

## LAB 1 : Sensor

### Name

- นายอัศวศักดิ์ณรงค์ แสงสมิ 67340500068
- นายศิริภพ สิทธิวงษ์ 67340500074
- นางสาวศิรินภา สุขบุญส่ง 67340500078

### Objectives

- เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานและคุณสมบัติเฉพาะตัวของเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ
- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง (เช่น ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก, อุณหภูมิ ฯลฯ ขึ้นอยู่กับชนิดของเซนเซอร์)
- เพื่อหาและประเมินความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างตัวแปรทางกายภาพกับสัญญาณเอาต์พุตของเซนเซอร์แต่ละชนิด
- เพื่อศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการทำงานของเซนเซอร์ เช่น ผลกระทบจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กหรือการใช้งาน Shielding
- เพื่อประเมินประสิทธิภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ เช่น ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของสัญญาณเอาต์พุต

## LAB 1.1 : Potentiometer

### การทดลองที่ 1 การทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติของ Potentiometer แต่ละชนิด

#### จุดประสงค์

- เพื่อให้สามารถศึกษาและจำแนกประเภทของ Potentiometer แต่ละชนิดได้
- เพื่อให้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติการตอบสนองทางไฟฟ้าของ Potentiometer แต่ละชนิดได้
- เพื่อให้สามารถตรวจสอบความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของ Potentiometer แต่ละชนิดได้

#### สมมติฐาน

Potentiometer จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปตามลักษณะ Taper ของแต่ละชนิด

- Potentiometer ชนิด Linear การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเป็นสัดส่วนโดยตรง (เชิงเส้น) กับตำแหน่งการปรับ Potentiometer ตลอดช่วง 0% ถึง 100% การปรับตำแหน่งที่เท่ากันจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในปริมาณที่เท่ากัน
- Potentiometer ชนิด Logarithmic การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก (ประมาณ 0% ถึง 50% ของการปรับ) และจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าลงในช่วงหลัง (ประมาณ 50% ถึง 100% ของการปรับ)
- Potentiometer ชนิด Inverse Logarithmic การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงแรก (ประมาณ 0% ถึง 50% ของการปรับ) และจะมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วขึ้นในช่วงหลัง (ประมาณ 50% ถึง 100% ของการปรับ) ซึ่งเป็นรูปแบบตรงกันข้ามกับ Potentiometer ชนิด Logarithmic

#### ตัวแปร

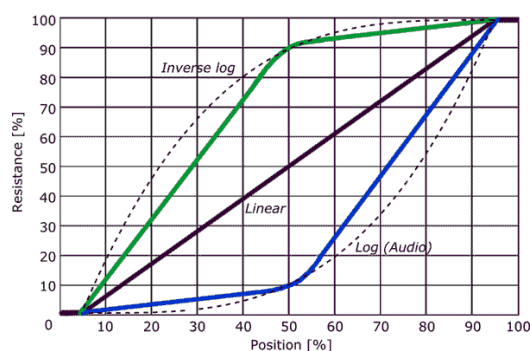
1. ตัวแปรต้น :
  - ชนิดของ Potentiometer
  - ตำแหน่งการปรับ Potentiometer
2. ตัวแปรตาม :
  - แรงดันไฟฟ้า Output จาก Potentiometer
3. ตัวแปรควบคุม :
  - แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูป 1 Potentiometer

Potentiometer คือตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดหนึ่งที่มีสามขั้ว ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (voltage divider) ที่ปรับค่าได้ ขั้วสองข้างของ Potentiometer จะต่อกับความต้านทานรวมของอุปกรณ์ ส่วนขั้วที่สาม (wiper) จะเลื่อนไปตามแถบความต้านทาน ทำให้สามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขา Wiper ได้ตั้งแต่ศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดของแรงดันที่ป้อนเข้า โครงสร้างประกอบด้วยองค์ประกอบความต้านทาน และหน้าสัมผัสที่สามารถเลื่อนได้ ซึ่ง Potentiometer สามารถแบ่งออกได้เป็นประเภท 3 หลัก ๆ ตาม Taper ดังนี้ :



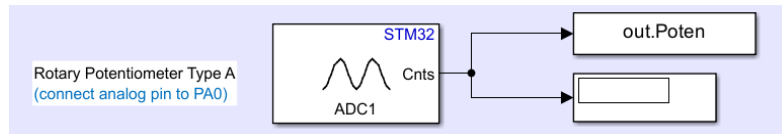
รูป 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Potentiometer แต่ละ Taper

- **Linear Taper** ความต้านทานเปลี่ยนแปลง เชิงเส้นตรง กับตำแหน่งการปรับ
- **Logarithmic Taper** ความต้านทานเปลี่ยนแปลงแบบ Logarithmic (ไม่เชิงเส้น) เร็วในช่วงแรกและช้าลงในช่วงท้าย
- **Inverse Logarithmic Taper** ความต้านทานเปลี่ยนแปลง ตรงกันข้าม กับ Log Taper ช้าในช่วงแรก เร็วในช่วงท้าย

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

- เชื่อมต่อบอร์ด NUCLEO-G474RE เข้ากับ Simulink
- ตั้งค่าโมเดลใน Simulink สำหรับการเก็บข้อมูลการทดลอง
  - a. เลือก Solver Type = Fixed-step และตั้งค่า
    - i. Fixed-step size = 0.01 s
    - ii. Stop time = 0.99 s (เพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวน 100 ค่า)

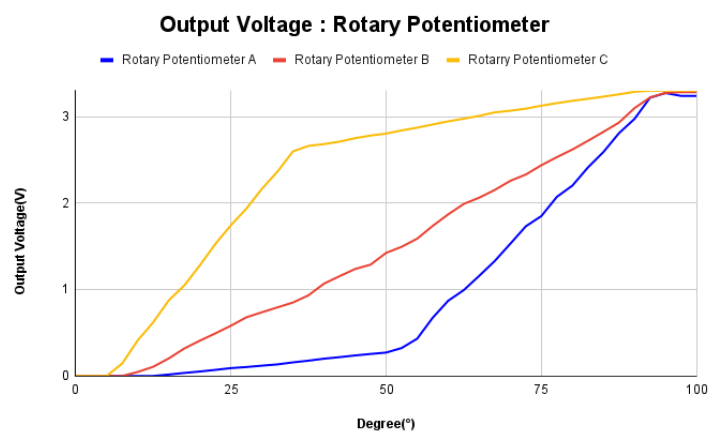
- b. ใช้ Block “To workspace” เพื่อดึงข้อมูลออกจาก Simulink
- i. Save format เป็น Array แบบ 2-D array



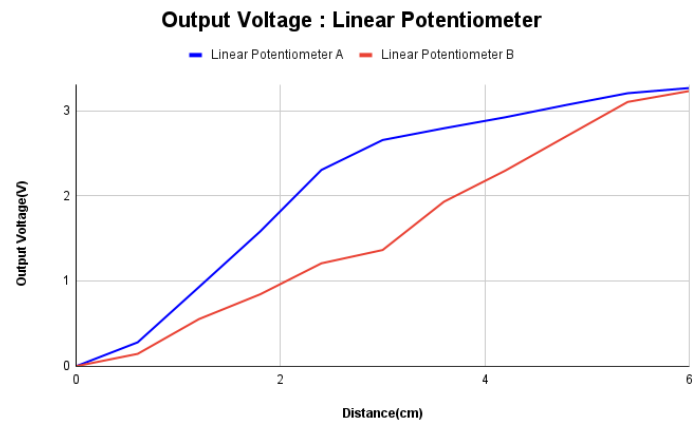
รูป 3 ภาพประกอบบล็อก Simulink

- ดำเนินการทดลองเก็บข้อมูล
  - a. หมุนหรือเลื่อน Potentiometer ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ (เช่น  $2.5^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7.5^\circ$ )
  - b. รัน Simulink เพื่อบันทึกข้อมูลจำนวน 100 ค่าในแต่ละตำแหน่ง
  - c. นำข้อมูลที่ได้จาก Simulink ไปคำนวณใน Excel เพื่อหาค่าเฉลี่ยของแต่ละองศา เช่น ทดลอง Rotary Potentiometer A ที่  $2.5^\circ$  นำค่า 100 ค่าที่  $2.5^\circ$  ที่ได้จาก Simulink มาทำการ Average เพื่อหาค่าเฉลี่ย
- นำผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละการทดลองมาทำการพลอตกราฟใน Excel เพื่อทำการวิเคราะห์

#### ผลการทดลอง



รูป 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage(V) กับ Degree(°) ของ Rotary Potentiometer



รูป 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage(V) กับ Degree(°) ของ Linear Potentiometer

องศาการหมุน(degree)	Output Voltage(V)		
	Rotary Potentiometer A	Rotary Potentiometer B	Rotary Potentiometer C
0	0	0	0
2.5	0	0	0
5	0	0	0
7.5	0	0	178.75
10	0	57.07	510.64
12.5	0	131.84	770.32
15	20.11	251.41	1085.2
17.5	43.31	394.09	1298.92
20	63.58	505.97	1586.52
22.5	87.15	610.88	1894.62
25	112.63	720.54	2162.83
27.5	127.87	841.65	2401.32
30	147.66	914.09	2686.62
32.5	165.79	984.25	2932.91
35	194.92	1054.1	3223.17
37.5	219.24	1157.53	3302.75
40	247.82	1325.26	3327.98
42.5	269.82	1431.9	3363.82
45	294.18	1535.19	3413.24
47.5	315.71	1597.62	3451.25
50	335.58	1766.56	3478.89
52.5	400.62	1854.16	3525.03
55	534.77	1970.4	3563.74
57.5	835.51	2153.77	3610.17
60	1079.91	2319.48	3654.69
62.5	1232.05	2469.23	3692.93
65	1437.79	2559.5	3734.11
67.5	1650.91	2670.1	3783.63
70	1897.76	2801.05	3807.16
72.5	2148.4	2891.82	3837
75	2295.61	3024.73	3879.19
77.5	2571.28	3141.27	3916.56
80	2732.82	3250.62	3949.38
82.5	2993.3	3375.42	3978.43
85	3215.12	3504.49	4009.61
87.5	3485.34	3637.05	4042.76
90	3689.89	3844.44	4078.94
92.5	3994.63	3997.76	4095
95	4061.31	4063.38	4095
97.5	4020.04	4074.09	4095
100	4019.24	4074.15	4094.41

ตาราง 1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage(V) กับ Degree(°) ของ Rotary Potentiometer

ระยะทาง(cm)	Output Voltage(V)	
	Linear Potentiometer A	Linear Potentiometer B
0	0	0
0.6	346.84	178.77
1.2	1151.85	685.23
1.8	1962.5	1046.67
2.4	2859.16	1498.35
3	3295.13	1692.49
3.6	3466.16	2395.85
4.2	3626.43	2848.43
4.8	3806.35	3349.88
5.4	3977.21	3850.17
6	4052.15	4008.29

ตาราง 2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage(V) กับ Degree(°) ของ Rotary Potentiometer

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า Potentiometer แต่ละชนิดให้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตแตกต่างกัน ทั้ง Rotary Potentiometer A, B, C และ Linear Potentiometer A, B ซึ่งสามารถจำแนก Taper ของ Potentiometer แต่ละตัวได้ดังนี้

Rotary Potentiometer A → Inverse Logarithmic Taper

Rotary Potentiometer B → Linear Taper

Rotary Potentiometer C → Logarithmic Taper

Linear Potentiometer A → Inverse Logarithmic Taper

Linear Potentiometer B → Linear Taper

## อภิปรายผล

จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตกับระยะทางและมุมหมุนของ Potentiometer พบว่า Potentiometer แต่ละชนิดมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันไปตามลักษณะของ Taper

### 1. Rotary Potentiometer

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ **Rotary Potentiometer A** การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงช้าในช่วงแรก และมีการเปลี่ยนแปลงที่มากขึ้นในช่วงหลัง ซึ่งมีลักษณะสัญญาณคล้ายกับรูปสัญญาณของ Inverse Logarithmic Taper ตามเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **Rotary Potentiometer B** มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วง ซึ่งแสดงลักษณะการตอบสนองแบบ Linear Taper

**Rotary Potentiometer C** มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ตรงกันข้ามกับ Rotary Potentiometer A และสัญญาณไม่มีความเป็นเชิงเส้นดังนั้นจึงเป็น Logarithmic Taper ตามรูปแบบสัญญาณเอาต์พุตของเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2. Linear Potentiometer

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ **Linear Potentiometer A** มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและช้าลงในช่วงหลัง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ Inverse Logarithmic Taper **Linear Potentiometer B** มีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงการ ซึ่งแสดงลักษณะการตอบสนองแบบ Linear Taper

โดยสรุปแล้ว ทั้ง Linear และ Rotary Potentiometer แสดงคุณสมบัติการแปลงการเคลื่อนที่เชิงกลให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ตามทฤษฎี แต่ความแตกต่างในเส้นกราฟบ่งบอกถึงแรงดันไฟฟ้า Output ความเป็นเชิงเส้น (linearity) และลักษณะสัญญาณเอาต์พุตที่จำเพาะต่อ Potentiometer แต่ละชนิด

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรเก็บผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์
2. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือทฤษฎีที่มีอยู่ เพื่อยืนยันความถูกต้องและเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

## อ้างอิง

<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/potentiometer-taper/#>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Potentiometer>

## การทดลองที่ 2 การออกแบบและสร้างวงจร Schmitt Trigger ด้วยโปรแกรม Simulink

### จุดประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างวงจร Schmitt Trigger ใน Simulink พร้อมทั้งกำหนดค่า Upper และ Lower Threshold ที่เหมาะสม

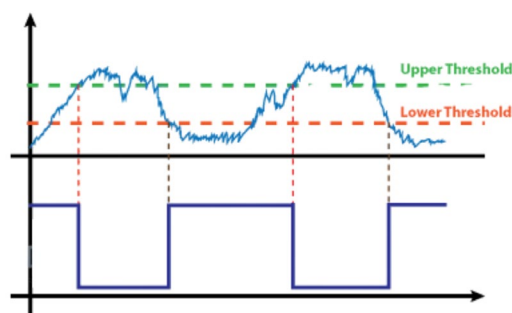
### สมมติฐาน

วงจร Schmitt Trigger สามารถเปลี่ยนสัญญาณแรงดันแอนะล็อกที่มีสัญญาณรบกวนหรือเปลี่ยนแปลงช้า ให้กลายเป็น สัญญาณดิจิทัลเอาต์พุตที่มีการสลับสถานะชัดเจนและเสถียรได้

