

RMXplorer

LAB1: Sensors Report

Name

- นายจิรัฐนันท์ ลีอุดมวงษ์ 66340500009
- นายนิธิต สีแสงสุวรรณชัย 66340500028
- นางสาวอัยยรรดา สิ้นพัฒนฐานกุล 66340500064

Objective

- นักศึกษาต้องสามารถออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ในการ สืบเสาะ พฤติกรรม ปรากฏการณ์ ทดลอง บันทึกผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เข้าใจหลักการ ทำงานของเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สถิติ และศาสตร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผล การทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับ ตรวจสอบความถูก ต้องเทียบกับทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ
- นักศึกษาต้องสามารถอธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเซ็นเซอร์ทั้งหมดตั้งแต่ต้นจนจบ กระบวนการได้ เช่น การอธิบายหลักการวัดความเร็วเชิงมุมของ Incremental Encoder และการอธิบายการ วัดน้ำหนักของ Load Cell (จากแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นน้ำหนักได้อย่างไร)
- นักศึกษาต้องสามารถกำหนด ตัวแปรในการทดลองได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็น ตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลอง อธิบายสมมติฐานให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่น่าเชื่อถือรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- นักศึกษาต้องสามารถออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้ย่อยทั้งหมดได้ด้วย ตนเองอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง บันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มี กระบวนการทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx ฯลฯ และชุดการทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เบื้องต้น
- นักศึกษาต้องสามารถเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และ รูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

บทที่ 1 Potentiometer

โดยบทนี้ มีการทดลองทั้งหมด 2 การทดลอง ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษา Potentiometer และการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบวงจร Schmitt-trigger ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.1 วัตถุประสงค์

- 1.1.1 เพื่อศึกษาประเภทและความแตกต่างของชนิดของ Potentiometer
- 1.1.2 เพื่อศึกษาการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าขาออกต่อระยะทาง หรือ องศาการหมุนของ Potentiometer
- 1.1.3 เพื่อศึกษาการแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ในรูปแบบวงจร Schmitt-trigger ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

1.2 สมมติฐาน

- 1.2.1 การตอบสนองต่อแรงดันของ Potentiometer มีความสอดคล้องกับข้อมูลใน Data Sheet โดยค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในช่วง 20% ตามเกณฑ์ใน Data Sheet
- 1.2.2 วงจร Schmitt-Trigger สามารถแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ได้ด้วยการจำลองด้วย MATLAB Simulink โดยสัญญาณจะเปลี่ยนจากสถานะ "0" เป็น "1" เมื่อสัญญาณ Analog สูงกว่า Upper Bound และจะเปลี่ยนจาก "1" เป็น "0" เมื่อสัญญาณ Analog ต่ำกว่า Lower Bound

1.3 ตัวแปรที่ศึกษา

การทดลองที่ 1 : ตัวแปรต้น : ระยะทางหรือองศาการหมุนที่มีผลต่อความต้านทานใน Potentiometer
ตัวแปรตาม : การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก
ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่ขา VCC และแรงดันไฟฟ้าที่ขา GND

การทดลองที่ 2 : ตัวแปรต้น : การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก
ตัวแปรตาม : สัญญาณขาออก
ตัวแปรควบคุม : ค่าขอบบนและค่าขอบล่างของ Schmitt-Trigger

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.4.1 Potentiometer

อุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สามารถปรับความต้านทานได้ ซึ่งความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงตามการหมุนหรือการเลื่อนแกนกลาง โดยมักจะนำมาใช้ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าหรือในวงจรขนาดเล็ก

1.4.2 Tapers

ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของ Potentiometer เมื่อมีการหมุนแกนหรือเลื่อนตำแหน่ง ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า

1.4.3 Schmitt-Trigger

วงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital โดยมีค่าขอบบน (Upper Bound) และค่าขอบล่าง (Lower Bound) ในการตัดสินใจการเปลี่ยนสถานะ

1.4.4 ค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ค่าความคลาดเคลื่อนที่ระบุไว้ใน Datasheet ใช้เพื่อประเมินช่วงที่ยอมรับได้ในการใช้งาน

1.4.5 ค่าขอบบน

ค่าแรงดันมากที่สุดที่ต้องการให้สัญญาณหรือสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงไป มักถูกใช้เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรให้ทำงานภายในขอบเขตที่ปลอดภัย

1.4.6 ค่าขอบล่าง

ค่าแรงดันน้อยที่สุดที่ต้องการให้สัญญาณหรือสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงไป มักถูกใช้เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรให้ทำงานภายในขอบเขตที่ปลอดภัย

1.4.7 การทดลองที่ 1

การทดลองเพื่อศึกษาประเภทและความแตกต่างของชนิดของ Potentiometer

1.4.8 การทดลองที่ 2

การทดลองเพื่อศึกษาการแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ในรูปแบบวงจร Schmitt-trigger ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

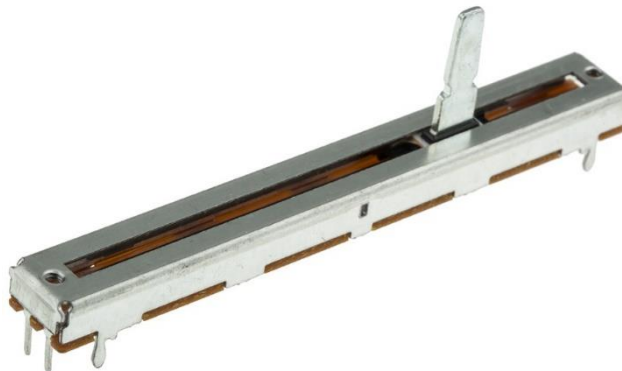
1.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

1.5.1 การศึกษาแรงดันไฟฟ้าขาออกของ Potentiometer ตามระยะทางหรือองศาการหมุน โดยใช้ MATLAB Simulink ในการเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่แปลงจากสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ในรูปแบบวงจร Schmitt-Trigger ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลทางเทคนิค (Datasheet) เพื่อประเมินความสอดคล้องและความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ

1.5.2 แรงดันไฟฟ้าอยู่ในระยะค่าคลาดเคลื่อนที่รับได้ เป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีความสมเหตุสมผลและสอดคล้องกับค่า Datasheet

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 PTA6043-2015DPA103



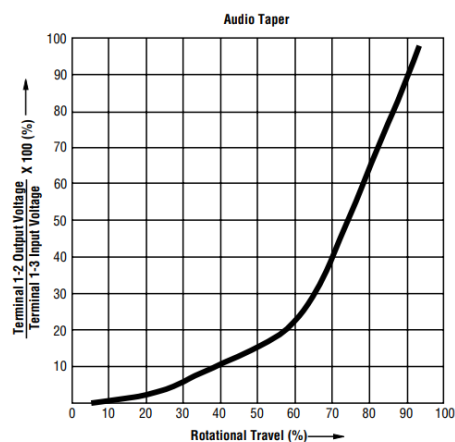
รูป PTA6043-2015DPA103

แหล่งที่มา : <https://th.rs-online.com/web/p/potentiometers/1674689>

PTA6043-2015DPA103 เป็นโมเดล PTA ที่มีคุณสมบัติดังนี้ มีความยาวช่วงชัก (Stroke Length) 60 มิลลิเมตร, ไม่มีฝาครอบกันฝุ่น (No Dust Cover), แบบสองแก๊ง (Dual Gangs), ขาสำหรับติดตั้งบนแผงวงจร (PC Pins) แบบหันลงด้านล่าง, ไม่มีจุดหยุด (No detent), ก้านยาว 15 มิลลิเมตร, มีลักษณะการทำงานแบบ Audio, รหัสความต้านทาน (Resistance Code) 103

ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) ประเภทลักษณะการทำงานแบบ Audio มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้างดังรูปต่อไปนี้



รูปพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของโมเดล PTA ประเภท Audio

แหล่งที่มา : <https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PTA6043-2015DPA103?qs=U%2FacTlguYxapXI1x524WqA%3D%3D>

(2) รหัสความต้านทาน 103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน ซึ่ง PTA6043-2015DPA103 มีค่าความต้านทานอยู่ที่ $10k\Omega$

1.6.2 PTA6043-2015DPB103



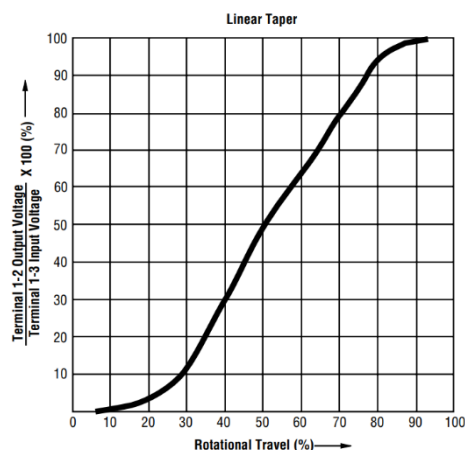
รูป PTA6043-2015DPB103

แหล่งที่มา : <https://www.digikey.ie/en/products/detail/bourns-inc/PTA6043-2015DPA103/3781231>

PTA6043-2015DPB103 เป็นโมเดล PTA ที่มีคุณสมบัติดังนี้ มีความยาวช่วงชัก (Stroke Length) 60 มิลลิเมตร, ไม่มีฝาครอบกันฝุ่น (No Dust Cover), แบบสองแก๊ง (Dual Gangs), ขาสำหรับติดตั้งบนแผงวงจร (PC Pins) แบบหันลงด้านล่าง, ไม่มีจุดหยุด (No detent), ก้านยาว 15 มิลลิเมตร, มีลักษณะการทำงานแบบ Linear, รหัสความต้านทาน (Resistance Code) 103

ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) ประเภทลักษณะการทำงานแบบ Linear มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้างดรูปต่อไปนี้

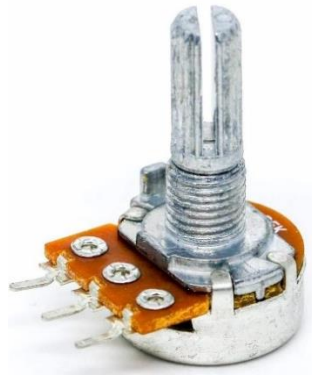


รูปพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของโมเดล PTA ประเภท Linear

แหล่งที่มา : <https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PTA6043-2015DPA103?qs=U%2FacTlguYxapXI1x524WqA%3D%3D>

(2) รหัสความต้านทาน 103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน ซึ่ง PTA6043-2015DPB103 มีค่าความต้านทานอยู่ที่ $10k\Omega$

1.6.3 PDB181-K420K-103A2



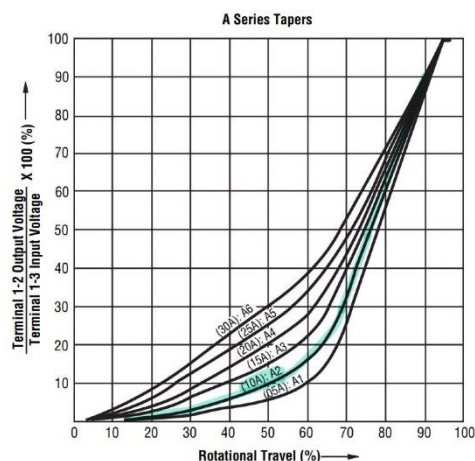
รูป PDB181-K420K-103A2

แหล่งที่มา : <https://www.amazon.com/Bourns-Potentiometers-5K-SINGLE/dp/B005TBCLSO>

PDB181-K420K-103A2 เป็นโมเดล PDB18 ที่มีคุณสมบัติดังนี้ แบบแก้งเดียว (Single Section) ขาสำหรับติดตั้งบนแผงวงจร (PC Pins) แนวตั้ง/หันลงด้านล่าง 12.5 มิลลิเมตร, ไม่มีจุดหยุด (No detent), ก้านยาว 20 มิลลิเมตร, มีลักษณะการทำงานแบบ A-series Tapers (A2), รหัสความต้านทาน 103

ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) ประเภทลักษณะการทำงานแบบ A-series Tapers มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าดังรูปต่อไปนี้ โดย PDB181-K420K-103A2 เป็นประเภท A2 ตามที่ได้เน้นด้วยสีน้ำเงิน



รูปพฤติกรรมตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของโมเดล PTA181 ประเภท A Series Tapers : A2

แหล่งที่มา : <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

(2) รหัสความต้านทาน 103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน ซึ่ง PDB181-K420K-103A2 มีค่าความต้านทานอยู่ที่ $10k\Omega$

1.6.4 PDB181-K420K-103B



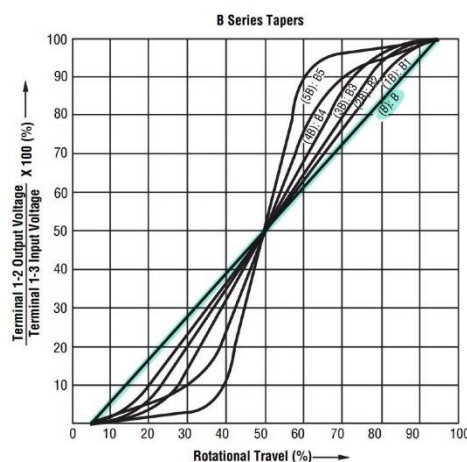
รูป PDB181-K420K-103B

แหล่งที่มา : <https://www.ebay.com/itm/264332383360>

PDB181-K420K-103B เป็นโมเดล PDB18 ที่มีคุณสมบัติดังนี้ แบบแก้งเดียว (Single Section) ขาสำหรับติดตั้งบนแผงวงจร (PC Pins) แนวตั้ง/หันลงด้านล่าง 12.5 มิลลิเมตร, ไม่มีจุดหยุด (No detent), ก้านยาว 20 มิลลิเมตร, มีลักษณะการทำงานแบบ B-series Tapers (B), รหัสความต้านทาน 103

ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) ประเภทลักษณะการทำงานแบบ B-series Tapers มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้างดรูปต่อไปนี้ โดย PDB181-K420K-103B เป็นประเภท B ตามที่ได้เน้นด้วยสีน้ำเงิน

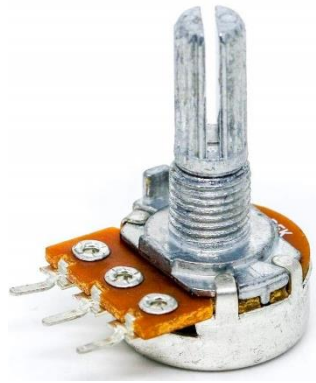


รูปพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของโมเดล PTA181 ประเภท B Series Tapers : B

แหล่งที่มา : <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

(2) รหัสความต้านทาน 103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน ซึ่ง PDB181-K420K-103B มีค่าความต้านทานอยู่ที่ $10k\Omega$

1.6.5 PDB181-K420K-103C



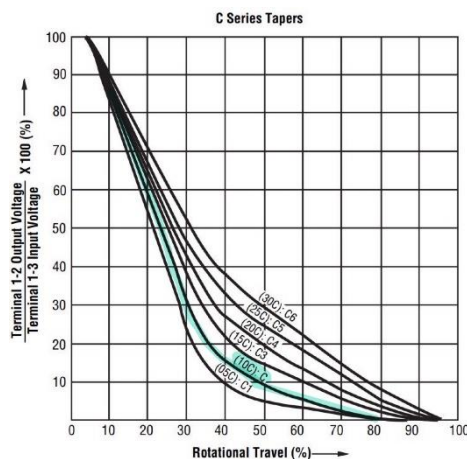
รูป PDB181-K420K-103C

แหล่งที่มา : <https://th.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PDB181-K420K-103C?qs=Ivs1Be2ZGq7NWK18gilWvg%3D%3D>

PDB181-K420K-103C เป็นโมเดล PDB18 ที่มีคุณสมบัติดังนี้ แบบแก้งเดียว (Single Section) ขาสำหรับติดตั้งบนแผงวงจร (PC Pins) แนวตั้ง/หันลงด้านล่าง 12.5 มิลลิเมตร, ไม่มีจุดหยุด (No detent), ก้านยาว 20 มิลลิเมตร, มีลักษณะการทำงานแบบ C-series Tapers (C), รหัสความต้านทาน 103

ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) ประเภทลักษณะการทำงานแบบ C-series Tapers มีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าดังรูปต่อไป้ โดย PDB181-K420K-103C เป็นประเภท C ตามที่ได้เน้นด้วยสีน้ำเงิน



รูปพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของโมเดล PTA181 ประเภท C Series Tapers : C

แหล่งที่มา : <https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

(2) รหัสความต้านทาน 103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน ซึ่ง PDB181-K420K-103A2 มีค่าความต้านทานอยู่ที่ $10k\Omega$

1.6.6 Schmitt Trigger

Schmitt Trigger เป็นวงจรที่ใช้ในการเปลี่ยนสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital โดยมีคุณสมบัติในการสร้างการตอบสนองที่เสถียรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ Input ซึ่งวงจรนี้ช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวน

และมีการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ชัดเจนและรวดเร็ว คุณสมบัติที่โดดเด่นของ Schmitt Trigger มีดังนี้

(1) ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

Schmitt Trigger มีลักษณะฮิสเทอรีซิส ซึ่งหมายถึงการมีค่าเกณฑ์ที่แตกต่างกัน สำหรับการเปลี่ยนแปลง จากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง เมื่อสัญญาณอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงจากต่ำไปสูง (Low to High) จะมีค่าจุดเปลี่ยน (Threshold) หนึ่ง และเมื่อสัญญาณกลับจากสูงไปต่ำ (High to Low) จะมีจุดเปลี่ยนอีกค่า ทำให้เกิดการตอบสนองที่เสถียรมากขึ้น

(2) ลดสัญญาณรบกวน

ด้วยลักษณะฮิสเทอรีซิสทำให้ Schmitt Trigger สามารถกรองสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสั้นของสัญญาณ Input ทำให้การตอบสนองมีความแม่นยำมากขึ้น

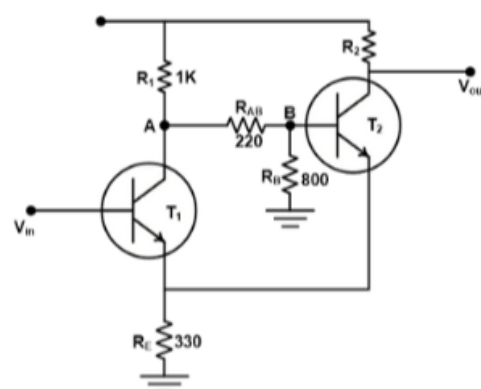
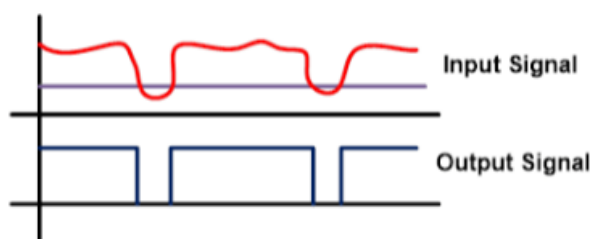
(3) รูปแบบการทำงาน

เมื่อสัญญาณขาเข้ามีค่าดังนี้ สัญญาณขาออกก็จะเปลี่ยนไป

ค่าเกณฑ์สำหรับสัญญาณต่ำ (ค่าขอบล่าง / Lower Bound) สัญญาณขาเข้าที่ต้องมีค่าน้อยกว่าค่านี้จึงจะถูกจัดว่าเป็นสถานะต่ำ (Low) หรือ 0

ค่าเกณฑ์สำหรับสัญญาณสูง (ค่าขอบบน / Upper Bound): สัญญาณขาเข้าที่ต้องมีค่ามากกว่าค่านี้จึงจะถูกจัดว่าเป็นสถานะสูง (High) หรือ 1

What is a Schmitt Trigger?



