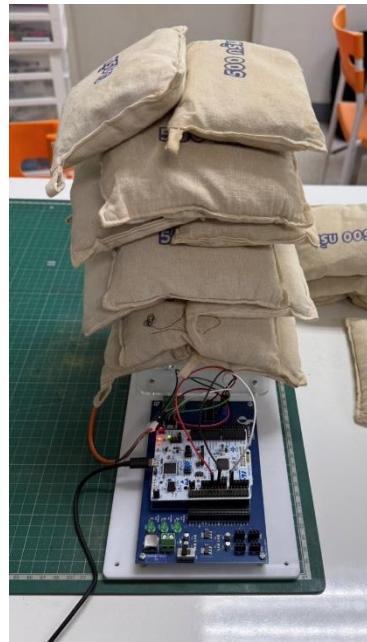
รูปที่ 113 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 4 กิโลกรัม



รูปที่ 114 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 5 กิโลกรัม



รูปที่ 115 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 6 กิโลกรัม



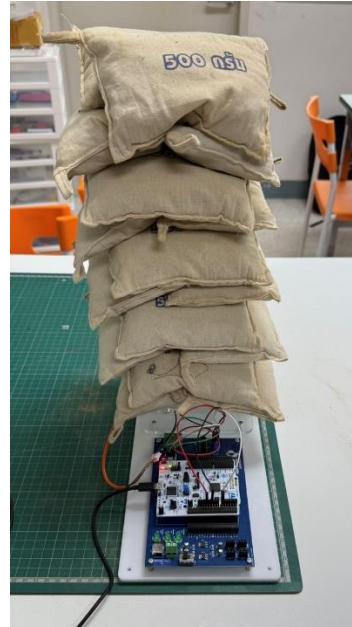
รูปที่ 116 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 7 กิโลกรัม



รูปที่ 117 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 8 กิโลกรัม



รูปที่ 118 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 9 กิโลกรัม



รูปที่ 119 การวัดค่า Load Cell ที่น้ำหนัก 10 กิโลกรัม

5.9.6 เมื่อได้ค่าความต้านทานที่ต้องการแล้ว จะทำการเก็บค่าทั้งหมด 500 ค่าในแต่ละครั้งที่เปลี่ยนค่าน้ำหนักที่กระทำกับ Load Cell เริ่มจาก 0 กิโลกรัม – 10 กิโลกรัม โดยเพิ่มขึ้นครั้ง 1 กิโลกรัม

5.9.7 นำค่าที่เก็บมาหาค่าเฉลี่ย และนำไป Plot Graph โดยทำการเขียนโปรแกรมใน MATLAB

```

1 arr_Kg = ones(1,11);
2 arr_Vout = ones(1,11);
3 arr_kg = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10];
4 initial_kg = [0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10];
5 initial_V = [0,0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.50,1.75,2.00,2.25,2.50];
6
7 for i = 1:11
8     arr_Kg(i) = mean(kg(i,:));
9     arr_Vout(i) = mean(v(i,:));
10 end
11 arr_Vout = arr_Vout -0.0205;
12 arr_Kg = arr_Kg - 0.10085;
13
14 x = {arr_kg, arr_kg};
15 y = {arr_Kg, arr_Vout};
16
17 ax_1 = subplot(1,2,1);
18 ax_2 = subplot(1,2,2);
19 ax = {ax_1, ax_2};
20
21 c = 'rg';
22 label_x = {'Mass [Kg]', 'Mass [Kg]'};
23 label_y = {'Kg [Kg]', 'Vout [V]'};
24 TT = {'Kg', 'Vout'};
25
26 for i = 1:2
27     plot(ax{i}, x{i}, y{i}, [c(i) '-'], 'LineWidth', 2);
28     hold(ax{i}, 'on');
29     grid(ax{i}, 'on');
30     xlabel(ax{i}, label_x{i}, 'FontSize',20, 'Interpreter','latex');
31     ylabel(ax{i}, label_y{i}, 'FontSize',20, 'Interpreter','latex');
32     title(ax{i}, TT{i}, 'FontSize',20, 'Interpreter','latex');
33 end
34
35 plot(ax{1}, arr_kg, initial_kg, 'b--', 'LineWidth', 2);
36 hold(ax{1}, 'off');
37
38 plot(ax{2}, arr_kg, initial_V, 'b--', 'LineWidth', 2);
39 hold(ax{2}, 'off');