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น :
  - สัญญาณแรงดันแอนะล็อกอินพุต (Analog Input Voltage) ที่ป้อนเข้าสู่วงจร Schmitt Trigger
  - ค่าการตั้งค่า Upper Threshold และ Lower Threshold ของวงจร Schmitt Trigger
2. ตัวแปรตาม :
  - สัญญาณแรงดันเอาต์พุตดิจิทัล (Digital Output Voltage) จากวงจร Schmitt Trigger
3. ตัวแปรควบคุม :
  - แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูป 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณของ Schmitt Trigger

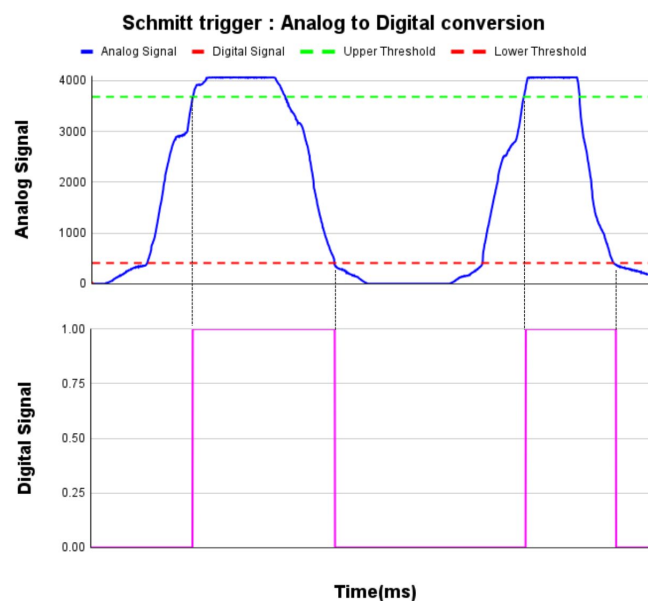


วงจร Schmitt Trigger เป็นวงจรคอมพาราเตอร์ (Comparator) ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติ ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน โดยวงจรจะมีระดับแรงดันเกณฑ์สองค่า ได้แก่ เกณฑ์บน (Upper Threshold Voltage) สำหรับสัญญาณขาเข้าในช่วงที่เพิ่มขึ้น และ เกณฑ์ล่าง (Lower Threshold Voltage) สำหรับสัญญาณขาเข้าในช่วงที่ลดลง ซึ่ง Upper Threshold Voltage และ Lower Threshold Voltage สามารถตั้งได้ตามจุดประสงค์ของการใช้งานในแต่ละสัญญาณ ผลลัพธ์คือ เอาต์พุตของวงจรจะไม่เปลี่ยนสถานะไปมาบ่อยครั้งเมื่อมีสัญญาณรบกวนเล็กน้อยรอบจุดเปรียบเทียบ

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อบอร์ด NUCLEO-G474RE เข้ากับ Simulink
2. สร้างแบบจำลอง Schmitt Trigger ใน Simulink
3. สร้างบล็อกไดอะแกรมจำลองวงจร Schmitt Trigger ใน Simulink พร้อมทั้งกำหนดค่า Upper Threshold และ Lower Threshold
4. ทำการเก็บค่าของสัญญาณ Input (Analog) และ Output (Digital) จากบล็อก Schmitt Trigger เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์การทำงานของวงจร
5. วิเคราะห์ผลโดยการพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel

### ผลการทดลอง



รูป 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุตแบบแอนะล็อกและสัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิทัลของ Schmitt Trigger

## สรุปผลการทดลอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Schmitt Trigger พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตแบบแอนะล็อก มีค่าต่ำกว่าค่า Lower Threshold สัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลจะอยู่ในสถานะ Low (0) และเมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นจนเกินค่า Upper Threshold สัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนเป็นสถานะ High (1) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวงจร Schmitt Trigger ที่ทำหน้าที่ตัดสัณค่าระดับแรงดันให้เป็นสัญญาณดิจิทัลแบบสองสถานะได้อย่างชัดเจน

## อภิปรายผล

ผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่า Schmitt Trigger ที่จำลองจาก Simulink สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องเมื่อสัญญาณต่ำกว่า Lower Threshold สัญญาณเอาต์พุตดิจิทัลจะอยู่ในสถานะ Low (0) เมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นจนเกินค่า Upper Threshold สัญญาณเอาต์พุตจะเปลี่ยนเป็นสถานะ High (1) ซึ่งเป็นไปตามหลักการทำงานของ Schmitt Trigger

ซึ่งทำให้เห็นว่า Schmitt Trigger สามารถทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลได้ และสามารถป้องกันการสลับสถานะของเอาต์พุตจากสัญญาณรบกวนในช่วงค่าก้ำกึ่งได้ตามที่ทฤษฎีได้อธิบายไว้

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรเก็บผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์
2. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือทฤษฎีที่มีอยู่ เพื่อยืนยันความถูกต้องและเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

## อ้างอิง

<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>

<https://www.hackatronic.com/schmitt-trigger-circuit-diagram-working-types-applications/>

<https://www.allelcoelec.com/blog/schmitt-triggers-in-modern-electronics-understanding-their-role-and-capabilities.html>

## LAB1.2: Incremental Encoder

### การทดลองที่ 1 การทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติของ Incremental Encoder

#### จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder
2. เพื่อให้สามารถจำแนกลักษณะของสัญญาณ ทิศทาง และสามารถอ่านค่าสัญญาณได้ถูกต้อง
3. เพื่อให้สามารถประมวลผลสัญญาณ และแปลงสัญญาณเป็นค่าที่ต้องการได้
4. เพื่อให้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติของ Encoder ได้
5. ออกแบบ wrap-around และ homing sequence

#### สมมติฐาน

1. หากเพลาหมุนครบ 1 รอบจะได้จำนวนพัลส์ตามค่า PPR ที่ระบุไว้ในสเปกอุปกรณ์
2. หากสัญญาณ A และ B มีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  จะสามารถระบุทิศทางการหมุนได้
3. หากความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น สัญญาณจะมีความถี่สูงขึ้น
4. หากอ่านค่าแบบ X4 จะได้ความละเอียดของการระบุตำแหน่งสูงกว่าแบบ X1 หรือ X2
5. หากการประมวลผลสัญญาณ และการนับพัลส์มีความถูกต้อง จำนวนพัลส์จะสัมพันธ์เชิงเส้นกับ ตำแหน่งเชิงมุม และความเร็วเชิงมุม

#### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น :
  - ทิศทางการหมุนของเพลา (CW / CWW)
  - วิธีการอ่านสัญญาณ Quadrature (Mode X1, X2, X4)
  - ความเร็วการหมุนเพลา
2. ตัวแปรตาม :
  - ตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position)
  - ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)
  - คุณภาพของสัญญาณ
  - Raw count จาก Encoder
3. ตัวแปรควบคุม :
  - แรงดันไฟเลี้ยงของ Encoder และวงจรอ่านสัญญาณ
  - ค่า Pulses per Revolution (PPR) ของ Encoder

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Incremental encoder คือ เซนเซอร์วัดการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular motion) หรือการเคลื่อนที่เชิงเส้นแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณพัลส์ เพื่อวัดตำแหน่ง และความเร็ว โดยทั่วไปจะมีช่องสัญญาณ 2 คลื่น (A,B) ที่อยู่ในสถานะ Quadrature มีลักษณะของสัญญาณเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) มีเฟสต่างกันประมาณ  $90^\circ$  ซึ่งทำให้สามารถระบุทิศทางการหมุนได้โดยเปรียบเทียบว่าสัญญาณ A ขึ้นก่อน หรือตามหลัง สัญญาณ B (A ขึ้นก่อน หมุนแบบ CW)

ค่าความละเอียด (Resolution) ของ Encoder คือ ค่าที่ใช้บอกระดับความละเอียดของสัญญาณที่ Encoder สามารถแยกแยะได้ในหนึ่งรอบการหมุน สามารถแสดงได้ 2 แบบหลัก ๆ คือ

1. Pulses Per Revolution (PPR) คือ จำนวนพัลส์ที่ออกมาครบหนึ่งรอบของเพลลา เป็นค่าคงที่ของ Encoder
2. Cycles Per Revolution (CPR) คือ จำนวนรอบที่ระบบสามารถนับได้จริงต่อรอบ การนับพัลส์ทุกของขึ้น/ลงของสัญญาณ A และ B ทำให้ระบบสามารถอ่านตำแหน่งได้ละเอียดขึ้น โหมดการอ่านแบบ Quadrature (A/B) มี 3 แบบหลัก คือ

1. X1 นับเฉพาะขอบขาขึ้นหรือขอบขาลงของสัญญาณ A (CPR = PPR)
2. X2 นับขอบขึ้น และขอบลงของสัญญาณ A (CPR = 2\*PPR)
3. X4 นับขอบขึ้น และขอบลงของสัญญาณ A และ B (CPR = 4\*PPR)

สูตรการหาความละเอียดเชิงมุมของ Encoder (Angular Resolution)

$$res_\theta = \frac{2\pi}{CPR} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{pulse}} \right]$$

ตัวแปร

$res_\theta$  (Resolution) [rad/pulse] คือ ขนาดของมุมที่เพลลาหมุนต่อ 1 พัลส์

CPR คือ จำนวนรอบที่ระบบสามารถนับได้จริงต่อรอบ

สูตรการหาตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position)

$$\theta = res_\theta \cdot n_{\text{pulse}} [\text{rad}]$$

ตัวแปร

$n_{\text{pulse}}$  คือ จำนวนพัลส์ที่นับได้ระหว่างจุดอ้างอิงเวลา 2 จุด

สูตรการหาความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)

$$\omega = res_\theta \cdot \frac{d}{dt} n_{\text{pulse}} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

ตัวแปร

$\frac{d}{dt} n_{\text{pulse}}$  คือ จำนวนพัลส์ที่นับได้ส่วนด้วยความต่างของเวลาระหว่างจุดอ้างอิง 2 จุด

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 1. การตั้งค่า IOC

- การเลือก Timers ในการทดลองเลือกใช้ TIM3 เนื่องจากเป็น General purpose timer ใช้งานง่ายและไม่รบกวน Timer ของระบบหลักที่ STM32 ใช้อยู่แล้ว สามารถสร้างสัญญาณ PWM ได้ 4 ช่อง ซึ่ง Timer อื่น ๆ สามารถเลือกใช้ได้แต่จะมีข้อจำกัดในการใช้มากกว่า และมีการทำงานที่ซับซ้อนกว่า การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงาน
- ตั้ง Combined Channel เป็น Encoder mode เพื่ออ่านค่า A และ B จาก encoder
- การตั้งค่า Counter period คือ ค่าที่กำหนดจุดที่ Timer จะรีเซ็ตกลับเป็นศูนย์ การตั้งค่าอยู่ในช่วง 61439 เพื่อให้ค่าใหญ่พอที่จะรองรับค่าที่นับจาก encoder และป้องกันการ Overflow เร็วเกินไป และสามารถตรวจจับการหมุนแบบไป-กลับได้โดยไม่พลาดช่วงที่เปลี่ยนค่า
- ตั้งค่า Encoder mode เพื่อกำหนดการอ่านค่า Quadrature (X1,X2 และ X4) และสามารถกำหนดได้ว่าจะให้ TI1 หรือ TI2 จะเป็นตัวนับหรือตัวกำหนดทิศทาง เช่น กำหนดให้ Encoder mode TI\_1 X1 หมายถึงให้นับขาขึ้นหรือขาลงของขา A หรือ B ที่เสียบอยู่กับ pin ที่กำหนดให้เป็น TI1 และ ขาที่เสียบอยู่กับ TI2 จะกลายเป็นตัวกำหนดทิศทางแทน เป็นต้น (โดยมาตรฐาน TI1 อยู่ที่ขา A และ TI2 อยู่ที่ขา B) และในการทดลองจะตั้งการนับเป็นแบบ x4

### 2. การเตรียมอุปกรณ์และการต่อวงจร

- เชื่อม NUCLEO-G474RE เข้าแล็ปท็อป
- TIM3\_CH1 (TI1 เช็ตเป็น PA6) ต่อที่ขา A และ TIM3\_CH2 (TI2 เช็ตเป็น PA4) ต่อที่ขา B, ต่อ Vcc 3.3 V และ Ground ให้ Encoder

### 3. Simulink Setup

- ตั้งค่าตำแหน่งที่ไฟล์ IOC อยู่และตำแหน่งของ PORT ปัจจุบันที่บอร์ดเสียบอยู่
- Encoder อ่านค่า QEI แบบ X4 และ counter ของ encoder และส่ง raw count ออกมา
- แปลงรูปแบบของข้อมูลเป็น double ด้วยบล็อก Data Type Conversion
- เขียนฟังก์ชัน Wrap-Around เพื่อรองรับการ Overflow ของค่าที่นับจาก encoder และ ออกแบบ Homing Sequence เพื่อกำหนดให้ค่าที่กำลังนับอยู่นั้นรีเซ็ตกลับไปอยู่ที่จุดอ้างอิงเริ่มต้น (ในการทดลองนี้คือตำแหน่งที่ 0) และทำการทดสอบ
- กด Run on Hardware เพื่อเริ่มเก็บสัญญาณจากอุปกรณ์เข้า Simulink

### 4. การตรวจสอบการอ่านค่าพื้นฐาน

- ทดสอบหมุนแกน Encoder ซ้ำๆ เพื่อยืนยันว่าค่าจำนวนครั้งนับ (raw count) เปลี่ยนแปลงตามทิศการหมุน (CW/CCW) อย่างถูกต้อง จากนั้นบันทึกพฤติกรรมการเพิ่มหรือลดของค่า raw count เพื่อใช้ประกอบผลการทดลอง

