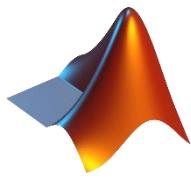


RMXplorer



LAB1 : Sensor Report

Name

- นายวิชาญ วิชญาณุภาพ 66340500051
- นายศรีสัก เดชะวรรณ์ 66340500053
- นางสาวสิตานัน พรฤทธิ์เรืองอุไร 66340500058

Objectives

- สามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ในการสืบเสาะพัฒนาระบบ การทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เข้าใจหลักการทำงานของ เชิงเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทำงานทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สถิติ และ ศาสตร์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการ ทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับ ตรวจสอบความถูกต้อง เทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- สามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเชิงเซอร์ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายหลักการวัดความเร็วเชิงมุมของ Incremental Encoder และการอธิบายการวัดน้ำหนักของ Load Cell (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นน้ำหนักได้อย่างไร)
- สามารถกำหนดตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัว แปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลอง อธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิง ปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่าเชื่อถือรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- สามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบ ให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้ย่อทั้งหมดได้ด้วยตนเองอย่าง ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้งบันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มีกระบวนการ ทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการ ทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- สามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

1. Potentiometer Sensor

1.1. ประเภทของ Potentiometer Sensor

1.1.1. จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาชนิดของ Potentiometer และหลักการทำงานของ Potentiometer แต่ละชนิดในชุดการทดลอง
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าออกที่อ่านได้ เทียบกับระยะตำแหน่งเลื่อนหรือองศาการหมุนของ Potentiometer แต่ละชนิด
3. เพื่อศึกษา เปรียบเทียบ สีบเสาะ และพิสูจน์ผลการใช้งาน Potentiometer แต่ละชนิดในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งเชิงเส้นหรือเชิงมุม เทียบกับค่าที่ควรได้จากการข้อมูลใน Datasheet

1.1.2. สมมติฐาน

1. Linear Potentiometer

สำหรับ Potentiometer Type A การเปลี่ยนตำแหน่งของตัวเลื่อนจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าออกเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของตำแหน่งที่ทำการเลื่อน โดยความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งตัวเลื่อนกับแรงดันไฟฟ้าออกจะเป็นเชิงเส้นตรง

สำหรับ Potentiometer Type B การเปลี่ยนตำแหน่งตัวเลื่อนจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าออกเพิ่มขึ้นในลักษณะ Logarithmic โดยในช่วงแรกแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นช้า และจะเพิ่มขึ้นเร็วขึ้น เมื่อเลื่อนตำแหน่งไปมากขึ้น

2. Rotary Potentiometer

สำหรับ Rotary Potentiometer Type A แรงดันไฟฟ้าออกจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่เท่ากันในทุกองศาการหมุน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกและองศาสตร์การหมุนจึงอาจเป็นแบบเชิงเส้น

สำหรับ Rotary Potentiometer Type B แรงดันไฟฟ้าออกจะเพิ่มขึ้นในลักษณะค่อยเป็นค่อยไปในช่วงแรกของการหมุน และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงถัดมาตามองศาสตร์มากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกและองศาสตร์การหมุนจึงอาจเป็นแบบแบบ Logarithmic

สำหรับ Rotary Potentiometer Type C แรงดันไฟฟ้าออกจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการหมุน และจะเพิ่มขึ้นช้าลงตามองศาสตร์มากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกและองศาสตร์การหมุนจึงอาจเป็นแบบ Reverse Logarithmic

1.1.3. ตัวแปร

1. Linear Potentiometer

ตัวแปรต้น	ตำแหน่งเลื่อนของ Potentiometer แปรค่าตั้งแต่ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร ถึง 60 มิลลิเมตร โดยวันทุก ๆ 3 มิลลิเมตร, ชนิดของ Potentiometer ได้แก่ Type A และ Type B
ตัวแปรตาม	แรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่ต้องการได้จาก Microcontroller ในแต่ละตำแหน่งที่เลื่อน
ตัวแปรควบคุม	แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายให้ Potentiometer, ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างข้อมูลในแต่ละตำแหน่งเป็น 2 วินาที, ขนาดตัวอย่างของข้อมูลแต่ละตำแหน่งเป็น 2001 หน่วย, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง

2. Rotary Potentiometer

ตัวแปรต้น	ตำแหน่งหมุนของ Potentiometer แปรค่าตั้งแต่ตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยวันทุก ๆ 5 เปอร์เซ็นต์, ชนิดของ Potentiometer ได้แก่ Type A, Type B และ Type C
ตัวแปรตาม	แรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่ต้องการได้จาก Microcontroller ในแต่ละตำแหน่งหมุน
ตัวแปรควบคุม	แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายให้ Potentiometer, ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง เป็น 2 วินาที, ขนาดตัวอย่างของข้อมูลแต่ละตำแหน่งเป็น 2001 หน่วย, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง

1.1.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

- ตำแหน่งเลื่อนของ Linear Potentiometer หมายถึง ตำแหน่งของตัวเลื่อนที่วัดด้วยเวอร์เนียร์คัลิป เปอร์จากตำแหน่งเริ่มต้น ณ 0 มิลลิเมตร ที่ปลายสุดซึ่งให้ค่าแรงดันจากอุปกรณ์เป็น 0 V ไปในแนวเส้นตรง ตามระยะของตัวอุปกรณ์ที่มีระยะเลื่อนมากสุด 60 มิลลิเมตร ระบุได้ด้วยตัวเลข 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบเท่ากับการระบุตำแหน่งเลื่อนตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร ถึง 60 มิลลิเมตร
- ตำแหน่งหมุน หมายความ หรือองศา การหมุนของ Rotary Potentiometer หมายถึง ตำแหน่งเชิงมุม ของแกนหมุนบน Rotary Potentiometer ที่อ่านได้จากเข็มขี้บอกตำแหน่งสเกลของปุ่มหมุน หลังจาก ทำการหมุนในช่วงตำแหน่งเริ่มต้นที่ 0 เปอร์เซ็นต์ จนถึงตำแหน่งสิ้นสุดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ระบุด้วย ตัวเลข 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทียบเท่ากับการระบุตำแหน่งเชิงมุมตั้งแต่ 0 องศา ถึง 300 องศา
- ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง หมายถึง ช่วงเวลาที่ใช้ในการวัดและบันทึกค่า ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ และตำแหน่งการเลื่อนของ Linear Potentiometer หรือตำแหน่งการหมุน ของ Rotary Potentiometer ในแต่ละตำแหน่ง โดยมีการตั้งค่า Fixed-Step size (Sampling time)

ใน Simulink ที่ 0.001 วินาที เพื่อให้มีการเก็บตัวอย่างข้อมูลในทุก ๆ 0.001 วินาที โดยทำการเก็บเป็นเวลา 2 วินาที ได้ขนาดตัวอย่างสูตรเป็น 2001 หน่วย สำหรับแต่ละตำแหน่ง

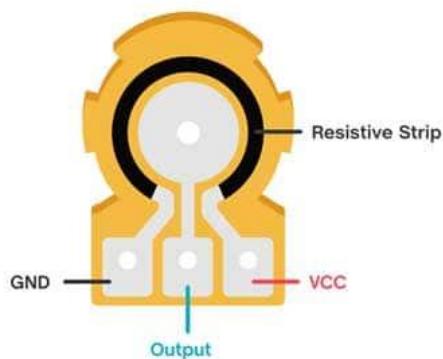
1.1.5. นิยามชิงปัญหาดิจิตาร์

1. Microcontroller หรือบอร์ดควบคุม ในการทดลองนี้ หมายถึงบอร์ด Microcontroller รุ่น Nucleo STM32G474RE
2. Slide Potentiometer Type A หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PTA6043-2015DPA103
3. Slide Potentiometer Type B หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PTA6043-2015DPB103
4. Rotary Potentiometer Type A หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PDB181-K420K-103A2
5. Rotary Potentiometer Type B หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PDB181-K420K-103B
6. Rotary Potentiometer Type C หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PDB181-K420K-103C

1.1.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การทำงานของ Potentiometer

ภายใน Potentiometer ประกอบด้วยตัวต้านทานที่มีกลไกเชิงกลซึ่งช่วยให้เราสามารถปรับค่าความต้านทานได้ เมื่อตำแหน่งของ Wiper ถูกเลื่อนให้เคลื่อนไปตามตัวต้านทานในแนวเส้นตรง หรือแบบหมุน ค่าความต้านทานก็จะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้กระแสไฟฟ้าผ่านทางการให้กลที่ตั้งกันออกไป แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะถูกจ่ายตลอดความยาวของตัวต้านทาน ขณะที่แรงดันขาออกจะได้จากค่าตักษ์ไฟฟ้าที่ลดลงระหว่างตัวต้านทานคงที่กับหน้าสัมผัสที่เคลื่อนไปตามตัวต้านทานนี้ ตำแหน่งของหน้าสัมผัสจะเป็นตัวกำหนดปริมาณแรงดันที่ส่งเข้าสู่วงจร ส่งผลให้ Potentiometer สามารถปรับสัญญาณแรงดันขาออกได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 การทำงานภายในทั่วไปของโพเทนชิโอมิเตอร์แบบหมุน

Potentiometer แบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ แบบ Analog และแบบ Digital โดย Potentiometer แบบ Analog ใช้กลไกในการปรับเพื่อตั้งค่าและควบคุมเอาต์พุต แบ่งย่อยออกได้เป็นสองแบบคือ แบบหมุนและแบบเชิงเส้น สำหรับ Potentiometer แบบหมุน จะควบคุมผ่านการหมุนเพลาหรือปุ่มที่เชื่อมต่อกับ Wiper ซึ่งเคลื่อนที่ไปตามตัวต้านทานภายใน เมื่อหมุนจะทำให้ค่าความต้านทานและเอาต์พุตเปลี่ยนตามตำแหน่งของ Wiper ทำให้สามารถปรับค่าเอาต์พุตตาม

ต้องการได้ ในขณะที่ Potentiometer แบบเชิงเส้น จะใช้การเลื่อน Wiper ไปตามแนวเส้นตรง โดยการเลื่อนนี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและเอาต์พุต ซึ่งช่วยให้ปรับแรงดันและเอาต์พุตได้อย่างละเอียดและแม่นยำ

Potentiometer Taper คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่อหมุน Rotary knob หรือเลื่อน Wiper โดยแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ Linear taper และ Audio taper โดยประเภท Linear taper ความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของ wiper อย่างสม่ำเสมอ เช่น หาก Wiper อยู่ที่ตำแหน่งตรงกลาง ความต้านทานก็จะเป็นครึ่งหนึ่งของค่าความต้านทานทั้งหมด ทำให้การปรับค่าเป็นเส้นตรงและคงที่ตลอดการหมุนหรือการเลื่อน สำหรับ Audio taper จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแบบลอการิทึม มักใช้กับอุปกรณ์เครื่องเสียง เช่น การปรับระดับเสียง โดยช่วงแรกของการหมุนจะทำให้ระดับเสียงเปลี่ยนแปลงมากกว่าช่วงหลัง

2. Datasheet ของ Liner Potentiometer

Features

- Carbon element
- Metal housing
- 15-60 mm travel
- Single and dual gang
- Center detent option
- RoHS compliant*

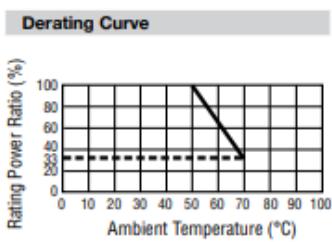
PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

Electrical Characteristics		Lever Style & Product Dimensions		Additional Information	
Taper.....	Linear, audio	Actuator Styles	DP METAL LEVER	Click these links for more information:	
Standard Resistance Range.....	1 K ohms to 1 M ohms	3.0 (.118)	4.0 (.157)	PRIVACY	TECHNICAL
Standard Resistance Tolerance.....	±20 %	H		INVENTORY	SAMPLE
Residual Resistance.....				CONTACT	

รูปที่ 2 Datasheet ของ Linear Potentiometer

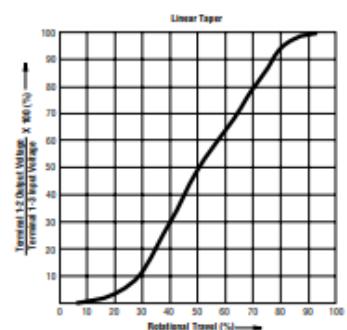
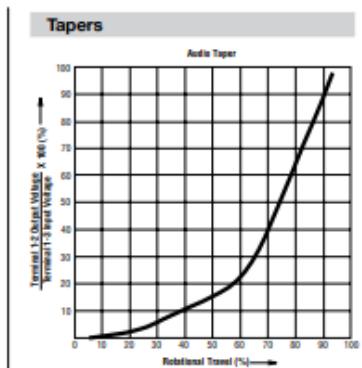
PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

BOURNS®



Standard Resistance Table

Resistance (Ohms)	Resistance Code
1,000	102
2,000	202
5,000	502
10,000	103
20,000	203
50,000	503
100,000	104
200,000	204
500,000	504
1,000,000	105



REV. 04/21

Specifications are subject to change without notice.

Users should verify actual device performance in their specific applications.

The products described herein and this document are subject to specific legal disclaimers as set forth on the last page of this document, and at www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf.

ຮູບທີ 3 Datasheet ຂອງ Linear Potentiometer

3. Datasheet ของ Rotary Potentiometer



Features

- Single and dual section control
- Metal shaft styles
- Carbon element
- Center and multiple detent options
- Wide range of resistance tapers
- Plain or knurled shaft options



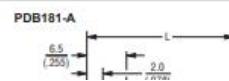
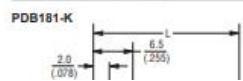
BOURNS®

PDB18 Series - 17 mm Rotary Potentiometer

Electrical Characteristics

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

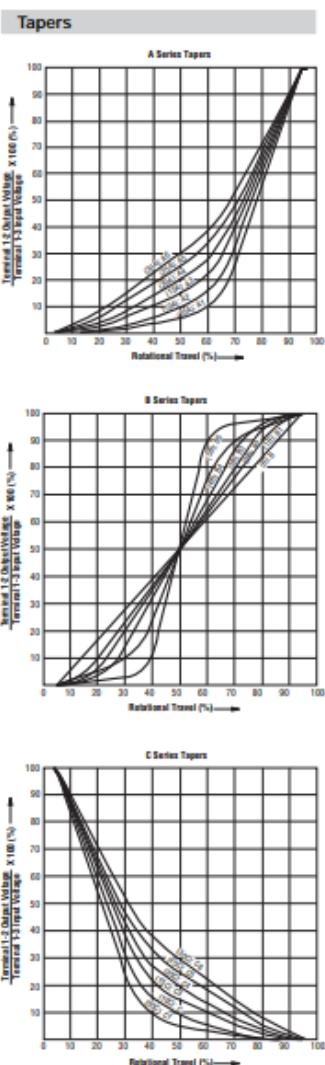
Product Dimensions



รูปที่ 4 Datasheet ของ Rotary Potentiometer

PDB18 Series - 17 mm Rotary Potentiometer

BOURNS®



How To Order

Model	PDB18 1 - K 4 25 K - 103 A1
Number of Sections	<ul style="list-style-type: none"> 1 = Single Section 2 = Dual Section
Terminal Configuration (Pin Layout)	<ul style="list-style-type: none"> K = PC Pins vertical/ Down Facing (12.5 mm) A = PC Pins vertical/ Down Facing (18.0 mm) B = PC Pins vertical/ Down Facing (23.0 mm) E = Solder Lugs Rear Facing P = PC Pins Rear Facing D = PC Pins Front Facing
(see individual drawings)	
Detent Option	<ul style="list-style-type: none"> 2 = Center Detent 4 = No Detents 5 = 10 Detent / 11 Position 6 = 20 Detent / 21 Position 7 = 30 Detent / 31 Position 8 = 40 Detent / 41 Position
Standard Shaft Length	<ul style="list-style-type: none"> 15 = 15 mm 18 = 18 mm 20 = 20 mm 25 = 25 mm 30 = 30 mm
Shaft Style	<ul style="list-style-type: none"> F = Metal Flattened Shaft K = Metal Knurled Type Shaft 18 Toothed Serration Type P = Metal Plain Shaft
Resistance Code (See Table)	
Resistance Taper (See Taper Charts)	
Taper Series followed by Curve Number	
Other styles available.	

Standard Resistance Table

Resistance (Ohms)	Resistance Code
1,000	102
2,000	202
5,000	502
10,000	103
20,000	203
50,000	503
100,000	104
200,000	204
500,000	504
1,000,000	105

BOURNS®

Asia-Pacific: Tel: +886-2 2562-4117 • Email: asiacus@bourns.com

EMEA: Tel: +36 88 885 877 • Email: eurocus@bourns.com

The Americas: Tel: +1-951 781-5500 • Email: americus@bourns.com

www.bourns.com

REV. 10/19

Specifications are subject to change without notice.

Users should verify actual device performance in their specific applications.

The products described herein and this document are subject to specific legal disclaimers as set forth on the last page of this document, and at www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf.

รูปที่ 5 Datasheet ของ Rotary Potentiometer

1.1.7. วิธีดำเนินการทดลอง

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 1.1.3.
2. เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และจัดเตรียมวงจรการทดลอง โดยต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก Potentiometer และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ Potentiometer

3. ออกแบบและสร้าง Blocks ด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับเชื่อมต่อกับ Microcontroller เพื่อเก็บค่าการทดลอง
4. ทำการทดลองกับ Slide Potentiometer โดยปรับตำแหน่งตัวเลื่อนของ Slide Potentiometer ทุก ๆ 3 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเลื่อนที่ 0 มิลลิเมตร จนถึง 60 มิลลิเมตร และบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าจากเป็นค่าดิจิตอล 12 บิต และตำแหน่งการเลื่อนลงใน MATLAB
5. ทำการทดลองกับ Rotary Potentiometer โดยทำการหมุนแกนหมุนของ Rotary Potentiometer ทุก ๆ 15 องศา จากองศาที่ 0 จนถึงองศาที่ 300 และบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าจากเป็นค่าดิจิตอล 12 บิต และตำแหน่งการเลื่อนลงใน MATLAB
6. วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล โดยนำข้อมูลมาแปลงหน่วย และคำนวนหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการเลื่อนหรือหมุนไปยังตำแหน่งนั้น ๆ จากนั้นทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) รวมถึงพื้นที่ Error Bar จากข้อมูล Standard Resistance Tolerance ที่อ้างอิงจาก Datasheet
7. นำมาข้อมูลทั้งหมดจากทุกขั้นตอนมาจัดทำลงรายงาน

1.1.8. วัสดุอุปกรณ์

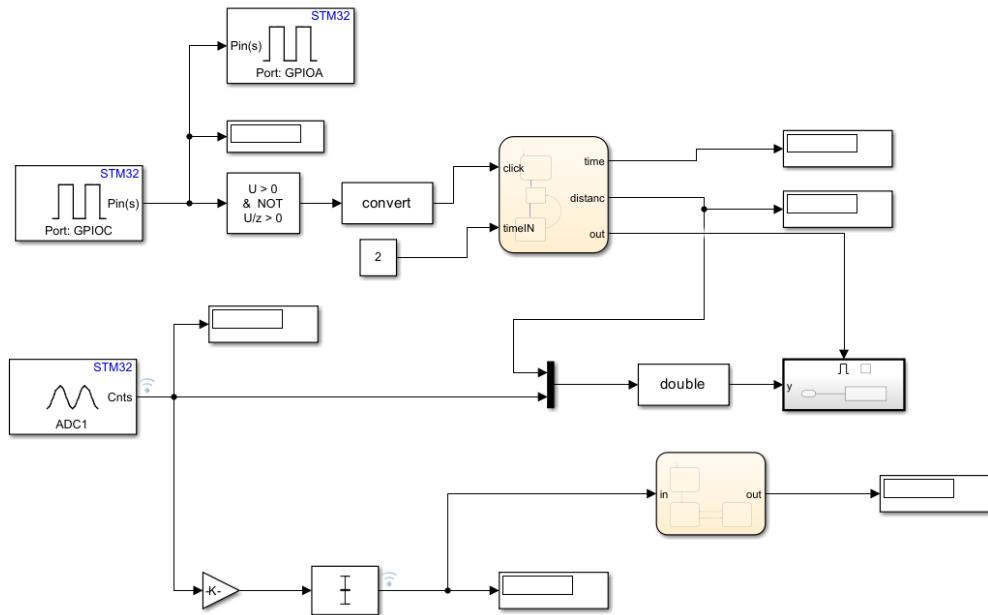
1. ปากกาเคมี 1 แท่ง
2. เวอร์เนียคลิปเปอร์ 1 ตัว
3. สายจ้มเปอร์ 3 เส้น
4. PTA6043-2015DPA103 1 ตัว
5. PTA6043-2015DPB103 1 ตัว
6. PDB181-K420K-103A2 1 ตัว
7. PDB181-K420K-103B 1 ตัว
8. PDB181-K420K-103C 1 ตัว
9. Nucleo STM32G474RE 1 ตัว
10. ชุดทดลอง PotenXplorer 1 ชุด
11. สายอัปโหลด USB 1 สาย
12. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง

1.1.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 การออกแบบโปรแกรม Simulink และเตรียมการเก็บข้อมูล

1. ออกแบบบริการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 1.1.3.

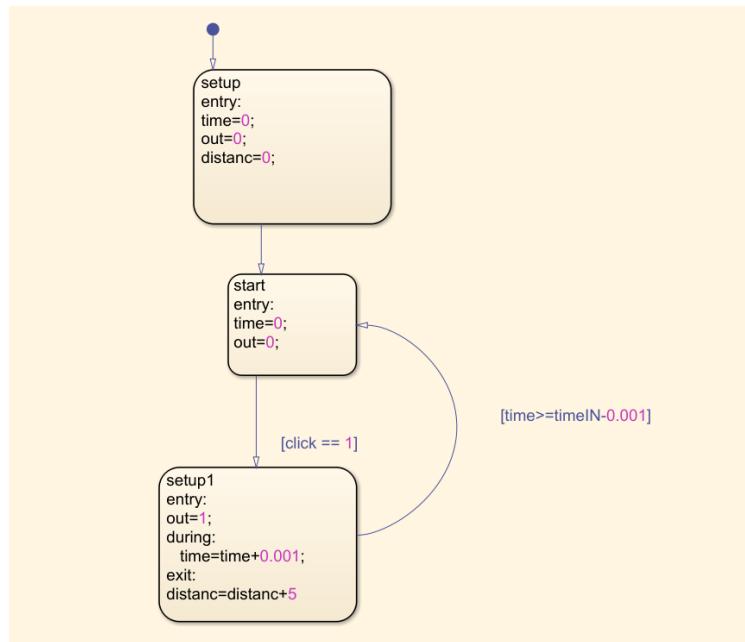
2. เจียน Block diagram บนโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบโปรแกรมเชื่อมต่อ Microcontroller ให้เก็บตัวอย่างข้อมูลจาก Linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer ตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ



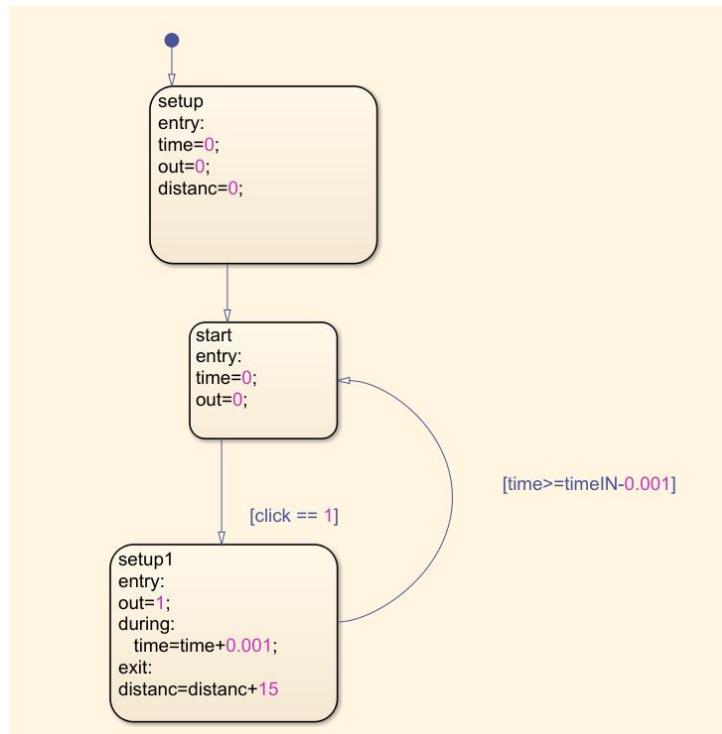
รูปที่ 6 Block diagram ใน Simulink Models ที่เก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ

จากการจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการใช้ Block ชื่อ Digital Port Read ที่มีการตั้งค่าเป็น Port GPIOC พินที่ 13 เพื่อทำการอ่านค่าสัญญาณที่อุปกรณ์ว่ามีการกดที่ปุ่มนี้หรือไม่ จากนั้นเข้าไปยัง Block ชื่อ Detect Rise Positive เพื่อป้องกันการกดปุ่มช้ำซ้อน (Debouncing) และ ตรวจจับการกดปุ่มครั้งใหม่ และ Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลของสัญญาณที่ได้มาตรงกับ ชนิดข้อมูลของ Block ต่อไป แล้วเข้า Block Chart ส่วน Block Constant ที่เข้าไปยัง Block Chart เป็น Block ที่กำหนดเวลาที่ต้องการเก็บค่าการทดลอง โดยในการทดลองนี้กำหนดให้มีการเก็บค่าการทดลองเป็น ระยะเวลา 2 วินาที

ส่วนสองมีการใช้ Block หลัก ๆ เพื่อทำการเก็บค่าในการทดลองคือ Analog to Digital Converter เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Potentiometer Sensor เป็นค่าสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิตจาก ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo STM32G474RE เข้าสู่ Block ชื่อ Mux เพื่อรวมกับค่าข้อมูลระยะ ตำแหน่งของ distance ที่อุปกรณ์ Block Chart ให้เป็นเวกเตอร์ขนาด 1×2 ที่มีค่าข้อมูลตำแหน่งกับ สัญญาณดิจิตอล จากนั้นนำเข้า Block Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลภายในให้เป็น double และเข้า Block Subsystem เพื่อบันทึกเพิ่มลง Workspace



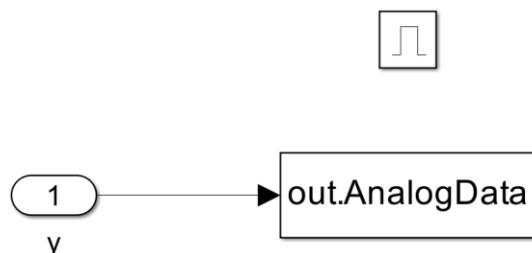
รูปที่ 7 ข้างใน Chart จาก Block diagram ที่มีการเขียน State flow เพื่อเก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่
ออกแบบ สำหรับ Slide Potentiometer



รูปที่ 8 ข้างใน Chart จาก Block diagram ที่มีการเขียน State flow เพื่อเก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่
ออกแบบ สำหรับ Rotary Potentiometer

ข้างใน Chart นี้จะมีทั้งหมด 3 States โดย State แรกชื่อ setup สำหรับกำหนดค่าตัวแปร Output ต่าง ๆ โดยตัวแปร time สำหรับนับเวลา ตัวแปร out สำหรับ trigger การทำงานของ Subsystem และตัวแปร distance สำหรับเก็บค่าตำแหน่งในปัจจุบัน ส่วน State ที่สองชื่อ start และเมื่อทำการกดปุ่ม B1 พิน

GPIOC13 บนบอร์ด Nucleo STM32G474RE ซึ่งทำให้ตัวแปร click มีค่าเท่ากับ 1 และจะเข้าไปทำงานยัง State ที่สามที่ชื่อ setup1 จะทำหน้าที่ trigger ให้ Subsystem ทำงานเพื่อบันทึกข้อมูลทุก ๆ 0.001 วินาที ตาม Simulation Fixed Step Size ที่กำหนด ภายใต้การนับเวลาไปด้วย และเมื่อนับเวลาครบตามค่าในตัวแปร timeIN จะกำหนดให้ตัวแปร distanc ที่ปัจจุบันเป็นค่าตำแหน่งที่กำลังเก็บค่าการทดลองอยู่ให้เลื่อนไปยังตำแหน่งถัดไปที่ต้องการเก็บค่าต่อ ก่อนกลับไปยัง State ที่สองที่ชื่อ start อีกรัง โดยมีการออกแบบการทดลองให้ทำการเก็บค่าทุก ๆ 3 มิลลิเมตร สำหรับ Slide Potentiometer และทุก ๆ มุมขนาด 5 เปลอร์เซ็นต์ หรือ 15 องศา สำหรับ Rotary Potentiometer

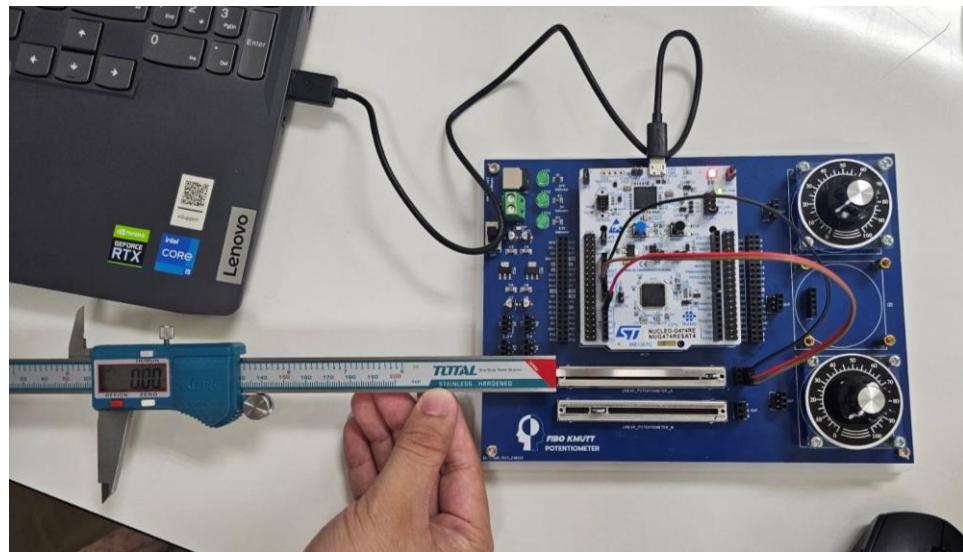


รูปที่ 9 ข้างใน Subsystem จาก Block diagram ที่มีการใช้ block เพื่อส่งค่าจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลไปยัง Workspace ใน MATLAB

ข้างใน Subsystem นี้จะมีการนำค่าข้อมูลที่เก็บได้จากข้างนอกเข้ามา และส่งไปยัง Block ที่ชื่อ To Workspace เพื่อนำตัวแปรที่เก็บข้อมูลมาส่งไปยังพื้นที่ Workspace ใน MATLAB โดยใช้ไฟล์ชื่อ AnalogData.mat ซึ่งมี Block ชื่อ Enable เป็นตัวกำหนดว่าจะให้ Subsystem นี้เริ่มทำงานหรือหยุดทำงานเมื่อใด โดยจะเริ่มทำงานเมื่อมีค่าส่งเข้ามาเป็น 1

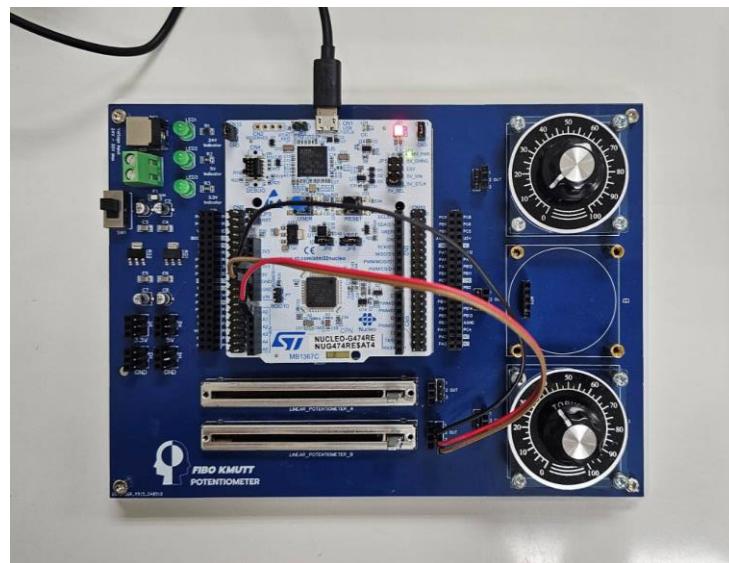
ตอนที่ 2 การดำเนินการเก็บข้อมูล

1. ต่อวงจรทดลองได้แก่ Microcontroller Nucleo STM32G474RE เช่นเชอร์ตัวที่จะทดลองลงบนบอร์ดชุดทดลอง และเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 10
2. เก็บผลสำหรับเซนเซอร์ที่จะทดลอง โดยต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก Linear Potentiometer Type A และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ Linear Potentiometer Type A ที่ข้ามลาย รันโปรแกรม Simulink เพื่อเริ่มเก็บข้อมูลจาก Microcontroller
3. ปรับตำแหน่งเลื่อนของ Linear Potentiometer ไปที่ตำแหน่งเลื่อนที่ต้องการเก็บผล โดยเริ่มที่ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร ด้วยการวัดจากเวอร์เนียร์คลิปเปอร์ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การใช้เวอร์เนียร์คัลิปเปอร์เพื่อเลื่อนปรับตำแหน่งที่ต้องการเก็บค่าของ Linear Potentiometer A

4. กดปุ่ม Push button ของบอร์ด เพื่อให้ Simulink ทำงานเก็บตัวอย่างสัญญาณดิจิตอลที่วัดได้ที่ตำแหน่งเลื่อนนั้น จำนวน 2001 ค่า ในเวลา 2 วินาที ไว้ใน Workspace ของ MATLAB
5. ทำซ้ำในขั้นตอนข้อที่ 3 – 4 โดยแปรตำแหน่งเลื่อนในขั้นที่ 3 จาก 0 มิลลิเมตร ให้เพิ่มทีละ 3 มิลลิเมตร ได้เป็น 3 มิลลิเมตร, 6 มิลลิเมตร, 9 มิลลิเมตร ไปเรื่อย ๆ จนถึง 60 มิลลิเมตร เพื่อบันทึกผลค่าสัญญาณดิจิตอลที่อ่านได้สำหรับตำแหน่งต่าง ๆ ของ Linear Potentiometer
6. ทำการทดลองเก็บผลจาก Linear Potentiometer Type B โดยทำซ้ำตามขั้นที่ 2 – 5 แต่เปลี่ยนเซนเซอร์ในขั้นที่ 2 เป็น Linear Potentiometer Type B ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 วงจรการต่อบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้ากับ Slide Potentiometer B (PTA6043-2015DPB103)

7. ทำการทดลองเก็บผลจาก Rotary Potentiometer Type A, Type B และ Type C ทีละชนิด โดยทำซ้ำตามขั้นที่ 2 – 5 แต่เปลี่ยนเซนเซอร์ในขั้นที่ 2 เป็น Rotary Potentiometer ตามชนิดนั้น ๆ และ

ปรับตำแหน่งมุมในขั้นที่ 3 ไปยังตำแหน่งมุมที่ต้องการเก็บผล โดยปรับตำแหน่งมุมจาก 0 องศา ที่อ่านได้จากเข็มซึ่งออกตำแหน่งสเกลของปุ่มหมุน ให้เพิ่มทีละ 15 องศา จึงได้เป็น 15 องศา, 30 องศา, 45 องศา ไปเรื่อยๆ จนถึง 300 องศา

8. บันทึกข้อมูลดิบที่ได้ลงใน Workspace

ตอนที่ 3 การประมวลผลข้อมูล

```

1 load('AnalogData.mat');
2 rawData = out.AnalogData

3 Nround = 21;
4 Nsample = 2001;

5 % Manipulate matrix
6 distanceData = rawData(:, 1)
7 analogs = rawData(:, 2)
8 anaData = reshape(analogs, [Nsample, Nround]')

10 % to be used
11 anaData = cast(anaData, "double");
12 voltData = anaData .* 3.3 ./ 4096.0
13
14 meanVoltDataVSRef = ((mean(voltData, 2)/3.3) *100)
15 measureX = 0 : 5 : 100

16

17 % Plotting
18 measureGraph = plot(measureX, meanVoltDataVSRef, 'o', 'MarkerSize', 3, 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b');
19 % Add on
20 xticks(0:10:100);
21 xticklabels(0:10:100);
22 datatip(measureGraph);
23 grid on;
24 title('Linear Potentiometer A', 'FontSize', 14);
25 xlabel('Rotational Travel (%)', 'FontSize', 14);
26 ylabel('Vout/Vin * 100 (%)', 'FontSize', 14);

```

รูปที่ 12 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟของ Linear Potentiometer A

```

27 % Load PlotData
28 load('linearA.mat');
29 load('x.mat');

30 % Read and plot datasheet
31 datasheetValue = linearA
32 datasheetX = x;

33 % Calculate Errors
34 err = 20/100 * datasheetValue

35

36

37 % Plotting Graph
38 measureGraph;
39 hold on;
40 datasheetGraph = plot(datasheetX, datasheetValue, 'o', 'MarkerSize', 3, 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r');
41 errorGraph = errorbar(measureX, datasheetValue, err, 'or', 'LineWidth', 1, 'MarkerSize', 1, 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r');
42 hold off;
43 % Add on
44 datatip(measureGraph);
45 datatip(datasheetGraph);
46 datatip(errorGraph);
47 xticks(0:10:100);
48 xticklabels(0:10:100);
49 grid on;
50 title('Error Graph of Linear Potentiometer A', 'FontSize', 14);
51 xlabel('Rotational Travel (%)', 'FontSize', 14);
52 ylabel('Vout/Vin * 100 (%)', 'FontSize', 14);
53 legend('Measured', 'Datasheet', 'Location', 'southeast');

```

รูปที่ 13 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟของ Linear Potentiometer A

```

1 load('AnalogData.mat');
2 rawData = out.AnalogData

3 Nround = 21;
4 Nsample = 2001;
5
6 % Manipulate matrix
7 distanceData = rawData(:, 1)
8 analogs = rawData(:, 2)
9 anaData = reshape(analogs, [Nsamp, Nround])
10
11 % to be used
12 anaData = cast(anaData, "double");
13 voltData = anaData .* 3.3 ./ 4096.0
14
15 meanVoltDataVSRef = ((mean(voltData, 2)/3.3) *100)
16 measureX = 0 : 5 : 100

17 % Plotting
18 measureGraph = plot(measureX, meanVoltDataVSRef, 'o', 'MarkerSize', 3, 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b');
19 % Add on
20 datatip(measureGraph);
21 xticks(0:10:100);
22 xticklabels(0:10:100);
23 grid on;
24 title('Rotary Potentiometer A', 'FontSize', 14);
25 xlabel('Rotational Travel (%)', 'FontSize', 14);
26 ylabel('Vout/Vin * 100 (%)', 'FontSize', 14);

```

รูปที่ 14 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปplot
กราฟของ Rotary Potentiometer A

```

27 % Load PlotData
28 load('rotaryA.mat');
29 load('x.mat');
30
31 % Read and plot datasheet
32 datasheetValue = rotaryA
33 datasheetX = x;
34
35 % Calculate Errors
36 err = 20/100 * datasheetValue

37 % Plotting Graph
38 measureGraph;
39 hold on;
40 datasheetGraph = plot(datasheetX, datasheetValue, 'o', 'MarkerSize', 3, 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r');
41 errorGraph = errorbar(measureX, datasheetValue, err, 'or', 'LineWidth', 1, 'MarkerSize', 1, 'MarkerEdgeColor', 'r', 'MarkerFaceColor', 'r');
42 hold off;
43 % Add on
44 datatip(measureGraph);
45 datatip(datasheetGraph);
46 datatip(errorGraph);
47 xticks(0:10:100);
48 xticklabels(0:10:100);
49 grid on;
50 title('Error Graph of Rotary Potentiometer A', 'FontSize', 14);
51 xlabel('Rotational Travel (%)', 'FontSize', 14);
52 ylabel('Vout/Vin *100 (%)', 'FontSize', 14);
53 legend('Measured', 'Datasheet', 'Location', 'southeast');

```

รูปที่ 15 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปplot
กราฟของ Rotary Potentiometer A

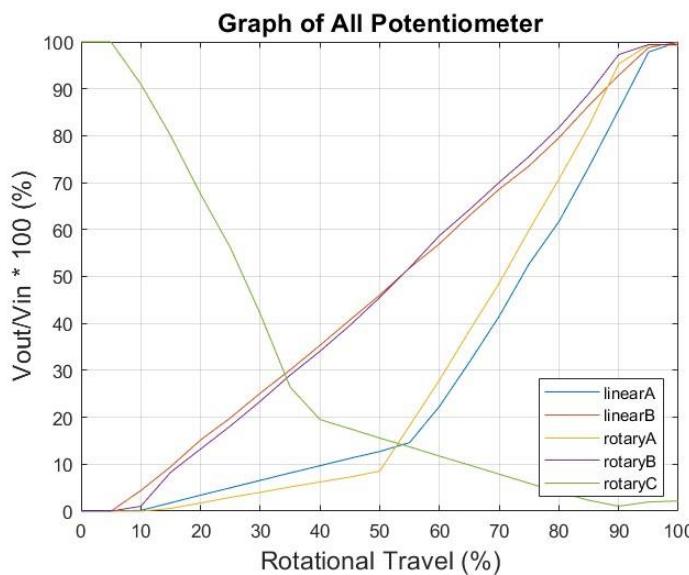
1. จากข้อมูลดิบที่ได้ใน Workspace จะได้ข้อมูลสำหรับ 21 ตำแหน่งเลื่อน ตำแหน่งละ 2001 หน่วย
ข้อมูล ทั้งหมดเป็น 42021 หน่วยข้อมูล ในรูปแบบเตอร์ขนาด 42021×2 ในตัวแปรชื่อ rawData โดยแต่ละ
หน่วยข้อมูลเป็นเวกเตอร์แทน [ตำแหน่งเลื่อน; สัญญาณดิจิตอล]