รูปแสดงตัวอย่าง Schmitt Triger

แหล่งที่มา : <https://www.ic-components.com/blog/schmitt-trigger-signal-converter-in-digital-electronics.jsp>

1.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

หัวข้อวิธีการดำเนินการทดลอง จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในการดำเนินการทดลอง เพื่อทดสอบและตรวจสอบสมมติฐานที่ได้ โดยอธิบายถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ รวมถึงวิธีการทดลอง การประยุกต์การแปลงสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณ Digital ตามรูปแบบของวงจร Schmitt-trigger ร่วมกับ MATLAB, Simulink และบอร์ด Nucleo STM32G474RE

1.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) PTA6043-2015DPA103
- (2) PTA6043-2015DPB103
- (3) PDB181-K420K-103A2
- (4) PDB181-K420K-103B
- (5) PDB181-K420K-103C
- (6) Nucleo STM32G474RE
- (7) PotenXplorer
- (8) สายจัมเปอร์

1.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 1

- (1) นำไฟฟ้าแรงดัน 3.3 V และ GND (0 V) มาต่อเข้ากับ Potentiometer ที่ขา 1 และ 3 ตามลำดับ และนำสัญญาณที่ขา 2 ของ Potentiometer มาต่อที่ขา A0 ของบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- (2) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่าน ADC (Analog to Digital Converter) ที่อ่านได้จาก Microcontroller มาแปลงเป็นสมการ ซึ่งสมการนี้เกิดจากการเทียบสัญญาณไตรยางค์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและจำนวนบิตที่ Microcontroller ส่งออกมา

$$\frac{3.3}{V} = \frac{4095}{ADC}$$

จะได้สมการสรุปว่า

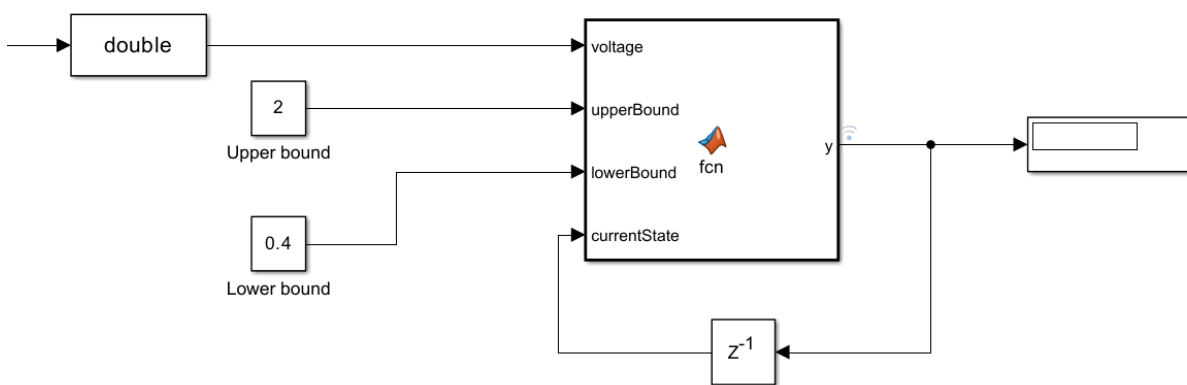
$$V = (ADC \times \frac{3.3}{4095})$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการหา (V),
ADC คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ Microcontroller ปลอยออกมา (Bit),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
4095 คือ ค่าดิจิทัลสูงสุดที่ Microcontroller สามารถส่งออกมาได้ (Bit)

- (3) สำหรับกรณีที่ Potentiometer เป็นแบบหมุน (Rotary) จะทำการหมุนครั้งละ 5 หน่วยตามค่าบนบอร์ดทดลอง (เทียบเท่ากับการหมุน 15 องศา) จากนั้นจึงบันทึกข้อมูลลงในโปรแกรม และกรณีที่ Potentiometer เป็นแบบเลื่อน (Linear) จะปรับเปลี่ยนในระยะครั้งละ 0.5 เซนติเมตร แล้วจึงบันทึกค่าแรงดันที่ได้
- (4) นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกไว้มาสร้างกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB
- (5) นำกราฟผลการทดลอง มาวิเคราะห์เทียบกับ Datasheet เพื่อตรวจสอบชนิด และ พฤติกรรมของ Potentiometer

1.7.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน การทดลองที่ 2

- (1) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อจำลองการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ด้วยวงจร Schmitt-Trigger จากนั้นจึงบันทึกผลและวิเคราะห์การตอบสนองของสัญญาณหลังผ่านโปรแกรม ด้วยฟังก์ชัน Data Inspector ใน MATLAB Simulink



รูปโปรแกรม MATLAB Simulink ที่ใช้สำหรับการจำลอง การแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ด้วยวงจร Schmitt Trigger

- (2) จากโปรแกรมได้มีการนำค่าแรงดันไฟฟ้ามาแปลงหน่วยด้วยบล็อก double จากนั้นนำเข้าบล็อก MATLAB function ที่ข้างในมีการเขียนโปรแกรมไว้ดังนี้

```

1 function y = fcn(voltage, upperBound,
2                 lowerBound, currentState)
3
4     if voltage > upperBound
5         y = 3.3;
6     elseif voltage < lowerBound
7         y = 0;
8     else
9         y = currentState;
10    end
11 end

```

รูปโปรแกรมเขียนวงจร Schmitt Trigger

โดยที่ voltage คือ แรงดันหรือค่า V ที่วัดได้หลังจากขั้นตอนที่ (2) (V),
upperBound คือ ค่าขอบบนของสัญญาณ หรือ 2 V,
lowerBound คือ ค่าขอบล่างของสัญญาณ หรือ 0.4 V และ
currentState คือ การนำค่าที่ถูกคั่นค่าออกไปในการทำฟังก์ชันนี้ครั้งสุดท้าย (V)

หาก voltage มีค่ามากกว่า upperBound ให้ทำการคั่นค่า 3.3 V

หาก voltage มีค่าน้อยกว่า lowerBound ให้ทำการคั่นค่า 0 V

หรือหากไม่เข้าเงื่อนไขใดเลย ให้นำค่า currentState ก่อนหน้ามาคั่นค่า ก็จะได้สัญญาณที่ผ่านการแปลง Analog เป็นสัญญาณ Digital แบบวงจร Schmitt-Trigger ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink

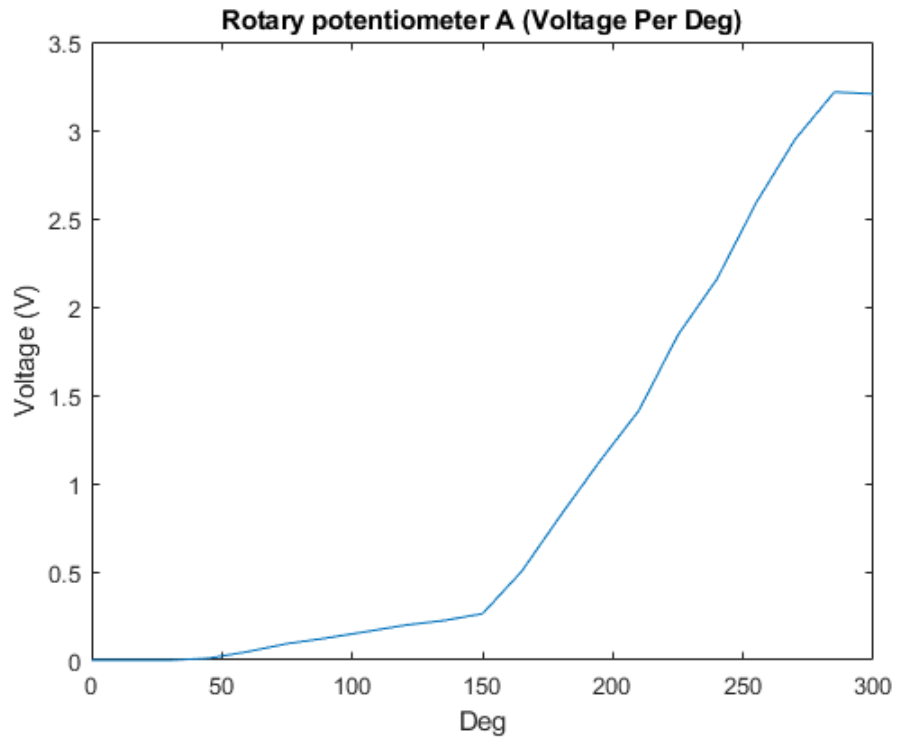
1.8 ผลการทดลอง

1.8.1 ผลการทดลองที่ 1

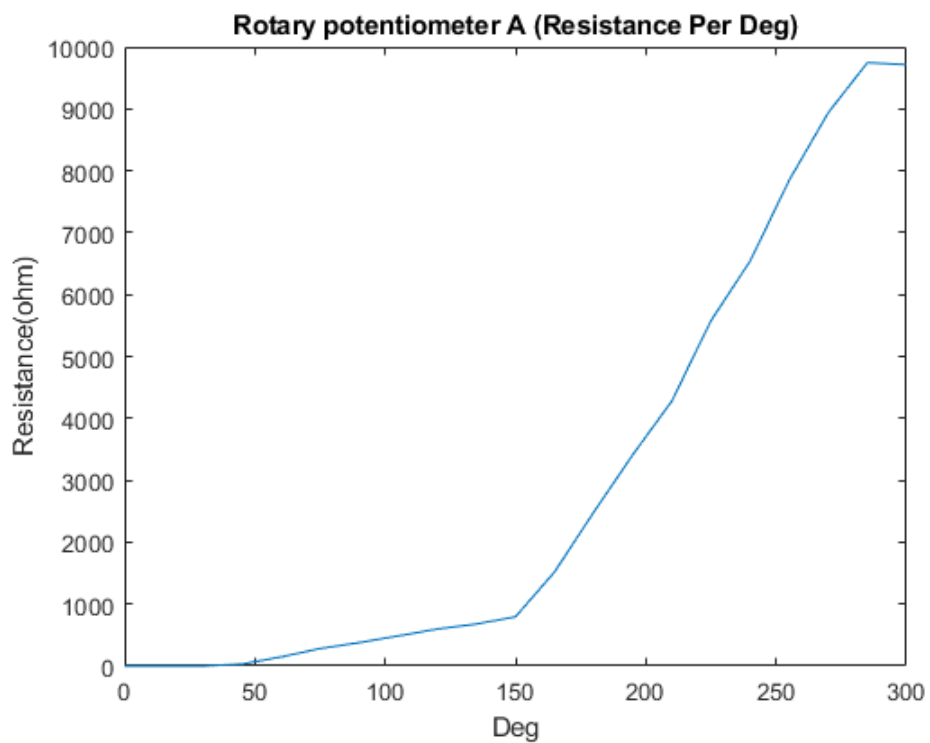
- (1) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง A ในองศาต่างๆ มาเก็บค่า สามารถแสดงผลค่าที่ได้ดังนี้

องศาการหมุน (องศา)	ค่าแรงดัน (V)	ค่าความต้านทาน (Ω)
0	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000
30	0.0000	0.0000
45	0.0099	29.9631
60	0.0479	145.0783
75	0.0929	281.4875
90	0.1244	376.9691
105	0.1602	485.4909
120	0.1970	597.0407
135	0.2237	677.7483
150	0.2622	794.4507
165	0.5017	1520.3550
180	0.8195	2483.4735
195	1.1262	3412.6485
210	1.4130	4281.7752
225	1.8410	5578.7862
240	2.1582	6540.0489
255	2.5896	7847.1698
270	2.9499	8939.1275
285	3.2162	9746.0079
300	3.2056	9713.8714

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง A ในองศาต่างๆ



รูปแสดงกราฟแรงดันที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer A ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปแสดงกราฟความต้านทานที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer A ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป

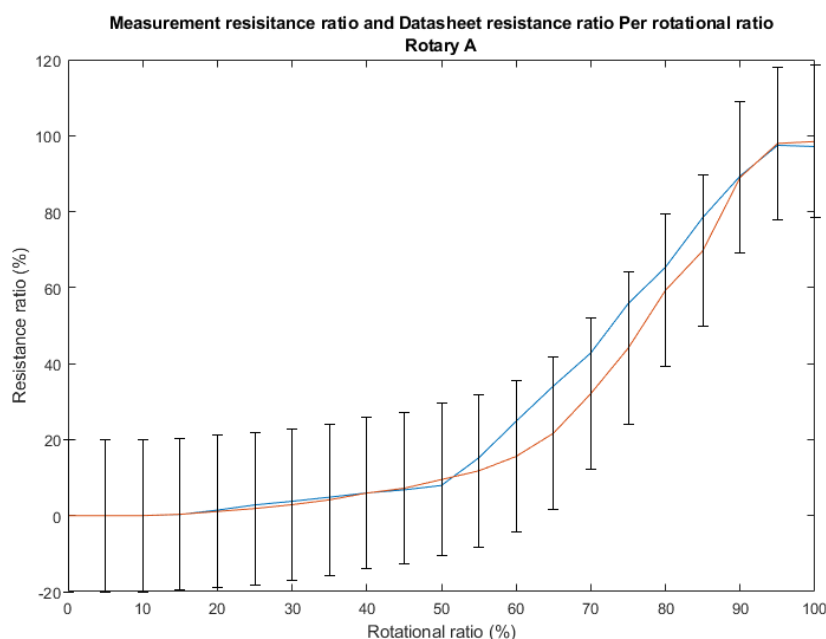
พบว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความคล้ยคลึงกับกราฟแรงดันไฟฟ้าจาก PDB181-K420K-103A2 ตาม Datasheet

นอกจากนี้ PDB181-K420K-103A2 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน จึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบความต้านทานที่เก็บค่าได้กับค่าทางทฤษฎี ด้วยการเลือกค่าแรงดันที่ชัดเจนจาก Datasheet เข้าสมการหาค่าความต้านทาน ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ สามารถเทียบบัญญัติได้ดังนี้

$$R_2 = (V_{out} \times \frac{10,000}{3.3})$$

เมื่อ R_2 คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการหา (Ω),
 V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น (V),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
10,000 คือ ค่าความต้านทานสูงสุด (Ω)

เมื่อได้ค่าความต้านทานทางทฤษฎีแล้ว ให้นำค่าความต้านทานทั้งหมดที่ได้ มาคำนวณระยะค่าคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



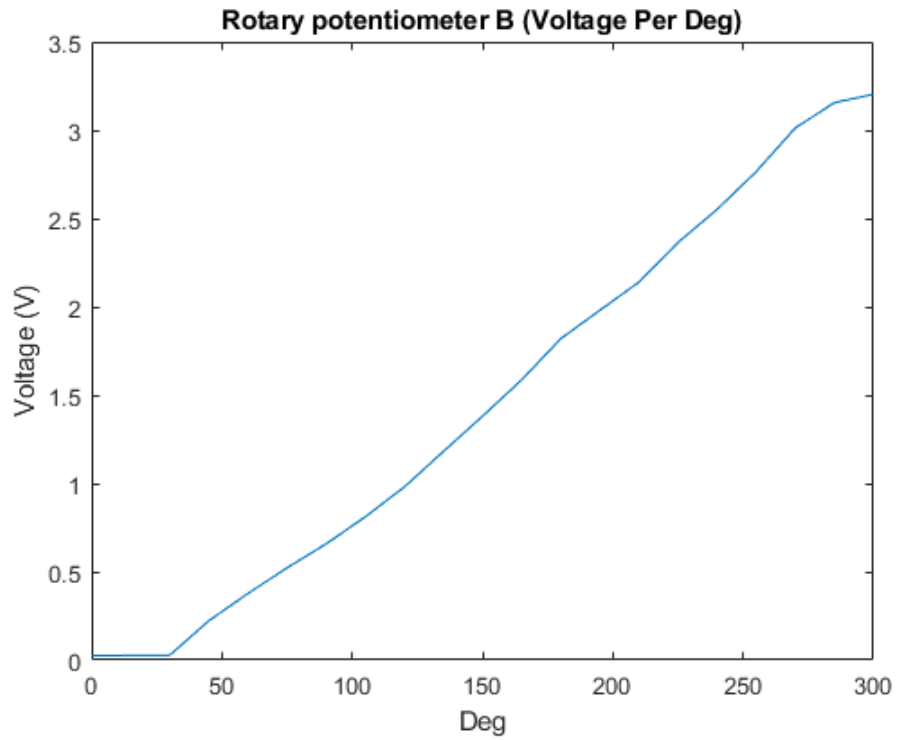
รูปแสดงขอบเขตค่าคลาดเคลื่อนของ Rotary Potentiometer A

เมื่อกราฟแสดงค่าความต้านทานตามที่แนบมากับ Datasheet ด้วยเส้นสีแดง และแสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้ พบว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เส้นขอบสีดำ) จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสอดคล้องกับข้อมูลใน Datasheet ของ PDB181-K420K-103A2

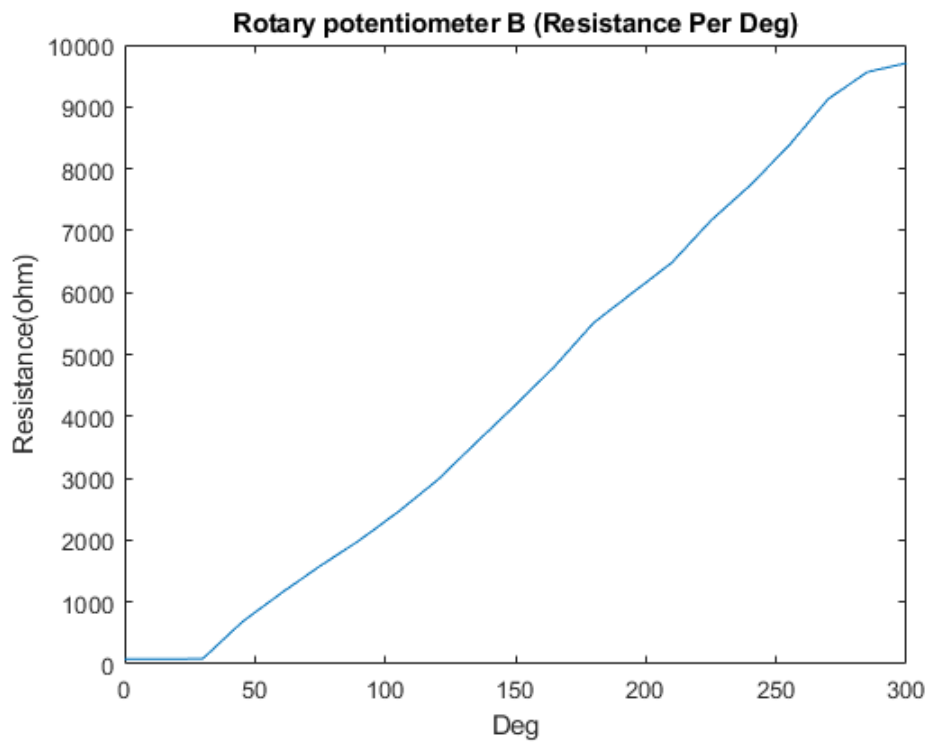
(2) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง B ในองศาต่างๆ มาเก็บค่า สามารถแสดงผลค่าที่ได้ดังนี้