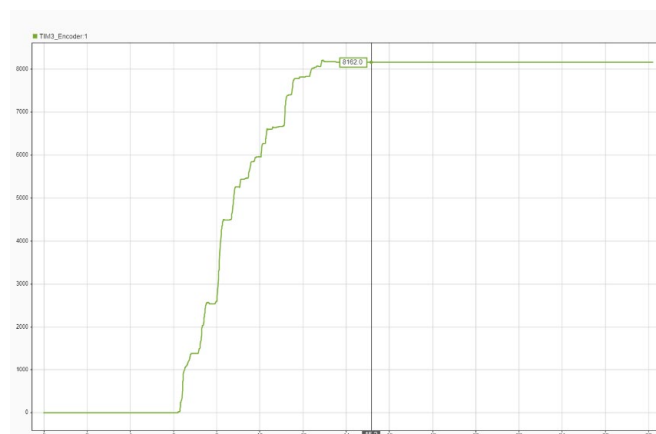
## 5. การเก็บข้อมูล

- วัดและหาค่า PPR ของอุปกรณ์และแปลงเป็นค่า Angular Resolution
- วัดสัญญาณทิศทางของการหมุน CW และ CCW
- เก็บค่า raw count และแปลงเป็น Relative Position, Angular Position และ Angular Velocity
- ใช้ Data Inspector เพื่อตรวจสอบกราฟสัญญาณ และส่งออกข้อมูลในรูปแบบไฟล์รูปภาพ

### ผลการทดลอง

#### 1. หาค่า PPR และคำนวณ Angular Resolution

การหา PPR จะเริ่มจากการหมุน encoder 1 รอบและดูจำนวน raw count ที่นับได้จากกราฟ เนื่องจาก encoder ถูกกำหนดรูปแบบการนับมาเป็นแบบ x4 เราจึงต้องหาร 4 เพื่อหาค่า PPR จริงของอุปกรณ์



รูป 8 กราฟตัวอย่างจากการวัด raw count ด้วยการหมุน encoder 1 รอบ

ค่า raw count ที่เก็บได้จากกราฟการทดลอง 5 ครั้งมีดังนี้

ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	Average
8162	8262	8250	8186	8164	8204.8

ตาราง 3 ตารางค่าที่วัดได้จากการวัดโดยการหมุน encoder 1 รอบ

เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากจึงทำการทดลองเพียง 5 ครั้ง จากการทดลองนี้จึงได้ค่าเฉลี่ยที่ encoder อ่านได้เท่ากับ 8204.8 พัลส์/รอบ และนำเลขนี้ไปหาร 4 จึงมีค่าออกมาดังนี้

$$8204.8 \div 4 = 2051.2$$

เมื่อได้ค่ามาจึงนำไปเทียบกับ datasheet ของ encoder คือ AMT103-V incremental encoder และเจอว่าในส่วนของ output resolution (PPR) นั้นมีรุ่นที่ทำ PPR ได้เท่ากับ 2048 พัลส์/รอบ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเลขที่คำนวณมาได้มากที่สุด กลุ่มเราจึงสรุปว่า encoder นี้มีค่า PPR เท่ากับ 2048 พัลส์/รอบ

ต่อมาหา Angular Resolution หาได้จากสมการ

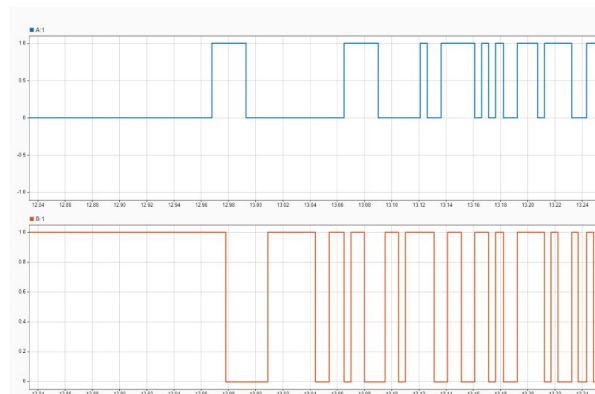
$$\text{res}_\theta = \frac{2\pi}{\text{CPR}} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{pulse}} \right]$$

ซึ่งเมื่อนำค่า PPR ที่หาได้มาใส่สมการจึงได้ค่าเท่ากับ

$$\text{res}_\theta = \frac{2\pi}{4 \cdot 2048} \approx 0.00077 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{pulse}} \right]$$

ดังนั้นค่า Angular Resolution เมื่ออ่านแบบ x4 ของ encoder ตัวนี้จึงมีค่าประมาณ เท่ากับ 0.00077 rad/pulse

## 2. Phase relationship ระหว่างสัญญาณ A และ B

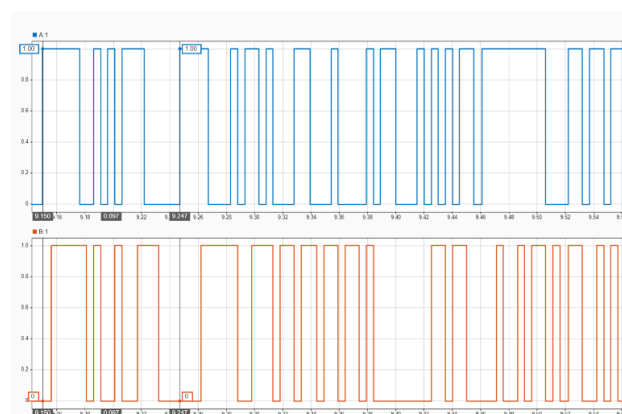


รูป 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ A และ B

จากรูปจะเห็นเมื่อเริ่มหมุน สัญญาณ A เริ่มที่สถานะ Low (0) และสัญญาณ B เท่ากับ High (1) ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าระหว่าง 2 สัญญาณนี้ไม่ได้เริ่มที่เดียวกันและมี Phase Shift อยู่ที่  $90^\circ$

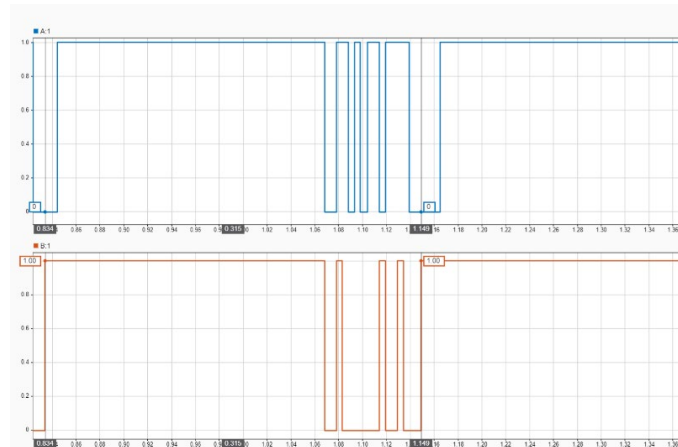
## 3. ทิศทางสัญญาณเมื่อหมุน Encoder ตามเข็ม (CW) และทวนเข็ม (CCW)

การหาทิศทางที่ได้จากกราฟเราจะดูที่เมื่อเริ่มหมุนนั้นสัญญาณ A หรือ B นั้นสัญญาณไหนนำหรือตามจากการดูขาขึ้นของทั้ง 2 สัญญาณเทียบกับ



รูป 10 กราฟสัญญาณเมื่อทำการทำการหมุน encoder ตามเข็ม

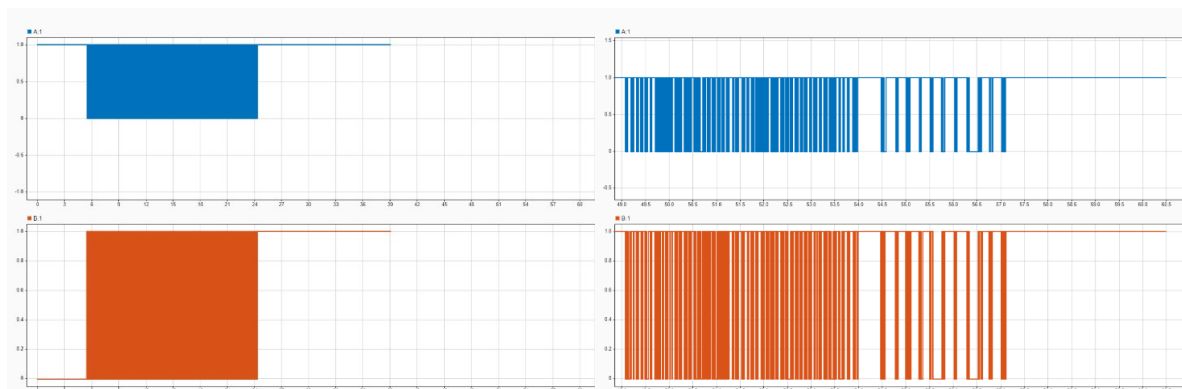
จากภาพนี้เมื่อทำการหมุนในทิศตามเข็ม (CW) ผลที่ได้คือสัญญาณ A นำสัญญาณ B



รูป 11 กราฟสัญญาณเมื่อทำการทำการหมุน encoder ทวนเข็ม

จากภาพนี้เมื่อทำการหมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา (CWW) ผลที่ได้คือสัญญาณ B นำสัญญาณ A

#### 4. คุณภาพของสัญญาณเมื่อหมุนด้วยความเร็วระหว่าง encoder AMT103-V และ encoder รุ่นหนึ่ง

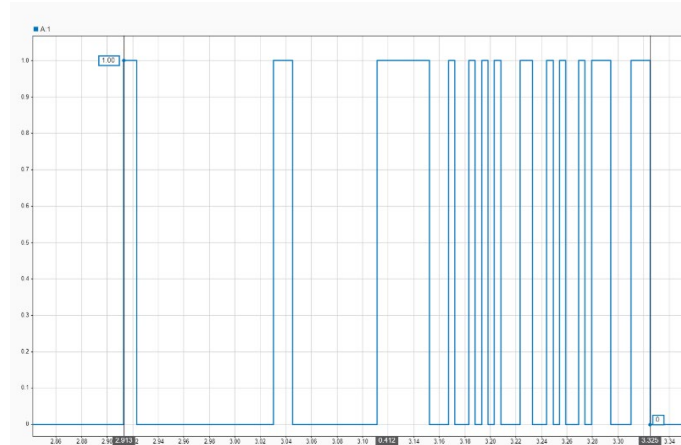


รูป 12 กราฟสัญญาณ A และ B ของ encoder รูปทางซ้ายคือกราฟของ encoder AMT103-V และทางขวาคือกราฟของ encoder รุ่นหนึ่งและทำการหมุน encoder ทั้ง 2 ด้วยความเร็ว

จากรูปทั้ง 2 สัญญาณ A และ B มีความต่างที่ชัดเจนในเรื่องของความห่างระหว่างพัลส์เมื่อหมุนด้วยความเร็ว ด้าน encoder รุ่นหนึ่งเมื่อหมุนด้วยความเร็วมากเท่าไร พัลส์จะยิ่งห่างมากเท่านั้น ซึ่งสามารถบอกได้เป็นนัยว่าความละเอียดของ encoder AMT103-V นั้นมีความละเอียดและคุณภาพมากกว่า encoder รุ่นหนึ่ง

#### 5. การแปลง raw count จากสัญญาณแปลงเป็น Relative Position, Angular Position และ Angular Velocity





รูป 13 กราฟของสัญญาณ A ที่ได้จาก encoder ช่วงหนึ่ง

หา Relative Position ได้จากการกำหนดกรอบอ้างอิงของเวลาช่วงหนึ่งเพื่อหาจำนวนพัลส์ที่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง จากภาพเวลาเริ่มต้นคือ 2.913 วินาที และเวลาตอนปลายเท่ากับ 3.325 วินาที และเมื่อนับจำนวนพัลส์จากกราฟสามารถสรุปได้ทันทีว่า Relative Position นั้นมีค่าเท่ากับ 13 พัลส์

หา Angular Position หาได้จากการนำจำนวนพัลส์ในช่วงเวลาหนึ่งมาคูณด้วย Angular Resolution จากข้อ 1. ตามสูตร

$$\theta = \text{res}_\theta \cdot n_{\text{pulse}} [\text{rad}]$$

นำค่าที่คำนวณได้มาใส่ในสูตรได้ค่าเท่ากับ

$$\theta = 0.00077 \cdot 13 \approx 0.01001 \text{ rad}$$

จากค่าที่ได้มาสามารถสรุปได้ว่า Encoder ได้หมุนไปแล้วมีค่าประมาณเท่ากับ 0.01001 rad

หา Angular Velocity ได้จากการนำ Angular Resolution มาคูณกับจำนวนพัลส์ของช่วงเวลาอ้างอิงหารด้วยความต่างของเวลาในช่วงที่อ้างอิงนั้นคือเวลาปลายลบด้วยเวลาด้านตามสูตร

$$\omega = \text{res}_\theta \cdot \frac{d}{dt} n_{\text{pulse}} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

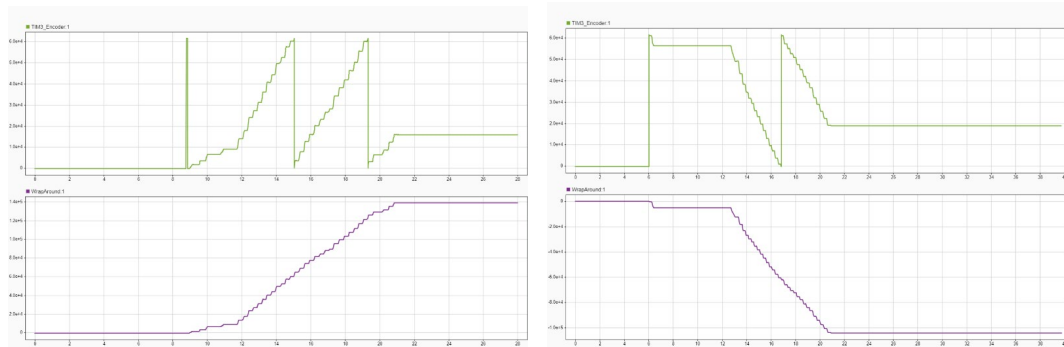
นำค่าที่คำนวณได้มาใส่ในสูตรได้ค่าเท่ากับ

$$\omega = 0.00077 \cdot \frac{13}{3.325 - 2.913} \approx 0.0243 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Angular Velocity ของ encoder ในเวลาระหว่าง 2.913 และ 3.325 จึงมีค่าประมาณเท่ากับ 0.0243 rad/s