2. จัดรูป่างข้อมูลด้วยการ reshape ตัวแปรเวกเตอร์ analogs ซึ่งดึงข้อมูลค่าสัญญาติจิตอลมาจาก rawData ให้เป็นเมตริกซ์มิติ 21×2001 ชื่อ anaData ซึ่งแต่ละแถวแทนข้อมูลทั้ง 2001 หน่วย ในคอลัมน์ของแคนัน สำหรับแต่ละตำแหน่งเลื่อน เพื่อสะดวกในการนำไปประมวลผลต่อ
3. แปลงค่าสัญญาติจิตอล 12 บิต เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ

$$Voltage = \frac{Analog\ Value}{4096} \times 3.3$$
 จากนั้นนำไปคำนวณหาแรงดันเฉลี่ย และเทียบกับแรงดันจากไฟเลี้ยง 3.3 V ให้เป็นร้อยละ เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจาก Datasheet และนำไปพล็อตเป็นกราฟ

1.1.10. ผลการทดลอง

สามารถพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Potentiometer ทั้ง 5 ชนิด ได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Potentiometer ทั้ง 5 ชนิด

1. Linear Potentiometer

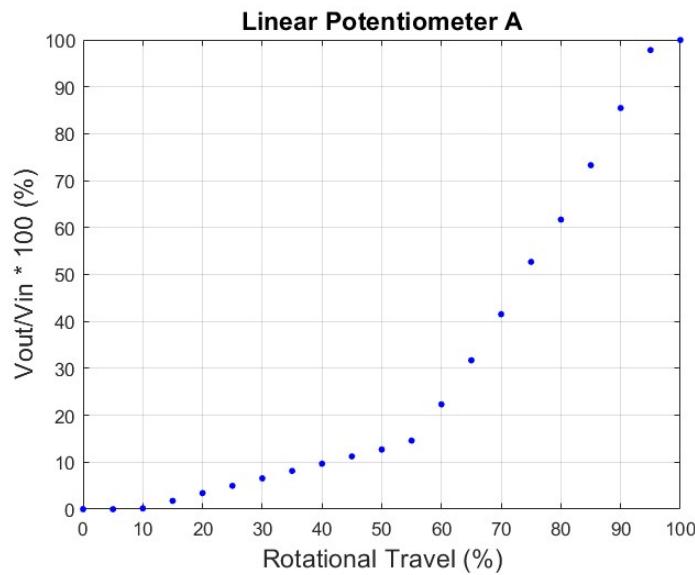
จากการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองให้เปลี่ยนตำแหน่งตัวเลื่อน Potentiometer ทุก ๆ 5 มิลลิเมตร และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าข้าอกตามการเลื่อนตำแหน่ง จากนั้นนำข้อมูลที่เก็บได้มามาแปลงเป็นค่าและหน่วยเปอร์เซ็นต์ตาม Datasheet คือ แรงดันไฟฟ้าข้าอกแปลงเป็น $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ และตำแหน่งการเลื่อนแปลงเป็น Rotational Travel (%) จึงได้ค่าบันทึกผลเป็นไปได้ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 จากนั้นนำค่าในตารางมาพล็อตเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 17 และรูปที่ 18

จากนั้นทำการพล็อตค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และ Rotational Travel หน่วยเปอร์เซ็นต์จาก Datasheet ในโปรแกรม Tracker เพื่อนำมาพล็อตเทียบกับค่าผลการทดลองที่ได้รวมถึงนำค่า Standard Resistance Tolerance จาก Datasheet ที่มีค่าเท่ากับ $\pm 20\%$ มาคำนวณ

กับค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ ของ Datasheet เพื่อนำมาพล็อตเป็น Error Bar เพื่อให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการเก็บผลการทดลองนั้นอยู่ในช่วงของ Datasheet ที่เป็นไปได้หรือไม่ และได้กราฟออกมารูปที่ 19 และรูปที่ 20

ตารางที่ 1 ข้อมูล Rotational Travel ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ หน่วยเปอร์เซ็นต์ที่เก็บได้จากการทดลองของ Linear Potentiometer A

Rotational Travel (%)	$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ (%)
0	0.0000
5	0.0000
10	0.1693
15	1.7735
20	3.4110
25	4.9742
30	6.5603
35	8.1384
40	9.6822
45	11.2467
50	12.7107
55	14.6114
60	22.3302
65	31.7292
70	41.5325
75	52.6912
80	61.6971
85	73.2847
90	85.4777
95	97.8258
100	99.9756

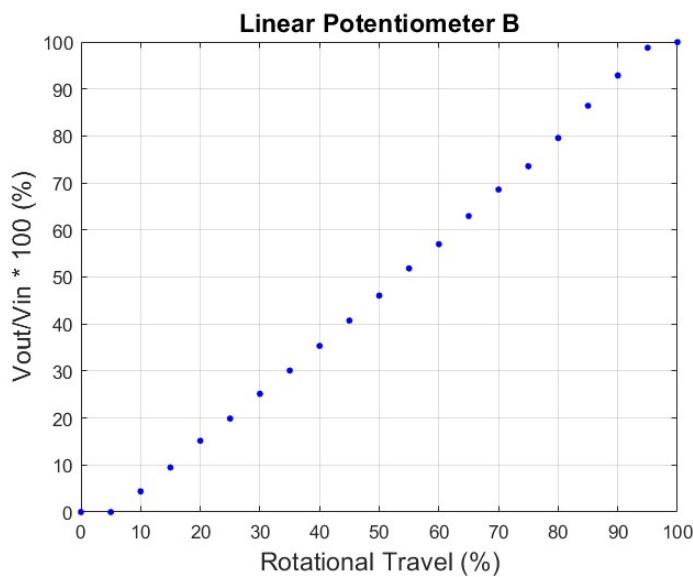


รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type A

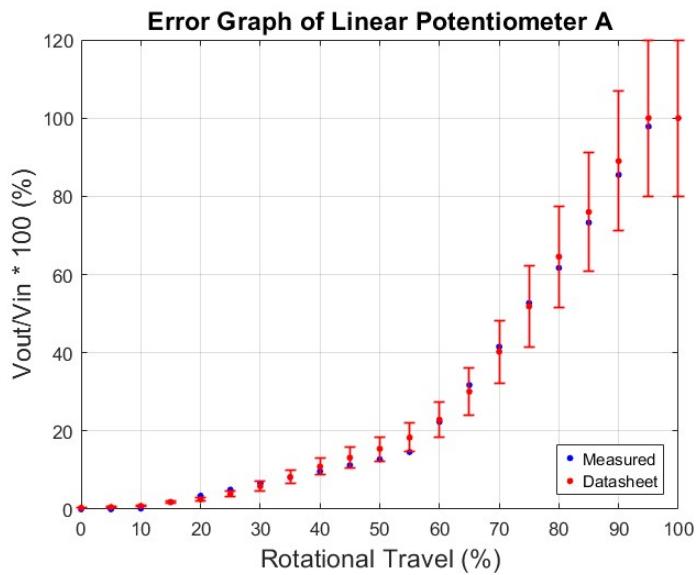
ตารางที่ 2 ข้อมูล Rotational Travel ในหน่วยเบอร์เซ็นต์ และ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ หน่วยเบอร์เซ็นต์ที่เก็บได้จากการทดลองของ Linear Potentiometer B

Rotational Travel (%)	$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$
0	0.0000
5	0.0000
10	4.3940
15	9.4785
20	15.1587
25	19.8839
30	25.1501
35	30.0984
40	35.3399
45	40.7316
50	46.0357
55	51.8227
60	56.9751
65	62.9744
70	68.5998

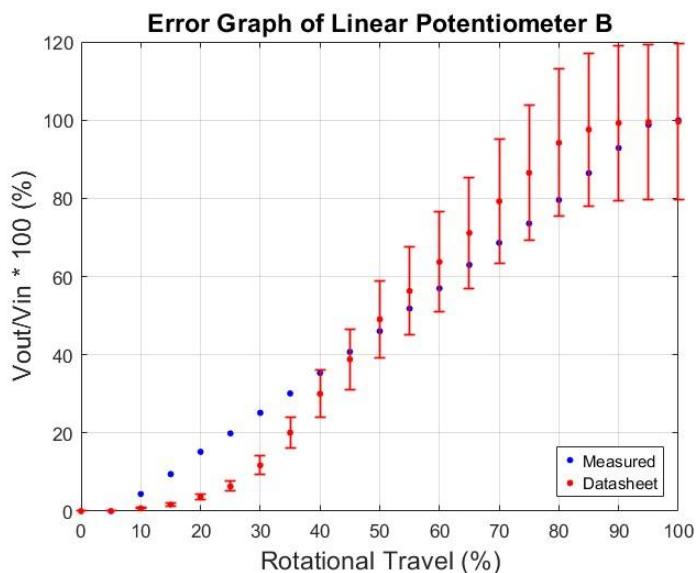
75	73.5651
80	79.5687
85	86.4296
90	92.8659
95	98.7546
100	99.9756



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type B



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จาก Datasheet ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type A



รูปที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จาก Datasheet ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type B

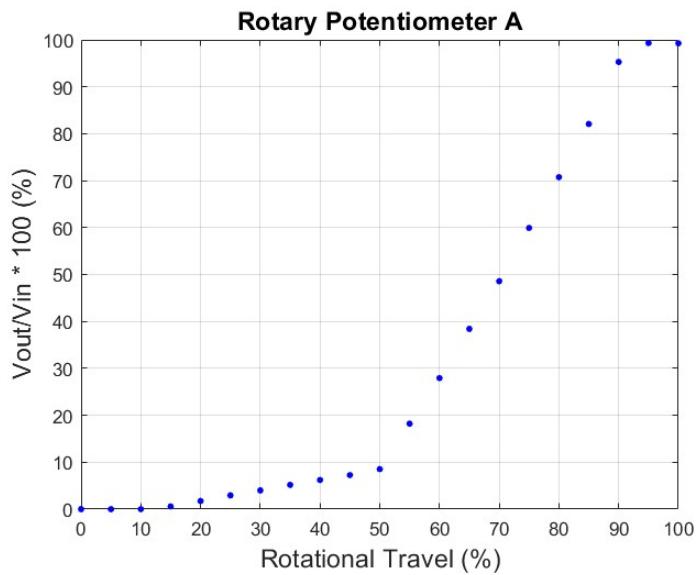
2. Rotary Potentiometer

จากการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองให้เปลี่ยนตำแหน่งของศาการหมุนของ Potentiometer ทุก ๆ 15 องศา และบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตามการหมุน จนนับนำข้อมูลที่เก็บได้มาแปลงเป็นค่าและหน่วยเบอร์เซ็นต์ตาม Datasheet คือ แรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์เป็น $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ และตำแหน่งของศาการหมุนแปลงเป็น Rotational Travel (%) จึงได้ค่าบันทึกผลเป็นไปได้ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 4 และตารางที่ 5 จากนั้นนำค่าในตารางมาพล็อตเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 21 รูปที่ 22 และรูปที่ 23

จากนั้นทำการพล็อตค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ และ Rotational Travel หน่วยเปอร์เซ็นต์ จาก Datasheet ในโปรแกรม Tracker เพื่อนำมาพล็อตเทียบกับค่าผลการทดลองที่ได้รวมถึงนำค่า Standard Resistance Tolerance จาก Datasheet ที่มีค่าเท่ากับ $\pm 20\%$ มาคำนวณกับค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100$ ของ Datasheet เพื่อมาพล็อตเป็น Error Bar เพื่อให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการเก็บผลการทดลองนั้นอยู่ในช่วง Error ตามใน Datasheet หรือไม่ และได้กราฟออกมามาดังรูปที่ 24 รูปที่ 25 และรูปที่ 26

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer A

Rotational Travel (%)	$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$
0	0.0000
5	0.0000
10	0.0000
15	0.5809
20	1.7305
25	2.9422
30	3.9967
35	5.1707
40	6.2118
45	7.2569
50	8.5330
55	18.2184
60	27.9321
65	38.4189
70	48.5703
75	59.9143
80	70.7489
85	82.0733
90	95.2932
95	99.3192
100	99.2610

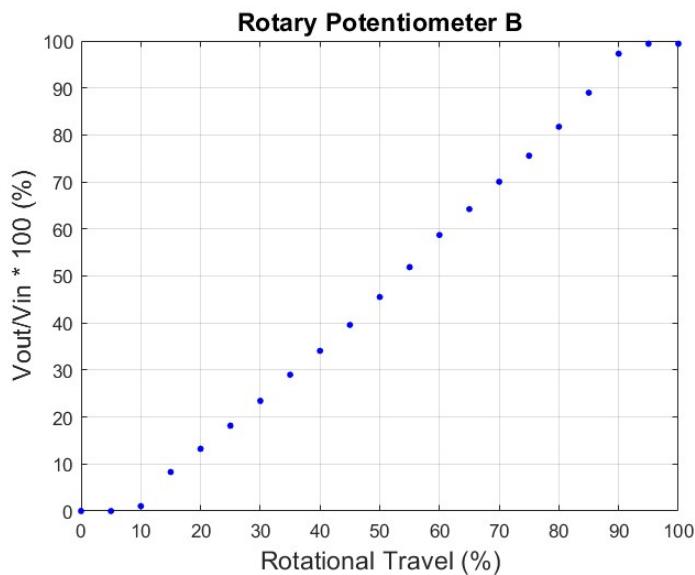


รูปที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer Type A

ตารางที่ 4 ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer B

Rotational Travel (%)	$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$
0	0.0000
5	0.0000
10	1.0438
15	8.2973
20	13.2379
25	18.1540
30	23.4308
35	28.9958
40	34.0876
45	39.5890
50	45.5376
55	51.8830
60	58.7163
65	64.2284
70	70.0514

75	75.5848
80	81.7508
85	88.9782
90	97.2864
95	99.4100
100	99.4097

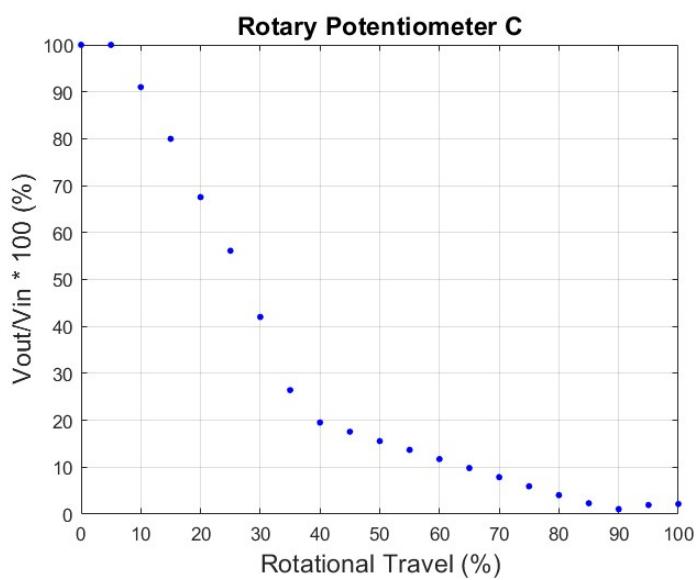


รูปที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer Type B

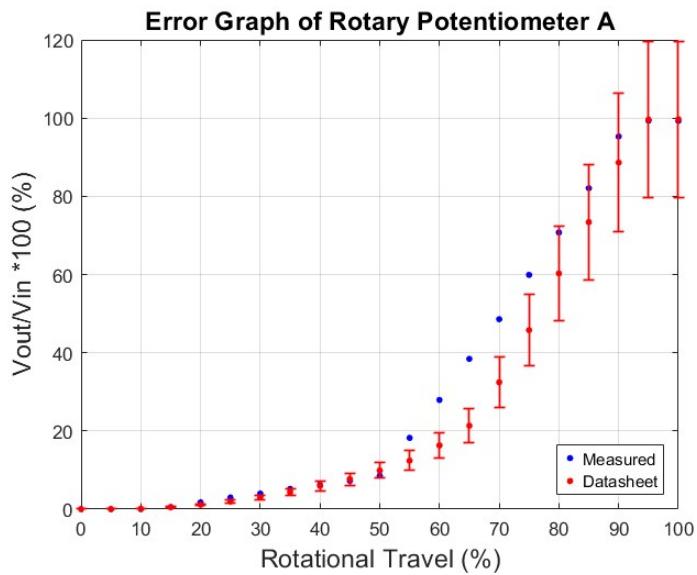
ตารางที่ 5 ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer C

Rotational Travel (%)	$\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$
0	100.0000
5	100.0000
10	90.9961
15	79.9749
20	67.5616
25	56.1243
30	42.0224
35	26.4368

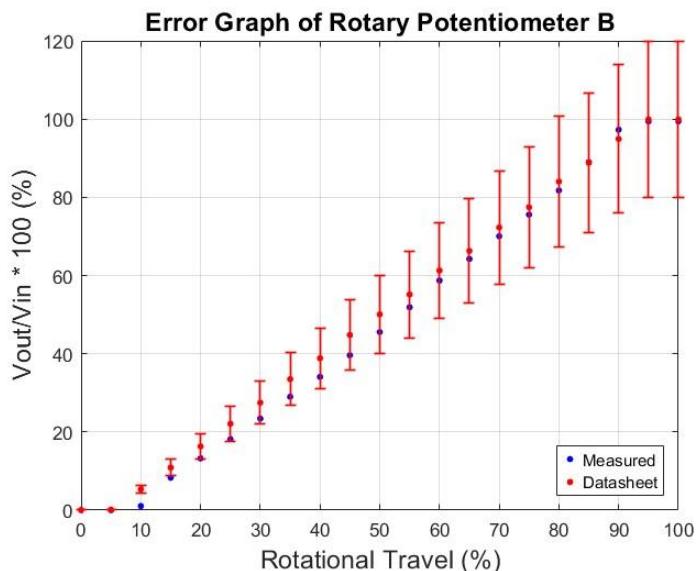
40	19.5253
45	17.5646
50	15.5692
55	13.6972
60	11.7251
65	9.8236
70	7.8827
75	5.9394
80	4.0500
85	2.3268
90	1.0632
95	1.9592
100	2.1768



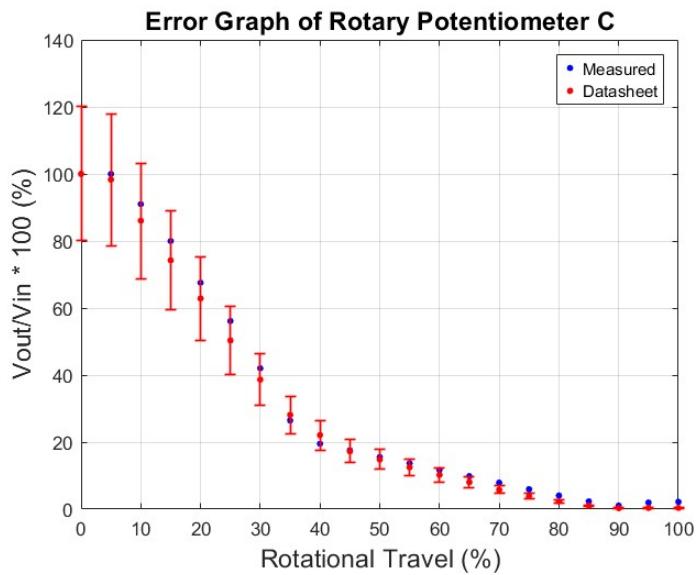
รูปที่ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Rotary Potentiometer Type C



รูปที่ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จาก Datasheet ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type A



รูปที่ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จาก Datasheet ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type B



รูปที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จาก Datasheet ระหว่างค่าของ $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ และ Rotational Travel (%) ของ Linear Potentiometer Type C

1.1.11. สรุปผล

1. Linear Potentiometer

จากการทดลองจะพบว่า การเปลี่ยนตำแหน่งตัวเลื่อนของ Potentiometer ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าออก โดย Potentiometer แต่ละชนิดจะให้ค่าแรงดันออกที่ตำแหน่งการเลื่อนต่างกันออกไป และเมื่อนำค่าจากการบันทึกผลมาพล็อตเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะการแปรผันของแรงดันเทียบกับตำแหน่งตัวเลื่อน และนำมาเบริยบเทียบกับกราฟจาก Datasheet ที่กำหนดค่า Error เป็น $\pm 20\%$ จากข้อมูล Standard Resistance Tolerance ใน Datasheet สำหรับพล็อต Error bar จะพบว่า

ลักษณะเส้นกราฟของ Linear Potentiometer Type A มีลักษณะเป็นแบบ Logarithmic ซึ่งคล้ายกับกราฟ Audio Taper ใน Datasheet และค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งการเลื่อนนั้นส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง Error $\pm 20\%$ ของค่า Datasheet แต่มีเพียงไม่กี่ตำแหน่งที่มีค่าเกินจากช่วง Error

ลักษณะเส้นกราฟของ Linear Potentiometer Type B มีลักษณะเป็นแบบ Linear ซึ่งคล้ายกับกราฟ Linear Taper ใน Datasheet และค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งการเลื่อนนั้นส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง Error $\pm 20\%$ ของค่า Datasheet แต่มีประมาณ 8 ตำแหน่งที่มีค่าเกินจากช่วง Error

2. Rotary Potentiometer

จากการทดลองจะพบว่า การเปลี่ยนองศาสตร์หมุนของ Potentiometer ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าออก โดย Potentiometer แต่ละชนิดจะให้ค่าแรงดันข้าออกที่ตำแหน่งของศาสตร์หมุนต่างกันออกไป และเมื่อนำค่าจากการบันทึกผลมาพิจารณาเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะการแปรผันของแรงดันเทียบกับตำแหน่งตัวเลือน และนำมาเปรียบเทียบกับกราฟจาก Datasheet ที่กำหนดค่า Error เป็น $\pm 20\%$ จากข้อมูล Standard Resistance Tolerance ใน Datasheet สำหรับพื้นที่ Error bar จะพบว่า

พบว่าลักษณะเส้นกราฟของ Rotary Potentiometer Type A มีลักษณะเป็นแบบเส้นตรงซึ่งคล้ายกับกราฟ A Series Tapers จากใน Data Sheet และค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของศาสตร์หมุนนั้นส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง Error $\pm 20\%$ ของค่า Datasheet แต่มีประมาณ 8 ตำแหน่งที่มีค่าเกินจากช่วง Error

พบว่าลักษณะเส้นกราฟของ Rotary Potentiometer Type B มีลักษณะเป็นแบบ Logarithmic ซึ่งคล้ายกับกราฟ B Series Tapers จากใน Datasheet และค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของศาสตร์หมุนนั้นส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง Error $\pm 20\%$ ของค่า Datasheet แต่มีประมาณ 4 ตำแหน่งที่มีค่าเกินจากช่วง Error

พบว่าลักษณะเส้นกราฟของ Rotary Potentiometer Type B มีลักษณะเป็นแบบ Reverse Logarithmic ซึ่งคล้ายกับกราฟ C Series Tapers จากใน Datasheet และค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ที่เก็บได้จากการทดลองในแต่ละเปอร์เซ็นต์ตำแหน่งของศาสตร์หมุนนั้นส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง Error $\pm 20\%$ ของค่า Datasheet แต่มีประมาณ 8 ตำแหน่งที่มีค่าเกินจากช่วง Error

1.1.12. อภิรายผล

1. Linear Potentiometer

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นว่า Linear Potentiometer ทั้งสองชนิดให้กราฟคุณลักษณะการแปรผันของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เทียบตามตำแหน่งเลื่อนต่างกันไป โดยที่ Linear Potentiometer Type A ให้กราฟแปรผันในลักษณะคล้ายสเกลล์อ็อกการิทึม ซึ่งเริ่มแปรผันด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ตำแหน่งเลื่อน 0 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งเลื่อน 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Potentiometer Type B ให้กราฟแปรผันในลักษณะสเกล เชิงเส้นซึ่งเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราคงที่ในช่วงหนึ่ง คือ ตั้งแต่ที่ตำแหน่งเลื่อนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก Potentiometer แต่ละชนิดถูกผลิตโดยใส่สัดส่วนนำที่แปรความต้านทานตามตำแหน่งด้วยอัตราต่างกัน เพื่อสร้างคุณลักษณะการแปรผันแบบต่าง ๆ กันขึ้นมา

เมื่อพิจารณาแนวโน้มกราฟจากการทดลอง เปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะการแปรผันจาก Datasheet จะเห็นว่าผลจาก Potentiometer Type A มีความใกล้เคียงกับกราฟที่ระบุใน Datasheet อยู่ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น อาจมากจากปัจจัย เช่น ความเคลื่อนในการผลิต

อุณหภูมิที่ส่งผลต่อความต้านทาน ความคลาดเคลื่อนในการกำหนดตำแหน่ง หรือปัจจัยรบกวนอื่น ขณะบันทึกผลที่ทำให้ค่าความต้านทานและแรงดันที่วัดได้มีความผันผวนไปด้วย

ในขณะที่ผลจาก Potentiometer Type B แม้มีลักษณะแปรผันแบบเชิงเส้นซึ่งความชันค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่มีอิทธิพลความคลาดเคลื่อนจากค่า $\frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100 (\%)$ ตาม Datasheet เป็นรายตำแหน่งเลื่อน จะเห็นว่ามีความแตกต่างกันมาก โดยพิจารณาได้ว่า สำหรับช่วงค่าแรงดันที่อ่านได้ตั้งแต่ 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แนวโน้มจากการทดลองมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงที่ความชันน้อยกว่า และแปรผันในช่วงกว้างกว่า คือ ในตำแหน่งเลื่อนประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แต่กราฟจาก Datasheet เป็นเส้นตรงความชันมากกว่า และแปรผันในช่วงแคบกว่า คือ ในตำแหน่งเลื่อนประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นลักษณะแนวโน้มกราฟที่ต่างกันอย่างค่อนข้างมีนัยสำคัญ จึงอาจเป็นไปได้ว่า Potentiometer Type B มีช่วงการแปรผันแบบเชิงเส้นไม่เท่ากับใน Datasheet หรืออาจเป็นรุ่นที่ไม่ตรงกับ Datasheet ทำให้ต้องมีการคำนวณปรับเทียบกราฟก่อนนำไปใช้วัดค่าโดยละเอียดจริง

ดังนั้น Linear Potentiometer แต่ละชนิดที่มีสเกลการแปรผันของแรงดันตามตำแหน่งเลื่อนต่างกัน สามารถนำไปใช้งานเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์นั้น ๆ ได้ โดยหากจะนำไปใช้วัดตำแหน่งทางกายภาพอย่างละเอียด ด้วยการแปลงการเปลี่ยนตำแหน่งเชิงกลเป็นการแปรความต้านทานและเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอีกที ควรจะมีการทดลองวัดแรงดันที่ได้ตามตำแหน่งก่อน เพื่อปรับเทียบชุดเซย์ความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลใน Datasheet

2. Rotary Potentiometer

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะเห็นว่า Rotary Potentiometer ทั้งสองชนิดให้กราฟคุณลักษณะการแปรผันของแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เทียบตามตำแหน่งหมุนต่างกันไป โดยที่ Rotary Potentiometer Type A ให้กราฟแปรผันในลักษณะคล้ายสเกลล็อกการวิธีมิ ซึ่งเริ่มแปรผันด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยที่ตำแหน่งหมุน 0 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งหมุน 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Potentiometer Type B ให้กราฟแปรผันในลักษณะสเกลเชิงเส้นซึ่งเปลี่ยนแปลงด้วยอัตราคงที่ในช่วงหนึ่ง คือ ตั้งแต่ที่ตำแหน่งหมุนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วน Potentiometer Type C ให้กราฟลักษณะแปรผันทางกับตำแหน่งหมุนในลักษณะคล้ายลดลงแบบสเกลล็อกการวิธีมิ ซึ่งเริ่มแปรผันด้วยขนาดอัตราการเปลี่ยนแปลงมากที่ตำแหน่งหมุน 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าแรงดันสูงสุด และมีขนาดอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งหมุน 100 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ เนื่องจาก Potentiometer แต่ละชนิดถูกผลิตโดยใส่วัสดุตัวนำที่ประมวลความต้านทานตามตำแหน่งด้วยอัตราต่างกัน เพื่อสร้างคุณลักษณะการแปรผันแบบต่าง ๆ กันขึ้นมา

เมื่อพิจารณาแนวโน้มกราฟจากผลการทดลอง เปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะการแปรผันจาก Datasheet จะเห็นว่าผลจาก Potentiometer Type A มีความใกล้เคียงกับกราฟที่ระบุใน

Datasheet อยู่ ในช่วงตำแหน่งหมุนที่ประมาณ 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ แต่วัดได้ค่าแรงดันสูงกว่าค่าจาก Datasheet ในช่วงตำแหน่งหมุนที่ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยที่แนวโน้มของกราฟแรงดันที่วัดได้ในช่วงครึ่งหลังนี้มีลักษณะความซับซ้อนที่คือโครงสร้างน้อยกว่ากราฟจาก Datasheet อาจเป็นเพราะว่าการผลิตวัสดุตัวนำภายในตัว Potentiometer ให้การแปรความต้านทานในลักษณะที่คล้ายคลื่อนจากที่ระบุ เช่น มีช่วงที่สภาพต้านทานมากกว่าที่ควรทำให้โดยรวมมีความต้านทานแปรตามตำแหน่งเขิงมุ่ไม่ตรงที่ระบุมาใน Datasheet

สำหรับผลจาก Potentiometer Type B ให้กราฟแปรผันตามและเป็นเชิงเส้น ตั้งแต่ช่วงตำแหน่งหมุนที่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าแรงดันใกล้เคียงกับข้อมูลจาก Datasheet ในขณะที่ผลจาก Potentiometer Type C ให้กราฟแปรผันสวนทางกับตำแหน่งหมุน ในลักษณะเป็นสเกลล์อกการิทึมซึ่งมีขนาดอัตราการเปลี่ยนแปลงน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ตำแหน่งหมุนที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ผลจาก Potentiometer ทั้งสองชนิดนี้ให้แรงดันและแนวโน้มลักษณะกราฟใกล้เคียงกับที่ระบุใน Datasheet โดยมีความคล้ายคลื่อนไปทางน้อยกว่าหรือมากกว่าค่าที่ระบุ คาดว่าความคล้ายคลื่อนที่ไม่แม่นยำ (Accurate) ต่อค่าที่ระบุลักษณะนี้อาจมาจากปัจจัย เช่น ความเคลื่อนในการผลิต อุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อความต้านทาน ความคล้ายคลื่นในการกำหนดตำแหน่งสัญญาณรบกวนจากหน้าสัมผัสของวัสดุทางกายภาพ หรือปัจจัยรบกวนอื่นขณะบันทึกผลที่ทำให้ค่าความต้านทานและแรงดันที่วัดได้มีความผันผวนไปด้วย

ดังนั้น Rotary Potentiometer แต่ละชนิดที่มีสเกลการแปรผันของแรงดันตามตำแหน่ง เลื่อนต่างกัน ที่สามารถนำไปใช้งานเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์นี้ ๆ ได้ โดยหากจะนำไปใช้วัดตำแหน่งทางกายภาพอย่างละเอียด โดยเฉพาะการใช้ Potentiometer Type B ที่แบบเบิงเส้น ด้วยการแปลงการเปลี่ยนตำแหน่งเขิงกลเป็นการแปรความต้านทานและเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าอีกที ควรจะมีการทดลองวัดแรงดันที่ได้ตามตำแหน่งก่อน เพื่อปรับเทียบชดเชยความคล้ายคลื่นจากข้อมูลใน Datasheet

1.1.13. ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีสเกลบอกความละเอียดบน PotenXplorer ของ Linear Potentiometer
2. ของ Potentiometer Type B ควรมีความยาวพอที่จะสามารถสัมผัสกับขั้วต่อภายใน PotenXplorer โดยไม่หลุด

1.1.14. เอกสารอ้างอิง

1. “หลักการพื้นฐานของการวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์” โดย สุนทร โสตถิพันธุ์
2. “หลักสถิติเบื้องต้น” โดย หญิกาณุจน์ ชูบรรณ
3. “เคล็ดลับการเขียนรายงานวิจัยและวิทยานิพนธ์” โดย สิทธิ์ ชีรสรณ์

4. “คู่มือปฏิบัติการพิสิกส์ทั่วไป 1” และ “คู่มือปฏิบัติการพิสิกส์ทั่วไป 2” โดย ภาควิชาพิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. “หลักสถิติเบื้องต้น” โดย หทัยกาญจน์ ชูบรรณ
6. <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/pta-778345.pdf>
7. <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

1.2. Schmitt-trigger Circuit ของ Linear Potentiometer Type A

1.2.1. จุดประสงค์

1. เพื่อศึกษาการแปลงสัญญาณ Analog ที่อ่านค่าได้อย่างต่อเนื่องจาก Potentiometer เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt-trigger

1.2.2. สมมติฐาน

สัญญาณ Analog จาก Potentiometer สามารถแปลงเป็นสัญญาณ Digital ได้โดยใช้วงจร Schmitt-trigger โดยสัญญาณ Output จะตอบสนองต่อสัญญาณ Input ที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งของ Potentiometer อย่างต่อเนื่อง และเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งที่เลื่อน

1.2.3. ตัวแปร

- | | |
|--------------|---|
| ตัวแปรต้น | ตำแหน่งเลื่อนของ Linear Potentiometer แพรค่าตั้งแต่ตำแหน่ง 0 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ |
| ตัวแปรตาม | แรงดันไฟฟ้าจากที่วัดได้จาก Microcontroller ในแต่ละตำแหน่งเลื่อน |
| ตัวแปรควบคุม | แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายให้ Potentiometer, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง |

1.2.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ตำแหน่งเลื่อนของ Linear Potentiometer หมายถึง ตำแหน่งของตัวเลื่อนที่วัดด้วยเวอร์เนียร์ค่าลิปเปอร์จากตำแหน่งเริ่มต้น ณ 0 มิลลิเมตร ที่ปลายสุดซึ่งให้ค่าแรงดันขาออกเป็น 0 V ไปในแนวเส้นตรง ตามระยะของตัวอุปกรณ์ที่มีระยะเลื่อนมากสุด 60 มิลลิเมตร

1.2.5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

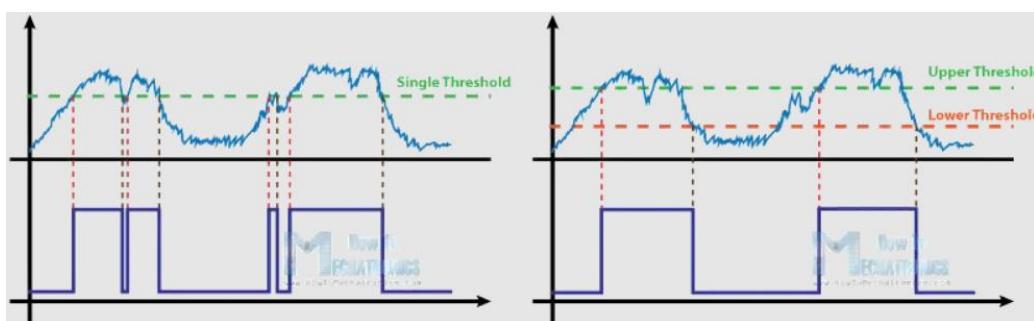
1. Microcontroller หรือบอร์ดควบคุม ในการทดลองนี้ หมายถึงบอร์ด Microcontroller รุ่น Nucleo STM32G474RE
2. Slide Potentiometer Type A หมายถึง เซนเซอร์รุ่น PTA6043-2015DPA103

1.2.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การทำงานของ Schmitt-trigger Circuit

Schmitt-trigger Circuit เป็น Bistable multivibrator circuit ชนิดหนึ่งที่ใช้ Emitter-coupled สามารถแปลงสัญญาณ Analog ได้ ๆ ให้เป็นสัญญาณ Digital โดยเปลี่ยนสัญญาณที่ Output จากระดับสูงเป็นต่ำ หรือจากระดับต่ำเป็นสูงตามค่า Threshold ที่กำหนด

ตัวอย่างเช่น หากมีสัญญาณ Input ที่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งประกอบด้วย 2 Pulse การใช้วงจรตรวจจับที่มีค่า Threshold เพียงระดับเดียวอาจทำให้เกิดการตรวจจับผิดพลาดได้ และอาจแสดง Pulse เกิน แต่เมื่อใช้ Schmitt-trigger วงจรจะสามารถตรวจจับ Input ได้อย่างถูกต้องเพียง 2 Pulse เนื่องจากมีค่า Threshold 2 ระดับ จึงสามารถกรองสัญญาณรบกวนที่สูงหรือต่ำกว่าค่า Threshold ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 27 สัญญาณที่ได้จาก Schmitt-trigger Circuit

1.2.7. วิธีดำเนินการทดลอง

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 1.2.3
2. เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และจัดเตรียมวงจรการทดลอง โดยต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก Potentiometer และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ Potentiometer
3. ออกแบบและสร้าง Blocks ด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับเชื่อมต่อกับ Microcontroller เพื่อเก็บค่าการทดลอง
4. ทำการทดลอง Schmitt-trigger Circuit ของ Linear Potentiometer A โดยค่อย ๆ เลื่อนตำแหน่งตัวเลื่อนของ Slide Potentiometer จากตำแหน่งที่ 0 มิลลิเมตร ไปจนถึง 60 มิลลิเมตร และเลื่อนกลับไปมา และบันทึกข้อมูลอุปกรณ์ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย และตำแหน่งการเลื่อนลงใน MATLAB
5. นำมาข้อมูลทั้งหมดจากทุกขั้นตอนมาจัดทำลงรายงาน

1.2.8. วัสดุอุปกรณ์

1. สายจัมเปอร์ จำนวน 3 เส้น
2. PTA6043-2015DPA103 1 ตัว
3. Nucleo STM32G474RE 1 ตัว
4. ชุดทดลอง PotenXplorer 1 ชุด

5. สายอัปโหลด USB 1 สาย

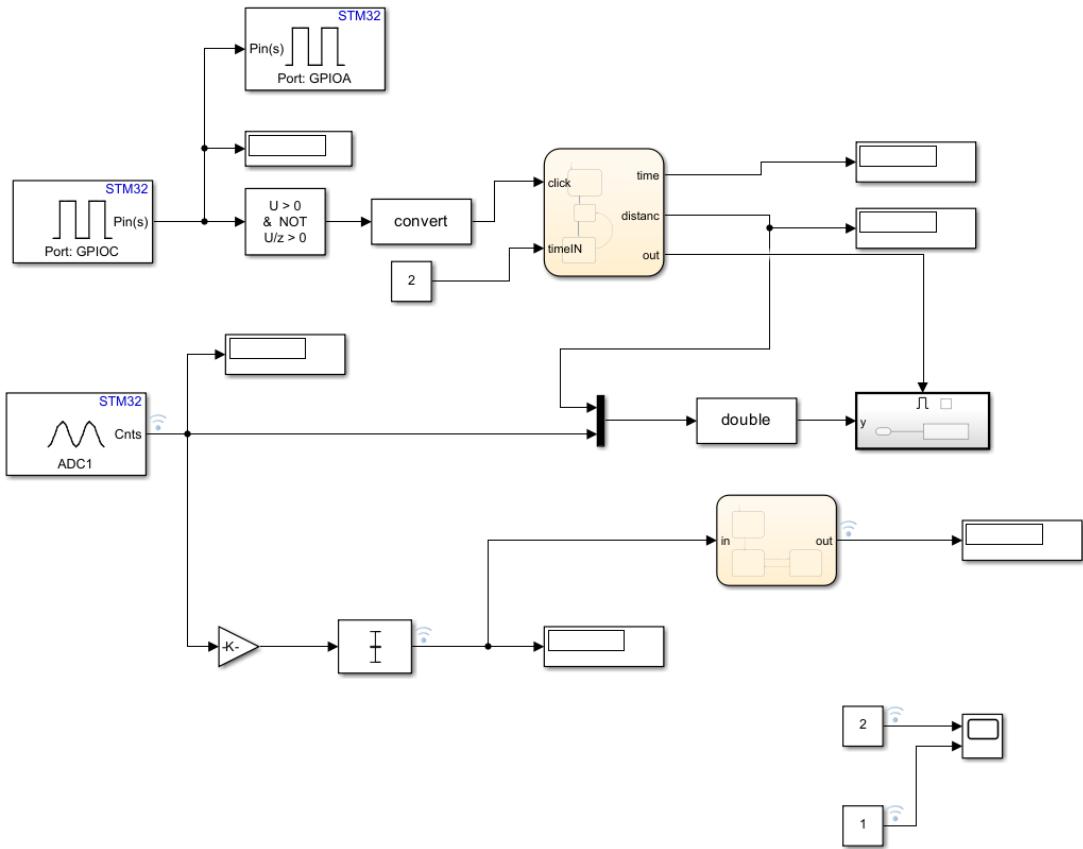
6. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง

1.2.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

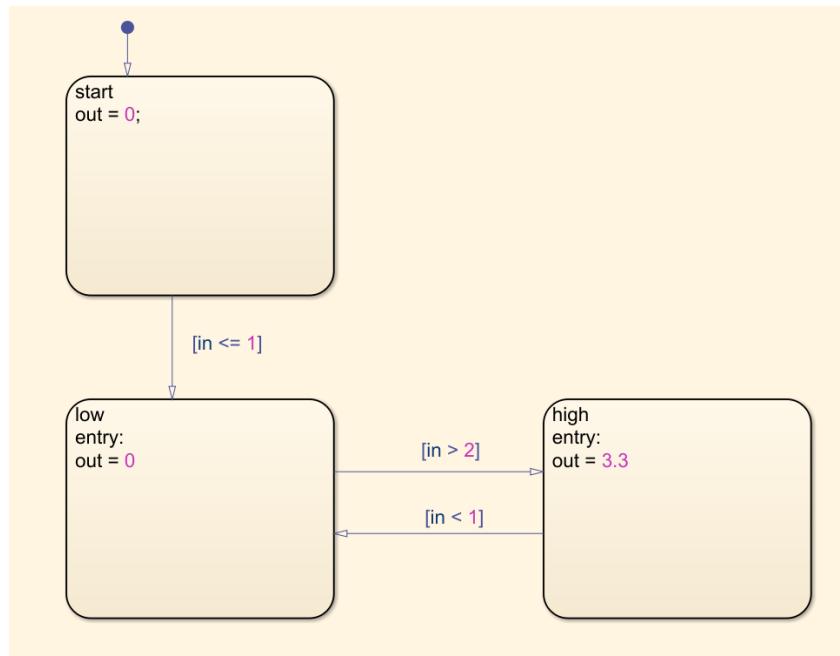
ตอนที่ 1 การออกแบบโปรแกรม Simulink และเตรียมการเก็บข้อมูล

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 1.2.3.