```

รูปที่ 120 Code ส่วนหาค่าเฉลี่ยของค่าที่เก็บมา และในส่วนของการ Plot graph

จากรูปที่ 120 จะสร้าง Array ใหม่ที่มีขนาด  $1 \times 11$  ที่มีค่าทั้งหมดเป็น 1 เพื่อใช้ในการเก็บค่า และใช้ For Loop ใน การนำค่า 500 ค่าในแต่ละแกรมมาหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปเก็บโดยการนำค่าที่เฉลี่ยได้มาไปแทนที่ค่า 1 ใน Array ที่ ตำแหน่งนั้น หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไป Plot graph โดยแกน y ของกราฟจะเป็นค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันขาออกและค่า น้ำหนักที่นำมาได้ ส่วนแกน x ของกราฟคือค่าน้ำหนักของถุงทรายที่ใช้ในการทดลอง

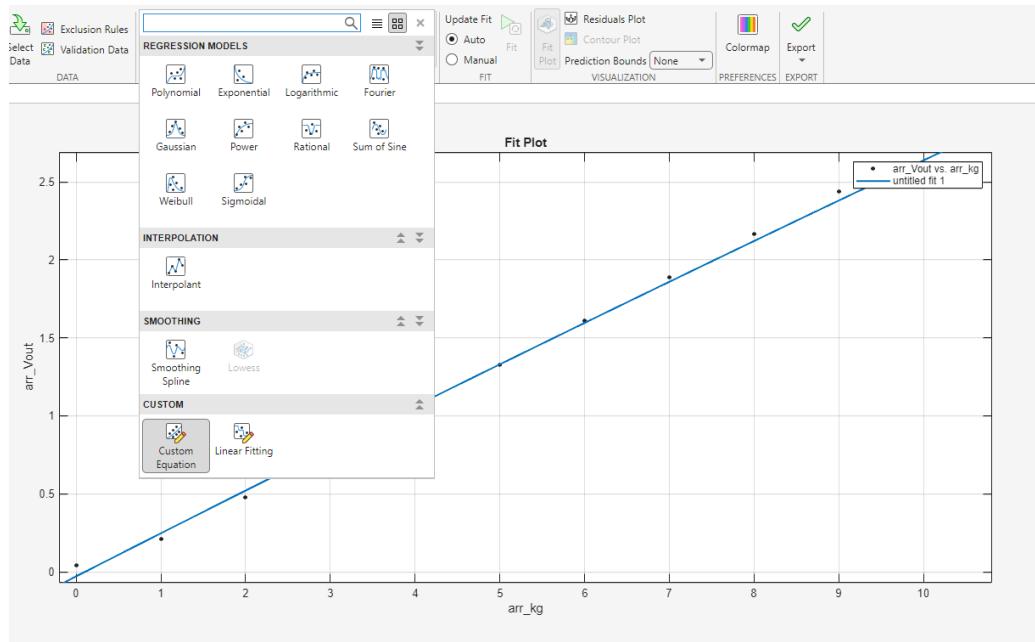
#### 5.9.8 นำข้อมูลที่ได้ไปเคราะห์ สังเกตถักขัณฑ์ความสมพันธ์ของกราฟ

5.9.9 เนื่องจากกราฟที่ได้มีความเป็นสมการไม่เชิงเส้น จึงนำไปวิเคราะห์ต่อด้วยการทำ Linearization ซึ่งมีวิธีการ ทำ ดังนี้

