

# *RMXplorer*

## LAB1 : Sensor Report

---

### สมาชิก

- นางสาวดิษย์ธารา สุทธาราเวศ 66340500019
- นายภาณุช เอื้อสุติกิจ 66340500040
- นายภูริวัฒน์ เกษมสุข ไพศาล 66340500044

### จุดประสงค์

- เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของ Potentiometer ชนิด A, B และ C ผ่านการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงดันทางไฟฟ้าเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ทางกลว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร
- เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างของ Potentiometer ประเภท Linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer ผ่านการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงดันทางไฟฟ้าเทียบกับระยะทางการเคลื่อนที่ทางกลว่ามีความสอดคล้องกันอย่างไร
- เพื่อศึกษาวิธีการแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt Trigger
- เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้สัญญาณจากการหมุน Potentiometer ด้วยมือเป็น Input และ สัญญาณ Digital เป็น Output จากการ Log สัญญาณ
- เพื่อศึกษากราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

## บทที่ 1

### **Potentiometer**

#### **1.1 จุดประสงค์**

1.1.1 เพื่อศึกษา Potentiometer ชนิด PTA6043-2015DPA103, PTA6043-2015DPB103, PDB181-K420K-103A2, PDB181-K420K-103B และ PDB181-K420K-103C

1.1.2 เพื่อศึกษาความสอดคล้องของการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าข้ามกันต่อระยะเวลา หรือ องศาการหมุน ของ Potentiometer

1.1.3 เพื่อศึกษาวิธีแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบวงจร Schmitt Trigger โดย ประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้สัญญาณจากการหมุน Potentiometer ด้วยมือเป็น Input และ สัญญาณ Digital เป็น Output จากการ Log สัญญาณ แสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็น ว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time

#### **1.2 สมมติฐาน**

1.2.1 การทดลอง 1 Rotary Potentiometer :

เมื่อตำแหน่งการหมุนของ Potentiometer เปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าความต้านทานและ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขา Output ของ Potentiometer เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

1.2.2 การทดลอง 2 Linear Potentiometer :

เมื่อตำแหน่งระยะการเลื่อนของของ Potentiometer เปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่าความ ต้านทานและแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากขา Output ของ Potentiometer เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

1.2.3 การทดลอง 3 Schmitt Trigger :

เมื่อตำแหน่งการหมุนหรือระยะการเลื่อนของของ Potentiometer ที่แปลงเป็นสัญญาณ Input ที่ป้อนเข้า Schmitt Trigger มีค่ามากกว่า High Threshold จะให้ Output เป็นสถานะ High และเมื่อตำแหน่งการหมุนหรือระยะการเลื่อนของของ Potentiometer ที่แปลงเป็นสัญญาณ Input ลดลงต่ำกว่า Low Threshold จะให้ Input เป็นสถานะ Low

### 1.3 ตัวแปร

#### 1.3.1 การทดลอง 1 Rotary Potentiometer :

ตัวแปรตัน : ตำแหน่งการหมุนของ Potentiometer

ตัวแปรตาม : แรงดันไฟฟ้าข้าออก หรือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าขาเข้า และอุณหภูมิ

#### 1.3.2 การทดลอง 2 Linear Potentiometer :

ตัวแปรตัน : ตำแหน่งระยะการเลื่อนของ Potentiometer

ตัวแปรตาม : แรงดันไฟฟ้าข้าออก หรือความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าขาเข้า และอุณหภูมิ

#### 1.3.3 การทดลอง 3 Schmitt Trigger :

ตัวแปรตัน : ตำแหน่งการหมุนหรือตำแหน่งระยะการเลื่อนของ Potentiometer

ตัวแปรตาม : สัญญาณข้าออกในรูปแบบ Digital

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าขาเข้า และอุณหภูมิ

### 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1) Potentiometer : ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ใช้เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของแกนหมุนหรือการเลื่อน ซึ่งแบ่งเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ Linear Potentiometer และ Rotary Potentiometer
- 2) Linear Potentiometer : ตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดหนึ่งที่มีแกนเป็นเส้นตรง การทำงานโดยการเลื่อนแกนตรงตามแนวเส้นตรง ซึ่งความยาวการเลื่อนของแกนจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า
- 3) Rotary Potentiometer : ตัวต้านทานปรับค่าได้ชนิดหนึ่งที่มีแกนหมุน ทำงานโดยการหมุน ซึ่งมุ่งการหมุนของแกนจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

- 4) Audio Taper : ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงใน Potentiometer ออกแบบมาให้สอดคล้องกับการรับรู้เสียงของมนุษย์ ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบ Logarithmic ทำให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของเสียงที่สัมภ์เสมอและลื่นไหล เหมาะสำหรับการควบคุมเสียงในเครื่องขยายเสียง (Amplifier) หรืออุปกรณ์เครื่องเสียง
- 5) Linear Taper : ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่เป็นเชิงเส้นตรงใน Potentiometer หมายถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สม่ำเสมอ กับการหมุน เหมาะสำหรับการปรับค่าที่ต้องการความแม่นยำและคงที่ เช่น การควบคุมความเร็ว การควบคุมแรงดัน หรือการปรับความสว่าง
- 6) Logarithmic Taper : ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานที่เป็นลักษณะ Logarithm ใน Potentiometer โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความต้านทานจะมีความชันสูงในบางช่วงและต่ำในบางช่วง ทำให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมที่ต้องการการตอบสนองที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงต้นและเพิ่มมากขึ้นในช่วงท้าย เช่น การควบคุมระดับเสียง
- 7) Sigmoid/S-Curve: กราฟที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ช้าในช่วงแรก จากนั้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงกลาง และจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าลงในช่วงท้าย ทำให้กราฟมีลักษณะเป็นรูปตัว "S"
- 8) STM32 Nucleo-G474RE : เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของ STMicroelectronics ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักพัฒนาสามารถทดลองและทดสอบการพัฒนาซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ได้อย่างง่ายดาย
- 9) Simulink : เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย MathWorks เพื่อการจำลองระบบและออกแบบโมเดลแบบ Block Diagram โดย Simulink ถูกออกแบบให้ใช้สำหรับการจำลองทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จริงเพื่อควบคุมและเก็บข้อมูลได้
- 10) Block ADC/Block Analog to Digital Converter : เป็น Block พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้จำลองการแปลงสัญญาณจากรูปแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นรูปแบบดิจิทัล (Digital)

- 11) Data Inspector : พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time และทำการบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ภายหลัง
- 12) Visualize Signal : การแสดงผลสัญญาณใน Simulink ด้วยรูปแบบกราฟหรือภาพที่แสดงถึงคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น การแสดงผลรูปคลื่นของสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิทัล เพื่อช่วยวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของสัญญาณนั้น
- 13) High/Low Threshold : ค่าขีดจำกัดสูง (High Threshold) และค่าขีดจำกัดต่ำ (Low Threshold) คือค่าระดับแรงดันที่ใช้กำหนดการเปลี่ยนแปลงสถานะในวงจรหรือระบบ เช่น ในวงจร Schmitt Trigger ค่าขีดจำกัดสูงจะเป็นค่าที่ทำให้ Output เปลี่ยนเป็นสถานะ High และค่าขีดจำกัดต่ำจะทำให้ Output เปลี่ยนเป็นสถานะ Low
- 14) RMS (Root Mean Square) : เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังสอง มีคุณสมบัติช่วยลดอิทธิพลของค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสัญญาณหลัก

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i^2}$$

เมื่อ      RMS คือค่าเฉลี่ยของกำลังสอง  
 $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $X_i$  คือข้อมูล Raw Data ตัวที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

- 15) Error Bars : ช่วงในกราฟที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้ถึงความแม่นยำและขอบเขตของความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้

16) Schmitt-trigger Circuit : วงจรแปลงสัญญาณที่มีการตอบสนองแบบฮิสเตอริซิส (Hysteresis) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยสร้างเกณฑ์สำหรับแยกแรงดันไฟฟ้าให้ Output เป็นสถานะ High และ Low

17) การเทียบบัญญัติไตรยางค์

เป็นวิธีการหาค่าที่ไม่ทราบ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสองชุดที่สัมพันธ์กันอย่างเป็นสัดส่วน

$$X = \frac{A \times B}{C}$$

เมื่อ **X** คือค่าที่ต้องการทราบ

**A** คือค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ **B** และเป็นตัวแปรหนึ่งที่เราทราบ

**B** คือค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ **A** และเป็นตัวแปรหนึ่งที่เราทราบ

**C** คือค่าที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบหรือปริมาณที่สัมพันธ์กับ **A** และ **B** ในการคำนวณ

18) Central Limit Theorem : เป็นทฤษฎีทางสถิติที่ระบุว่าหากทำการสุ่มตัวอย่างจากประชากรได้ ๆ ที่มีการกระจายค่าบางอย่าง เมื่อจำนวนของตัวอย่างที่สุ่มมากขึ้น จำนวนมากพอ การกระจายของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างเหล่านั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution)

19) Standard Resistance Tolerance : ขอบเขตที่ค่าความต้านทานจริงของอุปกรณ์อาจแตกต่างไปจากค่าที่ระบุไว้ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานนี้มักถูกแสดงเป็นเบอร์เซ็นต์ เช่น  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  ซึ่งแสดงถึงขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้

20) Linear Displacement : ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นตรงจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้าย โดยวัดจากระยะทางในแนวตรง ไม่คำนึงถึงเส้นทางที่เคลื่อนที่ ใช้ในการเคลื่อนที่ของวัตถุในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

21) โปรแกรม Tracker : ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยใช้เทคนิคติดตามตำแหน่งและวิเคราะห์ข้อมูลจากวิดีโอ

## 1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 1) Potentiometer : ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 2 ชนิดที่ถูกเลือกมาใช้ในการทดลอง คือ Rotary Potentiometer และ Linear Potentiometer ที่มีการตอบสนองต่อระยะเวลาหรือการเปลี่ยนที่แตกต่างกัน การทดลองจะวัดแรงดันไฟฟ้าที่ปลายขา Potentiometer เพื่อเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ด้วยการหมุนหรือการเลื่อนแกน โดยบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าข้าอกจากแต่ละชนิดเพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้อง
- 2) Linear Potentiometer : ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่มีแกนเลื่อนในแนวเส้นตรง จะทำการวัดโดยการเลื่อนแกนตามระยะทางต่าง ๆ และวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ณ แต่ละช่วงของระยะทาง
- 3) Rotary Potentiometer : ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่มีแกนหมุนในแนววงกลม จะทำการวัดโดยการหมุนแกนในมุมต่าง ๆ และวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ณ แต่ละมุม
- 4) STM32 Nucleo-G474RE : ทำหน้าที่เป็นบอร์ดรับสัญญาณแรงดันที่ได้จาก Potentiometer โดยเชื่อมต่อ Potentiometer เข้ากับขา ADC ของบอร์ด ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณ Analog จาก Potentiometer เป็นสัญญาณ Digital เพื่อส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink ข้อมูลที่ถูกแปลงนี้จะถูกนำไปบันทึกและวิเคราะห์ใน MATLAB Simulink เพื่อตรวจสอบความสมพันธ์ระหว่างมุกการหมุนและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
- 5) Simulink : Simulink จะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองการเก็บข้อมูลจากบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้บล็อก ADC เพื่ออ่านค่าแรงดันที่ได้จาก Potentiometer และแสดงผลแบบกราฟผ่าน Data Inspector รวมถึงการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 6) Visualize Signal: การสร้างกราฟหรือการแสดงข้อมูลของสัญญาณที่ได้ด้วย Simulink เพื่อแสดงสัญญาณตามเวลาใน Fixed-step size

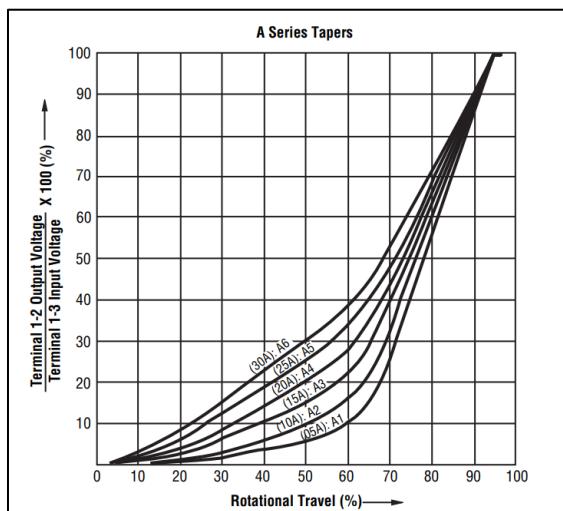
- 7) High/Low Threshold : การกำหนดค่าระดับแรงดันไฟฟ้าหรือระดับสัญญาณที่ทำให้ระบบเปลี่ยนสถานะ เช่น การกำหนดค่า 3.3 V เป็น High Threshold และ 1 V เป็น Low Threshold ในวงจร Schmitt Trigger
- 8) Finite State Machine (FSM) : ถูกนำมาใช้ในการเขียนลำดับการทำงานของโมเดล เพื่อกำหนดการทำงานหรือวิเคราะห์การทดลองที่ต้อง
- 9) Error Bars : จะปรากฏเป็นเลนกราฟแท่งเล็ก ๆ บนเส้นกราฟเพื่อแสดงขอบเขตของความไม่แน่นอนในการวัดค่าตัวแปร จำนวนได้จากการโดยการนำค่า Standard Resistance Tolerance ใน Datasheet ได้ ๆ
- 10) Block ADC หรือ Block Analog to Digital Converter : บล็อก ADC นี้จะทำหน้าที่อ่านค่าความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นจาก Potentiometer ผ่านขา ADC ของบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE จากนั้นข้อมูลแรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและเก็บเป็นข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และแสดงผลเป็นกราฟในโปรแกรม Simulink
- 11) Data Inspector : พังก์ชันใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ การทดลองจะทำโดยแสดงผลสัญญาณ Output จาก Potentiometer ที่ผ่านวงจร Schmitt-trigger และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time
- 12) วงจร Schmitt-trigger : วงจรที่ใช้เพื่อเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล จะทดลองโดยการนำสัญญาณอนาล็อกจาก Potentiometer ผ่านวงจร Schmitt-trigger ที่กำหนดช่วงแรงดันที่จะให้เป็น High หรือ Low และวัดค่า Output เมื่อสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลง
- 13) Central Limit Theorem : มากใช้ทฤษฎีนี้ในการเก็บค่าการทดลองเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีข้อมูลที่เกิดการกระจายตัวมากพอ ซึ่งหมายความว่าการสุ่มเก็บข้อมูลตัวอย่างหลาย ๆ ชุดจากการทดลอง จะทำให้ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) แม้ว่าในการทดลองเดิมข้อมูลจะมีการกระจายแบบอื่นก็ตาม การใช้ทฤษฎีบัน្តช่วยให้การวิเคราะห์สถิติสามารถทำได้ง่ายขึ้น และแม่นยำมากขึ้น

- 14) โปรแกรม Tracker : ถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งค่าในกราฟ Datasheet เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีช่วงและสัดส่วนที่ถูกต้องตามสิ่งที่ควรจะเป็น

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.6.1 Datasheet

#### 1.) PDB181-K420K-103A2 (Rotary Potentiometer Type A)

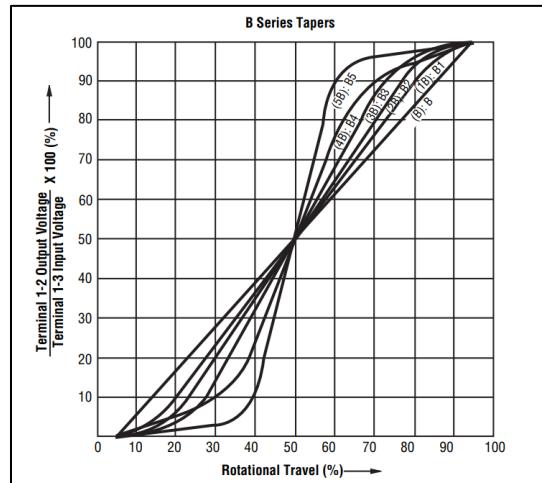


รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของระหว่างการหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ PDB181-K420K-103A2

A Series Tapers หมายถึง ลักษณะของความเปลี่ยนแปลงในการตอบสนองของแรงดัน ข้าวกับการหมุนในมุมต่าง ๆ ของ Potentiometer นั้นมีลักษณะแบบ Type A หรือที่เรียกว่า Audio Taper หรือ Logarithmic Taper เหมาะสำหรับการใช้ในงาน Amplifier

เมื่อหมุน Rotary Potentiometer Type A ในช่วงแรก แรงดันไฟฟ้าข้าวกจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ แต่เมื่อหมุนไปจนถึงช่วงท้าย แรงดันไฟฟ้าข้าวกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ Logarithmic Taper ที่แสดงในกราฟ การใช้ MATLAB และ Simulink ทำให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เป็นไปตามลักษณะ Logarithmic Taper โดย Rotary Potentiometer Type A นี้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการควบคุมสัญญาณแบบละเอียดในช่วงท้าย

## 2.) PDB181-K420K-103B (Rotary Potentiometer Type B)

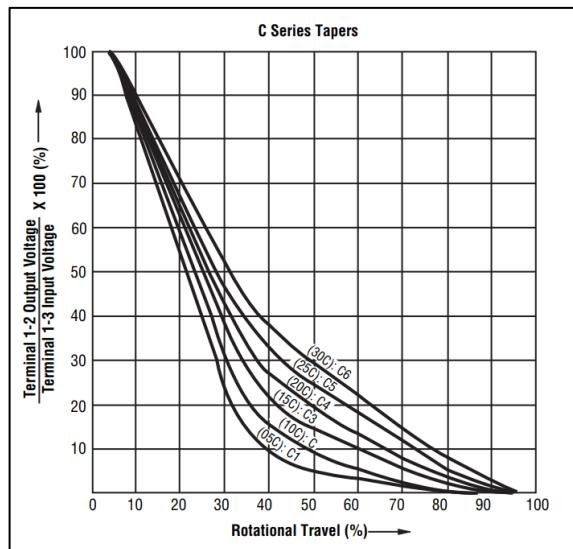


รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางการหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ PDB181-K420K-103B

B Series Tapers หรือที่เรียกว่า Linear Taper ซึ่งความหมายโดยทั่วไปคือ การตอบสนองของแรงดันข้าออกจะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับการหมุนของ Potentiometer เหมาะสำหรับการควบคุมที่ต้องการความแม่นยำในการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

เมื่อหมุน Rotary Potentiometer Type B จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าข้าออกมีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตลอดช่วงของการหมุน ซึ่งตรงกับลักษณะของ Linear Taper ที่แสดงในกราฟ ซึ่งสามารถใช้ MATLAB และ Simulink ในการตรวจสอบและบันทึกแรงดันไฟฟ้าข้าออกที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุน และจึงสามารถตรวจสอบว่าค่าที่ได้จากการทดลองเป็นเส้นตรงตามที่คาดหวัง โดยใช้ Data Inspector ใน MATLAB ซึ่งลักษณะของ Rotary Potentiometer Type B เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการปรับแรงดันไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ

### 3.) PDB181-K420K-103C (Rotary Potentiometer Type C)

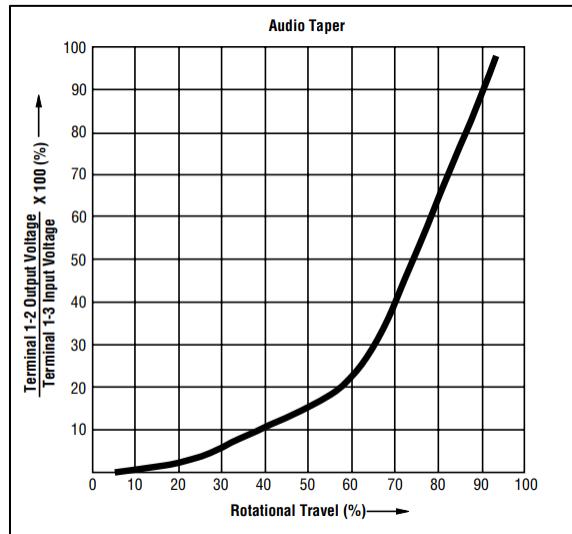


รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของระบบทางการหมุนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ PDB181-K420K-103C

C Series Tapers โดย Taper แบบ C นักจะเรียกว่า Reverse Audio Taper หรือ Reverse Logarithmic Taper ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่ตรงข้ามกับ Taper แบบ A หรือ Audio Taper เมน้ำสำหรับการใช้งานที่ต้องการการปรับค่าที่มีการลดแรงดันข้าออกในทิศทางตรงข้าม เช่น การควบคุมระดับสัญญาณในบางฟังก์ชันเฉพาะ

เมื่อหมุน Rotary Potentiometer Type C ในช่วงแรก แรงดันไฟฟ้าข้าออกจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อหมุนไปเรื่อยๆ แรงดันไฟฟ้าข้าออกจะลดลงอย่างช้าลง โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นไปตามกราฟที่ปรากฏ ซึ่งสามารถใช้ MATLAB และ Simulink ในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าข้าออกที่เปลี่ยนแปลงตามการหมุน และจึงสามารถบันทึกค่าออกมาเป็นกราฟ ซึ่งการตอบสนองของ Rotary Potentiometer Type C นี้สามารถใช้เพื่อควบคุมการลดระดับสัญญาณอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในงานที่ต้องการควบคุมความไวของการลดระดับแรงดันในช่วงท้าย

#### 4.) PTA6043-2015DPA103 (Linear Potentiometer Type A)

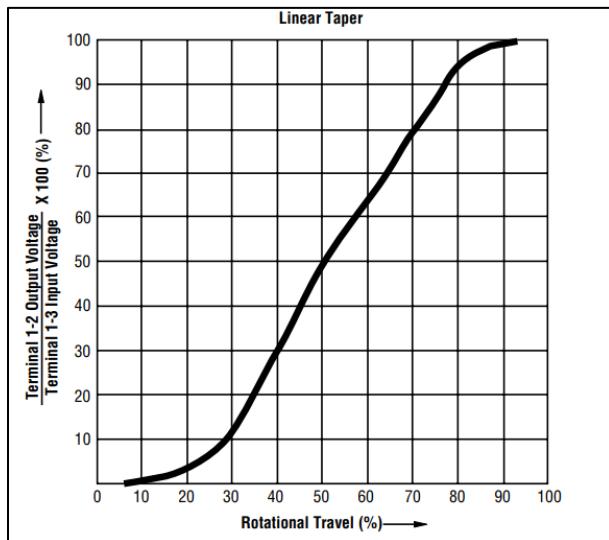


รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของระเบียบการเลื่อนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ PTA6043-2015DPA103

กราฟนี้บ่งบอกถึง Linear Potentiometer Type A ในลักษณะของเส้นโค้ง แสดงความเป็น Audio Taper หรือ Logarithmic Taper ซึ่งมีลักษณะการตอบสนองที่ไม่เป็นเส้นตรง เหมาะสำหรับ การใช้งานที่ต้องการการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น

เมื่อทำการหมุน Linear Potentiometer Type A แรงดันไฟฟ้าขอกจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วงแรกของการหมุน แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเข้าใกล้ช่วงท้าย ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของ กราฟ Audio Taper การใช้ MATLAB และ Simulink ในการตรวจวัดและบันทึกแรงดันไฟฟ้าขอก ที่เปลี่ยนแปลงตามระเบียบการเลื่อน จะช่วยให้สามารถสร้างกราฟที่แสดงลักษณะการตอบสนอง ได้อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะการตอบสนองของ Linear Potentiometer Type A นี้เหมาะสมสำหรับงาน ที่ต้องการความละเอียดสูงในการควบคุมสัญญาณในช่วงท้าย

5.) PTA6043-2015DPB103 (Linear Potentiometer Type B)



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของระบบการเลื่อนต่อแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของ PTA6043-2015DPB103

กราฟนี้บ่งบอกถึง Linear Potentiometer Type B ในลักษณะของ Linear Taper ที่หมายถึงการตอบสนองเชิงเส้นตรง แสดงถึงความสม่ำเสมอ อย่างสม่ำเสมอ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความคงที่และแม่นยำในการปรับระดับ

เมื่อหัน Linear Potentiometer Type B จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าข้าอกอกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอและเป็นเส้นตรงตลอดช่วงการหมุนของ Potentiometer ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ Linear Taper ที่แสดงในกราฟ การใช้ MATLAB และ Simulink ในการตรวจสอบและบันทึกแรงดันไฟฟ้าข้าอกอกที่เปลี่ยนแปลงตามระยะการเลื่อน แรงดันไฟฟ้าข้าอกอกตามการหมุน Potentiometer โดยลักษณะการตอบสนองของ Linear Potentiometer Type B ที่มีการตอบสนองแบบ Linear Taper ทำให้เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วง

### 1.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- 1) Calculation of RMS Values for Variable Frequency Sinusoidal Signals, Using Phasors and Digital SAL and CAL Filters

#### *2.1. Definition of RMS value*

The mathematical definition of RMS of a signal  $x(t)$  is given by equation (1)

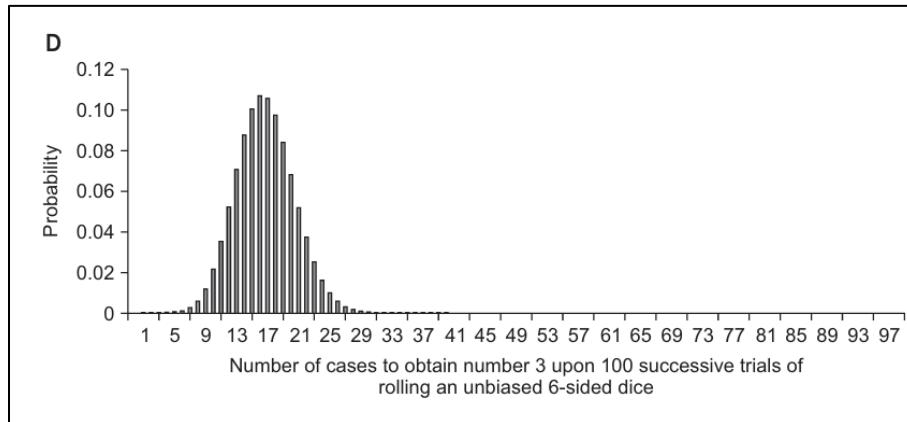
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Where T is the period of the signal.

รูปที่ 6 แสดงถึงคำนิยามและการคิดแบบ RMS

สมมติว่าข้อผิดพลาดของสัญญาณ (Error) ที่เราได้รับมีการกระจายแบบปกติและไม่มีความเอนเอียง การใช้ RMS จะช่วยให้สามารถวัดความแปรปรวนของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ โดยค่า RMS ที่คำนวณมาจะแสดงถึงการกระจายตัวของสัญญาณที่อยู่ใกล้กับค่าที่คาดหวัง และอาจนำ RMS มาช่วยลดสัญญาณรบกวนได้โดยการกรองค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาด หรือใช้ RMS เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Error) ของค่าเฉลี่ย การใช้ RMS เพื่อลด Noise นั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เก็บได้แล้วใช้ค่า RMS เป็นตัวปั่งบวกถึงขอบเขตของค่าที่น่าจะเป็นของสัญญาณ ลดผลกระทบจากค่า Noise ที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้มีความเสถียรและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 2) Central limit theorem : the cornerstone of modern statistics



รูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูล 100 ค่า

ขนาดตัวอย่างที่ถือว่าเพียงพอในการให้ค่าเฉลี่ยกระจายตัวแบบปกติมักอยู่ที่ 30 ขึ้นไป แต่ในหลายกรณีที่ต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในงานที่มีความผันผวนสูง จึงเลือกใช้ค่า 100 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่มีการกระจายแบบปกติมากขึ้น

### 1.7 วิธีดำเนินการทดลอง

ทำการทดสอบ Potentiometer โดยใช้ STM32 Nucleo-G474RE กับโปรแกรม Simulink โดยเริ่มจากการเชื่อมต่อ Potentiometer ที่จะตัวทั้ง Rotary Potentiometer 3 ชนิด (Series A, B และ C) และ Linear Potentiometer 2 ชนิด (Type A และ B) เข้ากับ STM32 Nucleo-G474RE และตั้งค่าให้เก็บข้อมูลจากขา ADC โดยใช้โปรแกรม Simulink เพื่อบันทึกความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการหมุนและการเลื่อนตำแหน่ง Potentiometer ในแต่ละแบบ เริ่มต้นการทดลองด้วยการปรับ Potentiometer แต่ละตัวด้วยการหมุนหรือเลื่อน และเก็บค่าที่ได้ต่อการปรับแต่ละตำแหน่งแต่ละครั้ง เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามตำแหน่ง Potentiometer เมื่อเทียบกับ Datasheet ต่อมาเลือกใช้ Rotary Potentiometer แบบ B ทำการเชื่อมตอกับวงจร Schmitt Trigger โดยกำหนดค่าแรงดัน Threshold ที่ระดับ 2.5 V สำหรับ High และ 0.5 V สำหรับ Low และทำการหมุน Potentiometer แบบ B เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแรงดันและการทำงานของ Schmitt Trigger จากนั้นใช้ Simulink บันทึกค่าข้อมูลที่ได้ทั้งหมดและวิเคราะห์ผลว่าตรงตามการทำงานของ Schmitt Trigger ที่ตั้งค่าไว้หรือไม่ สุดท้ายทำการสรุปและเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองของ Potentiometer แต่ละแบบและการทำงานของ Schmitt Trigger

## 1.8 วัสดุอุปกรณ์

- 1.8.1 PTA6043-2015DPA103 จำนวน 1 อัน
- 1.8.2 PTA6043-2015DPB103 จำนวน 1 อัน
- 1.8.3 PDB181-K420K-103A2 จำนวน 1 อัน
- 1.8.4 PDB181-K420K-103B จำนวน 1 อัน
- 1.8.5 PDB181-K420K-103C จำนวน 1 อัน
- 1.8.6 STM32 Nucleo-G474RE จำนวน 1 บอร์ด
- 1.8.7 สายอัปโหลด จำนวน 1 เส้น
- 1.8.8 PotenXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Potentiometer, 3D-Print ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Potentiometer ลักษณะคล้ายไมโครแทกเตอร์
- 1.8.9 สายจัมเปอร์

## 1.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

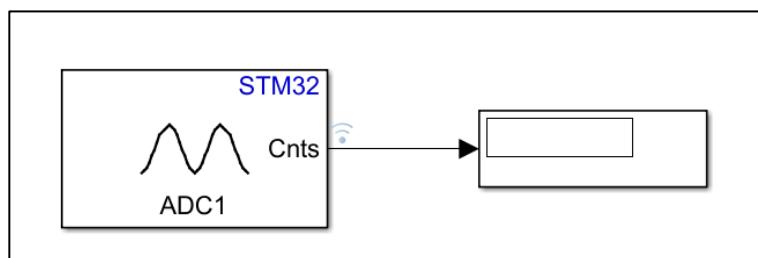
### 1.9.1 การทดลองที่ 1 Rotary Potentiometer

1) การเชื่อมต่อระหว่าง Rotary Potentiometer, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์  
เนื่องจากการเชื่อมต่อของชนิด A, B และ C มีลักษณะที่เหมือนกัน ทางคณะผู้ทำจริง<sup>1</sup>  
ระบุคำอธิบายเข้าไว้ด้วยกัน ดังนี้

- 1.) ขา 1 เชื่อม VCC ไฟ 3.3 V
- 2.) ขา 2 เชื่อม Analog Pin A0 (PA0)
- 3.) ขา 3 เชื่อม GND

2) การสร้างแบบจำลองสำหรับการเก็บค่าใน Simulink

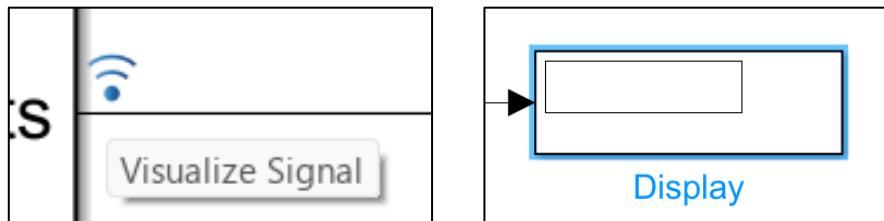
การเก็บค่า Rotary Potentiometer โดยใช้ Block ADC ร่วมกับ Block Display



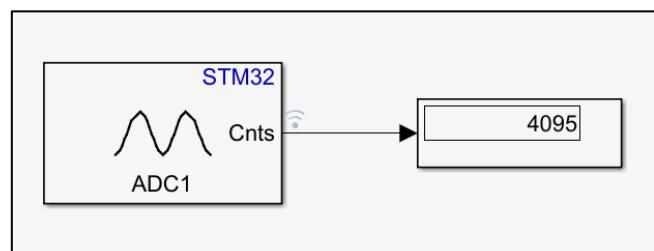
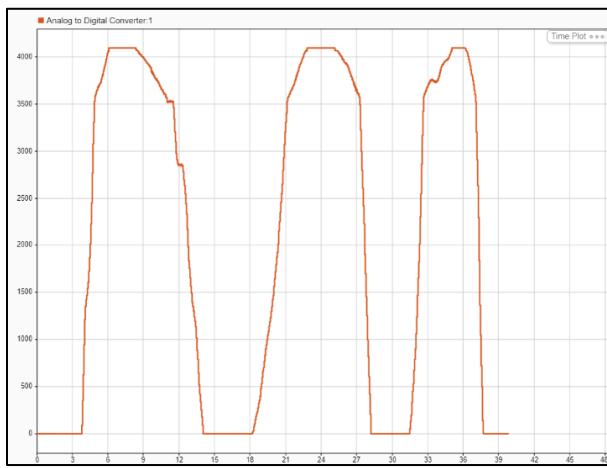
รูปที่ 8 แสดง Block Analog to Digital Converter สำหรับการแปลงค่าจาก Rotary Potentiometer

3) การวัดค่าและบันทึกข้อมูลที่ได้จาก Rotary Potentiometer ชนิด A, B และ C

เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จสิ้น ก็สามารถเริ่มต้นการเก็บค่าได้ด้วยการหมุนเป็นมุน โดยแต่ละมุนจะให้ค่าที่ต่างกันไปตามองศาที่มากขึ้น โดยจะสามารถนำค่าที่วัดได้มาจากการ Data Inspector ซึ่งสามารถกดดูได้จาก Visualize Signal ของ Block ADC และการ Display ค่าแต่ละจุดของมา



รูปที่ 9-10 แสดงวิธีการดู Data Inspector ที่ได้จากการทดลองด้วยการ Visualize Signal และการ Display

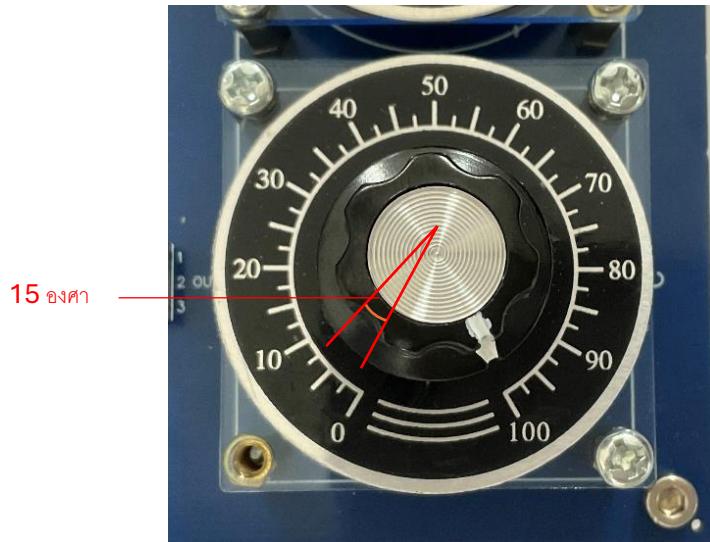


รูปที่

10-11 แสดงการแสดงค่าจากการ Data Inspector และค่าตัวเลขแต่ละจุดจาก Display

เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำเลือกนำกราฟจากการ Visualize Signal ของ Block ADC มาวิเคราะห์ค่าต่อ ทำให้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Potentiometer ทั้ง 3 ชนิด สามารถให้ค่าได้ตั้งแต่ช่วง 0 ถึง 4095 ด้วยการหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 300 องศา เท่ากันทั้งหมด