2. ทำการเขียน Block diagram บนโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบโปรแกรมเชื่อมต่อ Microcontroller ให้แสดงสัญญาณ Output แปรับตามสัญญาณ Input แบบ Real Time



รูปที่ 28 Block diagram ของ Schmitt-trigger Circuit ใน Simulink เพื่อแสดงสัญญาณ Output แปรับตามสัญญาณ Input แบบ Real Time



รูปที่ 29 ข้างใน Chart จาก Block diagram ที่มีการเขียน Stateflow เพื่อแสดงสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

จากนั้นใช้ Block Chart สร้าง Finite State Machine ประเภท Moore Machine ซึ่งให้ output ขึ้นกับ State ปัจจุบัน เพื่อให้ทำงานเลียนแบบวงจร Schmitt Trigger ซึ่งจะแปลงสัญญาณดิจิตอลที่ได้รับ เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยรับมือกับสัญญาณรบกวน (noise) ที่ผันผวนได้

ข้างใน Chart นี้จะมีทั้งหมด 3 States โดย State แรก ชื่อ start สำหรับกำหนดค่าตัวแปร out ให้มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของ โดยจะกำหนดตาม Digital logic ของสัญญาณ Output ที่ถ้าหากเป็น 0 V จะมี logic เป็น 0 และ 3.3 V จะมี logic เป็น 1 และจะเข้าไปทำงานใน State ที่สองชื่อ low ก็ต่อเมื่อตัวแปร in ซึ่งเป็นตัวแปรสำหรับเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยซึ่งหากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ Lower Threshold ที่ 1 V ($in \leq 1$) ซึ่งจะทำให้ตัวแปร out มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะมี logic เป็น 0 และเมื่อได้ก็ตามที่ตัวแปร in มีค่ามากกว่า Upper Threshold ที่ 2 V ($in > 2$) จะเข้าไปทำงานยัง State ที่สามชื่อว่า high จะทำให้ตัวแปร out มีค่าเท่ากับ 3.3 หรือก็คือมี logic เป็น 1 แต่เมื่อได้ก็ตามที่ตัวแปร in มีค่าน้อยกว่า 1 V ($in < 1$) จะกลับไปทำงานยัง State สองชื่อ low

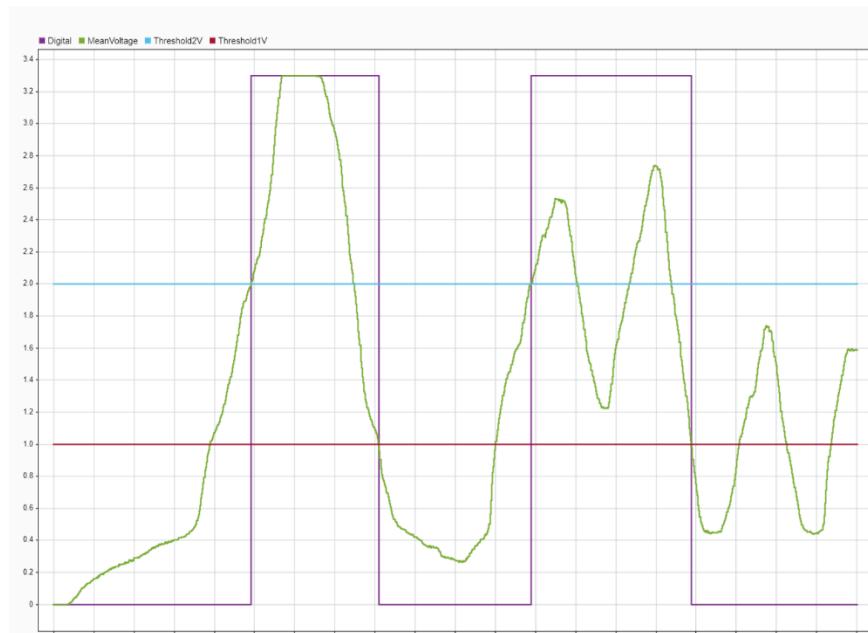
ตอนที่ 2 การดำเนินการเก็บข้อมูล

1. ต่อวงจรทดลอง โดยต่อ Microcontroller Nucleo STM32G474RE ลงบนบอร์ดชุดทดลอง PotenXplorer และเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์
2. เก็บผลการทดลอง โดยต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก Linear Potentiometer Type A และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ Linear Potentiometer Type A ที่ขาปลาย รันโปรแกรม Simulink เพื่อเริ่มเก็บข้อมูลจาก Microcontroller

3. ปรับตำแหน่งเลื่อนของ Linear Potentiometer ไปมา โดยเริ่มที่ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร ด้วยการวัดจากเวอร์เนียร์คัลิปเปอร์

1.2.10. ผลการทดลอง

จากการทดลองที่มีการใช้สัญญาณจากการเลื่อน Linear Potentiometer Type A ด้วยมือเป็น Input และ สัญญาณ Digital เป็น Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output ประผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time



รูปที่ 30 Data Inspector ของ Schmitt-trigger Circuit ของ Linear Potentiometer Type A

1.2.11. สรุปผล

จากการทำการทดลอง Schmitt-trigger Circuit ของ Linear Potentiometer A โดยค่อย ๆ เลื่อนตำแหน่งตัวเลื่อนของ Slide Potentiometer จากตำแหน่งที่ 0 มิลลิเมตร ไปจนถึง 60 มิลลิเมตร และเลื่อนกลับไปมา และบันทึกข้อมูลอุปกรณ์ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย และตำแหน่งการเลื่อน

1.2.12. อภิรายผล

จะพบว่ากราฟที่ได้จากการทดลองมีสัญญาณ Input ที่เข้ามายัง Analog ซึ่งจะถูกแปลงเป็น Digital โดยใช้ Threshold 2 ระดับ คือ ที่ 1 V และ 2 V จึงทำให้สามารถตรวจจับสัญญาณ Input ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ รวมถึงสามารถกรองสัญญาณรบกวนที่มีค่าเกินหรือต่ำกว่าค่า Threshold ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ได้สัญญาณ Output ที่เป็น Digital ได้อย่างแม่นยำ

1.2.13. ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีสเกลบอกรความละเอียดบน PotenXplorer ของ Linear Potentiometer

1.2.14. เอกสารอ้างอิง

1. http://www.tatc.ac.th/files/09011219194805_11052610102636.pdf
2. <https://th.fmuser.net/wap/content/?21083.html>
3. <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>

2. Incremental Encoder

2.1. จุดประสงค์

- 2.1.1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder
- 2.2.2. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และความหมายของการ config parameter ใน IOC
- 2.2.3. เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป โดยจะถูกนำไปที่รูปแบบเฟสของสัญญาณในแต่ละ Output ของ Incremental Encoder
- 2.2.4. เพื่อศึกษาการหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder ในชุดการทดลอง
- 2.2.5. เพื่อศึกษาการอ่านค่า Incremental Encoder ในรูปแบบของสัญญาณแบบ Quadrature encoder ทุกรูปแบบ และทุกวิธีการ (QEI และ Polling Method)
- 2.2.6. เพื่อศึกษาการอ่านค่า Raw Signal ของ QEI Method และแปลงเป็น Relative Position ด้วยการ Integrate Discrete Velocity และแสดงผลพร้อมกัน
- 2.2.7. เพื่อศึกษาการใช้ Incremental Encoder โดยใช้ MATLAB Simulink ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- 2.2.8. เพื่อศึกษาการอ่านด้วย QEI และ Polling Method
- 2.2.9. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อ Homing Incremental Encoder

2.2. สมมติฐาน

- 2.2.1. การอ่านค่าจาก Incremental Encoder สามารถอ่านค่าตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder ได้จากการอ่านค่าสัญญาณ A กับ B ของ Incremental Encoder ได้
- 2.2.2. การอ่านค่า Incremental Encoder รูปแบบ X4 ที่อ่านค่าจากสัญญาณ A กับ B ของ Incremental Encoder นั้นมีการอ่านค่าความละเอียดได้มากกว่ารูปแบบ X1 และ X2
- 2.2.3. ค่าตำแหน่ง และค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการอ่านค่าของ Incremental Encoder รูปแบบ X1 X2 และ X4 จากสัญญาณ A กับ B ของ Incremental Encoder ตัวเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน
- 2.2.4. การใช้ QEI จะให้ค่าการอ่านที่มีความเที่ยงตรง และแม่นยำกว่าใช้ Polling Method
- 2.2.5. การเขียนโปรแกรม Homing Incremental Encoder จะสามารถช่วยให้รีเซ็ตค่าตำแหน่งของ Incremental Encoder และเข็จจุดใหม่เป็นจุดเริ่มต้น

2.2.6. การใช้ Poling Method นั้นมีการใช้เวลาในการประมวลผลหรือคำนวนค่าต่างๆนานกว่าการใช้ QEI เป็นอย่างมาก

2.3. ตัวแปร

- | | |
|--------------|---|
| ตัวแปรต้น | ชนิดของ Incremental Encoder คือ PEC11R-4020F-S0024 และ AMT103, วิธีในการอ่าน Encoder คือ QEI และ Polling, Resolution ในการอ่าน |
| ตัวแปรตาม | สัญญาณพัลส์ที่ได้จาก STM32 Controller, ตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้, ประสิทธิภาพในการอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุม, |
| ตัวแปรควบคุม | แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายให้ Encoder, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง |

2.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

- คลิกขวา คือ การใช้นิ้วกลางกดไปที่ปุ่มด้านขวาของเมาส์นิ้ว คือ เป็นอวัยวะของมนุษย์ที่อยู่ปลายสุดของมือ ในมนุษย์จะมีนิ้วมือหางละ 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วหัวแม่มือ นิ้วซี่ นิ้วกลาง นิ้วนาง นิ้วก้อย
- คลิกซ้าย คือ การใช้นิ้วซีกกดไปที่ปุ่มด้านขวาของเมาส์
- ตำแหน่งเชิงมุม หมายถึงตำแหน่งที่วัดเป็นมุมสัมบูรณ์จากตำแหน่งเริ่มต้น ณ 0 radian ที่แกนของ Encoder ตอนที่เริ่มจ่ายไฟเลี้ยงทำงาน

2.5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

- เมาส์ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมตัวชี้บันจอคอมพิวเตอร์ (pointing device)
- นิ้ว คือ เป็นอวัยวะของมนุษย์ที่อยู่ปลายสุดของมือ ในมนุษย์จะมีนิ้วมือหางละ 5 นิ้ว ได้แก่ นิ้วหัวแม่มือ นิ้วซี่ นิ้วกลาง นิ้วนาง นิ้วก้อย
- Nucleo STM32G474RE คือ เป็นบอร์ดพัฒนา (development board) ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE จากบริษัท STMicroelectronics

2.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

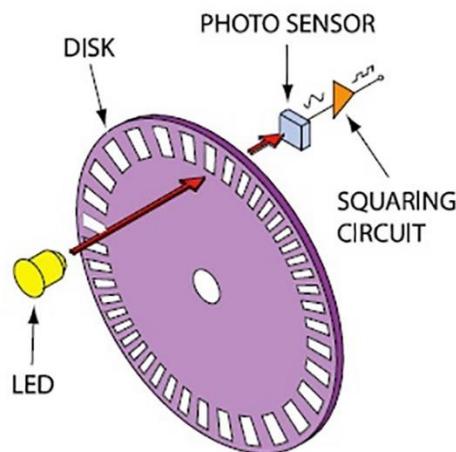
1. Incremental Encoder

เป็นเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถตรวจจับตำแหน่งเชิงมุมได้ และทิศทางในการหมุนได้ โดยเมื่อทำการหมุน Incremental Encoder จะมีการสัญญาณพัลส์ออกมา ซึ่งสัญญาณเหล่านี้เมื่อนำไปทำการคำนวน และทำการวิเคราะห์ก็จะได้ค่าตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมออกมา



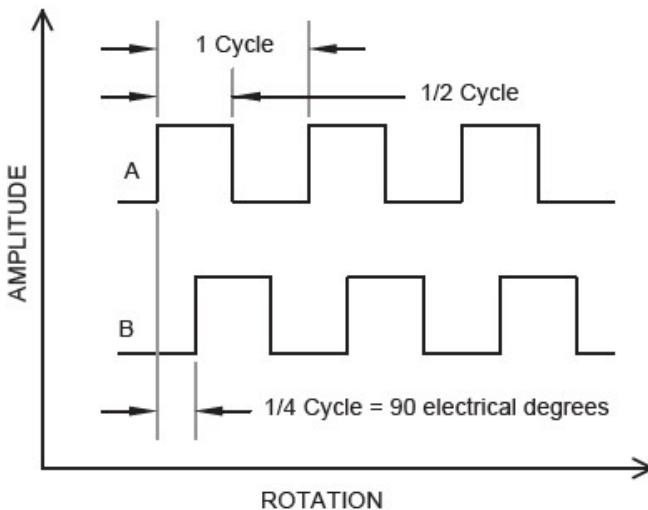
รูปที่ 31 Incremental Encoder

โดยหลักการทำงานของ Incremental Encoder จะมีสัญญาณพัลส์สองสัญญาณ คือ สัญญาณ A และ B ซึ่งทั้งสองสัญญาณนั้นเกิดจากแผ่นดิสก์ที่มีช่องที่เป็นรูແ Sang และทีบ Sang ซึ่งเมื่อกำการหมุน Incremental Encoder สัญญาณจาก A กับ B เป็นสัญญาณพัลส์ซึ่งค่าที่จะได้จะเป็น High กับ Low



รูปที่ 32 การอ่านค่าจากแผ่นดิสก์โดยใช้ Photo sensor

โดยที่สัญญาณ A และ B นั้นต่างเฟสกันที่ 90 องศา โดยค่าความละเอียดของ Incremental Encoder คือ Pulse Per Revolution (PPR) ซึ่งคือจำนวนพัลส์ที่จะนับได้ในหนึ่งรอบของการหมุน โดย Incremental Encoder แต่ละรุ่นนั้นก็จะมีค่า PPR ที่ต่างกัน



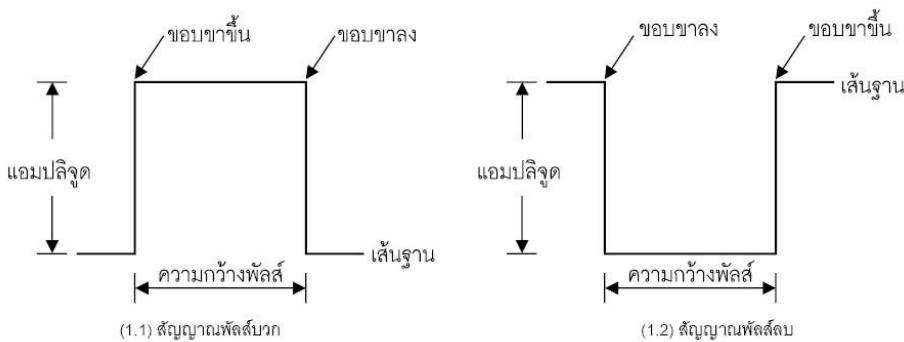
รูปที่ 33 สัญญาณ A กับ B จาก Incremental Encoder

2. สัญญาณขอบขาขึ้นและสัญญาณขอบขาลง

เป็นรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของสถานะทาง Digital ระหว่างสถานะต่าง ๆ โดยจะมีการนำมาใช้กับวงจรทาง Digital และสามารถนำมาใช้ประยุกต์ใช้ในการอ่านค่า Incremental Encoder ได้

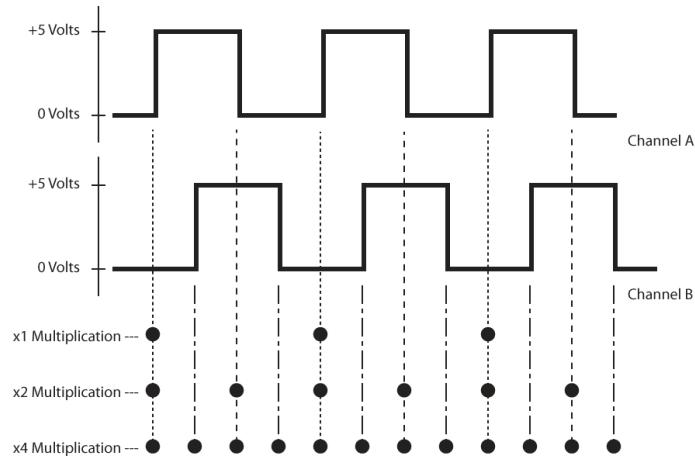
สัญญาณขอบขาขึ้น (Rising Edge) เป็นการเปลี่ยนแปลงของสถานะทาง Digital ที่เปลี่ยนแปลงจากสถานะ 0 (LOW) ไปยังสถานะ 1 (HIGH)

สัญญาณขอบขาลง (Falling Edge) เป็นการเปลี่ยนแปลงของสถานะทาง Digital ที่เปลี่ยนแปลงจากสถานะ 1 (HIGH) ไปยังสถานะ 0 (LOW)



รูปที่ 34 สัญญาณขอบขาขึ้นและสัญญาณขอบขาลง

โหมดการนับของ Incremental Encoder (Counting Mode) เป็นรูปแบบการนับสัญญาณของ Incremental Encoder ซึ่งแต่ละแบบจะมีผลต่อค่าความละเอียดที่จะนับได้ โดยแต่ละรูปแบบมีการอ่านค่าจากสัญญาณ A กับ B โดยจะมีการอ่านค่าสัญญาณขอบขาขึ้น และสัญญาณขอบขาลงซึ่งขึ้นอยู่กับโหมดที่เลือกใช้ในการอ่านค่าจาก Incremental Encoder ซึ่งโหมดในการอ่านค่าจาก Incremental Encoder มี 3 โหมด ได้แก่



รูปที่ 35 โหมดการอ่านค่าแบบ X1 X2 X4

1. โหมดการอ่านค่าแบบ X1

เป็นการอ่านค่าจากสัญญาณขอบขึ้น (Rising Edge) จากสัญญาณ A เมื่อเป็นขอบขึ้นแล้วก็จะมาอ่านค่าที่สัญญาณของ B เพื่อที่จะสามารถรู้ทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder ได้ ซึ่งการอ่านค่าแบบ X1 จะได้ความละเอียดใน 1 รอบการหมุนเท่ากับ PPR (Pulses Per Revolution) ของ Incremental Encoder ตัวนั้น

2. โหมดการอ่านค่าแบบ X2

โดยโหมดการอ่านค่าแบบ X2 นั้นเป็นการอ่านค่าจากสัญญาณขอบขึ้น (Rising Edge) และสัญญาณขอบขาลง (Falling Edge) จากสัญญาณ A เมื่ออ่านค่าขอบขึ้นหรือค่าขอบขาลงแล้วก็จะมาอ่านค่าที่สัญญาณ B เพื่อที่จะสามารถรู้ทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder ได้ ซึ่งการอ่านค่าแบบ X2 จะได้ความละเอียดใน 1 รอบการหมุนเท่ากับ 2 PPR (Pulses Per Revolution) ของ Incremental Encoder ตัวนั้น

3. โหมดการอ่านค่าแบบ X4

โดยโหมดการอ่านค่าแบบ X4 นั้นเป็นการอ่านค่าจากสัญญาณขอบขึ้น (Rising Edge) และสัญญาณขอบขาลง (Falling Edge) จากสัญญาณ A และ B เมื่ออ่านค่าขอบขึ้นหรือค่าขอบขาลงถ้าสัญญาณขอบขึ้น หรือขอบขาลงเป็นของสัญญาณ A ก็อ่านสัญญาณ B แต่ถ้าอ่านค่าขอบขาขึ้น หรือขอบขาลงเป็นของสัญญาณ B ก็จะอ่านค่าสัญญาณ A เพื่อที่จะสามารถรู้ทิศทางการหมุนของ Incremental Encoder ได้ ได้ ซึ่งการอ่านค่าแบบ X4 จะได้ความละเอียดใน 1 รอบการหมุนเท่ากับ 4 PPR (Pulses Per Revolution) ของ Incremental Encoder ตัวนั้น

3. วิธีการอ่านค่า Incremental Encoder โดยใช้วิธี Polling Method

วิธีการอ่านค่า Incremental Encoder ด้วยซอฟต์แวร์ โดยคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบค่าสถานะของสัญญาณ A กับสัญญาณ B เพื่อถูกการเปลี่ยนแปลงของสถานะของสัญญาณว่ามีการเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างไร โดยสามารถใช้ทดการทำงานแบบ X1 X2 X4

4. วิธีการอ่านค่า Incremental Encoder โดยใช้วิธี QEI

โดยเป็นวิธีการอ่านค่า Incremental Encoder ด้วยฮาร์ดแวร์ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทำการสำหรับการนับของสัญญาณค่าสถานะสัญญาณ A กับ B ซึ่งไม่ต้องใช้ CPU ในการคำนวณค่าช่วยให้ลดภาระของ CPU ได้ โดยการอ่านค่าด้วยวิธี QEI ก็ยังสามารถใช้ทดการทำงานแบบ X1 X2 X4

5. Datasheet ของ Incremental Encoder (AMT103)

CUI Devices is now Same Sky! [Learn More](#)

Additional Resources: [Product Page](#) | [3D Model](#)

date 09/12/2024
page 1 of 8



SERIES: AMT10 | **DESCRIPTION:** MODULAR INCREMENTAL ENCODER

FEATURES

- patented capacitive ASIC technology
- low power consumption
- CMOS outputs
- 16 DIP switch selectable resolutions
- index pulse
- modular package design
- straight [radial] and right-angle [axial] versions
- 8 mounting hole options for radial version
- 8 mounting hole options for axial version
- 40-100°C operating temperature



ELECTRICAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
power supply	VDD	3.6	5	5.5	V
current consumption	with unloaded output		6		mA
output high level		VDD-0.8			V
output low level			0.4		V
output current	CMOS sink/source per channel		2		mA
rise/fall time		30			ns

INCREMENTAL CHARACTERISTICS

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

Notes:
1. Resolution selected via adjustable DIP switch, pre-set to 2048 PPR. All resolutions are listed as pre-quadrature, meaning the final number of counts is PPR x 4.

2. Some stepper motors may leak a magnetic field causing the AMT index pulse to not function properly (non-magnetic version available with 8 pulses per revolution).

sameskydevices.com

รูปที่ 36 Datasheet ของ Incremental Encoder (AMT103)

จาก Datasheet ของ Incremental Encoder (AMT103) ทำให้ทราบว่าเราไม่สามารถทราบค่าที่ต่อไปนี้ได้จาก Datasheet ของ Incremental Encoder เนื่องจากไม่ระบุว่าภายในของ Encoder นั้นตั้งค่าสวิตช์แบบใดไว้ เราจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหาค่า PPR

6. Datasheet ของ Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024)



Features

- Push switch option
- Compact, rugged design
- High reliability
- Metal bushing/shaft
- RoHS compliant*

PEC11R Series - 12 mm Incremental Encoder

Electrical Characteristics

Output	2-bit quadrature code
Contact Rating	10 mA @ 5 VDC
Insulation Resistance	100 megohms @ 250V DC
Dielectric Withstanding Voltage	300 VAC min.
Sea Level	Continuous
Electrical Travel	2.0 ms max.**
Contact Bounce (15 RPM)	60 ms max.**
RPM (Operating)	60 max.**

Environmental Characteristics

Operating Temperature Range	-30 °C to +70 °C (-22 °F to +158 °F)
Storage Temperature Range	-40 °C to +85 °C (-40 °F to +185 °F)
Humidity	MIL-STD-202, Method 103B, Condition B
Vibration	10-55-10 Hz / 1 min. / Amplitude 1.5 mm
Shock	100 G
IP Rating	IP 40

Mechanical Characteristics

Mechanical Angle	360 ° Continuous
Torque	
Detent .. 30 to 90 gf-cm (0.41 to 1.25 oz.-in.)	
Running .. 10-70 gf-cm (0.14 to 0.97 oz.-in.)	
Mounting .. 10.2 kgf-cm (8.83 lb-in.) max.	
Shaft Side Load (Static)	
..... 2.04 kgf (4.5 lbs.) min.	
Weight	5 gm (0.17 oz.) max.
Terminals	Printed circuit board terminals
Soldering Condition	
Wave Soldering	Sn95.5/Ag2.0/Cu0.7 solder with no-clean flux: 260 °C max. for 3 ± 1 sec.
Hand Soldering	Not recommended
Hardware	One flat washer and one mounting nut supplied with each encoder
Rotational Life	30,000 cycles min.
Switch Life	20,000 cycles min.

Switch Characteristics

Switch Type	Contact Push ON Momentary SPST
Power Rating (Resistive Load)	10 mA at 5 VDC
Switch Travel	0.5 ± 0.3 mm
Switch Actuation Force	610 ± 306 gf (8.47 ± 4.24 oz.in.)
Contact Resistance	100 millionths @ 5 VDC

WARNING

Cancer and Reproductive Harm
www.P65Warnings.ca.gov

*RoHS Directive 2015/863, Mar 31, 2015 and Annex.

**Devices are tested using standard noise reduction filters. For optimum performance, designers should use noise reduction filters in their circuits.

See page 10 for detailed information and official notice.

Users should verify actual device performance in their specific applications. The products described herein and in this document are subject to specific legal disclaimers as set forth on the last page of this document, and at www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf.

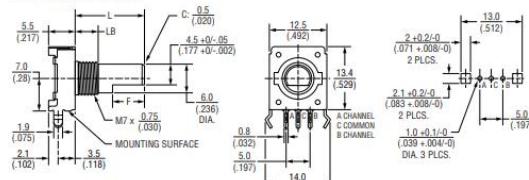
Additional Information

Click these links for more information:

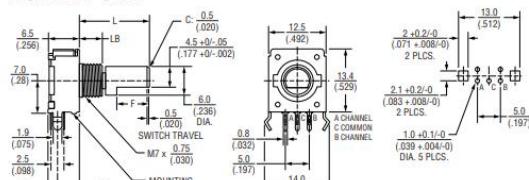


Product Dimensions

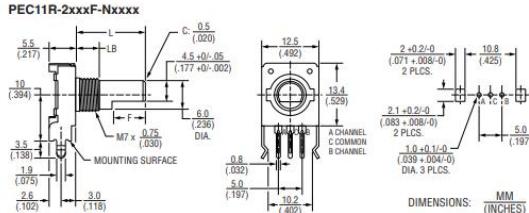
PEC11R-1xxxF-NXXX



PEC11R-1xxxF-SXXX



PEC11R-2xxxF-NXXX



DIMENSIONS: MM
(INCHES)



CAUTION

Do not store product in high temperature and humidity, direct sunlight and/or places where corrosive gases may be generated. Please use product within 6 months from the date of delivery and promptly after unpacking.

รูปที่ 37 Datasheet ของ Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024)

จาก Datasheet ทำให้เราได้ทราบค่า PPR ของ Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024) ซึ่งจากรหัส S0024 เป็นรหัสที่มีไว้สำหรับการบอกค่าความละเอียดของ Incremental Encoder ตัวนี้ ซึ่งจะได้ PPR คือ 24 PPR

2.7. วิธีดำเนินการทดลอง

1. ออกรูปแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 2.7
2. เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และจัดเตรียมวงจรการทดลอง โดยต่อพินตามรูปแบบที่กำหนด
3. ออกรูปแบบและสร้าง Blocks ด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับเชื่อมต่อกับ Microcontroller เพื่อเก็บค่าการทดลอง
4. ทำการทดลองหากาค่าตำแหน่ง และความเร็วเชิงมุมของ Incremental Encoder โดยการบิด Encoder และนำค่าท่าอ่านได้ในแต่ละรูปแบบนำมาเทียบกับ
5. นำมาข้อมูลทั้งหมดจากทุกขั้นตอนมาจัดทำลงรายงาน

2.8. วัสดุอุปกรณ์

1. Incremental Encoder AMT103-V 1 อัน
2. BOURNS PEC11R-4220F-N0024 1 อัน
3. Nucleo STM32G474RE 1 ตัว
4. ชุดทดลอง EncoderXplorer 1 ชุด
5. สายอัปโหลด USB 1 สาย
6. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง

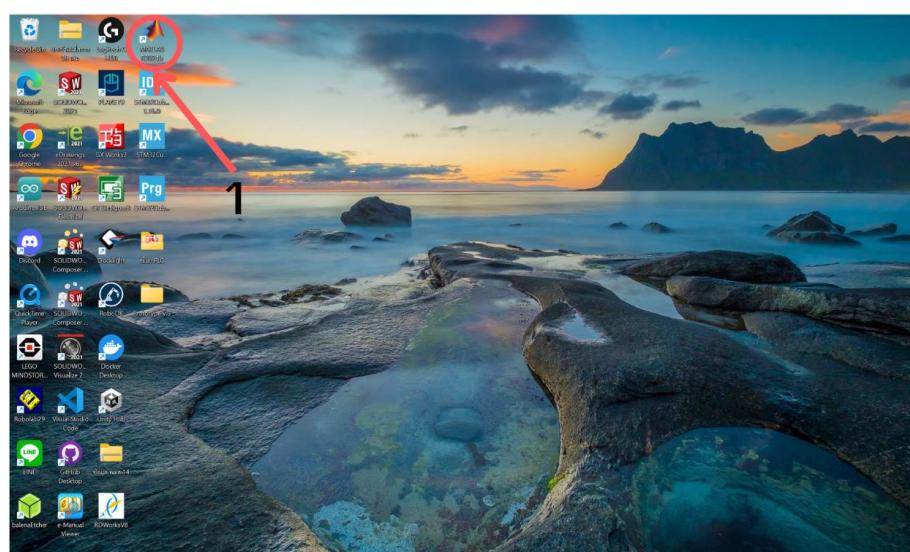
2.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบโปรแกรม Simulink และเตรียมการเก็บข้อมูล

1. ขั้นตอนตั้งค่าโปรแกรม Simulink ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE

1.1. เปิดโปรแกรม MATLAB

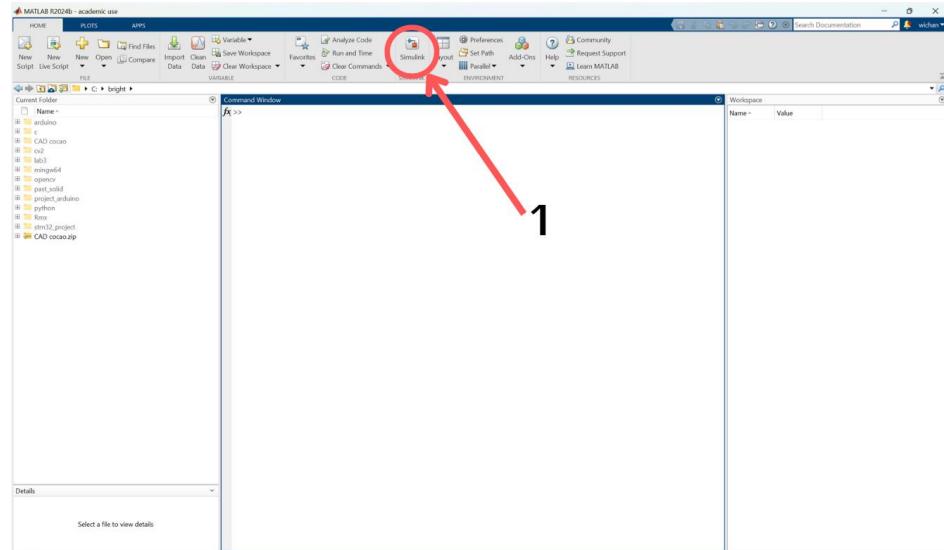
1.1.1. ทำการคลิกซ้ายที่โปรแกรม MATLAB R2024b เพื่อเปิดโปรแกรม MATLAB R2024b



รูปที่ 38 ขั้นตอนที่ 1 ทำการเปิดโปรแกรม MATLAB

1.1.2. ขั้นตอนที่ 2 เปิด Simulink

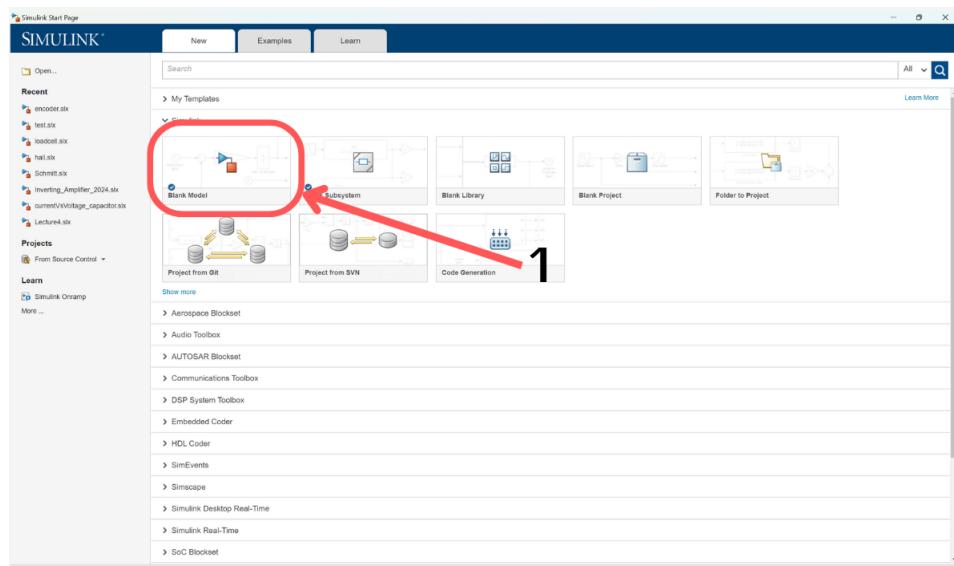
1. ทำการคลิกซ้ายไปที่ Simulink เพื่อเปิด Simulink



รูปที่ 39 ขั้นตอนที่ 2 เปิด Simulink

1.1.3. ขั้นตอนที่ 3 การสร้าง Model ใหม่

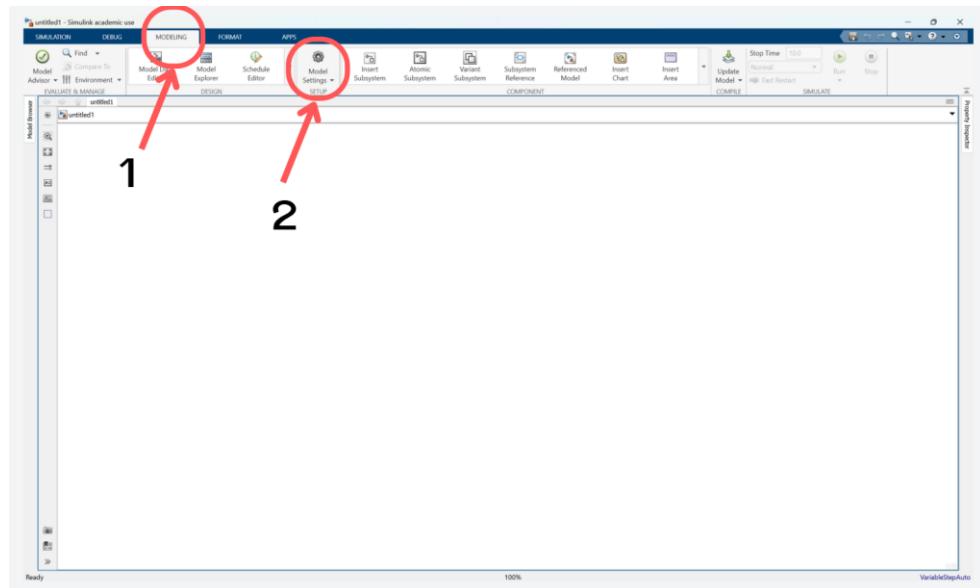
1. ทำการคลิกซ้ายไปที่ Blank Model เพื่อสร้าง Model



รูปที่ 40 ขั้นตอนที่ 3 การสร้าง Model ใหม่

1.1.4. ขั้นตอนที่ 4 วิธีการเปิดการตั้งค่า Model Settings

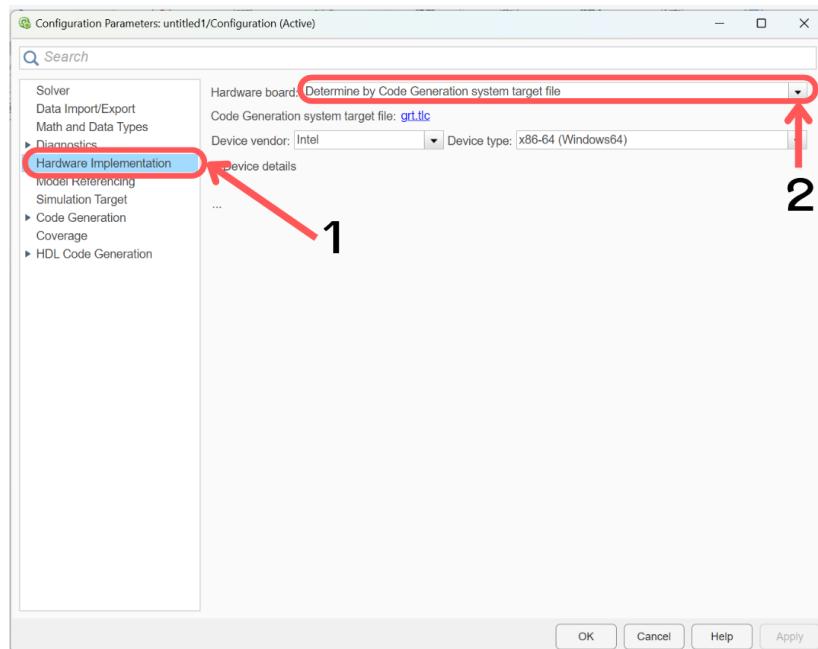
1. คลิกซ้ายไปที่ MODELING
2. คลิกซ้ายไปที่ Model Settings



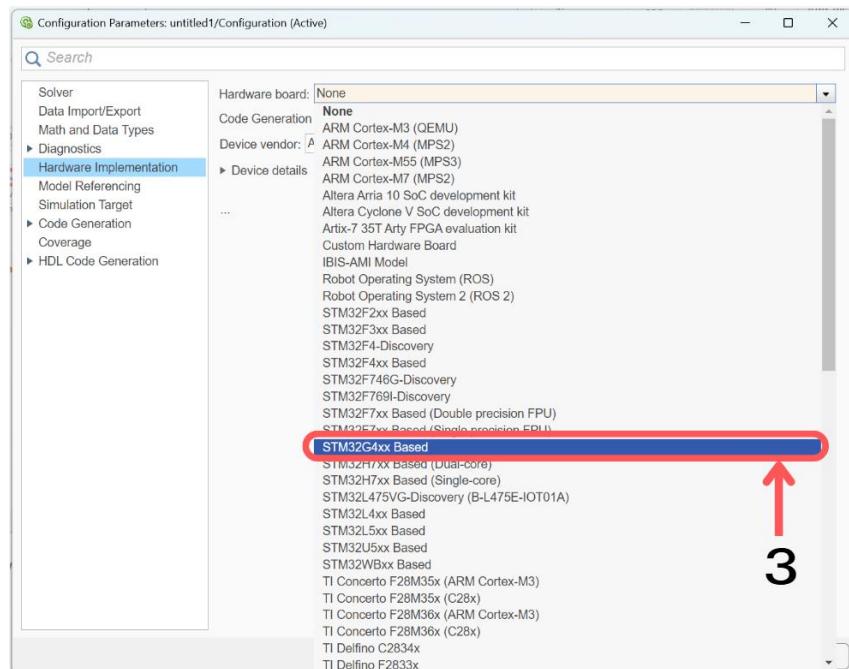
รูปที่ 41 ขั้นตอนที่ 4 การเปิด Model Settings

1.1.5. ขั้นตอนที่ 5 การตั้งค่า Hardware board สำหรับบอร์ด Nucleo

1. คลิกซ้ายไปที่ Hardware implementation
2. คลิกซ้ายไปที่arrowเลือก Hardware board
3. คลิกขวาไปที่ STM32G4xx Based