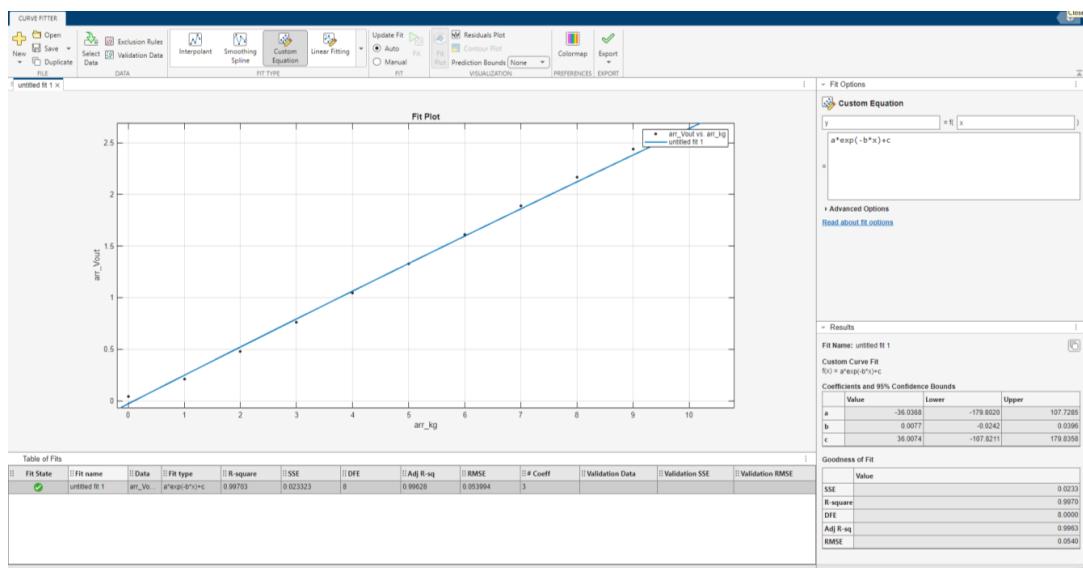
### 5.9.9.1 เปิดใช้ Curve Fitting Toolbox ใน MATLAB

5.9.9.2 นำเข้าข้อมูลที่ต้องการใส่ในแต่ละแกน ในที่นี้จะให้ ค่าหนักที่กระทำต่อ Load cell ซึ่งคือตัวแปร ต้นเป็นข้อมูลในแกน x และค่าแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์คือตัวแปรตามเป็นข้อมูลในแกน y

5.9.9.3 เลือกประเภท Fit Type เป็น Custom Equation เพื่อทำการหาค่า offset ให้สมการ Linear ที่ได้ ตัดกราฟใกล้เคียงกับตำแหน่ง (0,0) มากที่สุด



รูปที่ 121 แสดงหน้า Curve Fitting Toolbox หลังจากนำค่าข้อมูลเข้าแล้ว และการเลือก Fit Type เป็น Custom Equation



รูปที่ 122 แสดงหน้า Curve Fitting Toolbox ใน Fit Type แบบ Custom Equation เพื่อหาค่า offset

5.9.9.4 นำค่า offset ที่คำนวณได้ไปปรับแก้ที่ค่า y และเลือก Fit Type ประเภท Polynomial เนื่องจาก Fit Type ประเภทนี้สามารถทำการ Linearization ได้หมายความกับข้อมูลมากที่สุด

5.9.9.5 จานั้นทำการ export แบบ Code ออกรนาและนำมาแสดงผล

```
%% Fit: 'untitled fit 1'.
[xData, yData] = prepareCurveData( arr_kg, arr_Vout );

% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'poly1' );

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', 'untitled fit 1' );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'arr_Vout vs. arr_kg', 'untitled fit 1', 'Location', 'NorthEast', 'Interpreter', 'none' );
% Label axes
xlabel( 'arr_kg', 'Interpreter', 'none' );
ylabel( 'arr_Vout', 'Interpreter', 'none' );
grid on
```

