

## LAB 1: Sensors

### Name

- |              |                     |             |
|--------------|---------------------|-------------|
| • นายอภิเชฏ  | เลี้ยวไฟโรจน์       | 67340500046 |
| • นายภคิน    | ศักดิ์สิทธิ์พิทักษ์ | 67340500060 |
| • นายสมานสิน | เจตนาเจริญชัย       | 67340500075 |

### Objectives

- ศึกษาและอธิบายหลักการทำงานของ Potentiometer, Incremental Encoder, Magnetic Sensor, และ Load Cell ได้อย่างถูกต้อง
- วิเคราะห์คุณสมบัติ ความเป็นเชิงเส้น และการตอบสนองของ Potentiometer รวมถึงออกแบบวงจร Schmitt Trigger และแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลแบบเรียลไทม์ได้
- อธิบายลักษณะสัญญาณของ Incremental Encoder คำนวณ PPR, Angular Resolution, วิเคราะห์ผลจากความเร็ว ออกแบบ Wrap-around และ Homing Sequence ได้
- คำนวณและอธิบายค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก วิเคราะห์ผลของ Magnetic Shielding และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตแบบเรียลไทม์ได้
- อธิบายหลักการของ Load Cell และวงจรที่เกี่ยวข้อง คำนวณ Gain, วิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต อธิบาย Signal Conditioning และ Calibration ได้
- แสดงความสามารถในการตั้งสมมติฐาน ออกแบบการทดลอง วิเคราะห์ผล อภิปรายผล และอธิบายโปรแกรมที่ใช้ในแต่ละการทดลองได้อย่างครบถ้วน

## 1. Potentiometer

### การทดลองที่ 1.1: ตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของ Potentiometer แต่ละชนิด

#### จุดประสงค์

1. เพื่อระบุชนิดของ Potentiometer ทั้ง 5 รุ่นที่ได้รับโดยอาศัยการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์
2. เพื่อทดสอบและวิเคราะห์การตอบสนองระหว่างตำแหน่งการหมุน/เลื่อน กับค่าแรงดันขาออก
3. เพื่อตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของ Potentiometer แต่ละชนิด

#### สมมติฐาน

Potentiometer ที่มีรหัส Taper B (PDB181-K420K-103B และ PTA6043-2015DPB103) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงดันขาออกเป็นกราฟเส้นตรง (Linear) ในขณะที่ Potentiometer รหัส A (Logarithmic) และ C (Reverse Logarithmic) จะให้ผลเป็นกราฟเส้นโค้ง

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - มุมการหมุน (องศา) สำหรับ Rotary Potentiometer
  - ระยะการเลื่อน (มิลลิเมตร) สำหรับ Slide Potentiometer
  - ชนิดของ Potentiometer (Taper A, B, C)
2. ตัวแปรตาม:
  - ค่า Digital ที่ได้จาก ADC (0-4095) ซึ่งแปรผันตามแรงดันไฟฟ้าขาออก
  - ตัวแปรควบคุม:
    - แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่จ่ายให้ Potentiometer (3.3V)
    - ความละเอียดของ ADC (12-bit)
3. ตัวแปรควบคุม:
  - ระยะในการเลื่อน และองศาการหมุนที่ละ 10%

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Bourns, Inc. PDB181 Series Potentiometer Datasheet.

*ความเกี่ยวข้อง:* เป็นเอกสารข้อมูลจำเพาะ (Datasheet) ของรุ่น RA, RB, และ RC ให้ข้อมูลรหัส Taper (A, B, C) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

2. Bourns, Inc. PTA60 Series Slide Potentiometer Datasheet.

ความเกี่ยวข้อง: เป็นเอกสารข้อมูลจำเพาะของรุ่น LA และ LB ซึ่งเป็น Slide Potentiometer ระบุคุณสมบัติของ Taper B และ Taper A

3. STMicroelectronics. NUCLEO-G474RE User Manual (UM2519).

ความเกี่ยวข้อง: อ้างอิงคุณสมบัติของ Analog-to-Digital Converter (ADC) ความละเอียด 12-bit ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณ Analog เป็นค่า Digital (0-4095)

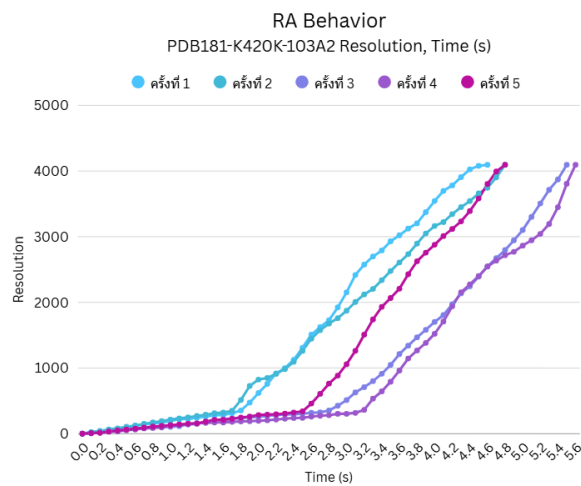
4. Application Note: "Understanding Potentiometer Tapers (Linear vs. Logarithmic)."

ความเกี่ยวข้อง: บทความทางเทคนิคที่อธิบายความแตกต่างของกราฟการตอบสนองระหว่าง Taper A (Logarithmic), Taper B (Linear), และ Taper C (Reverse Logarithmic) และการประยุกต์ใช้งาน

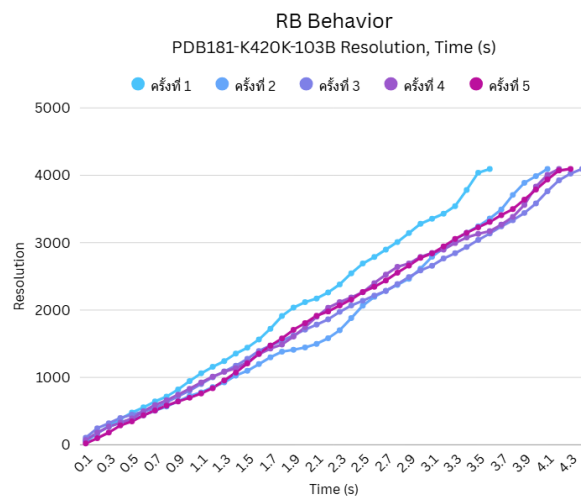
## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เขียนโปรแกรมเพื่ออ่านค่า ADC (Resolution 0-4095)
2. การเก็บข้อมูลสำหรับศึกษาพฤติกรรมของ Potentiometer
3. ทำการหมุน (สำหรับ RA, RB, RC) หรือเลื่อน (สำหรับ LA, LB) Potentiometer ด้วยมือ จากจุดเริ่มต้น 0% ไปยังจุดสิ้นสุด 100% แบบต่อเนื่อง
4. บันทึกค่า Resolution ที่อ่านได้เทียบกับเวลา (Time)
5. ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง สำหรับ Potentiometer แต่ละตัว เพื่อสังเกตความสม่ำเสมอในการตอบสนอง
6. การเก็บข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบความต่างของ Potentiometer
7. ค่อย ๆ หมุนทีละ 10% เริ่มจาก 0% จนถึง 100%
8. แปลงค่า ADC (0-4095) เป็น Voltage Out (%) และแปลงตำแหน่งการหมุน/เลื่อน เป็น Rotational Travel (%)
9. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage Out (%) เทียบกับ Rotational Travel (%) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้น พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage Out (%) เทียบกับ Rotational Travel (%) เพื่อวิเคราะห์ความเป็นเชิงเส้น

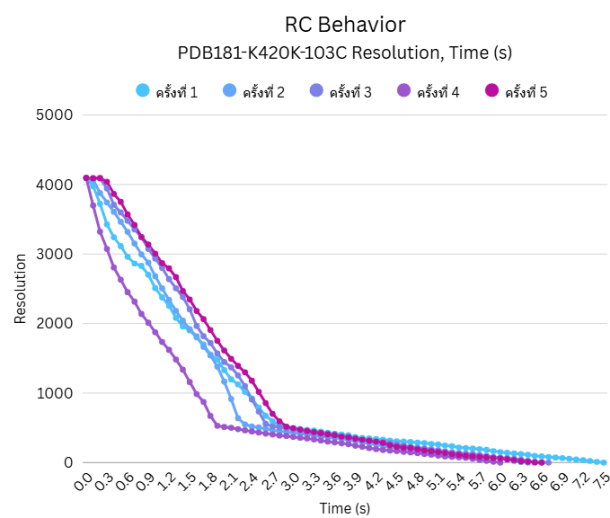
## ผลการทดลอง



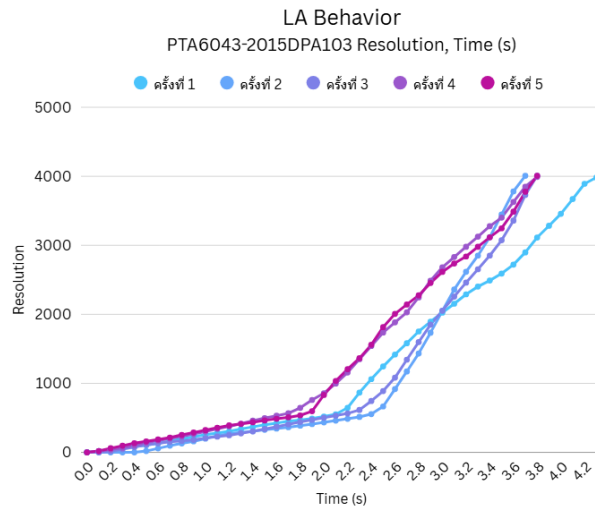
กราฟค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ RA Behavior



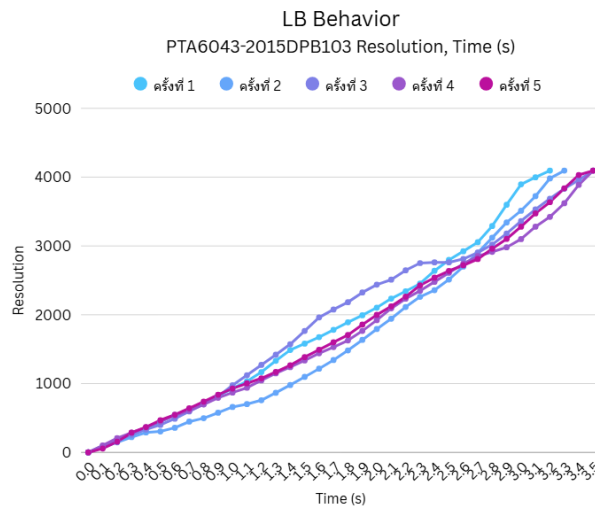
กราฟค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ RB Behavior



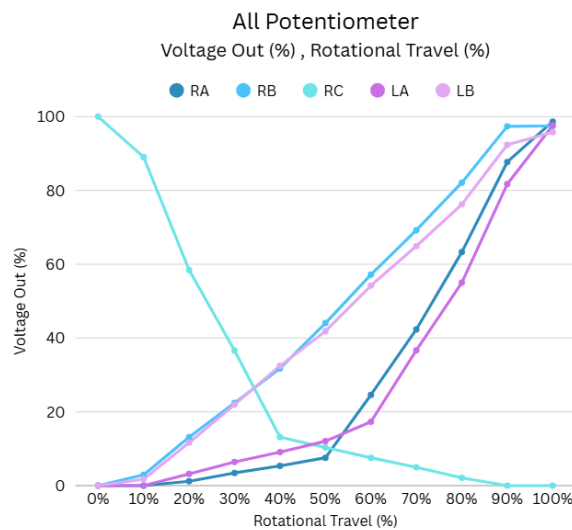
กราฟค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ RC Behavior