องศาการหมุน (องศา)	ค่าแรงดัน (V)	ค่าความต้านทาน (Ω)
0	0.0259	78.4365
15	0.0262	79.4377
30	0.0276	83.4914
45	0.2224	673.8655
60	0.3769	1142.0916
75	0.5220	1581.8441
90	0.6578	1993.4162
105	0.8111	2457.7595
120	0.9798	2969.0133
135	1.1813	3579.7047
150	1.3806	4183.5586
165	1.5863	4807.0215
180	1.8193	5512.9748
195	1.9801	6000.3948
210	2.1397	6483.8833
225	2.3645	7165.0015
240	2.5514	7731.4442
255	2.7653	8379.6689
270	3.0126	9128.9918
285	3.1559	9563.2742
300	3.2030	9706.1547

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง B ในองศาต่างๆ



รูปแสดงกราฟแรงดันที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer B ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปแสดงกราฟความต้านทานที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer B ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป

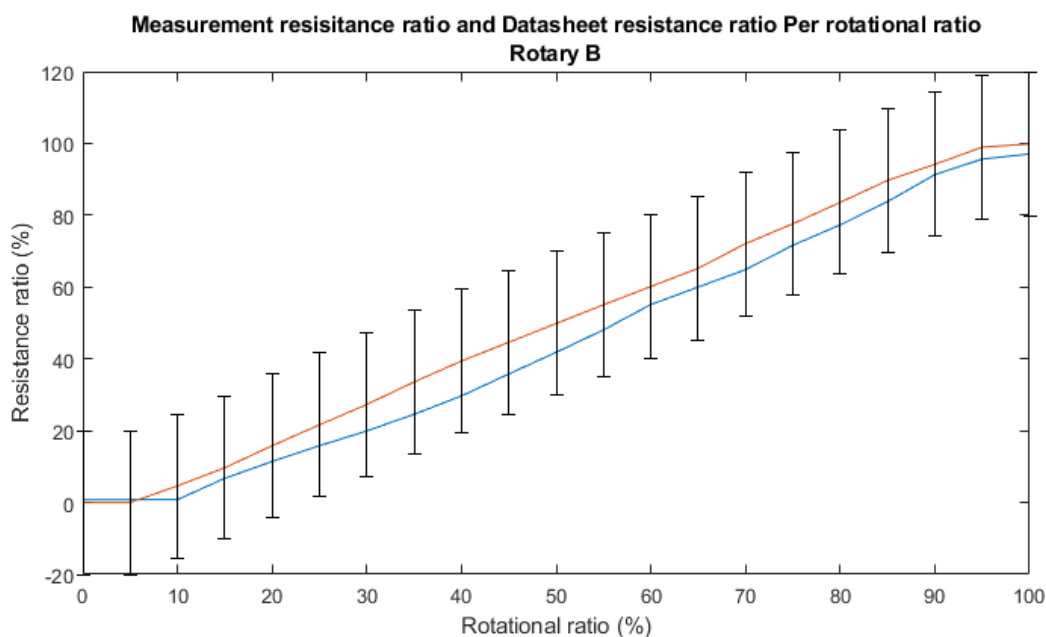
พบว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความคล้อยคลึงกับกราฟแรงดันไฟฟ้าจาก PDB181-K420K-103B ตาม Datasheet

นอกจากนี้ PDB181-K420K-103B มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน จึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบความต้านทานที่เก็บค่าได้กับค่าทางทฤษฎี ด้วยการเลือกค่าแรงดันที่ชัดเจนจาก Datasheet เข้าสมการหาค่าความต้านทาน ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ สามารถเทียบบัญญัติได้ดังนี้

$$R_2 = (V_{out} \times \frac{10,000}{3.3})$$

เมื่อ R_2 คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการหา (Ω),
 V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น (V),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
10,000 คือ ค่าความต้านทานสูงสุด (Ω)

เมื่อได้ค่าความต้านทานทางทฤษฎีแล้ว ให้นำค่าความต้านทานทั้งหมดที่ได้ มาคำนวณระยะค่าคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



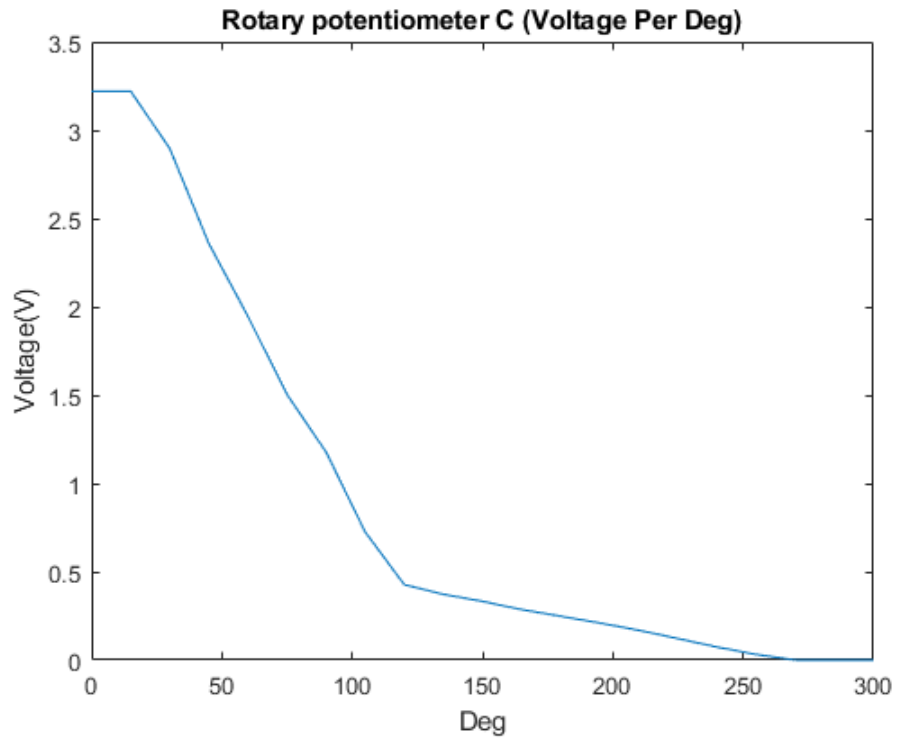
รูปแสดงขอบเขตค่าคลาดเคลื่อนของ Rotary Potentiometer B

เมื่อกราฟแสดงค่าความต้านทานตามที่แนบมากับ Datasheet ด้วยเส้นสีแดง และแสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้ พบว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เส้นขอบสีดำ) จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสอดคล้องกับข้อมูลใน Datasheet ของ PDB181-K420K-103B

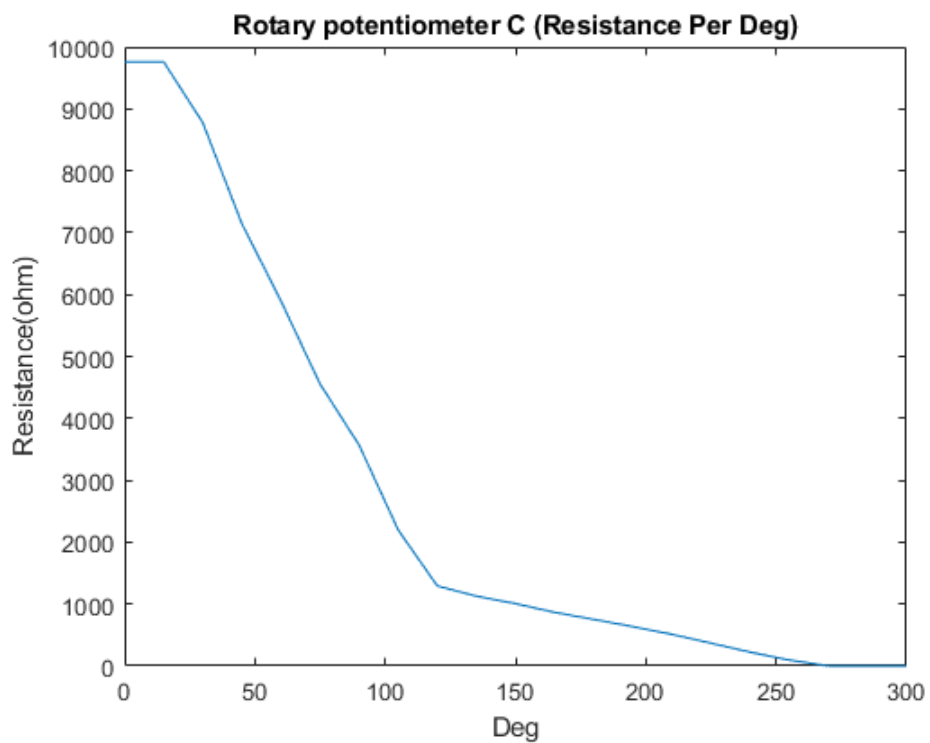
(3) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง C ในองศาต่างๆ มาเก็บค่า สามารถแสดงผลค่าที่ได้ดังนี้

องศาการหมุน (องศา)	ค่าแรงดัน (V)	ค่าความต้านทาน (Ω)
0	3.2201	9757.7539
15	3.2207	9759.7075
30	2.8964	8777.0042
45	2.3579	7145.2703
60	1.9460	5896.8303
75	1.5035	4555.9123
90	1.1773	3567.4703
105	0.7247	2196.0764
120	0.4266	1292.6155
135	0.3723	1128.2700
150	0.3322	1006.8057
165	0.2857	865.8299
180	0.2483	752.2777
195	0.2097	635.5264
210	0.1688	511.6201
225	0.1216	368.4466
240	0.0737	223.3927
255	0.0317	96.0432
270	0.0002	0.5617
285	0.0000	0.0000
300	0.0000	0.0000

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Rotary Potentiometer ณ ตำแหน่ง C ในองศาต่างๆ



รูปแสดงกราฟแรงดันที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer C ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปแสดงกราฟความต้านทานที่เก็บค่าได้จาก Rotary Potentiometer C ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป

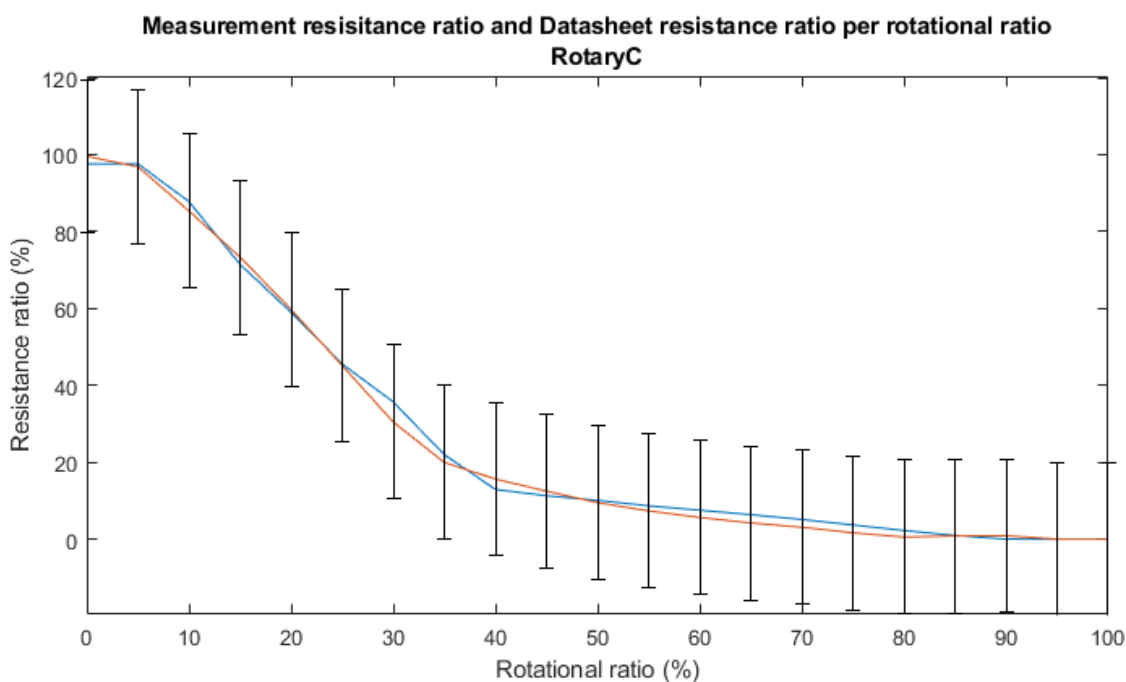
พบว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความคล้ายคลึงกับกราฟแรงดันไฟฟ้าจาก PDB181-K420K-103C ตาม Datasheet

นอกจากนี้ PDB181-K420K-103C มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน จึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบความต้านทานที่เก็บค่าได้กับค่าทางทฤษฎี ด้วยการเลือกค่าแรงดันที่ชัดเจนจาก Datasheet เข้าสมการหาค่าความต้านทาน ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ สามารถเทียบบัญญัติได้ดังต่อไปนี้

$$R_2 = (V_{out} \times \frac{10,000}{3.3})$$

เมื่อ R_2 คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการหา (Ω),
 V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น (V),
 3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
 10,000 คือ ค่าความต้านทานสูงสุด (Ω)

เมื่อได้ค่าความต้านทานทางทฤษฎีแล้ว ให้นำค่าความต้านทานทั้งหมดที่ได้ มาคำนวณระยะค่าคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



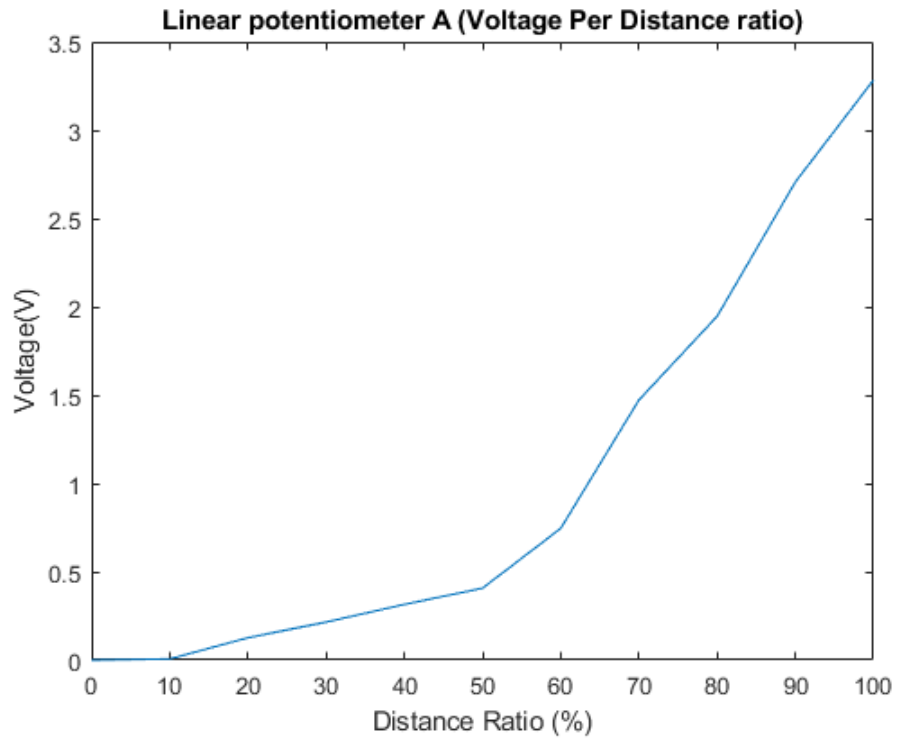
รูปแสดงขอบเขตค่าคลาดเคลื่อนของ Rotary Potentiometer C

เมื่อกราฟแสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เส้นขอบสีแดง) จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสอดคล้องกับข้อมูลใน Datasheet ของ PDB181-K420K-103C

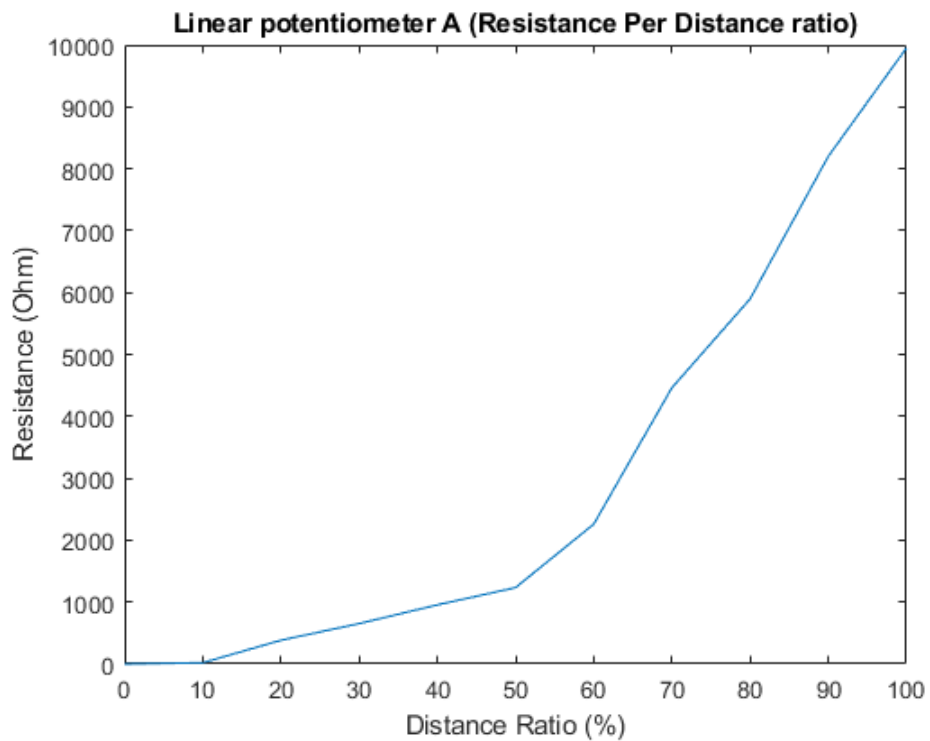
(4) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Linear Potentiometer ณ ตำแหน่ง A ในองศาต่างๆ มาเก็บค่า สามารถแสดงผลค่าที่ได้ดังนี้