รูปที่ 123 Code ส่วนการ Plot graph หลังการ Linearization

5.9.9.6 หาสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน โดยทำการทดลองเพิ่มเติม คือการหาความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักที่กระทำกับ Load cell ในช่วง 0-10 kg โดยเริ่มที่ 0 kg และเพิ่มขึ้นทีละ 1 kg กับแรงดันไฟฟ้าจาก Load cell ก่อนที่จะผ่าน IC INA125

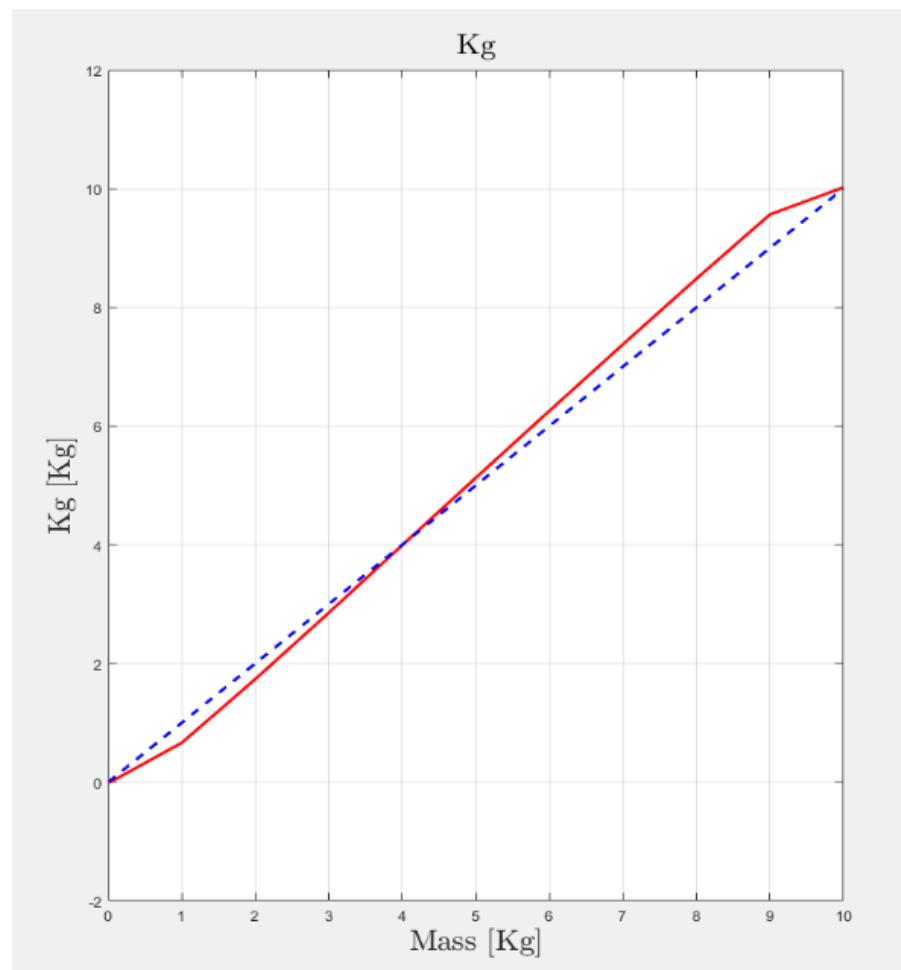
5.9.9.7 นำข้อมูลที่ได้ในการทดลองเพิ่มเติมมา Plot Graph และเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้หลังจาก สัญญาณถูกขยายผ่าน INA125 แล้ว

## 5.9 ผลการทดลอง

### 5.9.1 ผลการทดลองที่ได้หลังปรับค่า Gain และทำการทดสอบ

ตารางที่ 18 แสดงน้ำหนักของถุงทรายที่ใช้ทดลองเทียบกับค่าน้ำหนักที่ Load Cell อ่านได้