กราฟค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ LA Behavior



กราฟค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ LB Behavior



กราฟรวมค่า Resolution จาก Potentiometer เทียบกับเวลา ของ RA,RB,RC,LA,LB Behavior

## สรุปผลการทดลอง

5. กราฟ RA Behavior ความละเอียดขึ้นช้าในช่วงแรก และขึ้นไวในช่วงหลัง โดยมีสมการเชิงเส้น คือ  $y = 10.282x - 31.327$  และ  $R^2 = 0.839$
6. กราฟ RB Behavior ความละเอียดขึ้นคล้าย Linear โดยมีสมการเชิงเส้น คือ  $y = 10.828x - 17.91$  และ  $R^2 = 0.9876$
7. กราฟ RC Behavior ความละเอียดลดลงไวในช่วงแรก และลงช้าในช่วงหลัง โดยมีสมการเชิงเส้น คือ  $y = -9.9453x + 88.964$  และ  $R^2 = 0.7993$
8. กราฟ LA Behavior ความละเอียดขึ้นช้าในช่วงแรก และขึ้นไวในช่วงหลัง โดยมีสมการเชิงเส้น คือ  $y = 9.446x - 27.677$  และ  $R^2 = 0.8249$
9. กราฟ LB Behavior ความละเอียดขึ้นคล้าย Linear โดยมีสมการเชิงเส้น คือ  $y = 10.392x - 17.517$  และ  $R^2 = 0.9906$
10. เมื่อนำกราฟทั้งหมดมาแปลงเป็นแรงดัน แล้วนำมา Plot จะความแตกต่างของแต่ละแบบ โดยแบบ RB Behavior และ LB Behavior มีความเป็นเชิงเส้น Linear มากที่สุด

## อภิปรายผล

ผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับสมมติฐานและการออกแบบทางวิศวกรรม ของ Potentiometer Taper แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ดังนี้

- Taper B (Linear): กราฟเส้นตรงของ RB (PDB181-K420K-103B) และ LB (PTA6043-2015DPB103) ยืนยันว่าเป็นชนิด Taper B (Linear) ตามที่ระบุในสมมติฐานและรหัสสินค้า คุณสมบัตินี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการการตอบสนองที่คงที่และเป็นสัดส่วนโดยตรง เช่น การวัดตำแหน่ง, การปรับค่าพารามิเตอร์ในวงจร
- Taper A (Logarithmic): กราฟเส้นโค้งของ RA (PDB181-K420K-103A2) และ LA (PTA6043-2015DPA103) ยืนยันว่าเป็นชนิด Taper A (Logarithmic) ซึ่งออกแบบมาให้สอดคล้องกับการได้ยินเสียงของมนุษย์ (ซึ่งเป็นแบบ Logarithmic) จึงนิยมใช้เป็นตัวควบคุมระดับเสียง (Volume Control)
- Taper C (Reverse Logarithmic): กราฟเส้นโค้งของ RC (PDB181-K420K-103C) ยืนยันว่าเป็นชนิด Taper C (Reverse Log) ซึ่งมีการใช้งานที่เฉพาะเจาะจงน้อยกว่า แต่บางครั้งใช้ในการควบคุมที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงมากในช่วงต้น

## ข้อเสนอแนะ

ควรใช้ มอเตอร์ที่ควบคุมความเร็วได้ เช่น Stepper Motor หรือ DC Motor พร้อม Encoder มาขับเคลื่อน Potentiometer เพื่อให้ได้อัตราการเคลื่อนที่ ที่คงที่และแม่นยำ

## อ้างอิง

- <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/pdb18.pdf>
- <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/pta.pdf>

## การทดลองที่ 1.2: การทำ Schmitt Trigger

### จุดประสงค์

- เพื่อระบุชนิดของ Potentiometer ทั้ง 5 รุ่นที่ได้รับโดยอาศัยการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์
- เพื่อทดสอบและวิเคราะห์การตอบสนองระหว่างตำแหน่งการหมุน/เลื่อน กับค่าแรงดันขาออก
- เพื่อตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของ Potentiometer แต่ละชนิด

### สมมติฐาน

วงจร Schmitt Trigger จะมีจุดเปลี่ยนสถานะของ Output ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่า Input กำลังเพิ่มขึ้นหรือลดลง  
ขาขึ้น: สัญญาณ Output (Vout) จะเปลี่ยนจาก LOW เป็น HIGH เมื่อแรงดัน Input (RB) สูงกว่า 3000 (75%)  
ขาลง: สัญญาณ Output (Vout) จะเปลี่ยนจาก HIGH กลับเป็น LOW เมื่อแรงดัน Input (RB) ต่ำกว่า 1000 (25%)

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - Resolution ของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จาก RB
2. ตัวแปรตาม:
  - แรงดันไฟฟ้าขาออก (Vout) ออกเป็น 0 หรือ 100
3. ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันที่จ่ายเข้าวงจร (3.3 V)
  - อุปกรณ์ที่นำมาทดสอบ PDB181-K420K-103B

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Bourns, Inc. PDB181 Series Potentiometer Datasheet

ความเกี่ยวข้อง: ใช้อ้างอิงคุณสมบัติของ Potentiometer (RB) ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ Input สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์กลไก (Mechanical) เช่น Potentiometer มักจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือ Jitter เล็กน้อย ซึ่งเป็น "ปัญหา" ที่ Schmitt Trigger ถูกออกแบบมาเพื่อ "แก้ไข"

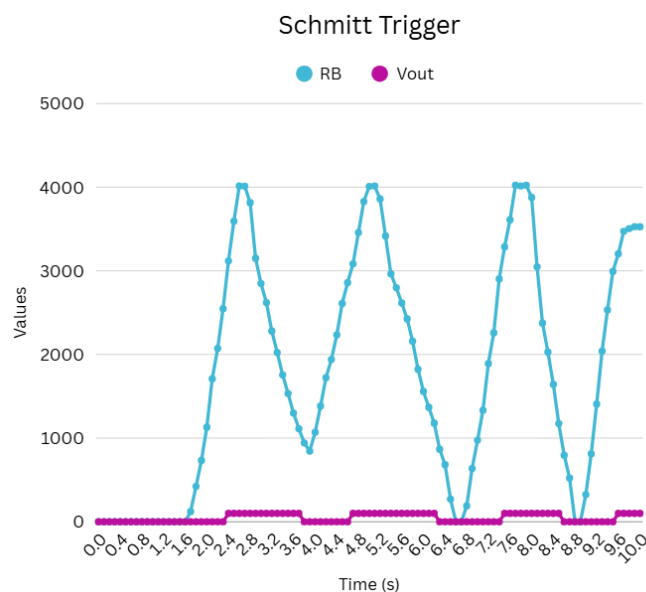
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เขียนโปรแกรมเพื่ออ่านค่า ADC (Resolution 0-4095) จาก Potentiometer (ตัวแปร RB)
2. สร้างตัวแปรสถานะสำหรับ Output (ตัวแปร Vout) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นเป็น LOW (0)
3. นำหลักการ Schmitt Trigger มาเขียนเป็นเงื่อนไข (Logic) ภายใน Loop ของโปรแกรม:

เงื่อนไขขาขึ้น: ตรวจสอบว่าถ้า Vout เป็น LOW และ ค่า RB ที่อ่านได้มีค่า มากกว่า 3000 ให้เปลี่ยนสถานะ Vout เป็น HIGH (100)

เงื่อนไขขาลง: ตรวจสอบว่าถ้า Vout เป็น HIGH และ ค่า RB ที่อ่านได้มีค่า น้อยกว่า 1000 ให้เปลี่ยนสถานะ Vout เป็น LOW (0)

## ผลการทดลอง



## สรุปผลการทดลอง

จากกราฟ Schmitt Trigger ที่ได้สามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังนี้

1. การทำงานขาขึ้น: เมื่อหมุน Potentiometer (RB) จนค่า Resolution เพิ่มขึ้น, สัญญาณ Output (Vout, สีม่วง) จะยังคงสถานะ LOW (0) จนกระทั่งค่า RB (สีฟ้า) มีค่า สูงกว่า 3000 (เช่น ที่เวลา 2.6s, 5.2s, 8.0s) Vout จึงจะเปลี่ยนสถานะเป็น HIGH (100)
2. การทำงานขาลง: เมื่อหมุน Potentiometer (RB) จนค่า Resolution ลดลง, สัญญาณ Vout จะยังคงสถานะ HIGH (100) จนกระทั่งค่า RB มีค่า ต่ำกว่า 1000 (เช่น ที่เวลา 4.0s, 6.8s, 8.8s) Vout จึงจะเปลี่ยนสถานะ กลับเป็น LOW (0)
3. การป้องกันสัญญาณรบกวน: ในช่วงที่สัญญาณ RB มีการกระเพื่อมเล็กน้อย (Noise/Jitter) แต่ยังคงอยู่ในช่วงระหว่าง 1000 ถึง 3000 (เช่น ช่วงเวลา 4.0s - 4.6s ที่ค่ากระเพื่อมอยู่ราว 800-900) สัญญาณ Vout ยังคงสถานะ LOW ไว้อย่างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณรบกวน

ผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับสมมติฐาน ที่ตั้งไว้ทุกประการ

## อภิปรายผล

ผลการทดลองนี้ยืนยันคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของ Schmitt Trigger นั่นคือ ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ซึ่งหมายถึง การมี "ช่องว่าง" หรือ "Dead Zone" ระหว่างเกณฑ์การเปิดข้อเสนอแนะ คุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างยิ่งในการ กำจัด สัญญาณรบกวน (Noise Rejection) หรือ การทำ Debouncing

## ข้อเสนอแนะ

ทดสอบการป้องกันสัญญาณรบกวน: ควรทดลองหมุน Potentiometer ให้มีสัญญาณรบกวน (Noise) ที่มีขนาดใหญ่กว่านี้ เช่น ให้ค่าแกว่งอยู่ระหว่าง 1500 ถึง 2500 (ซึ่งอยู่ภายใน Hysteresis Zone) เพื่อยืนยันว่า Output (Vout) จะไม่เปลี่ยนแปลงสถานะจริงๆ



## อ้างอิง

1. Bourns, Inc. PDB181 Series Potentiometer Datasheet.  
ความเกี่ยวข้อง: ใช้อ้างอิงคุณสมบัติของ Potentiometer (RB) ที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ Input ซึ่งเป็นอุปกรณ์ Analog แบบกลไกที่อาจมีสัญญาณรบกวน
2. Application Note: "Software Debouncing and Schmitt Triggers."  
ความเกี่ยวข้อง: บทความทางเทคนิคที่อธิบายหลักการสร้าง Schmitt Trigger Hysteresis โดยใช้ซอฟต์แวร์ (การเขียนเงื่อนไข If-Else) เพื่อกรองสัญญาณรบกวนจากสวิตช์หรือเซ็นเซอร์
3. Texas Instruments. Understanding Schmitt Triggers (Application Report).  
ความเกี่ยวข้อง: เอกสารอธิบายหลักการทำงานพื้นฐานของ Hysteresis และประโยชน์ในการแปลงสัญญาณที่มีการกระเพื่อม (Slow or Noisy Input) ให้เป็นสัญญาณ Digital ที่ชัดเจน

## 2. Incremental Encoder

### การทดลองที่ 2.1: การวัดคุณสมบัติ Encoder และอ่านค่าสัญญาณ

#### จุดประสงค์

- เพื่อตรวจสอบค่า Pulses Per Revolution (PPR) ของ Encoder ให้ตรงตามเอกสารข้อมูล (Datasheet)
- เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของสัญญาณที่ได้จากการอ่านค่าในโหมด X2 และ X4 ของ Incremental Encoder AMT103-V

#### สมมติฐาน

1. จำนวนพัลส์ที่นับได้จากการหมุน Encoder ครบ 1 รอบ จะมีค่าเท่ากับค่า PPR ที่ระบุใน Datasheet
2. การอ่านค่าแบบ X2 และ X4 จะให้ความละเอียดในการนับเป็น 2 เท่า และ 4 เท่าตามลำดับ

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - ทิศทางการหมุน (CCW)
  - โหมดการอ่านค่า (X2, X4)
2. ตัวแปรตาม:
  - จำนวนพัลส์ที่นับได้ต่อ 1 รอบ
3. ตัวแปรควบคุม:
  - Encoder ที่ใช้ทดลอง (Incremental Encoder AMT103-V)
  - บอร์ด NUCLEO-G474RE