ระยะทาง (เปอร์เซ็นต์)	ค่าแรงดัน (V)	ค่าความต้านทาน (Ω)
0	0.0000	0.0000
10	0.0064	19.5359
20	0.1265	383.3915
30	0.2152	652.0098
40	0.3151	954.8158
50	0.4070	1233.2020
60	0.7454	2258.8354
70	1.4723	4461.5052
80	1.9461	5897.3919
90	2.7061	8200.1831
100	3.2839	9951.0858

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Linear Potentiometer ณ ตำแหน่ง A ในองศาต่างๆ



รูปแสดงกราฟแรงดันที่เก็บค่าได้จาก Linear Potentiometer A ต่อระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปแสดงกราฟความต้านทานที่เก็บค่าได้จาก Linear Potentiometer A ต่อระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป

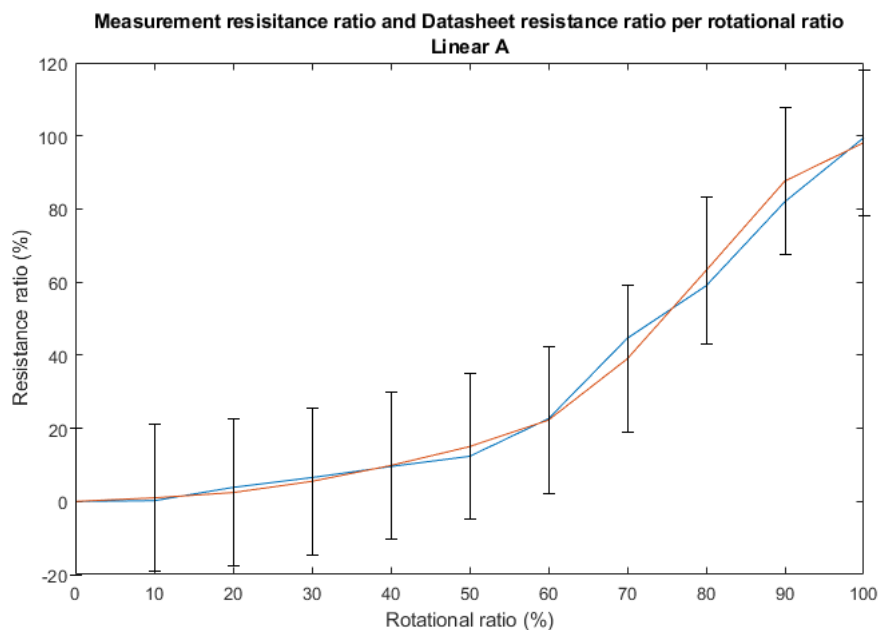
พบว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความคล้ยคลึงกับกราฟแรงดันไฟฟ้าจาก PTA6043-2015DPA103 ตาม Datasheet

นอกจากนี้ PTA6043-2015DPA103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน จึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบความต้านทานที่เก็บค่าได้กับค่าทางทฤษฎี ด้วยการเลือกค่าแรงดันตัวอย่างที่ชัดเจน จาก Datasheet เข้าสมการหาค่าความต้านทาน ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ สามารถเทียบบัญญัติไตรยางค์ได้ดังนี้

$$R_2 = (V_{out} \times \frac{10,000}{3.3})$$

เมื่อ R_2 คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการหา (Ω),
 V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น (V),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
10,000 คือ ค่าความต้านทานสูงสุด (Ω)

เมื่อได้ค่าความต้านทานทางทฤษฎีแล้ว ให้นำค่าความต้านทานทั้งหมดที่ได้ มาคำนวณระยะค่าคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



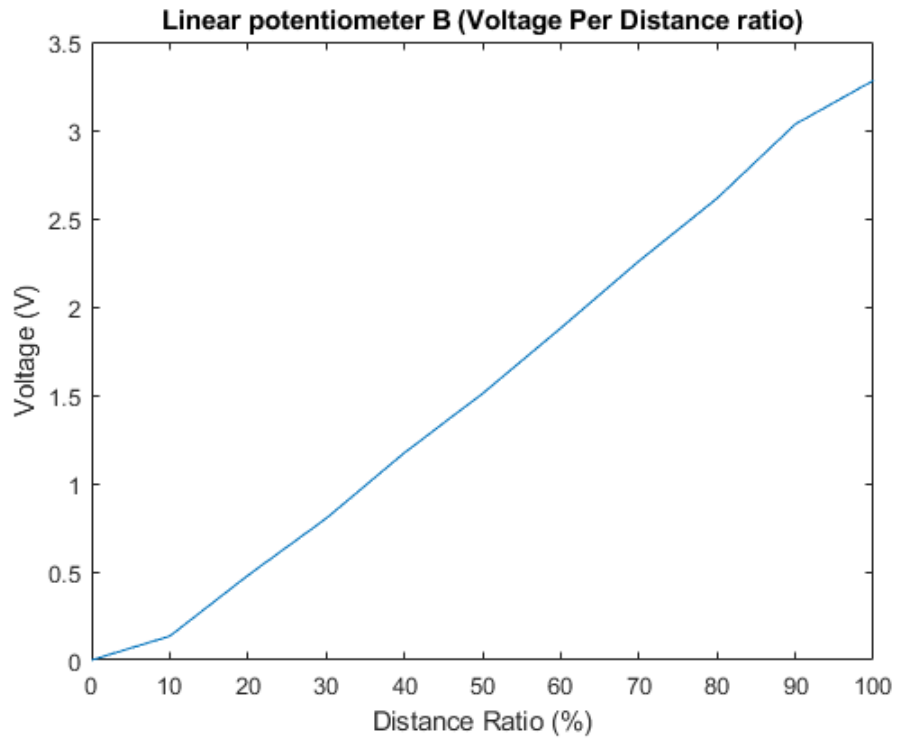
รูปแสดงขอบเขตค่าคลาดเคลื่อนของ Linear Potentiometer A

เมื่อกราฟแสดงค่าความต้านทานตามที่แนบมากับ Datasheet ด้วยเส้นสีแดง และแสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้ พบว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เส้นขอบสีดำ) จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสอดคล้องกับข้อมูลใน Datasheet ของ PTA6043-2015DPA103

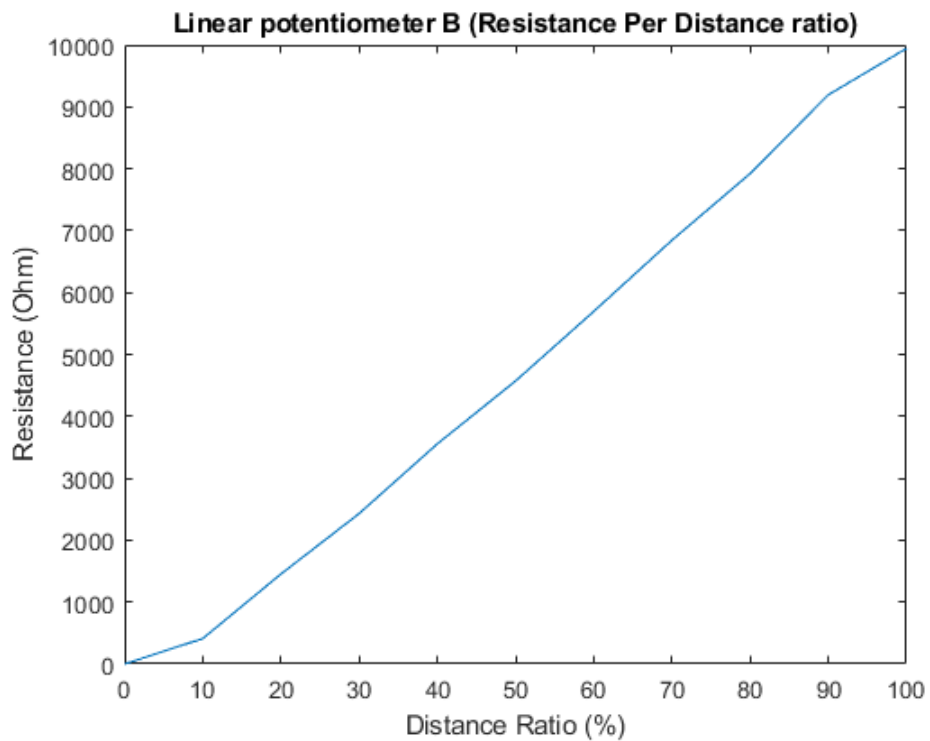
(5) ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Linear Potentiometer ณ ตำแหน่ง B ในองศาต่างๆ มาเก็บค่า สามารถแสดงผลค่าที่ได้ดังนี้

ระยะทาง (เซนติเมตร)	ค่าแรงดัน (V)	ค่าความต้านทาน (Ω)
0	0.0000	0.0000
10	0.1354	410.2534
20	0.4795	1452.9806
30	0.8018	2429.7743
40	1.1733	3555.5290
50	1.5086	4571.3945
60	1.8793	5694.7072
70	2.2588	6844.8818
80	2.6142	7921.7969
90	3.0340	9194.0706
100	3.2814	9943.7598

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Linear Potentiometer ณ ตำแหน่ง B ในตำแหน่งต่างๆ



รูปแสดงกราฟแรงดันที่เก็บค่าได้จาก Linear Potentiometer B ต่อระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปแสดงกราฟความต้านทานที่เก็บค่าได้จาก Linear Potentiometer B ต่อองศาที่เปลี่ยนแปลงไป

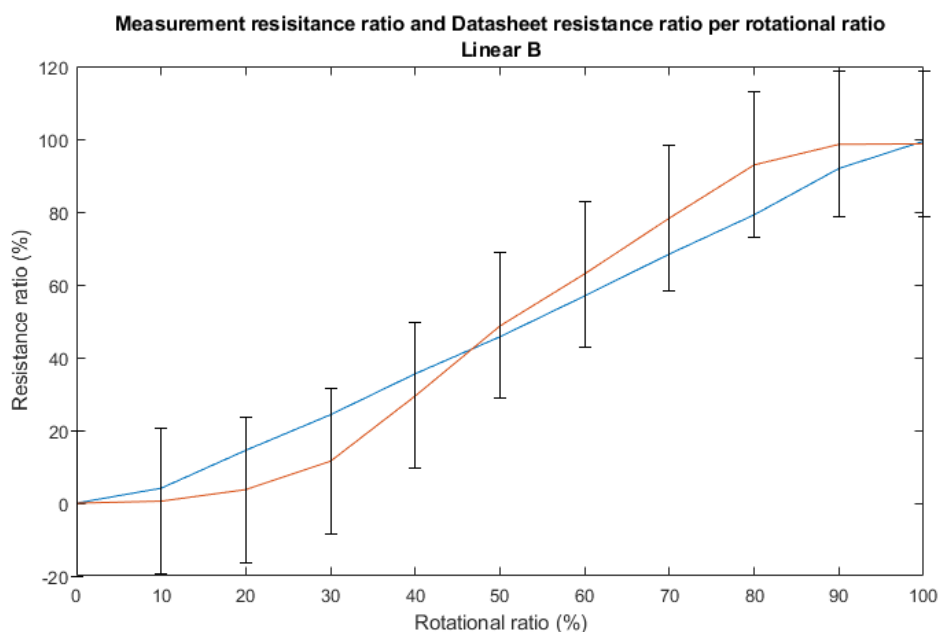
พบว่ากราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้ มีความคล้ยคลึงกับกราฟแรงดันไฟฟ้าจาก PTA6043-2015DPB103 ตาม Datasheet

นอกจากนี้ PTA6043-2015DPB103 มีค่าความคลาดเคลื่อนตัวต้านทานอยู่ที่ $\pm 20\%$ ของค่าความต้านทาน จึงสามารถสร้างกราฟเปรียบเทียบความต้านทานที่เก็บค่าได้กับค่าทางทฤษฎี ด้วยการเลือกค่าแรงดันตัวอย่างที่ชัดเจน จาก Datasheet เข้าสมการหาค่าความต้านทาน ณ แรงดันไฟฟ้านั้นๆ สามารถเทียบบัญญัติไตรยางค์ได้ดังนี้

$$R_2 = (V_{out} \times \frac{10,000}{3.3})$$

เมื่อ R_2 คือ ค่าความต้านทานที่ต้องการหา (Ω),
 V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งนั้น (V),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
10,000 คือ ค่าความต้านทานสูงสุด (Ω)

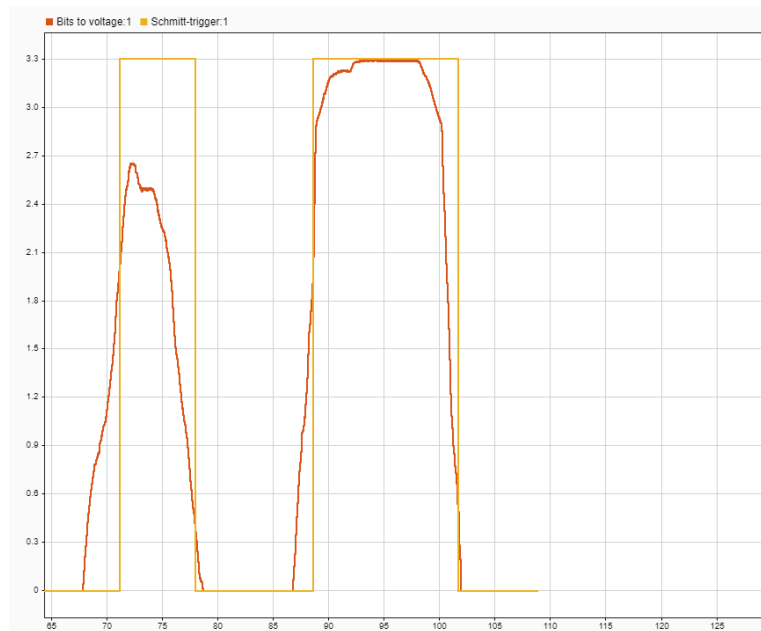
เมื่อได้ค่าความต้านทานทางทฤษฎีแล้ว ให้นำค่าความต้านทานทั้งหมดที่ได้ มาคำนวณระยะค่าคลาดเคลื่อน $\pm 20\%$ ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet เพื่อกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



รูปแสดงขอบเขตค่าคลาดเคลื่อนของ Linear Potentiometer B

เมื่อกราฟแสดงค่าความต้านทานตามที่แนบมากับ Datasheet ด้วยเส้นสีแดง และแสดงค่าความต้านทานที่คำนวณได้ พบว่าค่าความต้านทานที่คำนวณได้อยู่ภายในขอบเขตค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (เส้นขอบสีดำ) จึงสรุปได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นสอดคล้องกับข้อมูลใน Datasheet ของ PTA6043-2015DPB103

1.8.2. เมื่อเปิด Data Inspector พบว่าเมื่อหมุน Rotary Potentiometer หรือเลื่อน Linear Potentiometer ให้องศาหรือระยะทางเปลี่ยนไป จะแสดงผลดังนี้



รูปแสดงตัวอย่างสัญญาณขาออกของวงจร Schmitt Trigger

สัญญาณจะคงที่ที่ 0 V จนกว่าแรงดันขาออกจะถึง 2 V หรือค่าขอบบน จากนั้นสัญญาณจะเปลี่ยนเป็น 3.3 V และจะคงที่ที่ 3.3 V จนกว่าแรงดันขาออกจะลดลงถึง 0.4 V หรือค่าขอบล่าง

1.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

1.9.1 สรุปผล

Rotary Potentiometer A คือ PDB181-K420K-103A2 ซึ่งเป็น Taper A แสดงค่า Log
Rotary Potentiometer B คือ PDB181-K420K-103B ซึ่งเป็น Taper B แสดงค่า Linear
Rotary Potentiometer C คือ PDB181-K420K-103C ซึ่งเป็น Taper C แสดงค่า Anti-Log
Linear Potentiometer A คือ PTA6043-2015DPA103 ซึ่งเป็น Taper A แสดงค่า Log
Linear Potentiometer B คือ PTA6043-2015DPB103 ซึ่งเป็น Taper B แสดงค่า Linear

1.9.2 อภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Potentiometer มีการเปลี่ยนแปลงตามองศาการหมุน และระยะทางจากการเลื่อนแกนกลาง ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติที่ระบุไว้ใน Datasheet โดยเมื่อพล็อตกราฟ แรงดันไฟฟ้า จะพบว่ารูปแบบของกราฟมีความคล้ายคลึงกับกราฟใน Datasheet อย่างชัดเจน ทั้งนี้ การเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงยังแสดงให้เห็นว่า ความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ($\pm 20\%$) ตามที่ระบุไว้ใน Datasheet ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของ Potentiometer ในการทดลองมีความสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่กำหนด

ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของผลลัพธ์เมื่อใช้ Potentiometer ที่มีประเภท Taper แตกต่างกันอีกด้วย จึงสามารถพิสูจน์ได้ว่า Datasheet ที่เขียนประเภทของ Tapers ที่ต่างกัน จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน โดยสาเหตุที่ทำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไม่มากนักน้อย อาจเกิดได้เพราะหลายเหตุผล การควบคุมปัจจัยที่อาจมีผลกระทบจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เช่น การรักษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าระหว่างการทดลองหรือได้รับค่าที่ผิดเพี้ยนจาก Human Error

นอกจากนี้ การทดลองยังได้มีการจำลองวงจร Schmitt-Trigger โดยใช้ MATLAB Simulink เพื่อแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital ซึ่งการทำงานของวงจรแสดงให้เห็นว่าสามารถเปลี่ยนสถานะจาก “0” เป็น “1” ได้เมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าค่าขอบบน (Upper Bound) และกลับไปเป็น “0” เมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าขอบล่าง (Lower Bound) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีและการทำงานของวงจร Schmitt-Trigger โดยผลการทดลองยังแสดงถึงความสามารถในการแปลงสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี สามารถสรุปได้ว่า การออกแบบและการดำเนินการทดลองในครั้งนี้มีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์และซอฟต์แวร์ MATLAB Simulink ช่วยให้การบันทึกและวิเคราะห์ผลเป็นไปอย่างมีระบบและมีความสมบูรณ์

1.9.3 ข้อเสนอแนะ

ถ้าสามารถแก้ Human Error จากการเก็บค่าด้วยสายตาได้ จะมีค่าแรงดันที่ถูกต้องมากกว่านี้

1.10 เอกสารอ้างอิง

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

<https://www.mouser.com/ProductDetail/Bourns/PTA6043-2015DPA103?qs=U%2FacTlguYxapXl1x524WqA%3D%3D>

<https://www.digikey.ie/en/products/detail/bourns-inc/PTA6043-2015DPA103/3781231>

<https://th.rs-online.com/web/p/potentiometers/1674689>

<https://th.mouser.com/datasheet/2/54/PDB18-1013655.pdf>

บทที่ 2 Incremental Encoder

โดยบทนี้ มีการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง ได้แก่ การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ Incremental Encoder ด้วย polling method กับ QEI และ การทดลองเพื่อศึกษาการใช้ Home Configuration สำหรับ Incremental Encoder