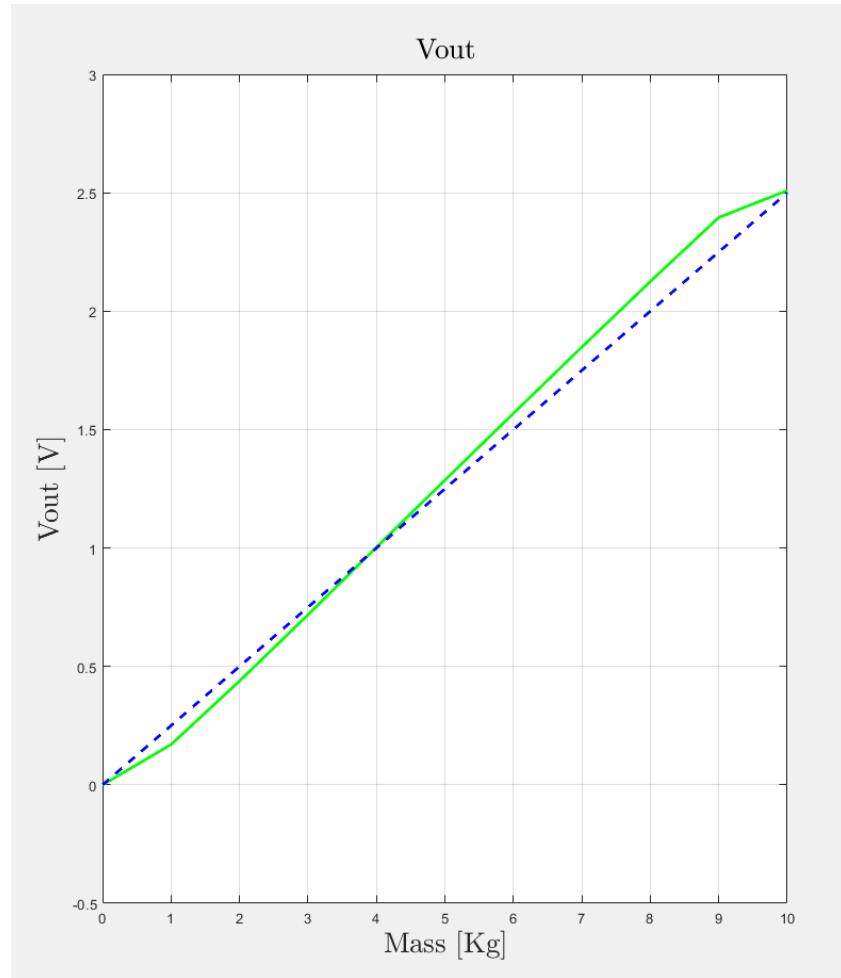
น้ำหนักของถุงทรายที่ใช้ทดลอง (Kg)	ค่าน้ำหนักที่ Load Cell อ่านได้ (Kg)
0	-0.0189
1	0.6621
2	1.7346
3	2.8532
4	3.9943
5	5.1280
6	6.2541
7	7.3745
8	8.4811
9	9.5637
10	10.0189