## 6. Wrap-Around

Wrap-Around คือวิธีแก้ปัญหาค่าล้นช่วงนับของตัวนับ encoder เมื่อเคาน์เตอร์ที่นับแบบวนรอบ กระโดดกลับจากค่าบนสุดไปเป็น 0 หรือจาก 0 ไปเป็นค่าบนสุด ทำให้ค่าความต่างของจำนวนพัลส์ระหว่างสองตัวอย่างถูกต้องความผิดเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่มาก ทั้งที่ความจริงเปลี่ยนไปเพียง 1 เคาน์ต์เท่านั้น

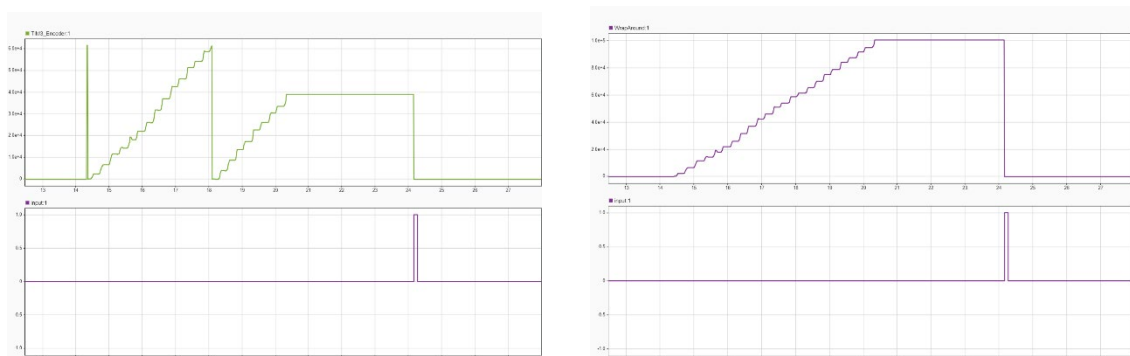


รูป 14 กราฟเปรียบเทียบค่า raw count ก่อนและหลังเข้า Wrap-Around ภาพทางซ้ายคือหุนเพิ่มค่าและทางขวาคือลดค่า raw count

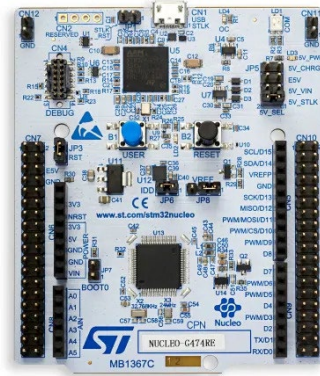
เมื่อหุนเพื่อเพิ่มหรือลดจำนวนไปเรื่อย ๆ ในส่วนของ raw count เมื่ออยู่จุดสูงสุดหรือต่ำสุดตัว raw count จะทำการวนกลับไปตรงกันข้ามทันที แต่ Wrap-Around จะทำให้การนับเพิ่มหรือลดนั้นไม่วนกลับไปตำแหน่งตรง

## 7. Homing Sequence

Homing Sequence คือกระบวนการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้นของระบบ (Home Position) เพื่อให้ค่าตำแหน่งจาก encoder กลับไปที่ตำแหน่งอ้างอิง (ตำแหน่งอ้างอิงในการทดลองนี้คือ 0) โดยในการทดลองนี้จะใช้ปุ่มสีน้ำเงินที่อยู่บนบอร์ด Microcontroller โดยตั้ง pin PC13 ให้เป็น input ในการส่งสัญญาณ High (1) เพื่อทำการรีเซ็ตค่า raw count จาก encoder และ Wrap-Around ให้กลับมาอยู่ที่จุดอ้างอิง



รูป 15 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่า count เมื่อ Homing Sequence ทำงาน โดยภาพทางซ้ายคือ raw count จาก encoder และทางขวาคือจากฟังก์ชัน Wrap-Around



รูป 16 รูปของบอร์ด STM32 Microcontroller NUCLEO-G474RE

### สรุปผลการทดลอง

- ระบบอ่านสัญญาณจาก Incremental Encoder ได้ถูกต้อง เห็นรูปแบบ Quadrature ของช่อง A และ B และใช้ลำดับ phase ยืนยันทิศ CW/CCW ได้
- ทดสอบในโหมดนับ X4 เพียงโหมดเดียว พบจำนวน count ต่อรอบสอดคล้องกับสเปกของอุปกรณ์ (PPR) และคำนวณความละเอียดเชิงมุมได้ถูกต้อง (ความละเอียดเชิงมุมของ X4 เท่ากับ 360 องศาหารด้วยจำนวน count ต่อรอบที่วัดได้)
- การแปลงค่าจาก raw count เป็นจำนวนพัลส์, ตำแหน่งและความเร็วให้แนวโน้มสอดคล้องกับการหมุนจริง
- การแก้ค่าล้นของตัวนับ (wrap-around) ทำให้ข้อมูลตำแหน่งต่อเนื่อง ไม่เกิดการกระโดดของค่า raw count
- กระบวนการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (homing sequence) ทำงานได้ เมื่อถึงเงื่อนไขโฮม ระบบตั้งตำแหน่งเป็นศูนย์และกลับสู่การวัดปกติ

### อภิปรายผล

- โหมด X4 ให้ความละเอียดสูงสุด จึงประเมินมุมและความเร็วได้ละเอียด แต่ไวต่อสัญญาณรบกวนและความไม่สม่ำเสมอของขอบสัญญาณมากกว่าโหมดที่ละเอียดน้อยกว่า
- จำนวน count ต่อรอบที่วัดได้สอดคล้องกับสเปก ความคลาดเคลื่อนที่พบอธิบายได้จากการหมุนด้วยมือและความละเอียดของเวลาเก็บข้อมูล
- การเลือกค่า Counter Period มีผลต่อโอกาสเกิดการล้น ต้องมีขั้นตอน wrap-around ก่อนคำนวณมุมและความเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงค่ากระโดด

- แม้ทดลองจริงเฉพาะ X4 แต่สามารถยืนยันเชิงตรรกะความสัมพันธ์ของ X1 และ X2 ได้จากอัตราส่วนของ count ต่อรอบ (X4 มากกว่า X2 สองเท่า และมากกว่า X1 สี่เท่า)
- วิธีโฮมที่ใช้สวิตช์/เก็อนไซบนบอร์ดใช้งานได้สะดวก แต่ความทำซ้ำและความแม่นยำต่ำกว่าวิธีอ้างอิงตำแหน่งทางกลเฉพาะ เช่น ช่อง Z (ช่อง index) หรือสวิตช์ลิมิต

### ข้อเสนอแนะ

- ใช้แหล่งหมุนความเร็วคงที่แทนการหมุนด้วยมือ และระบุช่วงเวลาเก็บข้อมูลให้ชัดเจน
- เพิ่มการกรองเชิงตัวเลขอย่างง่ายในช่องความเร็ว เช่น ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เพื่อลดการสั่นของค่าที่คำนวณ
- ปรับ Counter Period ให้เหมาะกับย่านความเร็วที่ใช้งาน ลดโอกาสล้นโดยไม่เสียความละเอียดเกินจำเป็น
- ทำขั้นตอน wrap-around ก่อนการคำนวณตำแหน่งและความเร็วทุกครั้ง
- หากต้องการความแม่นยำของจุดอ้างอิงสูงขึ้น ให้ใช้ช่อง Z ของ encoder หรือสวิตช์ลิมิตสำหรับโฮม

### อ้างอิง

[Incremental Encoder Signals 101](#) (สัญญาณที่ได้จาก Encoder และค่าความละเอียด)

[https://drive.google.com/file/d/1mFoqoDe\\_3F\\_oH\\_7Rjq2fEOqsgK6uGTP4/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1mFoqoDe_3F_oH_7Rjq2fEOqsgK6uGTP4/view?usp=sharing) (หลักการ  
ทำงานของ Encoder)

[https://drive.google.com/file/d/1O-dHPAbwDYKtX--1FO\\_iwLBVp6TBAVcP/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1O-dHPAbwDYKtX--1FO_iwLBVp6TBAVcP/view?usp=sharing)  
(Overflow)

<https://drive.google.com/file/d/1MvFKP1fLEzK535CkfOCROg3cMpON89WR/view?usp=sharing>  
(AMT103-V Incremental encoder datasheet)

## LAB 1.3 : Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

**การทดลองที่ 1** การทดลองวิเคราะห์สัญญาณ Output ของ Magnetic Sensor เมื่อ Magnetic Flux Density เปลี่ยนแปลงไป

### จุดประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต ต่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก
2. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Magnetic Sensor) และพฤติกรรมการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ Magnetic Flux Density
3. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relationship) ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Magnetic Sensor กับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

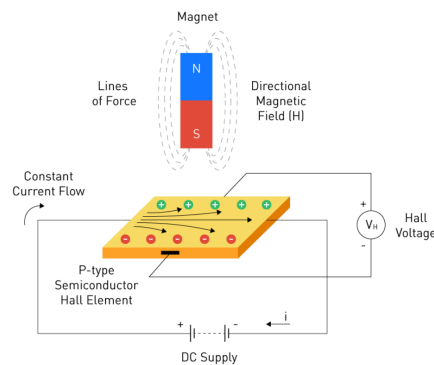
### สมมติฐาน

เมื่อค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) เพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของ Magnetic Sensor จะเพิ่มขึ้นตามในลักษณะเชิงเส้น (Linear Relationship)

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น :
  - ความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยควบคุมจากความสูงของอุปกรณ์การทดลอง
2. ตัวแปรตาม :
  - แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
3. ตัวแปรควบคุม :
  - แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายให้กับ Magnetic Sensor (Supply Voltage)
  - ทิศทางการวางตัวของเซนเซอร์ต่อสนามแม่เหล็ก

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูป 17 ภาพประกอบการทำงานของ Linear Hall Effect Sensor

Linear Hall Effect Sensor ใช้ปรากฏการณ์ Hall Effect ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำในขณะที่มีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแส จะเกิดแรงดันไฟฟ้า (Hall Voltage) ขึ้นในทิศที่ตั้งฉากกับทั้งสองทิศทางนั้น แรงดันนี้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อเซนเซอร์

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อบอร์ด NUCLEO-G474RE เข้ากับโปรแกรม Simulink เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการทดลอง
2. ตั้งค่าโมเดลใน Simulink สำหรับการเก็บข้อมูลการทดลอง แบบเดียวกับการทดลอง Potentiometer
3. นำข้อมูลแรงดันเอาต์พุตที่ได้จาก Simulink มาวิเคราะห์ต่อใน Microsoft Excel โดยทำการแปลงค่าข้อมูลจากสัญญาณอะนาล็อกให้อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า (Voltage Output) จากนั้นคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density, B) ตามสมการ
4. นำข้อมูลแรงดันเอาต์พุตที่ได้จาก Simulink มาวิเคราะห์ต่อใน Microsoft Excel โดยทำการแปลงค่าข้อมูลจากสัญญาณอะนาล็อกให้อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้า (Voltage Output) จากนั้นคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density, B) ตามสมการ

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

ตัวแปร

$V_{out}$  คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (mV)

$V_Q$  คือ แรงดันไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (mV)

$B$  คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) (mT)

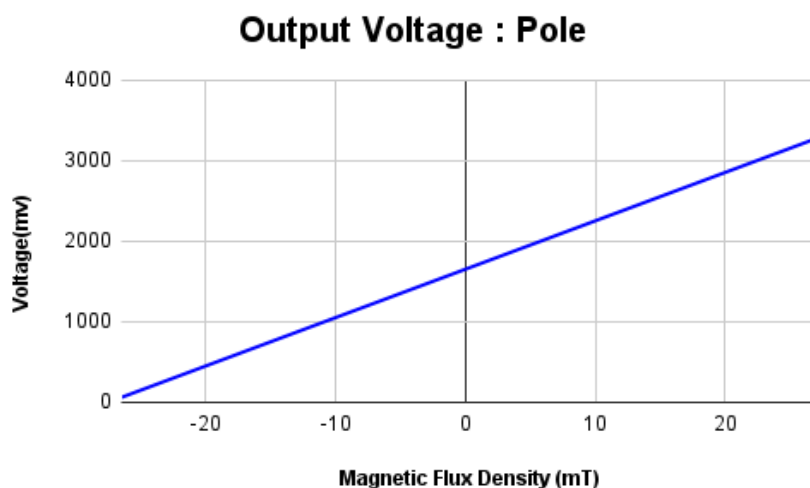
$Sensitivity_{25^\circ C}$  คือ ค่าความไวของเซนเซอร์ที่อุณหภูมิทั่วไป ( $25^\circ C$ )

$S_{TC}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ ( $\frac{\%}{^\circ C}$ )

$T_A$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ )

- นำค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ที่ได้จากการคำนวณ มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับความเข้มสนามแม่เหล็ก เพื่อประเมินลักษณะการตอบสนองของเซนเซอร์

#### ผลการทดลอง



รูป 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Flux Density (mT) กับ Voltage (mV)

ความสูง(cm)	Voltage(mV)		ความสูง(cm)	Magnetic Flux Density (mT)	
	ขั้ว S (Non-Shield)	ขั้ว N (Non-Shield)		ขั้ว S (Non-Shield)	ขั้ว N (Non-Shield)
1	3273.219727	59.10351563	1	27.05366211	-26.51494141
1.5	3273.687012	67.37768555	1.5	27.0614502	-26.37703857
2	2667.956543	526.2275391	2	16.96594238	-18.72954102
2.5	2069.654297	1257.061523	2.5	6.994238281	-6.548974609
3	1860.415283	1500.3479	3	3.506921387	-2.49420166
3.5	1796.687256	1595.005371	3.5	2.444787598	-0.916577148
4	1784.0625	1641.186035	4	2.234375	-0.146899414

ตาราง 4 ตารางความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Flux Density (mT) กับ Voltage (mV)

#### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า แรงดันเอาต์พุตของ Magnetic Sensor มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) โดยเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นบวก ซึ่งสอดคล้องกับขั้ว S แรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นตาม ในขณะที่เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็นลบ ซึ่งสอดคล้องกับขั้ว N แรงดันเอาต์พุตจะลดลงอย่างสม่ำเสมอ

## อภิปรายผล

ผลการทดลองที่พบว่าแรงดันเอาต์พุตของ Magnetic Sensor มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก เกิดจากหลักการทำงานของ Hall Effect ซึ่งระบุว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแผ่นสารกึ่งตัวนำ และมีสนามแม่เหล็กมากระทำในแนวตั้งฉากกับทิศทางกระแส ทำให้เกิด ความต่างศักย์ (Hall Voltage) ขึ้นที่ด้านข้างของแผ่นสารนั้น