#### 4) การทดลองและการบันทึกข้อมูลแบบ Real-Time



รูปที่ 12 แสดงการแบ่งช่วงเก็บข้อมูลในการทดลอง

จาก Rotary Potentiometer ที่มีองค์การหมุนตั้งแต่ 0 ถึง 300 องศา ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 เปอร์เซ็นต์ ของ 300 องศา หรือเทียบเท่า 15 องศา โดยเก็บค่าครั้งละ 100 Samplings ด้วย Fixed-step time ที่ 0.01 วินาทีเป็นเวลา 1 วินาที ทำให้ทุก ๆ 15 องศา มีทั้งหมด 100 Samplings อันเนื่องมาจาก Central Limit Theorem ที่กล่าวไว้ว่าจำนวน Samplings ที่น้อยที่สุดที่แนะนำเพื่อใช้ในการคำนวนคือ 30 Samplings แต่ เพราะทางคณะผู้จัดทำต้องการความแม่นยำที่มากขึ้นและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) จึงเลือกจำนวน Sampling ที่ 100 Samplings แต่ Samplings ที่ได้มานั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยเพื่อสรุปค่าที่ได้ที่แท้จริง ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนั้นไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องเสมอไป เนื่องจากการทดลองอาจได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อค่าที่ได้ ทำให้คณะผู้จัดทำต้องนำทุกค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยด้วยการหา RMS ทางคณะผู้จัดทำจึงเก็บข้อมูลการทดลอง และหาค่า RMS ของ Samplings ในทุก ๆ 15 องศา ของ Rotary Potentiometer ชนิด A, B และ C ได้ดังผลการทดลองในลำดับถัดไป

### 1.9.2 การทดลองที่ 2 Linear Potentiometer

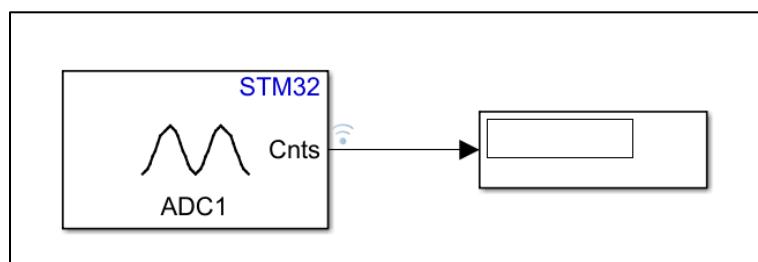
- 1) การเชื่อมต่อระหว่าง Linear Potentiometer, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์
 

เนื่องจากการเชื่อมต่อของชานิด A และ B มีลักษณะที่เหมือนกัน ทางคณะผู้จำทำจึงรวมคำอธิบายเข้าไว้ด้วยกัน ดังนี้

  - 1.) ขา 1 เชื่อม VCC ไฟ 3.3 V
  - 2.) ขา 2 เชื่อม Analog Pin A0 (PA0)
  - 3.) ขา 3 เชื่อม GND

### 2) การสร้างแบบจำลองสำหรับการเก็บค่าใน Simulink

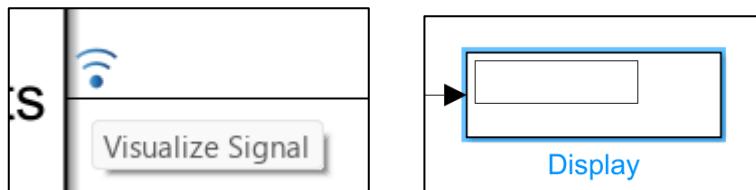
การเก็บค่า Rotary Potentiometer โดยใช้ Block ADC ร่วมกับ Block Display



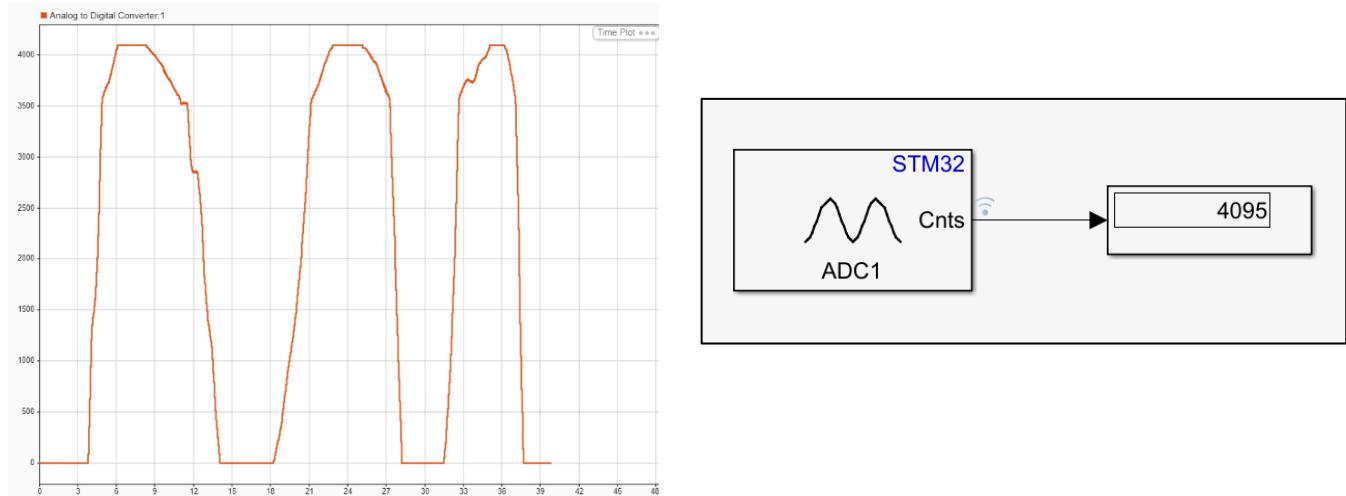
รูปที่ 13 แสดง Block Analog to Digital Converter สำหรับการแปลงค่าจาก Rotary Potentiometer เป็นค่าตัวเลข

### 3) การวัดค่าและบันทึกข้อมูลที่ได้จาก Linear Potentiometer ชานิด A และ B

เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จสิ้น ก็สามารถเริ่มต้นการเก็บค่าได้ด้วยการหมุนเป็นมุม โดยแต่ละมุมจะให้ค่าที่ต่างกันไปตามองค่าที่มากขึ้น โดยจะสามารถนำค่าที่วัดได้มาจากการ Data Inspector ซึ่งสามารถกดดูได้จาก Visualize Signal ของ Block ADC และการ Display ค่าแต่ละจุดออกมานะ



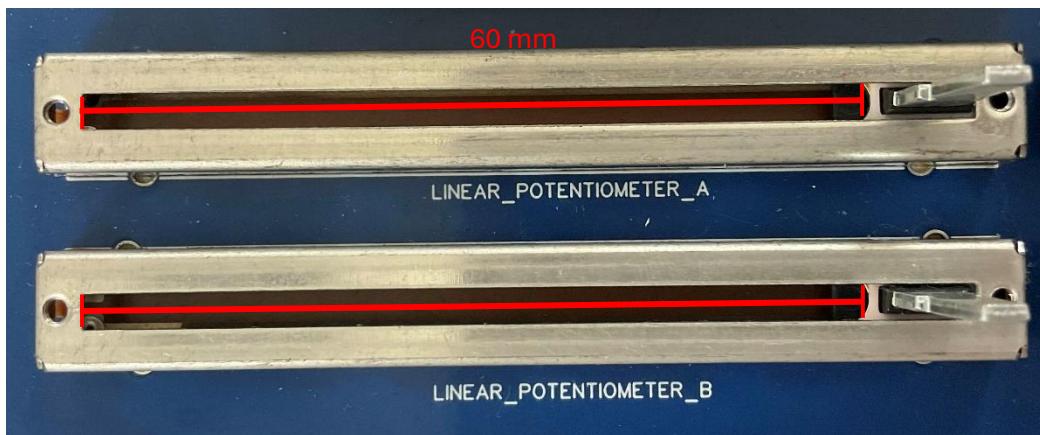
รูปที่ 14-15 แสดงวิธีการดูค่าที่ได้จากการทดลองด้วยการ Visualize Signal และการ Display



รูปที่ 16-17 แสดงการแสดงค่าจากการ Data Inspector และค่าตัวเลขแต่ละจุดจาก Display

เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำเลือกนำกราฟจากการ Visualize Signal ของ Block ADC มาวิเคราะห์ค่าต่อ ทำให้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Potentiometer ทั้ง 2 ชนิด สามารถให้ค่าได้ตั้งแต่ช่วง 0 ถึง 4095 จากการเลื่อนตั้งแต่ 0 ถึง 60 มิลลิเมตร

#### 4) การทดลองและการบันทึกข้อมูลแบบ Real-Time



รูปที่ 18 แสดงการแบ่งช่วงเก็บข้อมูลในการทดลอง

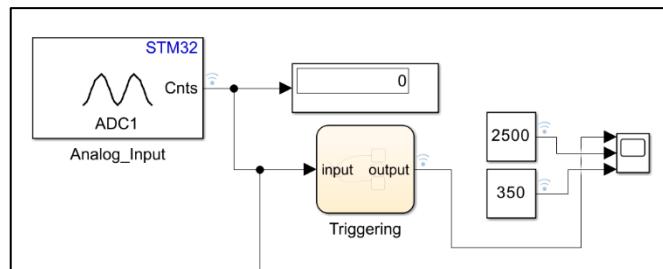
จาก Linear Potentiometer ที่มีระยะการเลื่อนตั้งแต่ 0 ถึง 60 มิลลิเมตร ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 เบอร์เซ็นต์ ของ 60 มิลลิเมตร หรือเทียบเท่า 6 มิลลิเมตร โดยเก็บค่าครั้งละ 100 Samplings ด้วย Fixed-step time ที่ 0.01 วินาที เป็นเวลา 1 วินาที ทำให้ทุก ๆ 6 มิลลิเมตรนั้นมีทั้งหมด 100 Samplings อันนี้องมาจาก Central Limit Theorem ที่กล่าวไว้ว่า

จำนวน Samplings ที่น้อยที่สุดที่แนะนำเพื่อใช้ในการคำนวณคือ 30 Samplings แต่เพราะทางคณาจารย์ต้องการความแม่นยำที่มากขึ้นและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) จึงเลือกจำนวน Sampling ที่ 100 Samplings แต่ Samplings ที่ได้มานั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยเพื่อสรุปค่าที่ได้ที่แท้จริง ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนั้นไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องเสมอไป เนื่องจากการทดลองอาจได้รับผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อค่าที่ได้ ทำให้คณาจารย์ต้องนำทุกค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยด้วยการหา RMS

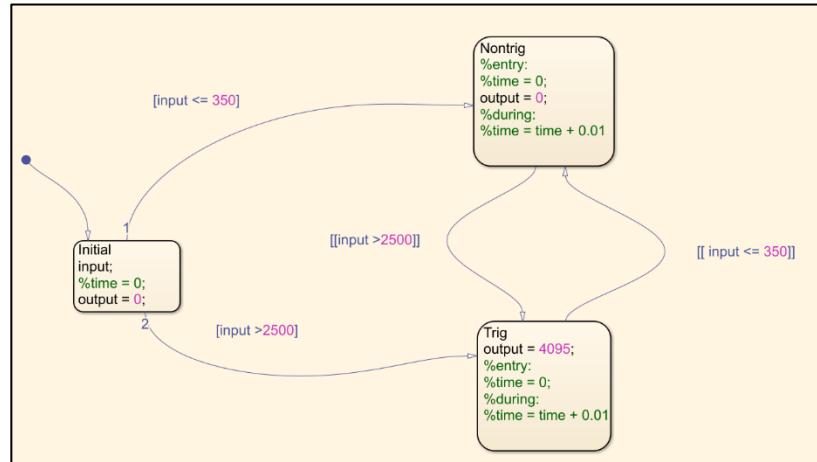
### 1.9.3 การทดลองที่ 3 Schmitt Trigger

เมื่อคณาจารย์ต้องการทำได้ข้อมูลที่จัดการสัญญาณแล้วจากหัวข้อ 1.9.1 และ 1.9.2 ทำให้คณาจารย์ต้องสามารถดำเนินการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ตามวงจร Schmitt-trigger และเพื่อการทดลองที่มีประสิทธิภาพ คณาจารย์ต้องทำได้เลือกใช้ Rotary Potentiometer Type B ในการทำการทดลอง เนื่องจากกราฟของ Potentiometer ชนิดนี้ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ทำให้สามารถคาดเดาการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายที่สุด ในลำดับถัดไป คณาจารย์ต้องสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของการหมุน Rotary Potentiometer ได้อย่างชัดเจน

เพื่อทำการทดลอง Schmitt Trigger คณาจารย์ต้องได้เลือกใช้ค่าของ ADC ในการสร้างเงื่อนไข ช่วง Trigger เนื่องจากค่า ADC เป็นค่า Raw Data ที่ยังไม่ผ่านการแปลงข้อมูลใด ๆ ทำให้สามารถได้ค่าตำแหน่งจาก Potentiometer ที่ไม่คลาดเคลื่อน คณาจารย์ต้องจึงเลือกช่วง High Threshold สำหรับการ Trigger ให้เป็นค่า Digital High ด้วยค่า ADC 2500 และเลือกช่วง Low Threshold สำหรับการ Trigger ให้เป็นค่า Digital Low ด้วยค่า ADC 350 เนื่องจากการเลือกช่วงที่กว้างทำให้สามารถสังเกตผลการทดลองได้อย่างชัดเจน ดังนั้นคณาจารย์ต้องสามารถออกแบบ Simulink สำหรับวงจร Schmitt Trigger ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 19 แสดงถึงรูปแบบการต่อ Block ใน Simulink เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าของสัญญาณ Schmitt Trigger



รูปที่ 20 แสดงถึงการต่อ Chart ด้วย FSM เพื่อให้ได้มาซึ่งการคำนวณรูปแบบ Schmitt Trigger

## 1.10 ผลการทดลอง

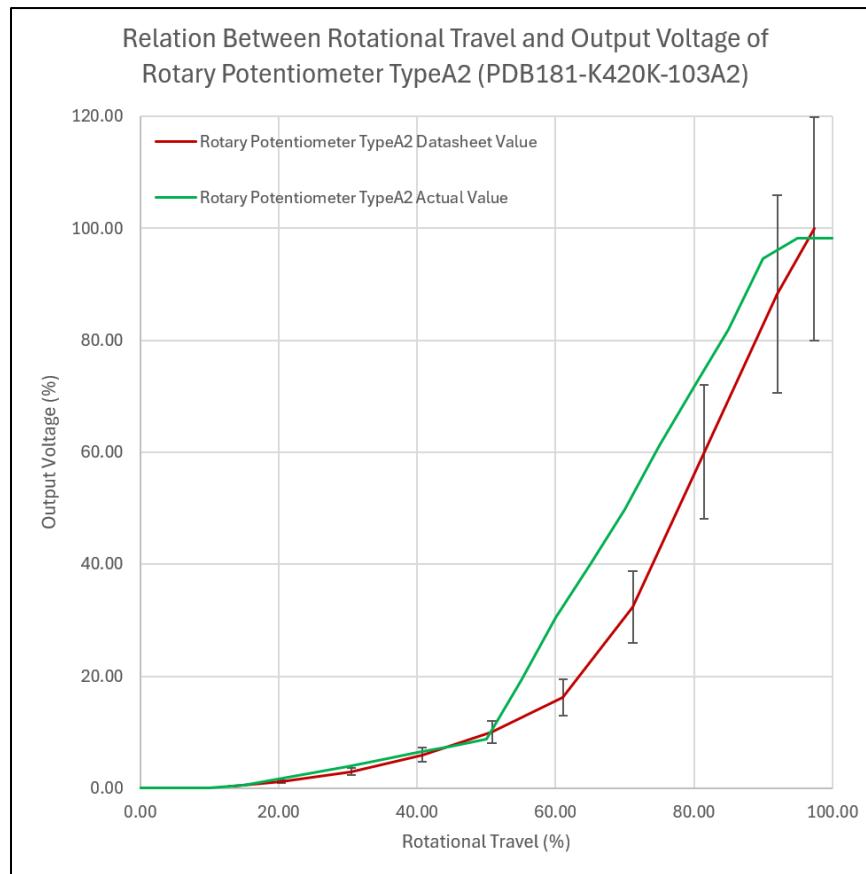
### 1.10.1 ผลการทดลองที่ 1 Rotary Potentiometer

Degrees	Rotary_Potentiometer_Type A	Rotary_Potentiometer_Type B	Rotary_Potentiometer_Type C
0	0	0	4082.664
5	0	0	4048.634
10	0	77.24617	3800.308
15	19.98255	300.4724	3025.072
20	69.40086	595.22	2437.114
25	110.4928	761.1794	2006.619
30	158.0906	946.5333	1547.128
35	207.9674	1130.696	1039.002
40	263.4	1404.01	592.3774
45	308.7092	1589.488	510.9942
50	360.8324	1789.134	471.3918
55	785.7116	1987.733	394.2925
60	1248.244	2258.26	312.0228
65	1638.362	2527.863	246.8402
70	2040.439	2791.19	192.8747
75	2508.634	3090.773	130.6834
80	2931.823	3288.744	65.324265
85	3356.061	3459.577	8.5335
90	3872.258	3792.626	0
95	4024.942	4047.291	0
100	4023.787	4056.739	0

ตารางที่ 1 แสดงค่า RMS ของ Rotary Potentiometer ชนิด A, B และ C

เมื่อได้ค่าในทุกช่วงที่ต้องการมาแล้ว ลำดับถัดไป ทางคณะผู้จัดทำจึงนำค่าเหล่านี้มาพล็อตเป็นกราฟด้วยการนำค่าที่ได้จากการทดลองพล็อตเบรี่ยนเทียบกับค่าจาก Datasheet โดยไม่ลืมวิเคราะห์ช่วงค่าความคลาดเคลื่อน (Standard Resistance Tolerance)  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ ให้สามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะและความถูกต้องของการทดลอง Rotary Potentiometer แต่ละชนิดได้ง่ายขึ้น

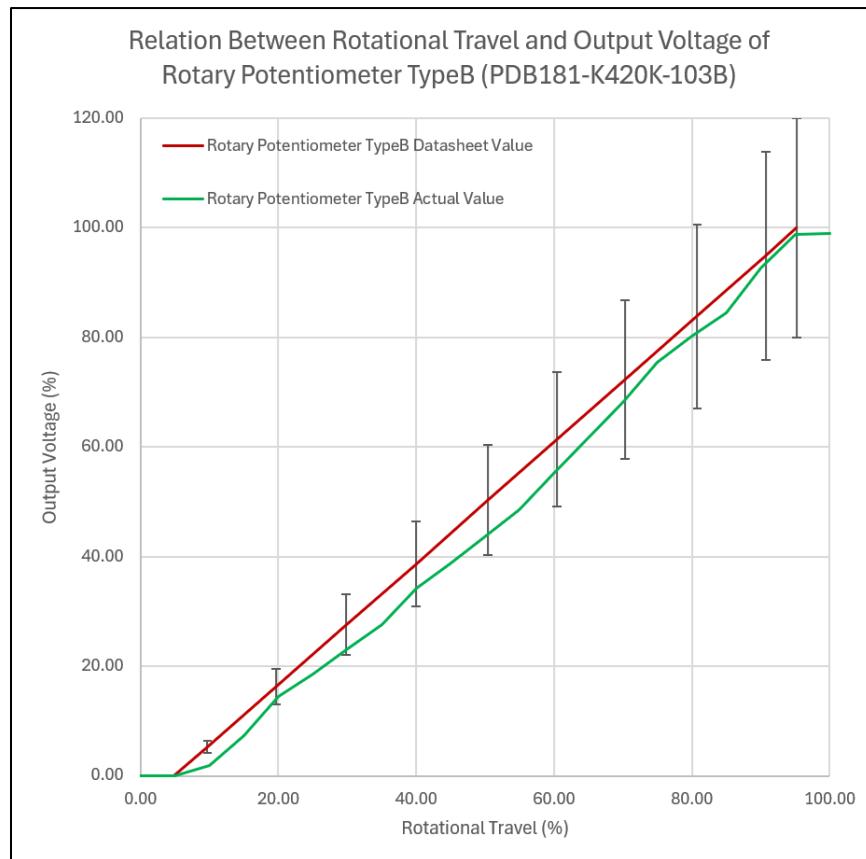
- PDB181-K420K-103A2 (Type A)



รูปที่ 21 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดลองได้กับค่าจาก Datasheet ของ PDB181-K420K-103A2

จากการทดสอบถึงค่าที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นสีเขียว) และค่าที่ได้จาก Datasheet (เส้นสีแดง) โดยมีการใส่ Error Bars ที่ 20 เบอร์เซนต์ซึ่งช่วยแสดงให้เห็นว่า ช่วงของค่าที่ได้นั้น คาดการณ์ได้ และช่วยบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทดลอง Logarithmic Taper คือ แรงดันข้าอก้ม ลักษณะเพิ่มขึ้นแบบช้าในช่วงแรก จนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการหมุน

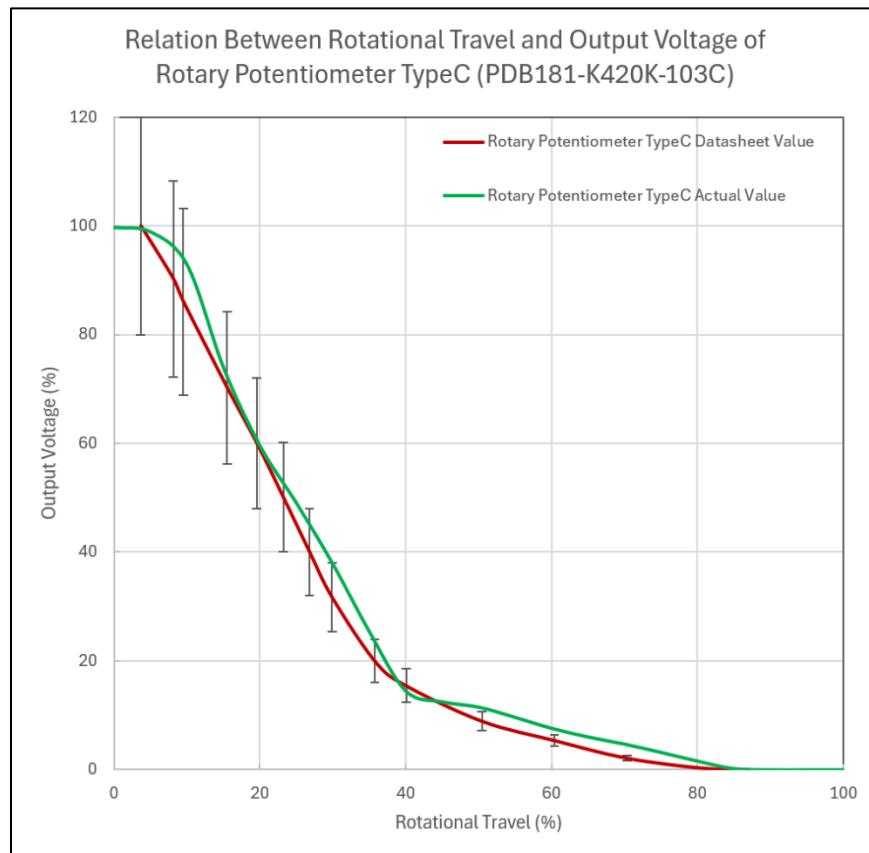
- PDB181-K420K-103B (Type B)



รูปที่ 22 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดลองได้กับค่าจาก Data Sheet ของ PDB181-K420K-103B

จากราฟนี้สามารถเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นสีเขียว) มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จาก Datasheet (เส้นสีแดง) รวมไปถึงการใส่ Error Bars ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองเส้น

- PDB181-K420K-103C (Type C)



รูปที่ 23 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดลองได้กับค่าจาก Data Sheet ของ PDB181-K420K-103C

จากการภาพนี้สามารถเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นสีเขียว) มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จาก Datasheet (เส้นสีแดง) รวมไปถึงการใส่ Error Bars ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองเส้น

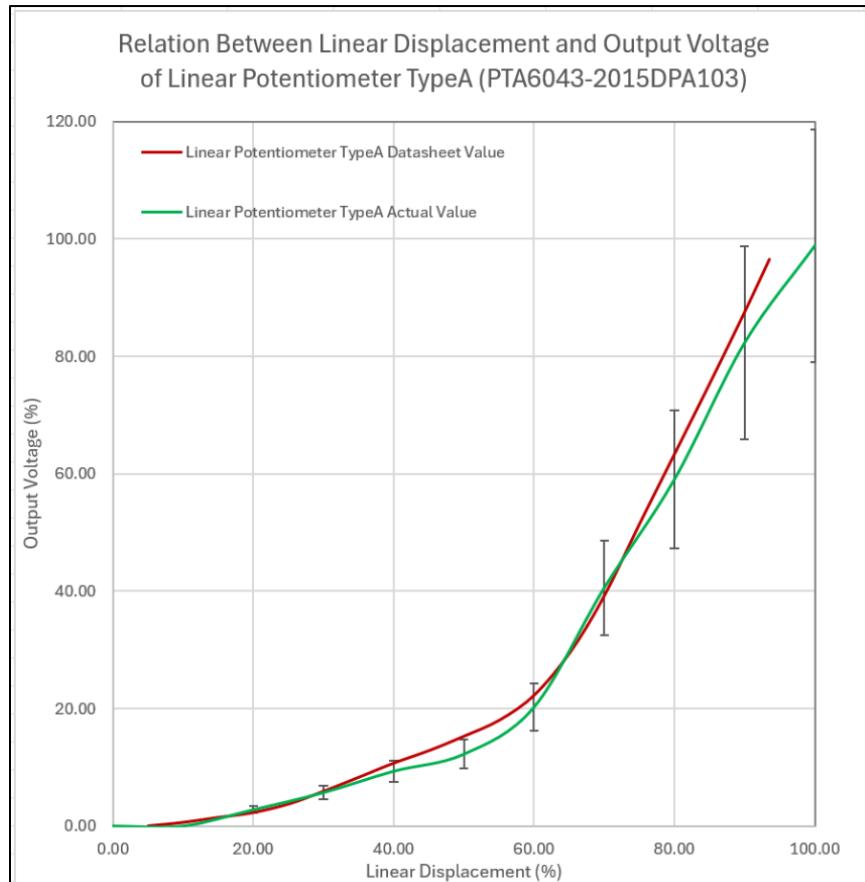
### 1.10.2 ผลการทดลองที่ 2 Linear Potentiometer

Line	Linear_Potentiometer_TypeA	Linear_Potentiometer_TypeB
0	0	0
10	0	155.2298
20	112.9975	580.6808
30	232.2996	1000.572
40	381.729	1387.21
50	500.5908	1902.805
60	828.4466	2350.279
70	1660.864	2815.297
80	2417.509	3190.075
90	3371.74	3714.281
100	4049.433	4061.705

ตารางที่ 2 แสดงค่า RMS ของ Linear Potentiometer ชนิด A และ B

เมื่อได้ค่าในทุกช่วงที่ต้องการมาแล้ว ลำดับถัดไป ทางคณะผู้จัดทำจึงนำค่าเหล่านี้มาพล็อตเป็นกราฟด้วยการนำค่าที่ได้จากการทดลองพล็อตเปรียบเทียบกับค่าจาก Datasheet โดยไม่ลืมวิเคราะห์ช่วงค่าความคลาดเคลื่อน (Standard Resistance Tolerance)  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ ให้สามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะและความถูกต้องของการทดลอง Rotary Potentiometer แต่ละชนิดได้ง่ายขึ้น

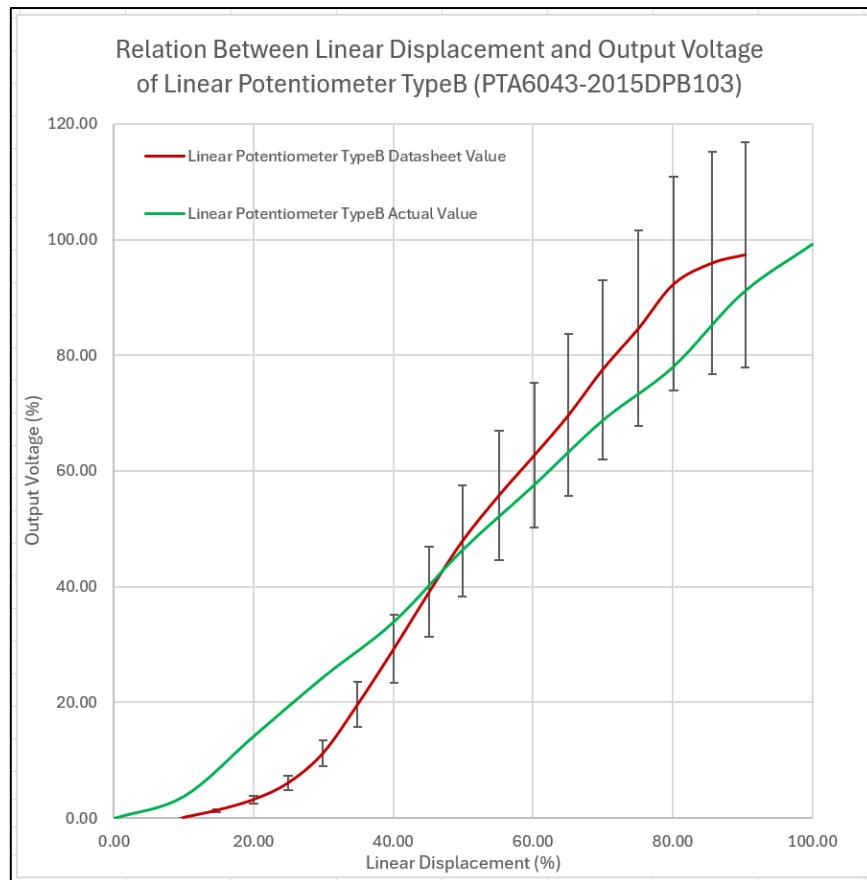
- PTA6043-2015DPA103



รูปที่ 24 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดลองได้กับค่าจาก Data Sheet ของ PTA6043-2015DPA103

จากราฟนี้สามารถเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นสีเขียว) มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จาก Datasheet (เส้นสีแดง) รวมไปถึงการใส่ Error Bars ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองเส้น

- PTA6043-2015DPB103

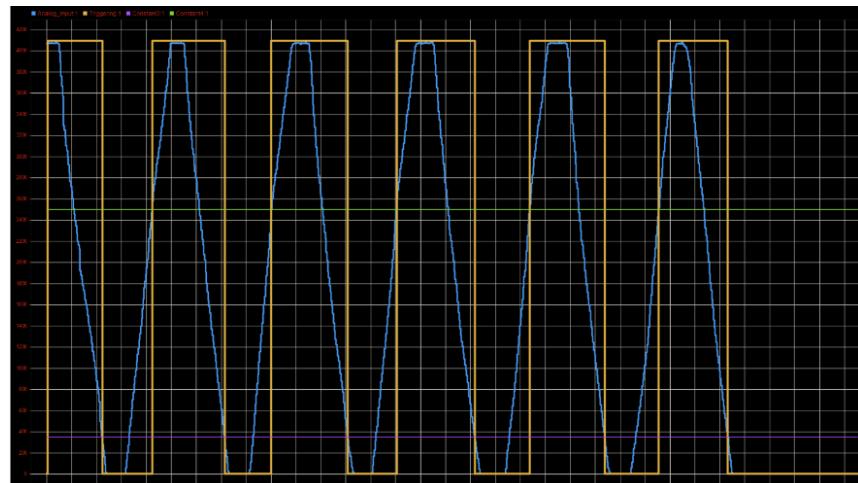


รูปที่ 25 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดสอบได้กับค่าจาก Data Sheet ของ PTA6043-2015DPB103

จากการนี้สามารถเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบจริง (เส้นสีเขียว) มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จาก Datasheet (เส้นสีแดง) รวมไปถึงการใส่ Error Bars ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองเส้น

### 1.10.3 ผลการทดลองที่ 3 Schmitt Trigger

คณะผู้จัดทำได้นำค่า ADC ของ Rotary Potentiometer Type B มาเทียบบัญญาติไตรยางค์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อพิสูจน์ว่า Potentiometer สามารถเปรียบเทียบค่า ADC ให้เป็นค่าแรงดันขาออกได้ ได้ ตามหลักการ Digital ที่จะให้ค่า High/Low ขึ้นอยู่กับแรงดันขาเข้า ทำให้ได้ค่าอุกมาตามตารางดังนี้หลังจากที่คณะผู้จัดทำได้เลือกใช้ค่าของ ADC แทนการเลือกช่วงของค่าแรงดัน คณะผู้จัดทำจึงเลือกช่วง High Threshold สำหรับการ Trigger ให้เป็นค่า Digital High ด้วยค่า ADC ที่ 2500 และเลือกช่วง Low Threshold สำหรับการ Trigger ให้เป็นค่า Digital Low ด้วยค่า ADC ที่ 350 เนื่องจากการเลือกช่วงที่กว้างทำให้สามารถสังเกตผลการทดลองได้อย่างชัดเจน จากการออกแบบรูปลักษณะนี้ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถได้กราฟจาก Data Inspector ดังรูปต่อไป



รูปที่ 26 แสดงถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ADC ที่เทียบกับค่าสัญญาณรูปแบบ Schmitt Trigger

กราฟแสดงการทำงานโดยแบ่งช่วงการ Trigger เป็น 2 ช่วง คือช่วง High Threshold และช่วง Low Threshold โดยการทำงานอยู่ในลักษณะที่เมื่อค่าอยู่ในช่วง 0 จะ Trigger เป็น 1 (เทียบเท่าค่าสัญญาณ 4095 ในกราฟ) ก็ต่อเมื่อหมุน Rotary Potentiometer ให้มีค่ามากกว่า High Threshold หรือตั้งแต่ 2500 เป็นต้นไป และเมื่อค่าอยู่ในช่วง 1 (เทียบเท่าค่าสัญญาณ 4095 ในกราฟ) จะ Trigger เป็น 0 ก็ต่อเมื่อหมุน Rotary Potentiometer ให้มีค่ามากกว่า Low Threshold หรือต่ำกว่า 351 เป็นต้นไป

## 1.11 สรุปผล

### 1.11.1 การทดลอง 1 Rotary Potentiometer

จากการภาพที่สรุปผลการทดลองของ Rotary Potentiometer ทั้งชนิด A, B และ C ทำให้คณะผู้จัดทำเห็นได้ว่า ค่าได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก Datasheet มีความสอดคล้องกัน และค่าที่ได้ยังอยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อนหั้งชนิด A, B และ C

#### 1) PDB181-K420K-103A2 (Rotary Potentiometer Type A)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การหมุน Rotary Potentiometer Type B ส่งผลให้ Output Voltage เปลี่ยนแปลงไปโดยตรง โดยเมื่อการวิเคราะห์ผ่านกราฟการทดลอง จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากรูปที่ 18 และเมื่อมีการใส่ Error Bars เพิ่มก็สามารถแสดงให้เห็นช่วงของค่าที่คาดการณ์ได้ และช่วยบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทดลอง โดยกราฟที่ได้จากการทดลองนั้นมีลักษณะเป็น Audio/Logarithmic Taper ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับใน Datasheet คือ แรงดันข้าออกมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบช้าในช่วงแรก จนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการหมุน

#### 2) PDB181-K420K-103B (Rotary Potentiometer Type B)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การหมุน Rotary Potentiometer Type B ส่งผลให้ Output Voltage เปลี่ยนแปลงไปโดยตรง โดยเมื่อการวิเคราะห์ผ่านกราฟการทดลอง จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากรูปที่ 19 และเมื่อมีการใส่ Error Bars เพิ่มก็สามารถแสดงให้เห็นช่วงของค่าที่คาดการณ์ได้ และช่วยบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทดลอง โดยเป็นกราฟที่ได้จากการทดลองนั้นมีลักษณะเป็น Linear Taper ซึ่งเป็นลักษณะกราฟเดียวกับใน Datasheet คือ แรงดันข้าออกมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามระยะการหมุน

#### 3) PDB181-K420K-103C (Rotary Potentiometer Type C)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การหมุน Rotary Potentiometer Type C ส่งผลให้ Output Voltage เปลี่ยนแปลงไปโดยตรง โดยเมื่อการวิเคราะห์ผ่านกราฟการทดลอง จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากรูปที่ 20 และเมื่อมีการใส่ Error Bars เพื่อสามารถแสดงให้เห็นช่วงของค่าที่คาดการณ์ได้ และช่วยบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทดลอง ในลักษณะที่ค่าของแรงดันข้าออกที่ลดลงในลักษณะ Reverse

Audio/Logarithmic ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับใน Datasheet คือ ค่าแรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในช่วงต้น และค่อย ๆ ลดลงในช่วงท้ายของการหมุน

#### 1.11.2 การทดลอง 2 Linear Potentiometer

จากการภาพที่สรุปผลการทดลองของ Linear Potentiometer ทั้งชนิด A และ B ทำให้คณะผู้จัดทำเห็นได้ว่า ค่าได้จากการทดลองและค่าที่ได้จาก Datasheet มีทั้งสอดคล้องและไม่สอดคล้องกัน ดังนี้

##### 1) PTA6043-2015DPA103

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเลื่อน Linear Potentiometer Type A ส่งผลให้ Output Voltage เปลี่ยนแปลงไปโดยตรง โดยเมื่อการวิเคราะห์ผ่านกราฟการทดลอง จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากรูปที่ 21 และเมื่อมีการใส่ Error Bars เพื่อช่วยแสดงให้เห็นช่วงของค่าที่คาดการณ์ได้ และช่วยบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการทดลอง ในลักษณะ Audio/Logarithmic Taper คือ แรงดันข้ออกมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบช้าในช่วงแรก จนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของการหมุน

##### 2) PTA6043-2015DPB103

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การหมุน Rotary Potentiometer Type B ส่งผลให้ Output Voltage เปลี่ยนแปลงไปโดยตรง โดยเมื่อการวิเคราะห์ผ่านกราฟการทดลอง จะสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จาก Datasheet โดยอ้างอิงจากรูปที่ 22 และเมื่อมีการใส่ Error Bars ที่แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าทั้งสองเส้น โดยกราฟจาก Datasheet ให้ลักษณะที่ใกล้กับกราฟ Sigmoid หรือกราฟ S-Curve คือ แรงดันข้ออกมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบช้าในช่วงแรก จนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงกลาง และช้าลงในช่วงท้ายของการหมุน ซึ่งแตกต่างจากกราฟที่ได้จากการทดลองที่มีลักษณะเดียวกันในบางช่วง แต่โดยรวมแล้วกราฟมีความเป็นเส้นตรงมากกว่า ทำให้ไม่สอดคล้องกับช่วง Error Bar

### 1.11.3 การทดลอง 3 Schmitt Trigger

จากการทดลองรูปแบบวงจร Schmitt Trigger ด้วย Rotary Potentiometer Type B

สามารถยืนยันได้ว่าคุณผู้จัดทำสามารถแปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ได้ด้วยรูปแบบวงจร Schmitt Trigger ถึงแม่กราฟที่ได้จะเป็นกราฟจากค่า ADC แต่สิ่งนี้ก็สามารถบ่งบอกได้ถึงหลักการทำงานของรูปแบบวงจร Schmitt Trigger นั้นคือ วงจร มีการทำงานโดยแบ่งช่วงการ Trigger เป็น 2 ช่วง คือช่วง High Threshold และช่วง Low Threshold และการหมุนหรือการเลื่อนของ Potentiometer จะกำหนดว่า Output จะเป็นค่าใด โดยจะให้ Output High เมื่อหมุนหรือเลื่อนให้ค่ามากกว่า High Threshold และให้ Output Low เมื่อหมุนหรือเลื่อนให้ค่าต่ำกว่า Low Threshold

## 1.12 อภิปรายผล

ในการทดลอง Potentiometer ทั้งแบบ Linear และ Rotary พบว่าค่าที่วัดได้มีความสอดคล้องกับค่าใน Data Sheet ซึ่งสามารถช่วยยืนยันความถูกต้องของการทดลองให้แก่คุณผู้จัดทำ โดยสามารถแยกย่อยประเด็นวิเคราะห์ได้ดังนี้

- 1) สัญญาณรบกวน (Noise): แม้ว่าจะเก็บข้อมูลด้วย 100 Samplings ทุกค่า ก็ไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนออกได้ 100 เปอร์เซ็นต์
- 2) ความละเอียดในการเก็บข้อมูล: ใน Linear Potentiometer การเก็บข้อมูลทุก ๆ 10% ของระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด (60 มิลลิเมตร) อาจไม่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ในความละเอียดที่สูงมากขึ้น ซึ่งเนื่องจากจะสามารถเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากการทดลองมีความคล้ายเส้นตรงมากกว่ากราฟจาก Data Sheet สืบให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างรายละเอียด
- 3) การหาค่าเฉลี่ยด้วย RMS: การใช้ค่า RMS สำหรับการหาค่าเฉลี่ยช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน ทั้งนี้ควรพิจารณาว่าวิธีการนี้เหมาะสมกับลักษณะของสัญญาณแบบใดบ้าง หรือวิธีการเฉลี่ยอื่นใดที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในกรณีที่ต่างกันไป
- 4) ค่าผิดพลาดที่อาจเกิดจากอุปกรณ์: ในอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง สามารถเกิดค่าความผิดพลาดหรือค่าความคลาดเคลื่อนได้เสมอ ทำให้ต้องคำนึงถึงปัจจัยนี้เสมอเพื่อบังคับข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจาก Hardware หรือ Software

- 5) ปัจจัยภายนอก : ปัจจัยภายนอกที่สามารถมีผลต่อการทดลอง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรืออื่น ๆ อาจส่งผลต่อค่าที่วัดได้ เนื่องจาก Potentiometer เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ที่มีความสัมพันธ์แบบ非線性的แบบ
- 6) ความสอดคล้องของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จาก Datasheet : จากการทดลอง Rotary Potentiometer ชนิด A, B, C และ Linear Potentiometer Type A พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จาก Datasheet คือ Error Bars ของแต่ละกราฟสามารถครอบคลุมค่าคลาดเคลื่อนได้เป็นส่วนใหญ่ พิสูจน์ให้เห็นถึงความแม่นยำในการทดลอง แต่ใน Rotary Potentiometer ชนิด B กลับมีจุดที่คลาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยกราฟที่ได้จากการทดลองจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตาม Linear Taper แตกต่างจากราฟจาก Datasheet ที่เป็น Sigmoid หรือ S-Curve ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยที่มากจากการค่าผิดพลาดที่อาจเกิดจากอุปกรณ์ หรือปัจจัยภายนอก ตามที่ได้กล่าวไป
- 7) ทำงานของรูปแบบวงจร Schmitt Trigger : การทดลอง Schmitt Trigger แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital โดยแม่กราฟที่ได้จากการทดลองจะเป็นค่าจาก ADC แต่ก็สามารถบ่งบอกถึงการทำงานของวงจรในเบื้องต้นได้ โดยวงจรสามารถแบ่งช่วงการ Trigger ได้อย่างชัดเจน ทำให้มั่นใจได้ว่างจร Schmitt Trigger มีการทำงานตามทฤษฎี

### 1.13 ข้อเสนอแนะ

- 1) เพิ่มจำนวน Sampling หรือปรับปรุงวิธีการเก็บข้อมูล เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน
- 2) ศึกษาและนำเทคนิคการประมวลผลสัญญาณเพิ่มเติมมาใช้ เช่น การกรองสัญญาณแบบดิจิทัลหรือการวิเคราะห์สเปกตรัม
- 3) ทำการทดลองในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ เพื่อลดปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลต่อผลการวัด
- 4) เปรียบเทียบผลการทดลองกับอุปกรณ์หรือวิธีการวัดอื่น ๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง

- 5) ควรตรวจสอบวิธีการทดลอง Linear Potentiometer Type B เพื่อหาสาเหตุของการเกิดเส้นกราฟที่ไม่เป็นไปตาม Datasheet
- 6) ทำการทดลองการ Schmitt Trigger ในรูปแบบแรงดันข้าออกเพิ่มเติม เพื่อยืนยันว่าจะสามารถทำงานได้ในรูปแบบของช่วงแรงดัน
- 7) เพิ่มการทดลองการทำงานของ Schmitt Trigger ใน Potentiometer ประเภทอื่น ๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องของวงจร

โดยสรุปการทดลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่า Potentiometer ทั้งแบบ Linear และ Rotary สามารถให้ค่าการวัดที่สอดคล้องกับข้อมูลจากผู้ผลิต แต่ยังมีพื้นที่ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความนำเชื่อถือของการวัดในอนาคต

## 1.14 เอกสารอ้างอิง

- [1] BIG DATA AND THE CENTRAL LIMIT THEOREM: A STATISTICAL LEGEND, Available online [2019] : [https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Bouza/publication/11342882\\_Bias\\_in\\_Visual\\_Attention\\_Behavior\\_in\\_a\\_Normal\\_School-Aged\\_Population/links/5d1de73c92851cf440636d40/Bias-in-Visual-Attention-Behavior-in-a-Normal-School-Aged-Population.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Bouza/publication/11342882_Bias_in_Visual_Attention_Behavior_in_a_Normal_School-Aged_Population/links/5d1de73c92851cf440636d40/Bias-in-Visual-Attention-Behavior-in-a-Normal-School-Aged-Population.pdf)
- [2] BOURNS, PTA6043-2015DPA103 PTA Series Low Profile Slide Potentiometer, Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.mouser.com/datasheet/2/54/pta-778345.pdf>
- [3] BOURNS, PTA6043-2015DPB103 PTA Series Low Profile Slide Potentiometer, Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/pta.pdf>
- [4] BOURNS, PDB181-K420K-103A2 PDB18 Series 17 mm Rotary Potentiometer, Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PDB18.pdf>
- [5] BOURNS, PDB181-K420K-103B PDB18 Series 17 mm Rotary Potentiometer, Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PDB18.pdf>
- [6] BOURNS, PDB181-K420K-103C PDB18 Series – 17 mm Rotary Potentiometer, Available online [ม.ป.ป.] : <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

## บทที่ 2

### Encoder

#### 2.1 จุดประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder
- 2) เพื่อศึกษาการ Configuration Parameter ใน IOC ให้เหมาะสมกับการตั้งค่าการอ่าน Encoder
- 3) เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป โดยจะเลือกไปที่รูปแบบ Phase ของสัญญาณในแต่ละ Output ของ Incremental Encoder
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการหาค่า Pulses Per Revolution และ Resolution ของ Incremental Encoder
- 5) เพื่อศึกษาการอ่านค่าจาก Incremental Encoder ในรูปแบบการสัญญาณแบบ Quadrature Encoder ได้ทุกรูปแบบ และทุกวิธีการ (QEI และ Polling Method)
- 6) เพื่อศึกษาวิธีอ่านค่า Raw Signal ของ QEI Method และแปลงเป็น Relative Position (Pulses) ด้วยการ Integrate Discrete Velocity (Diff\_counts) และแสดงผลพร้อมกันได้
- 7) เพื่อศึกษาวิธีประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการส่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32 -G474RE โดยใช้สัญญาณจากการหมุน Incremental Encoder ด้วยมือเป็น Input และ และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ และแสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แบ่งตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Angular Position, Angular Velocity ในหน่วย SI
- 8) เพื่อวิเคราะห์ ข้อดี-เสีย ของการอ่านด้วย QEI และ Polling Method
- 9) เพื่อศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมสำหรับการทำ Homing Incremental Encoder

#### 2.2 สมมติฐาน

เมื่อทำการหมุน Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา ค่า Relative Position และ Velocity ที่ได้จากการอ่านค่าผ่าน QEI และ Polling จะมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการหมุนที่ถูกต้อง และมีความสัมพันธ์กับโหมดการอ่านค่าแบบ  $x1$ ,  $x2$  และ  $x4$  โดยการอ่านค่าแบบ QEI จะมีความแม่นยำและเสถียรกว่าการอ่านค่าแบบ Polling

### 2.3 ตัวแปร

- 1) การทดลองที่ 1 การอ่านค่า Encoder แบบ QEI:

ตัวแปรต้น : ทิศทางการหมุนของ Encoder และโหมดการอ่านค่าแบบ x1, x2 และ x4 แบบ QEI

ตัวแปรตาม : Raw Signal, Relative Position, Angular Position, Angular Velocity จาก Encoder

ตัวแปรควบคุม : Encoder ประเภท AMT103-V หรือ BOURNS PEC11R-4220F-N0024,

STM32 Nucleo-G474RE และความเร็วในการหมุนของ Encoder

- 2) การทดลองที่ 2 การอ่านค่า Encoder แบบ Polling

ตัวแปรต้น : ทิศทางการหมุนของ Encoder และโหมดการอ่านค่าแบบ x1, x2 และ x4 แบบ Polling

ตัวแปรตาม : Raw Signal, Relative Position, Angular Position, Angular Velocity จาก Encoder

ตัวแปรควบคุม : Encoder ประเภท AMT103-V หรือ BOURNS PEC11R-4220F-N0024, STM32

Nucleo-G474RE และความเร็วในการหมุนของ Encoder

- 3) การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบการอ่านค่า Encoder ระหว่าง QEI และ Polling

ตัวแปรต้น : ทิศทางการหมุนของ Encoder และโหมดการอ่านค่าแบบ x1, x2 และ x4 แบบ QEI และ Polling

ตัวแปรตาม : Relative Position จาก Encoder

ตัวแปรควบคุม : Encoder ประเภท AMT103-V หรือ BOURNS PEC11R-4220F-N0024, STM32

Nucleo-G474RE และความเร็วในการหมุนของ Encoder

### 2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1) Incremental Encoder : อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการหมุนและตำแหน่งของวัตถุ โดยการสร้างสัญญาณ Pulse ในการหมุนแต่ละครั้ง ใช้เพื่อรับทิศทางและความเร็วของการหมุน โดยการนำค่า Pulse ที่ได้มาแปลงเป็นตำแหน่งเชิงมุมได้

- 2) Encoder Mode (STM32CubeMX) : การตั้งค่า Mode ใน STM32CubeMX สำหรับการอ่านค่าจาก Encoder โดยตรงผ่าน Quadrature Encoder Interface (QEI) ทำให้สามารถอ่านค่าตำแหน่ง (Position) และทิศทางการหมุนได้โดยใช้ Timer ของ STM32

- 3) QEI (Quadrature Encoder Interface) : หนึ่งในวิธีการค่าสัญญาณจาก Incremental Encoder โดยอ่านค่าแบบ Quadrature (ช่อง A และ B) เพื่อให้ทราบถึงทิศทางและจำนวน Pulse ของการหมุน ทำให้มีความแม่นยำและใช้ทรัพยากระบบน้อย
- 4) Polling : วิธีการอ่านค่าสัญญาณจาก Encoder โดยใช้การตรวจสอบสถานะของสัญญาณเป็นระยะ ๆ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความแม่นยำมาก แต่ก็มีการใช้ทรัพยากรของระบบมากกว่าวิธี QEI
- 5) Block Encoder : บล็อกที่ใช้ใน Simulink เพื่ออ่านค่าจาก Encoder โดยตรง สามารถนำมาใช้อ่านตำแหน่งหรือความเร็วจาก Encoder ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการประมวลผลสัญญาณในระบบควบคุม
- 6) Block Double : บล็อกใน Simulink ที่แสดงค่าตัวแปรในรูปแบบข้อมูลประเภท Double (ทศนิยม) เพื่อใช้ในการคำนวณที่ต้องการความละเอียดสูงในการแสดงผลสัญญาณจาก Encoder
- 7) Block MATLAB Function : บล็อกที่ใช้ใน Simulink เพื่อเขียนโค้ด MATLAB สำหรับสร้างฟังก์ชันหรือการคำนวณเพิ่มเติม โดยช่วยให้สามารถกำหนดการประมวลผลสัญญาณในรูปแบบที่ซับซ้อนหรือเฉพาะเจาะจงได้
- 8) Count Period : ช่วงเวลาที่ใช้ในการนับจำนวน Pulses ที่อ่านได้จาก Encoder ในช่วงเวลาที่กำหนดซึ่งมักใช้ในการคำนวณความเร็วหรือการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ Encoder
- 9) Pulses Per Revolution (PPR) : จำนวน Pulse ที่เกิดขึ้นจากการหมุนของ Encoder ครบหนึ่งรอบ (360 องศา) ซึ่งใช้ปัจงบอกความละเอียดของ Encoder โดยหากมีค่า PPR สูง แสดงว่ามีความละเอียดมาก

- 10) Resolution : ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Encoder ให้ละเอียดที่สุด ขึ้นอยู่กับจำนวน Pulse ที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบ โดยการมี Resolution สูงทำให้สามารถวัดค่าตำแหน่งได้แม่นยำมากขึ้น สามารถคำนวณได้จากการ

$$\text{Resolution} = \frac{2\pi r}{PPR}$$

เมื่อ              Resolution คือ ความสามารถในการทำได้ มีหน่วยเป็น  
 R คือ รัศมีจานหมุนของ Encoder มีหน่วยเป็น เมตร (m)  
 PPR คือจำนวน Pulse ที่เกิดขึ้นจากการหนึ่งรอบการหมุน มีหน่วยเป็น PPR

- 11) Relative Position : ค่าตำแหน่งสัมพัทธ์เชิงมุมที่ได้จากการนับจำนวน Pulse ของ Encoder โดย คำนวณจากจุดเริ่มต้นที่กำหนดไว้ โดยจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามทิศทางการหมุนของ Encoder

- 12) Angular Position : ตำแหน่งเชิงมุมของ Encoder ที่แสดงเป็นมุมในการหมุน มักอยู่ในหน่วยองศา (Degrees) หรือเรเดียน (Radians) ซึ่งคำนวณจากจำนวน Pulse ของ Encoder จากจุดเริ่มต้น

- 13) Angular Velocity : ความเร็วในการหมุนของ Encoder ที่คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ตำแหน่งเชิงมุม มีหน่วยเป็น rad/s หรือ °/s ขึ้นอยู่กับการตั้งค่า

- 14) STM32 Nucleo-G474RE : เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของ STMicroelectronics ที่ออกแบบ มาเพื่อช่วยให้นักพัฒนาสามารถทดลองและทดสอบการพัฒนาซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ได้อย่าง ง่ายดาย

- 15) Simulink : เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย MathWorks เพื่อการจำลองระบบและออกแบบโมเดลแบบ Block Diagram โดย Simulink ถูกออกแบบให้ใช้งานง่ายสำหรับการจำลองทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ ต่าง ๆ และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จริงเพื่อควบคุมและเก็บข้อมูลได้

- 16) Block ADC/Block Analog to Digital Converter : เป็น Block พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้จำลอง การแปลงสัญญาณจากรูปแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นรูปแบบดิจิทัล (Digital)

- 17) Data Inspector : พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time และทำการบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ภายหลัง
- 18) Visualize Signal : การแสดงผลสัญญาณใน Simulink ด้วยรูปแบบกราฟหรือภาพที่แสดงถึงคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น การแสดงผลรูปคลื่นของสัญญาโนนาล็อกหรือดิจิทัล เพื่อช่วยวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของสัญญาณนั้น
- 19) โปรแกรม Tracker : ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยใช้เทคโนโลยีติดตามตำแหน่งและวิเคราะห์ข้อมูลจากวิดีโอ

## 2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 1) STM32 Nucleo-G474RE : ทำหน้าที่เป็นบอร์ดรับสัญญาณแรงดันที่ได้จาก Potentiometer โดยเชื่อมต่อ Potentiometer เข้ากับขา ADC ของบอร์ด ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณ Analog จาก Potentiometer เป็นสัญญาณ Digital เพื่อส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink ข้อมูลที่ถูกแปลงนี้จะถูกนำไปบันทึกและวิเคราะห์ใน MATLAB Simulink เพื่อตรวจสอบความสมพันธ์ระหว่างมุกการหมุนและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
- 2) Count Period : เป็นช่วงเวลาในการนับ Pulses ที่อ่านได้จาก Encoder ภายในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อนำมาคำนวณค่า Relative Position และ Angular Velocity ซึ่งการกำหนด Count Period จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและความเร็วได้
- 3) Simulink : Simulink จะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองการเก็บข้อมูลจากบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้บล็อก Encoder, Double, Digital Port Read และ MATLAB Function เพื่ออ่านค่าจาก Encoder และคำนวณหา Angular Position และ Angular Velocity และแสดงผลแบบกราฟผ่าน Data Inspector
- 4) Visualize Signal: การสร้างกราฟหรือการแสดงข้อมูลของสัญญาณที่ได้ด้วย Simulink เพื่อแสดงสัญญาณตามเวลาใน Fixed-step size

- 5) Block ADC หรือ Block Analog to Digital Converter : บล็อก ADC นี้จะทำหน้าที่อ่านค่าความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นจาก Potentiometer ผ่านขา ADC ของบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE จากนั้นข้อมูลแรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลและเก็บเป็นข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อนำไปใช้เคราะห์และแสดงผลเป็นกราฟในโปรแกรม Simulink
- 6) Data Inspector : พังก์ชันใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ การทดลองจะทำโดยแสดงผลสัญญาณ Output จาก Potentiometer ที่ผ่านวงจร Schmitt-trigger และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time
- 7) PPR : คือค่าที่ pulse ที่ Encode หมุนครบ 1 รอบแล้วอ่านได้โดยที่ PPR นี้ถูกคิดจากค่า PPR ของ Encoder กับ Mode การอ่านแล้ว

## 2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Datasheet

<b>ELECTRICAL</b>					
parameter	conditions/description	min	typ	max	units
power supply	VDD	3.6	5	5.5	V
current consumption	with unloaded output		8		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

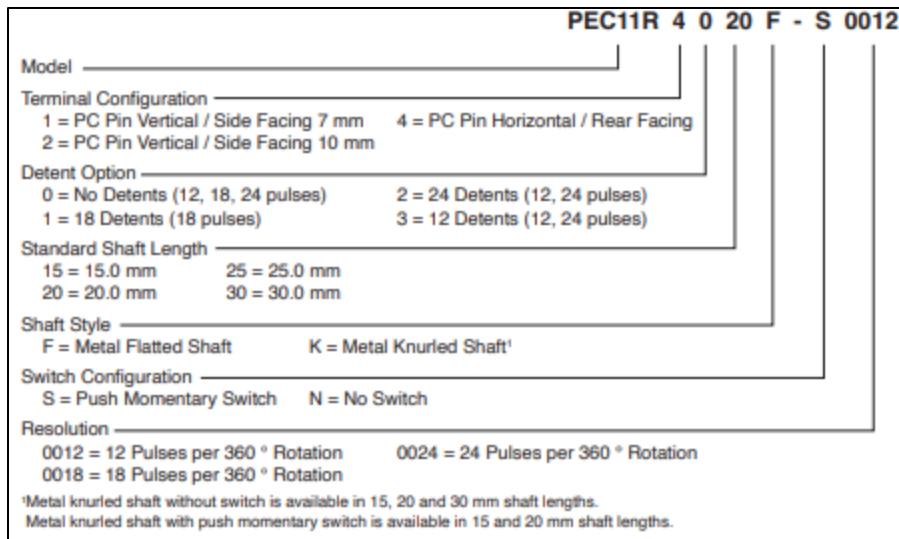
<b>INCREMENTAL CHARACTERISTICS</b>					
parameter	conditions/description	min	typ	max	units
channels	quadrature A, B, and X index				
waveform	CMOS voltage square wave				
phase difference	A leads B for CCW rotation (viewed from front)	90			degrees
quadrature resolutions <sup>1</sup>	48, 96, 100, 125,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

Notes:

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

รูปที่ 27 Datasheet ของ Incremental Encoder AMT103-V

จาก Datasheet ใช้ในการหา PPR ของ Incremental Encoder AMT103-V และใช้ในการอ้างอิงหนึ่งรอบการหมุนของ Encoder



รูปที่ 28 Datasheet ของ BOURNS PEC11R-4220F-N0024

จาก Datasheet ใช้ในการหา PPR ของ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 และใช้ในการอ้างอิง  
หนึ่งรอบการหมุนของ Encoder

## 2.7 วิธีดำเนินการทดลอง

ในการทดสอบ Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 เริ่มจากการเชื่อมต่อ Encoder เข้ากับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE จากนั้นตั้งค่า Pin ใน STM32CubeMX ในการอ่านค่าแบบ QEI และ GPIO\_INPUT เพื่ออ่านค่าจาก Encoder ทั้งแบบ QEI และ Polling หลังจากนั้นจึงใช้ MATLAB Simulink เพื่ออ่านค่า ของ Encoder โดยใช้บล็อก Encoder ใน Simulink เพื่ออ่านค่าแบบ QEI และเขียนโค้ด MATLAB เพื่อคำนวณหา Relative Position และ Velocity จากค่า QEI ที่ได้มากจาก Encoder ทั้งในโหมด x1 x2 และ x4 และใช้บล็อก Digital Port Read เพื่อทำการเก็บค่ามาคิดในรูปแบบ Polling ในแบบ x1 x2 และ x4 ด้วยการเขียนโค้ด MATLAB หลังจากนั้นจึงทำการหมุน Encoder ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาเพื่อเก็บข้อมูลตำแหน่ง ทิศทาง และความเร็วที่เปลี่ยนแปลงโดยบันทึกค่าใน MATLAB Simulink พร้อมแสดงผลแบบกราฟ นอกจากนี้ยังเพิ่มการรีเซ็ตค่า Relative position โดยกดปุ่มเพื่อรีเซ็ตค่า Relative position ให้เป็นศูนย์ สุดท้ายใช้ฟังก์ชัน Data Inspector ใน Simulink เพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ทิศทาง และความเร็วของ Encoder ที่บันทึกไว้พร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการอ่านค่าแบบ QEI และ Polling

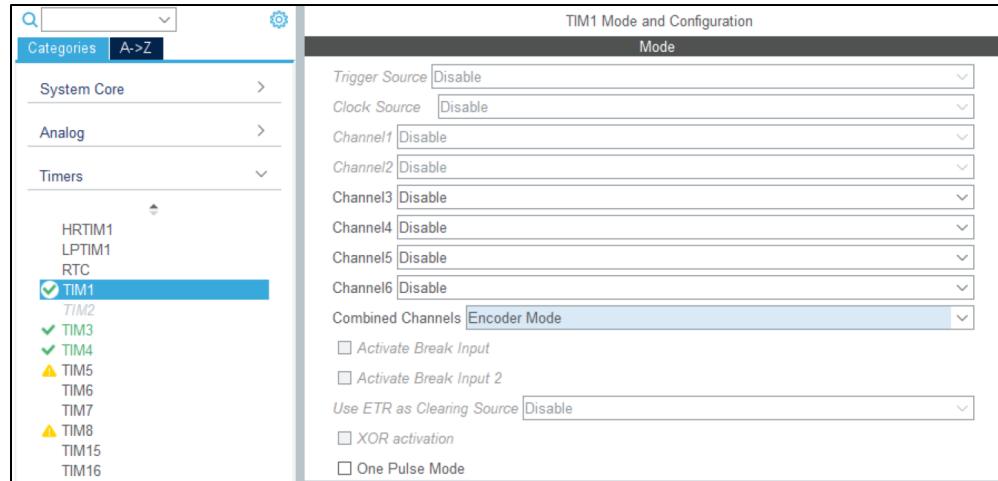
## 2.8 วัสดุอุปกรณ์

- 2.8.1 Incremental Encoder AMT103-V จำนวน 1 อัน
- 2.8.2 BOURNS PEC11R-4220F-N0024 จำนวน 1 อัน
- 2.8.3 STM32 Nucleo-G474RE จำนวน 1 บอร์ด
- 2.8.4 สายอัปโหลด จำนวน 1 เส้น
- 2.8.5 EncoderXplorer จำนวน 1 ชุด (ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, Incremental Encoder, 3D-Print ใช้สำหรับการวัดมุมการหมุนของ Incremental Encoder ลักษณะคล้ายไม้ Protractor)
- 2.8.6 สาย Jumper

## 2.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 2.9.1 การทดลองที่ 1 การอ่านค่า Encoder แบบ QEI

- 1) การเชื่อมต่อระหว่าง Incremental Encoder, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์  
เนื่องจากการเชื่อมต่อของชนิด Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีลักษณะที่เหมือนกัน ทางตอนผู้เข้าทำจึงรูบคำอธิบายเข้าไว้ด้วยกันดังนี้
  - 1.) ขา 5V เชื่อม VCC ไฟ 5V
  - 2.) ขา G เชื่อม GND
  - 3.) ขา A เชื่อม TIM1\_CH1 (PC0), TIM3\_CH1 (PA6) และTIM4\_CH1(PA11)
  - 4.) ขา B เชื่อม TIM1\_CH2 (PC1), TIM3\_CH2 (PA7) และTIM4\_CH2(PA12)
 ตั้งค่าใน Pinout & Configuration ใน STM32CubeMX  
 ตั้งค่า TIM1, TIM3 และ TIM4 ให้เป็น Encoder Mode

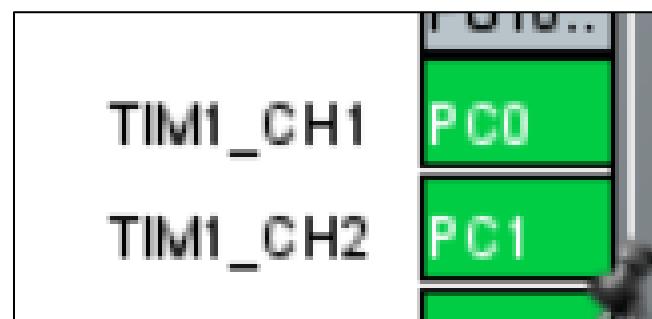


รูปที่ 29 แสดงการตั้งค่า Pinout & Configuration ใน STM32CubeMX

2) เลือก Pin ของ TIM1, TIM3 และTIM4

1) TIM1 channel 1 (TIM\_CH1) เลือกเป็น PC0

TIM1 channel 2 (TIM\_CH2) เลือกเป็น PC1



รูปที่ 30 การเลือก TIM1 Channel 1 และ 2 ใน STM32CubeMX

2) TIM3 channel 1 (TIM\_CH1) เลือกเป็น PA6

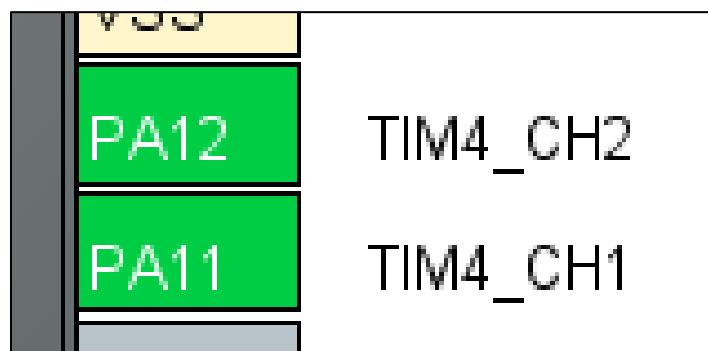
TIM3 channel 2 (TIM\_CH2) เลือกเป็น PA7



รูปที่ 31 การเลือก TIM3 Channel 1 และ 2 ใน STM32CubeMX

- 3) TIM4 channel 1 (TIM\_CH1) เลือกเป็น PA11

TIM4 channel 2 (TIM\_CH2) เลือกเป็น PA12



รูปที่ 32 การเลือก TIM4 Channel 1 และ 2 ใน STM32CubeMX

- 3) เปลี่ยนค่า Count Period ให้เป็น เป็นเลขที่มากที่สุดที่น้อยกว่า 65535 ที่ PPR ของแต่ละ Encoder หารลงตัวเพื่อให้มิ่งเกิดการข้ามค่าไป ซึ่งวิธีการคำนวณคือ

*Count Period = 65535 – (65535 % PPR)*

- 1) ค่า Count Period ของ Incremental Encoder AMT103-V ที่ได้คือ

  - a. ใน Mode x1 Incremental Encoder AMT103-V มีค่า PPR คือ 2048 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 63488
  - b. ใน Mode x2 Incremental Encoder AMT103-V มีค่า PPR คือ 4096 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 61440
  - c. ใน Mode x4 Incremental Encoder AMT103-V มีค่า PPR คือ 8192 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 57344

- 2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024
- Mode x1 BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีค่า PPR คือ 24 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 65520
  - Mode x2 BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีค่า PPR คือ 48 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 65520
  - Mode x4 BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีค่า PPR คือ 96 ทำให้ค่า Count Period เท่ากับ 65472
- 4) ตั้ง Encoder Mode ของ TIM1 ให้เป็นการอ่านแบบ x1
- Encoder Mode
Encoder Mode x1\_Tl1
- รูปที่ 33 การตั้งค่า Mode ของ TIM1 ให้อ่านค่าแบบ x1 ใน STM32CubeMX
- 5) ตั้ง Encoder Mode ของ TIM3 ให้เป็นการอ่านแบบ x2
- Encoder Mode
Encoder Mode TI2
- รูปที่ 34 การตั้งค่า Mode ของ TIM3 ให้อ่านค่าแบบ x2 ใน STM32CubeMX
- 6) ตั้ง Encoder Mode ของ TIM4 ให้เป็นการอ่านแบบ x4
- Encoder Mode
Encoder Mode TI1 and TI2
- รูปที่ 35 การตั้งค่า Mode ของ TIM3 ให้อ่านค่าแบบ x2 ใน STM32CubeMX
- 7) ตั้งค่า Fixed-step size เป็น 0.01 เพื่อความเร็วและความคงที่ต่อรอบการทำงานของโปรแกรม
- Fixed-step size (fundamental sample time):
0.01
- รูปที่ 36 การตั้งค่า Fixed-step size ของ Simulink ใน STM32CubeMX

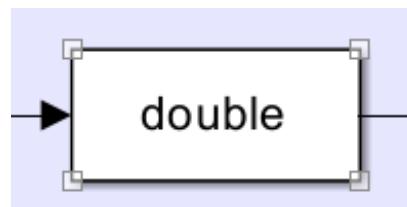
- 8) ทำการเก็บค่า QEI ทั้งแบบ x1, x2 และx4 โดยใช้ Block Encoder ใน Simulink



รูปที่ 37 แสดงการใช้ Block Encoder ใน Simulink

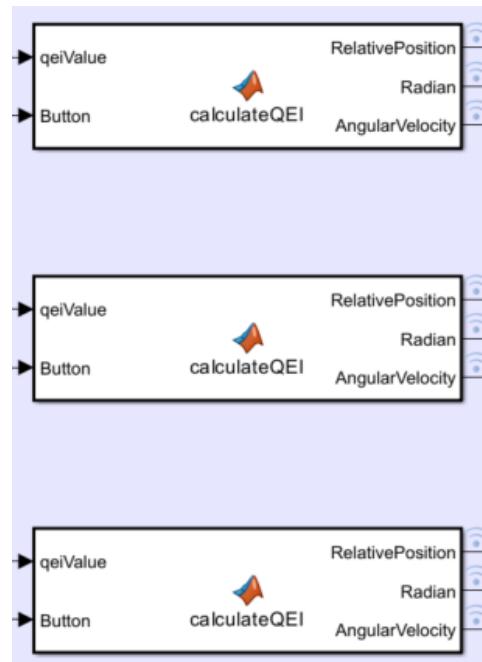
- 9) การแปลงค่าให้เป็น Relative position, Angular position และ Angular velocity

9.1) ใช้ Block double เพื่อแปลงค่าให้เป็น Double เพื่อให้ค่ามีทศนิยม 2 ตำแหน่งเพื่อให้ค่ามีความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 38 แสดงการใช้ Block double ใน Simulink

9.2) สร้าง Block MATLAB Function สำหรับการเขียนการทำงานที่ลະเอียด และสมการในการแปลงค่า



รูปที่ 39 แสดงการใช้งาน Block MATLAB Function ใน Simulink

9.3) หาค่า Relative Position โดยการนำการเปลี่ยนแปลงของค่า QEI ระหว่างการทำของ Simulink รอบปัจจุบัน และรอบก่อนมาลบกัน เพื่อให้ร่องรับกรณีที่ค่าข้ามระหว่างค่า 0 กับค่าที่มากสุด