รูปที่ 124 แสดงค่าอ่านน้ำหนักที่วัดจริงต่อน้ำหนักที่ได้ผ่าน Load Cell

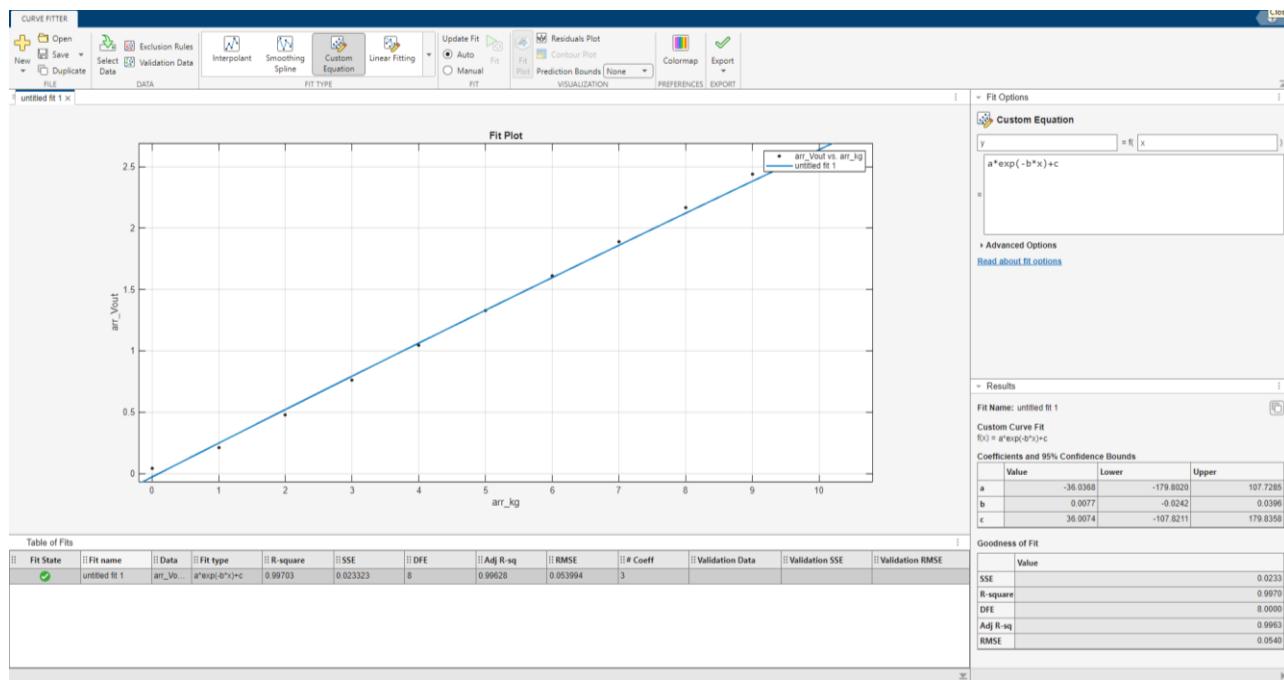
ตารางที่ 19 แสดงน้ำหนักของถุงทรายที่ใช้ทดลองเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าออก

น้ำหนักของถุงทรายที่ใช้ทดลอง (Kg)	แรงดันไฟฟ้าออก (V)
0	0.0410
1	0.2112
2	0.4794
3	0.7590
4	1.0443
5	1.3277
6	1.6092
7	1.8893
8	2.1660
9	2.4366
10	2.5504