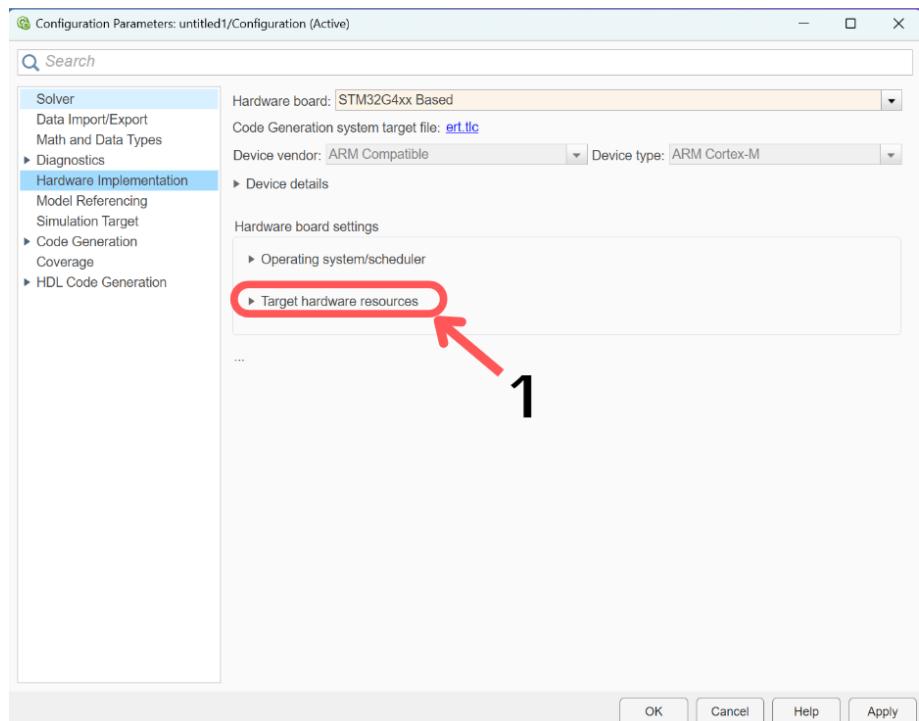
รูปที่ 42 ขั้นตอนที่ 5 การตั้งค่า Hardware board step 1 step 2



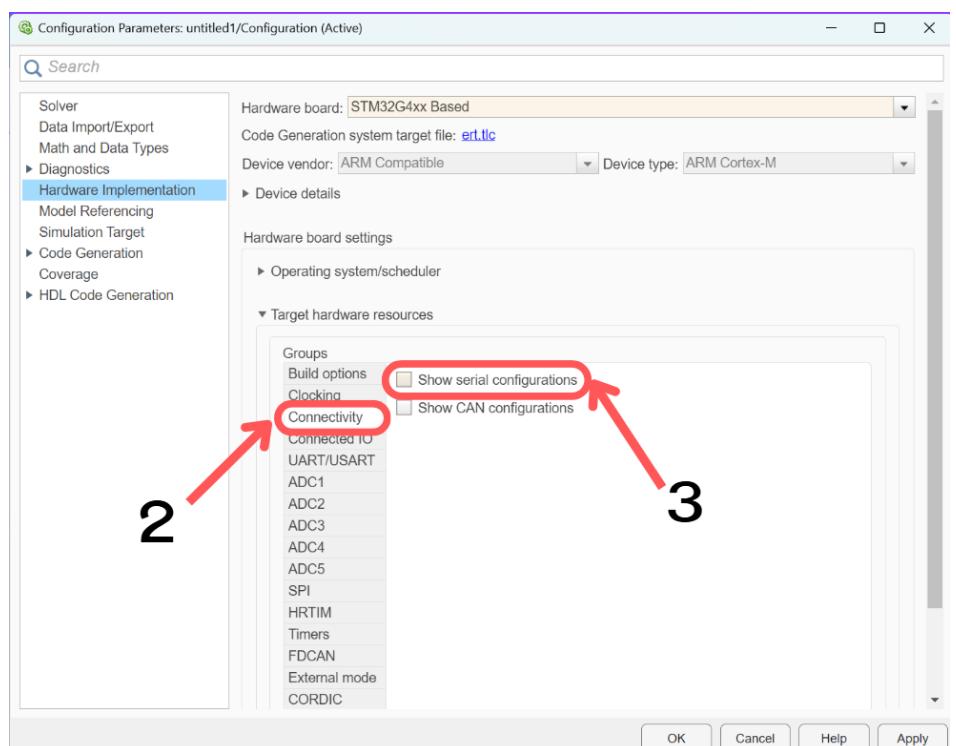
รูปที่ 43 ขั้นตอนที่ 5 การตั้งค่า Hardware board step 3

1.1.6. ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่า Connectivity

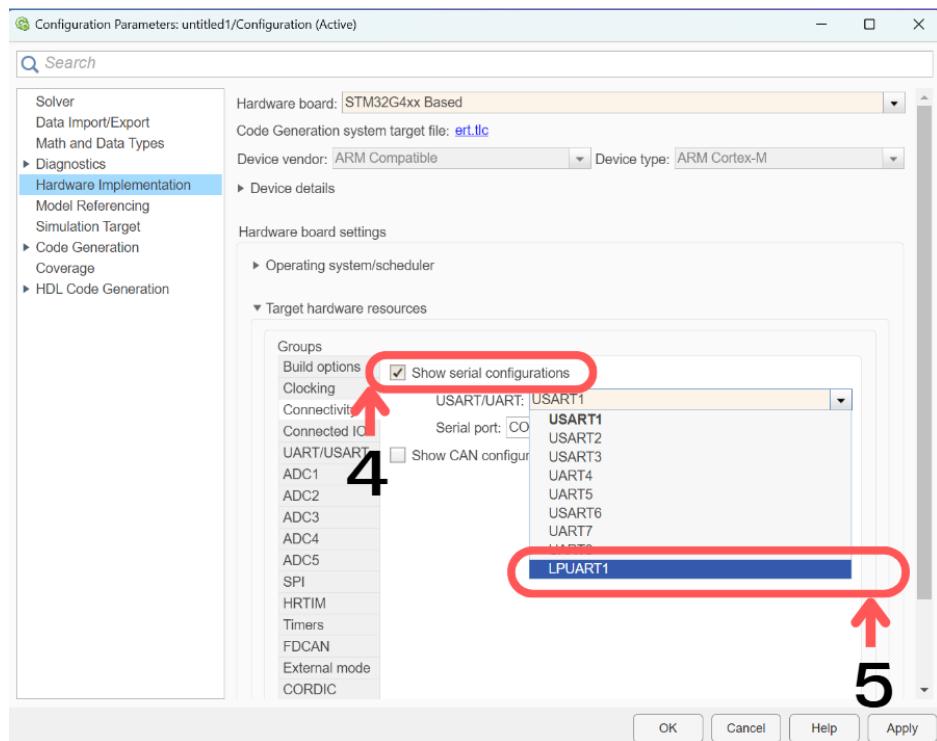
1. คลิกซ้ายไปที่ Target hardware resources
2. คลิกซ้ายไปที่ Connectivity
3. คลิกซ้ายไปที่ Show serial configurations
4. คลิกซ้ายไปที่ USART/UART
5. คลิกซ้ายไปที่ LPUART1
6. คลิกซ้ายไปที่ Serial port จะต้องใส่ COM Port ที่ตรงกับ Nucleo



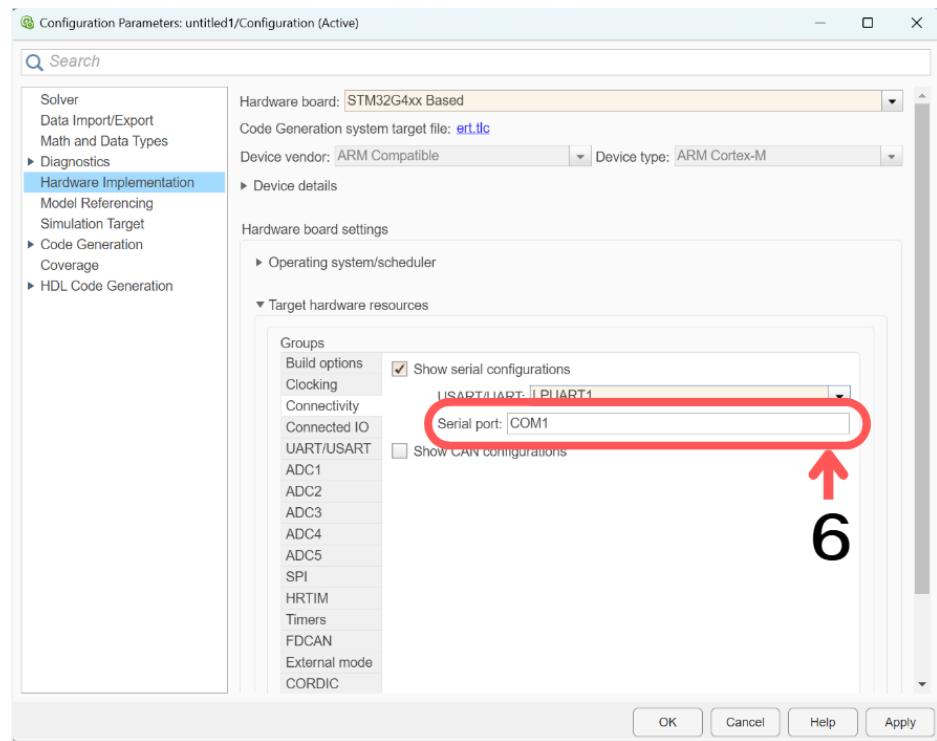
รูปที่ 44 ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่า Connectivity step1



รูปที่ 45 ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่า Connectivity step 2 step 3



รูปที่ 46 ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่า Connectivity step 4 step 5

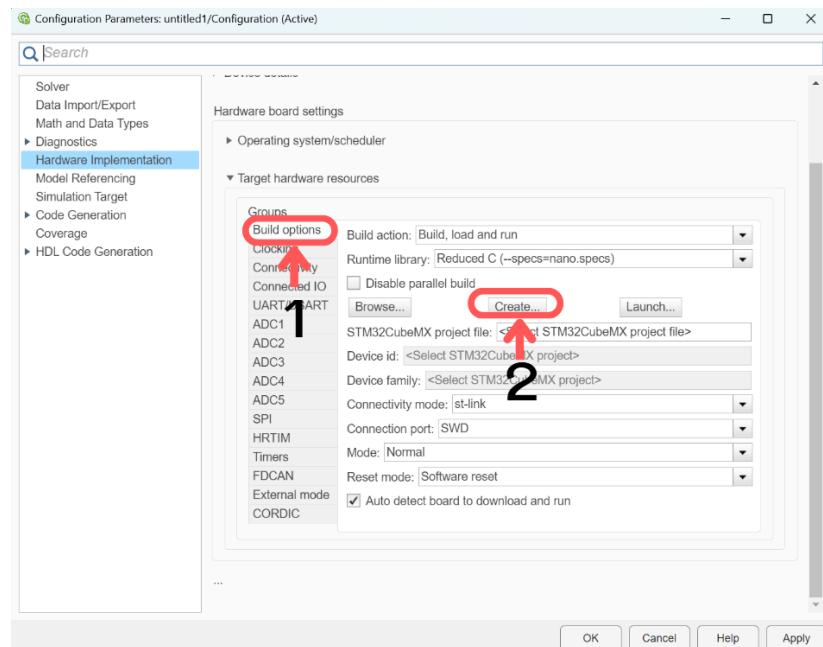


รูปที่ 47 ขั้นตอนที่ 6 การตั้งค่า Connectivity step 6

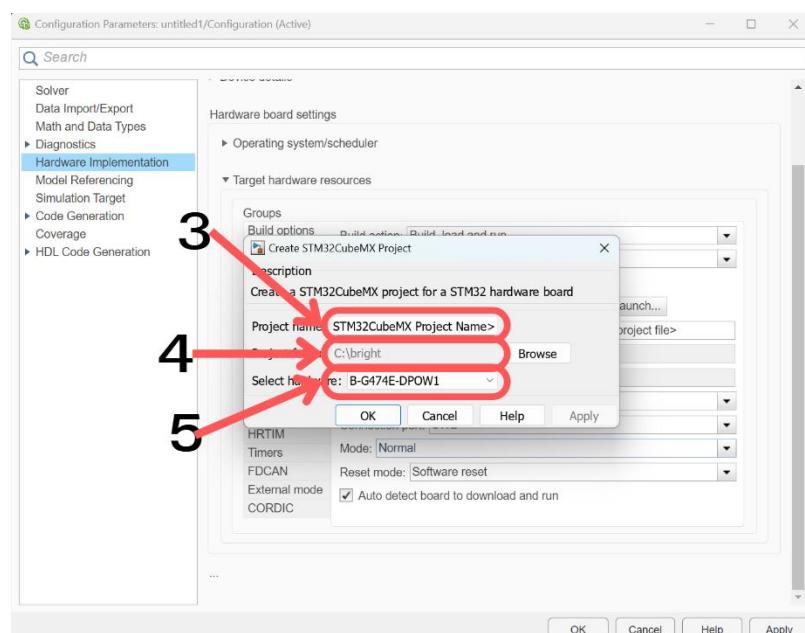
1.1.7. ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX

1. คลิกขวาไปที่ Build options
2. คลิกซ้ายไปที่ Create เพื่อสร้าง STM32CubeMX

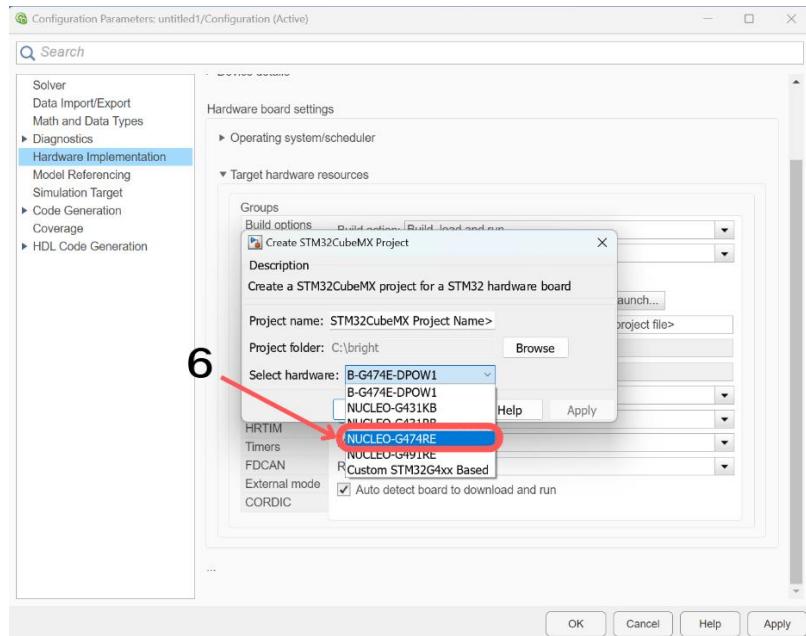
3. ทำการตั้งชื่อไฟล์
4. เลือกตำแหน่งที่จะทำการบันทึกไฟล์
5. คลิกไปที่ Select hardware
6. คลิกซ้ายเลือกไปที่ NUCLEO-G474RE
7. คลิกซ้ายไปที่ OK เพื่อสร้าง STM32CubeMX
8. คลิกซ้ายไปที่ APPLY เพื่อเปลี่ยนค่า



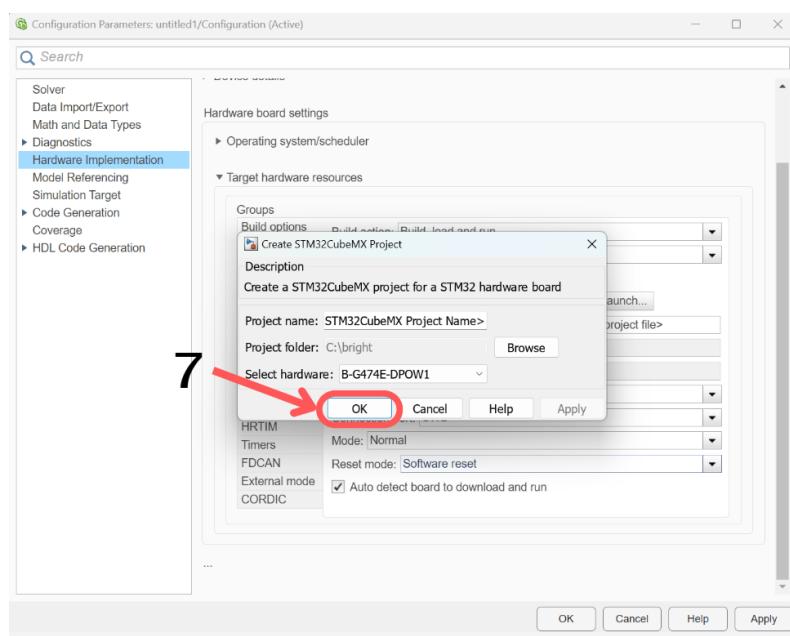
รูปที่ 48 ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX step 1 step 2



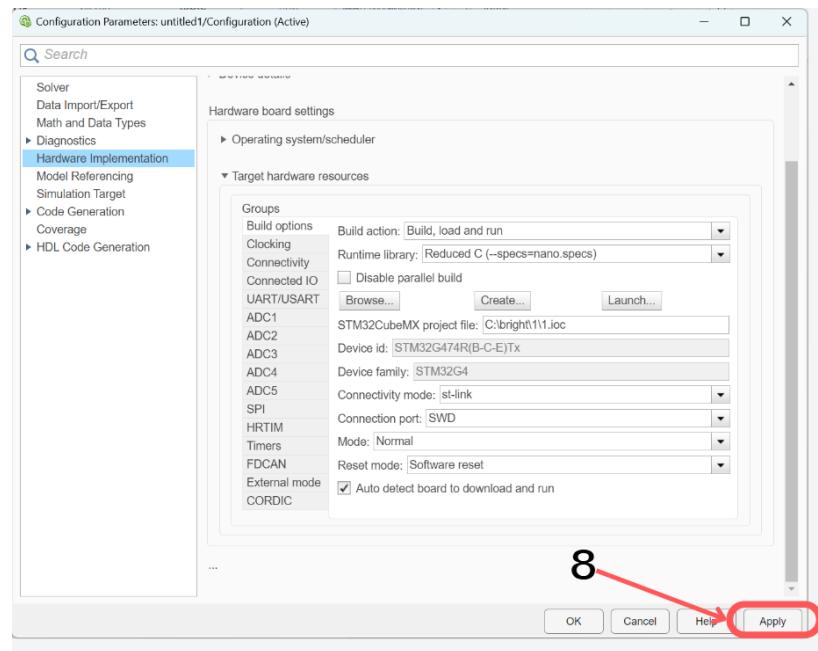
รูปที่ 49 ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX step 3 step 4 step 5



รูปที่ 50 ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX step 6



รูปที่ 51 ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX step 7



รูปที่ 52 ขั้นตอนที่ 7 การสร้าง STM32CubeMX step 8

1.1.8. ขั้นตอนที่ 8 การตั้งค่า STM32CubeMX ให้พร้อมใช้ encoder

1. คลิกซ้ายไปที่ Launch เพื่อทำการเปิดไฟล์ STM32CubeMX
2. คลิกซ้ายไปที่ Timers
3. คลิกซ้ายไป TIM 3
4. ดูที่ Mode และคลิกซ้ายไปที่ Combined Channels และเลือก Encoder Mode

5. เมื่อทำการเปลี่ยนเป็น Encoder Mode และ จะมีหน้าต่าง Configuration เลือกไปหาที่หัวข้อ Encoder > Encoder Mode ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าจะอ่านค่าในโหมดใดได้บ้าง โหมด X1 Encoder Mode X1 T1 โหมด X2 Encoder Mode TI1 โหมด X4 Encoder Mode TI1 and TI2 ซึ่งสามารถเลือกได้ว่าต้องการความละเอียดแบบใด

6. หน้าต่าง Configuration เลือกไปหาที่หัวข้อ counter Mode > counter period โดยค่านี้จะเป็นค่า ที่สามารถนับค่าได้โดย NUCLEO สามารถนับค่าได้ 66535) ซึ่งสามารถกำหนดค่าได้ว่าจะให้สามารถนับค่าได้ถึงเท่าไหรโดยวิธีการเลือกจะเลือก โดยการดูที่ PPR ของ Encoder ที่ใช้ซึ่งค่าที่ควรจะใช้จะต้องเป็นค่าที่สามารถนำ PPR ของ Encoder มาหารได้อย่างลงตัว ซึ่งการทดลองนี้ Incremental Encoder ที่ใช้มีค่า PPR อยู่ที่ 24 PPR ซึ่งเรามีการใช้แบบการอ่านค่ารูปแบบ X1 จะต้องใช้ค่า CCP ที่ $65535 - (65535 \bmod 24)$ ได้ค่า 66520 และเข็มค่านี้ลงไว้ใน counter period

7. ทำการขั้นตอนที่ 3 ถึง 6 โดยเปลี่ยนเป็น TIM 4 และ TIM 8 ซึ่งค่า TIM4 เป็นรูปแบบการอ่านแบบ X2 ค่า PPR ที่ได้จะเป็นสองเท่า คือ 48 ซึ่งจะใช้เป็นโหมด Encoder Mode TI1 ใช้ค่า CCP ที่ 65535 – (65535 mod 48) ได้ค่า 66520 ส่วนค่า TIM 8 เป็นรูปแบบการอ่านแบบ X4 ค่า PPR ที่ได้จะเป็นสองเท่า คือ 48 ซึ่งจะใช้เป็นโหมด Encoder Mode TI1 and TI2 ใช้ค่า CCP ที่ 65535 – (65535 mod 96) ได้ค่า 65472

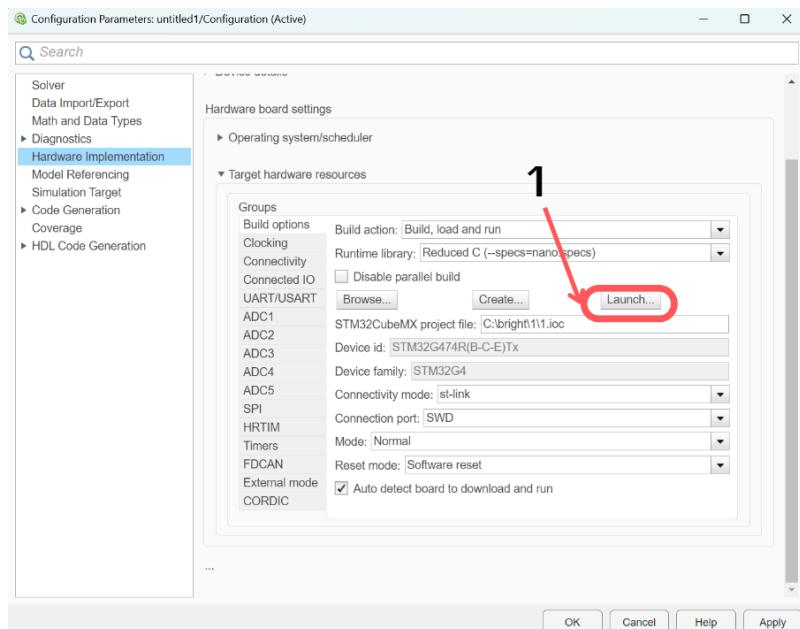
8. คลิกซ้ายไปที่ Project Manager

9. คลิกซ้ายไปที่ Advanced Setting

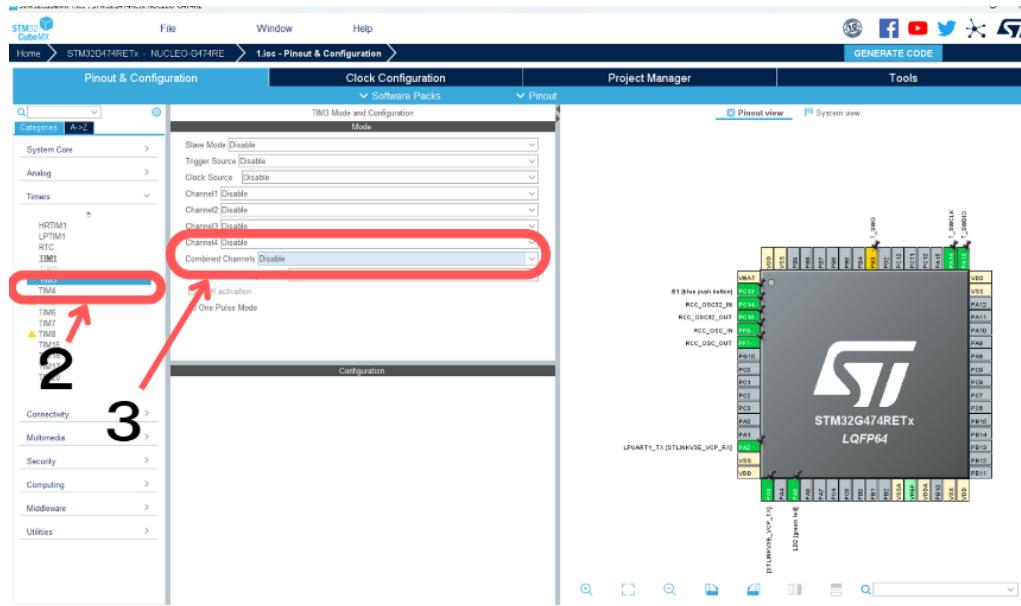
10. คลิกซ้ายไปที่ TIM และทำการคลิกซ้ายเลือกเป็น LL

11. ดูที่ตาราง Visibility คลิกซ้ายที่เครื่องหมายถูกของทั้งหมด

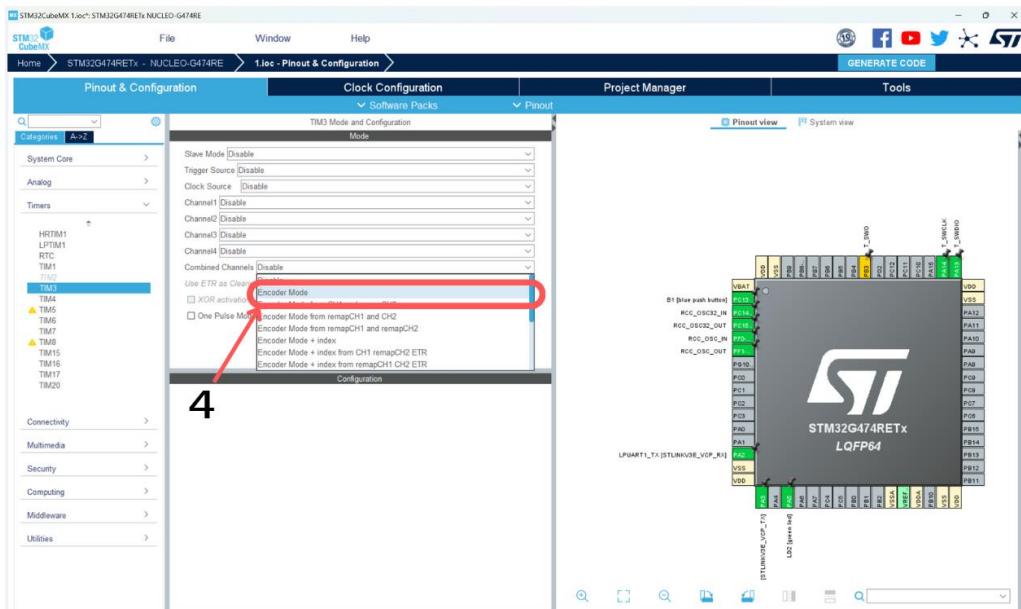
12. ทำการคลิกไปที่ GENERATE CODE



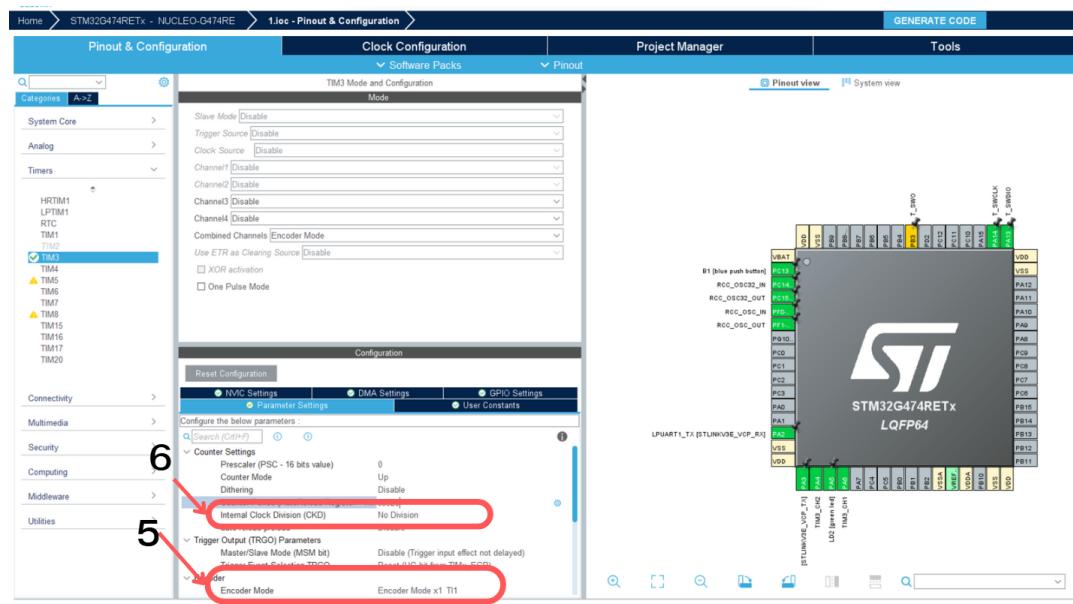
รูปที่ 53 ขั้นตอนการทดลองที่ 8 ตั้งค่า STM32CubeMX step 1



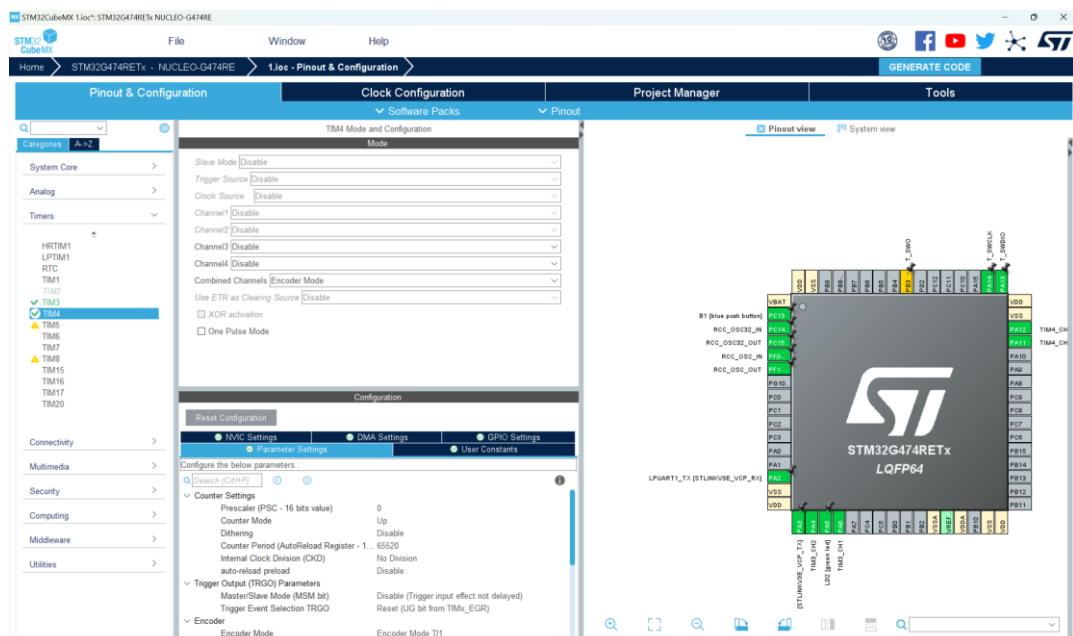
รูปที่ 54 ขั้นตอนการทดลองที่ 8 ตั้งค่า STM32CubeMX step 2 step 3



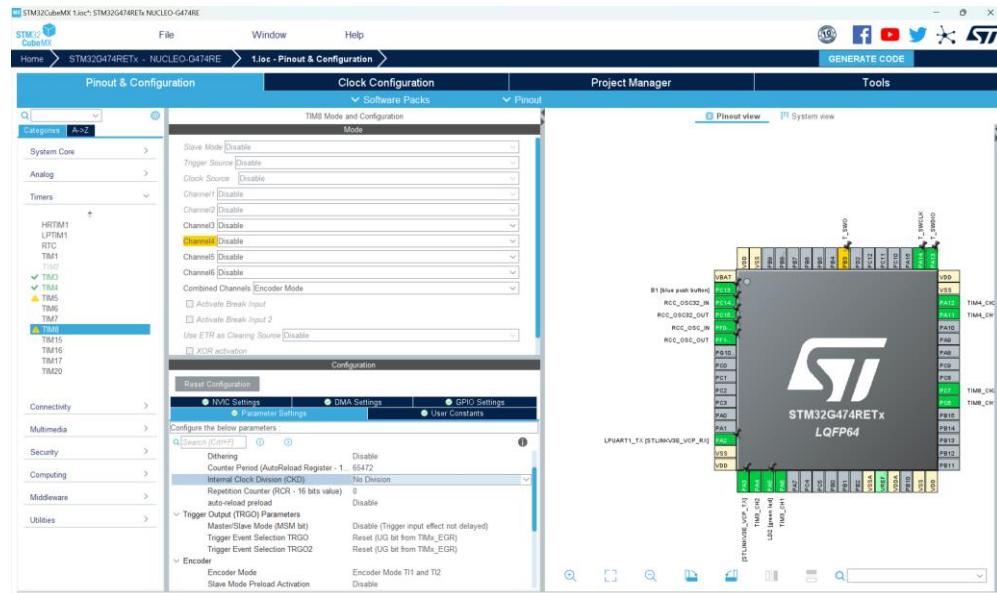
รูปที่ 55 ขั้นตอนการทดลองที่ 8 ตั้งค่า STM32CubeMX step 4



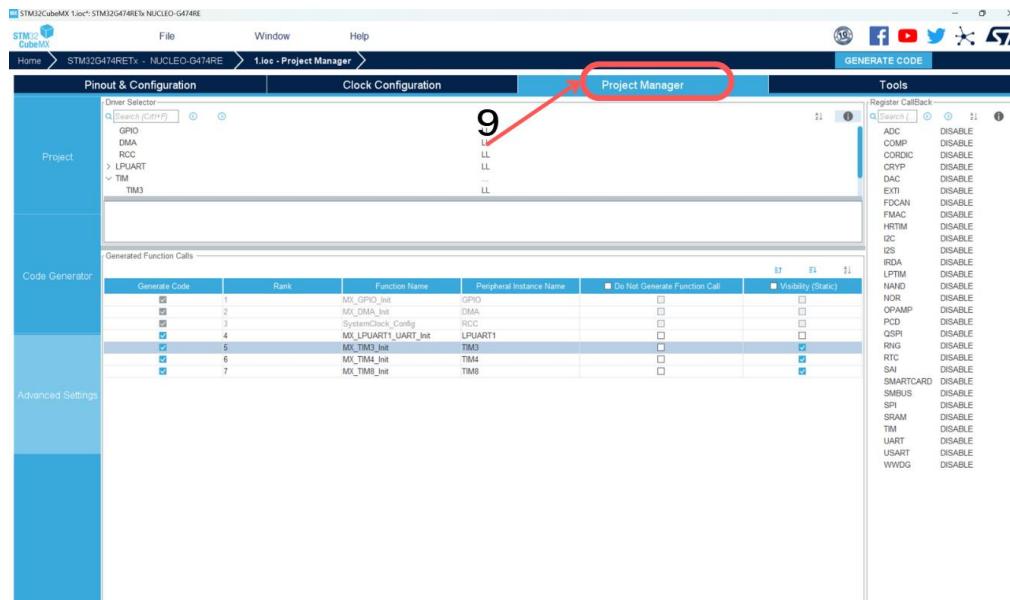
รูปที่ 56 ขั้นตอนการทดลองที่ 8 ตั้งค่า STM32CubeMX step 5 step 6



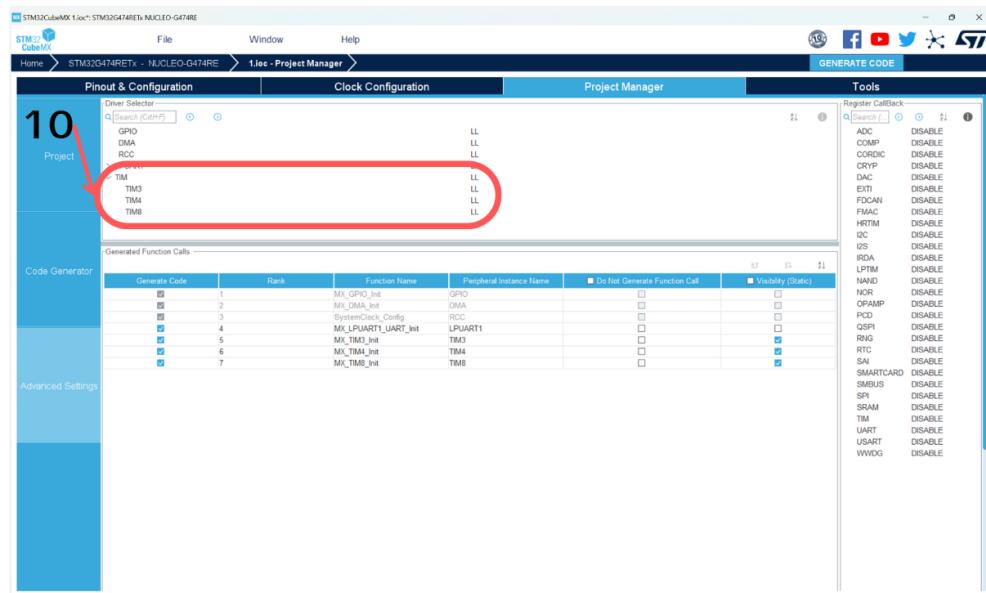
รูปที่ 57 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX TIM4



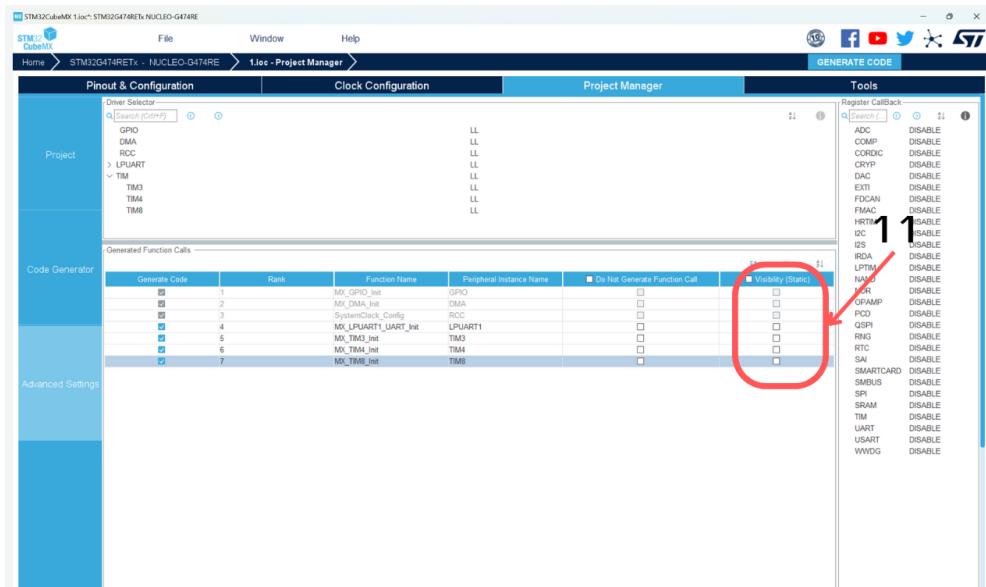
รูปที่ 58 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX TIM8



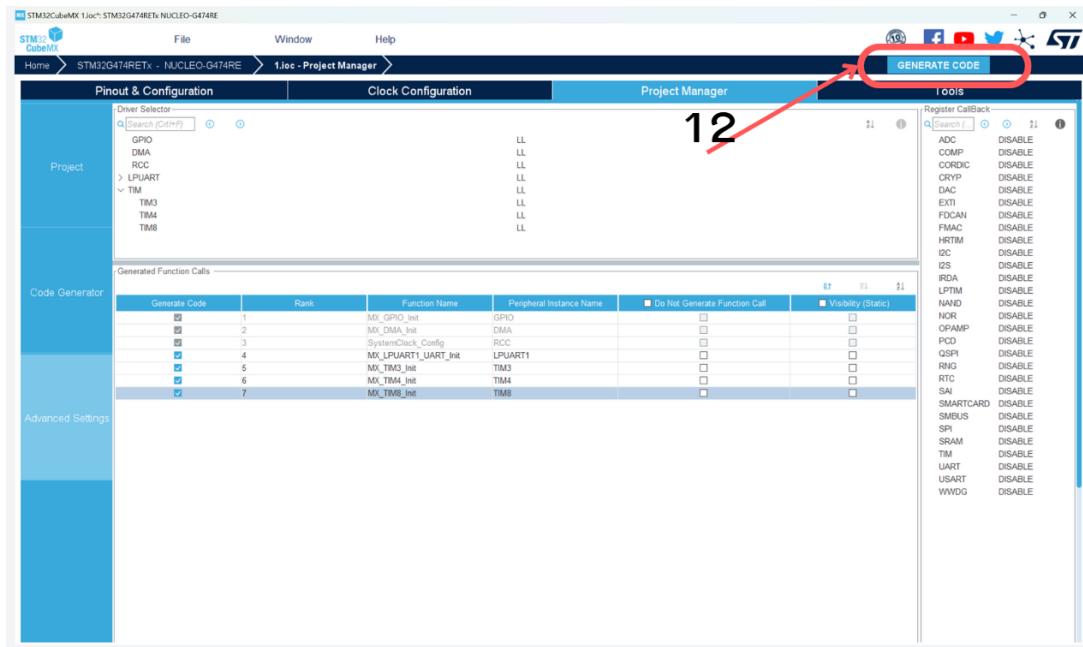
รูปที่ 59 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX step 9