เมื่อขั้ว S ของแม่เหล็กเข้าใกล้เซนเซอร์ สนามแม่เหล็กที่เข้าสู่ทิศทางหนึ่งจะทำให้แรงผลักของอิเล็กตรอนเกิดในทิศที่ทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อขั้ว N เข้าใกล้ สนามแม่เหล็กที่กลับทิศจะทำให้แรงดันเอาต์พุตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นลบ

## ข้อเสนอแนะ

1. ควรเก็บผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์
2. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือทฤษฎีที่มีอยู่ เพื่อยืนยันความถูกต้องและเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

## อ้างอิง

<https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/hall-effect-sensors-a-comprehensive-guide>

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf?ts=1753064339462>



## การทดลองที่ 2 การทดลองวิเคราะห์คุณสมบัติของ Magnetic Field Shielding (การเบี่ยงเบนสนามแม่เหล็ก)

### จุดประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของและผลกระทบของการใช้ Magnetic Field Shielding
2. เพื่อทำความเข้าใจหลักการทำงานของ Magnetic Field Shielding

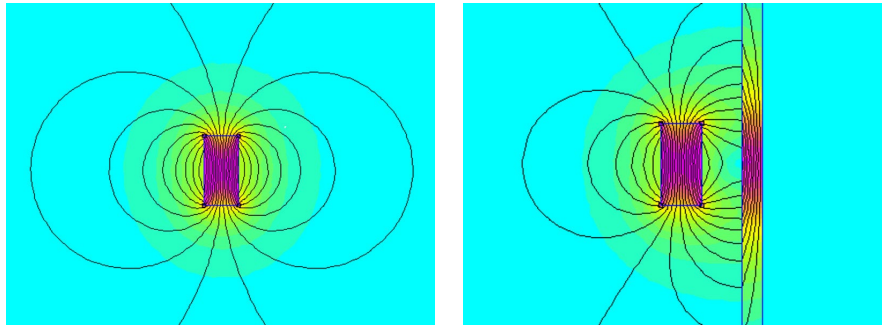
### สมมติฐาน

การใช้แผ่นชิลด์แม่เหล็ก (Magnetic Shielding) จำทำให้ ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เซนเซอร์วัดได้จะลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีแผ่นชิลด์

### ตัวแปร

1. ตัวแปรต้น :
  - ความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยควบคุมจากความสูงของอุปกรณ์การทดลอง
  - สถานะการมีแผ่นชิลด์และไม่มีแผ่นชิลด์ของแม่เหล็ก
2. ตัวแปรตาม :
  - แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
3. ตัวแปรควบคุม :
  - แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายให้กับ Magnetic Sensor (Supply Voltage)
  - ทิศทางการวางตัวของเซนเซอร์ต่อสนามแม่เหล็ก

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูป 19 ภาพเปรียบเทียบระหว่าง สนามแม่เหล็กแบบมี Shield และไม่มี Shield

การทำงานของ Magnetic Shield การทำ Magnetic Shield โดยทั่วไปจะใช้วัสดุที่มีค่าสภาพซึมผ่านแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) สูง เช่น โลหะผสมนิเกิล-เหล็ก (nickel-iron alloys) หลักการทำงานคือ เมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมาตกกระทบวัสดุที่มีสภาพซึมผ่านแม่เหล็กสูง วัสดุนั้นจะ "ดึงดูด" เส้นแรงแม่เหล็กเข้ามาในตัวมันเอง ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนใหญ่ไหลผ่านไปตามเส้นทางภายในวัสดุกำบังแทนที่จะทะลุผ่านพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน เปรียบเสมือนวัสดุกำบังเป็นทางด่วนสำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณที่ต้องการป้องกันลดลงอย่างมาก

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อบอร์ด NUCLEO-G474RE เข้ากับโปรแกรม Simulink เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการทดลอง
2. ตั้งค่าโมเดลใน Simulink สำหรับการเก็บข้อมูลการทดลอง แบบเดียวกับการทดลอง Potentiometer
3. เก็บค่าการทดลอง โดยการเปลี่ยนความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งควบคุมจากความสูงของอุปกรณ์การทดลอง และทำการใส่ Shield ในแต่ละระยะความสูง
4. นำค่าที่ได้จากสัญญาณ Analog ที่อ่านจาก Controller มาแปลงเป็นแรงดัน Output
5. นำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการพลอตกราฟใน Excel แล้วทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลระหว่างแรงดันไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของมี Shiled และไม่มี Shield

## ผลการทดลอง

ความสูง(cm)	Magnetic Flux Density (mT)			
	South pole		North pole	
	Non-Shield	Shield	Non-Shield	Shield
1	27.05	27.04	-26.51	-26.2
1.5	27.06	27.03	-26.38	-26.3
2	16.97	13.75	-18.73	-14.6
2.5	6.99	6.09	-6.55	-5.59
3	3.51	3.41	-2.49	-1.8
3.5	2.44	2.33	-0.92	-0.8
4	2.23	1.85	-0.15	0.01

ความสูง(cm)	Voltage(mV)			
	South pole		North pole	
	Non-Shield	Shield	Non-Shield	Shield
1	3273.22	3272.3	59.1	76.65
1.5	3273.69	3272	67.38	73.15
2	2667.96	2475.2	526.23	773.36
2.5	2069.65	2015.7	1257.06	1314.8
3	1860.42	1854.7	1500.35	1541.9
3.5	1796.69	1789.5	1595.01	1601.7
4	1784.06	1760.9	1641.19	1650.9

ตาราง 5 ตารางผลการทดลองของ Magnetic Flux Density (mT) กับ Voltage (mV)  
เมื่อมี Shield และไม่มี Shield

## สรุปผลการทดลอง

ผลของ Magnetic Shielding ต่อความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก จากผลการทดลองเมื่อใช้ Magnetic Shielding ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์ ลดลง อย่างชัดเจนในทุก ระยะความสูง ทั้งสำหรับขั้ว South pole และ North pole เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ Shielding

## อภิปรายผล

การใช้แผ่นชีลด์แม่เหล็ก (Magnetic Shielding) ทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เซ็นเซอร์วัดได้ลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้แผ่นชีลด์ ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ หลักการทำงานของกำบังแม่เหล็กที่ใช้วัสดุที่มีค่า สภาพซึมผ่านแม่เหล็กสูง (High Permeability Materials) ในการเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กไม่ให้เข้าสู่พื้นที่ที่ต้องการ ป้องกัน

จากข้อมูลในตาราง Magnetic Flux Density พบว่าค่าความหนาแน่นฟลักซ์ลดลงทั้งในขั้ว South pole และ North pole เมื่อมีการใช้ Shield แสดงให้เห็นถึงการลดทอนสนามแม่เหล็กภายนอก โดยเฉพาะอย่างมากที่ระยะห่าง จากแหล่งกำเนิดแม่เหล็กมาก ๆ (เช่น ที่ความสูง 2 cm, 2.5 cm) จะเห็นความแตกต่างระหว่างค่า Non-Shield และ Shield ได้ชัดเจน

เหตุผลที่ Magnetic Shielding ลดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้ เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำ Shielding ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะผสมที่มีค่าสภาพซึมผ่านแม่เหล็กสูงมาก เมื่อมีสนามแม่เหล็กจากภายนอก มาตกกระทบบนแผ่น Shielding ตัว Shielding จะทำหน้าที่เป็น "ทางลัด" หรือ "ทางด่วน" ให้กับเส้นแรงแม่เหล็ก โดยจะดึงดูดเส้นแรงแม่เหล็กเหล่านั้นให้ไหลผ่านไปตามเนื้อวัสดุของ Shield แทนที่จะทะลุผ่านเข้าไปยังพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในบริเวณภายใน Shield ลดลงได้

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรเก็บผลการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์
2. ควรนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรือทฤษฎีที่มีอยู่ เพื่อยืนยันความถูกต้องและเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์

### อ้างอิง

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\\_shielding#Magnetic\\_shielding](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_shielding#Magnetic_shielding)

<https://www.kjmagnetics.com/blog/magnetic-shielding-materials>

## Lab 1.4: Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

**การทดลองที่ 1** การทดลองหาค่า Gain ที่เหมาะสม สำหรับการขยายและแปลงสัญญาณของ Load cell  
ให้กลายเป็นน้ำหนักจริงในหน่วย SI

### จุดประสงค์

1. เพื่อทำความเข้าใจหลักการทำงานของโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Wheatstone bridge) และเหตุผลที่ต้องใช้ Instrumentation Amplifier เพื่อขยายสัญญาณระดับ mV/V ให้เหมาะสมกับการวัดบนบอร์ด STM32G474RE ผ่าน ADC 12-bit (0–4095)
2. เพื่อออกแบบและคำนวณค่า Gain ของ INA125 เพื่อให้ช่วงแรงดันขาออกไม่อิ่มตัวและครอบคลุมช่วงน้ำหนักทดลอง โดยเลือก/ปรับค่าตัวต้านทาน  $R_G$  (ผ่านทริมพอต 100 k $\Omega$ ) ตามสมการเกนของ INA125
3. ประเมินแหล่งกำเนิดความคลาดเคลื่อน เช่น สัญญาณรบกวน, ตำแหน่งการวางน้ำหนัก, เกนขยาย, แหล่งจ่ายไฟ และเสนอแนวทางลดข้อผิดพลาดเชิงทดลอง
4. เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณ Input ของตัว Load cell กับน้ำหนักที่คำนวณได้ใน Simulink

### สมมติฐาน

1. ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กดบนโหลดเซลล์กับแรงดันเอาต์พุตหลังขยายจะเป็นเชิงเส้นในช่วงการใช้งานที่กำหนด (ไม่เกินพิกัดใกล้เต็มสเกลของเซ็นเซอร์)
2. หลังทำการตั้งศูนย์ (tare) แล้ว ค่าเอาต์พุตที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุกจะคงที่ในกรอบความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากสัญญาณรบกวนและดริฟต์ของอุณหภูมิ
3. เมื่อเลือกเกน INA125 อย่างเหมาะสม เอาต์พุตจะไม่อิ่มตัว (saturation) ตลอดช่วงน้ำหนักทดลองและยังคงอยู่ในย่านแรงดันที่ ADC 12-bit วัดได้อย่างมีรายละเอียดพอเพียง
4. หากแหล่งจ่ายและการต่อวงจรถูกต้อง รวมถึงการวางน้ำหนักที่จุดกึ่งกลางแพลตฟอร์มข้อผิดพลาดจากการเยื้องศูนย์ (eccentric load) จะน้อยและไม่กระทบ slope หลักของกราฟคาลิเบรต

## ตัวแปร

### 1. ตัวแปรต้น :

- น้ำหนักที่เพิ่มเข้าสู่โหลดเซลล์
- ค่าเกนของ INA125 ซึ่งกำหนดด้วย RG (ทริมพอต 100 k $\Omega$ ) ตามสมการเกน

### 2. ตัวแปรตาม :

- แรงดันเอาต์พุตจาก INA125 (หลังขยาย)
- ค่าที่อ่านได้จาก ADC ของ STM32G474RE (0–4095 สำหรับ 12-bit) และค่าน้ำหนักที่คำนวณจากสมการคาลิเบรต

### 3. ตัวแปรควบคุม :

- แหล่งจ่ายไฟและการต่อวงจร (E+, E- เป็น Vcc และ Ground; A+, A- เช้าขาอินพุตแอมป์)
- การตั้งค่า ADC/Simulink ให้คงที่ตลอดการเก็บข้อมูล (โหมด, ความละเอียด, การบันทึกสัญญาณ/Data Inspector)

## เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจคือทรานส์ดิวเซอร์ที่แปลงแรง/น้ำหนักให้เป็นการยืด-หดของโครงสร้างโลหะ ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แล้วต่อเป็นสะพานวัดค่าแบบ Wheatstone เพื่อตรวจจับแรงดันดิฟเฟอเรนเชียลระดับมิลลิโวลต์ต่อโวลต์ (mV/V) จึงต้องใช้แอมป์ความเที่ยงตรงสูงขยายสัญญาณก่อนส่งเข้า ADC. ผู้ผลิตและคู่มือเชิงเทคนิคอธิบายตรงกันว่าโหลดเซลล์สเตรนเกจโดยมากระบุความไวเป็น “mV/V” เช่น 2 mV/V ที่แรงดันเลี้ยง 5 V จะให้สัญญาณเต็มสเกลราว 10 mV, ซึ่งคงสัดส่วนตามแรงดันเลี้ยงและเหมาะกับการวัดแบบบริดจ์.

ตัวอย่างโหลดเซลล์รุ่น YZC-131A (straight-bar) ระบุไว้ว่าส่งออกสัญญาณขนาดเล็กมากและต้องขยายด้วยวงจรเฉพาะ การออกแบบโครงสร้างเน้นให้วัดแรงในแกนเดียวเป็นหลัก (ลดผลจากแรงขวาง/แรงดัด).

Wheatstone bridge คือวงจรตัวต้านทาน 4 ตัวต่อเป็น “สะพาน” เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานขนาดเล็กอย่างแม่นยำ เมื่อบริดจ์สมดุล แรงดันเอาต์พุต  $\approx 0$ ; เมื่อเกิดสเตรน ความต้านทานบางแขนจะเพิ่ม/ลด ทำให้สะพานเสียสมดุลและเกิดแรงดันดิฟเฟอเรนเชียลตามสัดส่วนของสเตรน. บทความอุตสาหกรรม/วิศวกรรมสรุปว่า Wheatstone เหมาะอย่างยิ่งต่อการอ่านสเตรนเกจเพราะขยาย “ความไวต่อ  $\Delta R$ ” และเอื้อให้ชดเชยอุณหภูมิด้วยการจัดวางเกจแบบครึ่งบริดจ์/เต็มบริดจ์. คำอธิบายจากผู้ผลิตระบบชั่งน้ำหนักชี้ให้เห็นการตีความหน่วย mV/V ในบริดจ์-เบสเซนเซอร์ และเหตุผลที่ใช้บริดจ์เพื่อให้ผลลัพธ์ไม่ไหลตามความผันผวนของแหล่งจ่าย (เพราะวัดเป็นอัตราส่วนต่อ  $V_{exc}$ ).