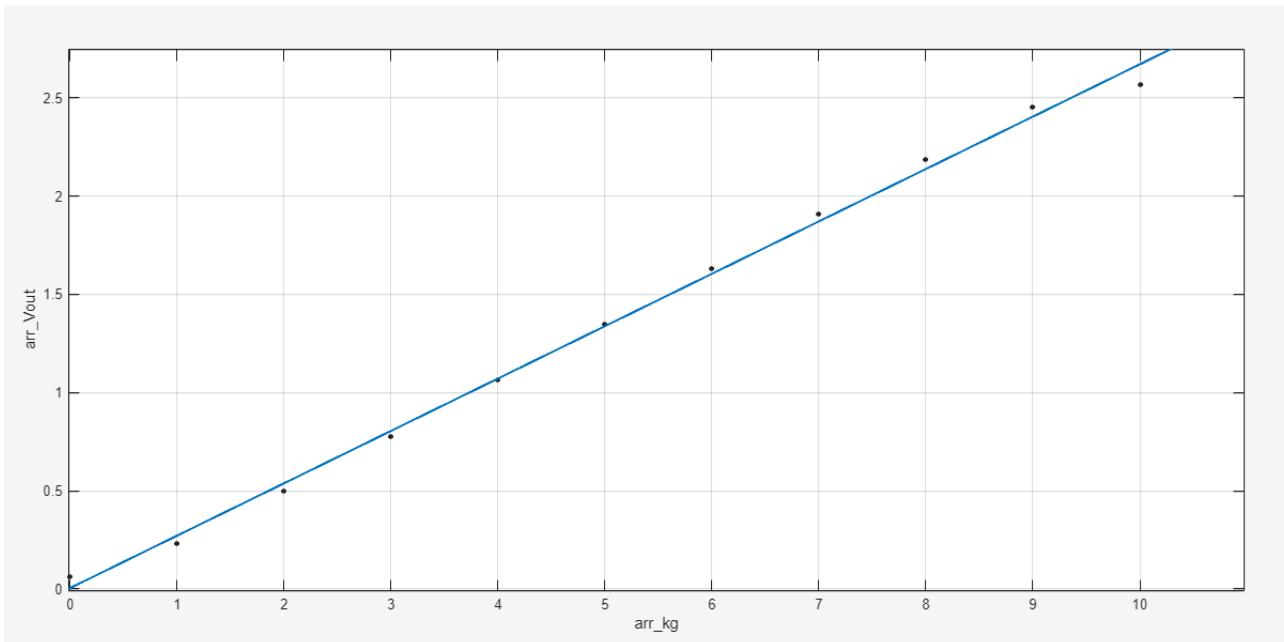


รูปที่ 125 แสดงค่าอัมบันก์ที่กระทำกับ Load Cell ต่อแรงดันไฟฟ้าขาออก

### 5.9.2 กราฟที่ได้จากการนำไปวิเคราะห์ด้วย Linearization



รูปที่ 126 แสดงสมการเชิงเส้นจากการ Linearization โดยที่ยังไม่ได้ offset

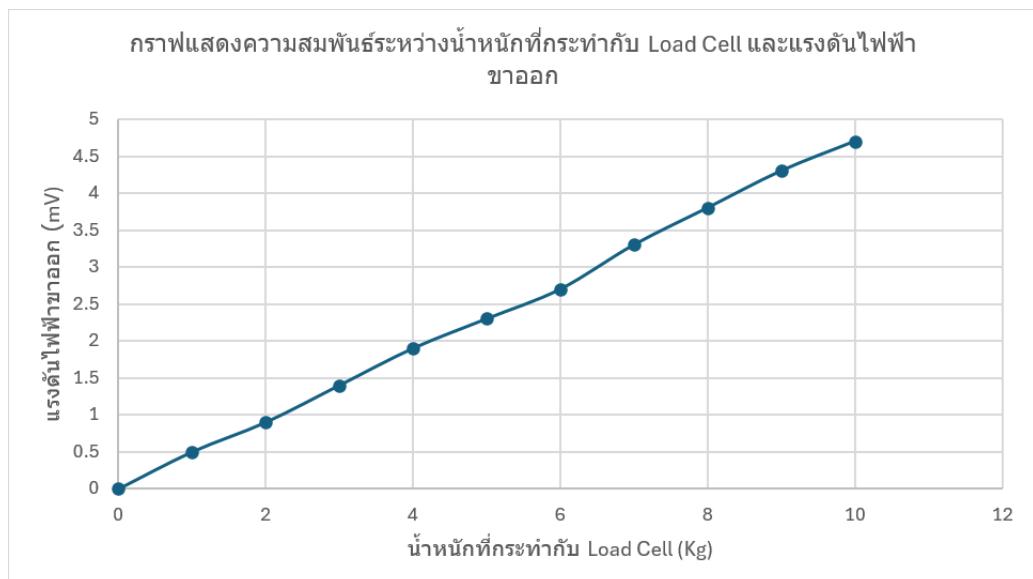


รูปที่ 127 แสดงสมการเชิงเส้นหลังจากการ Linearization และ

### 5.9.3 ผลการทดลองวัดแรงดันไฟฟ้าจากอ็อกโตดโดยไม่ผ่าน IC INA125

ตารางที่ 20 แสดงน้ำหนักที่กระทำกับ Load Cell เทียบกับแรงดันไฟฟ้าจากอ็อก

น้ำหนักที่กระทำกับ Load Cell (Kg)	แรงดันไฟฟ้าจากอ็อก (mV)
0	0
1	0.5
2	0.9
3	1.4
4	1.9
5	2.3
6	2.9
7	3.3
8	3.8
9	4.3
10	4.7