รูปที่ 60 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX step 10

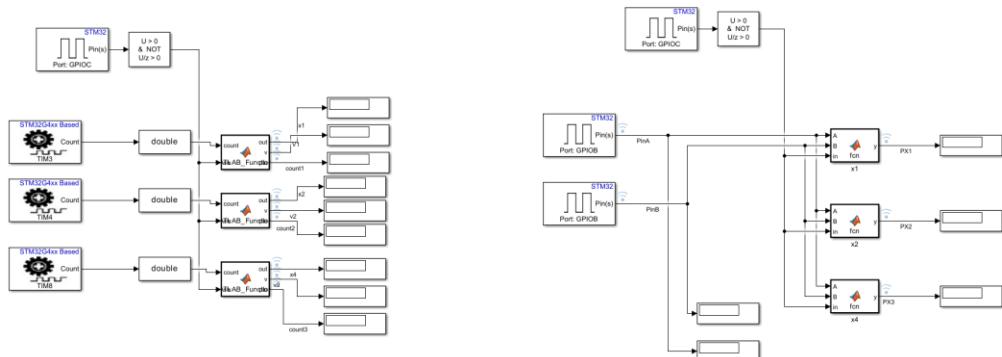


รูปที่ 61 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX step 11



รูปที่ 62 ขั้นตอนการทดลองที่ 7 ตั้งค่า STM32CubeMX step 12

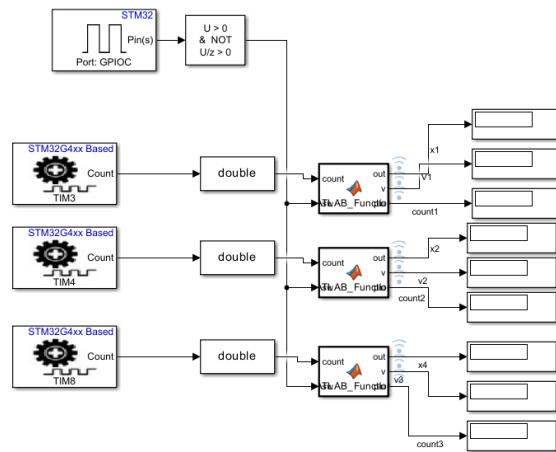
2. ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมบน Simulink



รูปที่ 63 Block diagram ใน Simulink Models ที่ใช้สำหรับการอ่านค่าจาก Encoder

โดย Block diagram ใน Simulink Models จะมีการอ่านข้อมูลจาก Incremental Encoder โดยมีการอ่านค่าในรูปแบบ QEI เป็น block ในฝั่งซ้ายของภาพที่ 63 และอ่านแบบ Polling Method ในฝั่งขวาของภาพที่ 63

2.1. การอ่านค่า Incremental Encoder แบบ QEI



รูปที่ 64 Block diagram การอ่านค่าแบบ QEI

การอ่านค่าจาก QEI จะเป็นการดึงค่าจาก Block Encoder ของ STM32 ค่าที่ได้นี้จะได้เป็นค่าในหน่วยพัลล์ซึ่งมีการนับค่าได้สูงสุดที่ได้ทำการตั้งค่า CPR จากการที่ได้มีการตั้งค่าไว้หลังจากนั้นก็ทำดึงค่าไปแปลงเป็น double เมื่อทำการแปลงค่าแล้วค่าที่แปลงก็จะถูกดึงเข้าไปสู่ Block MATLAB Function ซึ่งภายในนั้นมีหน้าที่มีการแปลงค่าพัลล์ที่ได้เป็นค่าตำแหน่ง และค่าความเร็วเชิงมุมโดยจะมีการเขียนโปรแกรมดังนี้

```

1  function [out,v,plu] = MATLAB_Function2(count,sw)
2      persistent pulse
3      persistent lastpulse
4      persistent lastrad;
5      persistent home;
6      if isempty(pulse)
7          pulse= 0;
8          lastrad =0;
9          lastpulse=0;
10         home=0;
11     end
12     if count>lastpulse
13         if (count-lastpulse)>10000
14             pulse=pulse-(65520-count);
15         else
16             pulse=pulse+(count-lastpulse);
17         end
18     else
19         if count<lastpulse
20             if (lastpulse-count)>10000
21                 pulse=pulse+(count);
22             else
23                 pulse=pulse-(lastpulse-count);
24             end
25         end
26     end
27     if sw ==1
28         home = pulse;
29     end
30
31     plu = pulse-home;
32     out = (pulse-home)*((2*pi)/24);
33     v= (pulse*((2*pi)/24)-lastrad)/0.1;
34     lastpulse=count;
35     lastrad=pulse*((2*pi)/24);
36

```

รูปที่ 65 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X1) Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024)

จากภาพที่ 65 MATLAB Function ซึ่งอันนี้จะเป็นการอ่านแบบ X1 จะมี INPUT คือ count เป็นค่าพัลส์ที่นับได้จาก QEI ซึ่งจะมีค่า 0 – 65520 ซึ่งจะนับวนไปไม่สิ้นสุดกับ rw เป็นค่าจาก GPIOC13 ซึ่งเป็นสวิตซ์บนบอร์ด Nucleo ใช้รีเซ็ตเป็นค่า Homing ถ้ากด เป็น 1 ถ้าไม่กดเป็น 0 และส่วนของ OUTPUT คือ plu คือ ค่าของ pulse ลบกับค่า home ซึ่งเป็นค่าพัลส์ out เป็นค่าตำแหน่งเชิงมุมที่มีการแปลงแล้ว v คือ ค่าความเร็วเชิงมุมจาก การเข้าค่าตำแหน่งปัจจุบันลบตำแหน่งก่อนหน้าแล้วหารด้วยเวลา 0.1 S โดยตัวโปรแกรมจะ มีตัวแปรที่จำค่าได้สามตัวก็คือ pulse คือค่าพัลส์ที่นับได้เป็นพิเศษกับ blob lastpulse เป็น ค่าก่อนหน้าค่าของ pulse lastrad คือค่าความเร็วเชิงมุมก่อนหน้า home เป็นค่าที่ใช้ สำหรับเก็บค่าที่จะใช้ในการ homing โดยเงื่อนไขของการเพิ่มขึ้นของค่า pulse มีเงื่อนไข ดังนี้ คือ ถ้าค่า count นั้นมีค่ามากกว่า lastpulse และค่าผลต่างของ count กับ lastpulse มีค่าน้อยกว่า 10000 ค่า pulse มีค่าเท่ากับค่า pulse บวกกับผลต่างของ count กับ lastpulse แต่ถ้า ผลต่างของ count กับ lastpulse มีค่ามากกว่า 10000 ค่า pulse จะ มีค่าเท่ากับ pulse ลบค่าผลต่าง CPR กับ count อีกร裔回คือ การที่ค่า count มีค่าน้อยกว่า lastpulse และผลต่างของ lastpulse นั้นมีค่าน้อยกว่า 1000 ค่า pulse มีค่าเท่ากับค่า

pulse ลบกับผลต่างของ lastpulse กับ count แต่ถ้าผลต่างของ count กับ lastpulse นี้ค่ามากกว่า 10000 ค่า pulse จะมีค่าเท่ากับ pulse บวกกับ count

โดยรูปแบบการอ่านแบบ X1 X2 X4 จะใช้โค้ดตัวเดียวกันส่วนที่ที่จะต้องทำการแก้ไขของโปรแกรมนี้เมื่อทำการเปลี่ยนวิธีการอ่าน หรือ Incremental Encoder คือค่า PPR และ CPR

```

1  function [out,v,plu] = MATLAB_Function3(count,sw)
2  persistent pulse
3  persistent lastpulse
4  persistent lastrad;
5  persistent home;
6  if isempty(pulse)
7      pulse= 0;
8      lastrad =0;
9      lastpulse = 0;
10     home = 0;
11 end
12
13
14 if count>lastpulse
15     if (count-lastpulse)>10000
16         pulse=pulse-(65520-count);
17     else
18         pulse=pulse+(count-lastpulse);
19     end
20 else
21     if count<lastpulse
22         if (lastpulse-count)>10000
23             pulse=pulse+(count);
24         else
25             pulse=pulse-(lastpulse-count);
26         end
27     end
28 end
29 if sw ==1
30     home = pulse ;
31 end
32 plu = pulse-home;
33 out = (pulse-home)*((2*pi)/48);
34 v= (pulse*((2*pi)/48)-lastrad)/0.1;
35 lastpulse=count;
36 lastrad=pulse*((2*pi)/48);

```

รูปที่ 66 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X2) Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024)

```

1 function [out,v,plu] = MATLAB_Function1(count,sw)
2 persistent pulse
3 persistent lastpulse
4 persistent lastrad;
5 persistent home;
6 if isempty(pulse)
7     pulse= 0;
8     lastrad =0;
9     lastpulse=0;
10    home=0;
11 end
12 if count>lastpulse
13     if (count-lastpulse)>10000
14         pulse=pulse-(65472-count);
15     else
16         pulse=pulse+(count-lastpulse);
17     end
18 else
19     if count<lastpulse
20         if (lastpulse-count)>10000
21             pulse=pulse+(count);
22         else
23             pulse=pulse-(lastpulse-count);
24         end
25     end
26 end
27 if sw ==1
28     home = pulse;
29 end
30 plu = pulse-home;
31 out = (pulse-home)*((2*pi)/96);
32 v= (pulse*((2*pi)/96)-lastrad)/0.1;
33 lastpulse=count;
34 lastrad=pulse*((2*pi)/96);

```

รูปที่ 67 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X4) Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024)

```

1 function [out,v,plu] = MATLAB_Function1(count,sw)
2 persistent pulse
3 persistent lastpulse
4 persistent lastrad;
5 persistent home;
6 if isempty(pulse)
7     pulse= 0;
8     lastrad =0;
9     lastpulse=0;
10    home=0;
11 end
12 if count>lastpulse
13     if (count-lastpulse)>10000
14         pulse=pulse-(63488-count);
15     else
16         pulse=pulse+(count-lastpulse);
17     end
18 else
19     if count<lastpulse
20         if (lastpulse-count)>10000
21             pulse=pulse+(count);
22         else
23             pulse=pulse-(lastpulse-count);
24         end
25     end
26 end
27 if sw ==1
28     home = pulse;
29 end
30 plu = pulse-home;
31 out = (pulse-home)*((2*pi)/2048);
32 v= (pulse*((2*pi)/2048)-lastrad)/0.1;
33 lastpulse=count;
34 lastrad=pulse*((2*pi)/2048);

```

รูปที่ 68 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X1) Incremental Encoder (AMT103)

```

1 function [out,v,plu] = MATLAB_Function1(count,sw)
2 persistent pulse
3 persistent lastpulse
4 persistent lastrad;
5 persistent home;
6 if isempty(pulse)
7     pulse= 0;
8     lastrad =0;
9     lastpulse=0;
10    home=0;
11 end
12    if count>lastpulse
13        if (count-lastpulse)>10000
14            pulse=pulse-(61440-count);
15        else
16            pulse=pulse+(count-lastpulse);
17        end
18    else
19        if count<lastpulse
20            if (lastpulse-count)>10000
21                pulse=pulse+(count);
22            else
23                pulse=pulse-(lastpulse-count);
24            end
25        end
26    end
27 if sw ==1
28     home = pulse;
29 end
30 plu = pulse-home;
31 out = (pulse-home)*((2*pi)/4096);
32 v= (pulse*((2*pi)/4096)-lastrad)/0.1;
33 lastpulse=count;
34 lastrad=pulse*((2*pi)/4096);

```

รูปที่ 69 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X2) Incremental Encoder (AMT103)

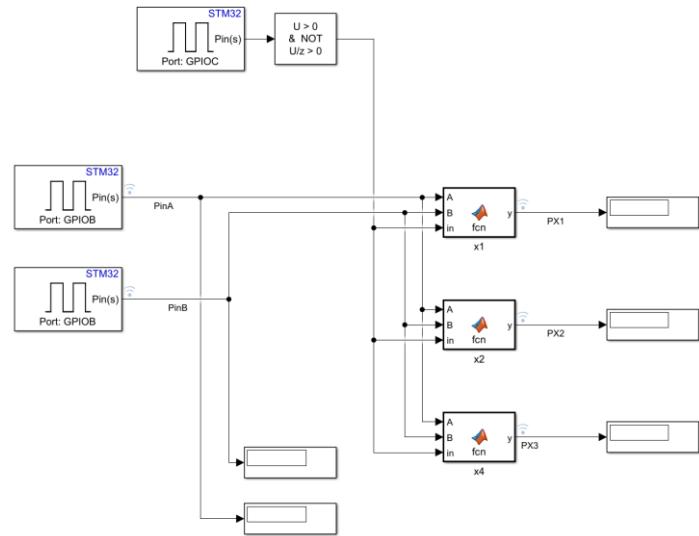
```

1 function [out,v,plu] = MATLAB_Function1(count,sw)
2 persistent pulse
3 persistent lastpulse
4 persistent lastrad;
5 persistent home;
6 if isempty(pulse)
7     pulse= 0;
8     lastrad =0;
9     lastpulse=0;
10    home=0;
11 end
12    if count>lastpulse
13        if (count-lastpulse)>10000
14            pulse=pulse-(57344-count);
15        else
16            pulse=pulse+(count-lastpulse);
17        end
18    else
19        if count<lastpulse
20            if (lastpulse-count)>10000
21                pulse=pulse+(count);
22            else
23                pulse=pulse-(lastpulse-count);
24            end
25        end
26    end
27 if sw ==1
28     home = pulse;
29 end
30 plu = pulse-home;
31 out = (pulse-home)*((2*pi)/8192);
32 v= (pulse*((2*pi)/8192)-lastrad)/0.1;
33 lastpulse=count;
34 lastrad=pulse*((2*pi)/8192);

```

รูปที่ 70 โค้ดการอ่านค่าแบบ QEI (X4) Incremental Encoder (AMT103)

2.2 การอ่านค่า Incremental Encoder แบบ Polling Method



รูปที่ 71 Block diagram การอ่านค่าแบบ Polling Method

โดยการอ่านแบบ Polling Method อ่านค่าโดยการใช้ Block Digital port Read ใช่สำหรับการอ่านค่าจาก สัญญาณ A กับ B ของ Incremental Encoder เพื่อที่จะนำมาคำนวณหาพัลส์จากวิธี Polling โดย โหมดการอ่านค่า X1 X2 X4 จะมีการอ่านที่ต่างกัน

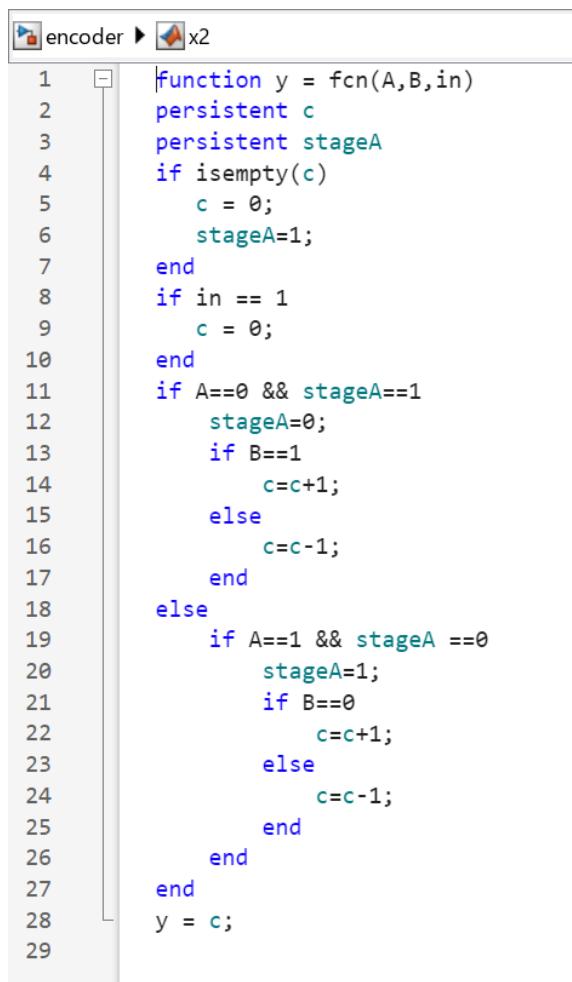
```

encoder > x1
1   function y = fcn(A,B,in)
2   persistent c
3   persistent stageA
4   if isempty(c)
5       c = 0;
6       stageA=1;
7   end
8   if in == 1
9       c = 0;
10  end
11  if A==0 && stageA==1
12      stageA=0;
13      if B==1
14          c=c+1;
15      else
16          c=c-1;
17      end
18  else
19      if A==1
20          stageA=1;
21      end
22  end
23  y = c;
24

```

รูปที่ 72 โค้ดการอ่านค่าแบบ Polling Method (X1)

การอ่านค่าแบบ Poling Method X1 โดยจะทำการอ่านค่าสัญญาณจาก Incremental Encoder โดยโค้ดนี้จะมี INPUT คือ A คือสัญญาณจาก Encoder ขา A , B คือ สัญญาณจาก Encoder B , in คือ สัญญาณจาก Block Digital port Read PC13 โดยจะมีตัวแปรที่จะจำค่าตัวเองไว้ คือ c เป็นค่าพัลส์กับ stageA เป็นค่าสถานะก่อนหน้าของสัญญาณ A ซึ่งการอ่านค่าแบบ X1 เป็นการอ่านค่าของขาลงจากสัญญาณ A โดยมีเงื่อนไขคือถ้าสัญญาณ A เป็น 0 และ stageA เป็น 1 แสดงว่าเป็นขอบขาลง แล้วทำการอ่านค่าสัญญาณ B เพื่อตรวจสอบว่าเป็นทิศทางไหนหากเป็น 1 c จะมีค่า c บวก 1 หากเป็น 0 c จะมีค่าเป็น c ลบ 1 และจะกำหนดให้ stageA เป็น 0 เพื่อไม่ให้มีการนับซ้ำจนสัญญาณจะกลับไปเป็น 1 อีกครั้ง โดยมี OUTPUT เป็น Y จะส่งค่า c ออกมานะ



```

1 function y = fcn(A,B,in)
2 persistent c
3 persistent stageA
4 if isempty(c)
5     c = 0;
6     stageA=1;
7 end
8 if in == 1
9     c = 0;
10 end
11 if A==0 && stageA==1
12     stageA=0;
13     if B==1
14         c=c+1;
15     else
16         c=c-1;
17     end
18 else
19     if A==1 && stageA ==0
20         stageA=1;
21         if B==0
22             c=c+1;
23         else
24             c=c-1;
25         end
26     end
27 end
28 y = c;
29

```

รูปที่ 73 โค้ดการอ่านค่าแบบ Poling Method (X2)

การเขียนโค้ดของการอ่านรูปแบบ X2 มีความคล้ายคลึงกับวิธีการอ่านในรูปแบบ X1 โดยได้มีการอ่านสัญญาณของขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ A โดยสามารถใช้โค้ดจากรูปแบบ X1 มาทำการเพิ่มการอ่านของขาขึ้นก็จะสามารถใช้งานเป็นการอ่านค่าในรูปแบบ X2

```
1 function y = fcn(A,B,in)
2 persistent c
3 persistent stageA
4 persistent stageB
5 if isempty(c)
6     c = 0;
7     stageA=1;
8     stageB=1;
9 end
10 if in==1
11     c=0;
12 end
13 if A==0 && stageA==1
14     stageA=0;
15     if B==1
16         c=c+1;
17     else
18         c=c-1;
19     end
20 else
21     if A==1 && stageA==0
22         stageA=1;
23         if B==0
24             c=c+1;
25         else
26             c=c-1;
27         end
28     end
29 end
30
31 if B==0 && stageB==1
32     stageB=0;
33     if A==0
34         c=c+1;
35     else
36         c=c-1;
37     end
38 else
39     if B==1 && stageB==0
40         stageB=1;
41         if A==1
42             c=c+1;
43         else
44             c=c-1;
45         end
46     end
47 end
48
49
50 y = c;
```

รูปที่ 74 โค้ดการอ่านค่าแบบ Polling Method (X4)

ตอนที่ 2 การดำเนินการเก็บข้อมูล



รูปที่ 75 บอร์ดทดลอง Fibo kmutt Encoder

1. ทำการต่อสายเข้ากับ Incremental Encoder (PEC11R-4020F-S0024) โดยจะทำการต่อสายสัญญาณ A กับสายสัญญาณ B
2. เริ่มทำการเก็บบันทึกข้อมูลโดยทำการอ่านค่าจาก Data Inspector โดยทำการตั้งเวลา Stop Time 50 S และทำการตั้ง Fixed-step size = 0.1 S โดยจะทำการหมุน Incremental Encoder หมุนไปตามเข็มนาฬิกา และวนเข็มนาฬิกาโดยจะทำการหมุนด้วยความเร็วต่าง ๆ
3. ทำการเก็บค่าที่ได้จาก Data Inspector ที่ได้มายัง Export เข้าสู่ workspace
4. ทำการต่อสายเข้ากับ Incremental Encoder (AMT103) แล้วทำการตามขั้นตอนที่ 2 ถึง 3 เพื่อเก็บค่า Incremental Encoder ใหม่
5. ทำการเก็บข้อมูลการ Homing โดยทำการหมุนไปยังตำแหน่งต่างๆ แล้วทำการกดปุ่มเพื่อใช้ตัวตำแหน่งใหม่สามถึงสี่ครั้งแล้วทำการอ่านค่าจาก Data Inspector และ Export เข้าสู่ workspace
6. นำค่าที่ได้มาจากการเก็บข้อมูลมาสร้างกราฟใน MATLAB เพื่อนำค่าparam มาทดลองในรายงาน

ตอนที่ 3 การนำข้อมูลที่เก็บจากการทดลองมาพล็อตเป็นกราฟ

```
1 load('Encoder_1.mat');
2 % QEI
3 pulseX1 = test{7};
4 pulseX2 = test{9};
5 pulseX4 = test{3};
6 thetaX1 = test{8};
7 thetaX2 = test{11};
8 thetaX4 = test{5};
9 wX1 = test{6};
10 wX2 = test{10};
11 wX4 = test{4};
12
13 % Polling
14 PX1 = test{12};
15 PX2 = test{13};
16 PX4 = test{14};
```

รูปที่ 76 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลเพื่อนำไปพล็อตกราฟของ Incremental Encoder (AMT103)

```
17 % QEI and Polling in one Frame
18 figure;
19 subplot(2, 1, 1);
20 quiX1 = plot(pulseX1.Values.Time, pulseX1.Values.Data, 'b-', 'LineWidth', 2);
21 hold on;
22 quiX2 = plot(pulseX2.Values.Time, pulseX2.Values.Data, 'r-', 'LineWidth', 2);
23 quiX4 = plot(pulseX4.Values.Time, pulseX4.Values.Data, 'Color', [0, 0.5, 0], 'LineWidth', 2);
24 hold off;
25 % Add on
26 datatip(quiX1);
27 datatip(quiX2);
28 datatip(quiX4);
29 xticks(0:5:50);
30 xticklabels(0:5:50);
31 yticks(-600:120:600);
32 yticklabels(-600:120:600);
33 grid on;
34 title('QEI Method Graph', 'FontSize', 14);
35 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
36 ylabel('Pulse (Pulses)', 'FontSize', 14);
37 legend('X1', 'X2', 'X4', 'Location', 'southeast');
38
39 subplot(2, 1, 2);
40 pollingX1 = plot(PX1.Values.Time, PX1.Values.Data, 'Color', [0.3, 0.75, 0.93], 'LineWidth', 2);
41 hold on;
42 pollingX2 = plot(PX2.Values.Time, PX2.Values.Data, 'Color', [1, 0.4, 0.6], 'LineWidth', 2);
43 pollingX4 = plot(PX4.Values.Time, PX4.Values.Data, 'g-', 'LineWidth', 2);
44 hold off;
45 % Add on
46 datatip(pollingX1);
47 datatip(pollingX2);
48 datatip(pollingX4);
49 xticks(0:5:50);
50 xticklabels(0:5:50);
51 yticks(-60:10:10);
52 yticklabels(-60:10:10);
53 grid on;
54 title('Polling Method Graph', 'FontSize', 14);
55 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
56 ylabel('Pulse (Pulses)', 'FontSize', 14);
57 legend('X1', 'X2', 'X4', 'Location', 'southeast');
```

รูปที่ 77 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลเพื่อนำไปพล็อตกราฟของ Incremental Encoder (AMT103)

```

59 % QEI and Polling
60 figure;
61 quiX1 = plot(pulseX1.Values.Time, pulseX1.Values.Data, 'b-', 'LineWidth', 2);
62 hold on;
63 quiX2 = plot(pulseX2.Values.Time, pulseX2.Values.Data, 'r-', 'LineWidth', 2);
64 quiX4 = plot(pulseX4.Values.Time, pulseX4.Values.Data, 'Color', [0, 0.5, 0], 'LineWidth', 2);
65 pollingX1 = plot(PX1.Values.Time, PX1.Values.Data, 'Color', [0.3, 0.75, 0.93], 'LineWidth', 2);
66 pollingX2 = plot(PX2.Values.Time, PX2.Values.Data, 'Color', [1, 0.4, 0.6], 'LineWidth', 2);
67 pollingX4 = plot(PX4.Values.Time, PX4.Values.Data, 'g-', 'LineWidth', 2);
68 hold off;
69 % Add on
70 datatip(quiX1);
71 datatip(quiX2);
72 datatip(quiX4);
73 datatip(pollingX1);
74 datatip(pollingX2);
75 datatip(pollingX4);
76 xticks(0:5:50);
77 xticklabels(0:5:50);
78 yticks(-600:120:600);
79 yticklabels(-600:120:600);
80 grid on;
81 title('QEI Method and Polling Method Graph', 'FontSize', 14);
82 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
83 ylabel('Pulse (Pulses)', 'FontSize', 14);
84 legend('QEI X1', 'QEI X2', 'QEI X4', 'Polling X1', 'Polling X2', 'Polling X4', 'Location', 'southeast');

```

รูปที่ 78 MATLAB script สำหรับจัดการข้อมูลเพื่อนำไปพล็อตกราฟของ Incremental Encoder (AMT103)

```

85 % Angular velocity and Theta VS Time All Mode in one Frame
86 figure;
87 subplot(3, 1, 1);
88 AngularVelocityX1 = plot(wX1.Values.Time, wX1.Values.Data, 'b-', 'LineWidth', 2);
89 ylabel('Angular Velocity (rad/s)', 'FontSize', 14);
90 yaxis right
91 thX1 = plot(thetaX1.Values.Time, thetaX1.Values.Data, 'Color', [0.3, 0.75, 0.93], 'LineWidth', 2);
92 ylabel('Angular Position (rad)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
93 set(gca, 'YColor', 'k');
94 % Add on
95 datatip(AngularVelocityX1);
96 datatip(thX1);
97 xticks(0:5:50);
98 xticklabels(0:5:50);
99 yticks(-40:10:40);
100 yticklabels(-40:10:40);
101 grid on;
102 title('Angular velocity and Angular Position VS Time Mode X1', 'FontSize', 14);
103 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
104 legend('Angular velocity X1', 'Angular Position X1', 'Location', 'Southeast');
105
106
107 subplot(3, 1, 2);
108 yaxis left
109 AngularVelocityX2 = plot(wX2.Values.Time, wX2.Values.Data, 'r-', 'LineWidth', 2);
110 ylabel('Angular Velocity (rad/s)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
111 set(gca, 'YColor', 'k');
112 yaxis right
113 thX2 = plot(thetaX2.Values.Time, thetaX2.Values.Data, 'Color', [1, 0.4, 0.6], 'LineWidth', 2);
114 ylabel('Angular Position (rad)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
115 set(gca, 'YColor', 'k');
116 % Add on
117 datatip(AngularVelocityX2);
118 datatip(thX2);
119 xticks(0:5:50);
120 xticklabels(0:5:50);
121 yticks(-40:10:40);
122 yticklabels(-40:10:40);
123 grid on;
124 title('Angular velocity and Angular Position VS Time Mode X2', 'FontSize', 14);
125 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
126 legend('Angular velocity X2', 'Angular Position X2', 'Location', 'Southeast');
127
128
129 subplot(3, 1, 3);
130 yaxis left
131 AngularVelocityX4 = plot(wX4.Values.Time, wX4.Values.Data, 'Color', [0, 0.5, 0], 'LineWidth', 2);
132 ylabel('Angular Velocity (rad/s)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
133 set(gca, 'YColor', 'k');
134 yaxis right
135 thX4 = plot(thetaX4.Values.Time, thetaX4.Values.Data, '-g', 'LineWidth', 2);
136 ylabel('Angular Position (rad)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
137 set(gca, 'YColor', 'k');
138 % Add on
139 datatip(AngularVelocityX4);
140 datatip(thX4);
141 xticks(0:5:50);
142 xticklabels(0:5:50);
143 yticks(-40:10:40);
144 yticklabels(-40:10:40);
145 grid on;
146 title('Angular velocity and Angular Position VS Time Mode X4', 'FontSize', 14);
147 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
148 legend('Angular velocity X4', 'Angular Position X4', 'Location', 'Southeast');

```

รูปที่ 79 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลเพื่อนำไปplot ผลกราฟของ Incremental Encoder (AMT103)

```

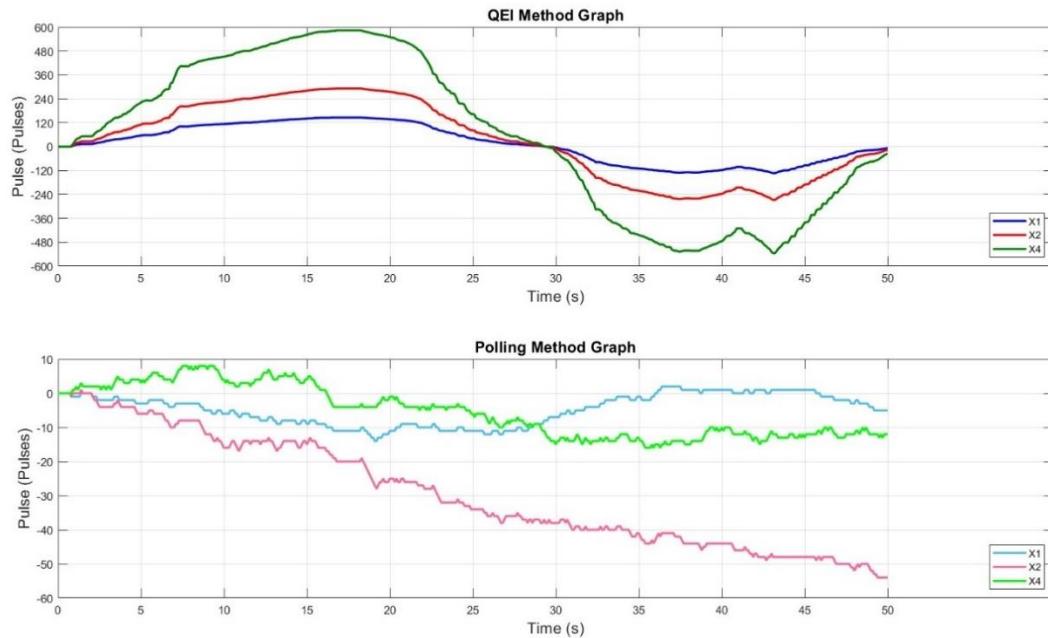
149 % Angular velocity VS Theta All
150 figure;
151 yaxis left
152 AngularVelocityX1 = plot(wX1.Values.Time, wX1.Values.Data, 'b-', 'LineWidth', 2);
153 hold on
154 AngularVelocityX2 = plot(wX2.Values.Time, wX2.Values.Data, 'r-', 'LineWidth', 2);
155 AngularVelocityX4 = plot(wX4.Values.Time, wX4.Values.Data, 'Color', [0, 0.5, 0], 'LineWidth', 2);
156 ylabel('Angular Velocity (rad/s)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
157 set(gca, 'Color', 'k');
158 yaxis right
159 thX1 = plot(thetaX1.Values.Time, thetaX1.Values.Data, 'Color', [0.3, 0.75, 0.93], 'LineWidth', 2);
160 thX2 = plot(thetaX2.Values.Time, thetaX2.Values.Data, 'Color', [1, 0.4, 0.6], 'LineWidth', 2);
161 thX4 = plot(thetaX4.Values.Time, thetaX4.Values.Data, 'g', 'LineWidth', 2);
162 ylabel('Angular Position (rad)', 'Color', 'k', 'FontSize', 14);
163 set(gca, 'Color', 'k');
164 hold off
165 % Add on
166 xticks(0:5:50);
167 xticlables(0:5:50);
168 yticks(-40:10:40);
169 yticlables(-40:10:40);
170 grid on;
171 title('Graph of All Mode between Angular velocity and Theta VS Time', 'FontSize', 14);
172 xlabel('Time (s)', 'FontSize', 14);
173 legend('Angular velocity X1', 'Angular velocity X2', 'Angular velocity X4', 'Angular Position X1', 'Angular Position X2', 'Angular Position X4', 'Location', 'Southeast');

```

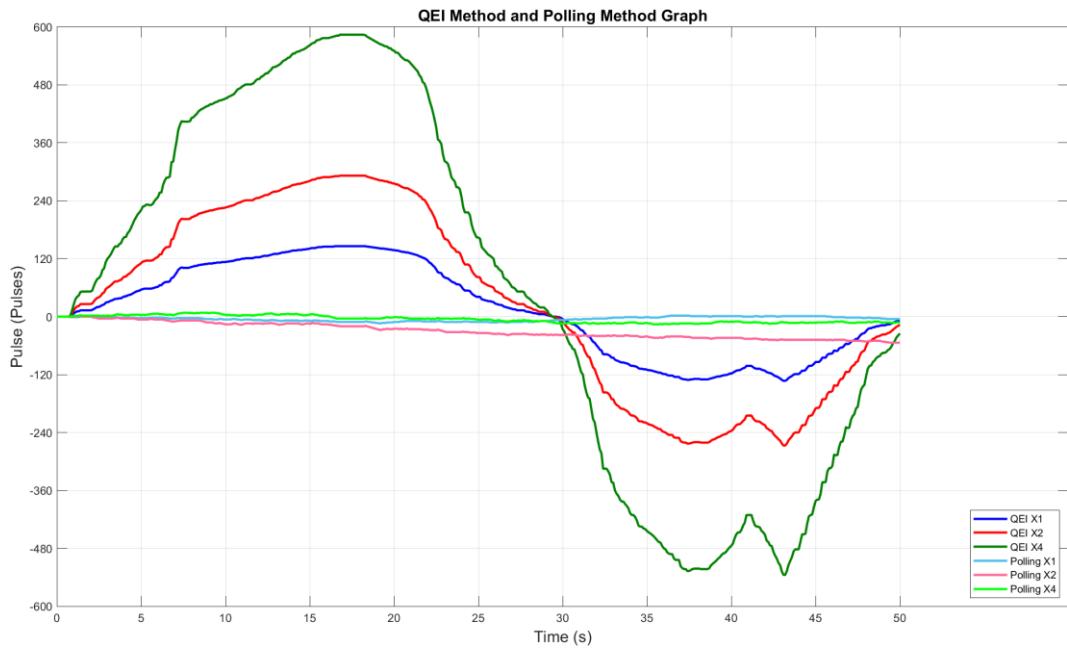
รูปที่ 80 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลเพื่อนำไปplot ผลกราฟของ Incremental Encoder (AMT103)

2.10. ผลการทดลอง

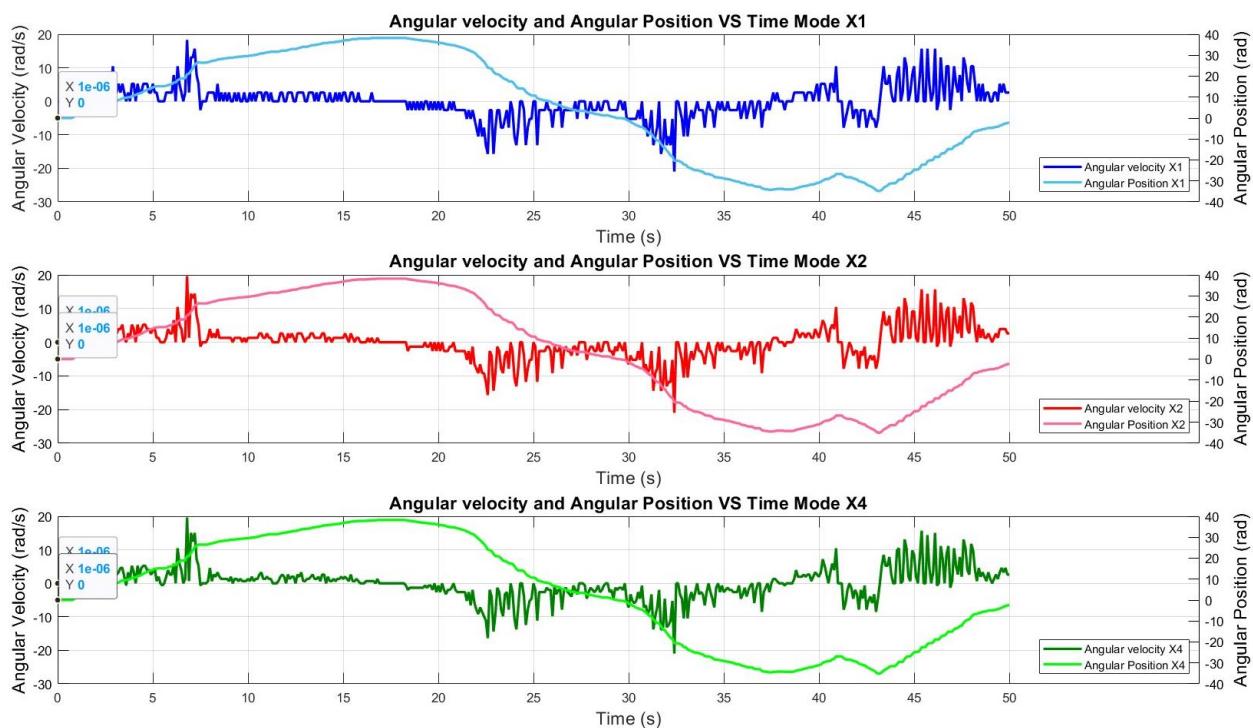
2.10.1 Incremental Encoder (AMT103)



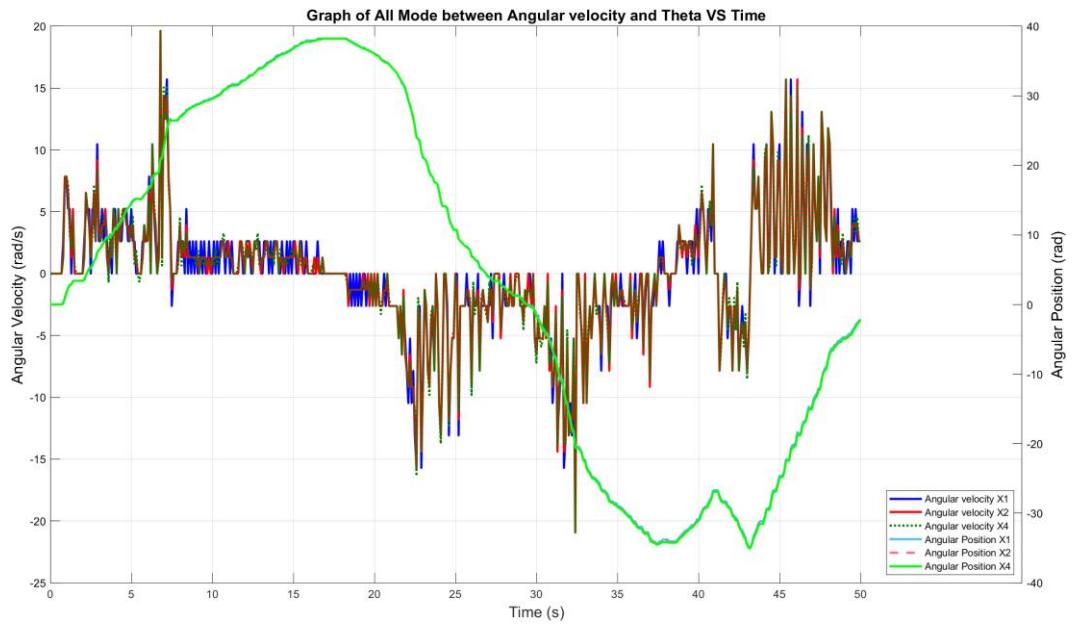
รูปที่ 81 กราฟเบริ่งเทียบค่า Pulse ที่อ่านได้จากการใช้วิธี QEI กับ Polling Method