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

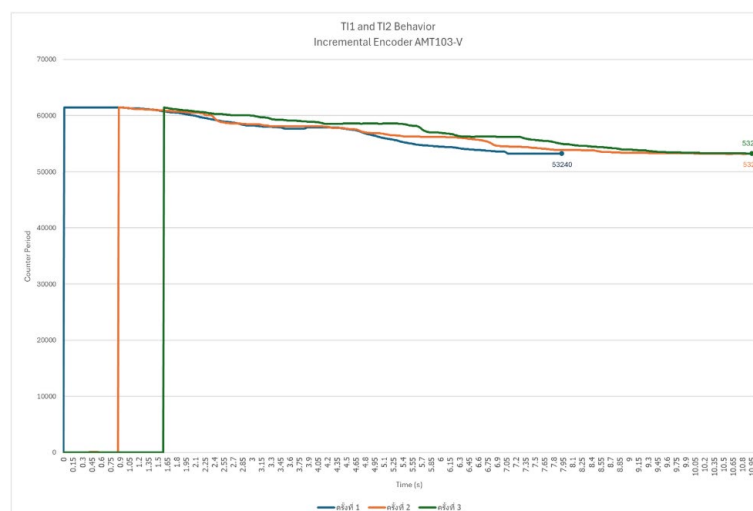
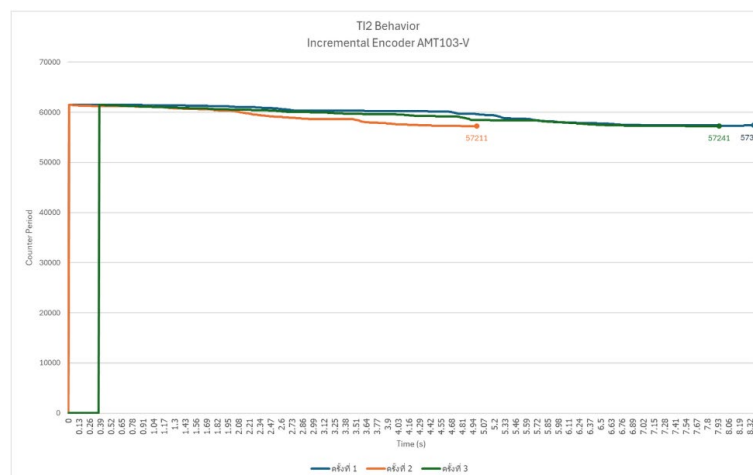
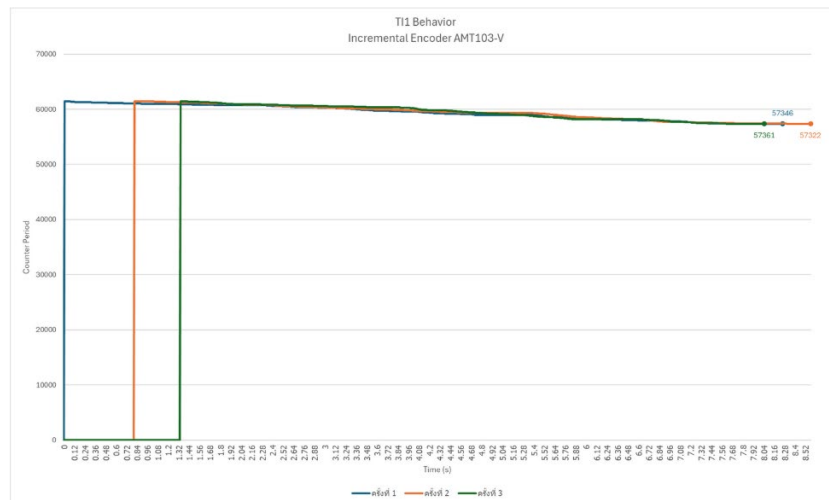
1. CUI Devices. *AMT103-V Modular Incremental Encoder Datasheet*. (2022) เอกสารข้อมูลทางเทคนิคของ Encoder ที่ใช้ในการตรวจสอบค่า PPR และรูปแบบการนับสัญญาณ
2. Texas Instruments. *Quadrature Encoder Interface Using Timers in Microcontrollers*. Application Report (2021) อธิบายหลักการตั้งค่าโหมด Encoder Interface (X2, X4) บนไมโครคอนโทรลเลอร์
3. Analog Devices. *Practical Guide to Rotary Encoders*. (2020) เอกสารอธิบายการทำงาน การนับพัลส์ และการประเมินความละเอียดของ Encoder

#### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ติดตั้ง Hardware Setup: ต่อ Encoder BOURNS PEC11R-4220F-N0024 เข้ากับบอร์ด STM32G474RE โดยเชื่อมต่อสายไฟ 3.3V, GND, สัญญาณ A และ B เข้ากับบอร์ด
- ตั้งค่า IOC Setup: ตั้งค่าโปรแกรม STM32CubeMX โดยเลือก TIM3 เป็น Encoder Mode, กำหนดค่า Counter Period = 61439
- หมุนแกน Incremental Encoder AMT103-V ให้ครบ 360 องศาและบันทึกข้อมูลพัลส์

- ปรับแก้โปรแกรมเพื่ออ่านค่าในโหมด X2 (TI1, TI2) และ X4 (TI1 and TI2)
- ทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ

## ผลการทดลอง



### สรุปผลการทดลอง

ค่าที่ได้จากการทดลอง 3 ครั้ง ในโหมด TI1 , TI2 และ TI1 and TI2 ได้ค่า Counter Period จากการหมุน CCW 1 ครั้งดังนี้ :

TI1 (57346, 57332, 57361) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 57346.333

TI2 (57352, 57211, 57241) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 57272.333

TI1 and TI2 (53240, 53245, 53205) คิดเป็นค่าเฉลี่ย 53230

### อภิปรายผล

จาก Datasheet Incremental Encoder AMT103-V มีค่า PPR อยู่ที่ 2048 ซึ่งโหมด TI1 และ TI2 ค่าสัญญาณที่นับได้จะถูก X2 และในโหมด TI1 and TI2 สัญญาณจะถูก X4 ในการทดลองนี้ตั้ง Counter Period อยู่ที่ 61439 แสดงว่าถ้าเราหมุน CCW 1 รอบ

TI1 และ TI2 ค่าควรจะอยู่ใกล้ค่า  $61439 - (2048 \times 2) = 57343$

TI1 and TI2 ค่าควรจะอยู่ใกล้ค่า  $61439 - (2048 \times 4) = 53247$

เมื่อเทียบผลการทดลอง

TI1 คาดเคลื่อน +3.333

TI2 คาดเคลื่อน -70.667

TI1 and TI2 คาดเคลื่อน -17

### ข้อเสนอแนะ

ค่าคลาดเคลื่อนจากการทดลองเกิดจาก Human Error เนื่องจากหมุนด้วยมือทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนสูงในการทดลองควรใช้ Encoder ที่ปรับค่าได้ง่ายกว่านี้

### อ้างอิง

1. <https://www.cuidevices.com/product/resource/amt10-v.pdf>
2. <https://www.ti.com/lit/an/spraao8/spraao8.pdf>
3. <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/understanding-rotary-encoders.html>

## การทดลองที่ 2.2: การวิเคราะห์สัญญาณ Quadrature

### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของเฟส (Phase Relationship) ระหว่างสัญญาณ A และ B เพื่อใช้ในการระบุทิศทางการหมุน (CW/CCW)
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วในการหมุนที่มีต่อคุณภาพของสัญญาณ

### สมมติฐาน

1. เมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW) สัญญาณ A จะนำหน้าสัญญาณ B และเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW) สัญญาณ B จะนำหน้าสัญญาณ A
2. ความเร็วในการหมุนที่สูงขึ้นจะส่งผลให้รูปคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยนไป และอาจเกิดสัญญาณรบกวน (Contact Bounce) ได้ง่ายขึ้น

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - ทิศทางการหมุน (CW, CCW)
  - ความเร็วในการหมุน (ต่ำ, สูง)
2. ตัวแปรตาม:
  - ความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างสัญญาณ A และ B
  - รูปทรงและคุณภาพของสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป
3. ตัวแปรควบคุม:
  - Encoder ที่ใช้ทดลอง (AMT103-V หรือ BOURNS PEC11R-4220F-N0024)
  - บอร์ด NUCLEO-G474RE

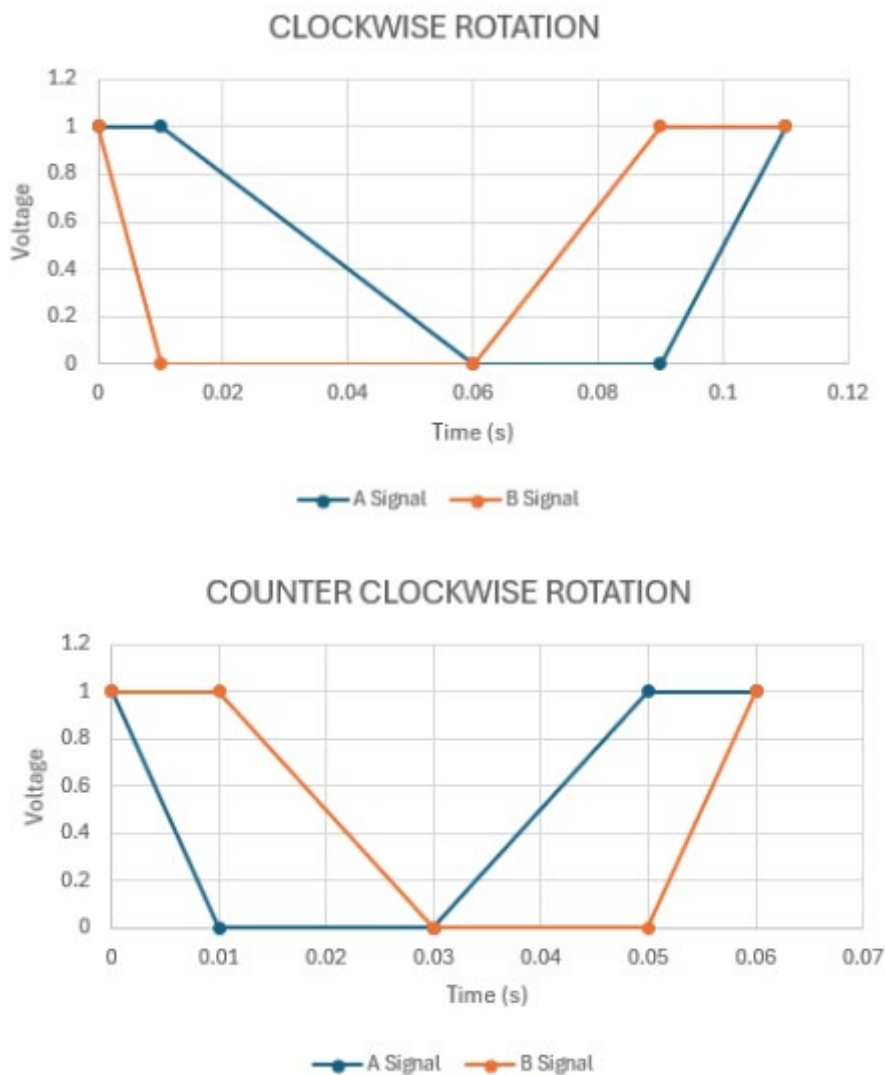
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Bourns, Inc. *PEC11R Series Encoder Datasheet*. (2021) ข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับสัญญาณ A/B และรูปแบบการนับ
2. National Instruments. *Understanding Quadrature Encoders*. (Technical Note, 2020) บทความอธิบายการเลื่อนเฟสของสัญญาณ A และ B สำหรับระบุทิศทาง CW/CCW
3. IEEE Xplore. "Analysis of Quadrature Encoder Signals for Motion Direction Detection." (2019) งานวิจัยเชิงทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์เฟสและการวิเคราะห์สัญญาณรบกวนใน Encoder ความเร็วสูง

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ต่อขาสัญญาณ A และ B ของ Encoder เข้ากับช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 ของออสซิลโลสโคป
2. หมุน Encoder อย่างช้าๆ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) สังเกตและบันทึกภาพความสัมพันธ์ของเฟส
3. หมุน Encoder อย่างช้าๆ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW) สังเกตและบันทึกภาพความสัมพันธ์ของเฟส
4. ทดลองหมุนด้วยความเร็วต่ำและสูง เปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณที่ปรากฏบนจอ

## ผลการทดลอง



## สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวิเคราะห์สัญญาณ Quadrature ด้วยออสซิลโลสโคป พบความสัมพันธ์ของเฟส (Phase Relationship) ระหว่างสัญญาณ A และ B ดังนี้ :

1. เมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW): จากกราฟผลการทดลอง CLOCKWISE ROTATION พบว่า สัญญาณ A (A Signal) เปลี่ยนแปลงสถานะ (เช่น ขอบขาลงจาก High ไป Low) นำหน้า สัญญาณ B (B Signal)
2. เมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW): จากกราฟผลการทดลอง COUNTER CLOCKWISE ROTATION พบว่า สัญญาณ B (B Signal) เปลี่ยนแปลงสถานะ (เช่น ขอบขาลงจาก High ไป Low) นำหน้า สัญญาณ A (A Signal)