สเตรนเกจแบบโลหะฟอยล์มีความสัมพันธ์พื้นฐาน  $\Delta R/R = GF \cdot \varepsilon$  โดย GF (gauge factor) มักใกล้เคียง ~2 สำหรับเกจโลหะทั่วไป และอาจมีส่วนของโพรง/พีโซเรซิสที่ไปด้วยตามวัสดุ ทำให้ความไวสูงขึ้นหรือต่ำลง. เอกสารมาตรฐานของวงการ (Vishay/Micro-Measurements) และบรรณานุกรมเชิงทฤษฎีสรุปสมการ GF รวมถึงปัจจัยอุณหภูมิ/ทรานส์เวิร์สเซนซิวิตีที่มีผลต่อความถูกต้อง. แหล่งความรู้เชิงปฏิบัติจาก HBM (เดิม HBM) รวบรวมพื้นฐานการเลือกเกจ สารยึดติด การติดตั้ง และเทคนิคลดข้อผิดพลาดภาคสนาม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อเส้นตรง/ดริฟต์/ฮิสเทอรีซิสในงานชั่งน้ำหนัก.

สถาปัตยกรรม “2-op-amp instrumentation amplifier” ใช้โอปแอมป์สองตัวทำบัฟเฟอร์/ขยายที่อินพุตทั้งสอง แล้วลบสัญญาณเพื่อให้ได้เอาต์พุตเชิงดิฟเฟอเรนเชียลพร้อม CMRR ที่ดีขึ้นกว่าดิฟเฟอเรนเชียลแอมป์แบบโอปแอมป์เดียว แต่ยังมีข้อจำกัดด้าน input common-mode range และข้อจำกัดเมื่อต้องการขับพลาเยต์เดียวต้องออกแบบค่าเกน/อ้างอิงให้เลี่ยงการอิ่มตัวของแอมป์. บทความ MT-062 ของ Analog Devices แจกแจงข้อจำกัดเหล่านี้พร้อมเงื่อนไขแรงดันที่ทำให้วงจรยังอยู่ในย่านเชิงเส้น.

ในงานทดลองด้านโหลดเซลล์ มักเลือกไอซีอินสตรูเมนเทชันแอมป์สำเร็จรูป เช่น TI INA125 ซึ่งรวมเครือข่ายตัวต้านทานแมตช์ภายในและแหล่งอ้างอิงสำหรับป้อนไฟบริดจ์ พร้อมสมการเกนมาตรฐาน

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}, V_{out} = G(V_{in+} - V_{in-})$$

โดย

- $R_G$  คือตัวต้านทานค่าหนึ่งเพื่อหาค่าเกน
- $V_{out}$  คือค่า Voltage หลังผ่านการ amplify มาแล้ว
- $G$  คือค่าเกนจาก amplify
- $V_{in+}$  คือขาหัวบวกของ load cells หรือ A+ เมื่อนำเข้า Amplifier
- $V_{in-}$  คือขาหัวลบของ load cells หรือ A- เมื่อนำเข้า Amplifier

ช่วยตั้งเกนครอบคลุมช่วง mV/V ของบริดจ์โดยคุมดริฟต์/ความแม่นยำได้ง่ายกว่าแบบประกอบด้วยโอปแอมป์แยกชิ้น

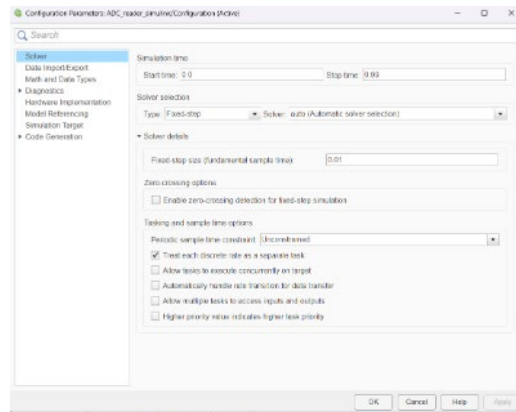
## ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 1. การเตรียมอุปกรณ์และการต่อวงจร

- เชื่อม NUCLEO-G474RE เข้าแล็ปท็อป
- ต่อขา E+ กับ Vcc 5V, E- กับ Ground, ขา A+ กับ pin PA1 (ADC2), ขา A- กับ pin PB1 (ADC3) และ ขา out จาก omp-ap กับ pin PA0 (ADC1)

## 2. Simulink Setup

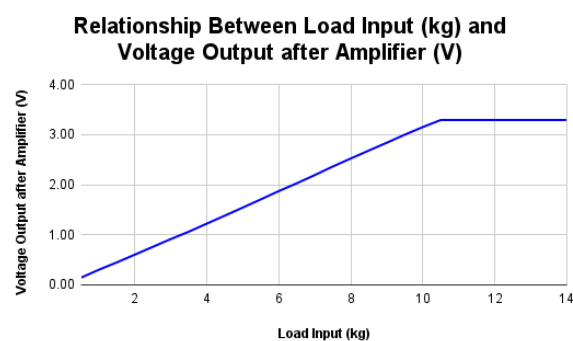
- a) เลือก Solver Type = Fixed-step และตั้งค่า
  - i) Fixed-step size = 0.01 s
  - ii) Stop time = 0.99 s (เพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวน 100 ค่า)



รูป 20 ภาพประกอบการตั้งค่า Solver Simulink

- b) แปลงค่า bits ที่ ADC อ่านได้เป็น Voltage ที่ microcontroller วัดได้ และส่งออกข้อมูล
  - i) ทำแปลงโดยพื้นฐานของ
  - ii) Save format เป็น Array แบบ 2-D array

## ผลการทดลอง

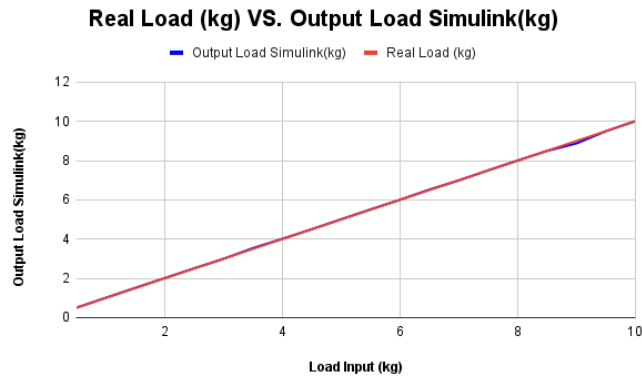


รูป 21 กราฟแสดง Saturation ที่เกิดขึ้นของ Single Point Load Cell  
เมื่อน้ำหนักที่ตัว Single Point Load Cell มีค่ามากกว่า 10 kg

Load Input (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
Voltage Output after Amplifier (V)	0.14	0.3	0.45	0.6	0.76	0.92	1.06	1.22	1.38	1.55	1.71	1.87	2.03	2.19	2.37	2.53	2.68	2.84	3	3.15	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3

ตาราง 6 ตาแสดง Saturation ที่เกิดขึ้นของ Single Point Load Cell  
เมื่อน้ำหนักที่ตัว Single Point Load Cell มีค่ามากกว่า 10 kg



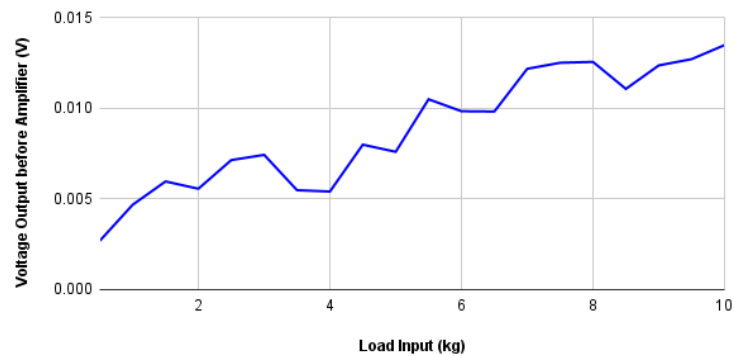


รูป 22 กราฟเปรียบเทียบและแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load Input ที่เกิดขึ้นจริง กับ Load ที่ Simulink สามารถคำนวณได้แบบ Realtime

Load Input (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Real Load (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Output Load Simulink (kg)	0.5016	1.007	1.511	2.008	2.506	2.990	3.538	4.011	4.500	5.009	5.510	6.000	6.522	6.989	7.503	8.004	8.493	8.876	9.497	10.014

ตาราง 7 ตารางเปรียบเทียบและแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load Input ที่เกิดขึ้นจริง กับ Load ที่ Simulink สามารถคำนวณได้แบบ Realtime

**Relationship Between Load Input (kg) and Voltage Output before Amplifier (V)**



รูป 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Output ของตัว Single Point Load Cell ( $V_{in+}-V_{in-}$ ) กับ แรงที่กระทำต่อ Single Point Load Cell ที่มีการแปรผันตรงกัน

Load Input (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Voltage Output before Amplifier (V)	0.003	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.005	0.005	0.008	0.008	0.011	0.01	0.01	0.012	0.013	0.013	0.011	0.012	0.013	0.013

ตาราง 8 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ Output ของตัว Single Point Load Cell ( $V_{in+}-V_{in-}$ ) กับ แรงที่กระทำต่อ Single Point Load Cell ที่มีการแปรผันตรงกัน

สาเหตุความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดจากชุดโหนดเซลล์กับเครื่องชั่งดิจิทัล ได้แก่ การวางน้ำหนักไม่ ชั่ว ตำแหน่งกึ่งกลางหรือเกิดแรงดัดจากโครงยึด; เกนรวมสูงทำให้ช่วงบนของ ADC ใกล้อิ่มตัว / ขนสเกลการอ้างอิง แรงดันระหว่าง Vexc กับ Vref ของ ADC ไม่สอดคล้อง (ไม่เป็น ratiometric) หรือแหล่งจ่ายไม่นิ่ง; สัญญาณรบกวนสูง / การกรองและการเฉลี่ยไม่เพียงพอสมการคาลิเบรตใช้จุดน้อยหรือไม่มีรอบขึ้น-ลงทำให้สโลป/ออฟเซตเพี้ยน หน่วยที่ใช้ต่างกัน (kg กับ N) ความละเอียดและการปัดเศษของเครื่องชั่งการเดินสาย / กราวด์/ ชิลด์ไม่เหมาะสม และเวลาอ่านค่าไม่เพียงพอให้ค่านิ่งก่อนบันทึกผล

### สรุปผลการทดลอง

1. Saturation ที่เกิดขึ้นของ Single Point Load Cell เกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักที่ตัว Single Point Load Cell ได้รับมีค่ามากกว่า 10 kg ซึ่งทำให้เกิดช่วง Saturation
2. สรุปค่า Gain ที่กลุ่มเลือกใช้คือ 300 เนื่องจากเป็นค่า Gain ที่ทำให้ขนาดข้อมูลมีความกว้างมากที่สุด สำหรับการประมวลผลข้อมูล (รายละเอียดเพิ่มเติมอยู่ในภาคผนวก)
3. การทดลองยืนยันว่าโหนดเซลล์แบบสเตรนเกจที่ต่อเป็นบริดจ์และขยายด้วย INA125 ให้เอาต์พุตสอดคล้องกับสมมติฐาน “เชิงเส้นในช่วงใช้งาน”: ค่าเฉลี่ย ADC เพิ่มขึ้นตามระดับน้ำหนักที่ทดสอบตั้งแต่ 500 – 10,500 ได้อย่าง เกือบเส้นตรง ( $R^2 \approx 0.9999$  จากการฟิตเส้นตรงค่าเฉลี่ยต่อระดับ) ขณะเดียวกันสัญญาณที่วัดได้จากบริดจ์หลังขยายมี  $A+ \approx 2.718 \text{ V}$ ,  $A- \approx 2.710 \text{ V}$  ให้ผลต่างเฉลี่ย  $\approx 8.72 \text{ mV}$  และเพิ่มจากประมาณ 2.7 mV (ที่ระดับ 500) ไปถึง  $\approx 14.6 \text{ mV}$  (ที่ระดับ 10,500) ตามแนวโน้มของน้ำหนักจริงที่ป้อนเข้า ระบบอ่านค่า ADC ครอบคลุมช่วง 154–4095 counts โดยพบการชนเพดาน 4095 ประมาณ 3.93% เมื่อใกล้สุดช่วง แสดงว่าการตั้งเกนปัจจุบันใช้สเกลได้คุ้มค่าแต่ “ชิดเพดาน” เล็กน้อย ในภาพรวมระบบทำงานได้ถูกต้องตามทฤษฎีของบริดจ์/อินแอมป์ เหมาะสำหรับสร้าง สมการคาลิเบรตเชิงเส้น ADC คือน้ำหนัก เพื่อนำไปใช้งานจริงในรายงาน

### อภิปรายผล

- ผลชุดนี้สะท้อนว่าระบบบริดจ์หลังขยายให้สัญญาณต่างศักย์เฉลี่ยระหว่างขา  $A+$  กับ  $A-$  ราว 8.72 mV ( $A+ \approx 2.718 \text{ V}$ ,  $A- \approx 2.710 \text{ V}$  จากข้อมูลที่บันทึก) ซึ่งเป็นระดับที่สอดคล้องกับธรรมชาติของโหนดเซลล์แบบมิลลิโวลต์ต่อโวลต์ (mV/V) เมื่อขับด้วยบริดจ์และขยายด้วยอินสตรูเมนต์เช่นแอมป์

ก่อนเข้า ADC. นี้อธิบายได้ว่าทำไมแรงดันดิฟเฟอเรนเชียลจึง “เล็กมาก” แต่ยังเพียงพอเมื่อคุณ  
เกณฑ์ตั้งไว้ในการทดลองนี้