24	% Difference between current and previous QEI values
25	delta = qeiValue - prevQEIValue;

รูปที่ 40 แสดงการหาค่าที่เปลี่ยนไปของค่าก่อนหน้าและค่าปัจจุบันใน Block MATLAB Function

สร้างกรณีมารองรับในกรณีที่ค่าเปลี่ยนแปลงปกติและกรณีที่ค่าที่ข้ามระหว่างค่า 0 กับค่าสุดท้าย

32	% Detect wrap-around conditions and adjust the signed count accordingly
33	if delta > maxQEIValue / 2
34	% Counter wrapped from 0 to maxQEIValue
35	signedCount = signedCount - (maxQEIValue - delta + 1);
36	elseif delta < -maxQEIValue / 2
37	% Counter wrapped from maxQEIValue to 0
38	signedCount = signedCount + (maxQEIValue + delta + 1);
39	else
40	% Normal counting
41	signedCount = signedCount + delta;
42	end

รูปที่ 41 แสดงเงื่อนไขการแปลงเป็น Relative Position ใน Block MATLAB Function

9.4) หาค่า Angular position(radians) โดยการนำค่า Relative position ที่ได้มามาเข้าสมการ

$$\text{Angular Position} = \text{Relative Position} \times \left( \frac{1}{PPR} \right) \times 2$$

58	% Output the Radian
59	Radian = (signedCount / encoderResolution) * 2 * pi;

รูปที่ 42 แสดงเงื่อนไขการแปลงเป็น Relative Position ใน Block MATLAB Function

9.5) หาค่า Angular Velocity (Radians per second) โดยการหาการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา (delta) โดยนำ Relative Position ปัจจุบัน มาลบกับ Relative Position ของรอบการทำงานก่อนหน้าใน Simulink และนำค่าที่ได้ไปหาร 0.01 เพื่อให้เป็นการเปลี่ยนแปลงต่อวินาที อันเนื่องมาจาก

Fixed-step size ได้ถูกตั้งค่าไว้ที่ 0.01 และในลำดับสุดท้ายจึงสามารถนำค่าที่ได้ไปแปลงเป็น Radians per second ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Angular Velocity} = \text{Delta} \times 0.01 \times \left( \frac{1}{PPR} \right) \times 2$$

```

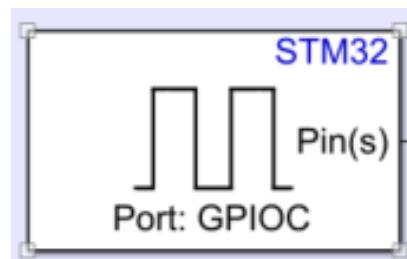
44 % Calculate the change in signed position (AngularVelocity in counts per step)
45 AngularVelo = signedCount - prevSignedCount;
46
47 % Calculate AngularVelocity in terms of radians per second
48 AngularVelo = AngularVelo / fixedStepSize;
49 AngularVelo = (AngularVelo / encoderResolution) * 2 * pi;

```

รูปที่ 43 แสดงการแปลงเป็น Relative Position เป็น Angular Velocity ใน Block MATLAB Function

### 11) สร้างปุ่มสำหรับการรีเซ็ตตำแหน่ง

- เก็บค่าปุ่มบนบอร์ดด้วย Block Digital Port Read (GPIOC 13)



รูปที่ 44 แสดงการใช้ Block Encoder ใน Simulink

- ใน Block MATLAB Function นำค่าที่เก็บจากปุ่มมาสร้างกรณีในการรีเซ็ตค่า Relative Position

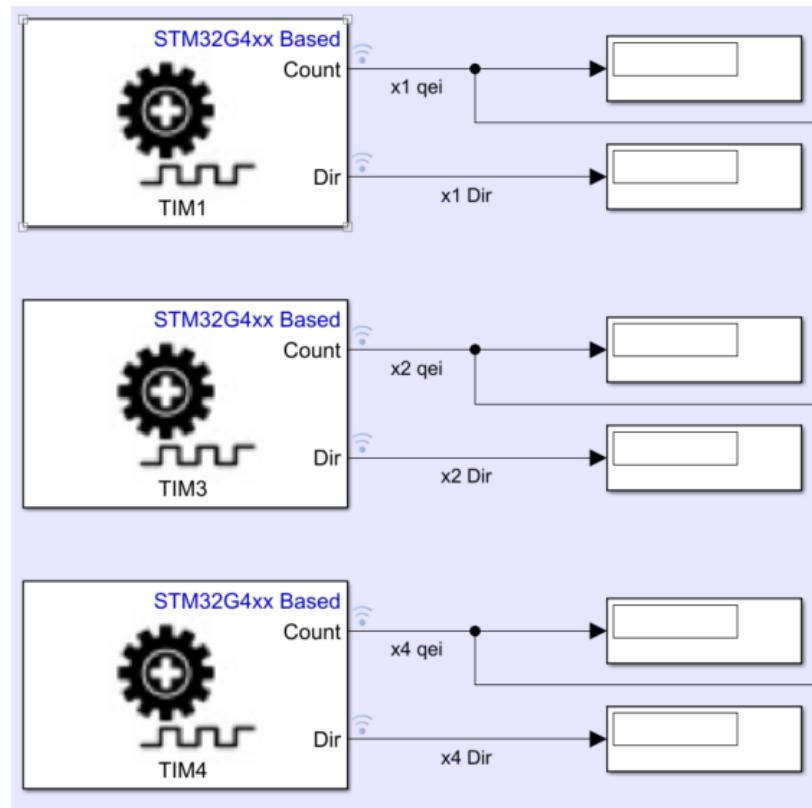
```

27 % Reset
28 if Button == 1
29     signedCount = 0;
30 end

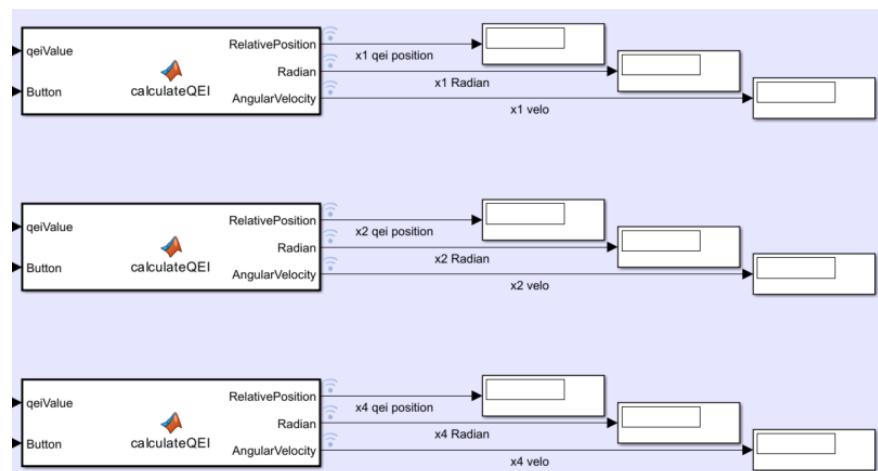
```

รูปที่ 45 แสดงการตั้งค่าปุ่มในการกดรีเซ็ต Relative Position ใน Block MATLAB Function

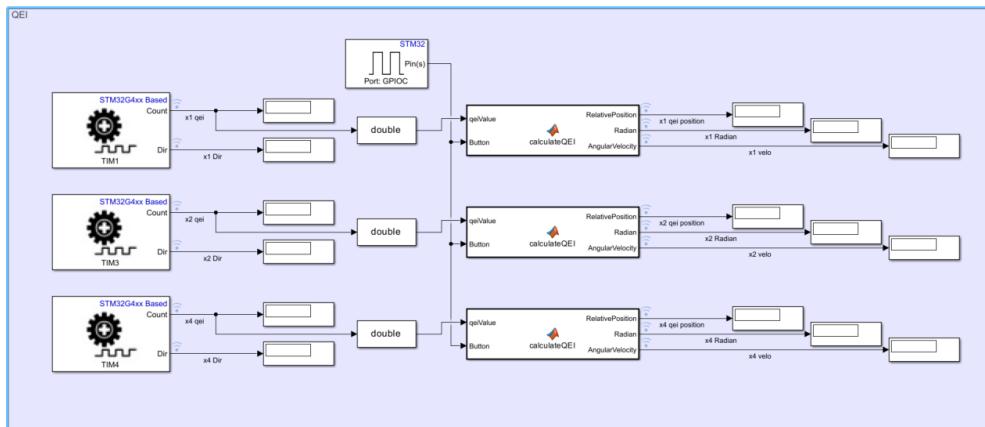
- 11) ใช้ Visualize Signal และ Display ค่า QEI, Relative position, Angular position(radians) และ Angular Velocity (Radians per second) ระหว่างการหมุน Encoder ทั้ง AMT103-V และ PEC11R-4220F-N0024



รูปที่ 46 แสดงการต่อ Block Encoder สำหรับการอ่านค่า QEI ใน Simulink



รูปที่ 47 แสดงการต่อ Block สำหรับการอ่านค่า Relative position, Angular Position และ Angular Velocity ใน Simulink



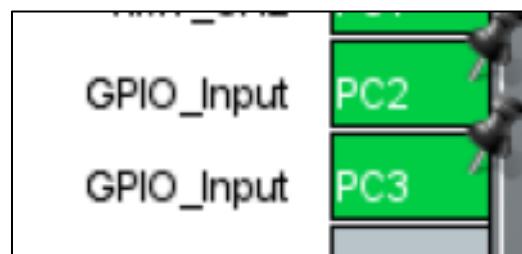
รูปที่ 48 แสดงการต่อ Block ทั้งหมดในการทำการทดลองในบทที่ 4 Encoder ใน Simulink

## 2.9.2 การทดลองที่ 2 การอ่านค่า Encoder แบบ Polling

- 1) การเชื่อมต่อระหว่าง Incremental Encoder, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์

เนื่องจากการเชื่อมต่อของชนิด Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีลักษณะที่เหมือนกัน ทางคณะผู้จัดทำจึงรวมคำอธิบายเข้าไว้ด้วยกัน ดังนี้

- 1.) ขา 5V เชื่อม VCC ไฟ 5V
- 2.) ขา G เชื่อม GND
- 3.) ขา A เชื่อม GPIO\_Input (PC2)
- 4.) ขา B เชื่อม GPIO\_Input (PC3)
- 2) ตั้งค่าใน Pin PC2 และ PC3 ใน STM32CubeMX เป็น GPIO\_Input



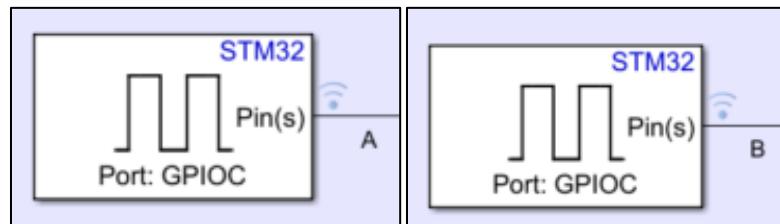
รูปที่ 49 การตั้งค่า Pin ให้เป็น GPIO\_Input ใน STM32CubeMX

- 2) ตั้งค่า Fixed-step size เป็น 0.01 เพื่อความเร็วและความคงที่ต่อรอบการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 50 การตั้งค่า Fixed-step size ของ Simulink ใน STM32CubeMX

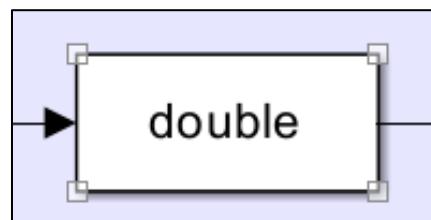
- 3) ทำการเก็บค่าขา A และ B ของ Encoder ด้วย Block Digital Port Read



รูปที่ 51 แสดงการใช้ Block Analog to Digital Converter ใน Simulink

- 3) แปลงค่า Digital ขา A และ B ให้เป็น Relative Position

- 4.1) ใช้ Block Double เพื่อแปลงค่าให้เป็น Double เพื่อให้คำนวณ 2 ตำแหน่งเพื่อให้คำนวณความละเอียดมากขึ้น



รูปที่ 52 แสดงการใช้ Block double ใน Simulink

- 4.2) สร้าง Block MATLAB Function เพื่อใช้ในการอ่านค่าแบบ Polling ใน Mode x1, x2 และ x4



รูปที่ 53 แสดงการใช้งาน Block MATLAB Function ใน Simulink

#### 4.3) อ่านค่า Polling แบบ x1

ทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะขาขึ้นของสัญญาณจากขา A เท่านั้น และใช้สถานะของขา B ตรวจสอบทิศทางการหมุนของ Encoder โดยกำหนดว่า เมื่อขา A เปลี่ยนจาก Low เป็น High และขา B มีสถานะตรงข้ามกับขา A ให้ค่าการนับเป็นบวก แต่ หากขา B มีสถานะเดียวกันกับขา A ให้ค่าการนับเป็นลบ

```

20      % Detect rising edge of A_pin to count
21      if (prevState == 0) && (currentStateA == 1)
22          % Check direction based on the state of B pin
23          if currentStateB == 0
24              pos = pos + 1;
25          else
26              pos = pos - 1;
27          end
28      end

```

รูปที่ 54 แสดงการให้เงื่อนไขในการอ่านค่า Encoder ใน Block MATLAB Function

#### 4.4) อ่านค่า Polling แบบ x2

ทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเฉพาะขาขึ้นหรือขาลงของสัญญาณจากขา A เท่านั้น และใช้สถานะของขา B ตรวจสอบทิศทางการหมุนของ Encoder โดยกำหนดว่า เมื่อขา A เปลี่ยนจาก Low เป็น High หรือ High เป็น Low หากขา B มีสถานะตรงข้ามกับขา A ให้ค่าการนับเป็นบวก แต่หากขา B มีสถานะเดียวกันกับขา A ให้ค่าการนับเป็นลบ

```

20      % Detect both rising and falling edges of A_pin to count
21      if (prevState == 0 && currentStateA == 1) % Rising edge detection
22          % Check direction based on the state of B pin
23          if currentStateB == 0
24              pos = pos + 1;
25          else
26              pos = pos - 1;
27          end
28      elseif (prevState == 1 && currentStateA == 0) % Falling edge detection
29          % Check direction based on the state of B pin
30          if currentStateB == 1
31              pos = pos + 1;
32          else
33              pos = pos - 1;
34          end
35      end

```

รูปที่ 55 แสดงการให้เงื่อนไขในการอ่านค่า Encoder แบบ x2 ใน Block MATLAB Function

#### 4.5) อ่านค่า Polling แบบ x4

ทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทั้งขาขึ้นและขาลงของสัญญาณขา A และขา B ของ Encoder โดยกำหนดให้ทิศทางการหมุนของ Encoder ขึ้นอยู่กับสถานะของสัญญาณขาที่ตรงข้ามกับขาที่มีสัญญาณเปลี่ยนแปลง โดยกำหนดว่าเมื่อขา A เปลี่ยนจาก Low เป็น High หรือ High เป็น Low หากขา B มีสถานะตรงข้ามกับขา A ให้ค่าการนับเป็นบวก แต่หากขา B มีสถานะเดียวกันกับขา A ให้ค่าการนับเป็นลบ และเมื่อขา B เปลี่ยนจาก Low เป็น High หรือ High เป็น Low หากขา A มีสถานะเดียวกันกับขา B ให้ค่าการนับเป็นบวก แต่หากขา A มีสถานะตรงข้ามกับขา B ให้ค่าการนับเป็นลบ

```

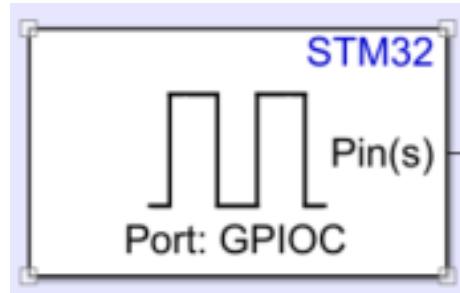
21      % Determine direction and count based on all transitions (x4 mode)
22      if (prevA == 0 && currentA == 1) % Rising edge of A
23          if currentB == 0
24              pos = pos + 1;
25          else
26              pos = pos - 1;
27          end
28      elseif (prevA == 1 && currentA == 0) % Falling edge of A
29          if currentB == 1
30              pos = pos + 1;
31          else
32              pos = pos - 1;
33          end
34      elseif (prevB == 0 && currentB == 1) % Rising edge of B
35          if currentA == 1
36              pos = pos + 1;
37          else
38              pos = pos - 1;
39          end
40      elseif (prevB == 1 && currentB == 0) % Falling edge of B
41          if currentA == 0
42              pos = pos + 1;
43          else
44              pos = pos - 1;
45          end
46      end

```

รูปที่ 56 แสดงการให้เงื่อนไขในการอ่านค่า Encoder แบบ x4 ใน Block MATLAB Function

### 2.9.2 สร้างปุ่มสำหรับการรีเซ็ตตำแหน่ง

- เก็บค่าปุ่มบนบอร์ดด้วย Block Digital Port Read (GPIOC 13)



รูปที่ 57 แสดงการใช้ Block Analog to Digital Converter ใน Simulink

- ใน Block MATLAB Function นำค่าที่เก็บจากปุ่มมาสร้างกรณีในการรีเซ็ตค่า Relative position

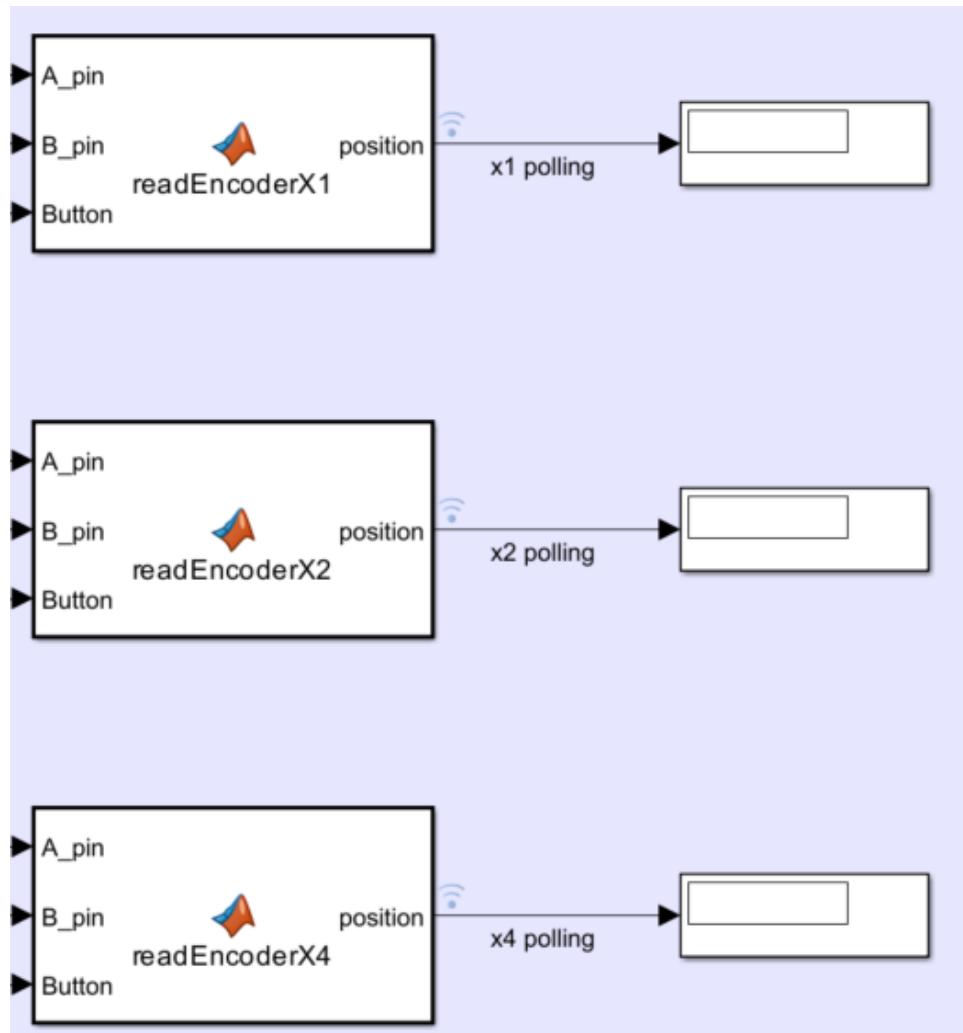
```

16 % Reset position if the button is pressed
17 if Button == 1
18     pos = 0;
19 end

```

รูปที่ 58 แสดงการตั้งค่าปุ่มในการกดรีเซ็ต Relative Position ใน Block MATLAB Function

- ใช้ Visualize Signal และ Display ค่า Relative position ระหว่างการหมุน Encoder ทั้งสองรุ่น



รูปที่ 59 แสดงการต่อ Block MATLAB Function สำหรับการอ่านค่า QEI ใน Simulink

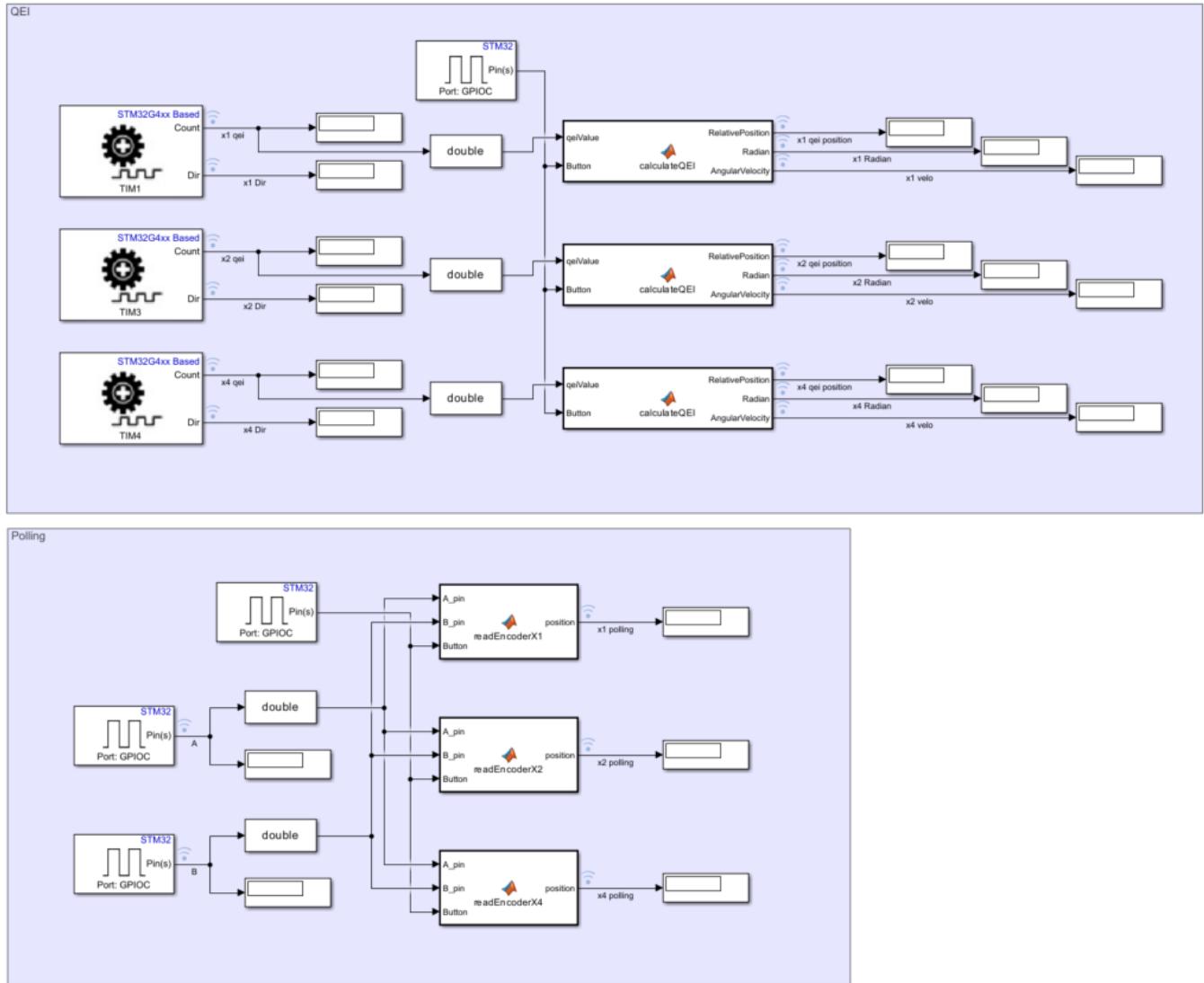
### 2.9.3 การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่าง QEI และ Polling

#### 11) Incremental Encoder AMT103-V

ทำการทดลองโดยการอ่านค่า Relative position ของการอ่านแบบ QEI และ Polling พร้อมกัน โดยหมุน encoder ในทิศทางเข็มนาฬิกาไป 1 รอบแล้วหมุนกลับ และหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ

#### 2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024

ทำการทดลองโดยการอ่านค่า Relative position ของการอ่านแบบ QEI และ Polling พร้อมกัน โดยหมุน encoder ในทิศตามเข็มนาฬิกาไป 1 รอบแล้วหมุนกลับ และหมุนทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ

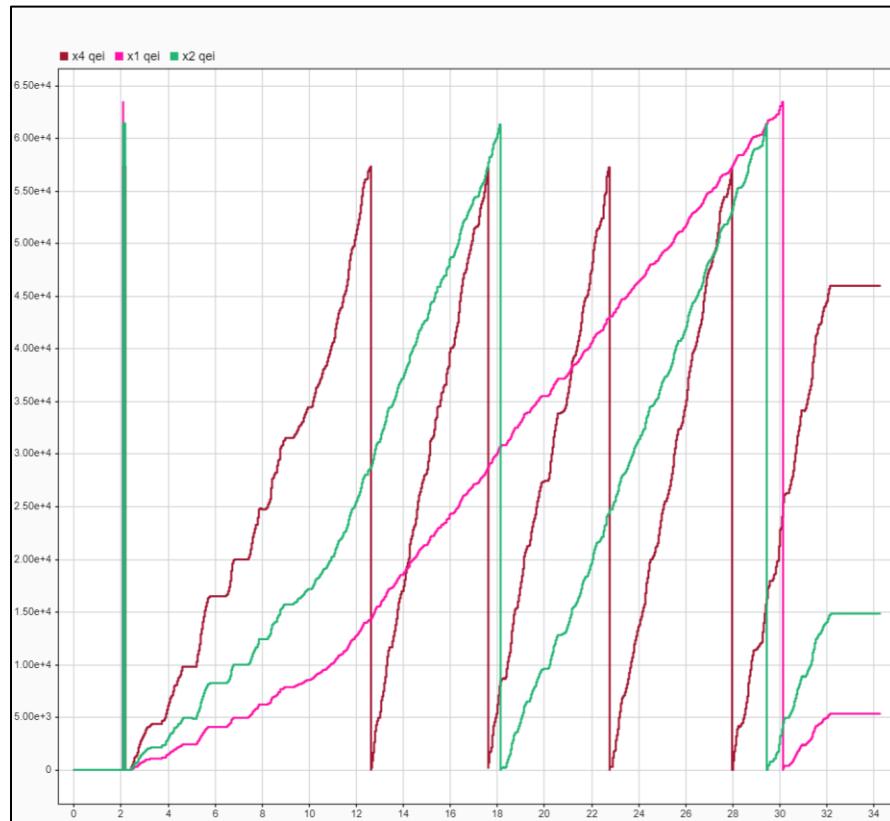


รูปที่ 60 แสดงการต่อ Block ใน Simulink ในการรูปแบบการอ่านค่าแบบ Polling และ QEI

## 2.10 ผลการทดลอง

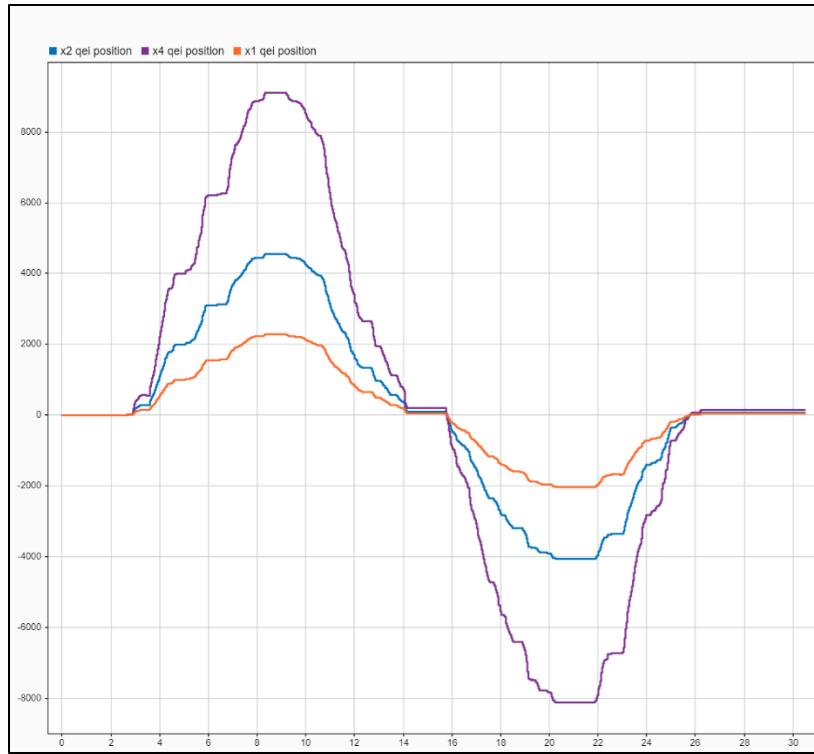
### 2.10.1 ผลการทดลองที่ 1 การอ่านค่าแบบ QEI

#### 1) Incremental Encoder AMT103-V



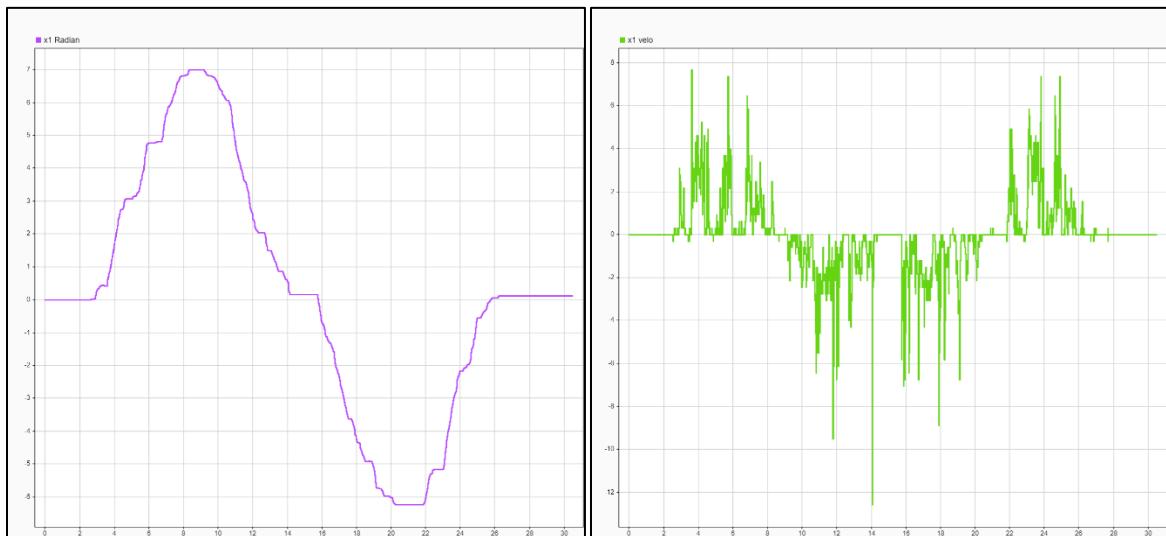
รูปที่ 61 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า QEI x1 x2 และ x4 กับเวลา

จากราฟเป็นค่าที่เก็บมาจากการอ่านค่า QEI จากการหมุน Encoder ในทิศทางเข็มนาฬิกาโดยไม่ผ่านการคำนวณใดๆ โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีชมพู), x2 (เส้นสีเขียว) และ x4(เส้นสีแดงเลือดหมู) พร้อมกัน

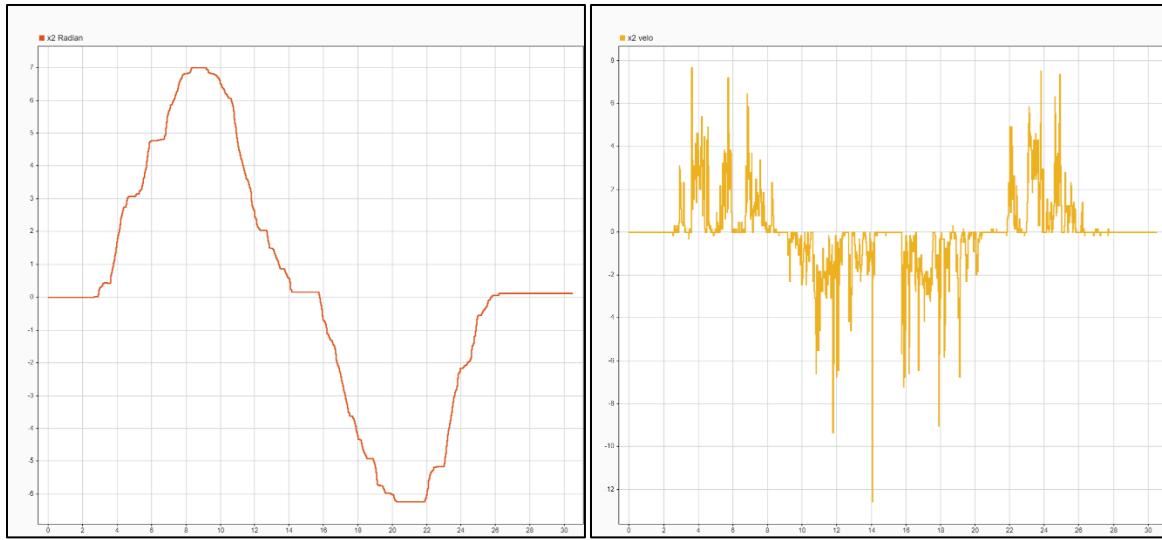


รูปที่ 62 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x1 x2 และ x4 กับเวลา

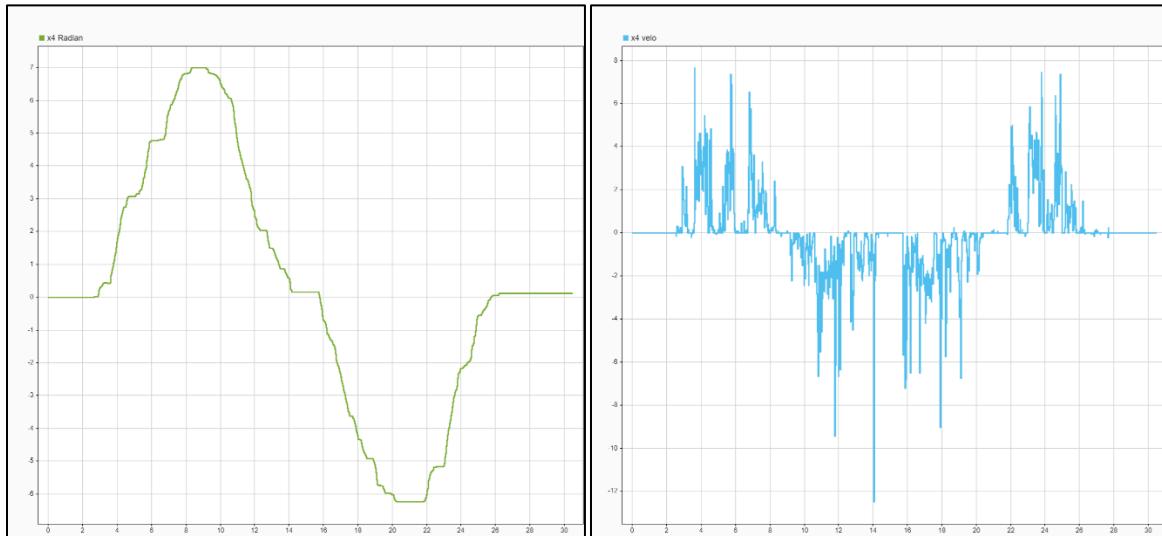
จากราฟเป็นค่าที่เก็บมาจากการแปลงค่า QEI เป็น Relative position จากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีส้ม) , x2 (เส้นสีน้ำเงิน) และ x4(เส้นสีม่วง) พร้อมกัน