## อภิปรายผล

ผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับสมมติฐานข้อแรก และตรงตามหลักการของ Quadrature Encoder ที่อธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง (เช่น National Instruments, 2020)

การที่สัญญาณ A และ B ถูกออกแบบมาให้มีเฟสต่างกัน 90 องศา (ในทางอุดมคติ) ทำให้ระบบสามารถระบุทิศทางการหมุนได้ โดยการตรวจสอบว่าสัญญาณใดเปลี่ยนแปลงก่อนกัน (เช่น การใช้ Interrupt ตรวจจับขอบสัญญาณ)

## ข้อเสนอแนะ

ทดสอบสมมติฐานข้อที่สองให้สมบูรณ์: ควรทำการทดลองซ้ำ โดยเน้นการ หมุน Encoder ด้วยความเร็วสูง (High RPM) และบันทึกภาพสัญญาณอีกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบรูปคลื่น และสังเกตปรากฏการณ์ Contact Bounce (หากใช้ PEC11R) หรือการผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Signal Distortion)

## อ้างอิง

11. <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PEC11R.pdf>
12. <https://www.ni.com/en-us/innovations/quadrature-encoders.html>
13. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792156>

## การทดลองที่ 2.3: การพัฒนาระบบอ่านและแปลงค่า และ Home Sequence

### จุดประสงค์

เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับแปลงค่า Relative Position (Pulse) ไปเป็นหน่วยทางกายภาพที่ใช้งานได้จริง ได้แก่ ตำแหน่งเชิงมุม (Radians) และความเร็วเชิงมุม (rad/s)

เพื่อออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับกระบวนการกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น (Homing Sequence) โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกเป็นตัวอ้างอิง

### สมมติฐาน

การส่งสัญญาณผ่านปุ่ม B1 (PC13) บนบอร์ดจะทำให้ ระบบกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใหม่ได้ (Setting Zero) และสามารถทำซ้ำได้

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - ค่า Counter Period ที่นับได้ (TIM3\_Encoder)
  - สถานะของปุ่ม B1 (PC13)
2. ตัวแปรตาม:
  - ค่าตำแหน่งเชิงมุม (Radians)
  - ค่าตัวนับของ Encoder (ถูกรีเซ็ตเป็น 0)
3. ตัวแปรควบคุม:
  - BOURNS PEC11R-4220F-N0024
  - โหมดการอ่านค่า (X4)
  - Counter Period = 300

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

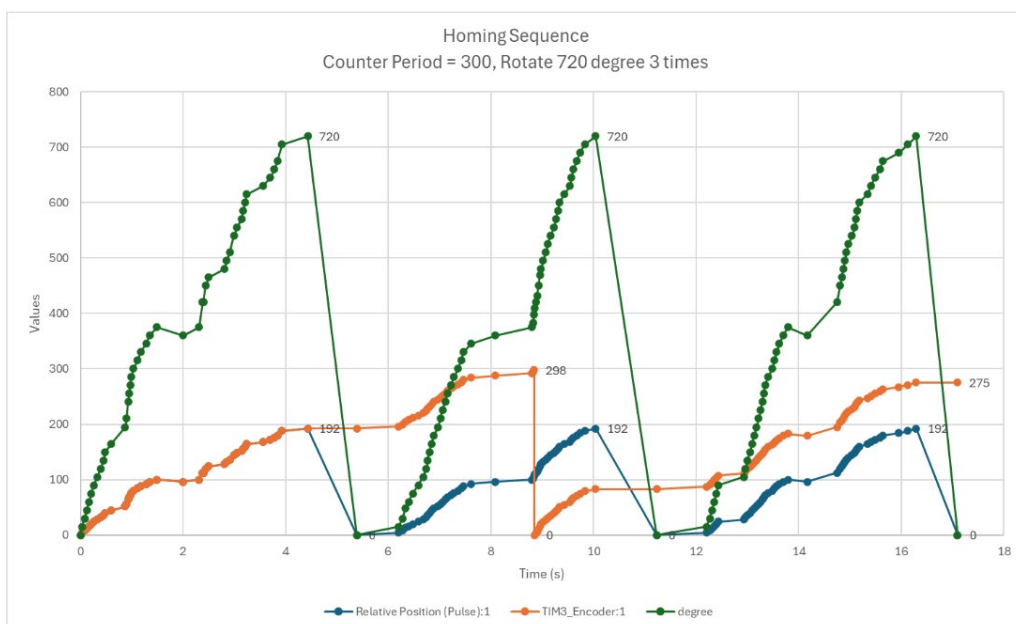
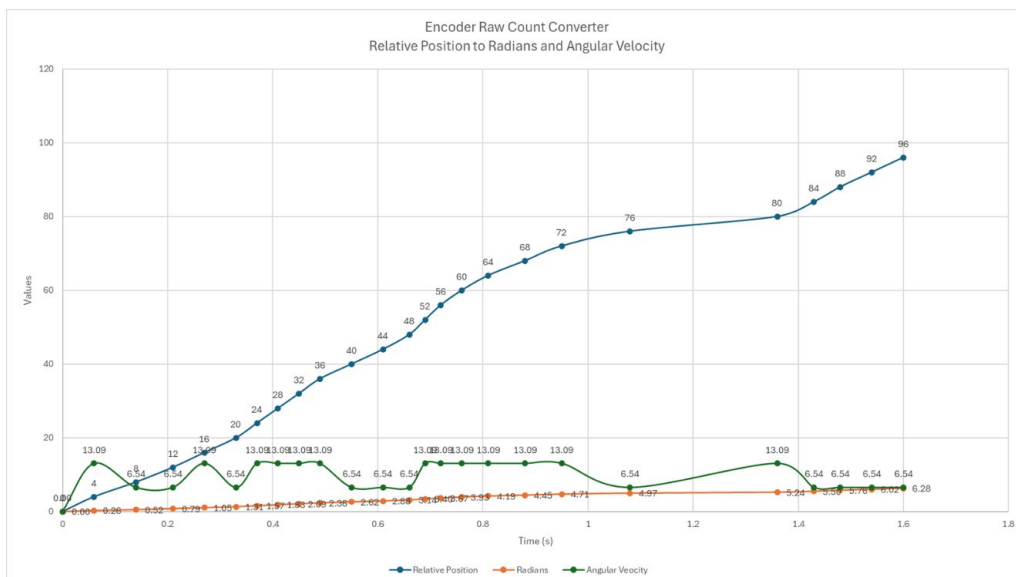
1. STMicroelectronics. *Application Note AN4013: Using STM32 Timers for Quadrature Encoder Interface*. (2020) คู่มือสำหรับการตั้งค่าการอ่านค่า Encoder ด้วย Peripheral TIMx
2. Bourns, Inc. *PEC11R-4220F-N0024 Encoder Datasheet*. (2021) ข้อมูลจำเพาะและคุณสมบัติของ Encoder ที่ใช้ทดลอง
3. Microchip. *Implementation of Homing and Indexing Functions in Rotary Encoder Systems*. (2019) อธิบายหลักการทำงานของระบบ Homing Sequence และการรีเซ็ตตำแหน่ง



## ขั้นตอนการดำเนินงาน

- เขียนฟังก์ชัน WarpAround เพื่อจัดการกับค่าโมด X4
- เขียนฟังก์ชัน Homing Sequence (Set Home)
- สร้างฟังก์ชันแปลงค่า Counter Period (TIM3\_Encoder) เป็น Relative Position
- สร้างฟังก์ชันนำค่า Relative Position ไปแปลงเป็น Angular Position (Radian) และ Angular Velocity (rad/s)
- ทดลองหมุน CW 360 องศา 1 ครั้งเพื่อตรวจสอบโปรแกรมว่าแปลงค่าได้ถูกต้อง
- เมื่อถูกต้องแล้วหมุนแกนเพื่อให้ค่าตำแหน่งเปลี่ยนจำนวน 720 องศา แล้วทดสอบกดปุ่ม Set Home [B1(PC13)] ทำทั้งหมด 3 ครั้ง

## ผลการทดลอง



## สรุปผลการทดลอง

ค่า TIM3\_Encoder เพิ่มขึ้นทีละ 4 ต่อการหมุน 1 ครั้ง (15 องศา) เมื่อหมุนไปครบ 720 องศา เมื่อกดปุ่ม B1(PC14) ค่า degree และ Relative Position กลับมาอยู่ที่ 0 TIM3\_Encoder เมื่อค่ามากกว่า 300 จะตั้งกลับมาเป็น 0

## อภิปรายผล

BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีค่า PPR อยู่ที่ 24 และตั้งโหมดอ่านสัญญาณ TI1 and TI2 (X4) ว่าทุก ๆ ครั้งที่หมุน 15 องศา หรือประมาณ 0.2618 rad จะต้องได้ค่า Counter Period (TIM3\_Encoder) เพิ่มขึ้นทีละ 4 ซึ่งผลลัพธ์ตรงตามสมมติฐาน

ในการทดลองใช้ปุ่ม Home sequence ค่าทั้งหมดควรจะกลับมาอยู่ที่ 0 จากผลการทดลองหลังหมุนครบ 720 องศาแล้วกดปุ่ม Set Home มีเพียงค่า TIM3\_Encoder ที่ไม่กลับมาเป็นเพราะค่านี้เป็นค่าที่มาจากการทำงานของ Function แปลงค่าทำให้ค่าที่นับได้ไม่กลับไปอยู่ที่ 0

## ข้อเสนอแนะ

เราสามารถนำ degree และ Home sequence ไปใช้ในการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้

## อ้างอิง

- [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/an4013-using-timers-for-encoder-interface-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/an4013-using-timers-for-encoder-interface-stmicroelectronics.pdf)
- <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PEC11R.pdf>
- <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00002768A.pdf>

### 3. Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

การทดลองที่ 3.1: ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์ ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Magnetic Sensor

#### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor ต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)
2. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Magnetic Sensor
3. เพื่อทดสอบการตอบสนองเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก

#### สมมติฐาน

หากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์เพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ตกกระทบเซนเซอร์ จะลดลง ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงตาม

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor
2. ตัวแปรตาม:
  - ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B)
  - ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Magnetic Sensor
3. ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันไฟเลี้ยง (3.3 V)
  - อุณหภูมิขณะทำการทดลอง
  - ตำแหน่งและแนวการติดตั้งของเซนเซอร์

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Texas Instruments. DRV5055 Radiometric Linear Hall Effect Sensor Datasheet. SBAS640B, Rev. B, 2021.

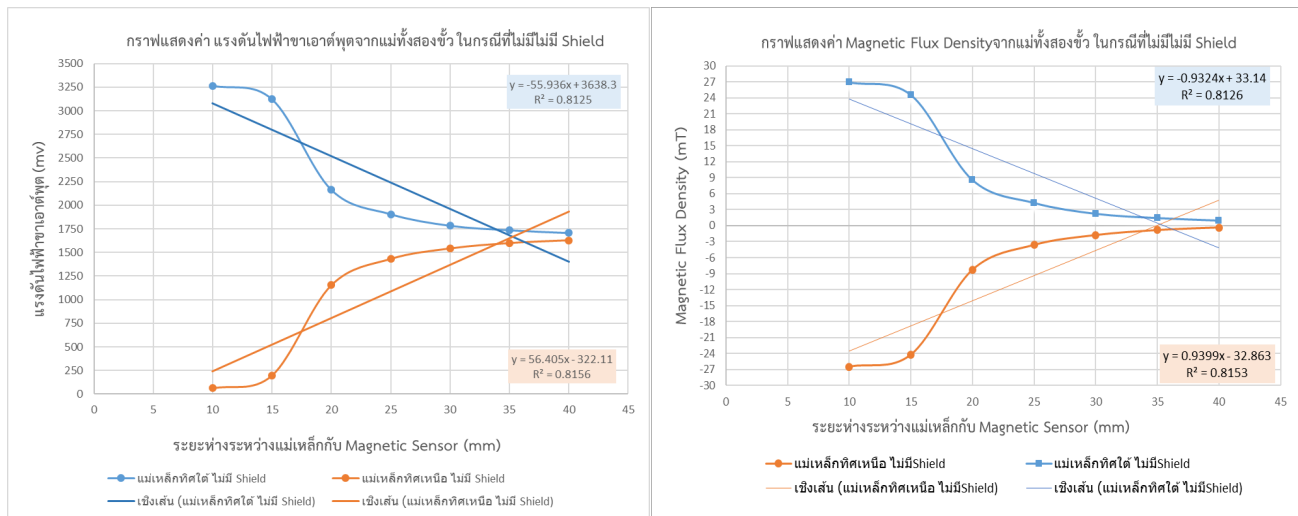
เอกสารข้อมูลทางเทคนิคของเซนเซอร์ Hall Effect รุ่น DRV5055 ซึ่งอธิบายลักษณะการทำงานของเซนเซอร์แบบเชิงเส้น (Linear Hall Effect Sensor) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตและค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ตลอดจนสมการพื้นฐานที่ใช้คำนวณค่า  $B$  จากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ ข้อมูลนี้มีความสำคัญในการอธิบายผลการทดลองเรื่องความสัมพันธ์ของระยะห่างและการใช้ Magnetic Shielding ต่อสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์