รูปที่ 82 กราฟแสดงค่า Pulse โดยอ่านค่าโดยวิธี QEI กับ Polling โดยนำมาระบบรวมกัน

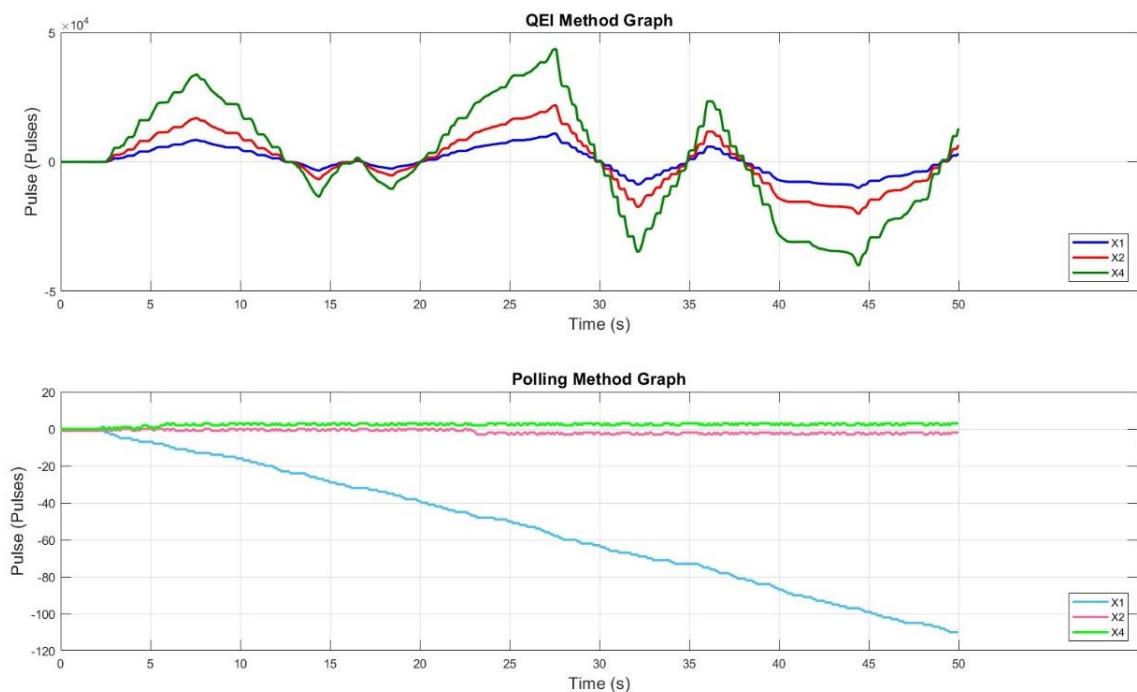


รูปที่ 83 กราฟตัวแหน่งและความเร็วเชิงมุม โดยใช้วิธี QEI ในการอ่านค่า โดยแยกเป็นกราฟ X1 X2 X4

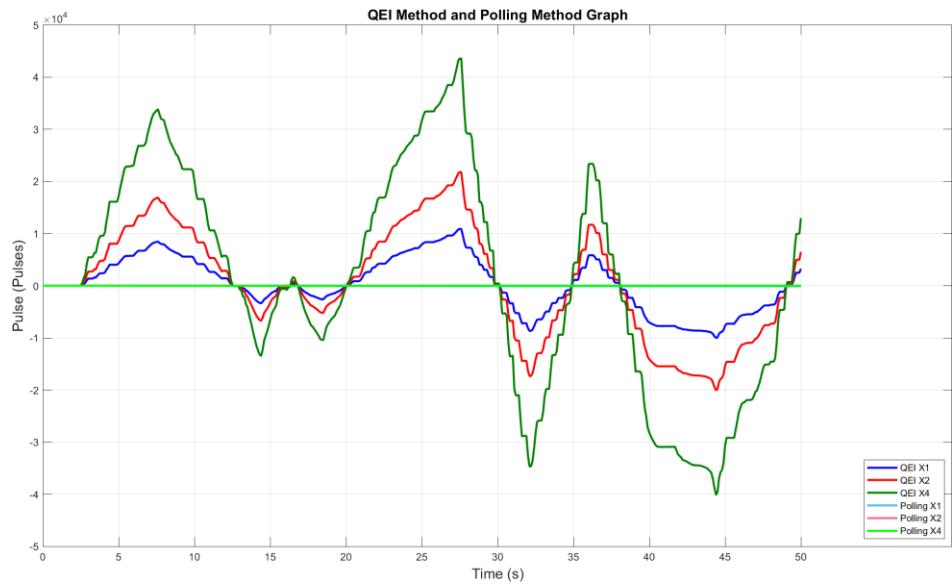


รูปที่ 84 กราฟตำแหน่งและความเร็วเชิงมุ่ง โดยใช้วิธี QEI ในการอ่านค่า โดยรวมกราฟ X1 X2 X4

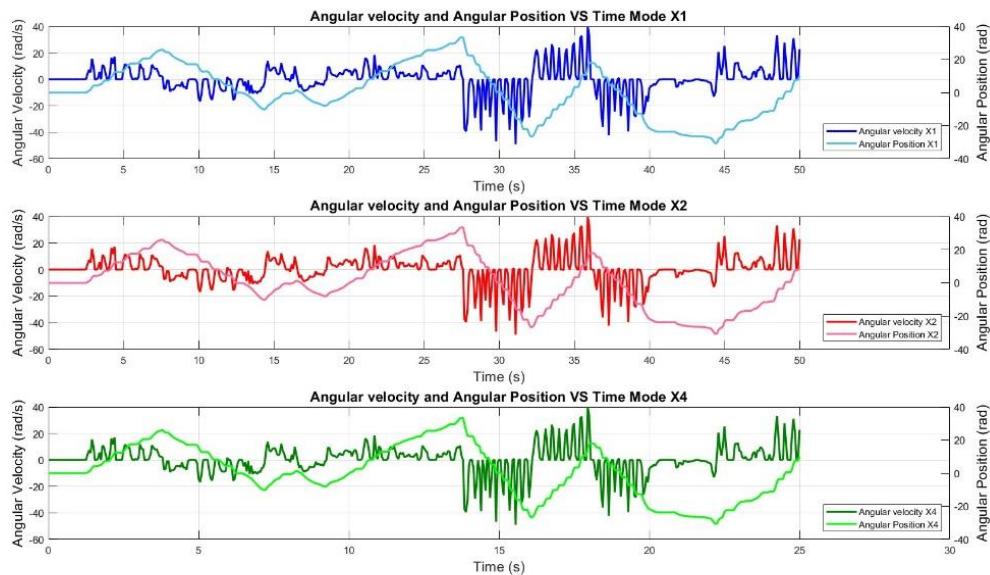
2.10.2. Incremental Encoder (PEC11R)



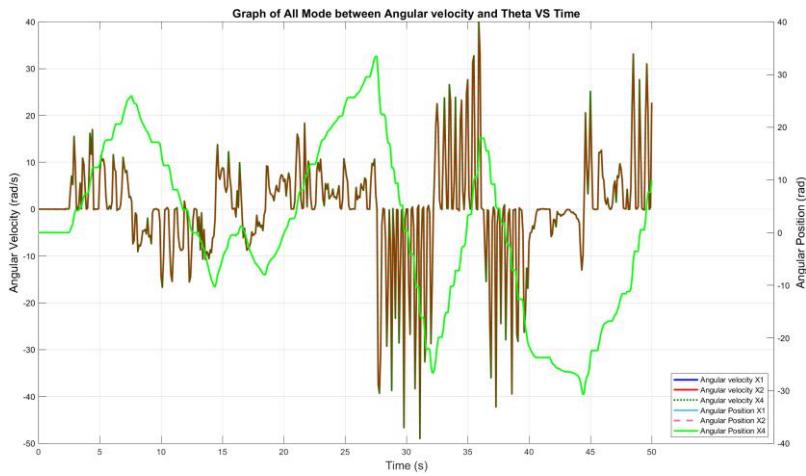
รูปที่ 85 กราฟเปรียบเทียบค่า Pulse ที่อ่านได้จากการใช้วิธี QEI กับ Polling Method



รูปที่ 86 กราฟแสดงค่า Pulse โดยอ่านค่าโดยวิธี QEI กับ Polling โดยนำมาพล็อตรวมกัน

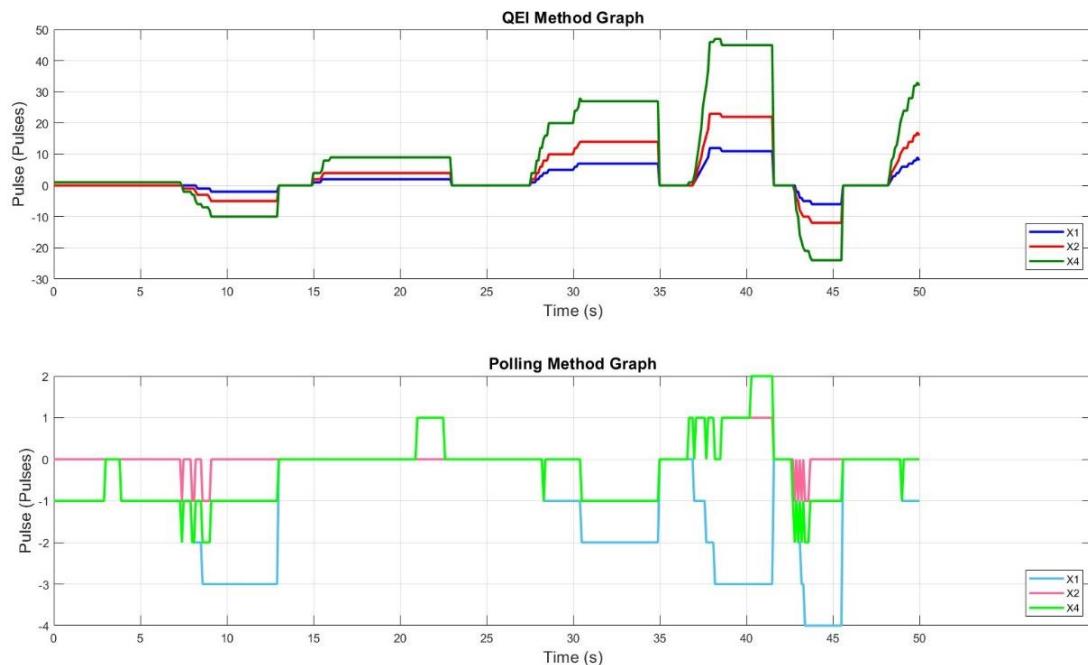


รูปที่ 87 กราฟตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม โดยใช้วิธี QEI ในการอ่านค่า โดยแยกเป็นกราฟ X1 X2 X4

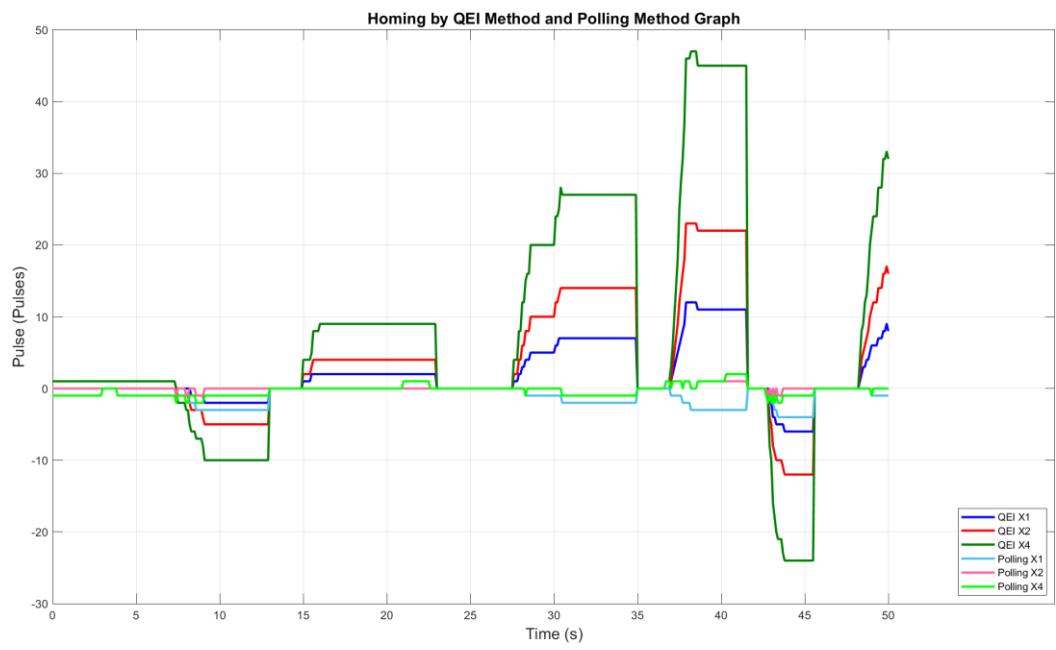


รูปที่ 88 กราฟตำแหน่งและความเร็วเชิงมุม โดยใช้วิธี QEI ในการอ่านค่า โดยรวมกราฟ X1 X2 X4

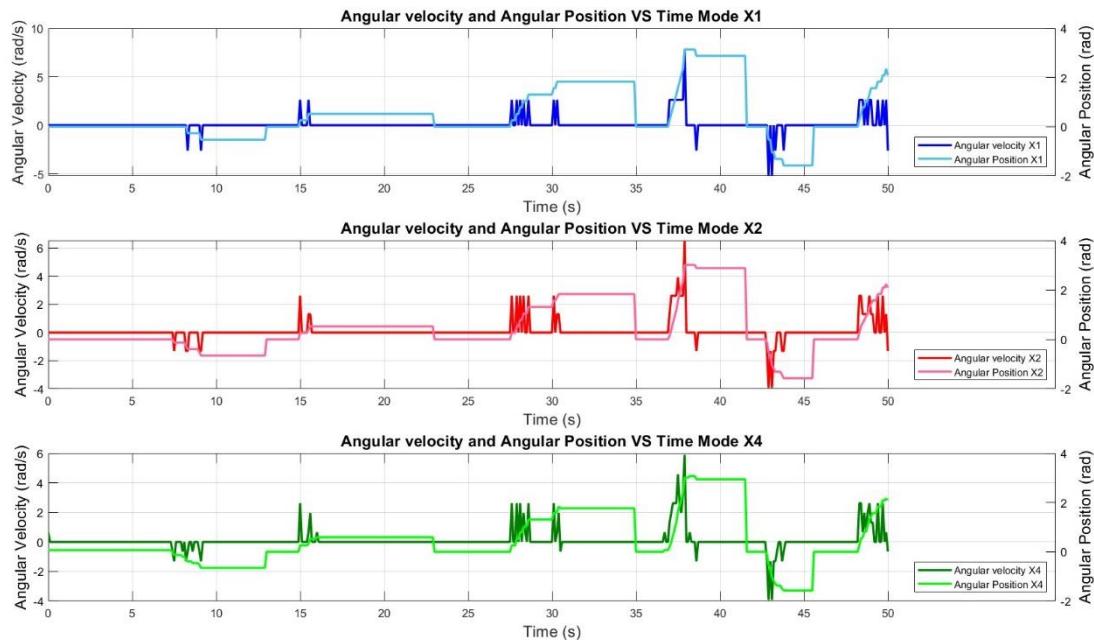
2.10.3. Homing ของ Incremental Encoder (AMT103)



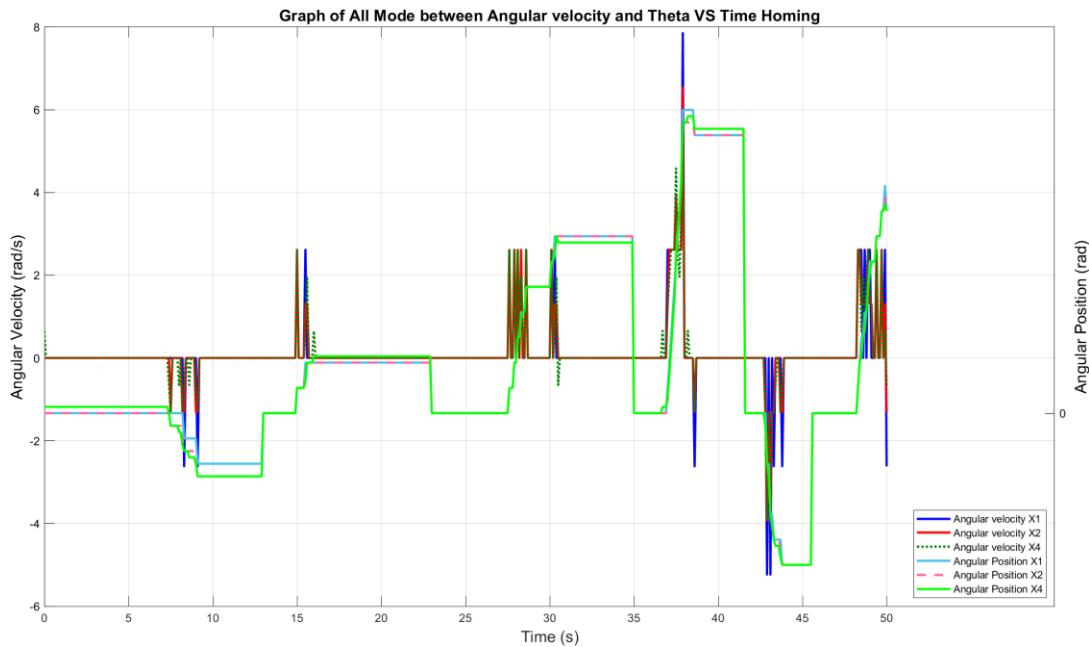
รูปที่ 89 กราฟแสดงการใช้สวิตซ์ Homing เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นใหม่



รูปที่ 90 กราฟแสดงการใช้สวิตซ์ Homing เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นใหม่ โดยอ่านค่าจาก QEI และ Polling โดยรวมกราฟ



รูปที่ 91 กราฟแสดงการใช้สวิตซ์ Homing เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นใหม่ โดยอ่านค่าจาก QEI และ Polling



รูปที่ 92 กราฟแสดงการใช้สวิตซ์ Homing เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นใหม่ โดยอ่านค่าจาก QEI และ Polling

2.11. สรุปผล

จากการทดลองของ Incremental Encoder (AMT103) และ Incremental Encoder (PEC11R) สิ่งที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจน คือ Encoder นั้นมีผลต่อความแม่นยำ ได้แก่ การอ่านด้วยวิธี QEI กับวิธีการอ่านแบบ Polling โดยการอ่านแบบ QEI นั้นมีความแม่นยำและถูกต้องมากกว่าการอ่านด้วยวิธี Polling และจากการที่ได้ทำการสังเกตไม่ว่าจะเป็นการอ่านค่าความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุม ในการอ่านแบบ X1 X2 X4 จะมีค่าที่เท่ากัน แต่ความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้จาก Incremental Encoder (AMT103) นั้นมีความต่อเนื่องมากกว่า Incremental Encoder (PEC11R) และความสามารถทำ Homing นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นได้

2.12. อภิปรายผล

จากการสรุปผลการทดลองว่า การที่วิธีการอ่านค่า Pulse โดยวิธีแบบ QEI นั้นสามารถอ่านค่าได้มีความแม่นยามากกว่าการอ่านด้วยวิธีแบบ Polling เพราะว่าการอ่านแบบ QEI เป็นการอ่านค่าโดยการใช้ Timer ของชาร์ดแวร์ในการนับจำนวน Pulse มาคำนวณ ซึ่งมีความไวนามากกว่าวิธีการอ่านค่าแบบ Polling เพราะว่าเป็นการอ่านโดยใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณซึ่งพึ่งพาการทำงานตาม Clock Speed ของ Processor จึงมีการประมวลที่ช้า ทำให้อ่านค่าพลัสที่มีความเร็วมากไม่ทัน และไม่สามารถติดตามค่าตำแหน่งสัมบูรณ์ได้ ดังนั้น จึงควรใช้วิธี QEI ในการอ่านค่าสัญญาณจาก Encoder

ส่วนเรื่องการอ่านความเร็วเชิงมุมที่ Incremental Encoder (AMT103) อ่านได้นั้นมีความต่อเนื่องมากกว่าการอ่านค่าจาก Incremental Encoder (PEC11R) เพราะว่า Incremental Encoder (AMT103) มีค่าความละเอียด 2048 PPR และสามารถหมุนได้ต่อเนื่องได้มากกว่า Incremental Encoder (PEC11R) ที่มีความละเอียด 24 PPR และไม่สามารถหมุนได้อย่างต่อเนื่องโดยจะหมุนได้เป็นขั้นโดยที่ละ 15 องศา และการที่มีการทำ

Homing ทำให้สามารถเลือกตำแหน่งเริ่มต้นของ Incremental Encoder ได้ซึ่งจะทำให้สามารถนำมาใช้งานได้ในงานอื่น ๆ ได้มากยิ่งขึ้น

2.13. ข้อเสนอแนะ

1. ควรระวังความคุณตัวแปรตำแหน่งเชิงมุมที่รัดกุมกว่านี้ เช่น การใช้มอเตอร์ที่มีความเร็ว慢้าเสมอ เพื่อให้สามารถวัดผลการเก็บค่าได้โดยเทียบกับตัวแปรที่รู้ค่า
2. อาจใช้วิธีหาความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยจากหลายช่วง Time Step เพื่อหาค่าความเร็วเชิงมุมในแต่ละขณะไปพล็อกตราชไฟต่อเนื่องขึ้น และรับมือกับกราฟที่มีช่วงโดดเด่น Time Step ค่าจากการที่ Encoder มีความละเอียด Pulse Per Revolution ต่ำเกินไป
3. ก้านหมุนของ Encoder ควรยืดอย่างมั่นคงมากขึ้นกว่านี้
4. ควรจะมีขีดบอกตำแหน่งเชิงมุมที่ละเอียดและเข้มขึ้นตำแหน่งที่แม่นยำติดบนแกนหมุน

2.14. เอกสารอ้างอิง

1. https://th.mouser.com/datasheet/2/1628/amt10_v-3507795.pdf

3. Magnetic Sensor

3.1. จุดประสงค์

- 3.1.1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
- 3.1.2. เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณ Output ของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เมื่อ Magnetic Flux Density เปลี่ยนแปลงไป
- 3.1.3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Field Shielding และ Magnetic Flux Density
- 3.1.4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก และ Magnetic Flux Density ที่วัดได้
- 3.1.5. เพื่อศึกษาการใช้ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ในการวัดค่า Magnetic Flux Density โดยใช้ MATLAB Simulink ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE

3.2. สมมติฐาน

- 3.2.1. การหันข้ามแม่เหล็กข้ามตัวเข้าหากัน เช่นเซอร์แม่เหล็ก จะทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งออกจากตัวเซอร์ในทิศทางพุ่งขึ้น ทำให้เซ็นเซอร์อ่านค่า Magnetic Flux Density ได้เป็นบวก และให้ค่าแรงดันขากอนมากกว่า 1.65 V ในขณะที่ การหันข้ามแม่เหล็กข้ามหน้าเข้าหากัน เช่นเซอร์แม่เหล็ก จะทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งเข้าหากันตัวเซอร์ในทิศทางพุ่งลง ทำให้เซ็นเซอร์อ่านค่า Magnetic Flux Density ได้เป็นลบ และให้ค่าแรงดันขากอนน้อยกว่า 1.65 ตามคุณสมบัติการตอบสนองต่อทิศทางเส้นฟลักซ์แม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดรุ่น DRV5055A2

- 3.2.2. ขนาดของ Magnetic Flux density ที่วัดได้ ควรจะแปรส่วนทางลดลงตามระยะตำแหน่งของแม่เหล็ก ถ้ารัฐที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากตัวแม่เหล็กถ้าจะถ่างออกจากกันในปริภูมิสามมิติ เมื่อ

ยิ่งห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไป จึงมีความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์หรือความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงตามระยะทาง

3.3.3 การใส่แผ่น Magnetic Shield บางไปที่แม่เหล็กถาวร จะทำให้สนามแม่เหล็กถูกวัดดูภายนอกในตัว Magnetic Shield ปิดกันไปปริมาณหนึ่ง จึงทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกมาในบริเวณโดยรอบมีความหนาแน่นลดลง นั่นคือ ควรจะทำให้เซ็นเซอร์แม่เหล็กอ่านค่าขนาดของ Magnetic Flux Density ได้ลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ใส่แผ่น Magnetic Shield สำหรับแต่ละตำแหน่งความสูงของแม่เหล็กถาวร

3.3. ตัวแปร

ตัวแปรต้น	ตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กถาวร แบรค่าตั้งแต่ตำแหน่งที่ 9 มิลลิเมตร ถึง 45 มิลลิเมตร โดยเริ่มที่ 0 3 มิลลิเมตร, ทิศทางข้ามแม่เหล็กที่หันเข้าหาตัวเซนเซอร์ ได้แก่ ข้ามใต้และข้ามเหนือ, การใส่หรือไม่ใส่ Magnetic Shield
ตัวแปรตาม	แรงดันไฟฟ้าจากที่วัดได้จาก Microcontroller ในแต่ละตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กถาวร รวมทั้งค่าของ Magnetic Flux Density ที่วัดได้
ตัวแปรควบคุม	แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายให้ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor, ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างข้อมูลในแต่ละตำแหน่ง c เป็น 2 วินาที, ขนาดตัวอย่างของข้อมูลแต่ละตำแหน่งเป็น 501 หน่วย, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, แม่เหล็กถาวรที่ใช้ทดลอง, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง, สถานที่ที่ทำการทดลองเป็นที่เดียวกัน, การไม่มีแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กربกวนในบริเวณโดยรอบ

3.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

- Microcontroller หรือบอร์ดควบคุม ในการทดลองนี้ หมายถึงบอร์ด Microcontroller รุ่น Nucleo STM32G474RE
- เซนเซอร์ เซนเซอร์แม่เหล็ก หรือ Magnetic Sensor ในการทดลองนี้ หมายถึง DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ที่มี Magnetic Sensitivity Option เป็นแบบ A2
- ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เป็นคำแปลของ Magnetic Flux Density เป็นปริมาณที่บอกถึงค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength) ณ ตำแหน่งหนึ่ง ๆ

3.5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

- ตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กถาวร ตำแหน่งของแม่เหล็กถาวร หรือความสูงของแม่เหล็กถาวร หมายถึง ความสูงของแม่เหล็กถาวรจากตัวเซนเซอร์แม่เหล็ก ซึ่งวัดจากตำแหน่งที่ชิดซึ้งตำแหน่งอ้างอิงของก้านจับ แม่เหล็กถาวรซึ่งเป็นสเกลบนกระยะของชุดทดลอง MagneticXplorer

3.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ฟลักซ์แม่เหล็ก และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) คือปริมาณหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งจากข้าวหนี่ไปยังอีกข้าวของเท่งแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวย์เบอร์ (Weber)

ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic flux density) คือ จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ที่เส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านเป็นปริมาณเวกเตอร์ มีหน่วยเป็น $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ หรือ เทสลา (Tesla) สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า $B = \frac{\emptyset}{A}$

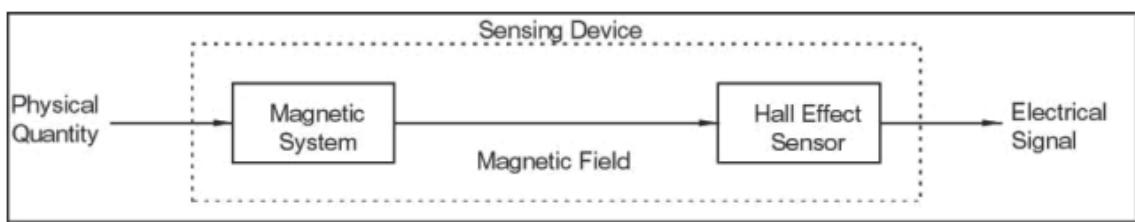
โดยที่ B คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ หรือเทสลา (T)

\emptyset คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Weber

A คือ พื้นที่ที่ตัดผ่านเป็นตารางเมตร

3.6.2. การทำงานของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทำงานโดยตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป และแปลงให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดัน Output จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็ก



General Hall effect system

รูปที่ 93 แนวคิดการตรวจวัดปริมาณทางกายภาพของ Hall Effect Magnetic Sensor

3.6.3. Datasheet ของ DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และการคำนวณความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็กจากแรงดันไฟฟ้า

DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor**1 Features**

- Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
- Operates From 3.3-V and 5-V Power Supplies
- Analog Output With $V_{CC}/2$ Quiescent Offset
- Magnetic Sensitivity Options (At $V_{CC} = 5$ V):
 - A1/Z1: 100 mV/mT, ± 21 -mT Range
 - A2/Z2: 50 mV/mT, ± 42 -mT Range
 - A3/Z3: 25 mV/mT, ± 85 -mT Range
 - A4/Z4: 12.5 mV/mT, ± 169 -mT Range
- Fast 20-kHz Sensing Bandwidth
- Low-Noise Output With ± 1 -mA Drive
- Compensation For Magnet Temperature Drift for A1/A2/A3/A4 Versions and None for Z1/Z2/Z3/Z4 Versions
- Standard Industry Packages:
 - Surface-Mount SOT-23
 - Through-Hole TO-92

2 Applications

- Precise Position Sensing
- Industrial Automation and Robotics
- Home Appliances
- Gamepads, Pedals, Keyboards, Triggers
- Height Leveling, Tilt and Weight Measurement
- Fluid Flow Rate Measurement
- Medical Devices
- Absolute Angle Encoding
- Current Sensing

3 Description

The DRV5055 is a linear Hall effect sensor that responds proportionally to magnetic flux density. The device can be used for accurate position sensing in a wide range of applications.

The device operates from 3.3-V or 5-V power supplies. When no magnetic field is present, the analog output drives half of V_{CC} . The output changes linearly with the applied magnetic flux density, and four sensitivity options enable maximal output voltage swing based on the required sensing range. North and south magnetic poles produce unique voltages.

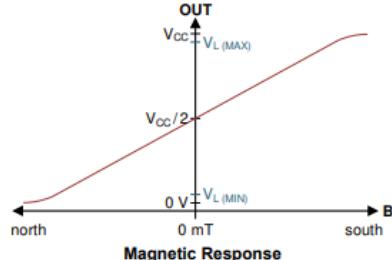
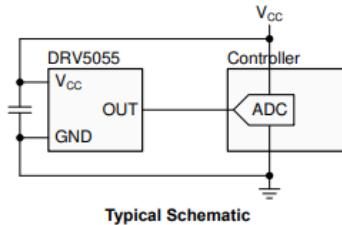
Magnetic flux perpendicular to the top of the package is sensed, and the two package options provide different sensing directions.

The device uses a ratiometric architecture that can eliminate error from V_{CC} tolerance when the external analog-to-digital converter (ADC) uses the same V_{CC} for its reference. Additionally, the device features magnet temperature compensation to counteract how magnets drift for linear performance across a wide –40°C to 125°C temperature range. Device options for no temperature compensation of magnet drift are also available.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
DRV5055	SOT-23 (3)	2.92 mm × 1.30 mm
	TO-92 (3)	4.00 mm × 3.15 mm

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



⚠ An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

ຮູບທີ 94 Datasheet ຂອງ DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

6.5 Electrical Characteristics

for $V_{CC} = 3$ V to 3.63 V and 4.5 V to 5.5 V, over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	MIN	TYP	MAX	UNIT
I_{CC} Operating supply current		6	10	mA	
t_{ON} Power-on time (see Figure 7-4)	$B = 0$ mT, no load on OUT	175	330	μ s	
f_{BW} Sensing bandwidth		20			kHz
t_d Propagation delay time	From change in B to change in OUT	10			μ s
B_{ND} Input-referred RMS noise density	$V_{CC} = 5$ V	130			nT/\sqrt{Hz}
	$V_{CC} = 3.3$ V	215			
B_N Input-referred noise	$B_{ND} \times 6.6 \times \sqrt{20}$ kHz	0.12			mT_{PP}
	$V_{CC} = 5$ V	0.2			
V_N Output-referred noise ⁽²⁾	$B_N \times S$	DRV5055A1/Z1	12		mV_{PP}
		DRV5055A2/Z2	6		
		DRV5055A3/Z3	3		
		DRV5055A4/Z4	1.5		

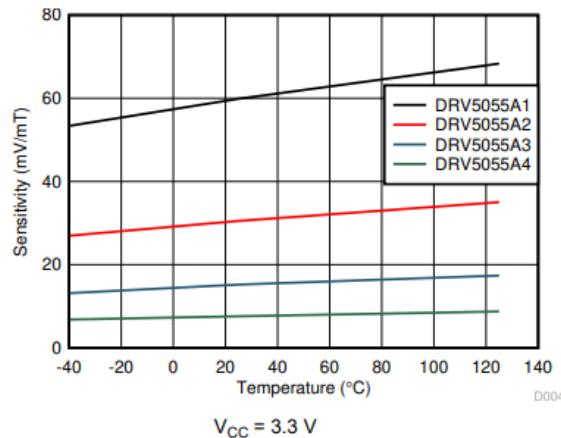
(1) B is the applied magnetic flux density.

(2) V_N describes voltage noise on the device output. If the full device bandwidth is not needed, noise can be reduced with an RC filter.

6.6 Magnetic Characteristics

for $V_{CC} = 3$ V to 3.63 V and 4.5 V to 5.5 V, over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_Q Quiescent voltage	$B = 0$ mT, $T_A = 25^\circ C$	2.43	2.5	2.57	V
	$V_{CC} = 3.3$ V	1.59	1.65	1.71	
V_{QAT} Quiescent voltage temperature drift	$B = 0$ mT, $T_A = -40^\circ C$ to $125^\circ C$ versus $25^\circ C$		$\pm 1\% \times V_{CC}$		V
V_{ORE} Quiescent voltage ratiometry error ⁽²⁾			$\pm 0.2\%$		
V_{QAL} Quiescent voltage lifetime drift	High-temperature operating stress for 1000 hours		< 0.5%		
S Sensitivity	$V_{CC} = 5$ V, $T_A = 25^\circ C$	DRV5055A1/Z1	95	100	105
		DRV5055A2/Z2	47.5	50	52.5
		DRV5055A3/Z3	23.8	25	26.2
		DRV5055A4/Z4	11.9	12.5	13.2
	$V_{CC} = 3.3$ V, $T_A = 25^\circ C$	DRV5055A1/Z1	57	60	63
		DRV5055A2/Z2	28.5	30	31.5
		DRV5055A3/Z3	14.3	15	15.8
		DRV5055A4/Z4	7.1	7.5	7.9
B_L Linear magnetic sensing range ^{(3) (4)}	$V_{CC} = 5$ V, $T_A = 25^\circ C$	DRV5055A1/Z1	± 21		mT
		DRV5055A2/Z2	± 42		
		DRV5055A3/Z3	± 85		
		DRV5055A4/Z4	± 169		
	$V_{CC} = 3.3$ V, $T_A = 25^\circ C$	DRV5055A1/Z1	± 22		mT
		DRV5055A2/Z2	± 44		
		DRV5055A3/Z3	± 88		
		DRV5055A4/Z4	± 176		
V_L Linear range of output voltage ⁽⁴⁾		0.2	$V_{CC} - 0.2$		V
S_{TC} Sensitivity temperature compensation for magnets ⁽⁵⁾	DRV5055A1, DRV5055A2, DRV5055A3, DRV5055A4		0.12		$^{\circ}C$



รูปที่ 96 กราฟความสัมพันธ์สำหรับค่า Sensitivity ตามอุณหภูมิที่ทำงานของ Magnetic Sensor ชนิดรุ่น DRV5055A2 ที่ใช้ในการทดสอบ

7.3 Feature Description

7.3.1 Magnetic Flux Direction

As shown in Figure 7-1, the DRV5055 is sensitive to the magnetic field component that is perpendicular to the top of the package.

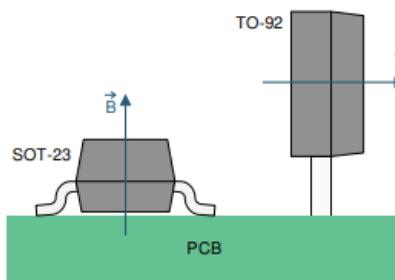


Figure 7-1. Direction of Sensitivity

รูปที่ 97 Datasheet ของ DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

Magnetic flux that travels from the bottom to the top of the package is considered positive in this document. This condition exists when a south magnetic pole is near the top (marked-side) of the package. Magnetic flux that travels from the top to the bottom of the package results in negative millitesla values.

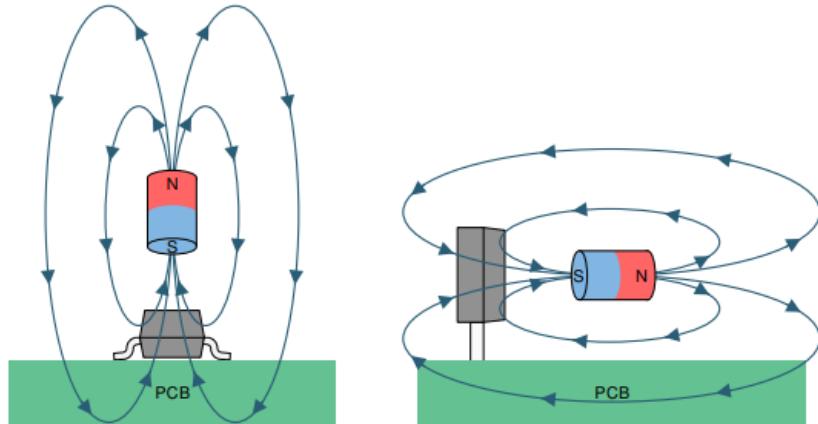


Figure 7-2. The Flux Direction for Positive B

7.3.2 Magnetic Response

When the DRV5055 is powered, the DRV5055 outputs an analog voltage according to [Equation 1](#):

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

where

- V_Q is typically half of V_{CC}
- B is the applied magnetic flux density
- $\text{Sensitivity}_{(25^\circ\text{C})}$ depends on the device option and V_{CC}
- S_{TC} is typically $0.12/\text{ }^\circ\text{C}$ for device options DRV5055A1 - DRV5055A4 and is $0/\text{ }^\circ\text{C}$ for DRV5055Z1 - DRV5055Z4 options
- T_A is the ambient temperature
- V_{OUT} is within the V_L range

As an example, consider the DRV5055A3 with $V_{CC} = 3.3$ V, a temperature of 50°C , and 67 mT applied. Excluding tolerances, $V_{OUT} = 1650$ mV + 67 mT $\times (15$ mV/mT $\times (1 + 0.0012/\text{ }^\circ\text{C} \times (50^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}))) = 2685$ mV.