รูปที่ 63-64 แสดงแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Angular position x1 กับเวลา และ Angular velocity x1 กับเวลา



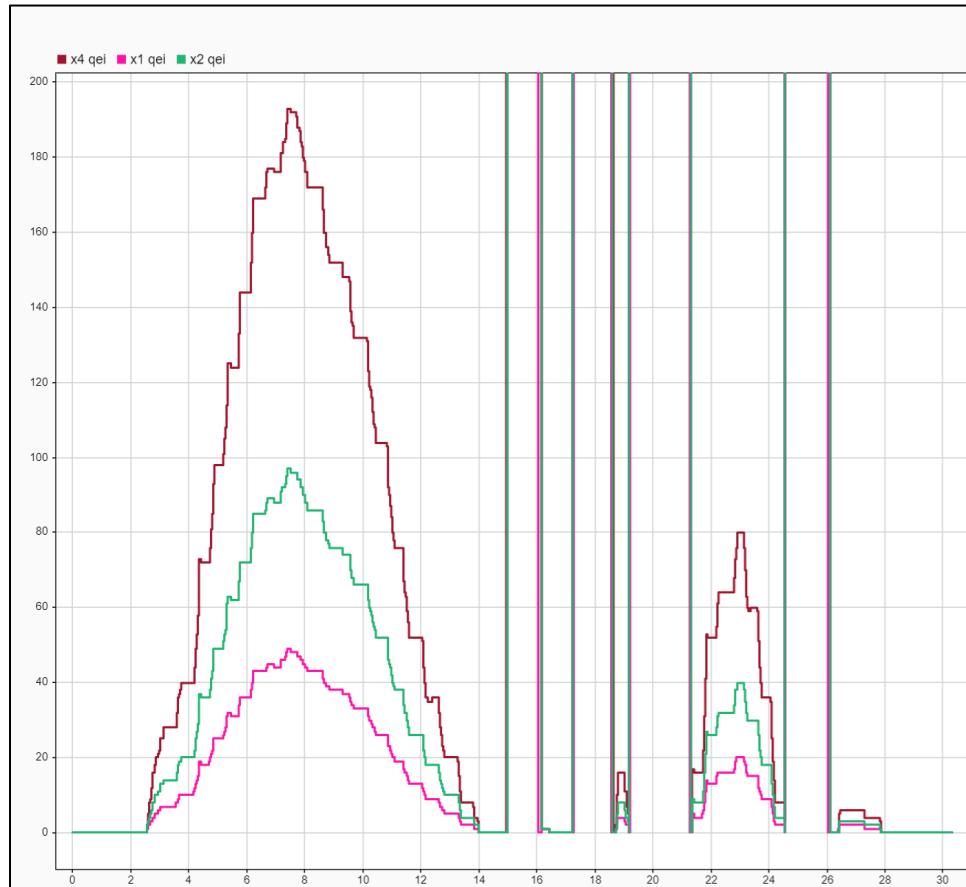
รูปที่ 65-66 แสดงแสดงกราฟเปลี่ยนเที่ยบระหว่างค่า Angular position x2 กับเวลา และ Angular velocity x2 กับเวลา



รูปที่ 67-68 แสดงแสดงกราฟเปลี่ยนเที่ยบระหว่างค่า Angular position x4 กับเวลา และ Angular velocity x4 กับเวลา

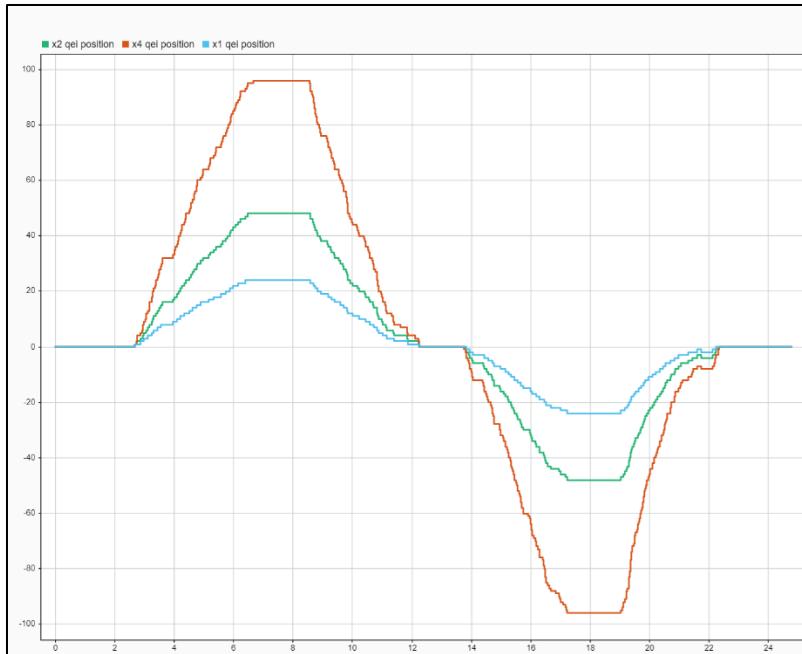
จากการที่ผ่านมาได้เก็บมาจากราคา Angular position(rad) โดยคำนวณจากค่า Relative Position และมีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีม่วง), x2 (เส้นสีเข้ม) และ x4(เส้นสีเขียวอ่อน) ส่วนกราฟทางขวาเป็นค่าที่เก็บมาจาก Angular velocity(rad/s) โดยคำนวณจากค่า Relative Position ต่อเวลา และมีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีเขียว), x2 (เส้นสีเหลือง) และ x4(เส้นสีน้ำเงิน) โดยกราฟทั้ง 6 นั้นเกิดจากจากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับ

## 2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024



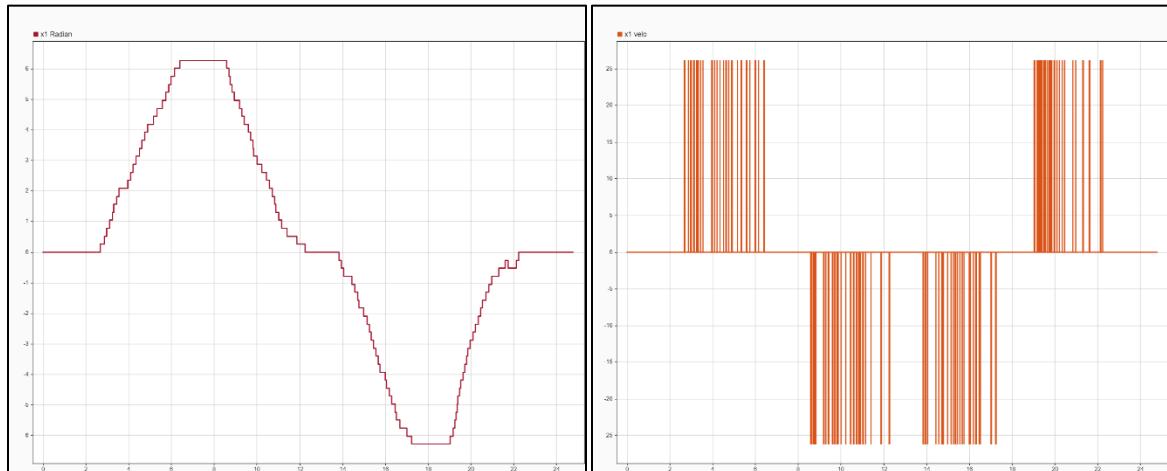
รูปที่ 69 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า QEI x1 x2 และ x4 กับเวลา

จากราฟเป็นค่าที่เก็บมาจากการอ่านค่า QEI จากการหมุน Encoder ในทิศทางตามนาฬิกาและทวนเข็มไปมาโดยไม่ผ่านการคำนวนใดๆ โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีชมพู), x2 (เส้นสีเขียว) และ x4(เส้นสีแดงเลือดหมู) พร้อมกัน

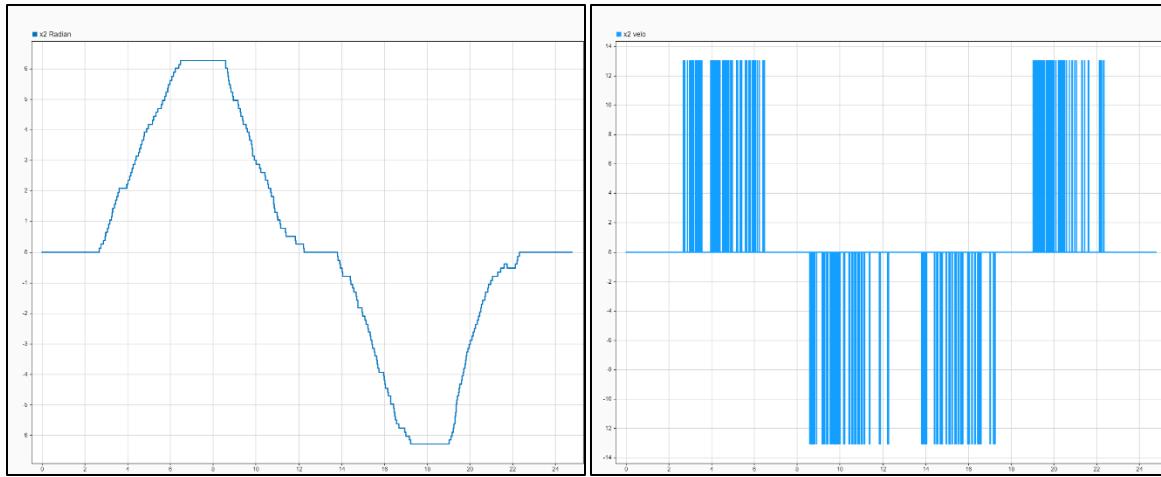


รูปที่ 70 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x1 x2 และ x4 กับเวลา

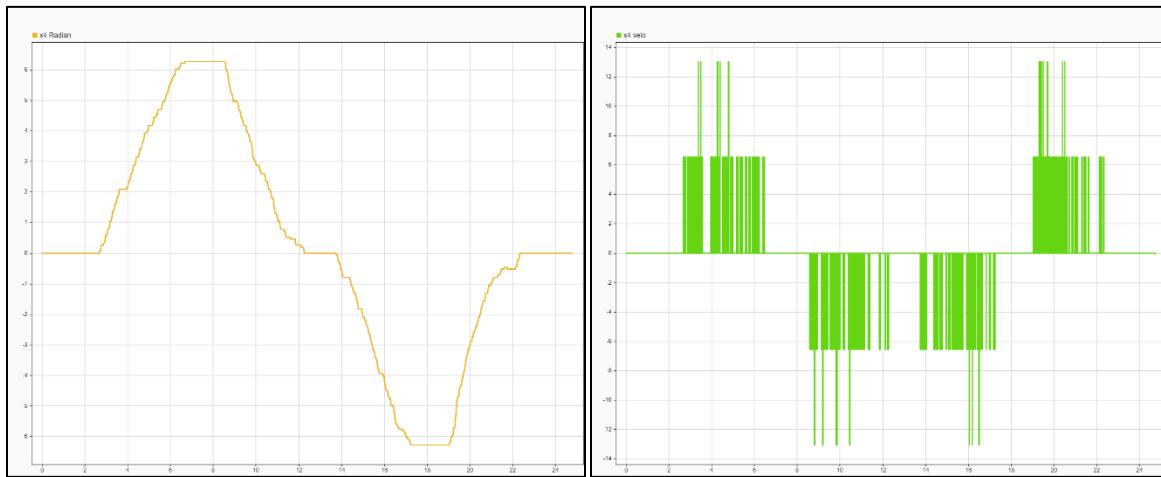
จากการเป็นค่าที่เก็บมาจากการแปลงค่า QEI เป็น Relative position จากการหมุน Encoder ในทิศทาง เข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีฟ้า) , x2 (เส้นสีเขียว) และ x4(เส้นสีส้ม) พร้อมกัน



รูปที่ 71-72 แสดงแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Angular position x1 กับเวลา และ Angular velocity x1 กับเวลา



รูปที่ 73-74 แสดงแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Angular position x2 กับเวลา และ Angular velocity x2 กับเวลา

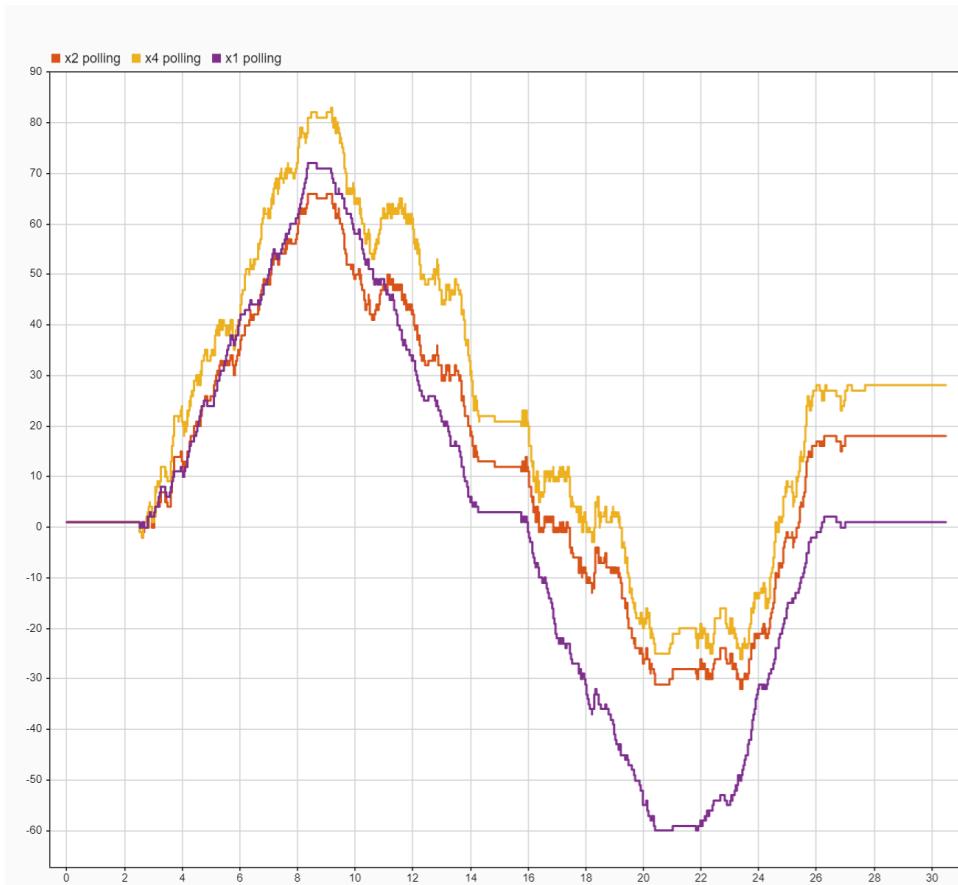


รูปที่ 75-76 แสดงแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Angular position x4 กับเวลา และ Angular velocity x4 กับเวลา

จากราฟทางผังชัยเป็นค่าที่เก็บมาจาก Angular position(rad) โดยคำนวณจากค่า Relative Position และมีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีแดง), x2 (เส้นสีน้ำเงิน) และ x4(เส้นสีเหลือง) ส่วนกราฟทางขวาเป็นค่าที่เก็บมา จาก Angular velocity(rad/s) โดยคำนวณจากค่า Relative Position ต่อเวลา และมีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีส้ม), x2 (เส้นสีน้ำเงิน) และ x4(เส้นสีเขียว) โดยกราฟทั้ง 6 นั้นเกิดจากจากการหมุน Encoder ในทิศตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับ

## 2.10.2 ผลการทดลองที่ 2 การอ่านค่าแบบ Polling

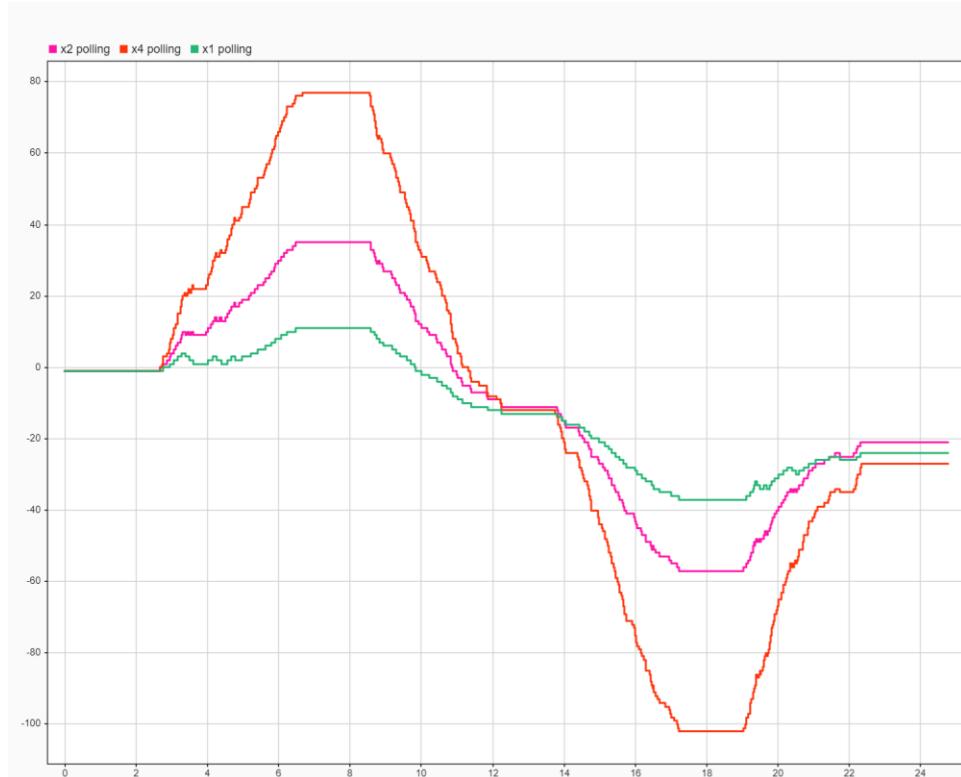
### 1) Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 77 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Polling x1 x2 และ x4 กับเวลา

จากราฟเป็นค่าที่มาจากการแปลงสัญญาณ Digital A และ B แบบ Polling จากการหมุน Encoder ในทิศทางเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีม่วง), x2 (เส้นสีส้ม) และ x4(เส้นสีเหลือง) พร้อมกัน

## 2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024

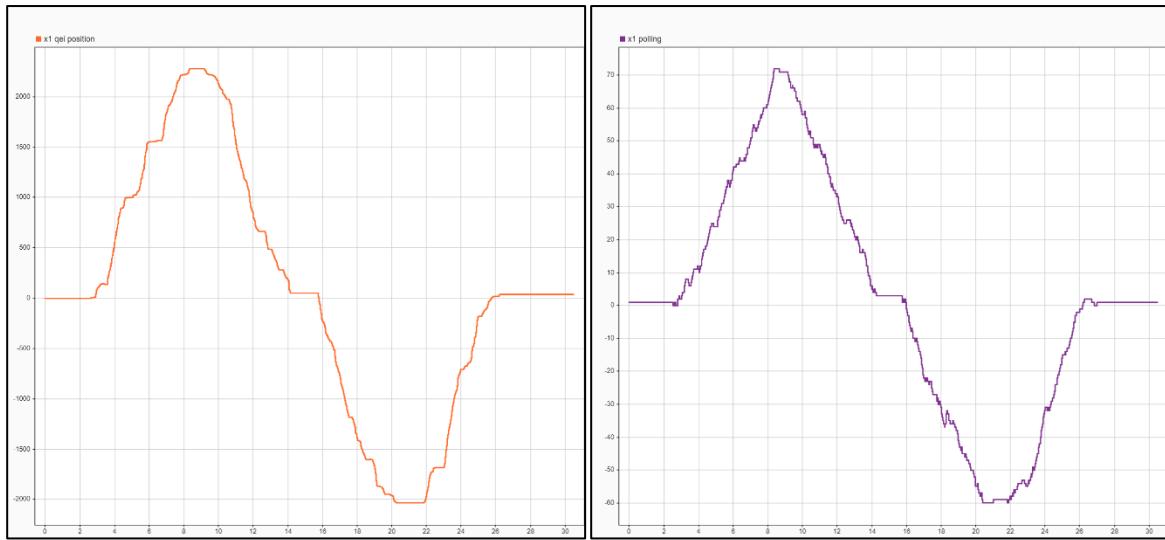


รูปที่ 78 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Polling x1 x2 และ x4 กับเวลา

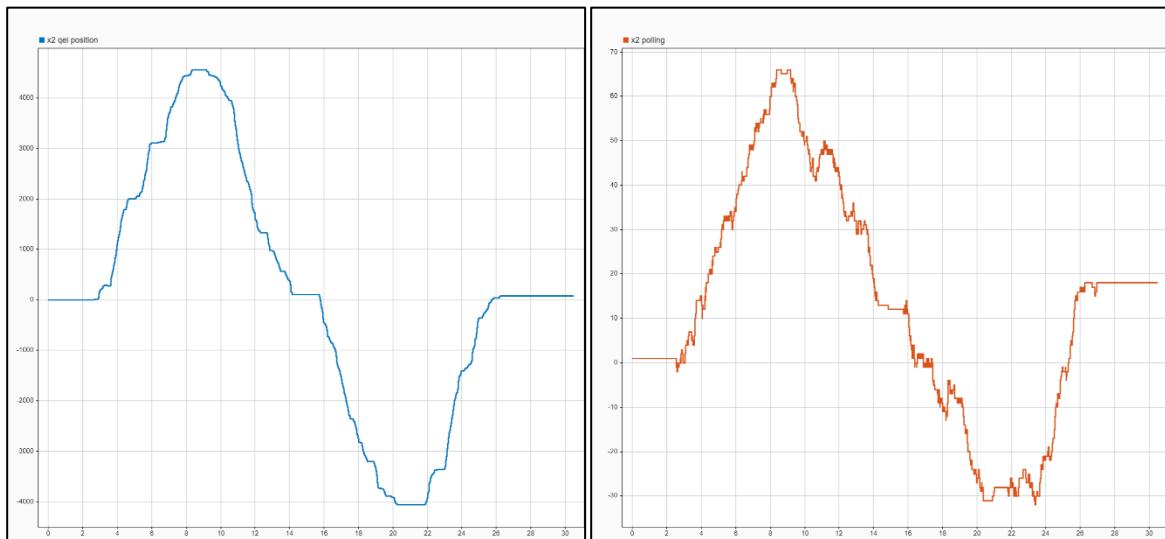
จากราฟเป็นค่าที่มาจากการแปลงสัญญาณ Digital A และ B แบบ Polling จากการหมุน Encoder ในทิศทางเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีเขียว), x2 (เส้นสีชมพู) และ x4(เส้นสีส้ม) พร้อมกัน

### 2.10.3 ผลการทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่าง QEI และ Polling

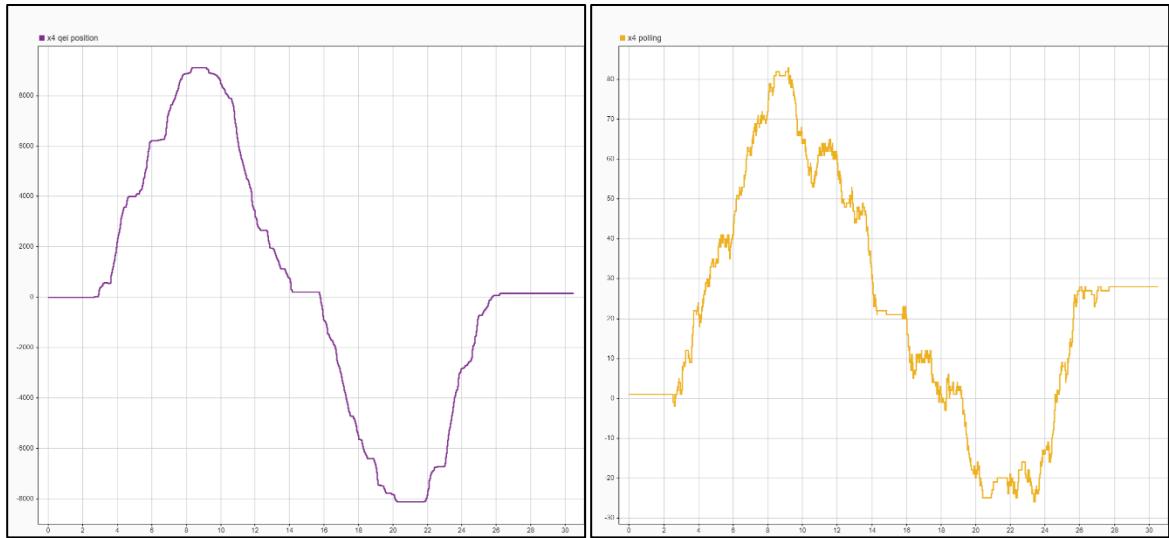
#### 1) Incremental Encoder AMT103-V



รูปที่ 79-80 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x1 กับเวลา เทียบกับ Polling x1 กับเวลา



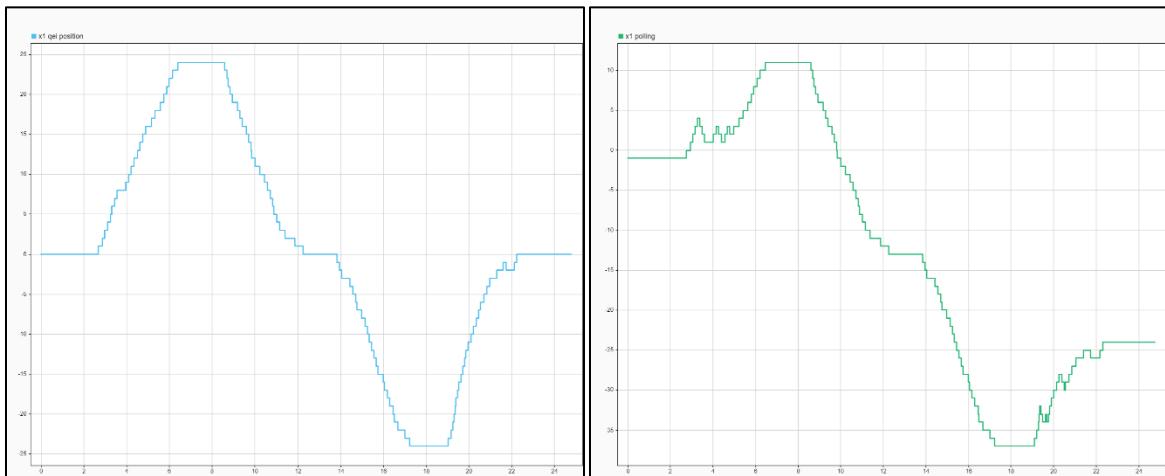
รูปที่ 81-82 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x2 กับเวลา เทียบกับ Polling x2 กับเวลา



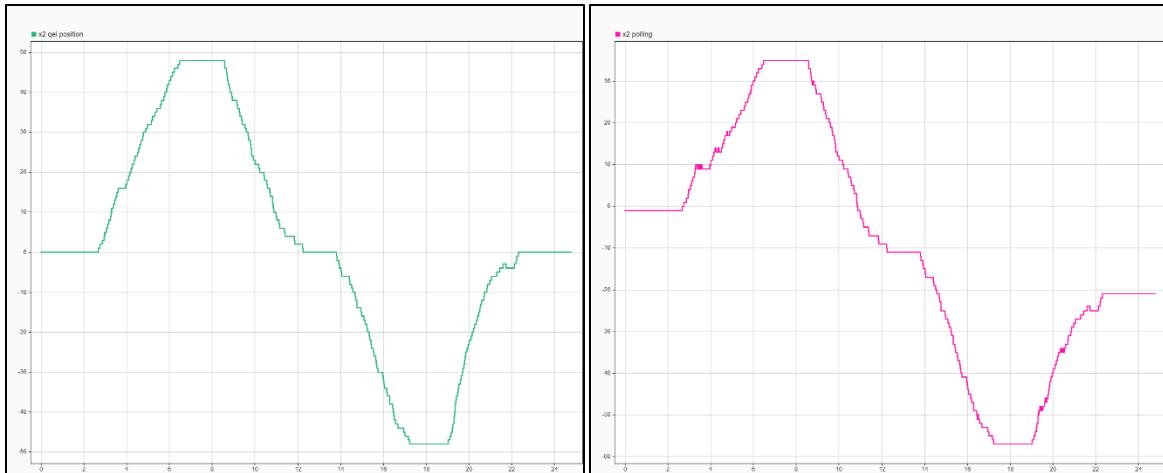
รูปที่ 83-84 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x4 กับเวลา เทียบกับ Polling x4 กับเวลา

จากราฟทางผังซ้ายเป็นค่าที่เก็บมาจากการแปลงค่า QEI เป็น Relative position จากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีส้ม), x2 (เส้นสีน้ำเงิน) และ x4(เส้นสีม่วง) พร้อมกัน ส่วนกราฟทางผังขวาเป็นค่าที่มาจากการแปลงสัญญาณ Digital A และ B แบบ Polling จากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีม่วง), x2 (เส้นสีส้ม) และ x4(เส้นสีเหลือง) พร้อมกัน โดย กราฟทั้งสองผังเกิดจากการเก็บค่าในเวลาเดียวกันเพื่อนำมาเทียบกัน

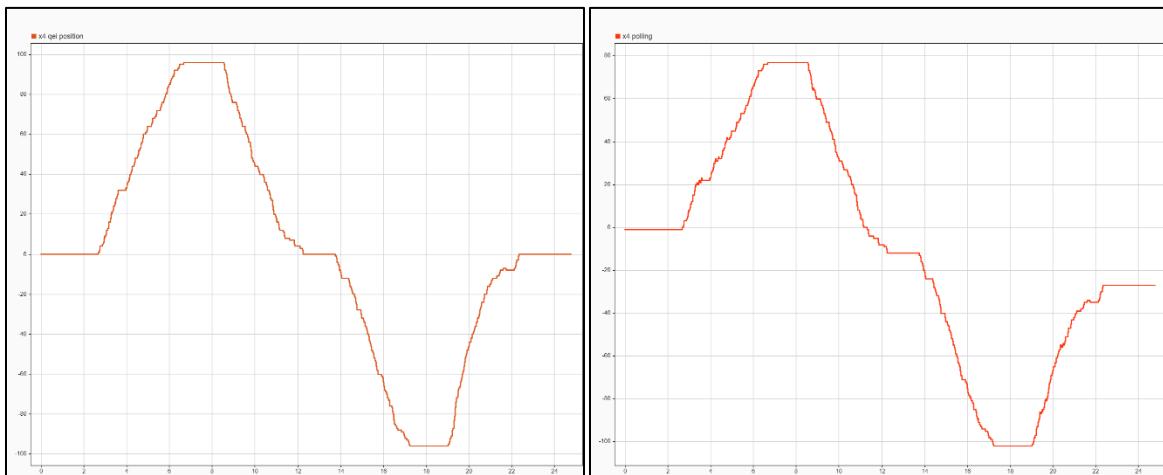
## 2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024



รูปที่ 85-86 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x1 กับเวลา เทียบกับค่า Polling x1 กับเวลา



รูปที่ 87-88 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x2 กับเวลา เทียบกับค่า Polling x2 กับเวลา



รูปที่ 89-90 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า Relative position x4 กับเวลา เทียบกับค่า Polling x4 กับเวลา

จากราฟทางผังข่ายเป็นค่าที่เก็บมาจากการแปลงค่า QEI เป็น Relative position จากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีฟ้า), x2 (เส้นสีเขียว) และ x4(เส้นสีส้ม) พร้อมกัน ส่วน กราฟทางผังขวาเป็นค่าที่มาจากการแปลงสัญญาณ Digital A และ B แบบ Polling จากการหมุน Encoder ในทิศทวนเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วหมุนกลับ แล้วจึงหมุนตามเข็มนาฬิกา 1 รอบแล้วจึงหมุนกลับโดย โดยที่มีการอ่านแบบ x1 (เส้นสีเขียว), x2 (เส้นสีชมพู) และ x4(เส้นสีส้ม) พร้อมกัน โดย กราฟทั้งสองผังเกิดจากการเก็บค่าในเวลาเดียวกันเพื่อนำมาเทียบกัน

## 2.11 สรุปผล

### 2.11.1 การทดลองที่ 1 การอ่านค่าแบบ QEI

จากการทดลองการอ่านค่าแบบ QEI ของ Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 รวมถึงค่าหลังจากแปลงเป็น Relative position ทำให้เห็นได้ว่า การอ่านแบบ  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_4$  มีความเปลี่ยนแปลงของค่าที่ไม่เท่ากันโดยที่ แบบ  $x_2$  มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 2 เท่าของ  $x_1$  และ  $x_4$  มีการเปลี่ยนแปลงเป็น 4 เท่าของ  $x_1$  แต่ค่า Angular position และ Angular velocity มีความเปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน และค่าทั้งหมดนั้นแปลงผันตามการหมุน Encoder 1 รอบการหมุน ตาม ppr ของแต่ละตัว

### 2.11.2 การทดลองที่ 2 การอ่านค่าแบบ Polling

จากการทดลองอ่านค่าแบบ polling ของ Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ทำให้เห็นได้ว่าค่า Relative position แปรผันใกล้เคียงการหมุน Encoder โดยที่ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีความตอบสนองของค่ากับการหมุนใกล้เคียงมากกว่า Incremental Encoder AMT103-V

### 2.11.3 การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่าง QEI และ Polling

จากการทดลองอ่านค่า Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 ในรูปแบบ QEI และ Polling พร้อมกันทำให้เห็นได้ว่าค่า Relative position ของแบบ QEI มีการตอบสนองของค่าต่อการหมุน Encoder ได้ดีกว่าแบบ Polling

## 2.12 อภิปรายผล

### 2.12.1 การทดลองที่ 1 การอ่านค่าแบบ QEI

จากการทดลองการอ่านค่าแบบ QEI ของ Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 พบว่าการตั้งค่า QEI ในโหมดต่าง ๆ เช่น  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $x_4$  ส่งผลต่อความละเอียดของการอ่านค่า Relative position โดยตรง โดยโหมด  $x_2$  ให้ความละเอียดเป็น 2 เท่าของโหมด  $x_1$  และโหมด  $x_4$  ให้ความละเอียดเป็น 4 เท่าของโหมด  $x_1$  ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในมุมที่เล็กลงของ Encoder ได้มากขึ้น นอกจากนี้ ค่า Angular position และ Angular velocity ที่คำนวณจากค่า QEI มีความสอดคล้องและเสถียร แม้ว่าจะปรับเปลี่ยนโหมดการอ่านที่ความละเอียดต่าง ๆ ก็ตาม ซึ่งช่วยยืนยันได้ว่า QEI มีความเหมาะสมในการอ่านค่า Encoder เพื่อให้ได้ค่าตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมที่มีความละเอียดและแม่นยำ การเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งหมดแปรผันตามการหมุนของ Encoder ตามจำนวน PPR ที่ระบุในข้อมูลของอุปกรณ์ ทั้งนี้ความเสถียรของ QEI แสดงให้เห็นว่า QEI สามารถอ่านค่าตำแหน่งได้อย่างต่อเนื่องและไม่สบัด แม้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการหมุน

### 2.12.2 การทดลองที่ 2 การอ่านค่าแบบ Polling

จากการทดลองอ่านค่าแบบ Polling ของ Incremental Encoder AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 พบว่าการอ่านค่า Relative position โดยใช้วิธี Polling สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับการหมุนของ Encoder แม้ว่าการอ่านค่าจะทำได้อย่างต่อเนื่อง แต่การใช้ Polling ยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำในระดับสูง โดยเฉพาะเมื่อ Encoder หมุนด้วยความเร็วสูง นอกจากนี้ พบว่า BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งได้ดีกว่า Incremental Encoder AMT103-V ซึ่งอาจเนื่องมาจาก PPR ที่ต่ำกว่าและความละเอียดของกลไกภายในตัว Encoder ทำให้ค่า Polling ที่ได้จาก BOURNS PEC11R-4220F-N0024 มีความเสถียรและแม่นยำกว่าภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