2. Texas Instruments. *Introduction to Hall-Effect Sensors*. Application Note, 2018.  
บทความทางเทคนิคที่อธิบายหลักการของ Hall Effect และการเกิด Hall Voltage ซึ่งเป็นพื้นฐานของการทำงานของ Magnetic Sensor รวมถึงการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดันเอาต์พุตเมื่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กเปลี่ยนไปตามระยะห่าง
3. NIST. *What's in a Name? The Tesla*. National Institute of Standards and Technology, 2020.  
เอกสารที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับหน่วยวัดมาตรฐานของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Tesla, T) และความสัมพันธ์กับหน่วยพื้นฐานในระบบ SI ซึ่งถูกใช้ในการแปลงค่าที่ได้จากการทดลองให้เป็นหน่วยมาตรฐานเพื่อการวิเคราะห์และเปรียบเทียบเชิงวิทยาศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง
4. MuMETAL®. *Shielding Fundamentals*. Magnetic Shield Corporation, 2020.  
บทความเชิงเทคนิคที่อธิบายหลักการและกลไกของการป้องกันสนามแม่เหล็ก (Magnetic Shielding) โดยใช้วัสดุที่มีค่า permeability สูง เช่น Mu-metal ซึ่งสามารถดูดซับและเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กได้ ข้อมูลนี้ถูกใช้ในการอธิบายผลของการใช้ Shielding ต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซนเซอร์
5. Zhang, L. et al. *Magnetic characterization of Mu-metal for passive shielding*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1015, 2021.  
งานวิจัยที่ศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับประสิทธิภาพของวัสดุ Mu-metal ในการลดทอนสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกนำมาใช้อ้างอิงเพื่ออธิบายผลที่ได้จากการทดลองเมื่อใช้ Magnetic Shielding ว่าสามารถลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันเอาต์พุตได้จริง

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ต่อวงจร Magnetic Sensor DRV5055 เข้ากับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE
2. ป้อนแรงดันไฟเลี้ยง 3.3V และเชื่อมต่อขา OUT ของเซนเซอร์เข้ากับ ADC ที่พอร์ต PA0
3. วัดแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก เพื่อหาค่าอ้างอิง  $V_{ref}$
4. ขยับแม่เหล็กเข้าใกล้และห่างจากเซนเซอร์ทีละ 5 มิลลิเมตร พร้อมบันทึกแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 2-3 นาที
5. คำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กจากแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้
6. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $B$ )

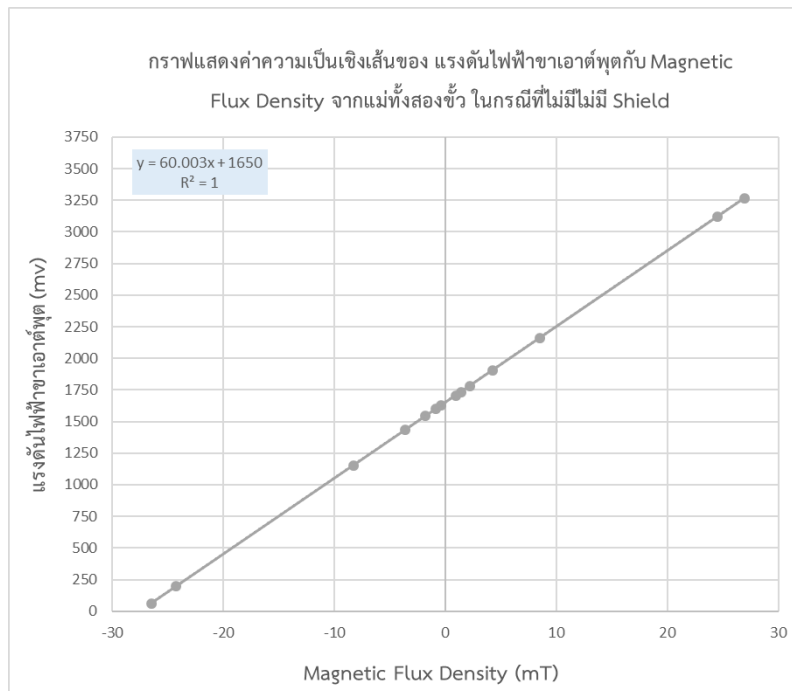
## ผลการทดลอง



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor กับแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุต และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor กับแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตในแม่เหล็กทั้งสองขั้ว ในกรณีที่ไม่มี Shield

จากกราฟ จะสังเกตได้ว่าในทิศแม่เหล็กทิศเหนือจะมีช่วงค่าแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 1700 มิลลิโวลต์ และในทิศแม่เหล็กทิศใต้จะมีช่วงค่าแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตอยู่ในช่วง 1650 ถึง 3300 มิลลิโวลต์ และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor ค่าแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตของแม่ทั้งสองขั้วจะมีค่าที่เข้าใกล้ 1650 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นไปตามค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor และจากกราฟจะเห็นถึงค่าแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตมีแนวโน้มลดลงหรือเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อระยะห่างมากขึ้นของแม่เหล็กทั้งสองขั้วโดยในแม่เหล็กทิศเหนือ จะมีสมการเส้นตรงเป็น  $y = 56.405x - 322.11$  และมีค่า  $R^2 = 0.8156$  ในแม่เหล็กทิศใต้จะมีสมการเส้นตรงเป็น  $y = -55.936x + 3638.3$  และมีค่า  $R^2 = 0.8125$  โดยมีจุดตัดของสมการเส้นตรงทั้งสองที่จุด  $x = 1650$

จากกราฟ จะสังเกตได้ว่าในทิศแม่เหล็กทิศเหนือจะมีช่วงค่า Magnetic Flux Density อยู่ในช่วง -27 ถึง 0 มิลลิเทสลา และในทิศแม่เหล็กทิศใต้จะมีช่วงค่าแรงดันไฟฟ้าจากเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0 ถึง 27 มิลลิเทสลา และเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor ค่า Magnetic Flux Density ของแม่ทั้งสองขั้วจะมีค่าลดลงและเข้าใกล้ค่าคงที่ที่ 0 มิลลิเทสลา ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความเข้มสนามแม่เหล็กและในระยะ 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดของ Magnetic Flux Density ที่ใกล้เคียงกันแต่จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกันซึ่งตรงกับทฤษฎีของสนามแม่เหล็กคู่ขั้ว (Dipole Field) และจากกราฟจะเห็นถึงค่า Magnetic Flux Density มีแนวโน้มลดลงหรือเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อระยะห่างมากขึ้นของแม่เหล็กทั้งสองขั้วโดยในแม่เหล็กทิศเหนือ จะมีสมการเส้นตรงเป็น  $y = 0.9399x - 32.863$  และมีค่า  $R^2 = 0.8153$  ในแม่เหล็กทิศใต้จะมีสมการเส้นตรงเป็น  $y = -0.9324x + 33.14$  และมีค่า  $R^2 = 0.8126$  โดยมีจุดตัดของสมการเส้นตรงทั้งสองที่จุด  $x = 0$



กราฟแสดงค่าความเป็นเชิงเส้นของ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับ Magnetic Flux Density จากแม่ทั้งสองขั้ว ในกรณีที่ไม่มี Shield

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Flux Density กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ในกรณีที่ไม่มี Shield สำหรับระยะ 10–40 มิลลิเมตร ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยกราฟเป็นเส้นตรงมี  $y = 60.003x + 1650$  และค่า  $R^2 = 1$  ซึ่งแสดงความเป็นเชิงเส้นสมบูรณ์แบบตามทฤษฎีของ Hall Effect ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่มากระทำต่อเซนเซอร์

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่า Magnetic Flux Density เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงกับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor และเมื่อ Magnetic Flux Density ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกับทฤษฎีของ Hall Effect ทำให้ค่า Magnetic Flux Density กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงที่สมบูรณ์

### อภิปรายผล

ผลการทดลองยืนยันสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่า ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์มีผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันเอาต์พุต โดยเมื่อแม่เหล็กเข้าใกล้เซนเซอร์มากขึ้น สนามแม่เหล็กที่ตกกระทบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้นตามความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี Hall Effect และข้อมูลใน Datasheet ของ DRV5055

### ข้อเสนอแนะ

- ควรใช้เครื่องมือวัดระยะที่มีความแม่นยำสูงเพื่อลดความคลาดเคลื่อน
- ควรทดลองในสภาพแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกต่ำเพื่อป้องกันการรบกวน

## อ้างอิง

1. <https://www.ti.com/lit/ds/symmlink/drv5055.pdf>
2. <https://www.nist.gov/si-units/tesla>
3. <https://www.ti.com/lit/an/sloa190/sloa190.pdf>

### การทดลองที่ 3.2: การมีหรือไม่มี Magnetic Shielding ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก และค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Magnetic Sensor

#### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการมีหรือไม่มี Magnetic Shielding ต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก
2. เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Magnetic Sensor เมื่อมีการป้องกันสนามแม่เหล็ก
3. เพื่อทำความเข้าใจหลักการและประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กในเชิงปฏิบัติ

#### สมมติฐาน

การมี Magnetic Shielding จะทำให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการป้องกัน

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - การมีหรือไม่มี Magnetic Shielding
2. ตัวแปรตาม:
  - ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (B)
  - ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก Magnetic Sensor
3. ตัวแปรควบคุม:
  - ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์
  - อุณหภูมิขณะทำการทดลอง
  - ตำแหน่งและแนวการติดตั้งของเซนเซอร์

#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Texas Instruments. DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor Datasheet. SBAS640B, Rev. B, 2021.

เอกสารข้อมูลทางเทคนิคของเซนเซอร์ Hall Effect รุ่น DRV5055 ที่อธิบายถึงหลักการทำงาน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) และสมการที่ใช้ในการคำนวณค่า  $B$  ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองว่าระยะห่างหรือการใช้ Magnetic Shielding ส่งผลต่อสัญญาณเอาต์พุตอย่างไร



## 2. MuMETAL®. *Shielding Fundamentals*. Magnetic Shield Corporation, 2020.

บทความเชิงเทคนิคที่อธิบายกลไกการป้องกันสนามแม่เหล็ก (Magnetic Shielding) ด้วยวัสดุที่มีค่า permeability สูง เช่น Mu-metal ซึ่งสามารถดูดซับและเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กได้ ข้อมูลนี้ถูกใช้ในการอธิบายว่าการใช้วัสดุป้องกันมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลดลงและแรงดันเอาต์พุตของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลงอย่างไร

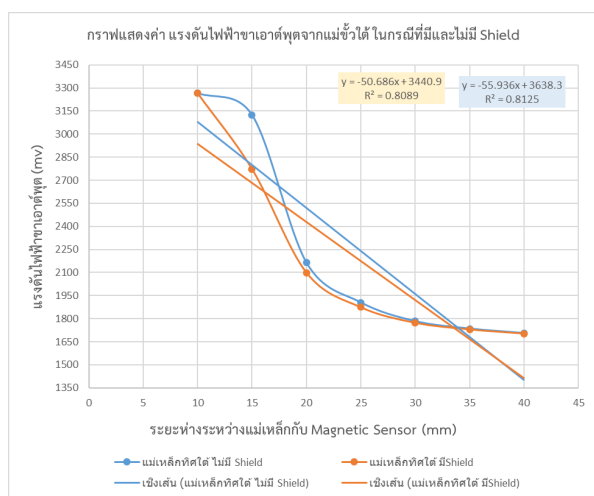
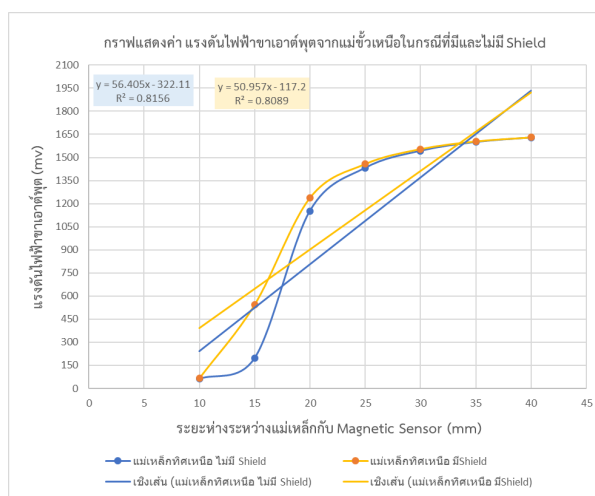
## 3. Zhang, L. et al. *Magnetic characterization of Mu-metal for passive shielding*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 1015, 2021.

งานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ Mu-metal ในการลดทอนสนามแม่เหล็ก โดยให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความสามารถในการป้องกันและลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายผลของการทดลองกรณีที่มีหรือไม่มี Magnetic Shielding ว่ามีผลต่อค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอย่างไร

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

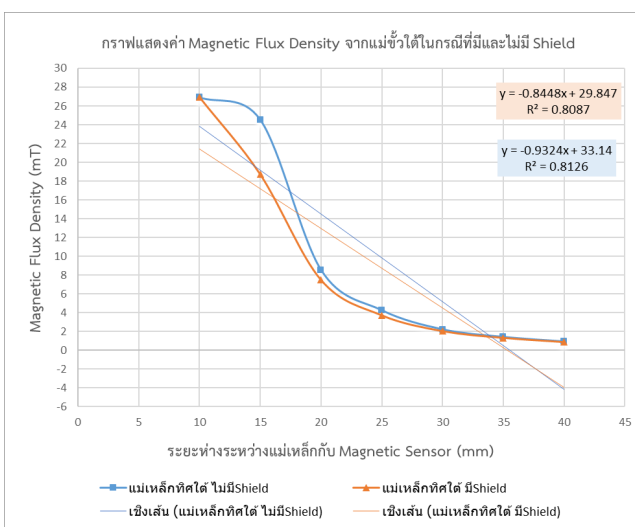
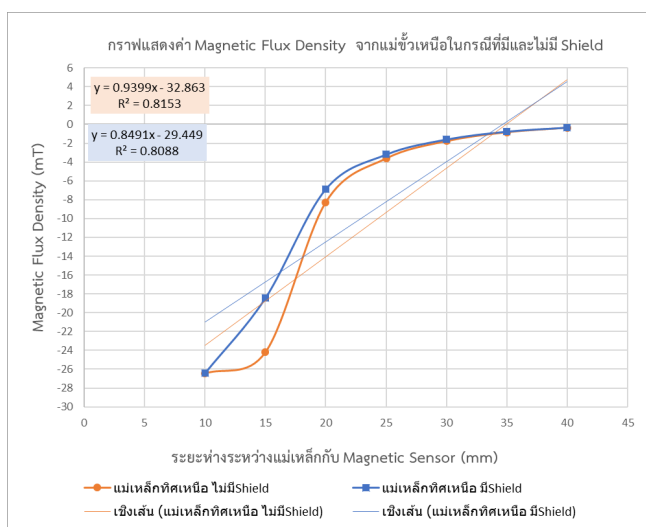
1. ต่อวงจร Magnetic Sensor DRV5055 เข้ากับบอร์ด NUCLEO STM32G474RE
2. ป้อนแรงดันไฟเลี้ยง 3.3V และเชื่อมต่อขา OUT ของเซนเซอร์เข้ากับ ADC ที่พอร์ต PA0
3. วัดแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีสนามแม่เหล็ก เพื่อหาค่าอ้างอิง  $V_{ref}$
4. วัดแรงดันไฟฟ้าและคำนวณค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในทั้งสองกรณี
5. ขยับแม่เหล็กเข้าใกล้และห่างจากเซนเซอร์ทีละ 5 มิลลิเมตร พร้อมบันทึกแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) เป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 2-3 นาที
6. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างกับแรงดันไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกรณีมีและไม่มี Shielding

### ผลการทดลอง



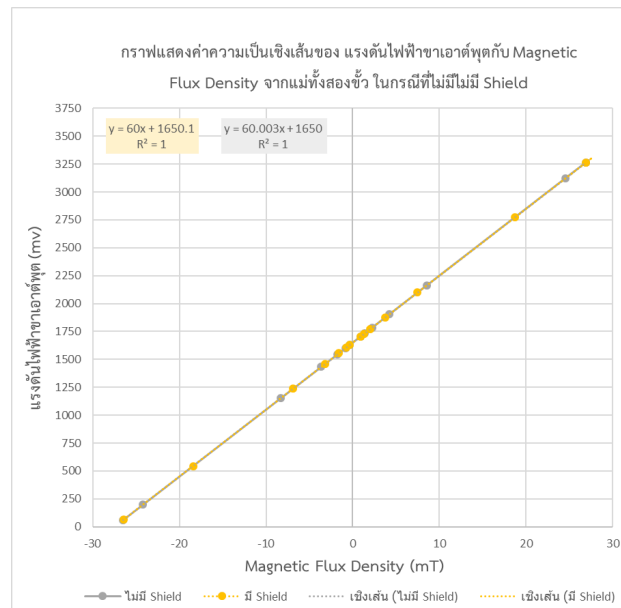
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในแม่เหล็กขั้วเหนือและขั้วใต้ ในกรณีที่มีและไม่มี Shield

จากกราฟจะสามารถสังเกตได้ว่าแบบมี shield และไม่มี shield มี ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุตที่มีความแตกต่างกันในทั้งแม่เหล็กทิศเหนือและทิศใต้ ที่อยู่ในช่วงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor มีค่า 11 – 25 มิลลิเมตร และในช่วงหลังจากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor มีค่ามากกว่า 25 ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุตของมี shield และไม่มี shield จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสามารถทำงานได้ดีในช่วง 11-25 มิลลิเมตร โดยยิ่งลดระยะห่าง Shield จะสามารถลด Magnetic Flux Density ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุตมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงชั่วเหนือและชั่วใต้ จนถึงระยะ 10 มิลลิเมตร เป็นระยะที่มีและไม่มี Shield จะไม่ส่งผลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุต และ เมื่อมี Shield จะได้ข้อมูลที่มีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าแบบไม่มี



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor กับค่า Magnetic Flux Density ในแม่เหล็กชั่วเหนือและชั่วใต้ในกรณีที่มีและไม่มี Shield

จากกราฟจะสามารถสังเกตได้ว่าแบบมี shield และไม่มี shield มี ค่า Magnetic Flux Density ที่มีความแตกต่างกันในทั้งแม่เหล็กทิศเหนือและทิศใต้ ที่อยู่ในช่วงระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor มีค่า 11 – 25 มิลลิเมตร และในช่วงหลังจากระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ Magnetic Sensor มีค่ามากกว่า 25 ค่า Magnetic Flux Density ของมี shield และไม่มี shield จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นสามารถทำงานได้ดีในช่วง 11-25 มิลลิเมตร โดยยิ่งลดระยะห่าง Shield จะสามารถลด Magnetic Flux Density ได้มากยิ่งขึ้น จนถึงระยะ 10 มิลลิเมตร เป็นระยะที่มีและไม่มี Shield จะไม่ส่งผลต่อ Magnetic Flux Density และ เมื่อมี Shield จะได้ข้อมูลที่มีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าแบบไม่มี



กราฟแสดงค่าความเป็นเชิงเส้นของ แรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุตกับ Magnetic Flux Density จากแม่ทั้งสองขั้ว ในกรณีที่มีและไม่มี Shield

จากแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Flux Density กับ แรงดันไฟฟ้าขาออก ในตอนที่มี Shield และไม่มี Shield สำหรับระยะ 10–40 มิลลิเมตร ทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้ โดยกราฟแสดงถึงความเป็นเชิงเส้นของข้อมูลที่ใกล้เคียงกันมากของข้อมูลในกรณีที่มี Shield และไม่มี Shield เป็นเส้นตรงมี  $y=60.003x+1650$  และค่า  $R^2 = 1$  ซึ่งแสดงความเป็นเชิงเส้นสมบูรณ์แบบตามทฤษฎีของ Hall Effect ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่มากระทำต่อเซนเซอร์ของมี Shield และไม่มี Shield

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า Magnetic Shielding สามารถช่วยในการลด Magnetic Flux Density ได้เห็นผลในระยะที่จำกัดที่ 11-25 มิลลิเมตร เมื่ออยู่ในระยะที่ใกล้หรือไกลมากเกินไปจะไม่สามารถลด Magnetic Flux Density ได้ โดยระยะที่ช่วยลด Magnetic Flux Density ได้มากที่สุด คือ ระยะ 15 มิลลิเมตร

### อภิปรายผล

ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันสมมติฐานว่า Magnetic Shielding สามารถลดค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าขาเอาต์พุตได้จริง เนื่องจากวัสดุที่มีค่า permeability สูงสามารถดูดซับและเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กออกจากเซนเซอร์ได้ ส่งผลให้เซนเซอร์รับสนามแม่เหล็กลดลง ผลนี้สอดคล้องกับหลักการทางแม่เหล็กไฟฟ้าและข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ข้อเสนอแนะ

ควรใช้วัสดุ Magnetic Shielding ที่มีคุณสมบัติเหมาะสม เช่น Mu-metal เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกัน ควรทดสอบในระยะห่างหลายระดับเพื่อวิเคราะห์ผลเชิงลึกของ Shielding

## อ้างอิง

1. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf>
2. <https://www.magneticshield.com/mumetal>
3. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165763>

#### 4. Single Point Load Cell

การทดลองที่ 4.1: ผลของการปรับปรุงสัญญาณด้วย Moving Average และ Low-Pass Filter ต่อความนิ่งของสัญญาณและความไวตอบสนอง

##### จุดประสงค์

1. วัดผลของการกรอง MA และ LPF ต่อความผันผวนของสัญญาณ
2. ประเมินผลกระทบด้านการหน่วงเวลาหลังเปลี่ยนน้ำหนัก
3. เลือกชุดพารามิเตอร์กรองที่สมดุลระหว่างความนิ่งกับความไวตอบสนอง

##### สมมติฐาน

การใช้ MA และ LPF จะลดสัญญาณรบกวนได้ชัดเจน โดยเพิ่มระยะเวลาหน่วงเล็กน้อย ซึ่งยอมรับได้สำหรับการวัดระดับน้ำหนักคงที่

##### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - หน้าต่าง MA (เช่น 8, 16, 32 sample)
  - Time constant ของ LPF ( $\tau$ )
2. ตัวแปรตาม:
  - ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ analog output
3. ตัวแปรควบคุม:
  - ค่า Gain
  - ค่า  $R_G$
  - Sample time ADC
  - สภาพแวดล้อม
  - น้ำหนักที่วัดผล

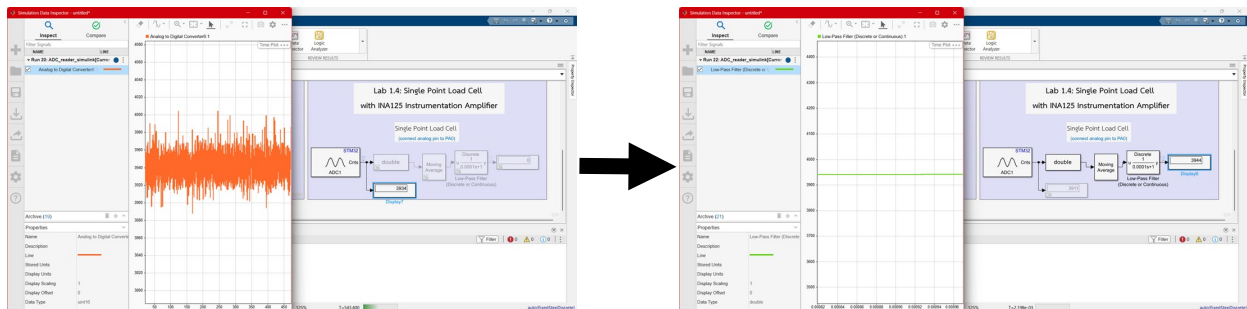
##### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แนวทาง signal conditioning สำหรับ bridge sensors
2. เอกสาร MathWorks/NI เรื่องการออกแบบตัวกรองดิจิทัล