รูปที่ 128 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับ Load Cell และแรงดันไฟฟ้าจากอ็อก

## 5.10 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า แรงดันไฟฟ้าข้ออကแปรผันตามน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell หากแต่สามารถสังเกตได้ว่า ในช่วงที่ 0-1 kg, 1-9 kg และ 9-10 kg ต่างก็มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น แต่เมื่อนำทั้งสามช่วงนี้มารวมกันแล้วพบว่า ทั้งสามช่วงต่างมีความชันที่ไม่เท่ากันอยู่เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เชิงเส้นของข้อมูลโดยรวม

เนื่องจากผลการทดลองไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่คาดหวังว่าแรงดันไฟฟ้าข้ออကจะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับน้ำหนักทั้งหมด จึงมีการนำข้อมูลมาปรับแก้ให้เป็นเส้นตรง (Linearization) เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างแม่นยำ และสะดวกขึ้น โดยเทคนิคที่ใช้ในการปรับคือการใช้สมการ Polynomial Fitting ซึ่งช่วยสร้างสมการเชิงเส้นที่สามารถใช้คำนวนหนาน้ำหนักจากแรงดันไฟฟ้าได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ดังนั้น สรุปได้ว่าเมื่อ Load Cell จะแสดงความสัมพันธ์กับน้ำหนักแบบไม่เชิงเส้นโดยรวม การทำ Linearization ช่วยให้สามารถจัดการข้อมูลได้ดีขึ้นและพร้อมใช้งานในการประเมินน้ำหนักอย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.11 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าข้ออคและน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell มีความสัมพันธ์กันแบบสมการไม่เชิงเส้น (Non-linear) ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น ความผิดพลาดของ Load Cell เองที่อาจมีความผิดพลาดของการทำงานภายใน หรืออาจจะมีปัญหาเกี่ยวกับการตัวขยายสัญญาณ ซึ่งคือ IC INA125

จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน โดยทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell และแรงดันไฟฟ้าข้ออค ก่อนผ่าน IC INA125 ซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณ พบว่า น้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell และแรงดันไฟฟ้าข้ออค ก่อนผ่าน IC INA125 มีความสัมพันธ์กันแบบสมการเชิงเส้น

จากข้อมูลดังกล่าว พบว่า Load Cell ทำงานได้ถูกต้อง แต่เมื่อสัญญาณผ่าน IC INA125 ความสัมพันธ์กลับเปลี่ยนไปเป็นไม่เชิงเส้น ซึ่งบ่งชี้ว่า IC INA125 อาจเป็นสาเหตุหลักของความคลาดเคลื่อนนี้ โดยอาจเกิดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ภายใน IC ที่ไม่เหมาะสม หรือการบิดเบือนสัญญาณภายในวงจร

## 5.12 ข้อเสนอแนะ

5.12.1 เปลี่ยน IC INA125 ที่มีการทำงานที่สมบูรณ์ เพื่อทำให้การขยายสัญญาณสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

5.12.2 ทำการเปลี่ยนช่วงน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เช่น การเพิ่มน้ำหนักทีละ 0.5 kg เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell และแรงดันไฟฟ้าออกได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

## 5.13 เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://mall.factomart.com/what-is-load-cell/>
- [2] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/847622/TI1/INA125.html>
- [3] <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/bridge-circuits/>
- [4] <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>
- [5] <https://www.biomed.in.th/strain-gauge-piezoelectric-accelerometer-in-medical-engineering/>
- [6] <https://www.biomed.in.th/strain-gauge-piezoelectric-accelerometer-in-medical-engineering/>
- [7] <https://mitec.co.th/load-cell-คืออะไร/>
- [8] <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>