- มองที่ฟังก์ชันค่า ADC ที่ได้ครอบคลุมตั้งแต่ 154 ถึง 4095 และพบตัวอย่างเช่นเต็มสเกล 4095  
ประมาณ 3.93% ของทั้งหมด แปลว่า Gain รวมของช่วงบน “ชิดเพดาน” อยู่ข้างถ้าวัตถุประสงค์  
คือเก็บกราฟคาลิเบรตให้เรียบสวยทั่วทั้งสเกล ควรลดเกนลงเล็กน้อยหรือเพื่อเฮดรูมให้ ADC มากขึ้น  
(ADC ของ STM32 โหมด 12-บิตแปลงได้ 0–4095 ตามสเปกมาตรฐาน)
- จุดที่ควรบันทึกไว้ในรายงานเพื่อความครบถ้วนเชิงวิศวกรรมคือ เหตุผลของการตั้งเกนและเฮดรูม:  
ระบุสมการเกนของอินแอมป์ที่ใช้ในชุดทดลองเช่น INA125 ซึ่งตั้งเกนด้วยตัวต้านทานตัวเดียวตาม  
 $G = 4 + 60k\Omega/R_G$  แล้วชี้ให้เห็นว่าการเลือก  $R_G$  ปัจจุบันทำให้สเกลใกล้เต็มช่วง ADC  
จึงเสนอปรับลดเล็กน้อยเพื่อกันการอิ่มตัวในจุดบนสุดโดยไม่เสียความละเอียดในช่วงกลางสเกล

### ข้อเสนอแนะ

- เฮดรูมของ ADC: มีข้อมูลชน 4095 ทำให้ลดเกนรวมเล็กน้อยเพื่อให้ค่าสูงสุดอยู่ราว 90–95%  
ของสเกล (เช่น ~3800–3900 counts) จะคาลิเบรตช่วงบนได้สวยกว่าและไม่บิดจากการอิ่มตัว  
ตัวอย่างคำนวณ (กรณี  $V_{ref\_ADC} = 3.3\text{ V}$  และค่าสูงสุดของบริดจ์  $14.6\text{ mV}$ ): กำหนด  $V_{out\_FS} \approx$   
 $3.06\text{ V}$   $G = 3.06/0.0146 = 209$ ,  $G$  สำหรับ INA125 ใช้  $R_G = \frac{60k\Omega}{(G-4)} = 292\Omega$  (จัดค่า  
 $R_G$  ใกล้ประมาณ  $300\ \Omega$  ด้วยตัวต้านทาน/ทริมเมอร์ค่าเล็ก)
- การอ่านสัญญาณให้เนียน: ใช้ค่าเฉลี่ย/มัธยฐานจาก  $N$  ตัวอย่างต่อจุด (เช่น 50–200 ตัวอย่าง)  
และกำหนดเวลาเก็บให้พอสำหรับค่าออกจากอาการสั่น/ตั้งหลังวางน้ำหนัก
- วางน้ำหนักที่กึ่งกลางตำแหน่งเดิมทุกครั้ง เพื่อลดผลจากการวางไม่ตรงจุดซึ่งทำให้ค่าคลาดเคลื่อน โดย  
ไม่เกี่ยวกับวงจร
- เฉลี่ยหลายตัวอย่างต่อจุด (เช่น 50–200 ตัวอย่าง) และให้เวลาค่า “นิ่ง” หลังวางน้ำหนักก่อนบันทึก  
จะได้ค่ากลางที่เสถียรกว่า

### อ้างอิง (ใส่แค่ Link)

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P9yBSAS>

<https://drive.google.com/file/d/1-s3E8F-ftTOSrJy5ac4g5y9-SrcLVnCn/view?usp=sharing>

<https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/strain-measurement-basics/strain-gauge-fundamentals>

<https://www.hbm.com/en/6896/strain-%20measurement-basics/>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge)

<https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/wheatstone->

[bridge?srltid=AfmBOor1lRgGzd96OHOKbgeUkm0Y-6uZfxRhSu2D-OnLjX9WjzyswBhl](https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/wheatstone-bridge?srltid=AfmBOor1lRgGzd96OHOKbgeUkm0Y-6uZfxRhSu2D-OnLjX9WjzyswBhl)

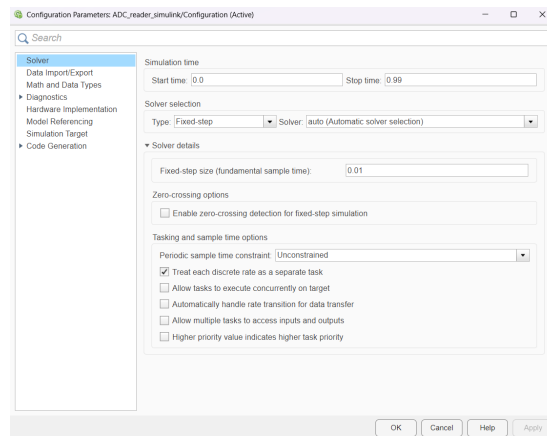
<https://drive.google.com/file/d/1CzSnxN2G1pNjUgOly7IlhfYBmn0DenPY/view?usp=sharing>

<https://www.ti.com/product/INA125>

## ภาคผนวก

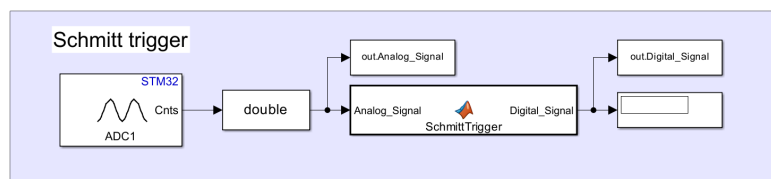
### Potentiometer :

- การตั้งค่า Solver สำหรับการทดลอง



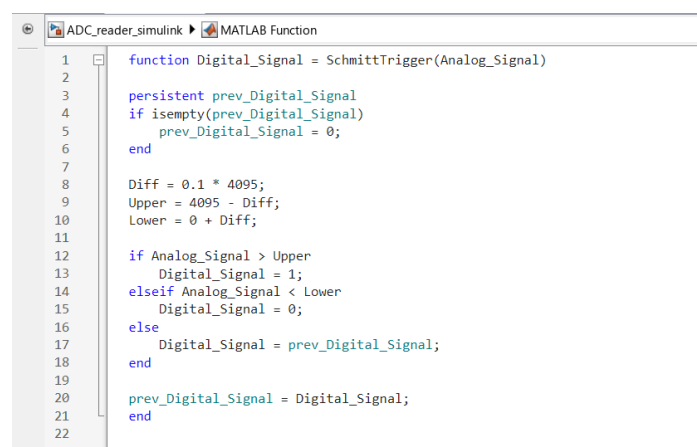
รูป 24 การตั้งค่า Solver สำหรับการทดลอง

- โครงสร้าง Simulink สำหรับวงจร Schmitt trigger



รูป 25 โครงสร้างโมเดล Simulink Schmitt trigger

- รายละเอียดโค้ดภายใน บล็อก Simulink Schmitt trigger function



รูป 26 รายละเอียดโค้ดภายใน Simulink Schmitt trigger function

โค้ดมีทั้งหมด 29 บรรทัดและมีการทำงานดังนี้

บรรทัดที่ 1 : ประกาศชื่อฟังก์ชัน ตัวแปร Input และตัวแปร Output

บรรทัดที่ 3-6 : สร้าง ตัวแปร prev\_Digital\_Signal ไว้สำหรับเก็บค่าตัวแปรของ Digital Output ใน State ก่อนหน้า ตัวแปรนี้ใช้สำหรับเก็บค่า Digital Output ไว้ในกรณีที่ค่าสัญญาณอยู่ระหว่างกลาง ไม่มากกว่า Upper Threshold หรือน้อยกว่า Lower Threshold

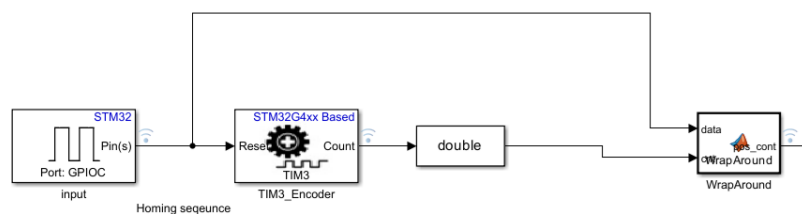
บรรทัดที่ 8-10 : สร้างตัวแปรกำหนดค่า Lower และ Upper Threshold สำหรับการทำงานของ วงจร Schmitt Trigger

บรรทัดที่ 12-18 : if Condition สำหรับการวิเคราะห์เงื่อนไขของสัญญาณ Analog input ว่า มากกว่า Upper หรือน้อยกว่า Lower Threshold แล้ว Output ออกเป็นสัญญาณ Digital เพื่อ จำลองการทำงานของวงจร Schmitt Trigger

บรรทัดที่ 20 : เก็บค่า Digital Output ไว้สำหรับกรณีที่ Analog Input ไม่มากกว่า หรือน้อยกว่า Upper Lower Threshold

## Encoder :

- โครงสร้างของ Homing Sequence และ Wrap-Around



รูป 27 โครงสร้างการทำงานใน Simulink

```
function pos_cnt = WrapAround(data,cnt)
persistent last_cnt acc
if isempty(last_cnt)
    last_cnt = int32(cnt);
    acc = int64(0);
end
%homing sequence for wrap around
if data == 1
    last_cnt = int32(0);
    acc = int64(0);
end
MAX_COUNT = int32(61439);
RANGE = int32(MAX_COUNT) + int32(1); % 61440
HALF = RANGE/2;

delta = int32(cnt) - last_cnt;

% detect wrap
if delta > HALF
    delta = delta - RANGE; % clockwise large positive -> negative jump (wrap backward)
elseif delta < -HALF
    delta = delta + RANGE; % counterclockwise large negative -> positive jump (wrap forward)
end
acc = acc + int64(delta); % accumulate corrected change
pos_cnt = double(acc);
last_cnt = int32(cnt);
end
```

รูป 28 โค้ดในการสร้างฟังก์ชัน Wrap-Around

- Wrap-Around

โค้ดมีทั้งหมด 29 บรรทัดและมีการทำงานดังนี้

บรรทัดที่ 1 : ประกาศ output ของฟังก์ชันชื่อ pos\_cout และ กำหนด input จำนวน 2 ตัวแปรในฟังก์ชันคือ data รับมาจากการกดปุ่มสวิตช์ที่อยู่นบนบอร์ด Microcontroller และ cnt คือค่า raw count ที่ได้จาก encoder

บรรทัดที่ 2 : ประกาศตัวแปรแบบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อฟังก์ชันจบที่คล้ายกับการใช้ static ใน C/C++ ชื่อ persistent โดยตั้งชื่อตัวแปรคือ last\_cnt เพื่อเก็บค่าที่อ่านได้ก่อนหน้าของ raw count และ acc คือ accumulate หรือตัวสะสมเพื่อส่งออกข้อมูลที่ไม่เกิดการ overflow จาก raw count ของ encoder ไปยัง output

บรรทัดที่ 3-6 : คือการกำหนดค่าให้ตัวแปร last\_cnt และ acc หาก last\_cnt ไม่มีการกำหนดค่าไว้หรือ NULL ให้กำหนดทั้ง 2 ตัวเป็นค่า 0 โดยมีการใช้ built-in function อย่าง int32 และ int64 เนื่องจากใน Matlab function ไม่สามารถเก็บค่า persistent ในรูปแบบเป็น double ได้ จึงต้องใช้ฟังก์ชันเพื่อกำหนดประเภท โดย

Int32() คือประเภท int แบบ Signed 32-bit ที่เก็บค่าได้ตั้งแต่  $[-2^{16}, 2^{16}-1]$

Int64() คือประเภท int แบบ Signed 64-bit ที่เก็บค่าได้ตั้งแต่  $[-2^{32}, 2^{32}-1]$

บรรทัดที่ 8-11 : เมื่อมีการกดปุ่มสวิตช์บนบอร์ด microcontroller จะมี pulse ขาขึ้นหรือสัญญาณ High (1) ขึ้นมา เมื่อเจอสัญญาณนี้ให้ฟังก์ชัน Wrap-Around รีเซ็ตค่าที่นับได้กลับไปจุดอ้างอิงหรือตำแหน่งที่ 0

บรรทัดที่ 13-17 : กำหนด 4 ตัวแปรคือ MAX\_COUNT คือค่าที่ encoder จะสามารถส่งข้อมูลได้ตาม counter period ที่ตั้งไว้, RANGE คือระยะห่างรวมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายการกำหนดเขตนำไปหาค่ากลางของ counter period ต่อไป มีค่าเท่ากับ 61440, HALF คือค่ากลางเพื่อนำไปใช้หาค่าที่วนซ้ำหรือ overflow ต่อไป มีค่าเท่ากับ 30720 และ delta เพื่อตรวจจับค่ากระโดดเมื่อ raw count จาก encoder เกิด overflow

บรรทัดที่ 18-24: เป็นการตรวจสอบค่ากระโดดหรือ overflow ของ encoder โดยการทำงานคือหาก delta ซึ่งสมมุติกำหนดค่าให้เป็น 61439 หมายความว่าเป็นการหมุนลดจำนวนจาก 0 มาเป็น 61439 และ Half คือ 30720 ซึ่งจะเข้าเงื่อนไขแรกและ delta จะเปลี่ยนค่ากลายเป็น delta - RANGE หรือ  $61439 - 61440$  นั่นเท่ากับ -1 ซึ่งจะทำให้เลขนับต่อไปได้โดยไม่เกิดการกระโดดของค่าอีก ในเงื่อนไขอีกตัวทำงานคล้ายกันแต่ delta จะกลายเป็น +1 แทน

บรรทัดที่ 25-29: ช่วงสุดท้ายของโค้ดเป็นการกำหนดค่าของ Wrap-Around ที่ถูกต้องและนำข้อมูลออกเป็น output โดยตัวแปร acc ทำการสะสมค่าเพิ่มหรือลดจาก delta และให้ส่งออก acc เป็น output โดยมีการเปลี่ยนประเภทของตัวแปรให้เป็น double เพื่อนำไปแสดงผลในกราฟอีกทีและเก็บค่า raw count ปัจจุบันไว้ใน last\_cnt เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการนับตัวอื่นๆต่อไป

- Homing sequence

สร้างบล็อก digital read เพื่อรับค่าจากการกดปุ่มสวิตช์เงินบนบอร์ด microcontroller และตั้งค่าบล็อกที่ใช้ในการอ่านค่า raw count จาก encoder ให้สามารถรีเซ็ตได้เมื่อมีสัญญาณ High เข้ามา จากนั้นลากเส้นบล็อกนี้เข้าไปที่ encoder และ Wrap-Around เพื่อให้แต่ละบล็อกสามารถอ่านค่าของปุ่มได้และทำการรีเซ็ตค่าทุกครั้งที่เกิดปุ่ม (การรีเซ็ต Wrap-Around ถูกอธิบายไว้ในบรรทัดที่ 8-11 ของโค้ดไว้แล้ว)