### 2.12.3 การทดลองที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่าง QEI และ Polling

จากการเปรียบเทียบการอ่านค่าแบบ QEI และ Polling พบว่าการอ่านค่าแบบ QEI สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งได้อย่างแม่นยำและมีความเสถียรสูงกว่า โดย QEI สามารถตรวจจับทุกการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งได้ครบถ้วน ซึ่งสามารถนับทุกขอบของสัญญาณได้ (ทั้งขาขึ้นและขาลงของสัญญาณ A และ B) ทำให้มีความละเอียดและความแม่นยำสูงกว่าการอ่านค่าแบบ Polling ที่อาจมีการคลาดเคลื่อนและไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเมื่อ Encoder มีการหมุนด้วยความเร็วสูง

## 2.13 ข้อเสนอแนะ

### 2.13.1 ปรับปรุงการอ่านค่า Polling สำหรับความเร็วสูง: ควรพิจารณาปรับปรุงความถี่ในการอ่านค่า Polling เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง Encoder โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ Encoder หมุนด้วยความเร็วสูง เช่น ใช้ Interrupt เพื่อให้สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันที

### 2.13.2 พิจารณาใช้วิธีการลด Noise ในการอ่านค่า: ในกรณีทดลองที่ใช้ Polling อาจมี Noise จากสัญญาณดิจิทัลของ Encoder ควรพิจารณาเพิ่มฟิลเตอร์ เช่น ฟิลเตอร์ดิจิทัล (Digital Filter) เพื่อช่วยกรองสัญญาณรบกวนและเพิ่มความแม่นยำของการวัดค่า

## 2.14 เอกสารอ้างอิง

[1] Incremental Encoder AMT103-V :

<https://www.sameskydevices.com/product/resource/amt10.pdf>

[2] BOURNS PEC11R-4220F-N0024: <https://www.bourns.com/docs/Product-Datasheets/PEC11R.pdf>

### บทที่ 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 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ แสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink และแสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output เป็น Raw Signal, Magnetic Flux Density ในหน่วย SI derived

##### 3.2 สมมติฐาน

เมื่อตำแหน่งของแม่เหล็กถูกเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่า Magnetic Flux Density ที่ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ตรวจจับได้นั้นเปลี่ยนแปลง และจะส่งผลให้สัญญาณ Output จาก Sensor เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

##### 3.3 ตัวแปร

ตัวแปรต้น : ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กถูกและการเปลี่ยนแปลง และแผ่น Shield

ตัวแปรตาม : ค่า Magnetic Flux Density หรือ Magnetic Field Intensity และสัญญาณ Output ของ Magnetic Sensor ที่วัดได้จาก STM32 Nucleo-G474RE

ตัวแปรควบคุม : กระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ป้อนให้กับวงจร, สภาพแวดล้อมของสนามแม่เหล็ก

### 3.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 3) Magnetic Sensor : อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เช่น Hall Effect Sensor ซึ่งใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ การหมุน หรือการเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็ก
- 3) Hall Effect Sensor: อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการของ Hall Effect ซึ่งเกิดจากการไฟลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำในแนวตั้งจากกับสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าในทิศทางตั้งฉากกับทิศกระแสและสนามแม่เหล็ก
- 3) STM32 Nucleo-G474RE : เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของ STMicroelectronics ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักพัฒนาสามารถทดลองและทดสอบการพัฒนาซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ได้อย่างง่ายดาย
- 3) DRV5055A2 Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor: เซนเซอร์ Hall Effect แบบ Linear ที่ให้สัญญาณ Output แบบอนาล็อกตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้งฉากกับพื้นผิวของเซนเซอร์
- 3) ADC (Analog-to-Digital Converter): อุปกรณ์หรือวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อก ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์หรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้
- 3) Magnet With/Without Shield : การใช้หรือไม่ใช้สตุหีหรือเทคโนโลยีในการลดหรือป้องกันสนามแม่เหล็กไม่ให้มีผลกระทบต่ออุปกรณ์หรือวงจรที่ต้องการป้องกัน
- 3) Magnetic Flux Density/ Magnetic Field Intensity : ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กหรือปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น Tesla (T) หรือ Gauss (G)
- 3) Sigmoid/S-Curve: กราฟที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่ช้าในช่วงแรก จากนั้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงกลาง และจะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช้าลงในช่วงท้าย ทำให้กราฟมีลักษณะเป็นรูปตัว "S"

- 3) Simulink : เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย MathWorks เพื่อการจำลองระบบและออกแบบโมเดลแบบ Block Diagram โดย Simulink ถูกออกแบบให้ใช้สำหรับการจำลองทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ และสามารถเชื่อมต่อกันอุปกรณ์จริงเพื่อควบคุมและเก็บข้อมูลได้
- 3) Block ADC/Block Analog to Digital Converter : เป็น Block พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้จำลองการแปลงสัญญาณจากรูปแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นรูปแบบดิจิทัล (Digital)
- 3) Data Inspector : พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time และทำการบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ภายหลัง
- 3) Visualize Signal : การแสดงผลสัญญาณใน Simulink ด้วยรูปแบบกราฟหรือภาพที่แสดงถึงคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น การแสดงผลรูปคลื่นของสัญญาณอนาล็อกหรือดิจิทัล เพื่อช่วยวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของสัญญาณนั้น
- 3) RMS (Root Mean Square) : เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังสอง มีคุณสมบัติช่วยลดอิทธิพลของค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสัญญาณหลัก

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i^2}$$

เมื่อ      RMS คือค่าเฉลี่ยของกำลังสอง  
 $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด  
 $X_i$  คือข้อมูล Raw Data ตัวที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

- 10) Error Bars : ช่วงในกราฟที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ซึ่งสามารถใช้บ่งชี้ถึงความแม่นยำและขอบเขตของความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่วัดได้

- 11) การเทียบบัญญัติไตรยางค์ : เป็นวิธีการหาค่าที่ไม่ทราบ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสองชุดที่สัมพันธ์กันอย่างเป็นสัดส่วน

$$X = \frac{A \times B}{C}$$

เมื่อ  $X$  คือ ค่าที่ต้องการทราบ

$A$  คือ ค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ  $B$  และเป็นตัวแปรหนึ่งที่เราทราบ

$B$  คือ ค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ  $A$  และเป็นตัวแปรหนึ่งที่เราทราบ

$C$  คือ ค่าที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบหรือปริมาณที่สัมพันธ์กับ  $A$  และ  $B$  ในการคำนวณ

- 12) Central Limit Theorem : เป็นทฤษฎีทางสถิติที่ระบุว่าหากทำการสุ่มตัวอย่างจากประชากรได้ ๆ ที่มีการกระจายค่าบางอย่าง เมื่อจำนวนของตัวอย่างที่สุ่มมา มีจำนวนมากพอ การกระจายของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างเหล่านั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution)

- 3.1..1 Standard Resistance Tolerance : ขอบเขตที่ค่าความต้านทานจริงของอุปกรณ์อาจแตกต่างไปจากค่าที่ระบุไว้ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานนี้มักถูกแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่น  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  ซึ่งแสดงถึงขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้

- 3.1..2 โปรแกรม Tracker : ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยใช้เทคนิคติดตามตำแหน่งและวิเคราะห์ข้อมูลจากวิดีโอ

### 3.2 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 1) Magnetic Flux Density/Magnetic Field Intensity : การวัดค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กด้วย Hall Effect Sensor โดยทำการวัดในตำแหน่งที่เปลี่ยนไปเพื่อวิเคราะห์ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

3.2.1 Magnetic Sensor : นิยามเชิงปฏิบัติการคือการใช้งานเซนเซอร์แม่เหล็กในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยการเชื่อมต่อ กับระบบประมวลผลและการอ่านค่าสัญญาณ เอาต์พุตจากเซนเซอร์

- 2) STM32 Nucleo-G474RE : ทำหน้าที่เป็นบอร์ดรับสัญญาณแรงดันที่ได้จาก โดยเชื่อมต่อ DRV5055A2 Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เข้ากับขา ADC ของบอร์ด ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณ Analog จาก Magnetic Sensor เป็นสัญญาณ Digital เพื่อส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink ข้อมูลที่ถูกแปลงนี้จะถูกนำไปบันทึกและวิเคราะห์ใน MATLAB Simulink เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
  - 3) DRV5055A2 Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor : ทำหน้าที่วัดความเข้ม สนามแม่เหล็ก ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแรงดันข้าออก โดยแรงดันข้าอกนี้จะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสนามแม่เหล็ก
  - 4) Magnet With/Without Shield : เมื่อทำการทดลอง จะมีการทดลองเซ็นเซอร์กับแม่เหล็กทั้งในสภาวะ ที่มีแผ่น Shield และไม่มี Shield จากนั้นวัดและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซนเซอร์เพื่อประเมินผล ของแผ่น Shield
- 3.2.2 Simulink : Simulink จะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองการเก็บข้อมูลจากบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้บล็อก ADC เพื่ออ่านค่าแรงดันที่ได้จาก Hall Effect Magnetic Sensor และแสดงผลแบบกราฟผ่าน Data Inspector รวมถึงการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 5) Visualize Signal: การสร้างกราฟหรือการแสดงข้อมูลของสัญญาณที่ได้ด้วย Simulink เพื่อแสดง สัญญาณตามเวลาใน Fixed-step size
  - 6) Finite State Machine (FSM) : ถูกนำมาใช้ในการเขียนลำดับการทำงานของโมเดล เพื่อการ กำหนดการทำงานหรือวิเคราะห์การทดลองที่ต้อง

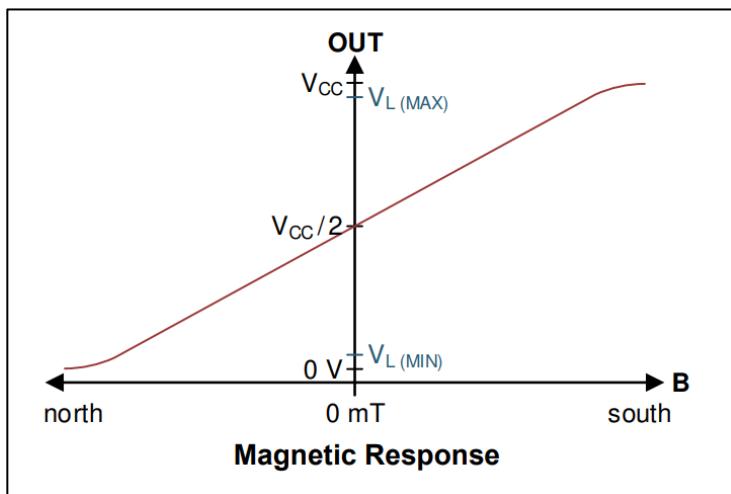
- 7) Error Bars : จะปรากฏเป็นเล่นกราฟแท่งเล็ก ๆ บนเส้นกราฟเพื่อแสดงขอบเขตของความไม่แน่นอนในการวัดค่าตัวแปร คำนวนได้จากการโดยการนำค่า Standard Resistance Tolerance ใน Datasheet ได้ ๆ
- 8) Block ADC หรือ Block Analog to Digital Converter : บล็อก ADC นี้จะทำหน้าที่อ่านค่าความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นจาก Hall Effect Magnetic Sensor ผ่านขา ADC ของบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE จากนั้นข้อมูลแรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตัลและเก็บเป็นข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และแสดงผลเป็นกราฟในโปรแกรม Simulink
- 9) Data Inspector : พังก์ชันใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ การทดลองจะทำโดยแสดงผลสัญญาณ Output จาก DRV5055 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time
- 10) Central Limit Theorem : นักใช้ทฤษฎีนี้ในการเก็บค่าการทดลองเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีข้อมูลที่เกิดการกระจายตัวมากพอ ซึ่งหมายความว่าการสุ่มเก็บข้อมูลตัวอย่างหลาย ๆ ชุดจากการทดลอง จะทำให้ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) แม้ว่าในการทดลองเดิม ข้อมูลจะมีการกระจายแบบอื่นก็ตาม การใช้ทฤษฎีนี้ช่วยให้วิเคราะห์สถิติสามารถทำได้ง่ายขึ้นและแม่นยำมากขึ้น
- 11) Central Limit Theorem : นักใช้ทฤษฎีนี้ในการเก็บค่าการทดลองเพื่อให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีข้อมูลที่เกิดการกระจายตัวมากพอ ซึ่งหมายความว่าการสุ่มเก็บข้อมูลตัวอย่างหลาย ๆ ชุดจากการทดลอง จะทำให้ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) แม้ว่าในการทดลองเดิม ข้อมูลจะมีการกระจายแบบอื่นก็ตาม การใช้ทฤษฎีนี้ช่วยให้วิเคราะห์สถิติสามารถทำได้ง่ายขึ้นและแม่นยำมากขึ้น

3.2..3 Magnetic Response : การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของ DRV5055A2 Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ซึ่งสามารถคำนวนหาแรงดันที่ผ่านเซ็นเซอร์นี้ได้ดังสมการ

3.2..4 โปรแกรม Tracker : ถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งค่าในกราฟ Datasheet เพื่อให้ข้อมูลที่ได้มีช่วงและสัดส่วนที่ถูกต้องตามสิ่งที่ควรจะเป็น

### 3.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 3.5.1 Datasheet

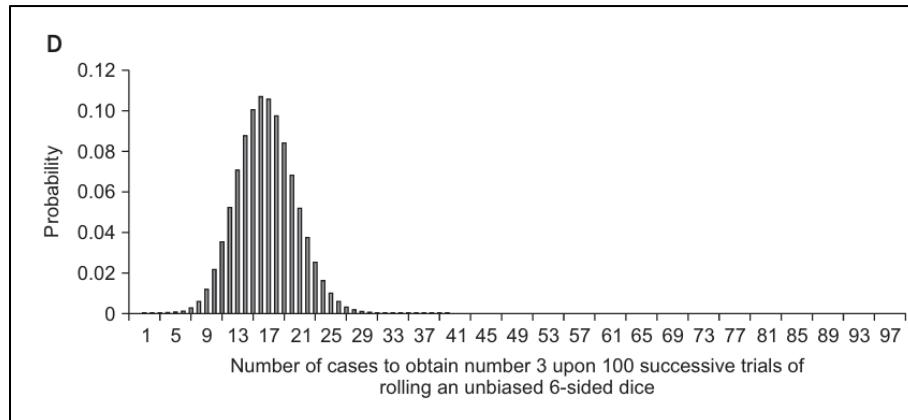


รูปที่ 91 แสดงค่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กและค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

เซนเซอร์ DRV5055A2 มีการตอบสนองในลักษณะคล้ายเชิงเส้นและ S-Curve เล็กน้อย ต่อ การเปลี่ยนแปลงของ Magnetic Flux Density โดยเมื่อ Magnetic Flux Density เป็นอนุพันธ์ของ การเปลี่ยนแปลงของ Magnetic Flux Density โดยอุดศูนย์กลางของกราฟที่ครึ่งเท่าของ แรงดันขาเข้า เป็นค่าที่เซนเซอร์จะจับได้ว่าไม่มีสนามแม่เหล็ก โดยแรงดันขาออกนี้จะเปลี่ยนแปลง ตามความเข้มของสนามแม่เหล็กและทิศทางที่เซนเซอร์ตรวจจับ

### 3.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1) Central limit theorem : the cornerstone of modern statistics



รูปที่ 92 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูล 100 ค่า

ขนาดตัวอย่างที่ถือว่าเพียงพอในการให้ค่าเฉลี่ยกระจายตัวแบบปกติมักอยู่ที่ 30 ขึ้นไป แต่ในหลายกรณีที่ต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในงานที่มีความผันผวนสูง จึงเลือกใช้ค่า 100 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่มีการกระจายแบบปกติมากขึ้น

#### 2) Calculation of RMS Values for Variable Frequency Sinusoidal Signals, Using Phasors and Digital SAL and CAL Filters

##### 2.1. Definition of RMS value

The mathematical definition of RMS of a signal  $x(t)$  is given by equation (1)

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Where T is the period of the signal.

รูปที่ 93 แสดงถึงคำนิยามและการคิดแบบ RMS

สมมติว่าข้อผิดพลาดของสัญญาณ (Error) ที่เราได้รับมีการกระจายแบบปกติและไม่มีความเอนเอียง การใช้ RMS จะช่วยให้สามารถวัดความแปรปรวนของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ โดยค่า RMS ที่ต่อไปนี้แสดงถึงการกระจายตัวของสัญญาณที่อยู่ใกล้กับค่าที่คาดหวัง และอาจนำ RMS มาช่วยลดสัญญาณรบกวนได้โดยการกรองค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาด หรือใช้ RMS เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Error) ของค่าเฉลี่ย การใช้ RMS เพื่อลด Noise นั้นสามารถ

ทำได้โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เก็บได้แล้วใช้ค่า RMS เป็นตัวบ่งบอกถึงขอบเขตของค่าที่น่าจะเป็นของสัญญาณ ลดผลกระทบจากค่า Noise ที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้มีความเสถียรและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

### 3.6 วิธีดำเนินการทดลอง

ทำการทดสอบ DRV5055A2 Radiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor โดยเชื่อมต่อเซนเซอร์กับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE และตั้งค่าโปรแกรมใน MATLAB Simulink เพื่อเก็บข้อมูลจากขา ADC โดยปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์ในแต่ละช่วง และบันทึกข้อมูลสัญญาณ Output ที่ได้ในแต่ละระดับการปรับระยะห่างจาก Data Inspector ของ MATLAB Simulink จากนั้นนำวัสดุสำหรับ Magnetic Field Shielding มาทดสอบการลดผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่มีต่อเซนเซอร์ โดยปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์ และเก็บค่าเมื่อเดิมอีกรอบ หลังจากนั้นก็ทำการทดลองแบบเดิมอีกรอบ โดยกลับข้ามแม่เหล็ก และนำข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสัญญาณ Output และ Magnetic Flux Density กับระยะห่างของเซนเซอร์กับแม่เหล็ก และนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ Datasheet รวมถึงผลจากการ Shielding สุดท้ายทำการสรุปผลการทดลองทั้งหมด

### 3.7 วัสดุอุปกรณ์

- 3.7.1 DRV5055A2 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor จำนวน 1 อัน
- 3.8.2 STM32 Nucleo-G474RE จำนวน 1 บอร์ด
- 3.8.3 พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 เส้น
- 3.8.4 MagneticXplorer จำนวน 1 ชุด (ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, DRV5055A2, 3D-Print ใช้สำหรับการปรับระยะแม่เหล็กกับ Sensor)
- 3.8.5 สายจัมเพอร์

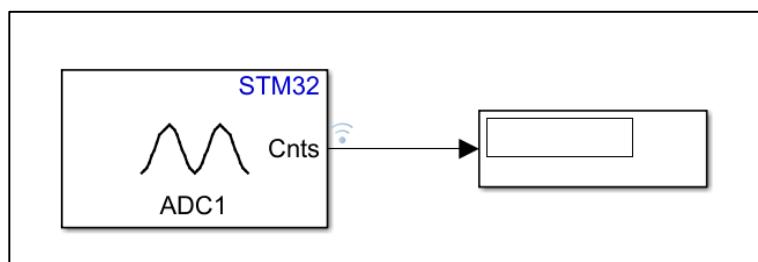
### 3.8 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.8.1 การเชื่อมต่อระหว่าง Magnetic Sensor, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์

- 1.) ขา 1 เชื่อม VCC ไฟ 3.3 V
- 2.) ขา 2 เชื่อม Analog Pin A0 (PA0)
- 3.) ขา 3 เชื่อม GND

#### 3.8.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับการเก็บค่าใน Simulink

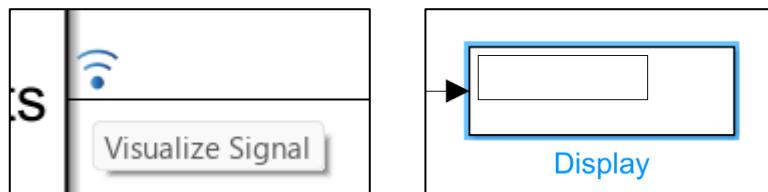
การเก็บค่า Magnetic Sensor โดยใช้ Block ADC ร่วมกับ Block Display



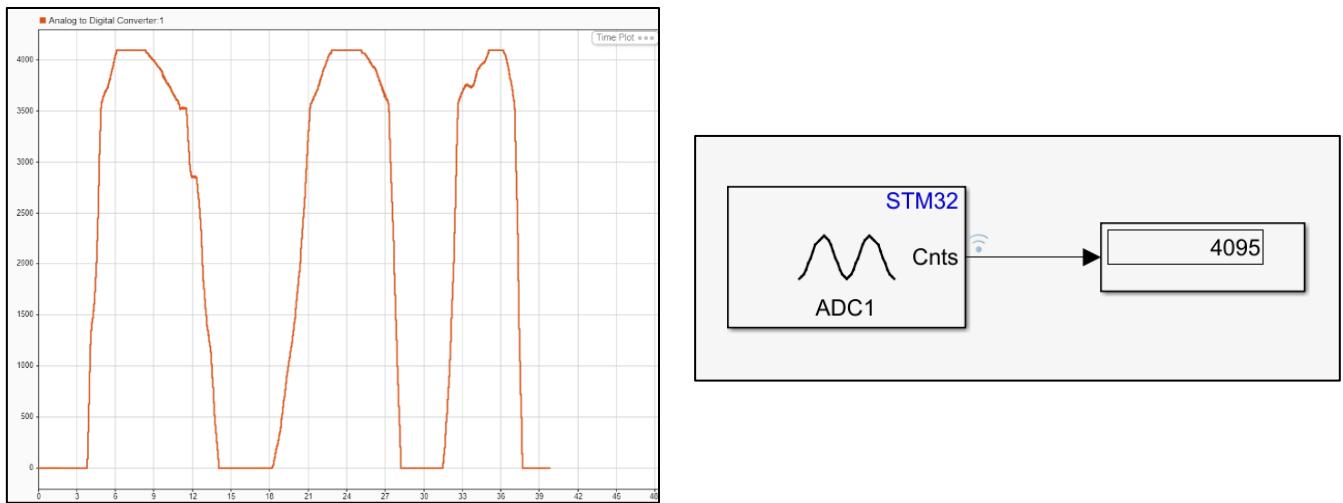
รูปที่ 94 แสดง Block Analog to Digital Converter สำหรับการแปลงค่าจาก Magnetic Sensor เป็นค่าตัวเลข

#### 3.8.3 การวัดค่าและบันทึกข้อมูลที่ได้จาก Magnetic Sensor

เมื่อสร้างแบบจำลองเสร็จสิ้น ก็สามารถเริ่มต้นการเก็บค่าได้ด้วยการปรับระยะเวลา เช่นเซอร์และแม่เหล็ก โดยแต่ละระยะจะให้ค่าที่ต่างกันไปตามความห่างที่มากขึ้น โดยจะสามารถ นำค่าที่วัดได้มาจากการ Data Inspector ซึ่งสามารถดูได้จาก Visualize Signal ของ Block ADC และการ Display ค่าแต่ละจุดอุปกรณ์



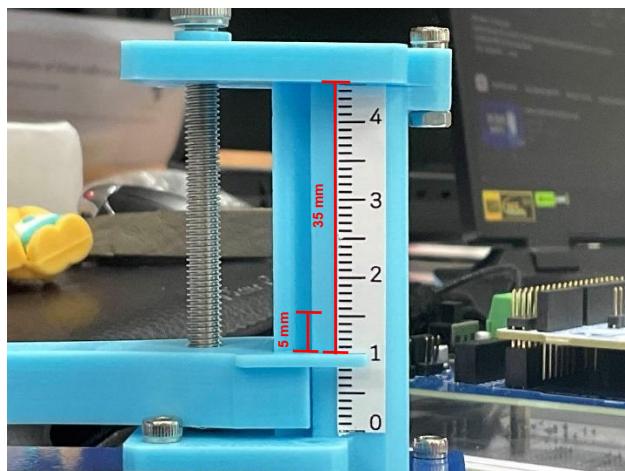
รูปที่ 95 แสดงวิธีการดูค่าที่ได้จากการทดลองทั้งการ Visualize Signal และการ Display



รูปที่ 96 แสดงการแสดงค่าจากการ Data Inspector และค่าตัวเลขแต่ละจุดจาก Display

เนื่องจากทางคณะผู้จัดทำเลือกนำกราฟจากการ Visualize Signal ของ Block ADC มาวิเคราะห์ค่าต่อ ทำให้สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Magnetic Sensor สามารถให้ค่าได้ตั้งแต่ช่วง 0 ถึง 4095 ด้วยการปรับระยะตั้งแต่ 0 เมตร ถึง 0.035 เมตร เหมือนกันทั้งหมด

### 3.8.4 การทดลองและการบันทึกข้อมูลแบบ Real-Time



รูปที่ 97 แสดงการแบ่งช่วงเก็บข้อมูลในการทดลอง

จาก Magnetic Sensor ที่มีระยะระหว่างเซนเซอร์และแม่เหล็ก 0.035 เมตร ทางคณะผู้จัดทำจึงเลือกเก็บข้อมูลทุก ๆ 0.005 เมตร คิดเป็น 14.25 เปอร์เซ็นต์ ของ 0.035 เมตร โดยเก็บ

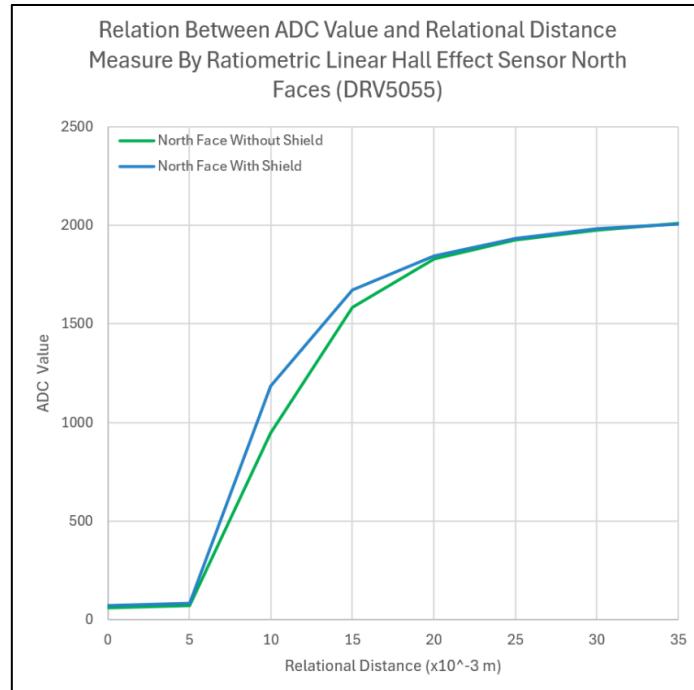
ค่าครั้งละ 100 Samplings ด้วย Fixed-step time ที่ 0.01 วินาทีเป็นเวลา 1 วินาที ทำให้ทุก ๆ 0.005 เมตร มีทั้งหมด 100 Samplings อันนี้องมาจากการ Central Limit Theorem ที่กล่าวไว้ว่า จำนวน Samplings ที่นโยบายสุดที่แนะนำเพื่อใช้ในการคำนวณคือ 30 Samplings แต่ เพราะทางคณิตศาสตร์จัดทำต้องการความแม่นยำที่มากขึ้นและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) จึงเลือก จำนวน Sampling ที่ 100 Samplings แต่ Samplings ที่ได้มานั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยเพื่อสรุปค่าที่ได้ที่แท้จริง ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองนั้นไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องเสมอไป เนื่องจากการทดลองอาจได้รับ ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อค่าที่ได้ ทำให้คณิตศาสตร์จัดทำต้องนำทุกค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยด้วยการหา RMS ทางคณิตศาสตร์จัดทำจึงเก็บข้อมูลการทดลอง และหาค่า RMS ของ Samplings ในทุก ๆ 0.005 เมตร ของ Magnetic Sensor เพื่อวัดค่าใน North Pole

การวัดสนามแม่เหล็กของ Magnetic Sensor จะต้องทำการวัดทั้งฝั่งข้าวเหนือ (North Pole) และข้าวใต้ (South Pole) ทำให้คณิตศาสตร์สามารถแบ่งการทดลองได้ 2 แบบใหญ่ ๆ คือการทดลองระหว่างแม่เหล็กข้าวใต้กับเซนเซอร์ และการทดลองระหว่างแม่เหล็กข้าวเหนือ ซึ่งการทดลองที่สามารถสนับสนุนแม่เหล็ก 2 รูปแบบคือ Magnetic Sensor with No Sheild และ Magnetic Sensor with Sheild

- Magnetic Sensor with North Pole Magnet

Distance	North with no shield	North with Shield
0	592495979	7273735472
5	71.87062083	8269255856
10	9452014506	1183132739
15	1585650171	16709845
20	1828092481	1846141237
25	1927.873435	1932371764
30	1976.300519	1983832624
35	2010.490175	2005666191

ตารางที่ 3 แสดงค่า ADC ที่อ่านได้โดยเก็บค่าเทียบกับระยะห่างของแม่เหล็กข้าวเหนือแบบมีและไม่มี Shield



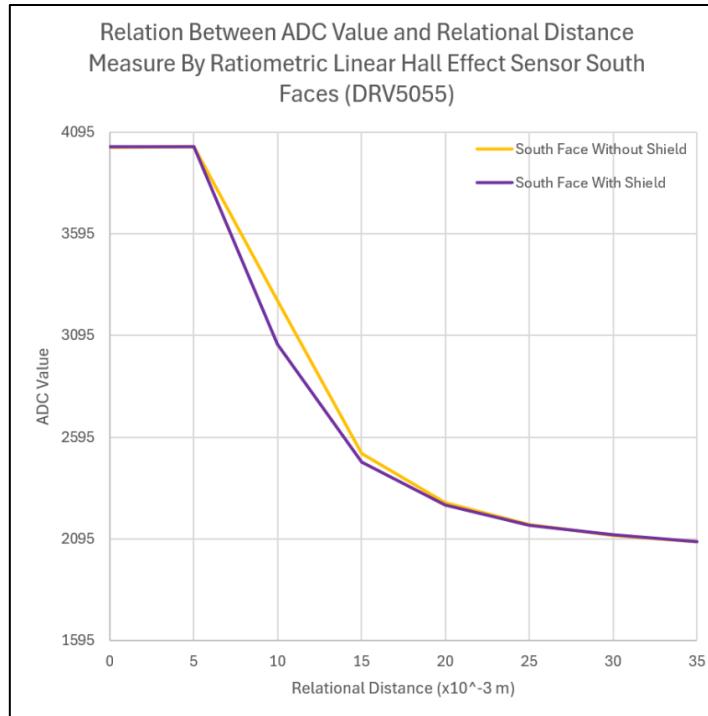
รูปที่ 98 แสดงความสัมพันธ์ของค่า ADC ที่อ่านได้เทียบกับระยะห่างระหว่าง DRV5055A2 และแม่เหล็กข้าวเหนียว

จากการทดสอบถึงการนำค่าที่ได้จากการทดลองกับ Magnetic Sensor แบบ No Shield (เส้นสีฟ้า) และแบบ With Sheild (เส้นสีน้ำเงิน) โดยค่าของ With Shield มีพุ่งติดลมที่ค่าลูปเข้าช่วง 2000 เเร็วกว่าแบบ No Shield

#### 3.8.4.1 Magnetic Sensor with South Pole Magnet

Distance	South With no Shield	South with Shield
0	4021.891045	4025234355
5	4024428338	40254235
10	3267.807195	3053.984262
15	2514.337373	2473.181202
20	2271.717151	2261.628122
25	2165.9056	2160.403361
30	2113.038905	2116.06404
35	2080.013561	2080.214065

ตารางที่ 4 แสดงค่า ADC ที่อ่านได้โดยเก็บค่าเทียบกับระยะห่างของแม่เหล็กข้าวได้แบบมีและไม่มี Shield



รูปที่ 99 แสดงความสัมพันธ์ของค่า ADC ที่อ่านได้เทียบกับระยะระหว่าง DRV5055A2 และแม่เหล็กขั้วใต้คากลางของเร็วกว่าแบบ No Shield

จากการทดสอบถึงการนำค่าที่ได้จากการทดลองกับ Magnetic Sensor แบบ No Shield (เส้นสีฟ้า) และแบบ With Sheild (เส้นสีน้ำเงิน) โดยค่าของ With Shield มีพฤติกรรมที่ค่าลูเข้าซึ่งค่ากลางของเร็วกว่าแบบ No Shield

### 3.9. ผลการทดลอง

จากการภาพห่วงค่า ADC กับระยะทางของขั้วเหนือและขั้วใต้ ทำให้คณะผู้จัดทำนำมารวเคราะห์ต่อ ด้วยการแปลงค่า ADC เป็นแรงดันประมาณ 0 ถึง 3300 มิลลิโวลต์ (mV) ด้วยการเทียบบัญญัติตรายางศ์ เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถนำค่านี้ไปคำนวณต่อเพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กในหน่วย มิลลิเทสลา (mT) ในสมการ Magnetic Response

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

- เมื่อ  $V_{OUT}$  คือ แรงดันไฟฟ้าข้ออก มีหน่วยเป็น mV  
 $V_Q$  คือ แรงดันไฟครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟขาเข้า มีหน่วยเป็น mV  
 $B$  คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) มีหน่วยเป็น mT  
 $\text{Sensitivity}_{25^\circ C}$  คือค่าความไวของเซ็นเซอร์ที่อุณหภูมิ  $25^\circ C$  ( $30 \text{ mV/mT}$ )  $\frac{\text{mV}}{\text{mT}}$   
 $S_{TC}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น  $\%/\text{C}$   
 $T_A$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม มีหน่วยเป็น  $^\circ C$

Distance	North With no Shield	North with Shield	South With no Shield	South with Shield
0	47.74692871	58.61618329	3241.084358	3243.778601
5	57.91771642	66.63869268	3243.129063	3243.930905
10	761.7008027	953.4403029	2633.397739	2461.086218
15	1277.813325	1346.580915	2026.205942	1993.039796
20	1473.18808	1487.732865	1830.687814	1822.557461
25	1553.59764	1557.222667	1745.418432	1740.984394
30	1592.67148	1598.692957	1702.815235	1705.253072
35	1620.175232	1616.287773	1676.201405	1676.362982

ตารางที่ 5 แสดงการแปลงค่า ADC เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าในหน่วย mV

เมื่ออ้างอิงจาก Datasheet คณะผู้จัดทำสามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อให้ได้มาซึ่งค่า Magnetic Field Intensity หรือค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กจากสมการ Magnetic Response จากสมการทั้งหมดเราสามารถแทนค่ากลับเพื่อหาความเข้มของสนามแม่เหล็กโดยดังนี้

$$V_{OUT} = 1650 + B \times \left( 30 \times (1 + 0 \times (25^\circ - 25^\circ)) \right)$$

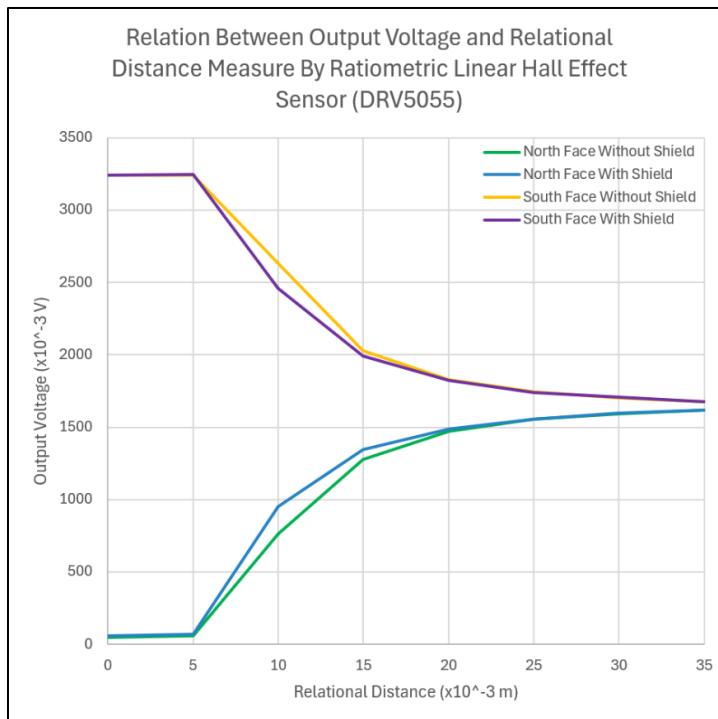
$$B = (V_{OUT} - 1650) / 30$$

หากนำค่าแรงดันไฟข้าออกแทนกลับเข้าสู่สมการใหม่ก็สามารถทำให้เราคำนวณหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity) ได้ดังกราฟที่แสดงด้านล่าง