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. วัดสัญญาณคงที่ที่ 10 kg ก่อนกรอง, หลัง MA, หลัง LPF
2. ประเมินลักษณะสัญญาณ และวัด settling time จากกราฟ Simulation Data Inspector
3. สรุปพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

## ผลการทดลอง



- จากภาพกราฟของผู้ทดลอง สัญญาณหลังกรองนิ่งขึ้นอย่างเด่นชัด และไม่มี overshoot สูง
- ค่าแสดงผล ADC คงที่ในช่วงแคบ เหมาะต่อการ Calibrate และใช้งานจริง

## สรุปผลการทดลอง

การผสม MA+LPF ช่วยให้สัญญาณมีความนิ่งโดยแลกกับการหน่วงเล็กน้อย เหมาะกับงานชั่งน้ำหนักที่ค่าคงที่

## อภิปรายผล

รายงาน settling time เชิงตัวเลขในภาคผนวก

## ข้อเสนอแนะ

ควรกำหนด Time constant ให้สัมพันธ์กับ Sampling rate เพื่อเลี่ยงการ lag มากเกินไปในเหตุการณ์โหลดเปลี่ยนเร็ว

## อ้างอิง

- <https://www.ni.com/en/innovations/signal-conditioning.html>
- <https://www.mathworks.com/help/simulink/>

## การทดลองที่ 4.2: การเลือก Gain ที่เหมาะสมและการตรวจสอบ Saturation

### จุดประสงค์

1. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $R_G$  กับค่า Gain ของ INA125 และผลต่อช่วงการวัดของ ADC
2. ตรวจสอบสถานะอิ่มตัว (saturation) และกำหนด headroom ที่ปลอดภัยเมื่อใช้โหลดสูงสุด
3. เลือกค่า Gain ที่เหมาะสมสำหรับช่วงการวัด 0–10 kg

### สมมติฐาน

เมื่อ  $R_G$  ลดลง Gain จะเพิ่มขึ้นจาก  $G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$  ทำให้สัญญาณเข้าใกล้ 4095 counts เกยขึ้นและเข้าใกล้การอิ่มตัวมากขึ้น

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - ค่า  $R_G$  (เช่น  $595\Omega$ )
2. ตัวแปรตาม:
  - สัดส่วน headroom (%) เมื่อ 10 kg
3. ตัวแปรควบคุม:
  - ค่า Gain
  - ค่า  $R_G$
  - Sample time ADC
  - สภาพแวดล้อม
  - น้ำหนักที่ทดสอบ

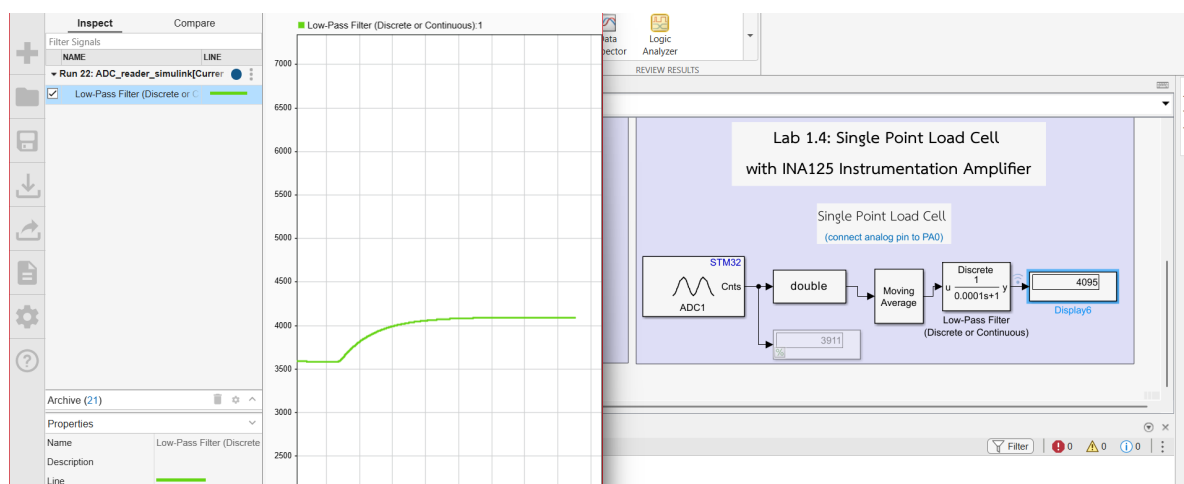
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Datasheet INA125
2. แนวปฏิบัติการออกแบบช่วงสัญญาณสำหรับ ADC

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ปรับ  $R_G$  ที่ค่า แล้ววัด ADC ที่ 10 kg
2. สร้างกราฟ counts vs kg สำหรับแต่ละ  $R_G$  แล้วคำนวณ headroom ที่ 10 kg
3. บันทึกภาพขณะที่สัญญาณเริ่มอิ่มตัว

## ผลการทดลอง



เมื่อเพิ่ม Gain (ลด  $R_G$ ) สัญญาณที่ 10 kg เข้าใกล้ 4095 มากขึ้น ชุดของผู้ทดลองหลังจูนที่ 10 kg กราฟแต่ละเต็มสเกล แสดงให้เห็นช่วงการวัดถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

**สรุปผลการทดลอง** (อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลอง)

ค่า Gain ที่เลือกซึ่งทำให้ 10 kg อยู่ราว 98–99% ของ 4095 counts คือ 609.4 ซึ่งให้ทั้งความละเอียดและความปลอดภัยจาก saturation เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

## อภิปรายผล

การตั้ง Gain สูงเกินไปทำให้เสียงอ้อมตัวจาก noise หรือการสั่นของโหลด ขณะที่ Gain ต่ำเกินไปลดความละเอียดต่อ LSB

## ข้อเสนอแนะ

ควรยืนยันผลด้วยชุดน้ำหนักสุ่ม 4–5 ค่า และคำนวณเชิงเปรียบเทียบระหว่างค่า Gain

## อ้างอิง

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>



### การทดลองที่ 4.3: ความสัมพันธ์ของน้ำหนัก ที่มีผลต่อแรงดันเอาต์พุต

#### จุดประสงค์

1. ระบุความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างน้ำหนักที่กระทำบน Load Cell กับแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$
2. คำนวณตัวชี้วัดประสิทธิภาพ คือ Counts-per-kg

#### สมมติฐาน

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบน Load Cell แรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  จะเพิ่มขึ้นแบบเกือบเชิงเส้นในช่วง 0–10 kg

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - น้ำหนักที่กระทำบน Load Cell (0–10 kg, เพิ่มลดทีละ 0.5 kg)
2. ตัวแปรตาม:
  - แรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  [V] และค่า ADC [counts]
3. ตัวแปรควบคุม:
  - ค่า  $R_G$
  - แรงดันอ้างอิง ADC (3.55 V)
  - อุณหภูมิ
  - รูปแบบการวางน้ำหนัก
  - การกรองสัญญาณ (Moving Average + Low-Pass Filter)
  - Sampling rate

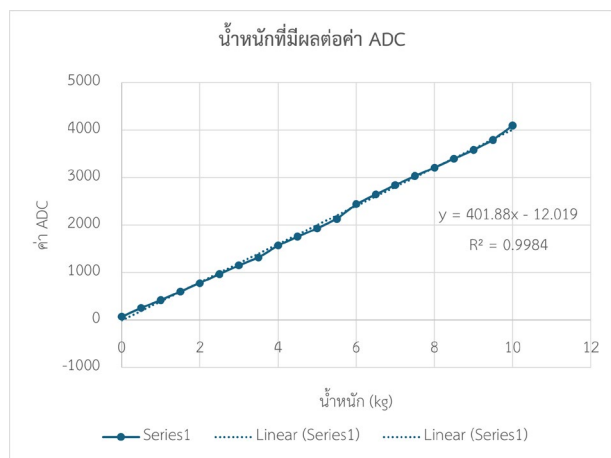
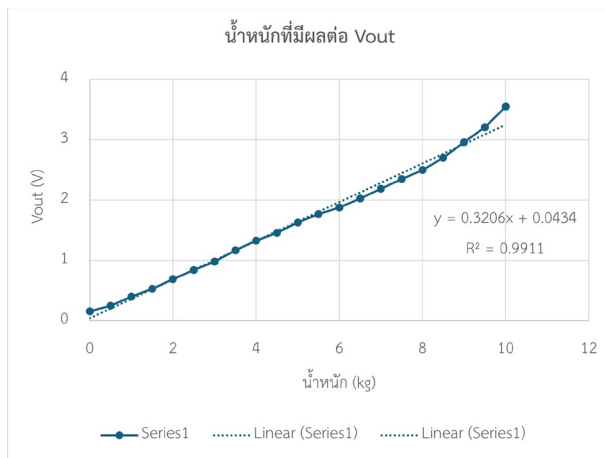
#### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Texas Instruments, INA125 Datasheet – สมการ Gain และการใช้งานกับสะพานวัด
2. National Instruments, Signal Conditioning for Bridge-Based Sensors – แนวปฏิบัติการคอนดิชันสัญญาณ/ Calibrate
3. Omega Engineering, Introduction to Load Cells – พฤติกรรมเชิงเส้น/ความไวของโหลดเซลล์

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตั้งศูนย์ (tare) ที่ 0 kg หลังเปิดใช้ MA+LPF แล้ว
2. วัดค่าที่น้ำหนัก 0, 0.5, 1, ..., 10 kg
3. บันทึก ADC counts และแปลงเป็นแรงดัน  $V_{out} = \text{counts} \times \frac{3.55}{4095}$
4. ทำ Linear regression ระหว่างน้ำหนักกับ  $V_{out}$

## ผลการทดลอง



ได้สมการ ดังนี้

$$V_{out} \approx 0.3206 \text{ (kg)} + 0.0434$$

$$\text{โดยที่ } R^2 \approx 0.9911$$

## สรุปผลการทดลอง

น้ำหนักมีความสัมพันธ์เกือบเชิงเส้นกับ  $V_{out}$  ในช่วง 0–10 kg และสมการที่ได้สามารถนำไปใช้แปลงค่า kg เป็นแรงดันไฟฟ้าได้

## อภิปรายผล

1. ค่า  $R^2$  สูง แสดงความเชิงเส้นที่ดี แต่ปลายสเกล/ใกล้ศูนย์อาจมีความคลาดเคลื่อนจาก non-linearity, hysteresis และ drift ของอ้างอิงแรงดัน
2. การเผื่อ headroom ไว้ประมาณ 1–2% ให้ต่ำกว่า 4095 counts ที่น้ำหนักสูงสุด ช่วยลดความเสี่ยง saturation เมื่อเกิดการสั้น/สัญญาณรบกวน

### ข้อเสนอแนะ

- ทำการวัดแบบขึ้น-ลง เพื่อคำนวณ hysteresis error
- ทดลองซ้ำที่น้ำหนัก 0, 5, 10 kg (mean, SD, %CV)

### อ้างอิง

1. <https://www.ti.com/lit/ds/symmlink/ina125.pdf>
2. <https://www.ni.com/en/innovations/signal-conditioning.html>
3. <https://www.omega.com/en-us/resources/load-cells>

## การทดลองที่ 4.4: การหาสมการ Calibrate และตรวจสอบเชิงเส้นของระบบ Load Cell-INA125

### จุดประสงค์

1. สร้างสมการแปลงค่าน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า ( $V_{out}$ )
2. ตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตตลอดช่วง 0–10 kg
3. ประเมินความสอดคล้องของค่า Gain ที่วัดจริง  $G = V_{out}/V_{in}$  กับ Gain ตามทฤษฎี

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

### สมมติฐาน

เมื่อเพิ่มน้ำหนักบน Load Cell ค่าความต้านทานของ Strain Gauge เปลี่ยน ทำให้  $V_{in}$  และ  $V_{out}$  เพิ่มขึ้น เกือบเชิงเส้น และค่า Gain ที่วัดจริงจะใกล้เคียงกับค่า Gain ตามสมการของ INA125