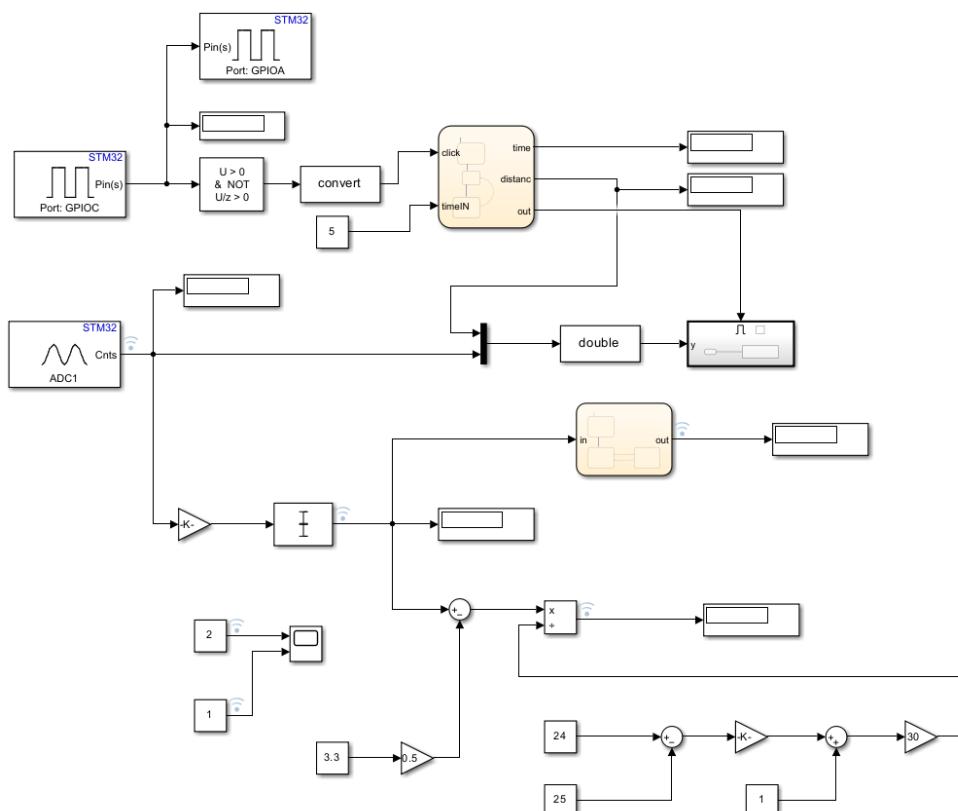
รูปที่ 98 Datasheet ของ DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

การคำนวณหากความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กหรือความเข้มของสนามแม่เหล็กจากแรงดันไฟฟ้าของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor สามารถหาได้จากการใน Datasheet คือ $V_{out} = V_Q + B \times (\text{Sensitivity}_{(25^\circ\text{C})} \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25^\circ\text{C})))$ โดยที่ค่า Sensitivity ของ Magnetic Sensor ชนิดรุ่น DRV5055A2 ที่อุณหภูมิ 24 องศา จะมีค่าเท่ากับ $30 \frac{\text{mV}}{\text{mT}}$

3.7. วิธีดำเนินการทดลอง

ตอนที่ 1 การออกแบบโปรแกรม Simulink และเตรียมการเก็บข้อมูล

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 3.3
2. เขียน Block diagram บนโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบโปรแกรมเชื่อมต่อ Microcontroller ให้เก็บตัวอย่างข้อมูลจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ

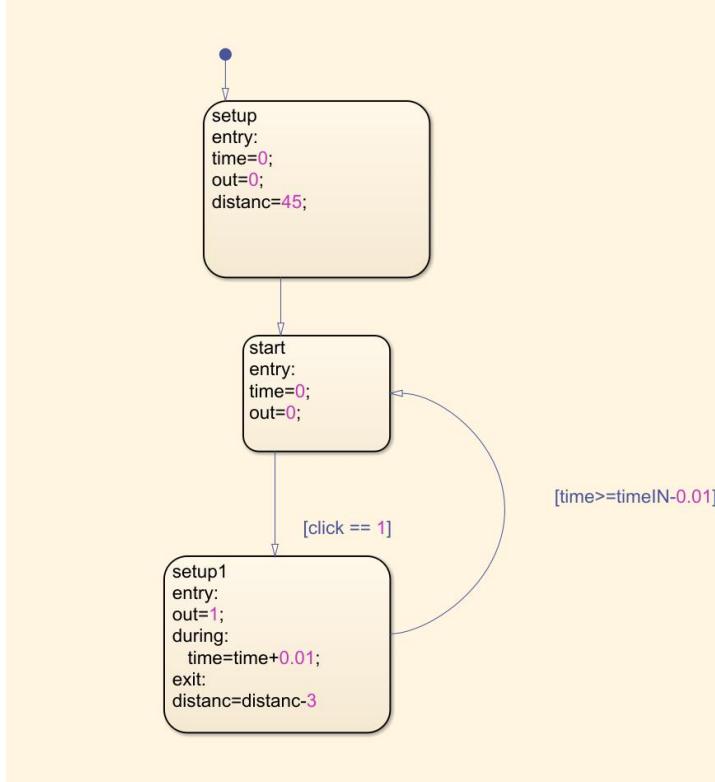


รูปที่ 99 Block diagram ใน Simulink Models ที่เก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ

จากการจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการใช้ Block ชื่อ Digital Port Read ที่มีการตั้งค่าเป็น Port GPIOC พินที่ 13 เพื่อทำการอ่านค่าสัญญาณที่อุปกรณามีการกดที่ปุ่มนี้หรือไม่ จากนั้นเข้าไปยัง Block ชื่อ Detect Rise Positive เพื่อป้องกันการกดปุ่มซ้ำซ้อน (Debouncing) และตรวจจับการกดปุ่มครั้งใหม่ และ Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลของสัญญาณที่ได้มาตรงกับชนิดข้อมูลของ Block ต่อไป แล้วเข้า Block Chart ส่วน Block Constant ที่เข้าไปยัง Block Chart เป็น Block ที่กำหนดเวลาที่ต้องการเก็บค่าการทดลอง โดยในการทดลองนี้กำหนดให้มีการเก็บค่าการทดลองเป็นระยะเวลา 2 วินาที

ส่วนสองมีการใช้ Block หลัก ๆ เพื่อทำการเก็บค่าในการทดลองคือ Analog to Digital Converter เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เป็นค่าสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิตจาก ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo STM32G474RE เข้าสู่ Block ชื่อ Mux

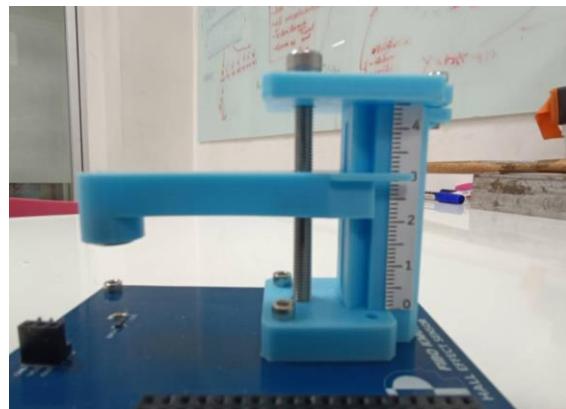
เพื่อรวมกับค่าข้อมูลระยะตำแหน่งของ distance ที่ออกมาจาก Block Chart ให้เป็นเวกเตอร์ขนาด 1×2 ที่มีค่าข้อมูลตำแหน่งกับสัญญาณดิจิตอล จากนั้นนำเข้า Block Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลภายในให้เป็น double และเข้า Block Subsystem เพื่อบันทึกเพิ่มลง Workspace



รูปที่ 100 ข้างใน Chart จาก Block diagram ที่มีการเขียน State flow เพื่อเก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบสำหรับ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

ตอนที่ 2 การดำเนินการเก็บข้อมูล

1. ต่อวงจรทดลองได้แก่ Microcontroller Nucleo STM32G474RE และเซนเซอร์แม่เหล็กที่จะทดลองลงบนบอร์ดทดลอง และเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์
2. ต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จากเซนเซอร์แม่เหล็ก และจ่ายไฟเลี้ยงขนาดแรงต้น 3.3 V ให้ เซนเซอร์แม่เหล็ก รันโปรแกรม Simulink เพื่อเริ่มเก็บข้อมูลจาก Microcontroller
3. ติดตั้งแม่เหล็กถาวรไว้กับก้านจับแม่เหล็ก โดยเริ่มให้หันข้ามตัวกัน เช่น เซนเซอร์แม่เหล็ก
4. ปรับตำแหน่งก้านจับแม่เหล็กถาวรไปที่ความสูงที่ต้องการเก็บผล ด้วยการวัดจากสเกลบอกตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กถาวร โดยเริ่มที่ตำแหน่ง 9 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความสูงที่น้อยที่สุดที่ทำให้แผ่นแม่เหล็กถาวรประชิดตัวเซนเซอร์แม่เหล็ก



รูปที่ 101 การวัดตำแหน่งก้านจับแม่เหล็กทราบโดยใช้จีดสเกลบอกร่องตำแหน่งของชุดทดลอง MagneticXplorer

5. กดปุ่ม Push button ของบอร์ด เพื่อให้ Simulink ทำงานเก็บตัวอย่างสัญญาณอนาล็อกของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่ตำแหน่งแม่เหล็กทราบนั้น จำนวน 501 ค่า ในเวลา 5 วินาที ไว้ใน Workspace ของ MATLAB

6. ทำซ้ำในขั้นตอนข้อที่ 4 – 5 โดยแปรงตำแหน่งก้านจับแม่เหล็กทราบในขั้นที่ 4 จาก 9 มิลลิเมตร ให้เพิ่มทีละ 3 มิลลิเมตร ได้เป็น 12 มิลลิเมตร, 15 มิลลิเมตร, 18 มิลลิเมตร ไปเรื่อยๆ จนถึง 45 มิลลิเมตร เพื่อบันทึกผลค่าสัญญาณดิจิตอลที่อ่านได้สำหรับตำแหน่งความ

7. ทำการทดลองเก็บผลจากเส้นฟลักซ์แม่เหล็กอิกิศทางหนึ่ง โดยทำซ้ำตามขั้นที่ 3 – 6 แต่เปลี่ยนการทิศการติดตั้งแม่เหล็กทราบกับก้านจับในขั้นที่ 3 จากหันข้ามเข้า เป็นหันเข้าหนีอเข้าหาเข็นเชอร์แม่เหล็กแทน

8. ทำการทดลองเก็บผลสำหรับแม่เหล็กทราบที่ใส่ Magnetic Sield โดยทำซ้ำตามขั้นตอน 3 – 7 แต่หลังจากติดตั้งแม่เหล็กทราบในขั้นที่ 3 ให้ติดตั้งแผ่น Magnetic Shield ไปด้วย ดังรูป



รูปที่ 102 ชุดทดลอง MagneticXplorer ที่ติดตั้งแม่เหล็กทราบพร้อมด้วยแผ่น Magnetic Shield

9. บันทึกข้อมูลดิบที่เก็บได้ลงใน Workspace

ตอนที่ 3 การประมวลผลข้อมูล

```

1 % To extract data from 2xn array into a matrix
2 function [distanceData, voltData] = extractArr(rawData, Nround, Nsample)
3     % Extract distance and analog data
4     distanceData = rawData(:, 1);
5     analogs = rawData(:, 2);
6
7     % Reshape analog data into Nround x Nsample matrix
8     anaData = reshape(analogs, [Nsample, Nround])';
9
10    % Convert to double and calculate voltage
11    anaData = cast(anaData, "double");
12    voltData = anaData * 3.3 / 4096;
13
14    % Reverse the order of rows
15    voltData = voltData(end:-1:1, :);
16 end
17
18 function [distanceData, voltData] = extractFromFile(fileName, Nround, Nsample)
19     load(fileName);
20     rawData = out.AnalogData;
21     [distanceData, voltData] = extractArr(rawData, Nround, Nsample);
22 end

```

รูปที่ 103 MATLAB Live Script สำหรับประมวลผลข้อมูลที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

```

23 % Data from Magnetic Sensor
24 Nround = 13; % 45 : -3 : 9
25 Nsample = 501;
26
27 [dist_NonShield_S, voltData_NonShield_S] = extractFromFile("NonShield_S\AnalogData", Nround, Nsample)
28 [dist_NonShield_N, voltData_NonShield_N] = extractFromFile("NonShield_N\AnalogData", Nround, Nsample)
29
30 [dist_Shield_S, voltData_Shield_S] = extractFromFile("Shield_S\AnalogData", Nround, Nsample)
31 [dist_Shield_N, voltData_Shield_N] = extractFromFile("Shield_N\AnalogData", Nround, Nsample)
32
33 save("voltData_extracted.mat", "voltData_NonShield_S", "voltData_NonShield_N", "voltData_Shield_S", "voltData_Shield_N");
34 % save the processed matrix variables for using in "PlotAll.mlx"

```

รูปที่ 104 MATLAB Live Script สำหรับประมวลผลข้อมูลที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์แม่เหล็ก

1. สำหรับการจัดการทดลองperc่าหนึ่ง จากข้อมูลดิบที่ได้ใน Workspace จะได้ข้อมูลสำหรับ 13 ตำแหน่งความสูง ตำแหน่งละ 501 หน่วยข้อมูล ทั้งหมดเป็น 6513 หน่วยข้อมูล ในรูป像个เตอร์ขนาด 6513×2 ในตัวแปรชื่อ rawData โดยแต่ละหน่วยข้อมูลเป็นเวกเตอร์แทน [ตำแหน่งความสูง; สัญญาณดิจิตอล]

2. จัดรูป่างข้อมูลด้วยการ reshape ตัวแปรเวกเตอร์ analogs ซึ่งดึงข้อมูลค่าสัญญาณดิจิตอลมาจากการ rawData ให้เป็นเมทริกซ์มิติ 13×501 ชื่อ anaData ซึ่งแต่ละแถวแทนข้อมูลทั้ง 501 หน่วย ในคอลัมน์ของ แคนันน์ สำหรับแต่ละตำแหน่งเลื่อน เพื่อสะดวกในการนำไปประมวลผลต่อ

3. แปลงค่าสัญญาณดิจิตอล 12 บิต เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ $Voltage = \frac{Analog\ Value}{4096} \times 3.3$ จากนั้นนำไปคำนวณหาแรงดันเฉลี่ย รวมทั้งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ แรงดัน และนำไปplotเป็นกราฟร่วมกับ Error Bar ในการวิเคราะห์ข้อมูล

4. คำนวณหาค่า Magnetic Flux Density ที่วัดได้จากค่าแรงดัน โดยใช้ความสัมพันธ์ $V_{out} = V_Q + B \times (Sensitivity_{(25^\circ C)} \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25^\circ C)))$ โดยแทนค่าที่สอดคล้องกับ Datasheet และการควบคุมการทดลองเป็น $V_Q = 1.65\ V, Sensitivity_{(25^\circ C)} = 30\ \frac{mV}{mT}, S_{rc} =$

$0.12\%/\text{C}$, $T_A = 24^\circ\text{C}$ เพื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของ Magnetic Flux Density (B) วิเคราะห์เทียบกับตัวแปรอื่น

3.8. วัสดุอุปกรณ์

1. DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor 1 อัน
2. Nucleo STM32G474RE 1 ชุด
3. สายอัปโหลด USB 1 สาย
4. MagneticXplorer 1 ชุด
5. สายจัมเปอร์ จำนวนหนึ่ง
6. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง

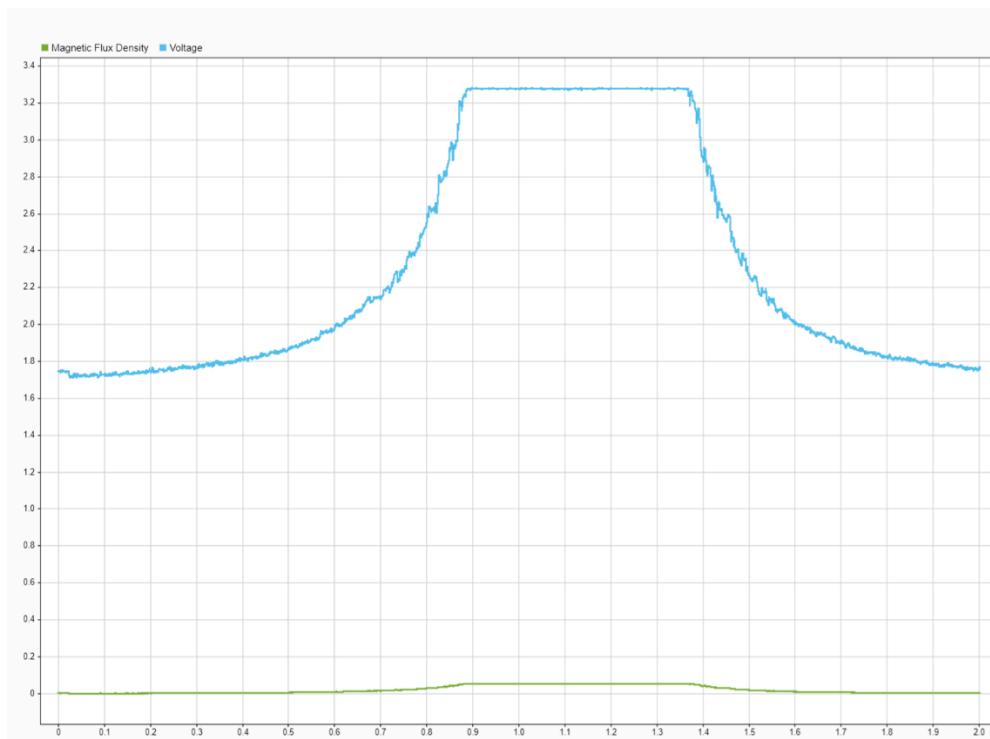
3.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 3.3.
2. เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และจัดเตรียมวงจรการทดลอง โดยต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
3. ออกแบบและสร้าง Blocks ด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับเขียนต่อ กับ Microcontroller เพื่อเก็บค่าการทดลอง
4. ทำการทดลอง โดยปรับตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กทราบของ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทุก ๆ 3 มิลลิเมตร เริ่มที่ 9 มิลลิเมตร จนถึง 45 มิลลิเมตร และบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้า ข้าอกเป็นค่าติดต่อ 12 บิต และตำแหน่งของก้านจับแม่เหล็กทราบลงใน MATLAB
5. วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล โดยนำข้อมูลมาคำนวนหาแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการเลื่อนไปยังตำแหน่งนั้น ๆ จากนั้นทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Voltage (V) กับ Position (mm) สำหรับการจัดแต่ละการทดลอง กราฟแสดงความสัมพันธ์ในการคำนวนค่าของ Magnetic Flux Density (mT) กับ Voltage (V) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Magnetic Flux Density (mT) กับ Position (mm) รวมถึงเพล็อตค่า Error Bar จากข้อมูล 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) สำหรับช่วงระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์
6. นำมาข้อมูลทั้งหมดจากทุกขั้นตอนมาจัดทำลงรายงาน

3.10. ผลการทดลอง

3.10.1. กราฟแสดงสัญญาณ Output ปรับแต่งตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

กราฟจาก Data Inspector แสดงสัญญาณ Output ปรับแต่งตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal และ Magnetic Flux Density ในหน่วย SI derived



รูปที่ 105 สัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

3.10.2. ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลอง

สามารถplot ตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบ คือ แม่เหล็กข้าวให้ที่ไม่ใส่ Magnetic Shield, แม่เหล็กข้าวเหนียวที่ไม่ใส่ Magnetic Shield, แม่เหล็กข้าวให้ที่ใส่ Magnetic Shield และแม่เหล็กข้าวเหนียวที่ใส่ Magnetic Shield และจากการใช้สมการการคำนวณตามความสัมพันธ์ $V_{out} = V_Q + B \times (Sensitivity_{(25^{\circ}\text{C})} \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25^{\circ}\text{C})))$

ตารางที่ 6 ข้อมูลตำแหน่ง แรงดันเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เก็บได้จากการทดลองที่แม่เหล็กข้าวให้หันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และไม่ใส่ Magnetic Shield

ตำแหน่งความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mT)
9	3.27	0.0016	0.0541
12	3.27	0.0014	0.0541
15	3.27	0.0014	0.0541
18	2.90	0.0068	0.0417
21	2.35	0.0098	0.0233
24	2.07	0.0093	0.0140
27	1.93	0.0094	0.0094
30	1.85	0.0085	0.0068
33	1.80	0.0085	0.0051

36	1.77	0.0083	0.0040
39	1.75	0.0085	0.0033
42	1.73	0.0083	0.0028
45	1.72	0.0085	0.0023

ตารางที่ 7 ข้อมูลตัวแหน่ง แรงดันเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เก็บได้จากการทดลองที่แม่เหล็กขั้วเหนือหันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และไม่ใส่ Magnetic Shield

ตำแหน่งความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ แรงดันไฟฟ้า	ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็ก (mT)
9	0.06	0.0017	-0.0529
12	0.07	0.0017	-0.0528
15	0.08	0.0017	-0.0525
18	0.41	0.0042	-0.0413
21	1.02	0.0050	-0.0211
24	1.30	0.0049	-0.0116
27	1.45	0.0049	-0.0068
30	1.53	0.0050	-0.0039
33	1.58	0.0052	-0.0022
36	1.61	0.0054	-0.0012
39	1.63	0.0052	-0.0006
42	1.64	0.0101	-0.0002
45	1.65	0.0109	0.0000

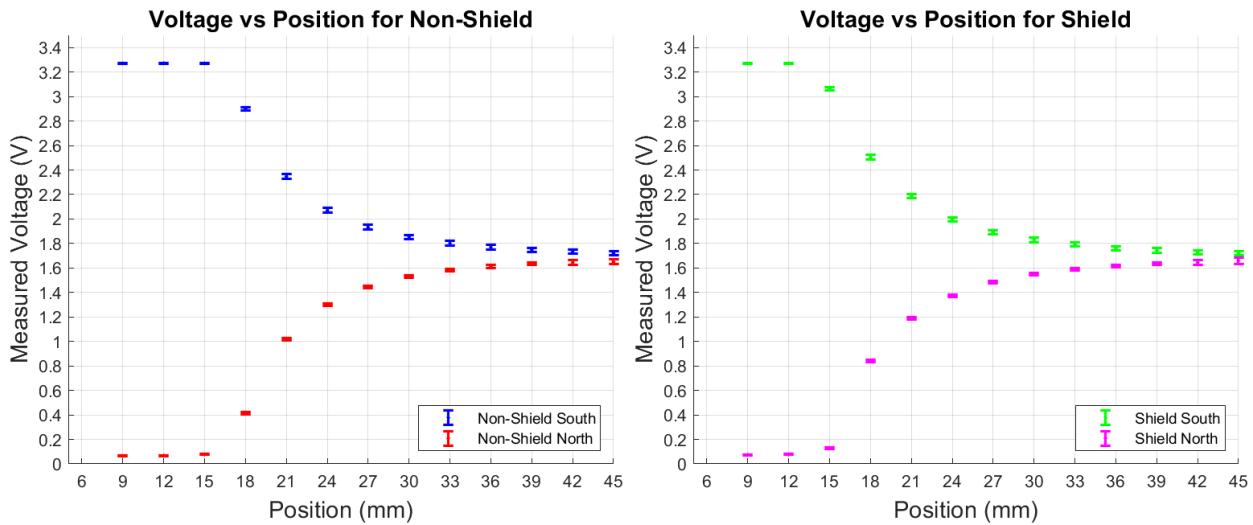
ตารางที่ 8 ข้อมูลตัวแหน่ง แรงดันเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เก็บได้จากการทดลองที่แม่เหล็กขั้วใต้หันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และใส่ Magnetic Shield

ตำแหน่งความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ แรงดันไฟฟ้า	ความหนาแน่นฟลักซ์ แม่เหล็ก (mT)
9	3.27	0.0015	0.0541
12	3.27	0.0015	0.0541
15	3.06	0.0069	0.0471
18	2.50	0.0101	0.0285
21	2.19	0.0093	0.0179
24	2.00	0.0088	0.0116
27	1.89	0.0082	0.0081
30	1.83	0.0089	0.0060

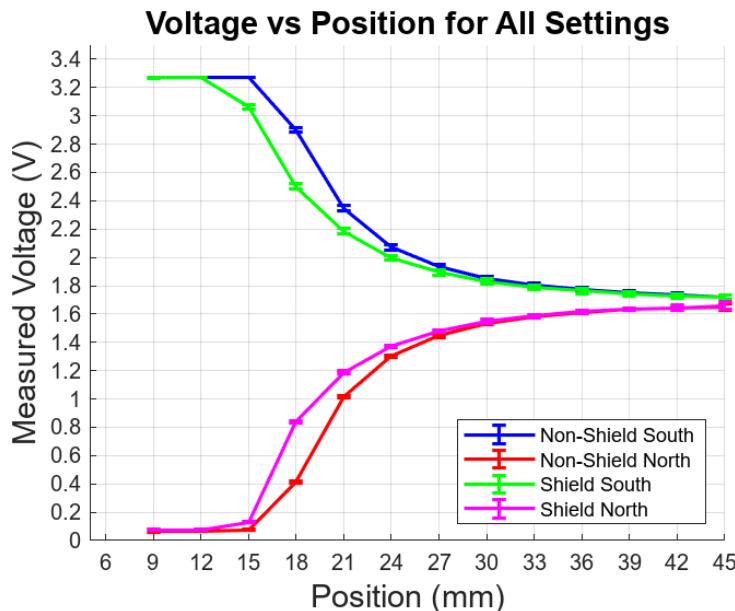
33	1.79	0.0083	0.0047
36	1.76	0.0081	0.0038
39	1.74	0.0086	0.0031
42	1.73	0.0081	0.0026
45	1.72	0.0080	0.0023

ตารางที่ 9 ข้อมูลตำแหน่ง แรงดันเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เก็บได้จากการทดลองที่แม่เหล็กขั้วเหนือหันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor และใส่ Magnetic Shield

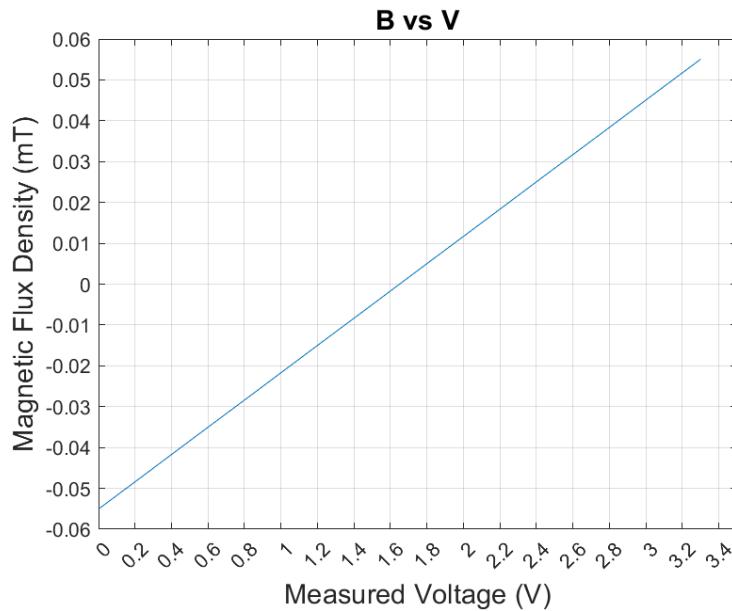
ตำแหน่งความสูง (มิลลิเมตร)	แรงดันไฟฟ้า (V)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (mT)
9	0.07	0.0017	-0.0526
12	0.08	0.0016	-0.0525
15	0.13	0.0020	-0.0508
18	0.84	0.0049	-0.0270
21	1.19	0.0049	-0.0154
24	1.37	0.0048	-0.0093
27	1.48	0.0048	-0.0056
30	1.55	0.0060	-0.0034
33	1.59	0.0052	-0.0021
36	1.62	0.0050	-0.0012
39	1.64	0.0051	-0.0005
42	1.64	0.0105	-0.0002
45	1.66	0.0129	0.0003



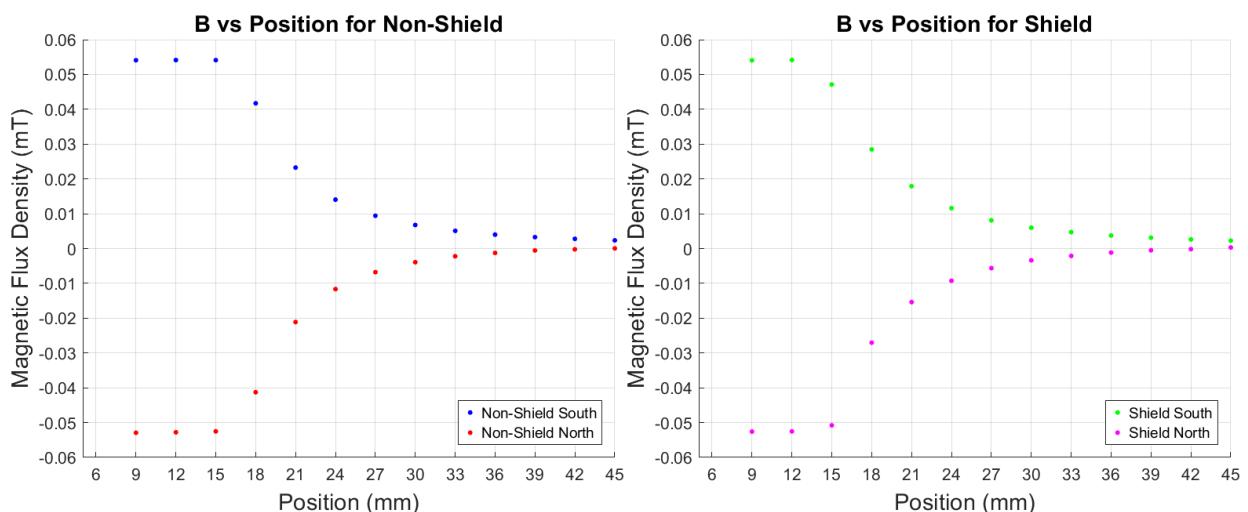
รูปที่ 106 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่า Voltage (V) และ Position (mm) ของแม่เหล็กขั้วเหนือและใต้หันเข้าหากัน Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ Magnetic Shield (Error Bar ครอบคลุมช่วง 2SD สำหรับระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)



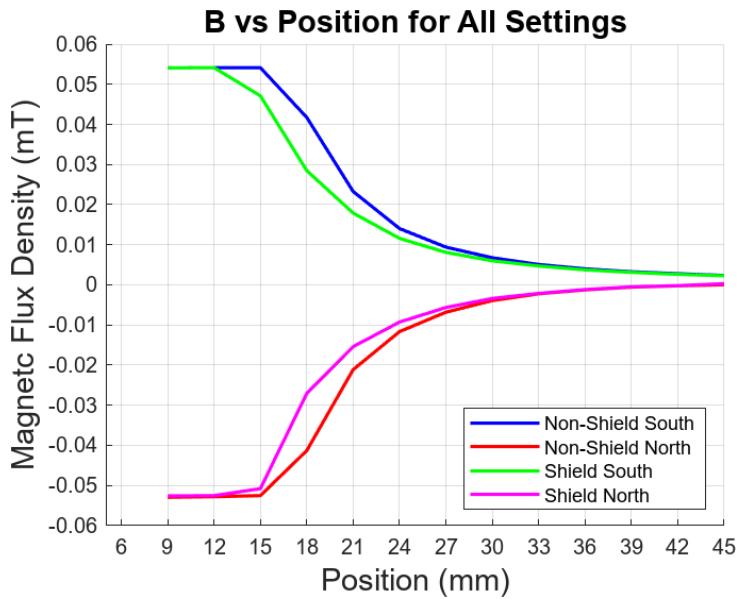
รูปที่ 107 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ Voltage (V) และ Position (mm) ของแม่เหล็กขั้วเหนือและใต้หันเข้าหากัน Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ Magnetic Shield (Error Bar ครอบคลุมช่วง 2SD สำหรับระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 108 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Magnetic Flux Density (mT) และ Voltage (V) ที่อ่านของแม่เหล็กข้าวเหนียวและใต้หันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor



รูปที่ 109 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่า Magnetic Flux Density (mT) และ Position (mm) ของแม่เหล็กข้าวเหนียวและใต้หันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทั้งใส่และไม่ใส่ Magnetic Shield



รูปที่ 110 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่า Magnetic Flux Density (mT) และ Position (mm) ของแม่เหล็กขั่วเหนือและได้หันเข้าหา Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ทั้งไม่ได้และได้มีไฟ Magnetic Shield

3.11. สรุปผล

3.11.1 จากการทดลองจะพบว่าเมื่อหันข้าวตัวของแม่เหล็กเข้าหาเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์จะอ่านค่า Magnetic Flux Density เป็นบวก และจะให้ค่าแรงดันข้าออกมากกว่า 1.65 V ในขณะที่การหันข้าวแม่เหล็กขั่วเหนือเข้าหาเซ็นเซอร์ จะทำให้เซ็นเซอร์อ่านค่า Magnetic Flux Density เป็นลบ และให้ค่าแรงดันข้าออกน้อยกว่า 1.65 ซึ่งจะพบว่า กราฟที่ได้จากการทดลองจะมีคุณสมบัติการตอบสนองต่อทิศทางเส้นฟลักซ์แม่เหล็กของเซ็นเซอร์แม่เหล็กชนิดรุ่น DRV5055A2 คล้ายตาม Datasheet

3.11.2 จากการทดลองพบว่าเมื่อหันข้าวตัวของแม่เหล็กเข้าหาเซ็นเซอร์ และเมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับ เซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Magnetic Flux Density ที่เซ็นเซอร์วัดได้จะลดลง ในขณะที่การหันข้าวแม่เหล็กข้า เหนือเข้าหาเซ็นเซอร์ และเมื่อระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า Magnetic Flux Density ที่เซ็นเซอร์วัดได้จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กแปรส่วนทางตามระยะทางจากแม่เหล็ก

3.11.3 จากการทดลองพบว่า ไม่ว่าจะหันข้าวตัวหรือข้าวเหนือของแม่เหล็กเข้าหาเซ็นเซอร์ การใส่แผ่น Magnetic Shield จะทำให้สนามแม่เหล็กบางส่วนถูกวัสดุภายในตัว Magnetic Shield ปิดกั้น จึงทำให้เซ็นเซอร์แม่เหล็กอ่าน ขนาดของ Magnetic Flux Density ได้ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีไม่ใส่แผ่น Magnetic Shield ซึ่งหมายความว่า เส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกมาในบริเวณโดยรอบมีความหนาแน่นลดลง

3.12. อภิปรายผล

จากการทดลองแปรค่าระยะห่างระหว่างแม่เหล็กตัวเซ็นเซอร์แม่เหล็กเพื่อให้ค่า Magnetic Density แปรตามไป ในแต่ละการจัดชุดการทดลอง สามารถวิเคราะห์ลักษณะของค่า Magnetic Flux Density ได้ว่า ที่ระยะใกล้กับตัวเซ็นเซอร์มาก เช่น ที่ระยะความสูง 9 – 15 มิลลิเมตรในกราฟ ขนาดของค่า Magnetic Flux

Density มีค่ามากและน่าจะเกินกว่าระดับที่เชื่อมชอร์สามารถอ่านได้ จึงได้ค่าที่สุดขีดเป็นประมาณ 0.055 mT และ -0.055 mT สำหรับการหันข้าวตี้เข้าและการหันข้าวหนีเข้าตามลำดับ ในขณะที่เมื่อสนใจระยะความสูงตั้งแต่ 15 มิลลิเมตรขึ้นไป จะเห็นว่าขนาดของค่า Magnetic Flux Density แปรลดลงเป็นเส้นโค้ง น่าจะใกล้เคียงกับการประผันแบบกำลังสองผันซึ่งขนาดของ Flux Density มีค่ามากในช่วงแรก ๆ แต่ลดลงอย่างรวดเร็ว และถูกเข้าใกล้ค่าศูนย์ในระยะทางที่ห่างออกไป โดยเครื่องหมายเป็นบวกหรือลบแสดงทิศทางของเส้นฟลักซ์ที่พุ่งผ่านตัวเซนเซอร์ในทิศขึ้นหรือลงตามลำดับ

นั่นคือเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่พุ่งออกจากแม่เหล็กถาวรรูปร่างทรงกรอบแบบน่าจะมีลักษณะเป็นเส้นพุ่งกระจายไปในปริภูมิบริเวณโดยรอบจากข้าวหนีไปยังข้าวตี้ของแม่เหล็กถาวร สามารถนิยามในภาพได้ว่า แม่หากเส้นฟลักซ์กระจายตัวเป็นเส้นตรงพุ่งออกจากจุดจุดหนึ่งอย่างสม่ำเสมอ เส้นฟลักซ์จำนวนหนึ่งจะขยายไปครอบคลุมพื้นที่กว้างขึ้นในตำแหน่งระยะห่างที่มากขึ้น เพราะพื้นที่ตั้งจากกับระยะทางนั้นจะเพิ่มขึ้นแบบกำลังสอง ทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับความหนาแน่นเส้นฟลักซ์ลดลงแบบกำลังสองผัน อย่างไรก็ตาม สำหรับแม่เหล็กถาวรที่ใช้ทดลองจริงให้เส้นฟลักซ์กระจายเป็นลักษณะโค้งไปในปริภูมิ ซึ่งอาจประมาณเป็นเส้นตรงเพียงบางบริเวณที่ใกล้ข้าวแม่เหล็กเท่านั้น โดยรวมจึงทำให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ลดลงตามระยะใกล้เคียงหรือเร็วกว่าการแบบกำลังสองผัน มีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อแม่เหล็กห่างออกไปมาก ๆ ดังผลการทดลอง

สำหรับการใส่ Magnetic Shield เป็นแผ่นโลหะบางติดไว้ที่ตัวแม่เหล็กถาวร มีผลทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นถูกปิดกันไปประมาณหนึ่งภายในเนื้อวัสดุของ Shield นั้น และทำให้เส้นฟลักซ์แม่เหล็กอาจมีรูปร่างการกระจายตัวเปลี่ยนไป ขึ้นกับสภาพซึ่งผ่านของสนามแม่เหล็กในเนื้อวัสดุนั้นที่ดังสนามให้หันเหลือดี จึงทำให้ที่แต่ละตำแหน่งความสูงเดิม สามารถวัดขนาดของค่า Magnetic Flux Density ได้อยกว่าการวัดโดยไม่ใส่ Shield แม้จะมีแนวโน้มคล้ายกัน ดังกราฟผลการทดลอง

3.13. ข้อเสนอแนะ

1. 3D-Print ของชิ้นส่วนก้านจับแม่เหล็กถาวรโดยแยก ควรจะออกแบบโครงสร้างให้มั่นคง
2. ควรกับหนดสเกลระยะห่างที่บอกร่องระยะห่างจากตัวเซนเซอร์ถึงข้าวแม่เหล็ก

3.14. เอกสารอ้างอิง

1. https://il.mahidol.ac.th/e-media/electromagnetism/sub_lesson/8_2.htm
2. <https://ejournals.swu.ac.th/index.php/SWUJournal/article/download/858/887/2722>
3. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dr5055.pdf?ts=1730310833814&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

4. Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

4.1. จุดประสงค์

4.1.1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Load cell, วงจร Wheatstone bridge, Strain Gauge, 2 Op-amps Differential Amplifier

4.1.2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าสัญญาณ Output Voltage ที่อ่านได้จาก Load Cell กับแรงที่กระทำต่อ Load Cell ที่เปลี่ยนแปลงไป

4.1.3. เพื่อศึกษาการปรับค่าความต้านทานของ Single External Resistor ในการปรับค่า Gain ขยายสัญญาณจาก Load Cell

4.1.4. เพื่อศึกษาระบวนการ Signal Conditioning และความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อ Load Cell แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจาก Load Cell ทั้งแบบที่ยังไม่ผ่าน INA125 และผ่าน INA125

4.1.5. เพื่อศึกษาการใช้ Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้ MATLAB Simulink

4.2. สมมติฐาน

4.2.1. แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ควรแปรผันตามน้ำหนักของมวลที่วางบน Load Cell ในลักษณะเชิงเส้นหรือใกล้เคียงกับความเป็นเชิงเส้น

4.2.2. การปรับค่า R_G สำหรับ Single External Resistor ตามที่คำนวณ จะทำให้ INA 125 Amplifier สามารถขยายสัญญาณจาก Load Cell ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการวัด

4.3. ตัวแปร

ตัวแปรต้น มวลที่วางให้เกิดน้ำหนักบน Load Cell แปรค่าตั้งแต่ 0 กิโลกรัม ไปจนถึง 10 กิโลกรัม โดยเว้นค่าทุก ๆ 0.5 กิโลกรัม, การอ่านโดยผ่านหรือไม่ผ่าน INA125 Amplifier

ตัวแปรตาม แรงดันไฟฟ้าขาออกที่วัดได้จาก Microcontroller จากการวางแต่ละน้ำหนักมวล

ตัวแปรควบคุม แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ที่จ่ายเลี้ยงให้ Load Cell และ INA125 Amplifier, ระยะเวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างข้อมูลสำหรับแต่ละน้ำหนักมวล เป็น 2 วินาที, ขนาดตัวอย่างของข้อมูลแต่ละน้ำหนักมวลเป็น 201 หน่วย, ค่า R_G ที่ปรับให้ตัวต้านทางปรับค่าได้ Single External Resistor สำหรับอัตราการขยาย, บอร์ดควบคุม Nucleo STM32G474RE ที่ใช้เก็บข้อมูล, อุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง

4.4. นิยามศัพท์เฉพาะ

1. น้ำหนักของมวลในการทดลองนี้ หมายถึง แรงที่มวลนั้น ๆ ถูกสนำมโน้มถ่วงโลกดึงดูด ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงที่มวลนั้นจะกระทำต่อ Load Cell สามารถระบุโดยค่าของมวลในหน่วยกิโลกรัม ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนักตามการคูณค่าคงที่สนำมโน้มถ่วงโลก $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

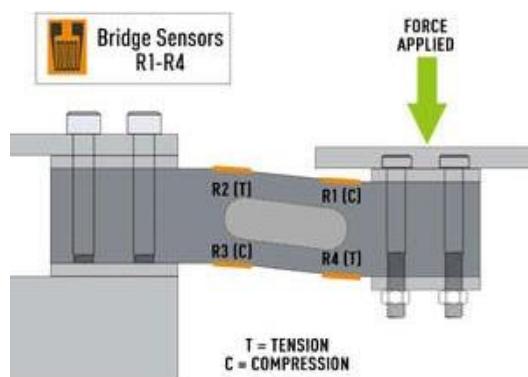
- Load Cell ในการทดลองนี้ หมายถึง Single Point Load Cell YZC-131A ซึ่งใช้ร่วมกับ INA125 Instrumentation Amplifier เพื่อขยายสัญญาณให้มีความละเอียดเหมาะสมแก่การวัด
- Microcontroller หรือบอร์ดควบคุม ในการทดลองนี้ หมายถึงบอร์ด Microcontroller รุ่น Nucleo STM32G474RE

4.5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

- การวางแผน Load Cell หมายถึง การวางแผนที่มีผลตามที่กำหนดค่านั้นลงบนฐานว่างรับน้ำหนักที่ติดอยู่กับ Load Cell จากชุดทดลอง LoadCellXplorer เพื่อให้เกิดน้ำหนักที่รู้ค่ากระทำลงที่จุดวัดแรงของ Load Cell

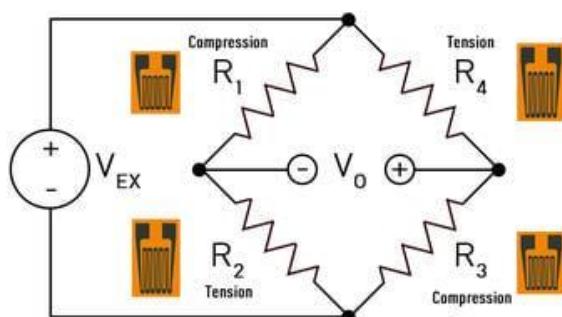
4.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.6.1 การทำงานของ Strain Gauge และ Load Cell



รูปที่ 111 การทำงานของ Load Cell ซึ่งมี Strain Gauge ที่ความต้านทานแปรค่าตามแรงที่กระทำ

Load Cell เป็น transducer ที่ใช้ในการวัดแรงในงานอุตสาหกรรม โดยแปลงพลังงานกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า Load Cell ประเภท Strain Gauge เป็นประเภทที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีความแม่นยำและประหยัดต้นทุน Load Cell ชนิดนี้ทำงานโดยการติดตั้ง Strain Gauge เข้ากับตัวโครงสร้าง ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปเล็กน้อยเมื่อมีแรงกระทำ Strain Gauge จะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดึง (tension) หรือแรงกด (compression) ทำให้สามารถแปลงค่าเหล่านี้เป็นข้อมูลแรงที่วัดได้



รูปที่ 112 วงจร Wheatstone Bridge

ใน Load Cell จะมี Strain Gauge ถูกจัดเรียงในรูปแบบของวงจร Wheatstone Bridge ประกอบด้วยตัวต้านทานสี่ตัว และมีแรงดันกระตุ้น (V_{EX}) เป็นไฟเลี้ยงวงจร เมื่อไม่มีแรงกระทำ วงจรจะอยู่ในสภาวะสมดุล ทำให้แรงดันเอาร์พุต (V_O) เท่ากับศูนย์ เมื่อมีแรงกระทำ ค่าความต้านทานของ Strain Gauge จะเปลี่ยนไป ทำให้วงจรไม่สมดุลและเกิดแรงดันเอาร์พุต (V_O) ซึ่งขึ้นกับแรงที่กระทำ โดยสามารถคำนวณแรงดันเอาร์พุตตามการแบ่งค่ากันได้จากสมการ

$$V_O = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \times V_{EX}$$

ความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถวัดแรงได้อย่างแม่นยำโดยการติดตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาร์พุตที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเมื่อมีแรงกระทำ

4.6.2 Datasheet ของ Single Point Load Cell YZC-131A

Calibration

A simple formula is usually used to convert the measured mv/V output from the load cell to the measured force:

$$\text{Measured Force} = A * \text{Measured mv/V} + B \text{ (offset)}$$

It's important to decide what unit your measured force is - grams, kilograms, pounds, etc.