2.1 วัตถุประสงค์

- 2.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Incremental Encoder
- 2.1.2 เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Output ของ Incremental Encoder เมื่อทิศทางและความเร็วการหมุนเปลี่ยนแปลงไป
- 2.1.3 เพื่อศึกษาคุณลักษณะของ Incremental Encoder เช่น Resolution, Pulses Per Revolution, คุณลักษณะเฉพาะ
- 2.1.4 เพื่อศึกษารูปแบบการอ่านสัญญาณของ Quadrature encoder ทุกรูปแบบ
- 2.1.5 เพื่อศึกษาความแตกต่างจากการอ่าน Encoder ด้วย QEI กับ Polling Method
- 2.1.6 เพื่อศึกษาข้อจำกัดของ MATLAB Simulink ในการอ่าน Encoder ด้วย Polling Method
- 2.1.7 เพื่อศึกษา STM32 Timer Encoder Mode: position and velocity estimation และ Home Configuration for Incremental Encoder
- 2.1.8 เพื่อฝึกฝนทักษะการอ่านความเร็วมอเตอร์จากค่าตำแหน่งที่ Wrap-around ด้วยการ Unwrap
- 2.1.9 เพื่อวิเคราะห์สาเหตุหรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่ออ่านค่าจาก Encoder ผิดพลาดด้วยตำแหน่งหรือจากวิธีการต่างๆ

2.2 สมมติฐาน

การอ่านค่าจาก Encoder ทั้งจาก AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 จะให้ค่าสอดคล้องกับทางทฤษฎีทั้งทิศทาง และขนาด สามารถคำนวณหาตำแหน่งเชิงมุม และความเร็วเชิงมุมได้ จากทั้ง Polling method และ QEI และสามารถที่จะเขียนโปรแกรมตั้งค่าเริ่มต้นให้กับ Encoder ได้

2.3 ตัวแปรที่ศึกษา

การทดลองที่ 1 และ 2 :

ตัวแปรต้น : ความเร็วและทิศทางในการหมุนของ Incremental Encoder,
ความละเอียดในการอ่านค่า (X1, X2, X4 Resolution)

ตัวแปรตาม : จำนวน Pulse หรือค่าตำแหน่งที่อ่านได้จาก Incremental Encoder,
ค่าความเร็วเชิงมุมที่คำนวณจากจำนวน Pulse ต่อเวลา และ
ข้อมูลการแสดงผลตำแหน่งและความเร็วที่ได้จาก Polling Method และ QEI

ตัวแปรควบคุม : Sampling frequency และ Counter period

การทดลองที่ 3 :

ตัวแปรต้น : ตำแหน่งเริ่มต้นหรือจุดอ้างอิงของ Encoder ที่กำหนดในการ Home Configuration

ตัวแปรตาม : ค่าตำแหน่งของ Incremental Encoder หลังจากทำการ Home และ
ความแม่นยำของค่าตำแหน่งที่กลับไปยังจุดเริ่มต้น

ตัวแปรควบคุม : การตั้งค่า Home Configuration ในโปรแกรม,
ความเร็วในการหมุน Encoder ขณะทำ Home,
แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Incremental Encoder และ สภาพแวดล้อมที่ทำการทดลอง

2.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

2.4.1 Home Configuration

2.4.2 Incremental Encoder

2.4.3 Sampling frequency

2.4.4 Counter period

2.4.5 Pulse

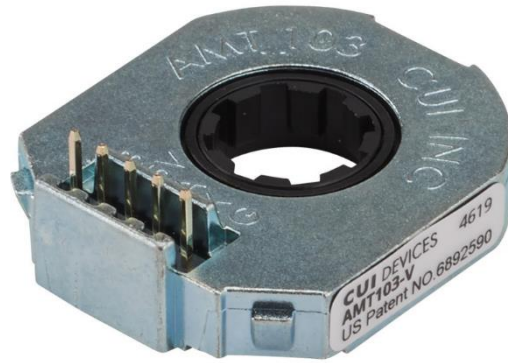
2.4.6 Polling Method

2.4.7 QEI

2.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Incremental Encoder AMT103-V



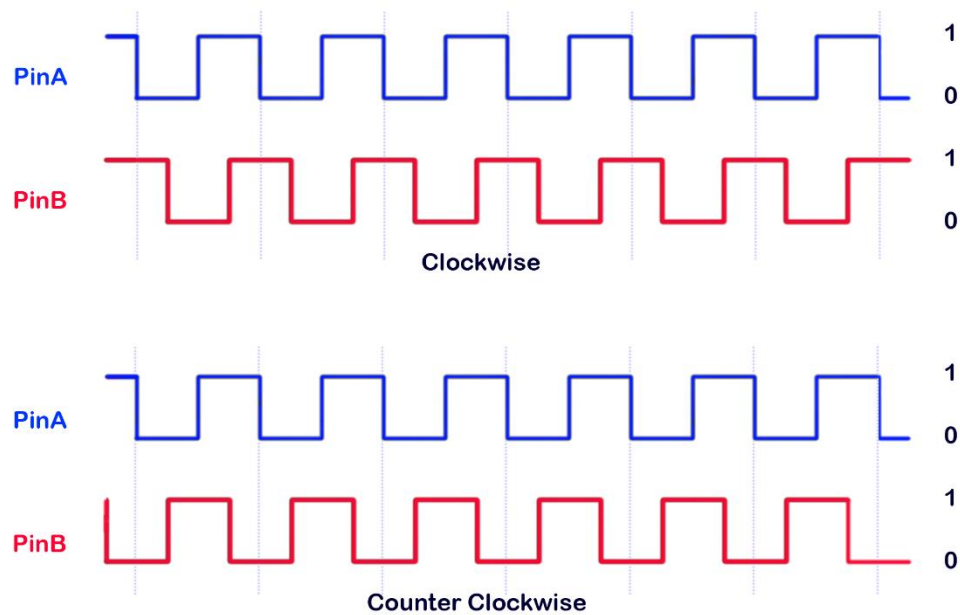
รูป Incremental Encoder AMT103-V

แหล่งที่มา: https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/sensors_-_encoders/encoders/modular_kit_encoders_for_stepper_motors/amt103-v

Encoder รุ่นนี้สามารถปรับ PPR ได้ตั้งแต่ 48 ถึง 2,048 PPR โดยมีตัวเลือกให้เลือกหลายระดับ ได้แก่ 48, 96, 192, 200, 250, 256, 360, 400, 500, 512, 1000, 1024, 1250, 2000, และ 2048

ความละเอียดที่ปรับได้นี้ช่วยให้สามารถเลือก PPR ที่เหมาะสมตามการใช้งานได้
ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีความละเอียดและแม่นยำตามความต้องการ AMT103-V ใช้สัญญาณแบบ Quadrature ซึ่งประกอบด้วย 2 ช่องสัญญาณหลัก (A และ B) ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา

สัญญาณนี้ทำให้สามารถตรวจจับทิศทางการหมุนได้ ทั้งตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา



รูปแสดงตัวอย่างการอ่านค่าทิศตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา

มีช่องสัญญาณ Index (Z) สำหรับการตั้งตำแหน่งศูนย์ (Home Position) เพื่อการรีเซ็ตตำแหน่งของ Encoder ได้ Encoder รุ่นนี้รองรับแรงดันไฟฟ้า 5V ซึ่งเหมาะกับระบบควบคุมอุตสาหกรรมและการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์

สามารถใช้งานได้ที่ความเร็วสูงสุดที่ 20,000 รอบต่อนาที (RPM) ซึ่งทำให้ตอบสนองได้ดีสำหรับการใช้งาน ที่ต้องการการหมุนความเร็วสูง

2.6.2 BOURNS PEC11R-4220F-N0024



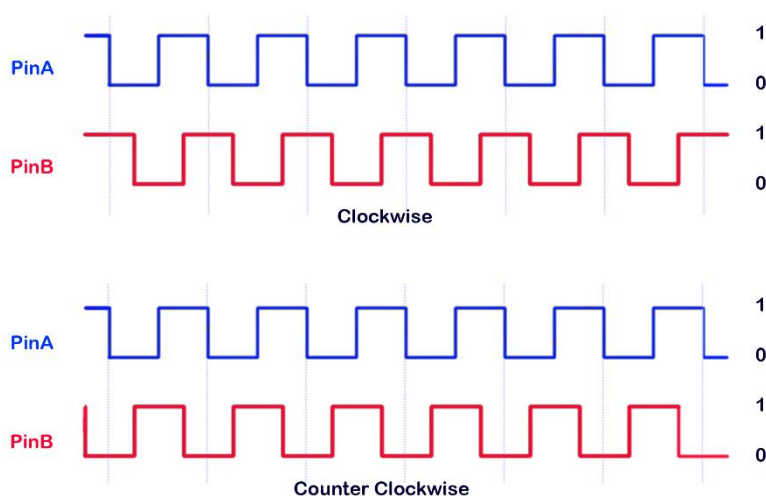
รูป BOURNS PEC11R-4220F-N0024

แหล่งที่มา : <https://www.ebay.com/itm/123205712899>

BOURNS PEC11R-4220F-N0024 เป็น Incremental Encoder ชนิด Rotary ซึ่งเหมาะสำหรับการควบคุมการหมุนที่ให้ตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ ใช้สำหรับการรับรู้ การหมุนในอุปกรณ์ที่ต้องการ การควบคุมแบบหมุน เช่น Volume ควบคุมเสียง หรือการปรับแต่งบนแผงควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้า

ให้ 24 Pulse ต่อการหมุนหนึ่งรอบ (24 PPR) ซึ่งหมายถึงการหมุนหนึ่งรอบจะเกิด Pulse ขึ้น 24 ครั้ง สัญญาณ Pulse เหล่านี้ใช้ในการระบุตำแหน่งหมุนหรือทิศทางการหมุนความละเอียดที่ไม่สูงมาก เหมาะสำหรับงานควบคุมทั่วไปที่ไม่ต้องการความแม่นยำระดับสูง

ให้สัญญาณแบบ Quadrature Encoder ที่มีสองช่องคือ A และ B โดยมีเฟสต่างกัน 90 องศา ช่วยในการระบุตำแหน่งและทิศทางการหมุน



รูปแสดงตัวอย่างการหมุนแบบตามเข็มนาฬิกากับทวนเข็มนาฬิกา

ไม่มีช่องสัญญาณ Index (Z) ซึ่งหมายความว่าไม่สามารถระบุตำแหน่งศูนย์ได้ จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการเพียงการนับจำนวน Pulse และทิศทางของการหมุน

แรงบิดการหมุนประมาณ 30 gf-cm ทำให้หมุนได้ง่ายแต่ยังให้สัมผัสที่มั่นคง ไม่หมุนหลวมเกินไป

มีสัมผัสที่พอดีสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดในระดับปานกลาง

ตัว Encoder มีอายุการใช้งานสูงถึง 30,000 รอบ (Cycles)

2.6.3 Quadrature Encoder

Quadrature Encoder เป็น Rotary Encoder ชนิดหนึ่งซึ่งใช้ในการวัดตำแหน่งเชิงมุมและทิศทาง การหมุนของวัตถุที่หมุน เช่น มอเตอร์ แกนหมุน หรือระบบการเคลื่อนที่ โดยให้สัญญาณแบบดิจิทัล ก็คือสัญญาณ Quadrature ซึ่งประกอบด้วยสองช่องสัญญาณ (Channel A และ Channel B) ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา สัญญาณนี้ช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งและทิศทางของการหมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยมีหลักการทำงานคร่าวๆดังนี้ Quadrature Encoder ทำงานโดยส่งสัญญาณสองช่อง (A และ B) ซึ่งเฟสของสัญญาณ A และ B จะต่างกัน 90 องศา (หรือ 1/4 รอบ) ในการหมุนที่กำหนด หากวัตถุหมุนไปตามทิศทางหนึ่ง เช่น ตามเข็มนาฬิกา สัญญาณ A จะนำสัญญาณ B แต่ถ้าหมุนทวนเข็มนาฬิกา สัญญาณ B จะนำสัญญาณ A

ใน Quadrature Encoder แต่ละขอบสัญญาณ (ทั้ง rising และ falling edge) จะเป็นตำแหน่งที่อ่านได้ โดยสามารถเลือกการอ่านได้แบบต่างๆ เช่น:

1X Mode: อ่านเฉพาะขอบสัญญาณด้านเดียว (เช่น ขอบสัญญาณ rising ของช่อง A)

2X Mode: อ่านขอบสัญญาณทั้ง rising และ falling ของช่อง A

4X Mode: อ่านขอบสัญญาณ rising และ falling ของทั้งช่อง A และ B ทำให้สามารถเพิ่มความละเอียดในการนับตำแหน่งได้มากขึ้น

2.6.4 ความแตกต่างระหว่าง การอ่าน Encoder ด้วย QEI กับ Polling Method

(1) Quadrature Encoder Interface (QEI)

- (1.1) ใช้ฮาร์ดแวร์ใน Microcontroller เพื่ออ่านสัญญาณจาก Encoder โดยตรง ซึ่งจะมีการนับและจัดการสัญญาณ A และ B ที่ส่งออกมา
- (1.2) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- (1.3) เมื่อสัญญาณเปลี่ยนแปลง ระบบจะสร้างการ interrupt ไปยัง CPU ให้ CPU ประมวลผลข้อมูลได้ในเวลาที่เหมาะสม

(2) Polling Method

- (2.1) Polling Method คือการตรวจสอบสัญญาณจาก Encoder อย่างต่อเนื่องโดย CPU ซึ่งจะต้องเรียกอ่านสัญญาณ A และ B เป็นระยะๆ เพื่อดูว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่
- (2.2) ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับอัตราการตรวจสอบ
- (2.3) เหมาะสำหรับงานที่ไม่ต้องการการตอบสนองเร็วมาก หรือในระบบที่มีความซับซ้อนน้อย

Quadrature Encoder Interface		Polling Method	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
ประมวลผลข้อมูลได้เร็วและมีประสิทธิภาพ	อาจจะซับซ้อนในการตั้งค่าและการเขียนโปรแกรม	ง่ายต่อการติดตั้งและเขียนโปรแกรม	ใช้ CPU มากขึ้นและอาจทำให้การประมวลผลข้อมูลอื่นๆ ช้าลง
ลดภาระของ CPU เนื่องจากไม่ต้องการตรวจสอบสัญญาณอย่างต่อเนื่อง	ต้องใช้ฮาร์ดแวร์พิเศษที่สนับสนุน QEI	ไม่มีความต้องการฮาร์ดแวร์พิเศษ	อาจสูญเสียข้อมูลที่สำคัญถ้าตั้งอัตราการตรวจสอบต่ำเกินไป

2.6.5 Wrap-around ใน Encoder

สถานการณ์ที่ตำแหน่งที่นับจาก Encoder กลับไปที่จุดเริ่มต้นอีกครั้งเมื่อถึงขีดจำกัดสูงสุดของการนับ นี่คือการสถานการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อ Encoder หมุนไปถึงจุดสูงสุดของการหมุนแล้วกลับไปตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งมักเกิดขึ้นใน Encoder ที่มีการนับตำแหน่งในรูปแบบเชิงวงกลม มีหลักการทำงานดังนี้

(1) การนับตำแหน่ง

Encoder จะนับตำแหน่งตามจำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้น โดยเมื่อหมุนไปถึงจำนวนพัลส์สูงสุด (เช่น 1023 สำหรับ Encoder ที่มี 1024 PPR) แล้ว เมื่อหมุนต่อไปอีกพัลส์เดียวจะทำให้ตำแหน่งกลับไป 0 (หรือ 0 PPR) นั่นคือ Wrap-around จะเกิดขึ้น

(2) การจัดการกับ Wrap-around

การจัดการกับสถานการณ์ Wrap-around นี้มีความสำคัญสำหรับการควบคุมที่แม่นยำ เช่น ในระบบควบคุมมอเตอร์หรือเครื่องจักร เพราะการอ่านค่าจาก Encoder ที่กลับไป 0 อาจทำให้เกิดความสับสนหรือข้อผิดพลาดในการควบคุม อัลกอริธึมที่ใช้ในการอ่านค่าจาก Encoder จำเป็นต้องสามารถตรวจจับการ Wrap-around และปรับปรุงการนับให้ถูกต้อง เช่น ใช้การตรวจสอบค่าที่นับอยู่เพื่อให้สามารถรู้ว่าการ Wrap-around เกิดขึ้นหรือไม่

2.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

2.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) Incremental Encoder AMT103-V
- (2) BOURNS PEC11R-4220F-N0024
- (3) Nucleo STM32G474RE
- (4) EncoderXplorer
- (5) สายจัมเปอร์

2.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- (1) ต่อสายสัญญาณ A, B โดยที่สายสัญญาณ A,B นั้นจะถูกแยกออกไปต่อ 8 ขา 2 ขาแรกต่อเข้ากับ Pin GPIO และสำหรับ 2 ขาถัดๆไป นำไปต่อ TIM3, TIM4 และ TIM8 ตามลำดับ
- (2) ตั้งค่าการทำงานของ STM32 ผ่าน CubeMX โดยมี 3 การตั้งค่าที่มีความสำคัญดังนี้
 - (2.1) Combine channel เป็นการตั้งค่าให้ Timer สามารถอ่านค่าจาก Encoder แบบ QEI ได้
 - (2.2) Counter Period เป็นการตั้งค่าตำแหน่งขอบสุดของ QEI ในการทดลองนี้จะใช้การหารร่วมมากของ ความละเอียด ณ Mode ต่างๆของ Encoder
 - (2.3) Encoder Mode เป็นการตั้งค่า Mode ของการอ่านค่า Encoder มีตั้งแต่ 1x ถึง 4x
- (3) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink ในการอ่านค่าจาก Encoder ทั้งแบบ QEI และ Polling method
 - (3.1) สำหรับ QEI ค่าดิบที่ได้ไม่สามารถนำมาประมวลผลได้โดยตรง ต้องผ่านขั้นตอนการ unwrap ก่อน ซึ่งสามารถเขียนโค้ด MATLAB Simulink เพื่อทำการ unwrap ได้ดังนี้

```
% Position calculation
if diff < -57344/2
    pos = pos + (signal + (57345 - pre_signal));

elseif diff > 57344/2
    pos = pos - (pre_signal + (57345 - signal));
else
    pos = pos + diff;
end
```

รูปแสดงโปรแกรมการคำนวณ Position Calculation

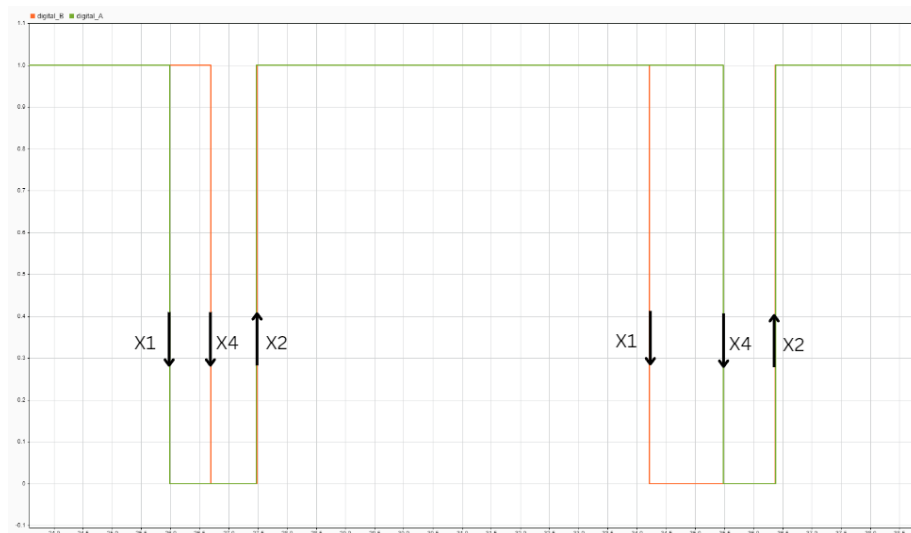
โดยเลข 57,344 มีที่มาจากค่า Counter Period,