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น:
  - น้ำหนักที่กระทำบน Load Cell (0–10 kg, ไหล่ระดับที่ละ 0.5 kg)
  - ค่าตัวต้านทาน  $R_G$  ของ INA125 (ปรับด้วย Trimpot 100 k $\Omega$ )
2. ตัวแปรตาม:
  - ค่า  $V_{out}$
  - ค่า ADC (ตั้งแต่ 0–4095)
  - ค่า  $V_{in}$
  - ค่า  $G_{real} = V_{out}/V_{in}$
3. ตัวแปรควบคุม:
  - แรงดันเลี้ยงและแรงดันอ้างอิง ADC
  - อุณหภูมิ
  - รูปแบบการวางน้ำหนัก
  - การกรองสัญญาณ (Moving Average + Low-Pass Filter)
  - Sampling rate

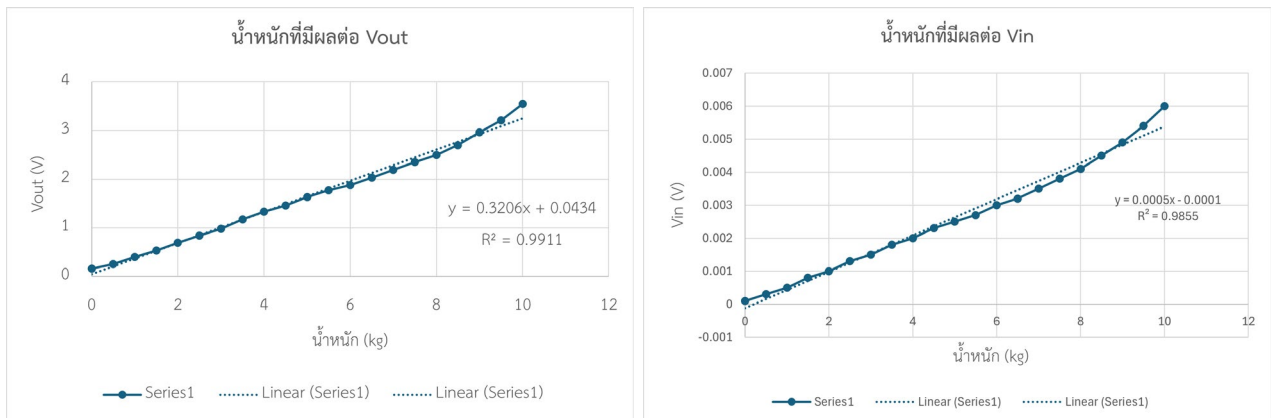
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Datasheet INA125 สำหรับสมการ Gain และการต่อกับสะพานวัด
- บทความด้านการ Calibrate เซนเซอร์ และการประเมินเชิงเส้น

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ต่อวงจร Single-Point Load Cell, Wheatstone Bridge, INA125, PA0 ที่ STM32G474
2. เปิดใช้ MA และ Low-Pass Filter
3. ตั้งศูนย์เครื่องชั่ง (tare) ที่ 0 kg
4. วัดข้อมูลน้ำหนักตั้งแต่ 10 จนถึง 0 kg ทำการบันทึก  $V_{out}$ ,  $V_{in}$ , counts,  $R_G$ ,  $G_{real}$ ,  $G_{calc}$
5. แปลง counts เป็น Volt ( $3.55V = \text{Max}$ ) สร้างคอลัมน์  $V_o^{cal}$  และหาส่วนต่าง  $V_o^{diff}$
6. ทำ Linear regression โดยเปรียบเทียบน้ำหนัก- $V_{out}$  และน้ำหนัก- $V_{in}$  แล้วคำนวณหาค่า  $R^2$

## ผลการทดลอง



ได้สมการ ดังนี้

- น้ำหนักที่มีผลต่อ  $V_{out}$  คือ  $V_{out} \approx 0.3206x + 0.0434 (V)$  โดยที่  $R^2 \approx 0.9911$
- น้ำหนักที่มีผลต่อ  $V_{in}$  คือ  $V_{in} \approx 0.0005x - 0.0001 (V)$  โดยที่  $R^2 \approx 0.9855$
- ค่า  $V_o^{diff}$  มีค่าน้อย แสดงถึงความถูกต้องของการสเกลเปลี่ยน ADC เป็นโวลต์

## สรุปผลการทดลอง

ระบบมีพฤติกรรมเกือบเชิงเส้นตลอด ช่วง 0–10 kg และสมการที่ได้สามารถใช้แปลงค่าน้ำหนัก เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยค่า Gain ที่วัดจริงสอดคล้องกับทฤษฎีของ INA125

## อภิปรายผล

1. ความคลาดเคลื่อนที่ปลายสเกลและใกล้ศูนย์มาจาก non-linearity/hysteresis ของโหลดเซลล์
2. การกรอง MA+LPF มีส่วนทำให้  $R^2$  สูง และลด  $V_o^{diff}$
3. ความสอดคล้องของ  $G_{real}-G_{calc}$  ยืนยันความถูกต้องของสมการหาค่า Gain

## ข้อเสนอแนะ

- ทำการทดลองที่น้ำหนักอื่นๆ เช่น 0, 5, 10 kg เพื่อประเมินความแม่นยำ
- คง headroom ให้เพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงการอิ่มตัวเมื่อโหลดสูงสุด

## อ้างอิง

1. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf>
2. <https://www.ni.com/en/innovations/signal-conditioning.html>

## อภิปรายผล

จากการดำเนินการทดลอง กลุ่มผู้ทดลองได้ทำการชั่งน้ำหนักซ้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งทำการวัดค่าแรงดันขาออก  $V_{out}$  และค่า ADC ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน (แรงดันอ้างอิง 3.55 V, การกรองสัญญาณด้วย Moving Average และ Low-Pass Filter ที่ตั้งค่าไว้คงที่)

ผลการวัดทั้งสามรอบ ให้ค่าที่ตรงกันทุกตำแหน่งของน้ำหนัก โดยไม่มีความแตกต่างในระดับที่ตรวจจับได้จากการแสดงผล ADC แสดงให้เห็นถึง

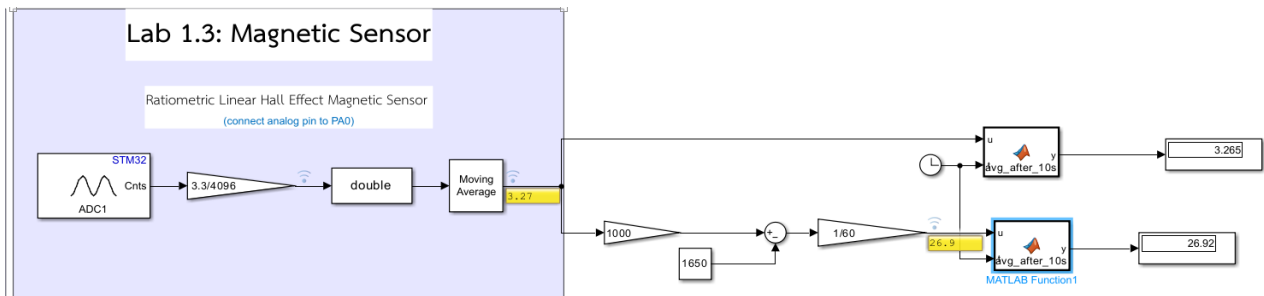
- ความเสถียรของระบบหลังผ่านการกรองสัญญาณ (MA + LPF)
- ความเที่ยงซ้ำ (repeatability) ของ Load Cell และวงจรขยาย INA125
- ความคงที่ของแรงดันอ้างอิงและการต่อวงจร

ดังนั้น คณะผู้ทดลองจึงพิจารณาใช้ผลเฉลี่ยของทั้งสามการทดลองเป็นชุดข้อมูลเดียว เนื่องจากค่าที่ได้ซ้ำตรงกันในทุกจุด และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบ “ตารางเดียว” จึงสามารถแทนค่าผลการวัดทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ โดยสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้อย่างถูกต้อง ไม่จำเป็นต้องแสดงข้อมูลซ้ำหลายชุด ทั้งยังช่วยให้การวิเคราะห์เชิงสมการ Calibrate และการวิเคราะห์เชิงเส้นทำได้ชัดเจนและอ่านง่ายมากขึ้น

ภาคผนวก

น้ำหนัก	Vout	Vin	G (real)	Rg	G (cal)	G (diff)	ADC	Vout (cal)	Vout (diff)
10	3.55	0.006	591.667	101	598.059	-6.393	4095	3.550	0.000
9.5	3.21	0.0054	594.444	100.5	601.015	-6.570	3789	3.285	-0.075
9	2.96	0.0049	604.082	100.2	602.802	1.279	3580	3.104	-0.144
8.5	2.7	0.0045	600.000	99.8	605.202	-5.202	3396	2.944	-0.244
8	2.5	0.0041	609.756	99.1	609.449	0.307	3205	2.778	-0.278
7.5	2.35	0.0038	618.421	99.3	608.230	10.191	3033	2.629	-0.279
7	2.19	0.0035	625.714	99.2	608.839	16.876	2840	2.462	-0.272
6.5	2.03	0.0032	634.375	99.4	607.622	26.753	2647	2.295	-0.265
6	1.88	0.003	626.667	99.4	607.622	19.045	2438	2.114	-0.234
5.5	1.77	0.0027	655.556	99.1	609.449	46.107	2122	1.840	-0.070
5	1.63	0.0025	652.000	96.9	623.195	28.805	1928	1.671	-0.041
4.5	1.46	0.0023	634.783	98.1	615.621	19.162	1755	1.521	-0.061
4	1.33	0.002	665.000	97.3	620.650	44.350	1573	1.364	-0.034
3.5	1.17	0.0018	650.000	96.8	623.835	26.165	1316	1.141	0.029
3	0.98	0.0015	653.333	99.9	604.601	48.733	1148	0.995	-0.015
2.5	0.84	0.0013	646.154	98.8	611.287	34.866	964	0.836	0.004
2	0.69	0.001	690.000	99.1	609.449	80.551	777.5	0.674	0.016
1.5	0.53	0.0008	662.500	99.7	605.805	56.695	596.4	0.517	0.013
1	0.4	0.0005	800.000	99.9	604.601	195.399	415.6	0.360	0.040
0.5	0.25	0.0003	833.333	98	616.245	217.088	254	0.220	0.030
0	0.16	0.0001	1600.000	100	604.000	996.000	72.25	0.063	0.097

ตารางแสดงน้ำหนักที่มีผลต่อค่า Vout, Vin, Rg, ADC ของ Single Point Load Cell การทดลองที่ 4: การหาสมการ Calibrate และ  
ตรวจสอบเชิงเส้นของระบบ Load Cell-INA125



ภาพแสดง โมเดล Simulink ของ Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ในการทดลองที่ 1 และการการทดลองที่ 2

ในภาพ โมเดล Simulink เป็นการนำสัญญาณเอาต์พุตของ Sensor ที่เป็น analog แปลงเป็นโวลต์เอาต์พุต แล้วนำแปลงเป็น double เพื่อความแม่นยำในการคำนวณ แล้วนำค่าที่ได้เข้าบล็อก Moving Average เพื่อหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และกรองสัญญาณรบกวน (Noise) ทำให้สัญญาณที่ได้เรียบขึ้น แล้วแยกไปสองส่วน โดยส่วนแรกนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ยที่ MATLAB Function แล้วแสดงค่าที่ Display และส่วนที่สองนำค่าที่ได้ไปหาค่า Magnetic Flux Density แล้วนำค่าที่ได้ไปเฉลี่ยที่ MATLAB Function แล้วแสดงค่าที่ Display โดยขั้นตอนทั้งหมดเป็นการทำแบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Magnetic Flux Density ในหน่วย SI Derived

```

1 function y = avg_after_10s(u, t)
2 persistent sum_data count final_avg
3 if isempty(sum_data)
4     sum_data = 0;
5     count = 0;
6     final_avg = 0;
7 end
8 if t >= 0 && t < 660
9     sum_data = sum_data + u;
10    count = count + 1;
11 end
12 if t >= 660 && count > 0
13     final_avg = sum_data / count;
14 end
15 y = final_avg;
16 end
17
18

```

ภาพแสดงโค้ดการทำงานของ MATLAB Function ของ Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ในการทดลองที่ 1 และการการทดลองที่ 2

ฟังก์ชันนี้ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $u$  ภายใน 10 นาที่แรก (0-660 วินาที) โดยสะสมค่าที่รับเข้ามาและนับจำนวนครั้ง เมื่อครบ 660 วินาทีจะคำนวณค่าเฉลี่ยในช่วง 60-660 วินาที และคงค่านั้นไว้เป็นผลลัพธ์ตลอดไป