Distance	North With no Shield	North with Shield	South With no Shield	South with Shield
0	-527751341	-5241712176	5240725818	5249600136
5	-5244012792	-5215287574	5247460683	5250101795
10	-2925886684	-2294333653	3239122988	2671561984
15	-1225911315	-9994040933	1239150006	1129907103
20	-5823844537	-5344767305	5951509012	5683710836
25	-3175308311	-305590689	314289962	2996850911
30	-1.888291156	-1.689955293	1.739632251	1.819929915
35	-0.982370476	-1.1104159	0.863023875	0.86834593

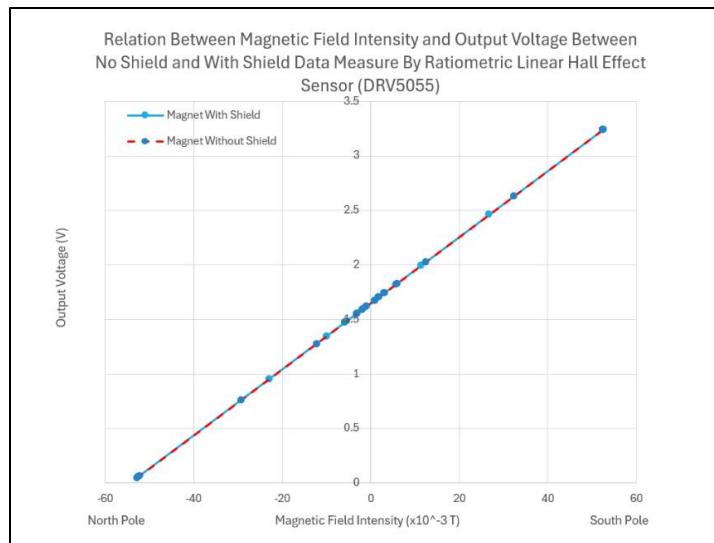
ตารางที่ 6 แสดงการแปลงค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณตาม Datasheet มีหน่วยเป็น mT

ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าข้าอกและระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับเซนเซอร์ DRV5055A2 ได้ดังนี้



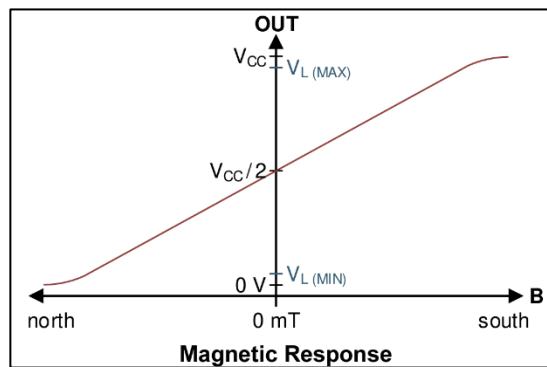
รูปที่ 100 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Output Voltage และ Relational Distance ของข้าแม่เหล็กที่และการมีอยู่ของ Shield ที่ต่างกัน

จากการสังเกตเบื้องต้น คณะผู้จัดทำมีความเห็นว่า ลักษณะกราฟของ Relation Between Output Voltage and Relational Distance Measure By Ratiometric Linear Hall Effect Sensor (DRV5055A2) มีลักษณะสู่เข้าหาค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 1.65 V เทียบเท่ากับครึ่งเท่าของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และหากสังเกตถึงความแตกต่างระหว่างแม่เหล็กข้าวเหนือแบบ Without Shield (North Faces No Shield) เทียบกับแม่เหล็กข้าวเหนือแบบ With Shield (North Faces With Shield) จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันไฟที่วัดได้ในช่วงต้นและปลายนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันแต่หากเทียบกับบริเวณช่วงกลางของกราฟจะสามารถเห็นได้ถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนว่าในกรณีที่หน้าแม่เหล็ก Without Shield จะมีแรงดันไฟฟ้าออกมากกว่าหน้าแม่เหล็กที่มี With Shield



รูปที่ 101 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกเทียบกับความเข้มของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กแบบมีและไม่มี Shield

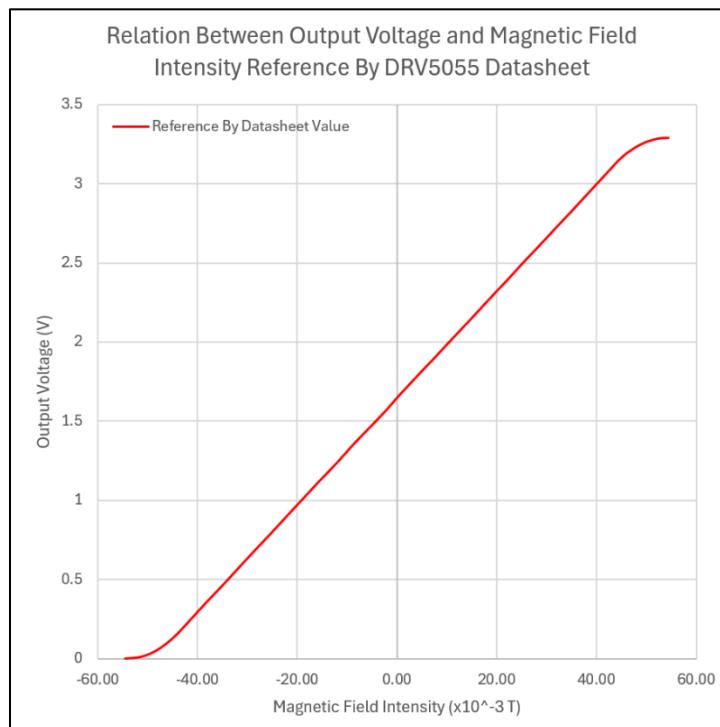
จะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟเส้นของ Magnet Without Shield (เส้นประสีแดง) และเส้นกราฟของ Magnet With Shield (เส้นสีฟ้า) มีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมากจนสามารถเทียบเคียงค่าซ้อนกันคล้ายเส้นเดียวกัน เนื่องจากข้อมูล (จุดสีฟ้า) มีความกระฉุกตัวมากในช่วงค่ากลางของแรงดันขาเข้า (สนามแม่เหล็กเป็น 0 T) และมีความห่างของข้อมูลมากกว่าในช่วงปลาย (สนามแม่เหล็กมากที่สุด และเปลี่ยนแปลงเร็วที่สุด) ทำให้มีผลต่อเส้นกราฟอย่างมากทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะเป็น Linear โดยเมื่อคณะผู้จัดทำจัดการกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้พอสมควรแล้ว คงจะจัดจึงสามารถเปรียบเทียบค่าจากการทดลองและค่าจาก Datasheet ในลำดับถัดไป



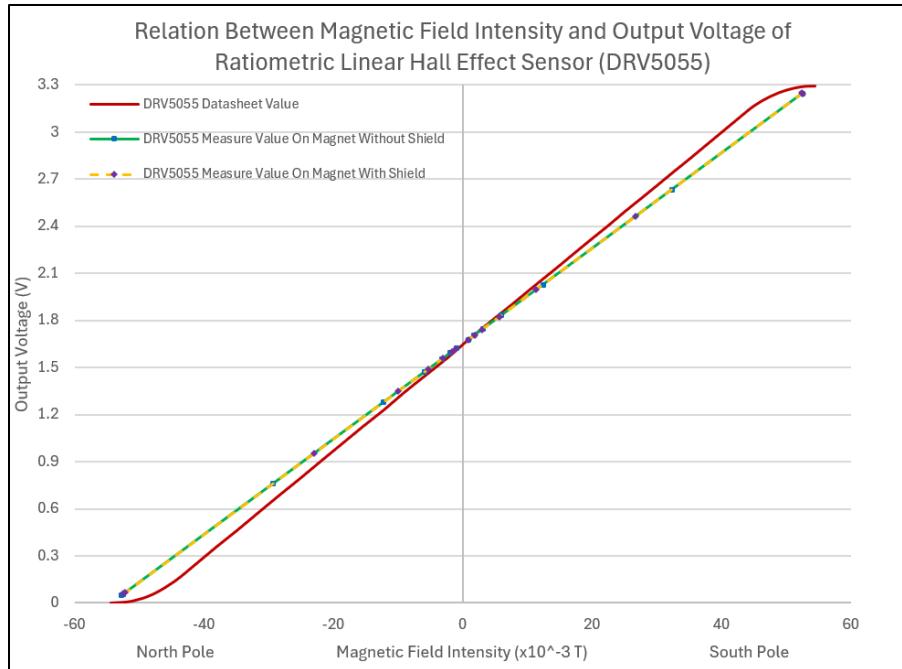
รูปที่ 102 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกกับความเข้มของสนามแม่เหล็กจาก Datasheet ของ DRV5055A2

จากรูปที่ 102 จะเห็นได้ว่า Datasheet นั้นไม่มีสัดส่วนในแกน x ให้ทำให้มีความจำเป็นต้องทำการคำนวนย้อนกลับเพื่อให้ได้มาซึ่งกราฟของ Datasheet โดยข้อมูลที่เรานำมาใช้คิดหาค่า Scale ที่แท้จริงคือ

ค่า  $V_{L(MIN)}$  และ  $V_{L(MAX)}$  รวมถึง  $V_{CC}$  ของ DRV5055A2 ซึ่งจะทำให้เราได้ค่าในแกน y มากอย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่ในส่วนของสัดส่วนในแกน x นั้น จะใช้ค่า Linear Magnetic Sensing Range ที่อ้างอิงจาก Datasheet โดยอยู่ที่ช่วง  $\pm 44$  mT และเมื่อนำข้อมูลสัดส่วนของแกน y ที่ทราบก่อนหน้ามารวมกับสัดส่วนแกน x ที่วิเคราะห์มา นำไปปัตติ้งค่าระยะห่างในโปรแกรม Tracker ทำให้คนผู้จัดทำสามารถสร้างกราฟที่อ้างอิงมาจาก Datasheet ใหม่ได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 103 แสดงถึงกราฟอ้างอิงมาจาก Datasheet ที่ผ่านการกำหนดสัดส่วนใหม่และผ่านโปรแกรม Tracker



รูปที่ 104 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Output Voltage และ Magnetic Field Intensity ของค่าที่เก็บผลได้ของแม่เหล็กแบบมีและไม่มี Shield เทียบกับค่าของ Datasheet

จากราฟนี้สามารถเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองจริงของแม่เหล็ก With Shield (เส้นประสีเหลืองจุดม่วง) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงของแม่เหล็กที่ Without Shield (เส้นสีเขียวจุดฟ้า) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเส้นทั้งสองนั้นมีความคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก และเมื่อนำค่าทั้งสองมาเทียบกับค่าที่ได้มาจากการ Datasheet (เส้นสีแดง) รายจุดก็จะเห็นได้ว่าค่า Magentic Field Intensity นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดมาได้และถูกคำนวณย้อนกลับ จะมีในช่วงแรกและช่วงท้ายของกราฟ Datasheet ที่สามารถสังเกตุเห็นได้ว่ากราฟนั้นไม่ได้มีความเป็นเส้นตรงแต่กราฟที่เราได้มาจากการทดลองนั้นมีความเป็นเส้นตรงเป็นอย่างมากจึงสามารถอนุมานได้ว่าที่กราฟไม่ได้แสดงให้เห็นถึงความคงกึ่ง เพราะว่าค่าที่ทดลองไม่สามารถเก็บค่าที่มีช่วงหรือระยะที่มีความถี่สูงมาก ๆ ได้ด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือ

### 3.10 สรุปผล

#### 3.10.1 Comparing Magnetic Sensor with North Pole Magnet with Magnetic Sensor with South Pole Magnet

##### 1) Magnetic Sensor with North pole Magnet

จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยแม่เหล็กทิศเหนือนี้อัน ให้ค่าเข้าใกล้แรงดันที่น้อยที่สุด ( $0 \text{ V}$ ) เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มมากที่สุด และค่อยๆ เข้าค่าครึ่งเท่าของแรงดันขาเข้า ( $1.65 \text{ V}$ ) เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น  $0 \text{ T}$

##### 2) Magnetic Sensor with South pole Magnet

จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยแม่เหล็กทิศใต้นี้ ให้ค่าเข้าใกล้แรงดันที่มากที่สุด ( $3.3 \text{ V}$ ) เมื่อสนามแม่เหล็กมีความเข้มมากที่สุด และค่อยๆ เข้าค่าครึ่งเท่าของแรงดันขาเข้า ( $1.65 \text{ V}$ ) เมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าเป็น  $0 \text{ T}$

#### Magnetic Flux

ทำให้สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่า DRV5055A2 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor มีพฤติกรรมตอบสนองต่อขั้วของแม่เหล็กต่างกัน คือให้ค่าที่กลับกันระหว่างขั้วเหนือและขั้วใต้

#### 3.10.2 Density with Shielding and No Shielding

##### 1) Density with Shielding

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการนำแผ่น Shield มาวางปิดแม่เหล็กไว้ทำให้ค่าที่สนามแม่เหล็กที่ออกแบบมีพฤติกรรมที่ลู๊เข้าค่าครึ่งเท่าของแรงดันขาเข้า ( $1.65 \text{ V}$ ) เร็วกว่าค่าสนามแม่เหล็กเมื่อไม่มีแผ่น Shield มา กัน เนื่องจากการการมีแผ่น Shield เปรียบเสมือนบล็อกที่ทำหน้าที่ขัดขวางการผ่านไปของความเข้มของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กขั้วเหนือและขั้วใต้ นั่นเป็นสาเหตุที่ทำให้กราฟลู๊เข้าสู่ค่ากลาง (สนามแม่เหล็กเป็น  $0 \text{ T}$ ) ด้วยอัตราที่เร็วกว่าแบบไม่มีแผ่น Shield

## 2) Density with No Shielding

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการไม่มีแผ่น Shield มากwang ปิดแม่เหล็กไว้ทำให้ค่าที่สนาณแม่เหล็กที่อุกามามีพุติกรรมที่ลูเข้าค่าครึ่งเท่าของแรงดันขาเข้า ( $1.65\text{ V}$ ) ซึ่กกว่าค่าสนาณแม่เหล็กเมื่อมีแผ่น Shield มากนั้น เนื่องจากการการไม่มีแผ่น Shield เปรียบเสมือนการไม่มีบล็อกความขัดขวางการผ่านไปของความเข้มของสนาณแม่เหล็กจากแม่เหล็กข้าวเหนือและข้าวใต้ นั่นเป็นสาเหตุที่ทำให้กราฟลูเข้าสู่ค่ากลาง (สนาณแม่เหล็กเป็น  $0\text{ T}$ ) ด้วยอัตราที่ซากกว่าแบบมีแผ่น Shield

## 3) การเปลี่ยนแปลงของ Magnetic Flux Density

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นทางทำให้แรงดันขาออกมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเชิงเส้นทั้งในข้าวเหนือและข้าวใต้ เมื่อตำแหน่งของแม่เหล็กถูกการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลให้ค่า Magnetic Flux Density ที่ Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor ตรวจจับได้นั้นเปลี่ยนแปลง และจะส่งผลให้สัญญาณ Output จาก Sensor เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

### 3.11 อภิปรายผล

#### 3.11.1 การตอบสนองของ Magnetic Sensor ต่อทิศทางสนาณแม่เหล็ก

ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของเซนเซอร์แม่เหล็กในการตรวจจับทิศทางและความเข้มของสนาณแม่เหล็ก โดยค่าแรงดันขาออกของเซนเซอร์จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มของสนาณแม่เหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานของเซนเซอร์ Hall Effect ที่เมื่อมีแม่เหล็กอยู่ห่างเซ็นเซอร์ออกไปมากเท่าไร ก็จะยิ่งตรวจจับค่าความเข้มของสนาณแม่เหล็กได้น้อยลงอันเนื่องมาจากการปฏิกิริยา Hall Effect และการทดลองที่ใช้แม่เหล็กทิศเหนือและทิศใต้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของเซนเซอร์ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ตรงกับข้อมูลใน Datasheet

#### 3.11.2 ผลกระทบของแผ่น Shield ต่อ Magnetic Flux Density

ในการทดลองที่ใช้แผ่น Shield เพื่อลดความเข้มของสนาณแม่เหล็กนั้น แสดงให้เห็นว่าการมีอยู่ของแผ่น Shield นั้นลดความเข้มของสนาณแม่เหล็กที่ส่งไปถึงเซนเซอร์

อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้แรงดันข้าออกของเซนเซอร์ลดลงเร็วกว่าในกรณีที่ไม่มีการป้องกัน ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของแผ่น Shield ในการลดทอนสนามแม่เหล็ก การวิเคราะห์ลักษณะของกราฟช่วยให้เข้าใจผลกระทบของการใช้ Shield ต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กและผลที่เกิดขึ้นกับแรงดันข้าออก

### 3.11.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่ามาตรฐาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองแสดงถึงความสอดคล้องกับข้อมูลที่คาดการณ์ไว้ใน Datasheet ทั้งในด้านการตอบสนองต่อทิศทางและความเข้มของสนามแม่เหล็ก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการใช้แผ่นป้องกันสนามแม่เหล็ก แสดงให้เห็นว่าเซนเซอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ระบุในทฤษฎี

## 3.12 ข้อเสนอแนะ

- 3.12.1** ควรเปลี่ยนมาใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงและถูกต้อง เช่น ปรับซึ่งของระยะห่างยังไม่ความเหลื่อม 0.001 m จะนั่นควรปรับปรุงให้ถูกต้อง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันข้าออกของเซนเซอร์
- 3.12.2** ควรทำการทดลองในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น ทดลองในสภาพแวดล้อมที่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กบกวน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของการตอบสนองของเซนเซอร์แม่เหล็ก
- 3.12.3** ควรเพิ่มการทดลองกับ Shield ต่างชนิดมากขึ้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการป้องกันสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน เช่น การเปลี่ยนวัสดุ ลดหรือเพิ่มความหนาของ Shield เป็นต้น

## 3.13 เอกสารอ้างอิง

- [1] TEXAS INSTRUMNENTS, DRV5055A2 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor datasheet (Rev. B), Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.mouser.com/datasheet/2/54/pta-778345.pdf>

## บทที่ 4

### Load Cell

#### 4.1 จุดประสงค์

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

Differential Amplifier

4.1.2 เพื่อศึกษาสัญญาณ Output ของ Load Cell เมื่อแรงที่กระทำต่อ Load Cell เปลี่ยนแปลงไป

4.1.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Gain และ ค่าความต้านทานของ Single External Resistor และ ส่งผลอย่างไรกับการวัดค่าของ Load Cell

4.1.4 เพื่อศึกษาระบวนการ Signal Conditioning ทั้งหมดได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ว่าค่าที่อ่านได้ จาก Load Cell มีที่มาอย่างไร

4.1.5 ศึกษาการ Calibrate Sensor รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำต่อ Load Cell และดันไฟฟ้าที่ออกมากจาก Load Cell ทั้งแบบที่ยังไม่ผ่าน INA125P และผ่าน INA125P

4.1.6 ศึกษาการประยุกต์ใช้ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่า ร่วมกับบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้สัญญาณจาก INA125P Instrumentation Amplifier ที่ต่อเข้ากับ Single Point Load Cell เป็น Input และ แสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณ แสดงผลเป็นกราฟจาก Data Inspector ใน MATLAB Simulink แสดงให้เห็นว่าสัญญาณ Output แปรผันตามสัญญาณ Input แบบ Real Time โดยมี Output

#### 4.2 สมมติฐาน

เมื่อนำ Load Cell ต่อกับ INA125P เพื่อขยายสัญญาณแล้วค่าสัญญาณ Output ที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงที่กระทำต่อ Load Cell และการปรับค่า Gain ผ่าน Resistor จะส่งผลต่อระดับความไวในการวัดสัญญาณ Output ที่ขยายได้

#### 4.3 ตัวแปร

ตัวแปรต้น : แรงที่กระทำต่อ Load Cell

ตัวแปรตาม : แรงดันไฟฟ้า Output ที่ได้จาก Load Cell หลังผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้ว  
ตัวแปรควบคุม : ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจร, อุณหภูมิและสภาพแวดล้อม

#### 4.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1) Load Cell : เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดน้ำหนักหรือแรง ทำงานโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าภายใต้เมื่อเกิดการยืดหรือบีบของ Strain Gauge ใน Load Cell โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงที่กระทำต่อ Load Cell
- 2) Strain Gauge : อุปกรณ์ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของวัสดุ โดยเมื่อวัสดุเกิดการยืดหรือบีบ จะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของ Strain Gauge เปลี่ยนไป ใช้ใน Load Cell เพื่อวัดแรงหรือแรงดันที่กระทำต่อวัสดุ
- 3) Wheatstone Bridge : วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยตัวต้านทานสี่ตัวเชื่อมต่อกันในรูปแบบของสะพาน โดยใช้เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงเล็ก ๆ ของแรงดันไฟฟ้า ใช้งานใน Strain Gauge เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าแรง
- 4) Differential Amplifier : ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างสองขาเข้า ทำให้สามารถขยายสัญญาณที่เกิดจาก Load Cell หรือ Strain Gauge ได้อย่างแม่นยำ โดยลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น
- 5) Gain : อัตราการขยายสัญญาณที่สามารถปรับค่าได้ โดยค่า Gain มีผลต่อการขยายสัญญาณแรงดันข้ามจาก Load Cell เพื่อให้ได้ค่าที่สามารถอ่านหรือวัดได้แม่นยำขึ้น ขึ้นอยู่กับความต้านทานของภายนอกที่เชื่อมต่อกับ Differential Amplifier
- 6) Signal Conditioning : กระบวนการจัดการสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานหรือการอ่านค่าผ่านอุปกรณ์ เช่น การขยายสัญญาณ การกรองสัญญาณ และการแปลงหน่วย เพื่อให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำและสามารถวิเคราะห์ได้

- 7) STM32 Nucleo-G474RE : เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของ STMicroelectronics ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักพัฒนาสามารถทดลองและทดสอบการพัฒนาซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ได้อย่างง่ายดาย
- 8) Simulink : เป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย MathWorks เพื่อการจำลองระบบและออกแบบโมเดลแบบ Block Diagram โดย Simulink ถูกออกแบบให้ใช้สำหรับการจำลองทางวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จริงเพื่อควบคุมและเก็บข้อมูลได้
- 9) Block ADC/Block Analog to Digital Converter : เป็น Block พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้จำลองการแปลงสัญญาณจากรูปแบบอนาล็อก (Analog) ไปเป็นรูปแบบดิจิทัล (Digital)
- 10) Data Inspector : พังก์ชันภายใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ โดยสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time และทำการบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ภายหลัง
- 11) Visualize Signal : การแสดงผลสัญญาณใน Simulink ด้วยรูปแบบกราฟหรือภาพที่แสดงถึงคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น การแสดงผลรูปคลื่นของสัญญาโนนาล็อกหรือดิจิทัล เพื่อช่วยวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของสัญญาณนั้น
- 12) RMS (Root Mean Square) : เป็นการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังสอง มีคุณสมบัติช่วยลดอิทธิพลของค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและสัญญาณรบกวนที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับสัญญาณหลัก

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n X_i^2}$$

เมื่อ RMS คือค่าเฉลี่ยของกำลังสอง

$n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$X_i$  คือข้อมูล Raw Data ตัวที่  $i$  โดยที่  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

13) Single Point Load Cell : เป็น Load Cell ที่ออกแบบมาเพื่อวัดแรงหรือการรับน้ำหนักในจุดเดียว โดยสามารถวัดน้ำหนักได้อย่างแม่นยำแม้ว่าแรงกระทำจะอยู่ที่จุดใดจุดหนึ่งของ Cell

14) INA125P : อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ มีหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างสองขาเข้าใน Load Cell หรือ Strain Gauge โดยมี Voltage Reference ภายใน ทำให้สามารถสร้างแรงดันอ้างอิงให้กับ Load Cell ได้โดยตรง

#### 4.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

- 1) Load Cell : การใช้เซนเซอร์ในการวัดแรงโดยการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีแรงกระทำต่อ Strain Gauge ภายใน Load Cell โดยเชื่อมต่อเข้ากับ Differential Amplifier INA125P และวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปคำนวณเป็นน้ำหนักในหน่วยมาตรฐาน SI
- 2) Wheatstone Bridge : เป็นวงจรที่มีตัวต้านทานสี่ตัวเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Strain Gauge เมื่อเกิดแรงกระทำต่อ Load Cell ทำให้แรงดันทั่วจร Bridge เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอ่านได้ผ่าน Differential Amplifier
- 3) Strain Gauge : ใช้หลักการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดจากการวางน้ำหนักไว้บน Load Cell โดยเมื่อมีแรงกระทำต่อ Load Cell ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Wheatstone Bridge เปลี่ยนตามไปด้วย
- 4) Differential Amplifier : ใช้ในการขยายสัญญาณแรงดันที่ส่งมาจาก Wheatstone Bridge เพื่อให้ได้สัญญาณที่อ่านได้ชัดเจนขึ้น
- 5) Gain : เป็นค่าอัตราการขยายให้ทั่วจร Differential Amplifier INA125P โดยสามารถปรับได้จากตัวต้านทานปรับค่าได้ และสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ  $G$  คือ ค่า Gain หรืออัตราการขยายสัญญาณของ INA125P  
 $R_G$  คือ ค่าความต้านทานที่ได้จากการปรับตัวต้านทานปรับค่าได้มีหน่วยเป็นโอม ( $\Omega$ )

$$V_0 = (V_{IN+} - V_{IN-}) \times \text{Gain}$$

เมื่อ  $G$  คือ ค่า Gain หรืออัตราการขยายสัญญาณของ INA125P  
 $V_0$  คือ แรงดันไฟที่ออกมายจากขา 10 ( $V_0$ ) และ 11 (Sense) ของ INA125P  
 $V_{IN+}$  คือ แรงดันไฟขา 6 ( $V_{IN+}$ ) ของ INA125P  
 $V_{IN-}$  คือ แรงดันไฟขา 7 ( $V_{IN-}$ ) ของ INA125P

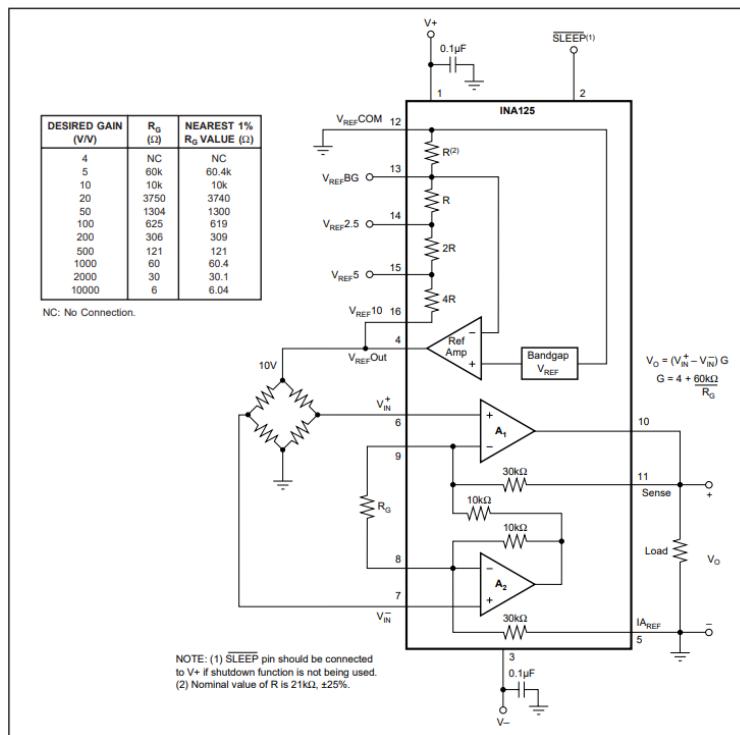
- 6) Signal Conditioning : การนำสัญญาณจาก Load Cell มาผ่านกระบวนการต่าง ๆ อย่างการขยายด้วย Differential Amplifier เพื่อให้ได้สัญญาณที่สามารถวิเคราะห์และคำนวณนำหน้าในหน่วย SI
- 7) STM32 Nucleo-G474RE : ทำหน้าที่เป็นบอร์ดรับสัญญาณแรงดันที่ได้จาก Potentiometer โดยเชื่อมต่อ Potentiometer เข้ากับขา ADC ของบอร์ด ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณ Analog จาก Potentiometer เป็นสัญญาณ Digital เพื่อส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Simulink ข้อมูลที่ถูกแปลงนี้จะถูกนำไปบันทึกและวิเคราะห์ใน MATLAB Simulink เพื่อตรวจสอบความสมพันธ์ระหว่างมุกการหมุนและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
- 8) Simulink : Simulink จะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองการเก็บข้อมูลจากบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE โดยใช้ Block ADC เพื่ออ่านค่าแรงดันที่ได้จาก Potentiometer และแสดงผลแบบกราฟผ่าน Data Inspector รวมถึงการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์
- 9) Visualize Signal: การสร้างกราฟหรือการแสดงข้อมูลของสัญญาณที่ได้ด้วย Simulink เพื่อแสดงสัญญาณตามเวลาใน Fixed-step size

- 10) Block ADC หรือ Block Analog to Digital Converter : บล็อก ADC นี้จะทำหน้าที่อ่านค่าความต่างศักย์ ที่เกิดขึ้นจาก Potentiometer ผ่านขา ADC ของบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE จากนั้นข้อมูลแรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและเก็บเป็นข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และแสดงผลเป็นกราฟในโปรแกรม Simulink
- 11) Data Inspector : พังก์ชันใน Simulink ที่ใช้สำหรับการตรวจสอบและแสดงผลข้อมูลสัญญาณในรูปแบบกราฟ การทดลองจะทำโดยแสดงผลสัญญาณ Output จาก Potentiometer ที่ผ่านวงจร Schmitt-Trigger และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแบบ Real-Time
- 12) MATLAB Function Block : เป็น Simulink Block ที่สามารถทำให้เขียนโค้ดเชิงขั้นตอนและการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนได้
- 13) โปรแกรม Tracker : ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับติดตามและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยใช้เทคนิคติดตามตำแหน่งและวิเคราะห์ข้อมูลจากวิดีโอ

## 4.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 4.6.1 Datasheet

#### 1) INA125P Instrumentation Amplifier



รูปที่ 105 แสดง Datasheet ของ INA125P Instrumentation Amplifier

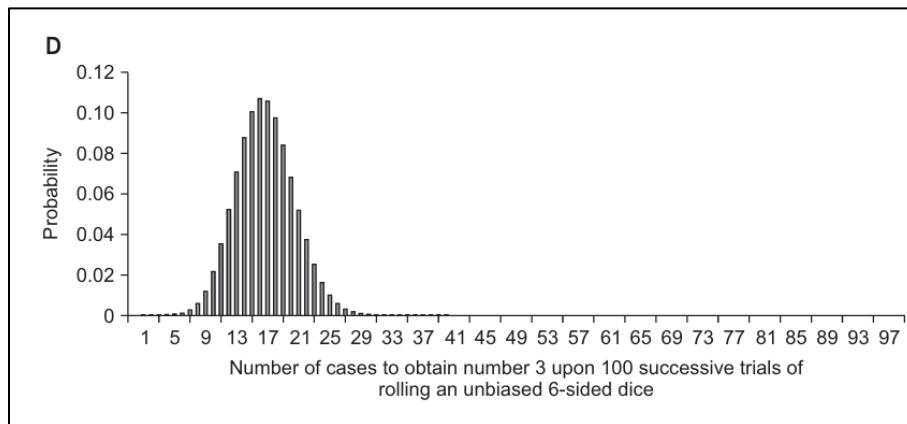
ในการทดลองด้วย INA125P เป็นแอมเพลฟายอิอร์ใน การขยายสัญญาณจาก Load Cell แบบ Single Point ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ชัวร์ดนำหน้าหรือแรง ด้วยสัญญาณที่ได้จาก Load Cell มีขนาดเล็กมากและต้องการการขยายเพื่อให้อ่านค่าได้อย่างแม่นยำ ทำให้การใช้ INA125P ช่วยให้สามารถปรับค่าゲนได้ตามความต้องการโดยใช้ตัวต้านทานภายในออกเพียงตัวเดียว ทำให้ขยายสัญญาณจาก Load Cell ได้

นอกจากนี้ INA125P มีแหล่งจ่ายที่ทำให้สามารถเลือกแรงดันอ้างอิงได้ ซึ่งทำให้สามารถเลือกแรงดันที่เหมาะสมกับ Load Cell และโหมด Sleep ของ INA125P ยังช่วยประหยัดพลังงาน เมื่อระบบไม่ได้ใช้งาน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบที่ต้องการการประหยัดพลังงาน

ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ INA125P จึงเป็นส่วนสำคัญในการทดลองของคณะผู้จัดทำ ช่วยให้สามารถวัดและแปลงสัญญาณจาก Load Cell ให้เป็นข้อมูลนำหน้าตามจุดประสงค์ได้

#### 4.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) Central limit theorem : the cornerstone of modern statistics



รูปที่ 106 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูล 100 ค่า

ขนาดตัวอย่างที่ถือว่าเพียงพอในการให้ค่าเฉลี่ยกระจายตัวแบบปกติกอยู่ที่ 30 ขึ้นไป แต่ในหลายกรณีที่ต้องการความแม่นยำที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในงานที่มีความผันผวนสูง จึงเลือกใช้ค่า 100 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่มีการกระจายแบบปกติตามากขึ้น

2) Calculation of RMS Values for Variable Frequency Sinusoidal Signals, Using Phasors and Digital SAL and CAL Filters

*2.1. Definition of RMS value*

The mathematical definition of RMS of a signal  $x(t)$  is given by equation (1)

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Where T is the period of the signal.