จำนวน Pulse ที่ถูกอ่านได้จะถูกเก็บไว้ใน pos,

signal คือค่าสัญญาณจาก QEI

และ pre_signal เป็นค่าสัญญาณก่อนหน้านี้ 0.01 วินาที จาก QEI

(3.2) สำหรับ Polling Method นั้นจะถูกเขียนแบ่งตาม Mode ได้ดังนี้



รูปแสดง Mode ของ Polling Method

(3.2.1) X1 จะตรวจสอบขอบขาขึ้นของสัญญาณเส้นใดเส้นหนึ่ง

(3.2.2) X2 จะตรวจสอบทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณเส้นใดเส้นหนึ่ง

(3.2.3.) X4 จะตรวจสอบทั้งขอบขาขึ้นและขอบขาลงของสัญญาณทั้งสองเส้น

(4) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink ในการคำนวณค่าความเร็ว ตำแหน่ง และ โปรแกรมการเซตค่าเริ่มต้น

(4.1) การเขียนโปรแกรมอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม (radian) นั้นจะเขียนได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{AngularPosition} = \text{Pulse} \times \frac{2\pi}{\text{Resolution}}$$

เมื่อ **AngularPosition** คือ ตำแหน่งเชิงมุม (radian),

Pulse คือ จำนวนที่ Encoder หมุนไปหนึ่งช่วงหรือขั้น (Pulse) และ

Resolution คือ จำนวน Pulse ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบ

- (4.2) การเขียนโปรแกรมอ่านค่าความเร็วเชิงมุม (radian/sec) นั้นจะสามารถเขียนได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\omega = \left(\left(\frac{\Delta \text{Pulse}}{T_{\text{sampling}}} \right) \div \text{Resolution} \right) \times 2\pi$$

เมื่อ ΔPulse	คือ จำนวน Pulse ที่นับได้ในช่วงเวลาหนึ่ง	(Pulse),
T_{sampling}	คือ ช่วงเวลาในการเก็บค่าข้อมูล	(วินาที) และ
Resolution	คือ จำนวน Pulse ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบ	(PPR)

- (4.3) การเซตค่าเริ่มต้นของ Encoder นั้น สามารถเขียนโปรแกรมได้ โดยการเซตค่า Pulse ที่ถูกเก็บไว้ทั้งหมดให้เป็น 0 ทั้งค่าก่อนหน้าและค่าปัจจุบัน

```
% Homing
if home == 1
    pos = 0;
    array_pos = zeros(1,10);
end
```

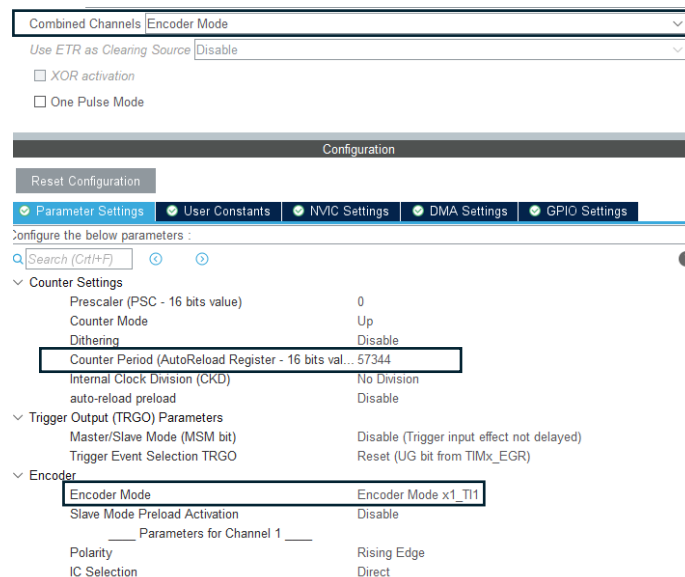
รูปแสดงโปรแกรมตั้งค่าเริ่มต้นของ Encoder

2.8 ผลการทดลอง

จากสมมุติฐานจะสามารถสร้างการทดลองย่อยได้ทั้งหมด 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 คือการทดลองการอ่านค่า Encoder ด้วย QEI และสามารถที่จะคำนวณหาตำแหน่งเชิงมุม และความเร็วเชิงมุมของ Encoder ได้ การทดลองที่ 2 คือการทดลองการอ่านค่า Encoder ด้วย Polling method และสามารถที่จะคำนวณหาตำแหน่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมของ Encoder การทดลองที่ 3 คือการทดลองการเขียนโปรแกรมเซตค่าเริ่มต้นให้กับ Encoder ซึ่ง 2 การทดลองแรกจะต้องทำการทดลองทั้งกับ AMT103-V และ BOURNS PEC11R-4220F-N0024

2.8.1 ผลการทดลองที่ 1

การทดลองการอ่านค่า Encoder ด้วย QEI นั้นจะต้องทำการตั้งค่าใน CubeMX ก่อนโดยมีการตั้งค่าดังต่อไปนี้



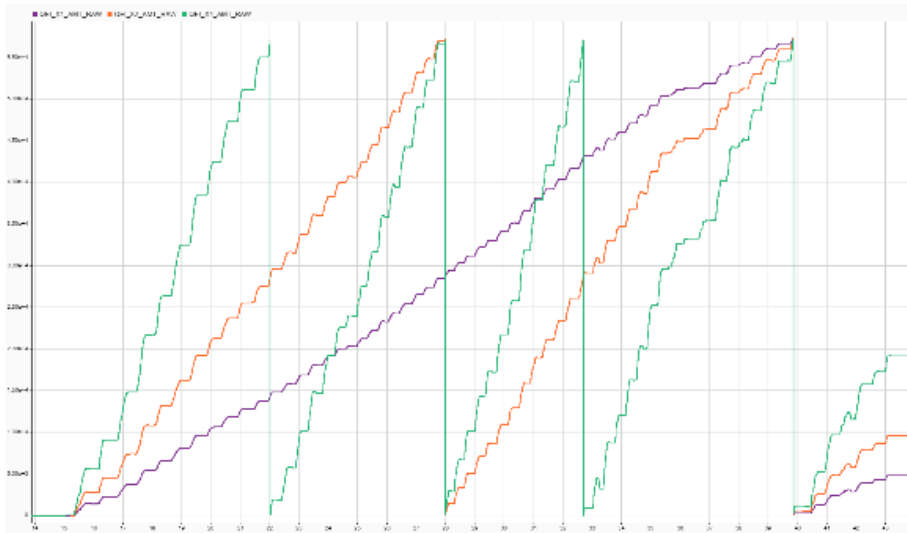
รูปแสดงการตั้งค่าใน CubeMX

Combined Channels หมายถึง การเปิดใช้งาน Timer ของ Nucleo G4 ในโหมดที่ใช้สำหรับการอ่านค่า Encoder โดยใช้ QEI (Quadrature Encoder Interface)

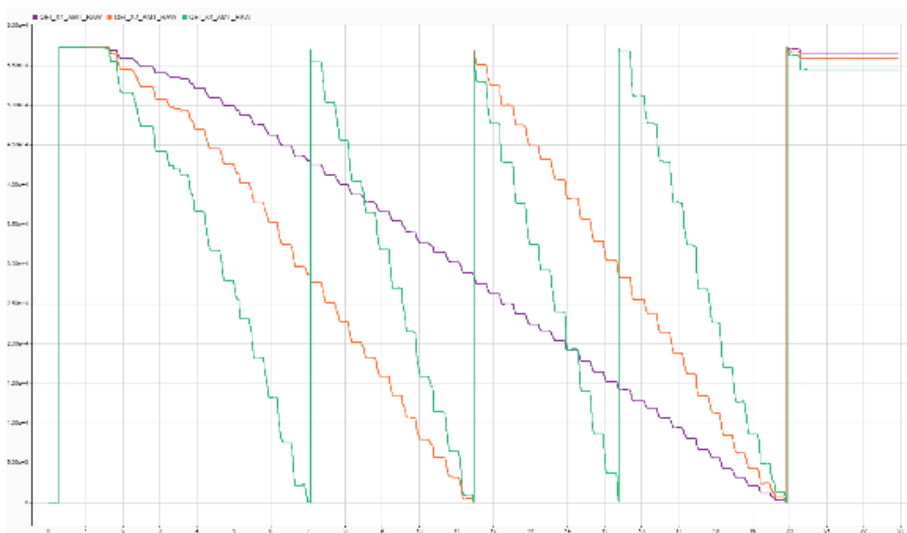
Counter Period หมายถึง การตั้งค่าขอบบนของ QEI โดยเมื่อค่าของ QEI นับถึงค่าที่กำหนด (ตามจำนวนบิตที่ระบุไว้ใน Counter Period) จะกลับไปเริ่มที่ 0 ใหม่ (ตั้งค่าตามห.ร.ม.ของ resolution ของ Encoder ทั้งสาม Mode)

Encoder Mode หมายถึง การตั้งค่าโหมดการอ่าน Encoder ว่าจะเลือกแบบ X1, X2, หรือ X4 ซึ่งขึ้นอยู่กับสัญญาณที่ใช้ในการอ่าน

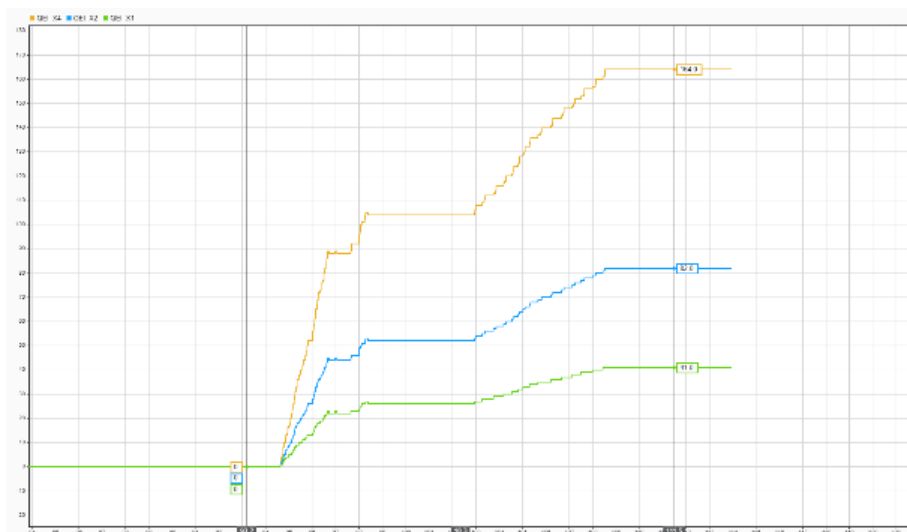
หลังจากทำการตั้งค่าเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการอ่านค่าดิบที่ได้จาก QEI ซึ่งมีค่าดิบเป็นไปดังนี้



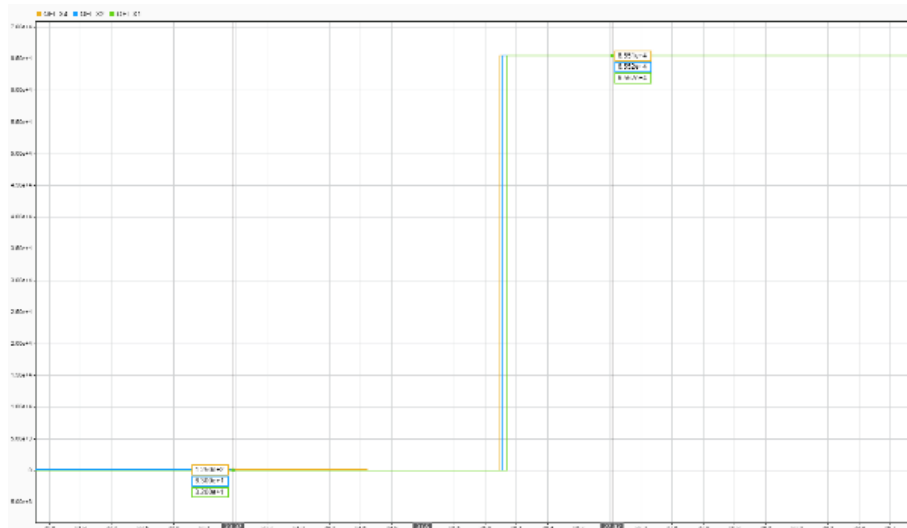
รูปแสดงผลการอ่านค่าดิบของ AMT103 ที่ได้จาก QEI ที่หมุนทางบวก



รูปแสดงผลการอ่านค่าดิบของ AMT103 ที่ได้จาก QEI ที่หมุนทางบวก



รูปแสดงผลการอ่านค่าดิบของ PEC11R ที่ได้จาก QEI ที่หมุนทางบวก



รูปแสดงผลการอ่านค่าดิบของ PEC11R ที่ได้จาก QEI ที่หมุนทางลบ

แต่เพียงค่าดิบนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้ได้เพราะค่าเป็นค่าแบบ wrap around ต้องทำการ Unwrap เสียก่อนโดยการ Unwrap นั้นจะสามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมดังนี้

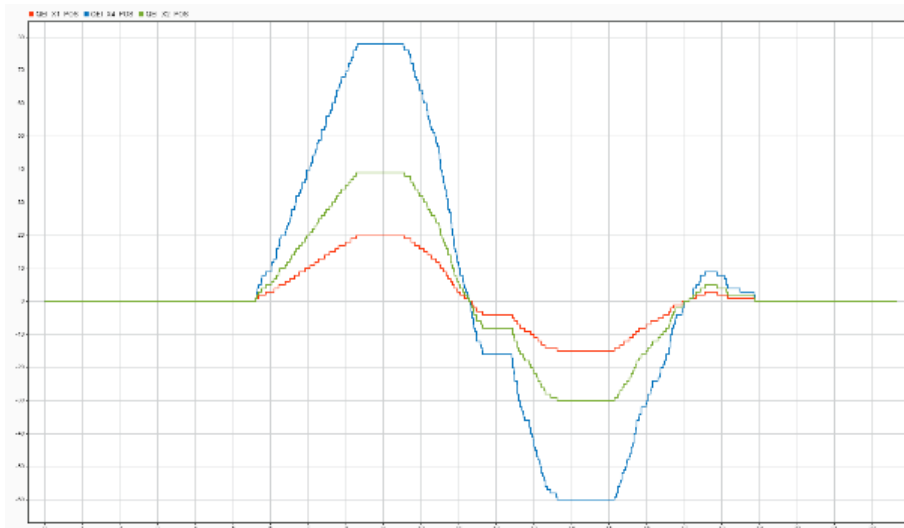
```
% Position calculation
if diff < -57344/2
    pos = pos + (signal + (57345 - pre_signal));

elseif diff > 57344/2
    pos = pos - (pre_signal + (57345 - signal));
else
    pos = pos + diff;
end
```

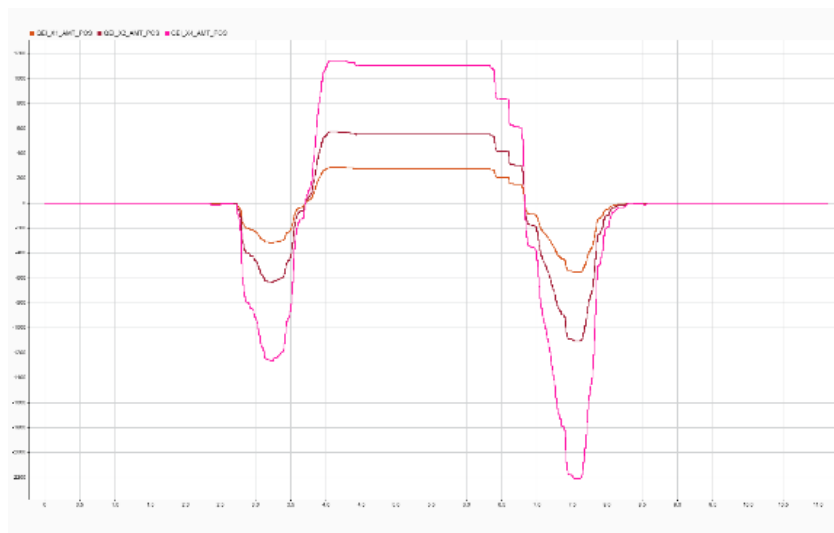
รูปแสดงโปรแกรมUnwrap

โดยที่เลข 57,433 คือเลขของ counter period,
ค่า pos คือค่าของ pulse หลังผ่านการ unwarp,
signal คือค่าสัญญาณดิบจาก QEI ณ ปัจจุบัน และ
pos_signal คือค่าสัญญาณ ณ loop การทำงานก่อนหน้านี้

ซึ่งข้อมูลหลังจากผ่านการ unwrap แล้วจะมีลักษณะดังนี้



รูปแสดงผลการอ่านPEC11Rค่าดิบที่ได้จาก QEI หลังผ่านการ Unwrap



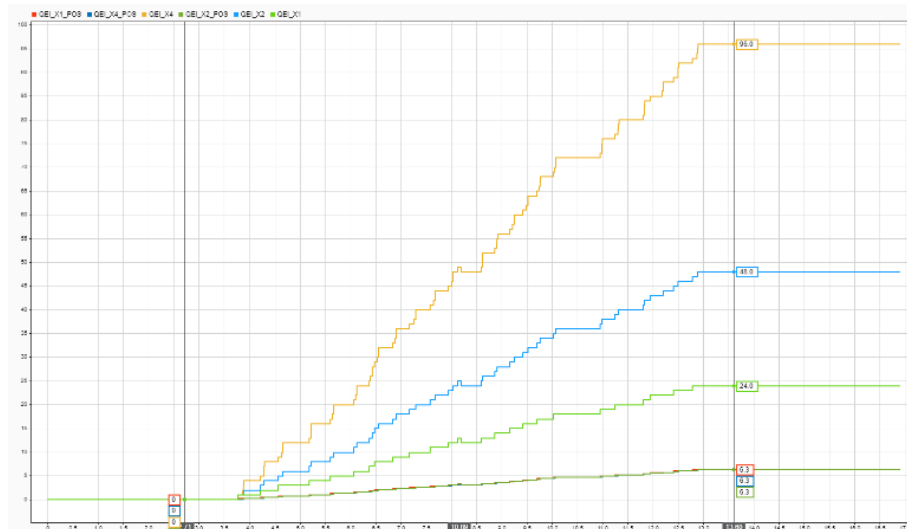
รูปแสดงผลการอ่านค่าAMT103ดิบที่ได้จาก QEI หลังผ่านการ Unwrap