This load cell has a rated output of $1.0 \pm 0.15 \text{ mv/v}$ which corresponds to the sensor's capacity of 5kg.

To find A we use

$$\text{Capacity} = A * \text{Rated Output}$$

$$A = \text{Capacity} / \text{Rated Output}$$

$$A = 5 / 1.0$$

$$A = 5$$

Since the Offset is quite variable between individual load cells, it's necessary to calculate the offset for each sensor. Measure the output of the load cell with no force on it and note the mv/V output measured by the PhidgetBridge.

$$\text{Offset} = 0 - 5 * \text{Measured Output}$$

YZC-131A Series Product Specifications	
Mechanical	
Housing Material	Aluminum Alloy
Load Cell Type	Strain Gauge
Capacity	1/2/3/5 kg
Dimensions	Lx12.7x12.7 mm
Mounting Holes	M5 (Screw Size)
Cable Length	210 mm
Cable Size	30 AWG (0.2mm)
Cable - no. of leads	4
Electrical	
Precision	0.05%
Rated Output	$1.0 \pm 0.15 \text{ mv/V}$
Non-Linearity	0.05% FS
Hysteresis	0.03% FS
Non-Repeatability	0.03% FS
Creep (per 5 minutes)	0.1% FS
Temperature Effect on Zero (per 10°C)	0.02% FS
Temperature Effect on Span (per 10°C)	0.05% FS Zero
Balance	$\pm 1.5\%$ FS
Input Impedance	$1000 \pm 50 \text{ Ohm}$
Output Impedance	$1000 \pm 50 \text{ Ohm}$
Insulation Resistance (Under 50VDC)	$\geq 2000 \text{ M}\Omega$
Excitation Voltage	5 VDC
Compensated Temperature Range	-10 to $\sim +40^\circ\text{C}$
Operating Temperature Range	-21 to $\sim +40^\circ\text{C}$
Safe Overload	120% Capacity
Ultimate Overload	150% Capacity

รูปที่ 113 Datasheet ของ Single Point Load Cell YZC-131A

Safe Overload

The maximum axial load which can be applied without producing a permanent shift in performance characteristics beyond those specified.

Compensated Temperature

The range of temperature over which the load cell is compensated to maintain output and zero balance within specified limits.

Temperature Effect on Span

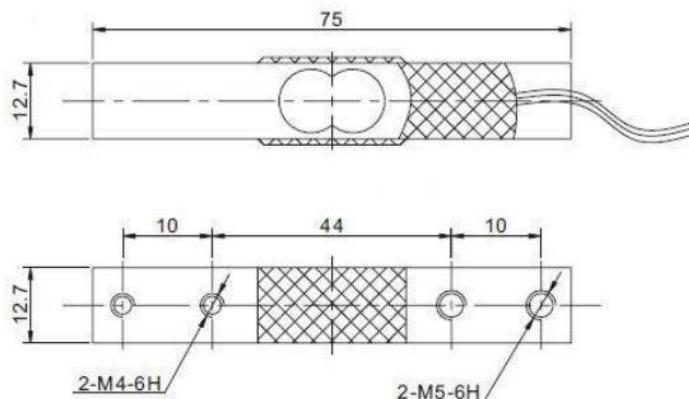
Span is also called rated output. This value is the change in output due to a change in ambient temperature. It is measured over 10 degree C temperature interval.

Temperature Effect on Zero

The change in zero balance due to a change in ambient temperature. This value is measured over 10 degree C temperature interval.

Zero Balance

Zero Balance defines the maximum difference between the +/- output wires when no load is applied. Realistically, each sensor will be individually calibrated, at least for the output when no load is applied. Zero Balance is more of a concern if the load cell is being interfaced to an amplification circuit - the PhidgetBridge can easily handle enormous differences between +/- . If the difference is very large, the PhidgetBridge will not be able to use the higher Gain settings.

Dimensions

ຈົບໜີ 114 Datasheet ຂອງ Single Point Load Cell YZC-131A

4.6.3 Datasheet ວິທີ INA125

APPLICATION INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA125. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the instrumentation amplifier reference (IA_{REF}) terminal which is normally grounded. This must be a low impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 12Ω in series with the IA_{REF} pin will cause a typical device to degrade to approximately 80dB CMR ($G = 4$).

Connecting V_{REF}^{OUT} (pin 4) to one of the four available reference voltage pins (pins V_{REF}^{BG} , $V_{REF}^{2.5}$, V_{REF}^5 , or V_{REF}^{10}) provides an accurate voltage source for bridge applications.

For example, in Figure 1 V_{REF}^{OUT} is connected to V_{REF}^{10} thus supplying 10V to the bridge. It is recommended that V_{REF}^{OUT} be connected to one of the reference voltage pins even when the reference is not being utilized to avoid saturating the reference amplifier. Driving the $SLEEP$ pin LOW puts the INA125 in a shutdown mode.

SETTING THE GAIN

Gain of the INA125 is set by connecting a single external resistor, R_G , between pins 8 and 9:

$$G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_G} \quad (1)$$

Commonly used gains and R_G resistor values are shown in Figure 1.

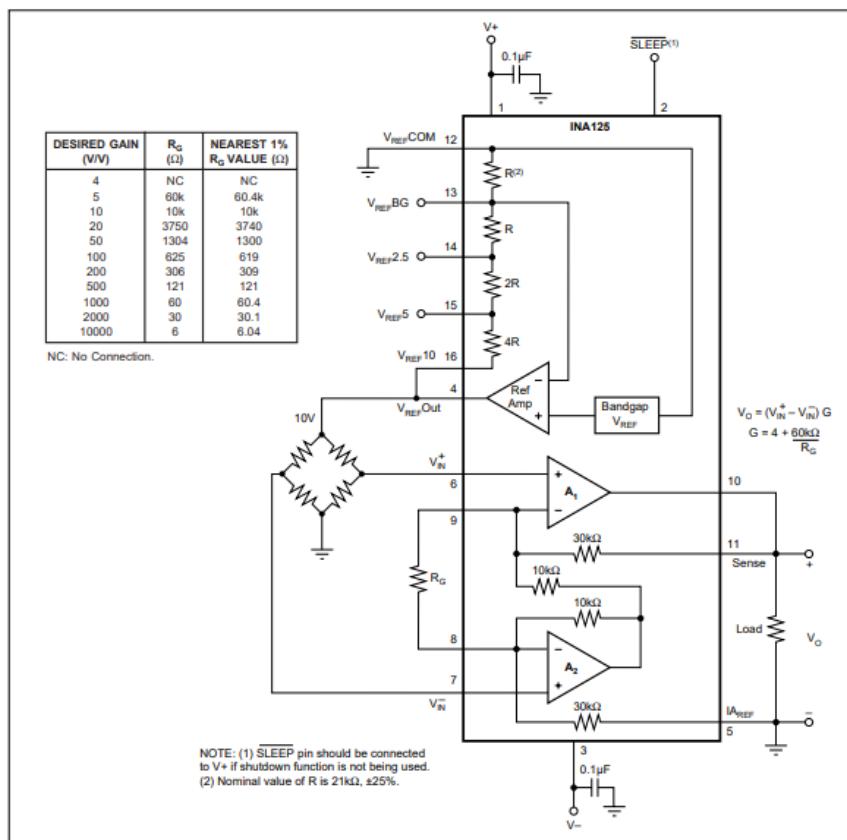


FIGURE 1. Basic Connections.

BURR-BROWN®
INA125

4.7. วิธีดำเนินการทดลอง

1. ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 4.3.
2. เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และจัดเตรียมวงจรการทดลอง โดยเชื่อมสายจาก Single Point Load Cell เข้าบอร์ด LoadCellXplorer และต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Out จาก INA125 และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้ INA125
3. ทำการคำนวณหาค่า R_g เพื่อปรับค่าความต้านทาน R5 บนบอร์ด สำหรับขยายแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จาก Strain Gate
4. ออกแบบและสร้าง Blocks ด้วยโปรแกรม Simulink สำหรับเขียนต่อ กับ Microcontroller เพื่อเก็บค่าการทดลอง
5. ทำการทดลองกับ Single Point Load Cell โดยนำของที่มีน้ำหนักทุก ๆ 0.5 กิโลกรัม มาวางบน Single Point Load Cell จนถึง 10 กิโลกรัม และบันทึกข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าข้าออกเป็นค่าดิจิตอล 12 บิต และน้ำหนักที่นำมาซึ่งใน MATLAB
6. วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล โดยนำข้อมูลมาแปลงหน่วย และคำนวณหาระดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากการซั่งน้ำหนัก จากนั้นทำการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง รวมถึงพล็อตค่า Error Bar จากข้อมูลค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน
7. นำมาข้อมูลทั้งหมดจากทุกขั้นตอนมาจัดทำลงรายงาน

4.8. วัสดุอุปกรณ์

1. Single Point Load Cell YZC-131A 1 อัน
2. INA125 Instrumentation Amplifier จำนวน 1 อัน
3. Trimpot 100 K 25 Turns จำนวน 1 อัน
4. Resistor 4.7K Ohm จำนวน 1 อัน
5. Nucleo STM32G474RE 1 ชุด
6. สายอัปโหลด USB 1 สาย
7. LoadCellXplorer 1 ชุด
8. สายจัมเปอร์ จำนวนหนึ่ง
9. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
10. ชุดน้ำที่ตวงน้ำร่วมน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม 1 กิโลกรัม และ 1.5 กิโลกรัม จำนวนหนึ่ง
11. ตะกร้าสำหรับเป็นภาชนะวางมวลน้ำหนัก

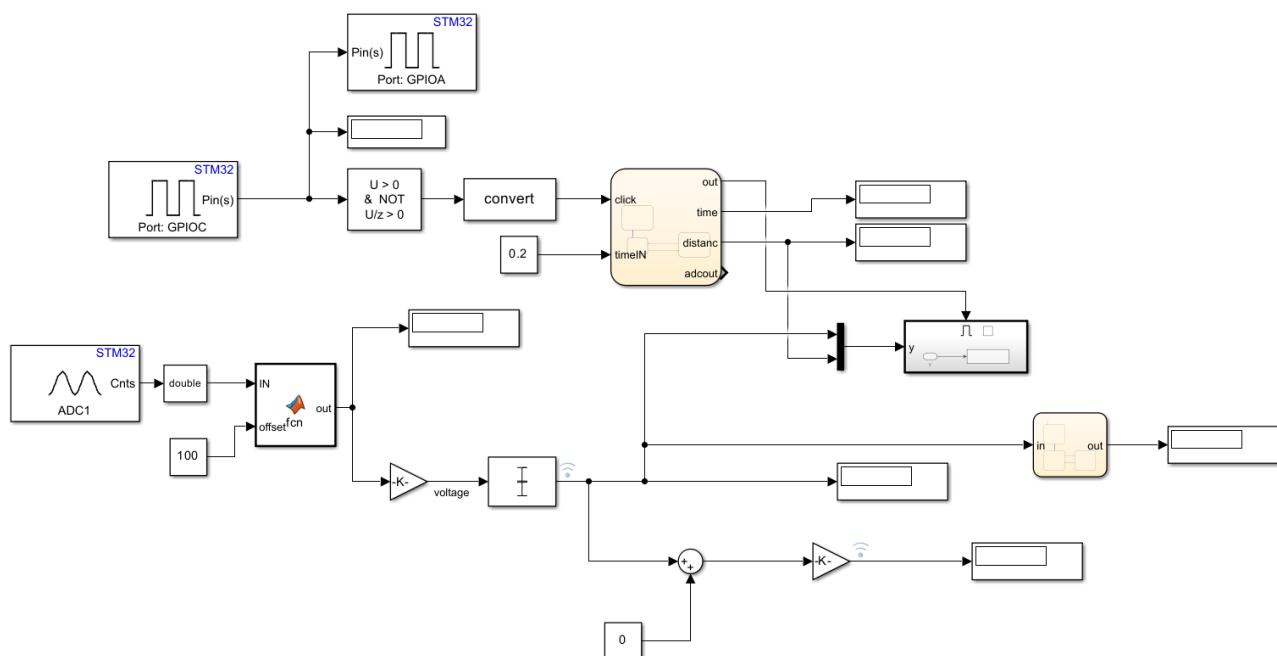
4.9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 Calibrate Sensor

- ที่มวล 10 กิโลกรัม กำหนดให้มี V_o เท่ากับ 2.5 V และเมื่อทำการวัด V_{in}^+ เทียบ V_{in}^- มีค่าเท่ากับ 4.3 mV จากนั้นนำเข้าสูตร $V_o = (V_{in}^+ - V_{in}^-)G$ จาก Datasheet จะได้ค่า G (Gain) เท่ากับ 581.4 เท่า
- นำค่า G (Gain) ที่ได้แทนลงในสมการ $G = 4 + \frac{60k\Omega}{R_g}$ จาก Datasheet เพื่อหาค่า R_g ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 104 Ω และทำการปรับค่าความต้านทาน R5 บนบอร์ด LoadCellXplorer ตามค่าที่คำนวณมา เพื่อขยายสัญญาณที่ได้รับจาก Strain Gauge ของ Load Cell ด้วยค่า Gain ที่ต้องการ

ตอนที่ 2 การออกแบบโปรแกรม Simulink และเตรียมการเก็บข้อมูล

- ออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลการทดลอง โดยกำหนดตัวแปรตามหัวข้อที่ 4.3.
- เขียน Block diagram บนโปรแกรม Simulink เพื่อออกแบบโปรแกรมเชื่อมต่อ Microcontroller ให้เก็บตัวอย่างข้อมูลจาก Load Cell ตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ



รูปที่ 116 Block diagram ใน Simulink Models ที่เก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ

```

1   function out = fcn(IN,offset)
2
3     if (IN - offset) <0
4       out = 0;
5     else
6       out = IN - offset;
7     end

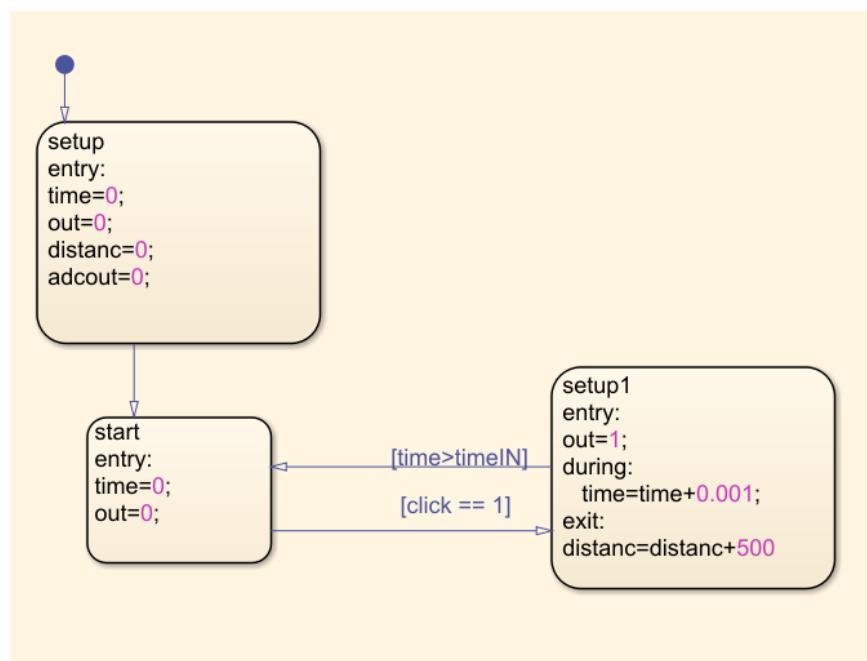
```

รูปที่ 117 ข้างใน MATLAB Function ใน Simulink Models สำหรับใช้คำนวณ

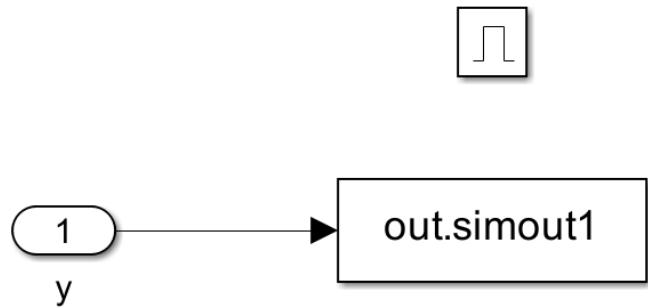
จากการจะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการใช้ Block ชื่อ Digital Port Read ที่มีการตั้งค่าเป็น Port GPIOC พินที่ 13 เพื่อทำการอ่านค่าสัญญาณที่อุปกรณามีการกดที่ปุ่มนี้หรือไม่ จากนั้น

เข้าไปยัง Block ชื่อ Detect Rise Positive เพื่อป้องกันการกดปุ่มซ้ำซ้อน (Debouncing) และตรวจสอบการกดปุ่มครั้งใหม่ และ Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลของสัญญาณที่ได้มาตรงกับชนิดข้อมูลของ Block ต่อไป แล้วเข้า Block Chart ส่วน Block Constant ที่เข้าไปยัง Block Chart เป็น Block ที่กำหนดเวลาที่ต้องการเก็บค่าการทดลอง โดยในการทดลองนี้กำหนดให้มีการเก็บค่าการทดลองเป็นระยะเวลา 0.2 วินาที

ส่วนสองมีการใช้ Block หลัก ๆ เพื่อทำการเก็บค่าในการทดลองคือ Analog to Digital Converter เพื่ออ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากเป็นค่าสัญญาณดิจิตอลขนาด 12 บิตจาก ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo STM32G474RE เข้าสู่ Block ชื่อ Data Type Conversion เพื่อแปลงชนิดข้อมูลให้เป็น double และเข้าสู่ MATLAB Function พร้อมกับ Block Constant ที่กำหนดให้เป็นค่าบิตของน้ำหนักอะคริลิคและตะกร้า เพื่อคำนวนบิตของแรงที่วัดได้เมื่อหักค่าจาก Block Constant และนำค่าที่ออกมายไปคูณกับค่าใน Gain และเข้า Block Mean เพื่อคำนวนหาแรงดันเฉลี่ย จากนั้นแยกเข้าสู่ Block ชื่อ Mux เพื่อรวมกับค่า ข้อมูลระยะตำแหน่งของ distance ที่ออกมายจาก Block Chart ให้เป็นเวกเตอร์ขนาด 1×2 ที่มีค่าข้อมูลตำแหน่งกับสัญญาณดิจิตอล และเข้า Block Subsystem เพื่อบันทึกเพิ่มลง Workspace และแยกเข้าสู่ Block Sum เพื่อรวมกับค่าจาก Block Constant และเข้า Block Gain เพื่อคำนวนข้อมูลของมวลที่ทำนายจากการวัดแรงดันตามสมการ $y = 0.2531x + (-0.0252)$



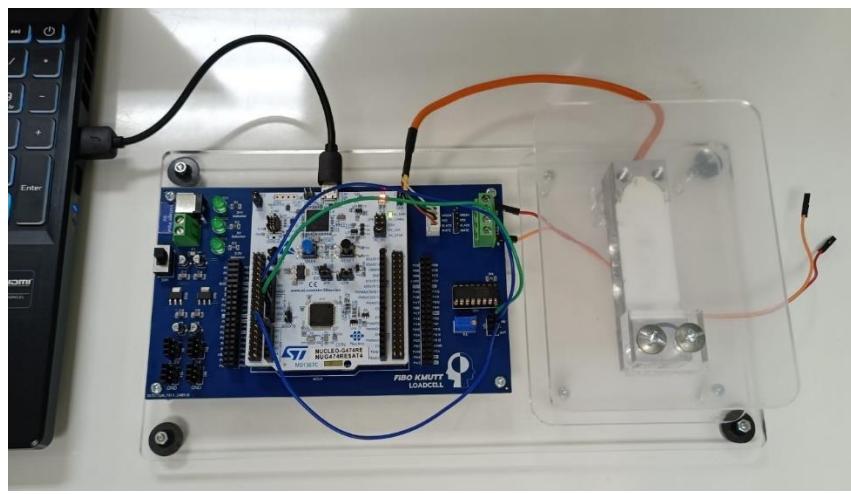
รูปที่ 118 ข้างใน Chart จาก Block diagram ที่มีการเขียน State flow เพื่อเก็บตัวอย่างข้อมูลตามจำนวนและช่วงเวลาที่ออกแบบ



รูปที่ 119 ข้างใน Subsystem จาก Block diagram ที่มีการใช้ block เพื่อส่งค่าจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลไปยัง Workspace ใน MATLAB

ตอนที่ 3 การดำเนินการเก็บข้อมูล

1. ต่อวงจรทดลองได้แก่ Microcontroller Nucleo STM32G474RE เช่นเชอร์ Load Cell และ INA125 Amplifier ลงบนบอร์ดชุดทดลอง และเชื่อมต่อสาย USB กับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่
2. ต่อพิน ADC1 หรือ PA0 ของ Microcontroller ไปที่สัญญาณ Output Voltage จาก LNA125 Amplifier และจ่ายไฟเลี้ยง 3.3 V ให้หัวจาก LNA125 Amplifier และ Load Cell รันโปรแกรม Simulink เพื่อเริ่มเก็บข้อมูลจาก Microcontroller
3. เตรียมมวลน้ำหนักขนาดต่าง ๆ ที่จะใช้ โดยใช้มวลที่รู้ค่า ได้แก่ ตวงน้ำในขวดน้ำให้ได้น้ำหนักตามที่ต้องการควบคุม เพื่อนำมารวมให้ได้ค่าน้ำหนักตามที่ต้องการ



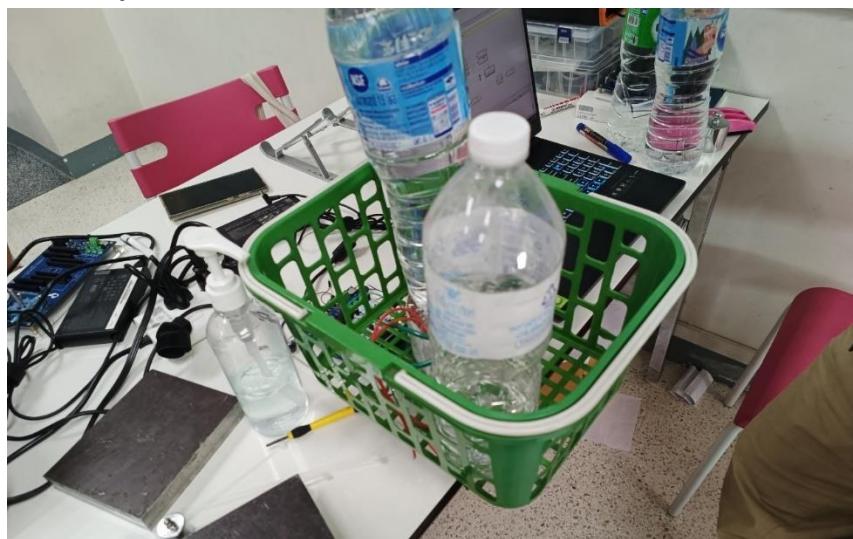
รูปที่ 120 บอร์ด LoadCellXplorer

4. วางแผนที่มีน้ำหนักรวมกันค่าต่าง ๆ โดยเริ่มมวลที่ 0 กิโลกรัม หรือกึ่งไม่มีมวลเลย โดยวางลงบนฐานวางน้ำหนักของตัว Load Cell ที่มากับชุดทดลอง เพื่อให้น้ำหนักกดลงบนวัสดุรับน้ำหนักของ Load Cell ให้ Strain Gauge ตรวจวัดได้

5. กดปุ่ม Push button ของบอร์ด เพื่อให้ Simulink ทำงานเก็บตัวอย่างสัญญาณอนาล็อกของค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ที่ตำแหน่งแม่เหล็กการนับ จำนวน 501 ค่า ในเวลา 5 วินาที ไว้ใน Workspace ของ MATLAB

6. แปรน้ำหนักมวลที่วาง โดยทำขั้นตอนที่ 3 – 4 แต่เปลี่ยนมวลในขั้นตอนที่ 3 จาก 0 กิโลกรัมเป็น 0.5 กิโลกรัม 1.0 กิโลกรัม 1.5 กิโลกรัม ไปเรื่อย ๆ จนถึง 10 กิโลกรัม โดยเว้นค่าทีละ 0.5 กิโลกรัม โดยหากมีการใช้ตะกร้าเป็นภาชนะระหว่างรับมวลด้วย ก็หักค่าซดเชยน้ำหนักมวลตะกร้าที่เพิ่มขึ้นมาด้วยค่า offset สำหรับสัญญาณใน Simulink

7. บันทึกข้อมูลที่เก็บได้ใน Workspace เพื่อนำไปพล็อตกราฟประมวลผล



รูปที่ 121 การนำขวดน้ำมาชั่งบน LoadCellXplorer

ตอนที่ 4 การประมวลผลข้อมูล

```
1 load('v2.mat'); % เก็บรอบที่ 2
2 rawData = out.simout1

3 Nround = 21;
4 Nsample = 201;

5 % Manipulate matrix
6 MassData = rawData(:, 2)
7 analogs = rawData(:, 1)
8 anaData = reshape(analogs, [Nsample, Nround]);

9 % to be used
10 anaData = cast(anaData, "double");
11 voltData = anaData .* 3.3 ./ 4096.0

12 meanVoltData = mean(voltData, 2)
13 stdVolt = std(voltData, 0, 2)

14 Mass = 0 : 0.5 : 10 % kg
15 g = 9.81
16 Force = Mass * g
```

รูปที่ 122 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟ

```
40 % Fitting
41 x = Mass;
42 y = meanVoltData;
43
44 % Get coefficients of a line fit through the data.
45 coefficients = polyfit(x, y, 1)
46 global c1;
47 global c2;
48 c1 = coefficients(1)
49 c2 = coefficients(2)
50
51 % Create a new x axis with exactly 1000 points (or whatever you want).
52 xFit = linspace(min(x), max(x), 1000);
53 % Get the estimated yFit value for each of those 1000 new x locations.
54 yFit = polyval(coefficients, xFit);
55 % Plot everything.
56 plot(x, y, 'b.', 'MarkerSize', 15); % Plot training data.
57 hold on; % Set hold on so the next plot does not blow away the one we just drew.
58 plot(xFit, yFit, 'r-', 'LineWidth', 2); % Plot fitted line.
59 grid on;
```

รูปที่ 123 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟ

```
60 % plot and fitting line
61 figure;
62 hold on;
63 graph_V = errorbar(Mass, meanVoltData, 2*stdVolt, ...
64 'or', 'LineWidth', 1.0, 'MarkerSize', 2, 'Color', 'b', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'b');
65 plot(xFit, yFit, 'r-', 'LineWidth', 0.8); % Plot fitted line.

66 % ตั้งแต่ง
67 xticks(0:1:10);
68 xticklabels(0:1:10);
69 yticks(0:0.2:3.4);
70 yticklabels(0:0.2:3.4);
71 grid on;
72 title('Voltage vs Exerted Force', 'FontSize', 14);
73 xlabel('Exerted Force (x 9.81 N)', 'FontSize', 14);
74 ylabel('Voltage (V)', 'FontSize', 14);
75 legend('Voltage', sprintf('y = %.4fx + %.4f', c1, c2), 'Location', 'southeast');
76 %datatip(graph_V);
77 coefficients
78 hold off;
```

รูปที่ 124 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟ

```

81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
% line equation
function v = mass2volt(kg)
    global c1;
    global c2;
    v = c1 * kg + c2;
end

function kg = volt2mass(v)
    global c1;
    global c2;
    kg = (v - c2) / c1;
end

```

รูปที่ 125 Matlab script สำหรับจัดการข้อมูลดิบที่บันทึกไว้ใน Workspace ให้เป็นชนิดข้อมูลที่ต้องการ และนำไปพล็อตกราฟ

1. จากข้อมูลดิบที่ได้ใน Workspace จะได้ข้อมูลสำหรับ 21 ตำแหน่งเลื่อน ตำแหน่งละ 201 หน่วย ข้อมูล ทั้งหมดเป็น 4221 หน่วยข้อมูล ในรูปแบบเตอร์ขนาด 4221×2 ในตัวแปรชื่อ rawData โดยแต่ละหน่วย ข้อมูลเป็นเวกเตอร์แทน [น้ำหนักของมวลที่นำมาซึ่ง; สัญญาณดิจิตอล]
2. จัดรูป่างข้อมูลด้วยการ reshape ตัวแปรเวกเตอร์ analogs ซึ่งตึงข้อมูลค่าสัญญาณดิจิตอลมาจาก rawData ให้เป็นชื่อ anaData
3. แปลงค่าสัญญาณดิจิตอล 12 บิต เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า ด้วยความสัมพันธ์ตามสมการ

$$Voltage = \frac{Analog\ Value}{4096} \times 3.3$$
 จากนั้นนำไปคำนวณหาแรงดันเฉลี่ย และเทียบกับแรงดันจากไฟเลี้ยง 3.3 V ให้เป็นร้อยละ เพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลจาก Datasheet และนำไปพล็อตเป็นกราฟ

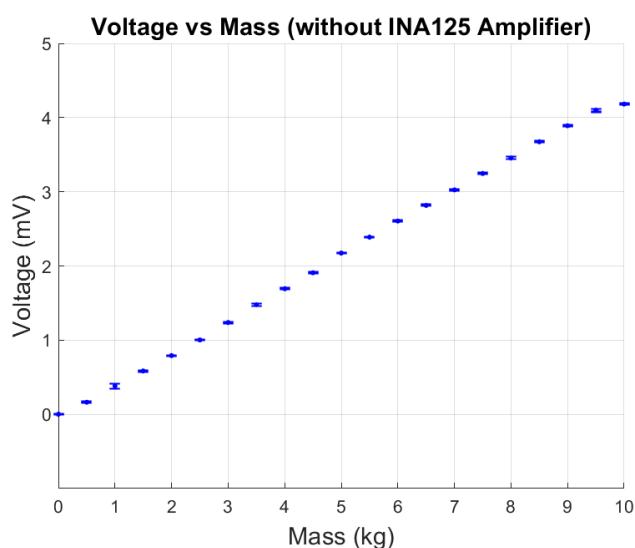
4.10. ผลการทดลอง

สามารถพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม ได้ดังต่อไปนี้

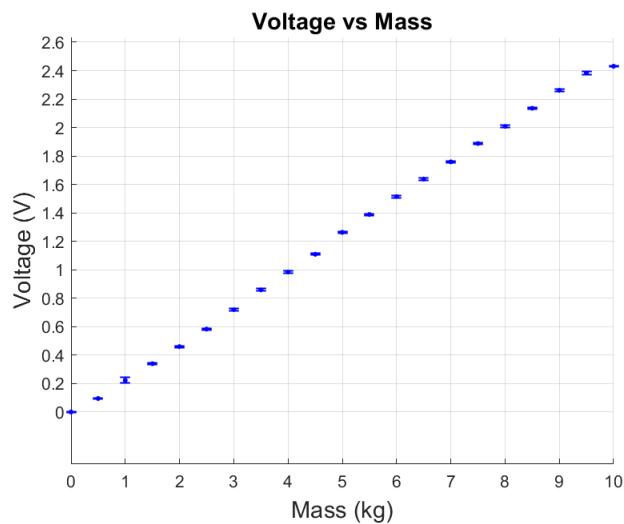
ตารางที่ 10 ข้อมูลมวลที่นำมาซึ่งจริง แรงดันไฟฟ้า มวลที่ทำนายจากการวัดแรงดัน ความคลาดเคลื่อนจากค่ามวลที่นำมาซึ่งจริง และค่า Root Mean Square Error

มวลที่นำมาซึ่งจริง (กิโลกรัม)	แรงดันไฟฟ้า (V)	มวลที่ทำนายจาก การวัดแรงดัน (กิโลกรัม)	ความคลาดเคลื่อนจากค่ามวลที่นำมา ซึ่งจริง (กิโลกรัม)
0.0	0.000	0.101	0.101
0.5	0.095	0.475	-0.025
1.0	0.223	0.979	-0.021
1.5	0.340	1.442	-0.058
2.0	0.460	1.917	-0.083
2.5	0.583	2.403	-0.097
3.0	0.720	2.944	-0.056
3.5	0.859	3.494	-0.006
4.0	0.984	3.989	-0.011
4.5	1.109	4.483	-0.018

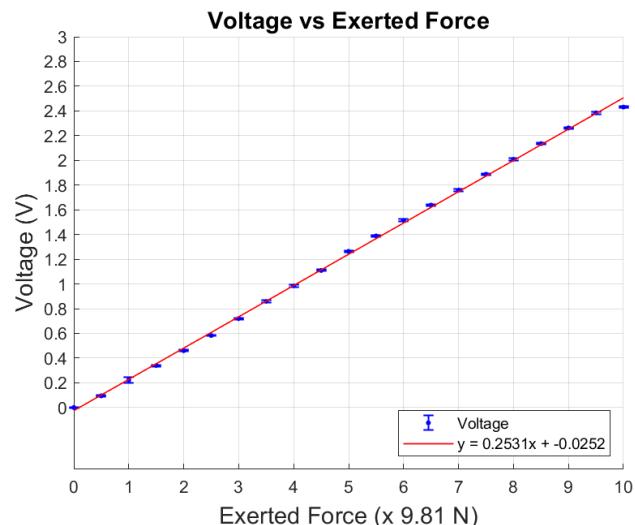
5.0	1.264	5.092	0.092
5.5	1.389	5.587	0.087
6.0	1.515	6.085	0.085
6.5	1.638	6.571	0.071
7.0	1.759	7.049	0.049
7.5	1.888	7.558	0.058
8.0	2.009	8.036	0.036
8.5	2.136	8.537	0.037
9.0	2.262	9.036	0.036
9.5	2.384	9.519	0.019
10.0	2.431	9.704	-0.296
Root Mean Square Error		0.087	



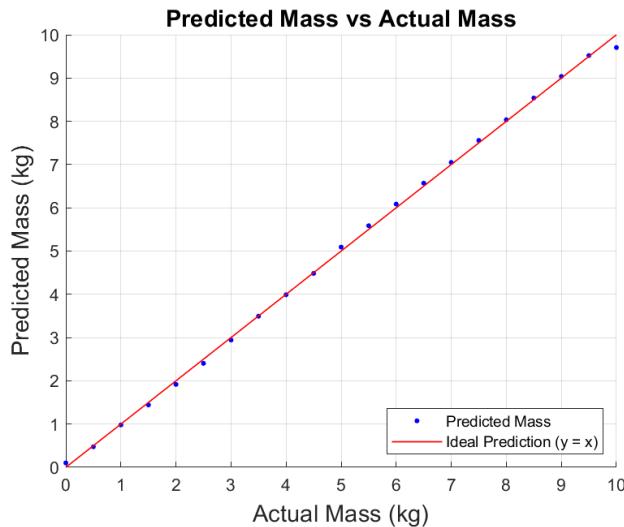
รูปที่ 126 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ Voltage (V) และ Mass (kg) โดยไม่ได้ใช้ INA125 Amplifier โดยที่มี Error Bar ครอบคลุมช่วง 2SD



รูปที่ 127 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ Voltage (V) และ Mass (kg) โดยที่มี Error Bar ครอบคลุมช่วง 2SD



รูปที่ 128 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของ Voltage (V) และ Exerted Force ($\times 9.81$ N) โดยที่มี Error Bar มาจากการใช้สมการ $y = 0.2531x - 0.0252$



รูปที่ 129 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองระหว่างค่าของมวลที่ทำนายจากการวัดแรงดัน (กิโลกรัม) และมวลที่นำมาซึ่งจริง (กิโลกรัม) โดยที่มีเส้นค่าที่การทำนายได้ในอุดมคติตามสมการ $y = x$

4.11. สรุปผล

จากการทดลองแปรค่าน้ำหนักมวลที่วางบน Load Cell เพื่อศึกษาผลต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้ พบว่า โดยการปรับค่า R_g เท่ากับ 104Ω ค่าสัญญาณแรงดันที่อ่านได้แปรค่าในช่วงตั้งแต่ 0 V ถึง 2.431 V แต่ถ้าไม่ใช้ตัวขยายสัญญาณ INA125 Amplifier จะทำให้อ่านค่าสัญญาณแรงดันได้ในช่วงประมาณ 0 mV ถึง 4.181 mV ซึ่งเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กกว่ามาก จึงควรใช้สัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วมาเพื่ออ่านโดย Microcontroller ในการเก็บผล

สำหรับการแปรค่ามวลโดยควบคุมน้ำหนักมวลตั้งแต่ 0 kg จนถึง 10 kg จะเห็นว่าค่าแรงดันที่วัดได้เปรียบตามน้ำหนักที่กระทำแบบเป็นแนวโน้มเชิงเส้น โดยเมื่อพล็อตในหนักที่กระทำในหน่วย $\times 9.81 \text{ kg}$ เทียบกับความต่างศักย์ในหน่วย Volt จะใช้ Linear Regression คำนวนหา Best Fit Line ได้สมการของเส้นแนวโน้มเป็น $y = 0.2531x - 0.02525$ นั่นคือ Load Cell นี้สามารถนำไปเป็นเครื่องมือวัดมวลโดยมีอัตราการตอบสนองต่อน้ำหนักมวลที่กระทำเป็น 0.2531 V/kg

หากคำนวนย้อนกลับจากสมการเส้นแนวโน้มข้างต้น จะได้ความสัมพันธ์สำหรับคำนวนหามวลที่ซึ่งได้จากการอ่านแรงดันไฟฟ้าเป็น $m (\text{kg}) = \frac{V (\text{V}) + 0.0252}{0.2531}$ ซึ่งนำไปทำนายค่ามวลที่วัดได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามวลที่แท้จริง สำหรับค่ามวลต่าง ๆ ที่เก็บจากการทดลองได้ดังกราฟ จะเห็นว่า ค่าที่ทำนายค่อนข้างอยู่ใกล้เคียงกับเส้นอุดมคติที่แสดงค่าจริง $y = x$ โดยระยะห่างจากเส้นอุดมคตินั้นแสดงถึงค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายเทียบจากค่ามวลจริง ซึ่งพบว่าหาค่าความคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error) ได้เป็น 0.087 kg นั่นคือ การวัดหามวลโดยใช้ Load Cell นี้อาจคลาดเคลื่อนจากค่าจริงได้ในช่วง 0.087 kg

4.12. อภิรายผล

จากการพิจารณาผลการทดลองจะเห็นว่า ผลจากการวัดแรงดันไฟฟ้าที่ประตามน้ำหนักมวล มีลักษณะแบบโกร์เดลเคียงแนวโน้มเชิงเส้น หากแบร็ปต์ติ่งแต่ช่วง 0 kg ถึง 10 kg แต่ข้อมูลมีความไม่เป็นเชิงเส้นในขนาดเล็กคือ มีความคลาดเคลื่อนจากเส้นแนวโน้มในระดับ 0.1 V ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของค่ามวลที่ทำนายเทียบกับค่ามวลจริง จะคลาดเคลื่อนในระดับขนาด 0.100 kg หรือ 100 g ซึ่งค่อนข้างมากสำหรับการวัดมวลอย่างละเอียดในระดับหน่วยกรัม

หากพิจารณาลักษณะกราฟโดยละเอียดจะเป็นว่ามีความโค้งคล้าย S-Curve เล็กน้อย จึงทำให้มีบางช่วงน้ำหนักที่ทำนายได้ค่าคลาดเคลื่อนไปทางมากเกินไป และบางช่วงน้ำหนักที่ทำนายได้ค่าคลาดเคลื่อนไปทางน้อยเกินไป อาจเป็นเพราะว่า INA125 Amplifier มีปัญหาได้รับแรงดันไฟเลี้ยงในการทำงานไม่เพียงพอ จึงขยายแรงดันออกมากไม่เป็นเชิงเส้นตามแรงดันขาเข้าจริง ๆ อาจแก้ปัญหาการจ่ายไฟเลี้ยงให้ดีว่า Amplifier หรืออาจทดลองหาสมการที่ช่วยคำนวณชดเชยค่าให้ได้ใกล้เคียงค่าจริงขึ้น

4.13. ข้อเสนอแนะ

- ควรหามวลน้ำหนักมากที่มีขนาดและรูปร่างพอดีสำหรับการวางบนฐานน้ำหนัก สำหรับการทดลองให้ได้ความเที่ยงตรงและแม่นยำ
- ควรจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงอย่างเหมาะสมให้ LNA125 Amplifier เพื่อแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของการขยายสัญญาณ
- อาจสามารถปรับค่าน้ำหนักมวลได้ละเอียดและมีหน่วยตัวอย่างมากกว่านี้

4.14. เอกสารอ้างอิง

- https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf?ts=1730281979018&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- How does a Strain Gauge Work จาก <https://www.800loadcel.com/load-cell-and-strain-gauge-basics.html>
- <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/YZC-131A.pdf>