รูปที่ 107 แสดงถึงคำนิยามและการคิดแบบ RMS

สมมติว่าข้อผิดพลาดของสัญญาณ (Error) ที่เราได้รับมีการกระจายแบบปกติและไม่มีความเออนเอียง การใช้ RMS จะช่วยให้สามารถวัดความแปรปรวนของสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ โดยค่า RMS ที่คำนวณจะแสดงถึงการกระจายตัวของสัญญาณที่อยู่ใกล้กับค่าที่คาดหวัง และอาจนำ RMS มาช่วยลดสัญญาณรบกวนได้โดยการกรองค่าเฉลี่ยของข้อผิดพลาด หรือใช้ RMS เพื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (Standard Error) ของค่าเฉลี่ย การใช้ RMS เพื่อลด Noise นั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่เก็บได้แล้วใช้ค่า RMS เป็นตัวบ่งบอกถึงขอบเขตของค่าที่น่าจะเป็นของสัญญาณ ลดผลกระทบจากค่า Noise ที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สัญญาณที่ได้มีความเสถียรและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

#### 4.7 วิธีดำเนินการทดลอง

ทำการทดสอบ Single Point Load Cell โดยเชื่อมต่อกับ INA125P Instrumentation Amplifier เพื่อขยายสัญญาณ และเชื่อมต่อสัญญาณที่ขยายออกมายังบอร์ด STM32 Nucleo-G474RE ตั้งค่าโปรแกรมใน MATLAB Simulink เพื่อเก็บข้อมูลจากขา ADC โดยใช้การเก็บข้อมูลและจัดการค่าแบบ RMS ซึ่งกระบวนการทั้งหมดเริ่มจากการทดสอบเทียน Load Cell เพื่อหาค่า Gain ที่เหมาะสมผ่านการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยจะใช้ค่าน้ำหนักสูงสุดที่ Load Cell สามารถรับได้ จากนั้นทำการทดลองโดยปรับแรงที่กระทำต่อ Load Cell ด้วยการเพิ่มน้ำหนักและบันทึกข้อมูลสัญญาณ Output ที่ได้ในแต่ละน้ำหนักที่ต่างกันใน Data Inspector ของ MATLAB Simulink เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จแล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริงและค่า ADC ที่วัดได้ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่โปรแกรม Excel เพื่อคำนวณหา Trendline แบบเส้นตรง จากนั้นนำสมการเส้นตรงที่ได้เข้าสู่ Simulink เพื่อที่จะคำนวณหาค่าน้ำหนักจริงอย่างแม่นยำและคงที่

#### 4.8 วัสดุอุปกรณ์

- 4.8.1 Single Point Load Cell จำนวน 1 อัน
- 4.8.2 INA125P Instrumentation Amplifier จำนวน 1 อัน
- 4.8.3 Trimpot 100k $\Omega$  25 Turns จำนวน 1 อัน
- 4.8.4 Resistor 4.7k $\Omega$  Ohm จำนวน 1 อัน
- 4.8.5 STM32 Nucleo-G474RE 1 บอร์ด
- 4.8.6 สายอัปโหลด จำนวน 1 เส้น
- 4.8.7 LoadCellXplorer จำนวน 1 ชุด (ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ Load Cell)
- 4.8.8 สายจัมเปอร์

#### 4.9 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 4.9.1 การเชื่อมต่อระหว่าง Load Cell และ INA125P

- 1.) เชื่อมสายสีขาวเข้ากับ LoadCellXplorer ช่อง RED
- 2.) เชื่อมสายสีแดงเข้ากับ LoadCellXplorer ช่อง WHITE
- 3.) เชื่อมสายสีเขียวเข้ากับ LoadCellXplorer ช่อง GREEN
- 4.) เชื่อมสายสีดำเข้ากับ LoadCellXplorer ช่อง BLACK

#### 4.9.2 การเชื่อมต่อระหว่าง INA125P, Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์

- 1.) เชื่อมช่อง H5 GND ของ LoadCellXplorer เข้าช่อง GND ของ Board STM32 Nucleo-G474RE
- 2.) เชื่อมช่อง H5 + ของ LoadCellXplorer เข้าช่อง 3V3 ของ Board STM32 Nucleo-G474RE
- 3.) เชื่อมช่อง H5 OUT ของ LoadCellXplorer เข้าช่อง A0 (PA0) ของ Board STM32 Nucleo-G474RE
- 4.) เสียบสาย Micro USB เพื่อทำการสื่อสารและเชื่อมต่อระหว่าง Board STM32 Nucleo-G474RE และคอมพิวเตอร์

#### 4.9.3 การเก็บคำนวนเพื่อปรับค่า Gain ด้วยตัวต้านทานเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับน้ำหนักที่จะซั่ง

4.9.3.1 วัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ 14 ( $V_{REF}$  2.5) เทียบ Ground เพื่อให้ทราบค่าสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้าออกหลังจากผ่าน Gain

4.9.3.2 นำน้ำหนักที่มากที่สุดที่ Load Cell สามารถรับได้มาตั้งไว้บน Load Cell ซึ่งในการทดลองนี้ คือ 10 kg จากนั้นวัดแรงดันต่อกครองตรงกลางระหว่างขาที่ 6 ( $V_{IN+}$ ) และ 7 ( $V_{IN-}$ ) ของ INA125

4.9.3.3 ทำการคำนวนย้อนกลับเพื่อหาค่า Gain ที่ควรเป็นจากสมการซึ่งอย่างอิงมาจาก Datasheet

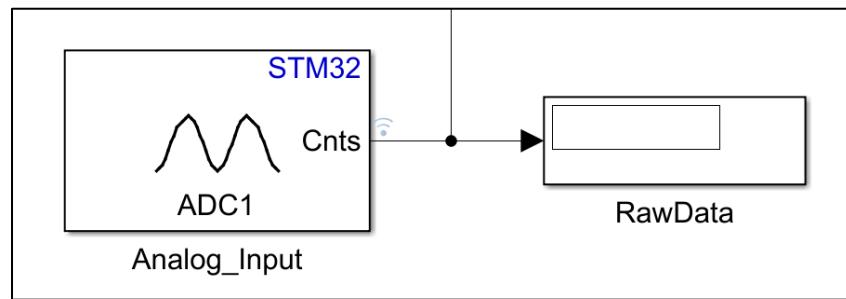
$$V_0 = (V_{IN+} - V_{IN-}) \times G$$

4.9.3.4 เมื่อคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความต้านทานที่ใช้สำหรับการกำหนด Gain หรืออัตราการขยายสัญญาณจากสมการที่อ้างอิงมาจาก Datasheet

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

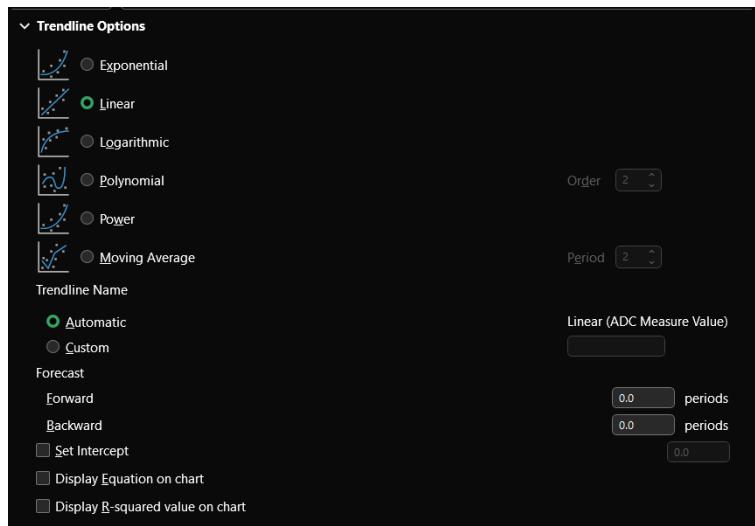
หลังจากที่เราทราบถึงค่าของ  $R_G$  ที่เราต้องปรับเพื่อให้สอดคล้องและได้มาซึ่งค่า Gain เราจึงมาปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ ( $R5$ ) บน LoadCellXplorer ให้ได้ค่าเทียบเท่า  $R_G$  ซึ่งในที่นี่ก็คือ  $106 \Omega$

4.9.3.5 เก็บค่าสัญญาณ Analog โดยใช้ Block ADC เพื่อให้ได้ Raw Data ที่อ่านได้โดย Board STM32 Nucleo-G474RE



รูปที่ 108 แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมต่อระหว่าง Block ใน Simulink เพื่อการอ่านค่า ADC

4.9.3.6 การนำค่า Raw Data จาก ADC มาคำนวณและหาค่า RMS เพื่อหาค่าของข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อ จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการใช้กราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างค่า ADC และหนักจริง เพื่อให้สามารถสร้างสมการที่มีความสอดคล้องกับกราฟนั้นโดยใช้ฟังก์ชัน Trendline ใน โปรแกรม Excel



รูปที่ 109 แสดงถึงฟังก์ชัน Trendline ชนิดต่าง ๆ ในโปรแกรม Excel

เมื่อได้สมการจากพล็อตกราฟในโปรแกรม Excel คณะผู้จัดทำจึงนำสมการที่ได้เข้าสู่ Block MATLAB Function ใน Simulink เพื่อแก้ไขการทดลอง เพื่อให้ได้ค่าจากการทดลองมีค่าเทียบเท่า น้ำหนักที่แท้จริง ซึ่งสามารถทดลองและคำนวณใหม่ได้มาจากสมการของ Graf ระหว่างค่า ADC ที่วัดเทียบกับน้ำหนักจริงที่ถูกชั่ง

## 4.10 ผลการทดลอง

### 4.10.1 การคำนวณหาค่าอัตราการขยาย Gain

จากสมการดังต่อไปนี้

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

$$G = \frac{2.52 \text{ V}}{0.0044 \text{ V}}$$

$$G \approx 572.73$$

เมื่อได้ค่า Gain อยู่ที่ประมาณ 572.73 นั่นแสดงว่า INA125P ขยายสัญญาณจากเดิมไป 572.73 เท่าโดยประมาณ

4.10.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมสำหรับค่า Gain ที่คำนวณได้โดยค่าความต้านทานนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

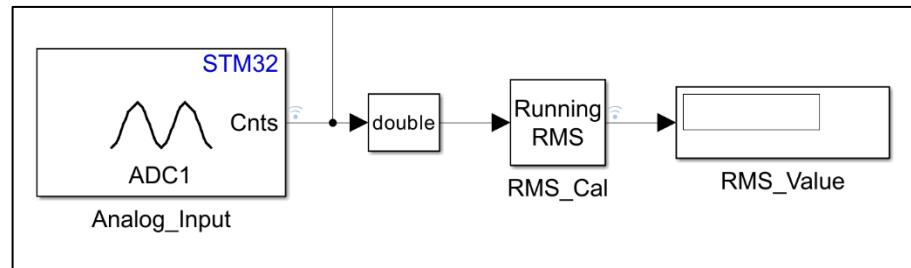
$$R_G = \frac{60,000 \Omega}{G - 4}$$

$$R_G = \frac{60,000 \Omega}{572.73 - 4}$$

$$R_G \approx 106 \Omega$$

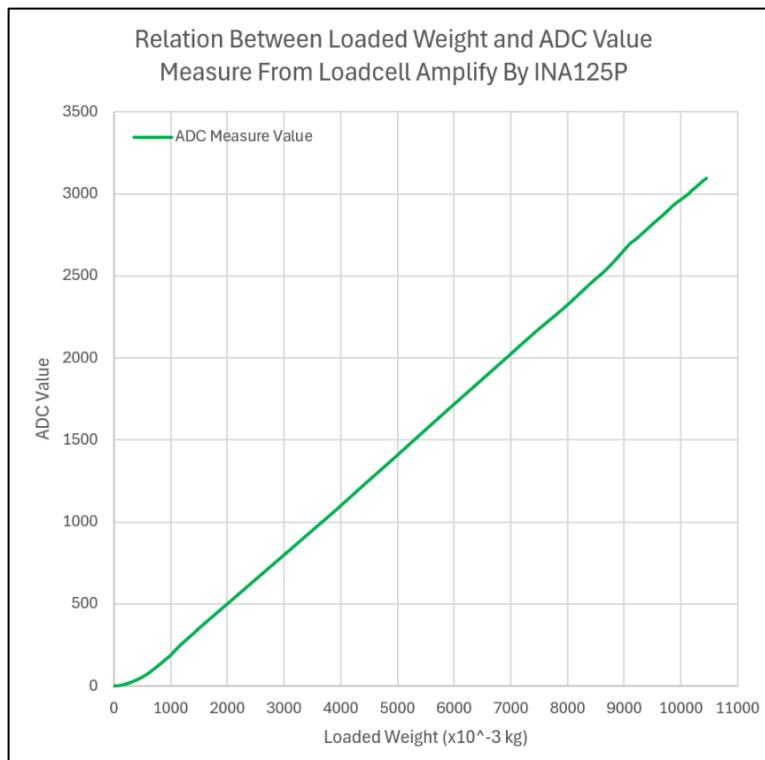
ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถคำนวณและปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้บนบอร์ด LoadCellXplorer ให้มีค่าความต้านทานที่เหมาะสมอยู่ที่ 106 Ω

4.10.3 การนำค่า ADC ที่อ่านได้มาคิดคำนวณแบบ RMS เพื่อลบสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบที่เกิดขึ้น โดยสามารถใช้ Simulink ในการเชื่อมต่อ Block ดังภาพต่อไปนี้



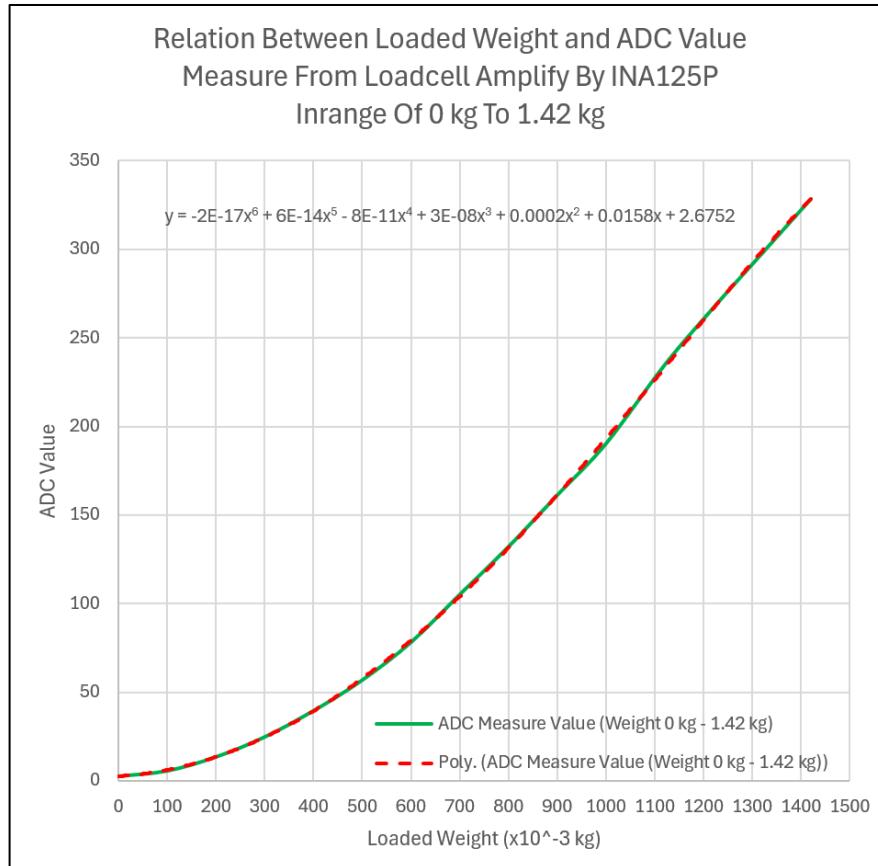
รูปที่ 110 แสดงให้เห็นถึงการต่อ Block ใน Simulink เพื่อใช้สำหรับการหาค่า RMS ของข้อมูล

4.10.4 การนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลเพื่อให้ได้มาซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของ และน้ำหนักจริงที่ถูกชั่ง



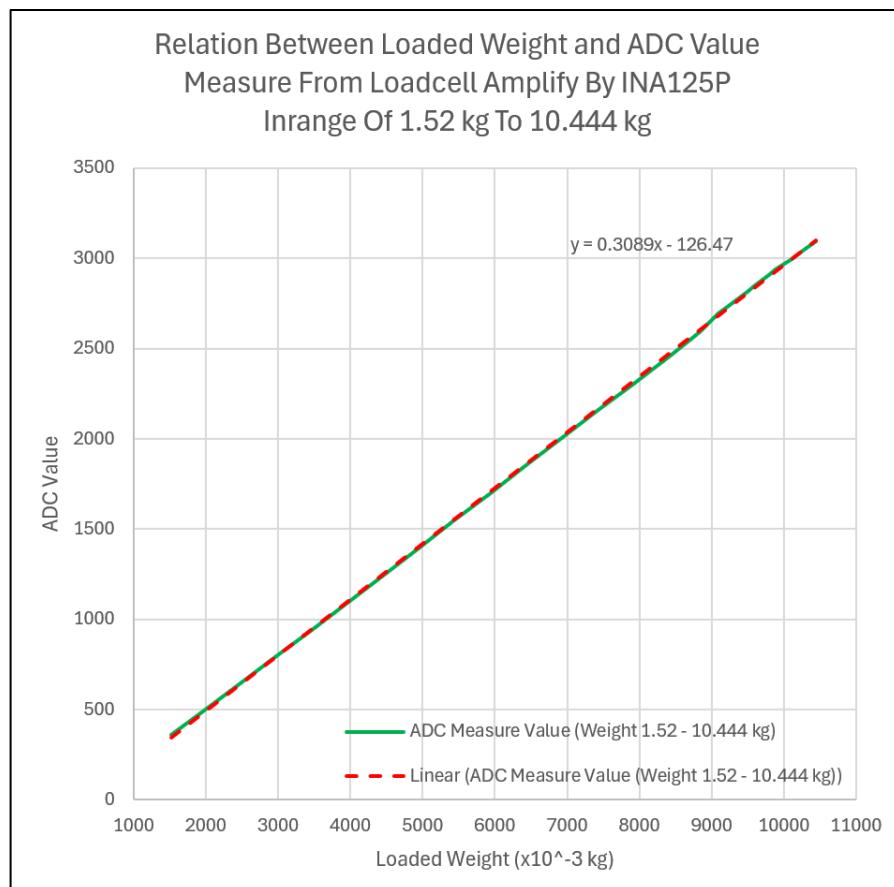
รูปที่ 111 แสดงถึงค่าของ ADC เทียบกับน้ำหนักที่ถูกชั่งอยู่บน Load Cell

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากการฟอกของค่า ADC เทียบกับน้ำหนักที่ชั่งอยู่บน Load Cell จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการชั่งน้ำหนักที่มีค่า 0 ถึงประมาณ 1.42 กิโลกรัม ค่าของ ADC ที่อ่านออกมายังนั้นมีเส้นกราฟที่เป็นลักษณะเส้นโค้ง



รูปที่ 112 แสดงให้เห็นถึงกราฟของค่า ADC ที่อ่านได้เทียบกับน้ำหนักที่ซึ่งในช่วง 0 ถึง 1.42 กิโลกรัม

จะเห็นได้ว่าการที่ข้อมูลช่วงต้นมีกราฟแบบเส้นโค้งนั้น ทำให้ยากต่อการนำไปคิดต่อและไม่สามารถเทียบอัตราส่วนโดยตรงกับกราฟในช่วงของน้ำหนัก 1.42 กิโลกรัม ขึ้นไปได้ เพราะค่านั้นมีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และกราฟที่ออกแบบนั้นก็มีความเป็นเส้นตรง



รูปที่ 113 แสดงให้เห็นถึงกราฟของค่า ADC ที่อ่านได้เทียบกับน้ำหนักที่ซึ่งในช่วง 1.520 ถึง 10.444 กิโลกรัม

คณะผู้จัดทำจึงแบ่งช่วงการคิดเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นช่วงกราฟที่เกิดความโคลง และช่วงที่สองเป็นช่วงที่กราฟเป็นเส้นตรง ตามสมการดังต่อไปนี้

- 1) การใช้สมการ Polynomial 6 Order สำหรับกราฟช่วงแรกที่เกิดความโคลง

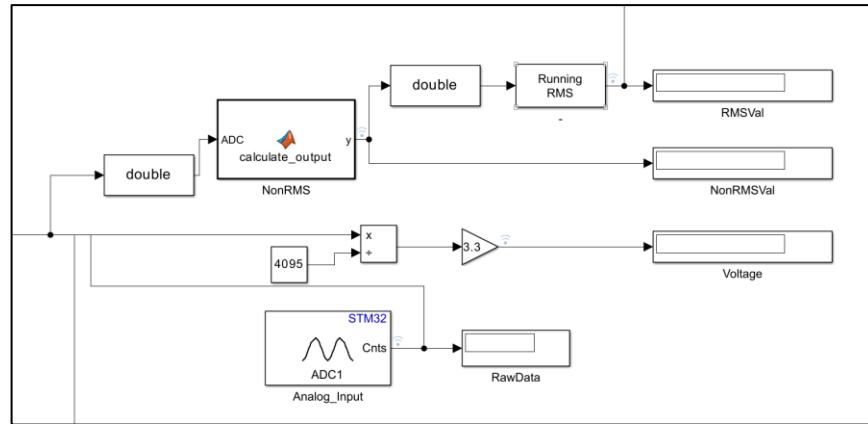
$$y = -2E-17x^6 + 6E-14x^5 - 8E-11x^4 + 3E-08x^3 + 0.0002x^2 + 0.0158x + 2.6752$$

- 2) การใช้สมการ Linear สำหรับกราฟช่วงที่สองที่เป็นเส้นตรง

$$y = 0.3089x - 126.47$$

เมื่อ y คือค่า ADC และ x คือค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักจริงมากที่สุด ด้วยวิธีการนี้จะทำให้สามารถคำนวณเพื่อหาค่า x ให้ได้น้ำหนักที่ซึ่งจาก Load Cell มีความใกล้เคียงกับน้ำหนักจริงมากที่สุด

#### 4.9.4 การนำสมการเข้า Block MATLAB Function เพื่อปรับปรุงการทดลองให้ได้ค่า�้ำหนักที่ใกล้เคียงน้ำจิริมากที่สุด



รูปที่ 114 แสดงถึงการต่อ Block Simulink เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักจริง

```

function y = calculate_output(ADC)
% Input:
% ADC - ค่า ADC ที่รับเข้ามา
% Output:
% y - ค่าที่คำนวณได้ตามเงื่อนไขของ ADC

if ADC < 328
    % ตั้งค่าคงที่ในสมการพหุนาม
    coefficients = [-2e-17, 6e-14, -8e-11, 3e-8, 0.0002, 0.0158, 2.6752];
    y_target = ADC; % กำหนด y เป็นค่า ADC

    % พึงกշัณที่ใช้ในการหาค่า x ที่ทำให้ y ใกล้เคียงกับ ADC
    polynomial_func = @(x) polyval(coefficients, x) - y_target;

    % หา x โดยใช้ fzero โดยให้ค่าเริ่มต้น
    x_guess = 0;
    x = fzero(polynomial_func, x_guess);

    % ศึกษา y เป็นค่า x ที่คำนวณได้
    y = x; % ศึกษาที่ได้จาก x
    if y < 0
        y = 0; % ถ้า y น้อยกว่า 0 ในศึกษาเป็น 0
    end
else
    % ถ้า ADC มากกว่า 328 ใช้สมการเชิงเส้นเพื่อคำนวณ y
    y = (ADC + 126.47) / 0.3089; % คำนวณ x
end

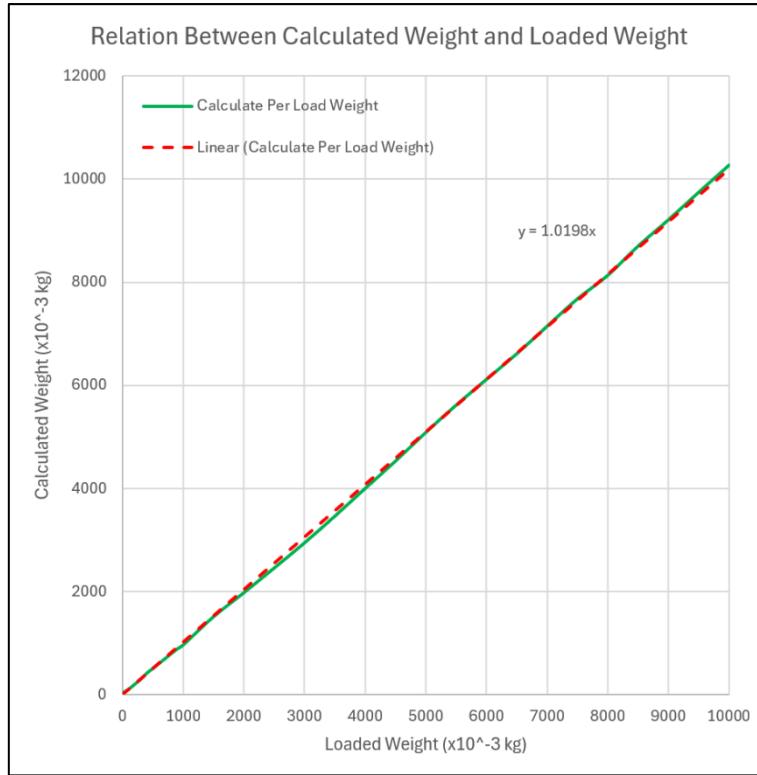
```

รูปที่ 115 แสดงถึงโค้ดภายใน MATLAB Function Block เพื่อแยกการคิดคำนวนระหว่างกราฟสองช่วง

#### 4.10 สรุปผล

จากการทดลองเพื่อทดสอบเก็บค่าของข้อมูล ADC เทียบกับน้ำหนัก ทำให้สามารถเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ของทั้งสองในช่วงแรกว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่ได้เป็นอัตราส่วนที่เพิ่มอย่างคงที่แตกต่างกันช่วง

หลังที่อัตราส่วนหักสองนันเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ทำให้ต้องนำค่าที่ได้ในช่วงแรกมาคิดคำนวณเพื่อให้ทราบถึงสมการที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้



รูปที่ 116 แสดงให้เห็นถึงกราฟน้ำหนักที่คำนวณได้เทียบกับน้ำหนักจริงที่ควรจะเป็น

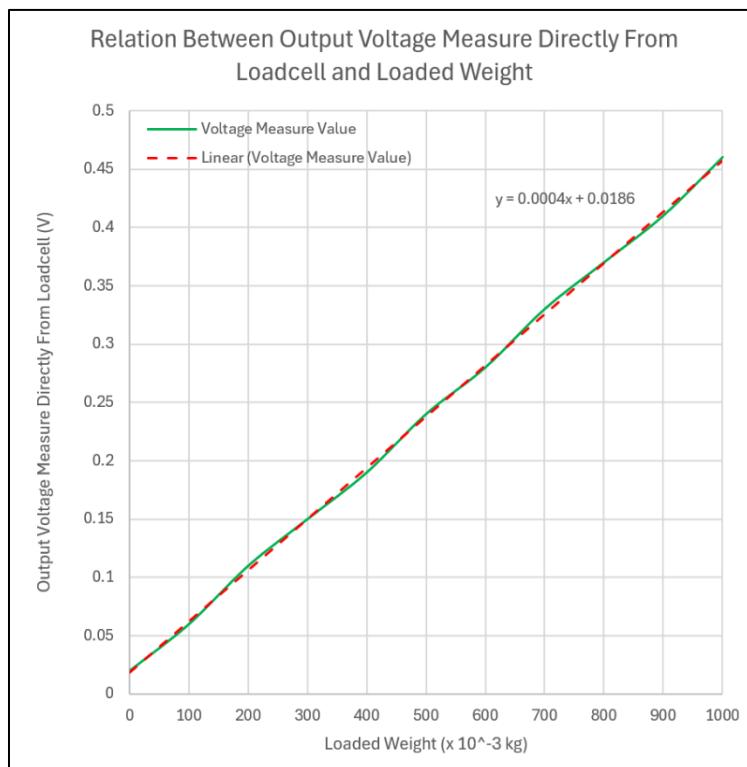
จากราฟสามารถเห็นได้ว่าการที่แยกกราฟเป็นสองส่วนเพื่อคิดคำนวณหน้าหนัก ทำให้ค่านะผู้จัดทำได้ค่าน้ำหนักที่มีความใกล้เคียงน้ำหนักจริงสูง โดยสังเกตได้ชัดเจนจากค่าความชันของกราฟที่มีค่าเข้าใกล้ 1 และว่าค่าที่คำนวณได้มีความใกล้เคียงกับน้ำหนักจริง ซึ่งการที่คำนวณผ่านสมการสามารถทำให้ค่านะผู้จัดทำได้ค่าของน้ำหนักที่คำนวณเทียบกับน้ำหนักจริงที่มาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่

#### 4.11 อภิปรายผล

จากการทดลอง เมื่อวัดค่า ADC ที่อ่านได้ผ่าน STM32 Nucleo-G474RE ทำให้ทราบได้ว่า กราฟนั้นไม่ได้มีความเป็นเส้นตรงในช่วงแรก ซึ่งเหตุการณ์นี้เป็นสิ่งที่ไม่ควรเกิดขึ้นเนื่องจาก Load Cell และ INA125P ควรให้ค่าสัญญาณที่เทียบกับหน้าหักแบบเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ทำให้กราฟควรจะเป็นเส้นตรงในทุก ๆ ช่วง คงจะผิดพลาดทำเงื่อนไขทางจุดยกพร่องที่อาจเกิดขึ้นในระบบหรือเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่า โดยสามารถแบ่งการทดลองย่อยได้อีก 2 ชุดการทดลอง เพื่อหาจุดผิดพลาดที่เกิดขึ้นดังนี้

1) ข้อผิดพลาดจาก Load Cell การทดสอบแรงดันไฟฟ้าต่อกรุ่ม Load Cell

คณะผู้จัดทำตั้งสมมติฐานของการทดสอบในครั้งนี้ไว้ว่า “หากแรงดันไฟฟ้าต่อกรุ่ม Load Cell นั้นมีค่าแรงดันข้าวกอกเทียบกับน้ำหนักแล้วมีอัตราส่วนที่คงที่ จะสามารถถือความได้ว่า ข้อผิดพลาดที่ทำให้กราฟไม่เป็นเส้นตรงในช่วงตันนั้นไม่ได้มีสาเหตุมาจากการข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจาก Load Cell”

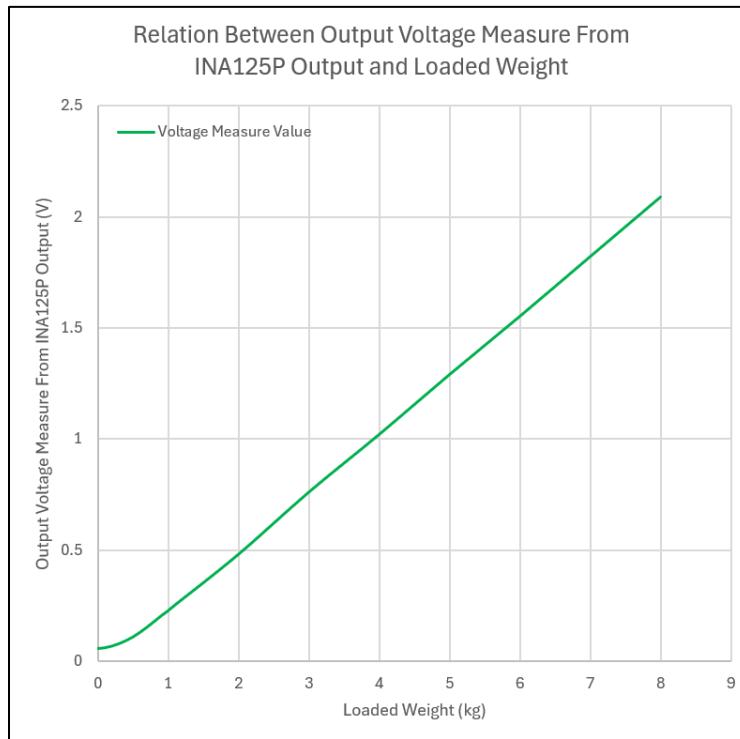


รูปที่ 117 แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่อกล่อง Load Cell เทียบกับน้ำหนักที่ชั่งจริง

จากการทดลองและการพล็อตกราฟขึ้นมา ทำให้สามารถเห็นอย่างชัดเจนว่ากราฟมีความเป็นเส้นตรง ซึ่งนั่นสามารถทำให้ตีความได้ว่า “นำหนักนั้นเพิ่มขึ้นอย่างคงที่เมื่อเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าจึงสรุปได้ว่าข้อผิดพลาดไม่ได้เกิดขึ้นจาก Load Cell แต่อย่างใด”

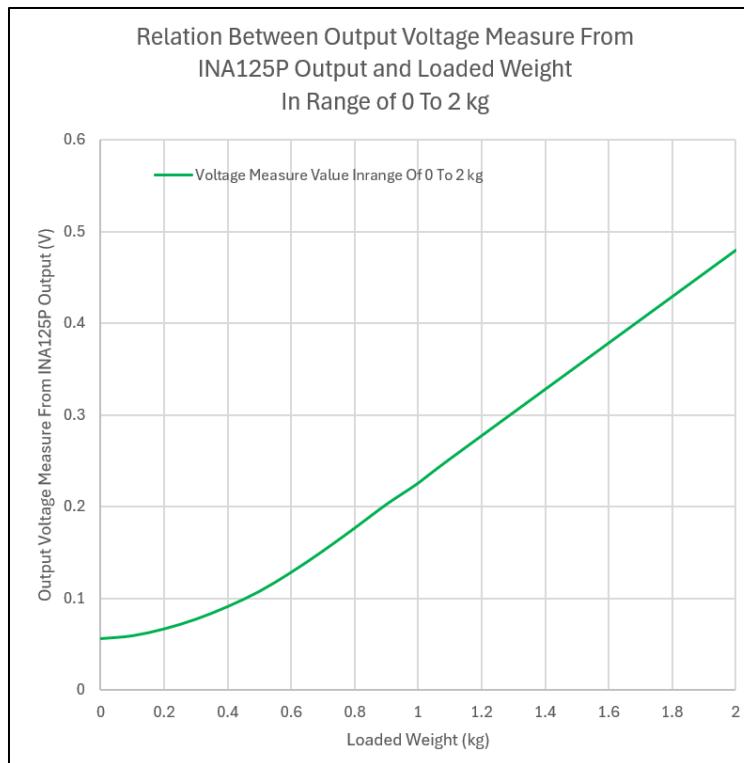
- 2) ข้อผิดพลาดจาก INA125P : การวัดแรงดันไฟฟ้าข้ออก ( $V_0$  หรือ Sense) เทียบกับ Ground ของระบบ

คณะกรรมการกำลังสมมติฐานของการทดสอบในครั้งนี้ไว้ว่า “แรงดันไฟที่ออกมาจากขาทั้งสองจะต้องมีค่าแรงดันที่ออกมาเทียบกับนำหนักแล้วมีอัตราส่วนที่คงที่ จะสามารถตีความได้ว่า ข้อผิดพลาดที่ทำให้กราฟไม่เป็นเส้นตรงในช่วงตันนี้ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการข้อผิดพลาดอันเนื่องมาจาก INA125P”



รูปที่ 118 แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าข้ออกของ INA125P เทียบกับนำหนักที่ชั่งจริง

จากการจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรกนั้นค่าไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากการที่มีความเป็นเส้นตรง แต่หลังจากผ่านช่วงแรกไปกราฟก็มีความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 119 แสดงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าของ INA125P เทียบกับน้ำหนักที่ชั่งจริงช่วง 0 ถึง 2 กิโลกรัม

จากการสามารถทำให้เราสรุปความได้ว่าข้อผิดพลาดนั้นเกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก INA125P ที่ขยายสัญญาณออกไม่เป็นอัตราส่วนอย่างคงที่ในช่วงแรก

#### 4.12 ข้อเสนอแนะ

##### 1) ปรับปรุงค่า Gain ของ INA125P

สามารถทำได้โดยการทดลองปรับค่าความต้านทานภายนอกเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมที่ทำให้การขยายสัญญาณเป็นเส้นตรงตลอดช่วงน้ำหนักที่วัด และตรวจสอบว่าวงจรการต่อความต้านทานเป็นไปตาม Datasheet ของ INA125P เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตั้งค่าเกน

##### 2) เพิ่มจรวจ Offset Amplifier

ออกแบบและติดตั้งวงจรชดเชย Offset เพื่อลดผลกระทบจากแรงดัน Offset ที่อาจทำให้สัญญาณมีความไม่เป็นเส้นตรง โดยเฉพาะในช่วงน้ำหนักต่ำ

### 3) ใช้การฟิลเตอร์สัญญาณ (Signal Filtering)

ติดตั้งฟิลเตอร์แบบ Low-pass เพื่อกรองสัญญาณรบกวนที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของ การวัดพิจารณาใช้เทคนิคการเฉลี่ยสัญญาณ (Averaging) หรือการประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล เพื่อเพิ่มความเสถียร

### 4) ตรวจสอบและปรับปรุงการเชื่อมต่อวงจร

ตรวจสอบการเชื่อมต่อสายไฟและจุดบัดกรีเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีการสูญเสียสัญญาณหรือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเชื่อมต่อที่ไม่ดีใช้สายสัญญาณที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน (Shielded Cables) เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณภายนอก

### 5) ปรับค่าให้เหมาะสมเชนเซอร์อย่างละเอียด (Detailed Calibration)

ทำการปรับค่าให้เหมาะสม Load Cell ในหลาย ๆ จุดของน้ำหนัก โดยเฉพาะในช่วงน้ำหนัก ต่ำ เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น ใช้การปรับค่าให้เหมาะสมแบบหลายจุด (Multi-point Calibration) เพื่อแก้ไขความไม่เป็นเส้นตรง

## 4.13 เอกสารอ้างอิง

- [1] TEXAS INSTRUMNETS, INA125 Instrumentation Amplifier with Precision Voltage Reference, Available online [ม.ป.ป.] : <https://www.ti.com/lit/gpn/ina125>