หลังจากผ่านการ unwrap จึงสามารถนำจำนวน Pulse มาคำนวณเป็นตำแหน่งเชิงมุมได้จากสมการนี้

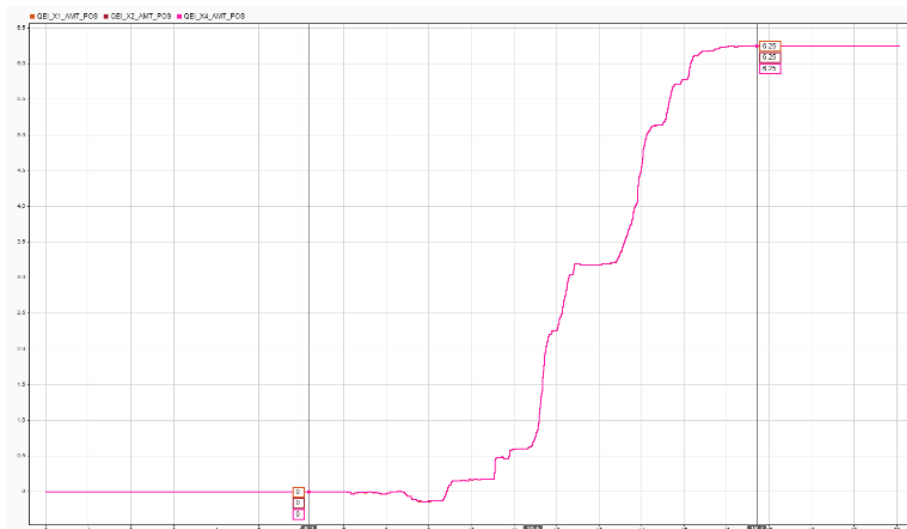
$$\text{AngularPosition} = \frac{\text{Pulse} \times 2\pi}{\text{Resolution}}$$

เมื่อ AngularPosition	คือ ตำแหน่งเชิงมุม	(Radians)
Pulse	คือ จำนวน Pulse ที่ตรวจวัดได้	(Pulse)
Resolution	คือ จำนวน Pulse ทั้งหมดต่อการหมุน 1 รอบ	(Pulse)

โดยในการวัดค่า Angular position ได้อย่างแม่นยำนั้น ทางคณะผู้จัดทำจึงได้ออกแบบการทดลอง โดยการหมุน Encoder ไปเป็นจำนวนหนึ่งรอบ หากค่าถูกคำนวณออกมาถูกต้อง จะทำให้มีค่า Angular Position อยู่ที่ 2π หรือมีค่าเท่ากับ 6.28



รูปแสดงค่าตำแหน่งหลังผ่านการคำนวณและการหมุนจำนวนหนึ่งรอบของ PEC11R



รูปแสดงค่าตำแหน่งหลังผ่านการคำนวณและการหมุนจำนวนหนึ่งรอบของ AMT103

- (6) จากการทดลองพบว่าค่าตำแหน่งของ Encoder หลังผ่านการหมุนไปหนึ่งรอบนั้นมีค่าเป็น 6.3 rad สำหรับ BOURNS PEC11R-4220F-N0024 และ 6.25 rad สำหรับ AMT103 ซึ่งทำให้เห็นว่าการนำค่าสัญญาณจาก QEI ที่ Unwrap แล้วมาคำนวณเป็นตำแหน่งเชิงมุมสามารถทำได้อย่างแม่นยำ
- (7) นอกจากจะสามารถคำนวณตำแหน่งเชิงมุมแล้ว การทราบ Pulse ณ ตำแหน่งสามารถทำให้เราคำนวณความเร็วเชิงมุมของ Encoder ได้ ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{AngularVelocity} = \left(\frac{\Delta \text{pulse}}{T} \times 2\pi \right) \div \text{Resolution}$$

เมื่อ AngularPosition คือ ตำแหน่งเชิงมุม (Radians)

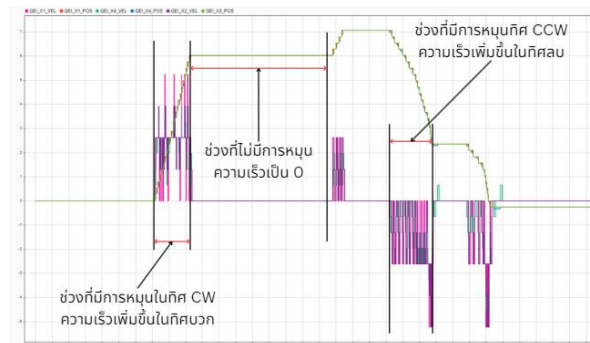
Pulse คือ จำนวน Pulse ที่ตรวจวัดได้ (Pulse)

Resolution คือ จำนวน Pulse ทั้งหมดต่อการหมุน 1 รอบ (Pulse)

ซึ่งจะสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเมื่อเกิดความเร็วจากการหมุนได้ดังนี้



รูปแสดงค่าความเร็วหลังผ่านการคำนวณของ AMT103

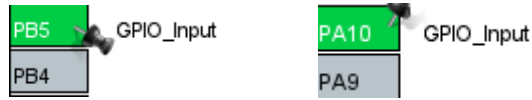


รูปแสดงค่าความเร็วหลังผ่านการคำนวณของ PEC11R

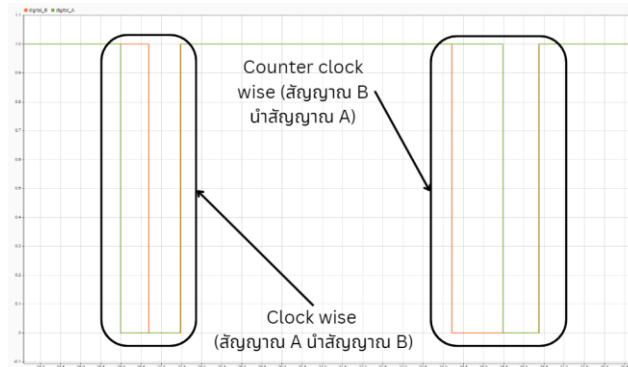
จากการทดลองทำให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อเกิดการหมุน หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ค่าความเร็วเชิงมุมจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยยะสำคัญ

2.8.2 ผลการทดลองที่ 2

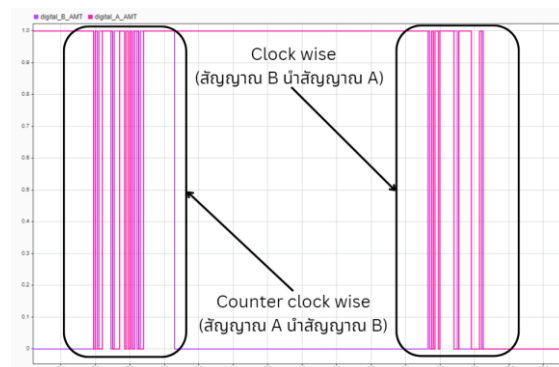
การอ่านค่า encoder แบบ Polling method นั้นไม่ต้องการ Timer การตั้งค่าจึงมีเพียงการเปิด GPIO ที่จะใช้สำหรับการอ่านค่าเท่านั้น โดยการเปลี่ยน Pin นั้นๆเป็น GPIO_Input



หลังจากที่ทำการตั้งค่า GPIO เรียบร้อยแล้วจะสามารถวัดค่าดิบได้โดยการอ่าน Digital Read ที่ขา A,B ได้โดยตรงโดยจะมีค่าดิบดังนี้

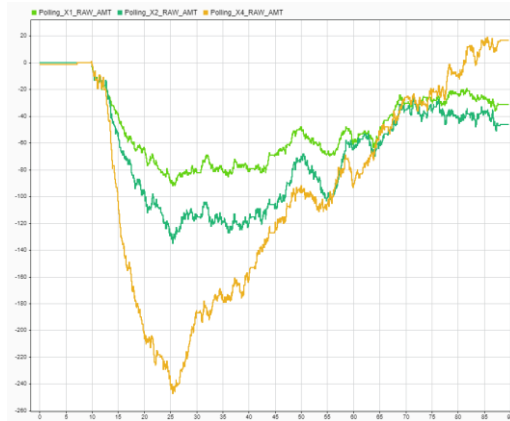


รูปกราฟสัญญาณ A,B เมื่อเกิดการหมุนทวนเข็ม และตามเข็ม ของ PEC11R

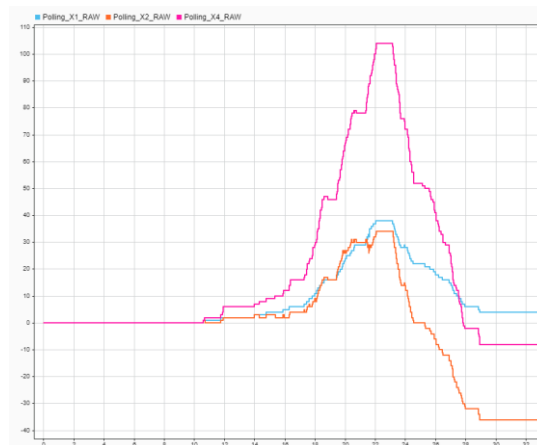


รูปกราฟสัญญาณ A,B เมื่อเกิดการหมุนทวนเข็ม และตามเข็ม ของ AMT103

แต่เพียงสัญญาณดิบที่ได้นั้นไม่เพียงพอต่อการนำความคำนวณอะไรแต่อย่างใด ต้องถูกนำมานับ Pulse ก่อน โดยการนับ Pulse นั้นมีทั้งหมด 3 แบบ ตามที่ได้กล่าวไปใน ขั้นตอนการทดลองที่ 3.2 ซึ่งจะให้ค่าดังต่อไปนี้

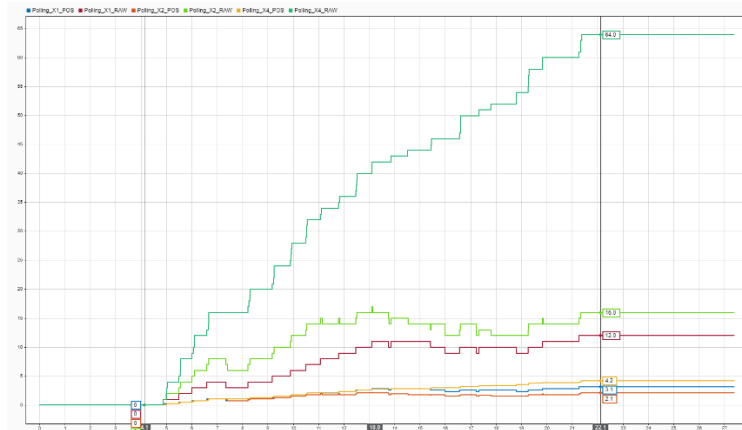


รูปกราฟแสดงจำนวน Pulse ที่เกิดขึ้นของ AMT103 จากการนับด้วย Polling method

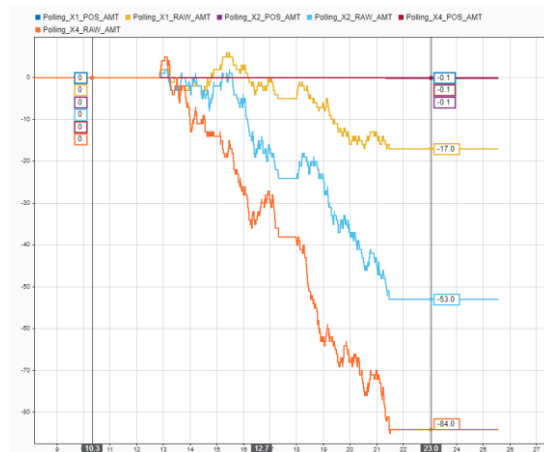


รูปกราฟแสดงจำนวน Pulse ที่เกิดขึ้นของ PEC11R จากการนับด้วย Polling method

หากสังเกตผลการทดลองจะพบว่าค่าจำนวน pulse นั้นค่อนข้างคลาดเคลื่อนซึ่งการคลาดเคลื่อนของจำนวน pulse ที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อข้อมูลอื่นๆ อาทิ ความเร็วเชิงมุม และ ตำแหน่งเชิงมุม จากการทดลองอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมหลังจากที่หมุนครบหนึ่งรอบจากสมการเชิงมุม $AngularPosition = \frac{Pulse \times 2\pi}{Resolution}$ ได้ค่าดังต่อไปนี้

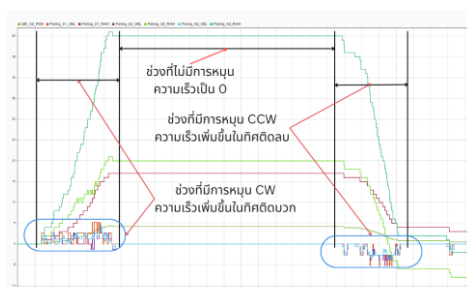


รูปแสดงตำแหน่งเชิงมุมของ PEC11R ที่ถูกคำนวณจาก pulse ที่ได้จาก polling method

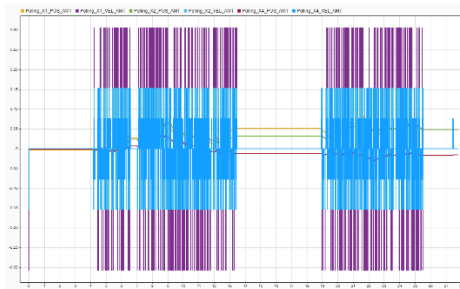


รูปแสดงตำแหน่งเชิงมุมของ AMT103 ที่ถูกคำนวณจาก pulse ที่ได้จาก polling method

จากการทดลองคาดว่าตำแหน่งหลังจากผ่านไป 1 รอบควรมีค่าตำแหน่งเชิงมุมที่ 6.28 rad แต่หลังจากที่ค่า pulse ที่เขียนจากการอ่านค่าด้วย Polling method ทำให้ค่าตำแหน่งเปลี่ยนไปด้วย จนแทบไม่เหลือโครงค่าเดิม หลังจากที่เราทราบแล้วว่าค่าตำแหน่งคลาดเคลื่อน ก็ยังเหลือการวัดความเร็วเชิงมุมว่ายังสามารถตอบสนองในการวัดค่า Encoder แบบ Polling method ใหม่ ซึ่งผลเป็นไปดังนี้



รูปแสดงค่าความเร็วหลังผ่านการคำนวณของ AMT103 จาก pulse ที่ได้จาก Polling method



รูปแสดงค่าความเร็วหลังผ่านการคำนวณของ PEC11R จาก pulse ที่ได้จาก Polling method

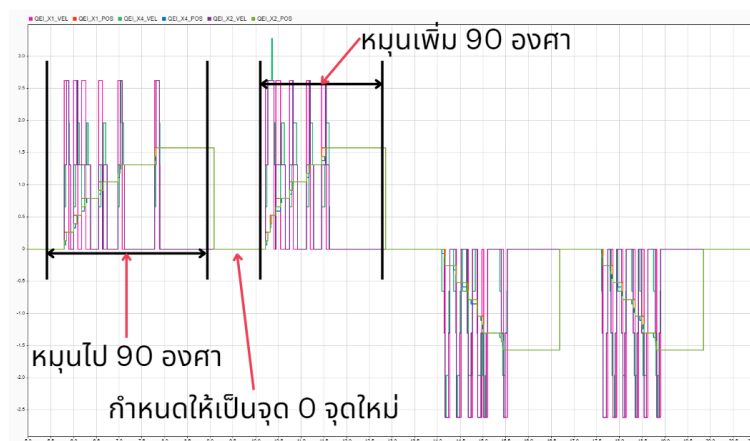
จากการทดลองทำให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วยังสามารถที่จะตอบสนองได้แต่อาจจะไม่ถูกต้องตามหลักการคำนวณ

2.8.3 ผลการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 3 เป็นการทดสอบโปรแกรมเซตค่า 0 ให้กับ encoder หรือ Homing configuration ในการทดสอบโปรแกรมนั้นจะสามารถทำได้โดยหมุน 90 องศา จากนั้นกด Homing configuration แล้วจึงทำการหมุนเพิ่มอีก 90 องศา หาก Home configuration ทำได้อย่างถูกต้อง ค่าแสดงตำแหน่งเชิงมุมของ encoder ควรจะมีค่าเท่ากับช่วงก่อน Home configuration และไม่เกิดความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงค่ากลับลงมา 0

```
% Homing
if home == 1
    pos = 0;
    array_pos = zeros(1,10);
end
```

รูปแสดงค่าความเร็วหลังผ่านการคำนวณของ AMT103



รูปกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งเมื่อถูกตั้ง Home configuration

จากการทดลองพบว่า ตำแหน่งหลังจากกด Home configuration ได้ย้ายไปที่ 0 และไม่เกิดการความเร็วจากการทำ Homing configuration และหลังจากที่ทำการหมุนค่าเพิ่มขึ้น 90 องศาทำให้ตำแหน่งกลับไปอยู่ ณ ตำแหน่งเดิมก่อนการ Homing configuration ถือว่าการทดสอบเป็นอันสำเร็จ

2.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

2.9.1 สรุปผล

การอ่านค่าของ Encoder ด้วย Polling method นั้นมีความแม่นยำน้อยกว่าการอ่านค่าด้วย QEI เพราะว่าการตรวจสอบสัญญาณขอขาตามจุดต่างๆด้วย Sampling Frequency ที่ 100 Hz นั้นไม่เพียงพอ ทำให้ข้ามการอ่านข้อมูลไปในหลายครั้ง ซึ่งส่งผลต่อจำนวน Pulse ที่วัดได้ จึงก่อให้เกิดการคลาดเคลื่อน และส่งผลต่อค่าอื่นๆ ทั้งความเร็วเชิงมุม และ ตำแหน่งเชิงมุม ต่างจากการอ่านค่า Encoder ด้วย QEI ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำ แต่ข้อมูลของ QEI นั้นต้องนำมาผ่านการ Unwarp ถึงจะสามารถนำจำนวน Pulse ที่ได้ไปคำนวณได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ

2.9.2 อภิปรายผล

จากการทดลองทำให้ได้เห็นข้อดีของการอ่านค่า Encoder แบบ QEI ที่มีความรวดเร็ว สะดวก และแม่นยำ สามารถนำค่า pulse ที่ได้ไปขยายผล คำนวณหาตำแหน่งเชิงมุม ไปจนถึง ความเร็วเชิงมุมได้อย่างแม่นยำ ถึงอย่างนั้นก็ตามการอ่านค่า Encoder ด้วย QEI จำเป็นต้องมี Timer ที่คอยอ่านค่า Encoder ซึ่ง Timer เป็นทรัพยากรที่สำคัญอย่างหนึ่งภายใน Microcontroller ทำให้ใน Microcontroller จำนวน 1 ตัว อาจจะไม่สามารถอ่านค่าของ Encoder ได้จำนวนหลายตัวมากนักหากใช้ QEI ในการอ่านค่า Encoder ในทางกลับกัน Polling method นั้นไม่จำเป็นต้องใช้ Timer สามารถอ่านค่าจาก GPIO ได้เลยจริงๆ แต่การทำ Polling method นั้นคือการตรวจสอบสถานะของ สัญญาณขา A และ B โดยตรงตามความถี่ที่ Microcontroller ทำงานได้ โดยในหลายๆครั้ง Microcontroller ไม่สามารถที่จะอ่านข้อมูลของขาได้ครบถ้วน ทำให้ค่า pulse ที่นับได้ ไม่ตรงกับค่าความเป็นจริง ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณตำแหน่งเชิงมุม และความเร็วเชิงมุม ทำให้จากการทดลอง เราจึงพบว่าการอ่านข้อมูลด้วย Polling method นั้นไม่ตรงกับค่าที่ควรจะเป็น