### Single Point Load Cell :

- การเลือกค่า Gain ค่า Gain ที่กลุ่มเลือกใช้สำหรับการขยายสัญญาณจาก Single Point Load Cell ผ่าน Op-amp คือ 300 เนื่องจากเป็นค่า Gain ที่ทำให้ช่วงของข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลมีความละเอียดสูงที่สุด และมีความกว้างของข้อมูลมากที่สุด การคิดค่า Gain นี้ทางกลุ่มเริ่มจากการอ่านค่าสัญญาณที่ได้จาก Single Point Load Cell ก่อนโดยไม่มีการแปลงสัญญาณใด ๆ เพื่อที่จะดูขนาดสัญญาณดิบของตัว Single Point Load cell ซึ่งทางกลุ่มพบว่า เมื่อ Single Point Load cell รับน้ำหนักที่ 1 kg ค่าผลต่างศักย์ของแรงดันไฟฟ้า Output ของตัว Single Point Load Cell จากทั้งขา A+ และ A- จะอยู่ที่ 1.1 mV และเมื่อเพิ่มน้ำหนักไปที่ 2 kg ก็พบว่า ค่าผลต่างของแรงดันไฟฟ้า Output ของตัว Single Point Load Cell จากทั้ง A+ และ A- จะอยู่ที่ประมาณ 2.2 mV ซึ่งจากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าผลต่างของแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักที่ตัว Single Point Load cell ได้รับ ซึ่งอัตราส่วนจะอยู่ที่ประมาณ 1 kg : 1.1 mV และเนื่องจากว่าค่าแรงดันไฟฟ้าในหน่วย mV นั้นมีขนาดเล็กมาก ๆ ซึ่งเมื่อ Input ค่าแรงดันไฟฟ้านี้ไปที่ Microcontroller ค่าสัญญาณที่ได้ก็จะมีช่วงค่าสัญญาณที่เล็กมาก ๆ เช่นกัน การขยายสัญญาณ หรือ amplify ผ่านตัว Op-amp จึงมีความจำเป็นและเป็นตัวช่วยสำคัญในการขยายขนาดของแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ตัว Microcontroller สามารถอ่านค่าได้ช่วงของข้อมูลมีความกว้างขึ้น และมีความชัดเจนขึ้น ซึ่งการขยายสัญญาณของตัว Op-amp สามารถคำนวณได้ผ่านสูตร

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

เมื่อ  $V_o$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า output หลังจากการขยายผ่านตัว Op-amp (V)

$(V_{IN}^+ - V_{IN}^-)$  คือ ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการขยายผ่านตัว Op-amp (V)

G คือ อัตราการขยายสัญญาณ



เนื่องจากว่าในการคำนวณค่า น้ำหนักในหน่วย kg สำหรับการทดลองนี้ทางกลุ่มต้องการความละเอียดของข้อมูลให้มีความละเอียดมากที่สุด และมีช่วงของข้อมูลกว้างที่สุด จึงต้อง การขยายสัญญาณจาก 1mV ให้กลายเป็น 0.3 V เพราะเมื่อรับน้ำหนักที่ 10kg แรงดันไฟฟ้าที่เข้าหาที่ตัว Microcontroller จะอยู่ที่ประมาณ 3V ซึ่งทำให้ช่วงข้อมูลมีความกว้างและละเอียดมากที่สุด ค่าที่ Microcontroller อ่านได้จะอยู่ในช่วง 0-3V ซึ่งเกือบมากที่สุดที่ตัว Microcontroller รับได้ก็คือ 0-3.3V แทนค่าสมการเพื่อหาค่า Gain ที่เหมาะสมสำหรับการขยายแรงดันไฟฟ้าจาก 1mV หรือ 0.001 V ให้กลายเป็น 0.3V

$$0.3V = (0.001V)G$$

$$G = 300$$

ดังนั้นเพื่อขยายสัญญาณจาก 0.001V ให้กลายเป็น 0.3V จะต้องใช้ค่า Gain หรืออัตราขยายที่มีค่าเท่ากับ 300

การตั้งค่าความต้านทานสำหรับค่า Gain (อัตราขยาย) เป็นไปตามสมการ ดังนี้

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

เมื่อ G คือ อัตราขยายสัญญาณ

$R_G$  คือ ค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ ( $\Omega$ )

$60k\Omega$  คือ ค่าตัวต้านทานคงที่ของตัว Op-amp ( $\Omega$ )

แทนค่าสมการเพื่อหาค่า  $R_G$  (ค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ ( $\Omega$ ))

$$300 = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G}$$

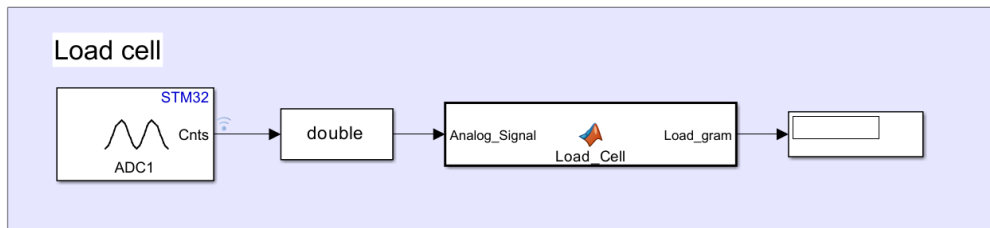
$$R_G = 202\Omega$$

ดังนั้นตัวต้านทานปรับค่าได้  $R_G$  จะต้องมียุ่ค่าเท่ากับ  $202\Omega$  เพื่อให้ได้อัตราขยายเท่ากับ 300

จากสมการดังกล่าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ว่า เมื่อ  $R_G$  (ค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ ( $\Omega$ )) มีค่าลดลง ค่าอัตราขยายสัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้น หรือก็คือ มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน

ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่า Gain หรืออัตราขยายสัญญาณตามที่ต้องการในการทดลองนี้ จะได้ว่าต้องปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ให้เป็น  $202\Omega$  เพื่อให้ได้อัตราขยายสัญญาณที่มีค่าเท่ากับ 300 ตามความต้องการของการทดลอง

- การทำ Signal Conditioning และ Calibration สำหรับการแปลง Input จาก Single Point Load cell ให้ กลายเป็นน้ำหนัก ในหน่วย SI



รูป 29 โครงสร้างโมเดล Simulink สำหรับ แปลง Input Signal ของ Single Point Load cell ให้กลายเป็นน้ำหนักในหน่วย SI

การแปลงน้ำหนักจากค่าสัญญาณ Analog Signal ของตัว Single Point Load Cell ให้กลายเป็นน้ำหนักจริงในหน่วย SI ใช้หลักการการหาอัตราส่วนของค่า Analog Signal ที่วัดได้ เทียบกับค่า Load จริง เช่น ค่า Analog Signal ที่วัดได้จากการทดลองน้ำหนักที่ใส่ให้กับตัว Single Point Load Cell ที่ 0.5 kg เมื่อทำการทดลองซ้ำ ๆ แล้วหาค่าเฉลี่ยของ Analog Signal ที่วัดได้ แล้วได้ค่าเป็น 176 (ค่า Analog Signal เฉลี่ยจากการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง) เมื่อน้ำหนักที่ใส่ให้กับตัว Single Point Load Cell คือ 0.5 kg  
จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่าง Single Point Load Cell กับ Analog Signal เป็น

$$176 [Analog\ signal] : 0.5 [kg]$$

หรือก็คือ

$$1 [Analog\ signal] : 0.0028409 [kg]$$

แล้วจึงนำอัตราส่วนที่ได้นี้มาใช้ในการแปลง Analog Signal ที่ Input จาก Single Point Load Cell ให้อยู่ในรูปของน้ำหนักในหน่วย SI

ตัวอย่าง Microcontroller วัด Analog Signal ได้เป็น 178 จะได้น้ำหนักในหน่วย kg มีค่าเท่ากับ

$$178[Analogsignal] \times 0.0028409[kg] = 0.505[kg]$$

ซึ่งเมื่อได้หลักการในการแปลงสัญญาณ Input จาก Single Point Load cell ให้กลายเป็นน้ำหนักจริง ๆ ในหน่วย SI ดังนี้ จึงนำหลักการนี้ไป Calibrate กับค่าสัญญาณ Input จาก Single Point Load cell ในช่วงต่าง ๆ ของน้ำหนัก ทั้งหมดเพื่อให้ค่าน้ำหนัก Output ของการคำนวณมีความละเอียดมากที่สุด

```

1 function Load_gram = Load_Cell(Analog_Signal)
2
3 Ratio = [2.83398515 2.670226969 2.694159063 2.669656682 ...
4          2.652041542 2.64107756 2.653786954 2.633640811 ...
5          2.621033503 2.607439547 2.594180546 2.579180852 ...
6          2.57987696 2.570505288 2.554652533 2.552127198 ...
7          2.551188854 2.552807663 2.550260261 2.555198679 ...
8          2.567161844];
9 Average_Ratio = 2.613532784 ;
10
11 Max_Analog = [184 391 575 763 954 1148 1343 1537 1728 1939 2144 ...
12              2343 2540 2737 2954 3152 3346 3546 3741 3928 4095];
13
14
15 Min_Analog = [154 322 500 699 889 1080 1273 1470 1667 1854 2060 ...
16              2270 2458 2666 2891 3079 3283 3471 3672 3857 4042];
17
18
19 for i = 1:length(Ratio)
20     if Analog_Signal >= Min_Analog(i) && Analog_Signal <= Max_Analog(i)
21         Load_gram = Analog_Signal * Ratio(i);
22         return;
23     end
24 end
25
26 % Use Average if not in Range Min Max
27 Load_gram = Analog_Signal * Average_Ratio;
28 end

```

รูป 30 โค้ดภายในบล็อก Load\_Cell ของบล็อก Simulink

หลักการ Calibration ทั้งหมดทำงานภายใน โค้ดของบล็อก Simulink เนื่องจากพบว่าการทดสอบเปรียบเทียบค่ากับ เครื่องมือซึ่ง Digital จริง ๆ แล้วพบว่าหากมีค่า Ratio ที่ทำการเฉลี่ยจากทุกช่วงระยะของน้ำหนักแล้วนำมาใช้นั้น ค่าน้ำหนักที่คำนวณได้ในหน่วย SI จะมีความคลาดเคลื่อนสูงค่อนข้างมากทางกลุ่มจึงเลือกใช้วิธีในการ กำหนด Ratio ของแต่ละช่วงข้อมูลแบบแบ่งออกกันอย่างชัดเจน ว่าค่า Analog Signal ที่เท่าไรต้องใช้ค่า Ratio ที่เท่าไรเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการประมวลผลมากที่สุด

โค้ดมีทั้งหมด 28 บรรทัด อธิบายหลักการทำงานได้ ดังนี้

บรรทัดที่ 1 ทำการกำหนดชื่อ function และตัวแปร Input Output สำหรับ function ตัวแปร Input จะเป็นค่า Analog Signal ที่วัดได้จากตัว Load cell และ Output จะเป็นค่าหลังจากการคำนวณ Ratio การแปลงค่า Analog Signal ให้กลายเป็นน้ำหนักในหน่วย SI

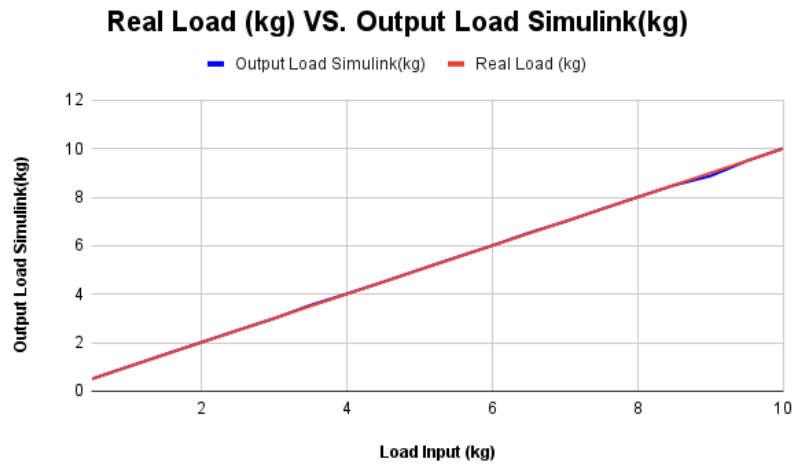
บรรทัดที่ 3-9 : เป็นการกำหนดค่า Average Ratio และ Ratio สำหรับแต่ละช่วงค่าน้ำหนักต่าง ๆ ตั้งแต่ 500, 1000 ไปจนถึง 10000 เพื่อแบ่งช่วง Ratio ที่ต่างกันในแต่ละการคำนวณ

บรรทัดที่ 11-16 : เป็นการกำหนดช่วงของข้อมูล Min Max ในแต่ละช่วงข้อมูลที่ตรงกับช่วงน้ำหนักต่าง ๆ

บรรทัดที่ 19-24 : เป็น for loop ที่ใช้สำหรับการหาช่วงของค่า Analog Signal ว่าอยู่ในช่วงไหน และ return ผลลัพธ์เป็น Analog Signal คูณกับ Ratio ของค่าในช่วงนั้น

บรรทัดที่ 27 : เป็นเงื่อนไขสำหรับค่า Analog Signal ที่ไม่ได้อยู่ในช่วง Min และ Max ที่กำหนด ซึ่ง Output ก็จะเป็น Analog Signal คูณกับ Ratio ของค่าในช่วงนั้น

ซึ่งผลลัพธ์ของการทำ Calibration ดังกล่าวทำให้ได้ผลลัพธ์การเปรียบเทียบ Load จริง กับ Load ที่ Simulink คำนวณทั้งหมดได้ดังนี้



รูป 31 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Load ที่ Single Point Load Cell ได้รับจริง ๆ กับ Load ที่ Simulink คำนวณได้ จากการ Calibration

Load Input (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Real Load (kg)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Output Load Simulink (kg)	0.5016	1.007	1.511	2.008	2.506	2.990	3.538	4.011	4.500	5.009	5.510	6.000	6.522	6.989	7.503	8.004	8.493	8.876	9.497	10.014

ตาราง 9 ตารางเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง Load ที่ Single Point Load Cell ได้รับจริง ๆ กับ Load ที่ Simulink คำนวณได้ จากการ Calibration