การตั้งค่า home configuration นั้นสามารถทำได้โดยการตั้งค่าทุกค่าให้เป็น 0 ทันที จะทำให้ข้อมูลทั้งหมดถูกย้อนกลับเป็น 0 และ ไม่ส่งผลกระทบต่อความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงค่า กระทั่งนั้น

2.9.3 ข้อเสนอแนะ

ชุดทดลองควรออกแบบมาให้ง่ายต่อการใช้งานมากกว่านี้ ควรมี Bread board เพื่อให้ง่ายต่อการขนานสายสัญญาณ ตัว AMT103 ควรมีหัวลูกศรหรือที่จับเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตค่าและการทดลอง

2.10 เอกสารอ้างอิง

AMT103-V Data Sheet

P E C 1 1 R - 4 2 2 0 F - N 0 0 2 4 D a t a S h e e t

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

<https://forum.allaboutcircuits.com/threads/quadrature-encoders.127588/>

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70208A.pdf>

<https://www.totalphase.com/blog/2023/10/polling-interrupts-exploring-differences->

[a p p l i c a t i o n s /](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/)

https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/

[https://automationdirectinc.my.site.com/s/question/0D53u00002HwM2QCAV/how-to-](https://automationdirectinc.my.site.com/s/question/0D53u00002HwM2QCAV/how-to-process-absolute-encoder-wrap-around)

[process-absolute-encoder-wrap-around](https://automationdirectinc.my.site.com/s/question/0D53u00002HwM2QCAV/how-to-process-absolute-encoder-wrap-around)

https://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt_trigger

https://www.ti.com/lit/ab/scea046a/scea046a.pdf?ts=1730364583999&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

https://www.ti.com/lit/ab/slaa795/slaa795.pdf?ts=1730368541012&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

บทที่ 3 Magnetic Sensor

3.1 วัตถุประสงค์

- 3.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Magnetic Sensor, Magnetic Flux Direction, Magnetic Flux Density, Sensitivity Linearity ของ Magnetic Sensor และ Magnetic Field Shielding
- 3.1.2 เพื่อศึกษาลักษณะ Output ของ Magnetic Sensor (Magnetic Response)
- 3.1.3 เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Magnetic Field Shielding และ Magnetic Flux Density
- 3.1.4 เพื่อฝึกฝนการประยุกต์ MATLAB และ Simulink ในการสั่งการหรือรับค่าร่วมกับบอร์ด Nucleo STM32G474RE โดยใช้สัญญาณจาก Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor เป็น Input และแสดงสัญญาณ Output จากการ Log สัญญาณเป็นกราฟจาก Data Inspector

3.2 สมมติฐาน

- 3.2.1 ระยะทางที่เซ็นเซอร์อยู่ห่างกับแม่เหล็กส่งผลต่อแรงดันขาออกและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
- 3.2.2 เมื่อติดตั้งแผ่นกัน (Shield) จะส่งผลให้แรงดันขาออกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีแผ่นกันระหว่างแม่เหล็กและเซ็นเซอร์ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ Magnetic Field Shield
- 3.2.3 ค่าแรงดันที่เกิดจากแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กขั้วใต้ แม้จะมีระยะทางที่เท่ากัน แต่จะมีค่าแรงดันที่แตกต่างกัน

3.3 ตัวแปรที่ศึกษา

- ตัวแปรต้น : ระยะทางจากแม่เหล็กถึงเซ็นเซอร์ ณ ขั้วเหนือและขั้วใต้ ขณะที่มีการมีแผ่นกันและไม่มีแผ่นกัน
- ตัวแปรตาม : การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออกและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
- ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่ขา VCC และแรงดันไฟฟ้าที่ขา GND

3.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

3.4.1 เซ็นเซอร์

เซ็นเซอร์ DRV5055 เป็นเซ็นเซอร์ Hall Effect แบบเชิงเส้นที่ตอบสนองตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก

3.4.2 ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก มีผลต่อเซ็นเซอร์ DRV5055 ตาม Datasheet

3.4.3 Magnetic Field Shield

Magnetic Field Shielding คือการป้องกันหรือกั้นสนามแม่เหล็กไม่ให้สนามแม่เหล็กผ่านไปยังบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก โดยการป้องกันนี้มักทำได้โดยการใช้วัสดุที่สามารถดูดซับหรือเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กออกไป เช่น Shield หรือแผ่นกั้นที่ใช้ในการทดลองนี้

3.4.4 ระยะทาง

ระยะทางจากแม่เหล็กถึงเซ็นเซอร์ DV5055 ตามที่ MagneticXplorer ทำเส้นวัดหน่วยไว้ โดยที่ค่าที่แม่เหล็กอยู่ใกล้เซ็นเซอร์มากที่สุดคือ 1 เซนติเมตร และค่าที่แม่เหล็กอยู่ไกลเซ็นเซอร์มากที่สุดคือ 4 เซนติเมตร

3.4.5 Sensitivity Linearity

ความสามารถของเซ็นเซอร์แม่เหล็กในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กอย่างเป็นสัดส่วนหรือเชิงเส้น

3.4.6 ทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Direction)

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็กจากขั้วเหนือ (North Pole) ไปยัง ขั้วใต้ (South Pole) ของแม่เหล็ก

3.4.7 Shield

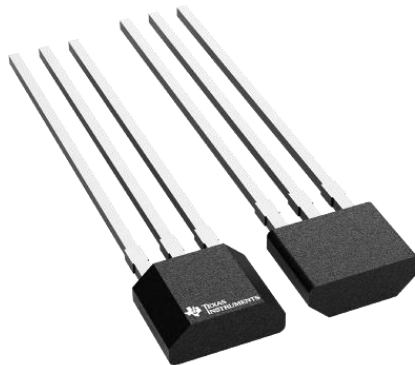
แผ่นกั้นสำหรับกั้นที่มีคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก

3.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

Hall Effect Sensors เป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้หลักการของ Hall Effect ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า

3.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.6.1 DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor



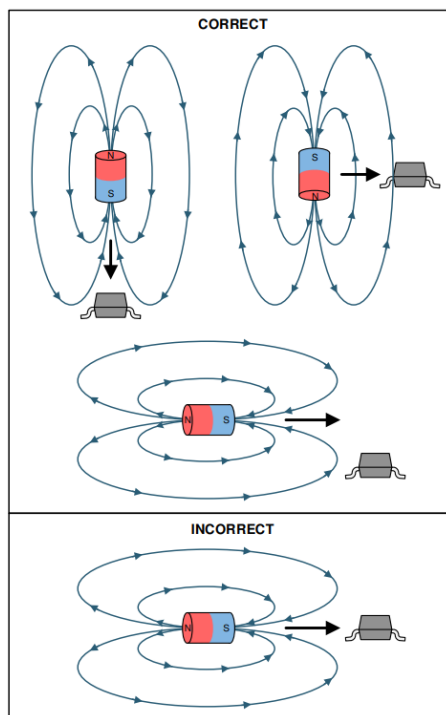
รูป DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor

แหล่งที่มา : <https://www.ti.com/product/DRV5055/part-details/DRV5055A4OLPG>

DRV5055A2/Z2 เป็นเซ็นเซอร์ Hall Effect แบบเชิงเส้นที่ตอบสนองตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) และจะส่งแรงดันไฟฟ้าขาออกในรูปแบบ Analog ซึ่งมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเนื่องจากมี response time ต่ำ (อยู่ในระดับไมโครวินาที) โดยเซ็นเซอร์จะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวเซ็นเซอร์ หากทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กไม่ตั้งฉากกับเซ็นเซอร์ ความแม่นยำในการตรวจจับอาจลดลง

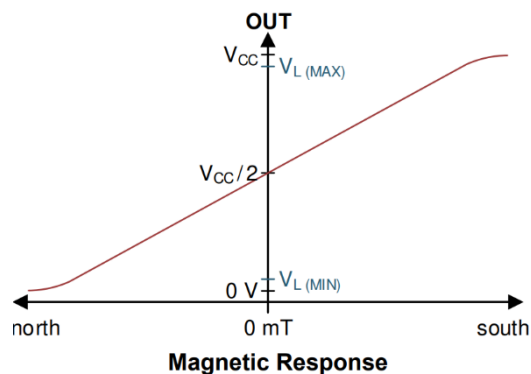
ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ต้องสนใจดังนี้

(1) เราจำเป็นต้องสนใจทิศทางการวาง DRV5055 กับแม่เหล็กที่สนใจอย่างมาก เนื่องจากหากวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม อาจจะทำให้ไม่สามารถจับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องได้



รูปตัวอย่างการใช้เซ็นเซอร์ DRV5055

(2) นอกจากค่าแรงดันไฟฟ้าของ DRV5055 จะขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กแล้ว ยังมีปัจจัยอีกอย่างคือ การใช้แม่เหล็กขั้วเหนือหรือแม่เหล็กขั้วใต้ในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าง่ายภาพ



รูปการแสดงการตอบสนองเมื่อใช้แม่เหล็กขั้วเหนือและใต้ในการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

(3) ค่า Sensitivity ของ DRV5055A2/Z2 เมื่อแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจรมีค่าเท่ากับ 3.3V อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คือ 30 mV/mT

(4) การตอบสนองของแม่เหล็ก (Magnetic Response)

จากDatasheet ได้กำหนดการตอบสนองของแม่เหล็ก (Magnetic Response) ตามสมการต่อไปนี้

$$V_{out} = V_Q + B \times \left(\text{Sensitivity} \times (1 + S_{TC} \times (T_A - 25)) \right)$$

เมื่อ	V_{out}	คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก	(V),
	V_Q	คือ ครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจร หรือ 1.65V	(V),
	B	คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	(T),
	Sensitivity	คือ 30 mV/mT ตามค่า Datasheet	(mV/mT),
	S_{TC}	คือ 0%/°C ตามค่า Datasheet	(%/°C) และ
	T_A	คือ ค่าอุณหภูมิของห้อง	(°C)

สามารถสรุปได้ว่า

$$B = \frac{(V_{out} + 1.65)}{30 \times 10^{-3}}$$

เมื่อ	B	คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	(T) และ
	V_{out}	คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก	(V)

3.6.2 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

ปริมาณของเส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กบ่งบอกถึงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งนั้นๆ มีหน่วยเป็นเทสลา (Tesla – T) หรือ (Wb/m²) ซึ่ง DRV5055 จะนำข้อมูลส่วนนี้มาประมวลแรงดันส่งออกตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้

3.6.3 Sensitivity Linearity

ความสามารถของเซ็นเซอร์แม่เหล็กในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กอย่างเป็นสัดส่วนหรือเชิงเส้น กล่าวคือ เมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นหรือลดลงในสัดส่วนหนึ่ง ค่าที่เซ็นเซอร์ส่งออก (เช่น แรงดันหรือกระแสไฟฟ้า) ควรจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงในสัดส่วนเดียวกันโดยมีความสอดคล้องกับค่าที่แท้จริง (เป็นข้อมูลเชิงเส้น) ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- (1) ได้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนถึงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กอย่างถูกต้องและแม่นยำ
- (2) ความเป็นเชิงเส้นช่วยลดความซับซ้อน เนื่องจากค่าผลลัพธ์จะสามารถคาดการณ์ได้โดยง่าย
- (3) จะช่วยให้การประมวลผลสัญญาณเป็นไปอย่างราบรื่นและแม่นยำ

3.6.4 ทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Direction)

ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงถึงการเคลื่อนที่ของฟลักซ์แม่เหล็กจากขั้วเหนือ (North Pole) ไปยัง ขั้วใต้ (South Pole) ของแม่เหล็ก สามารถเกิดขึ้นทั้งในและนอกตัวแม่เหล็ก

3.6.5 Magnetic Field Shielding

Magnetic Field Shielding คือการป้องกันหรือกั้นสนามแม่เหล็กไม่ให้สนามแม่เหล็กผ่านไปยังบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก โดยการป้องกันนี้มักทำได้โดยการใช้วัสดุที่สามารถดูดซับหรือเบี่ยงเบนเส้นแรงแม่เหล็กออกไป เช่น Shield หรือแผ่นกั้นที่ใช้ในการทดลองนี้

3.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

เนื่องจากบทที่ 3 มีวัตถุประสงค์การเรียนรู้ที่ต่างกันอยู่ 3 หน่วย จึงต้องมีการประกาศอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการทดลอง เพื่อให้สามารถหาค่าตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง

3.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Magnetic Sensor
- (2) Nucleo STM32G474RE
- (3) MagneticXplorer
- (4) สายจัมเปอร์
- (5) แผ่น Shield

3.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- (1) นำไฟฟ้าแรงดัน 3.3 V และ GND (0 V) มาต่อเข้ากับ DRV5055 ที่ขา 1 และ 3 ตามลำดับ และนำสัญญาณที่ขา 2 ของ DRV5055 มาต่อที่ขา A0 ของบอร์ด Nucleo STM32G474RE
- (2) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่าน ADC (Analog to Digital Converter) ที่อ่านได้จาก Microcontroller มาแปลงเป็นสมการ ซึ่งสมการนี้เกิดจากการเทียบสัญญาณไตรยางค์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและจำนวนบิตที่ Microcontroller ส่งออกมา

$$\frac{3.3}{V} = \frac{4095}{ADC}$$

จะได้สมการสรุปว่า

$$V = (ADC \times \frac{3.3}{4095})$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการหา (V),
ADC คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ Microcontroller ปลอยออกมา (Bit),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
4095 คือ ค่าดิจิทัลสูงสุดที่ Microcontroller สามารถส่งออกได้ (Bit)

- (3) ทำการปรับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์ครึ่งละ 0.5 เซนติเมตร โดยเริ่มตั้งแต่ระยะ 1 เซนติเมตร ถึง 4 เซนติเมตร จากนั้นบันทึกค่าแรงดันที่วัดได้ในแต่ละระยะ
- (4) นำค่าแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกไว้มาสร้างกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB

- (5) เขียนโปรแกรม Simulink เพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกที่อ่านได้จาก ADC (Analog to Digital Converter) ในการแปลงค่าตามสมการการตอบสนองของแม่เหล็ก (Magnetic Response)

$$B = \frac{(V_{out} + 1.65)}{30 \times 10^{-3}}$$

เมื่อ B คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T) และ
 V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก (V)

- (6) นำค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่หาได้มาบันทึกไว้ และสร้างกราฟด้วยโปรแกรม MATLAB
 (7) สลับขั้วแม่เหล็ก และทำขั้นตอนที่ (3)-(6) ใหม่อีกครั้ง

3.8 ผลการทดลอง

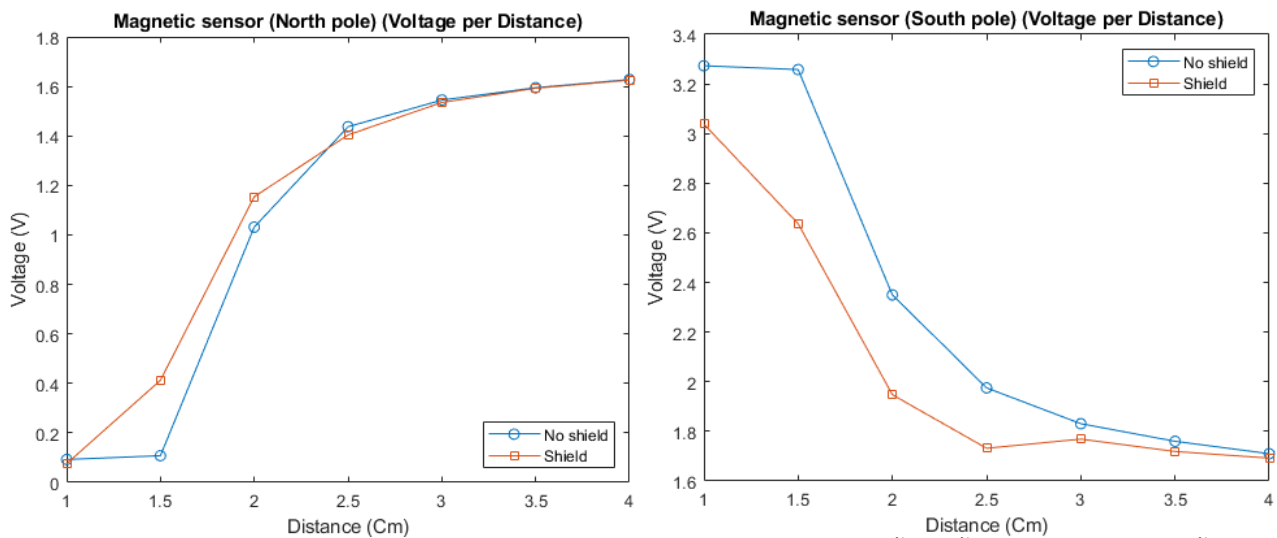
- 3.8.1 ผลการทดลองที่ 1 บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ระยะทางจากแม่เหล็กถึงเซนเซอร์ ณ ขั้วเหนือและขั้วใต้ ขณะที่แม่เหล็กมีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น จะได้

ระยะทาง (เซนติเมตร)	แรงดันที่แม่เหล็กขั้วเหนือ		แรงดันที่แม่เหล็กขั้วใต้	
	มีแผ่นกั้น (V)	ไม่มีแผ่นกั้น (V)	มีแผ่นกั้น (V)	ไม่มีแผ่นกั้น (V)
1	0.0758	0.0927	3.0381	3.2734
1.5	0.4126	0.1080	2.6368	3.2581
2	1.1540	1.0315	1.9478	2.3499
2.5	1.4038	1.4368	1.7318	1.9752
3	1.5352	1.5448	1.7689	1.8309
3.5	1.5924	1.5948	1.7189	1.7600
4	1.6254	1.6278	1.6923	1.7100

ตารางแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระยะทางด้วยแม่เหล็กทั้งสองขั้ว ขณะที่แม่เหล็กมีแผ่นกั้นและไม่มีแผ่นกั้น

ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ในรูปแบบกราฟ โดยใช้สีที่แตกต่างกันเพื่อระบุเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลแรงดันที่วัดได้เมื่อมีแผ่นกั้นจะแสดงด้วยเส้นกราฟสีแดง และข้อมูลแรงดันเมื่อไม่มีแผ่นกั้นจะแสดงด้วยเส้นกราฟสีน้ำเงิน

ผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า แม้จะอยู่ในระยะทางที่เท่ากัน แต่การใช้แม่เหล็กที่มีขั้วต่างกัน ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกได้มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้ยังแสดงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย



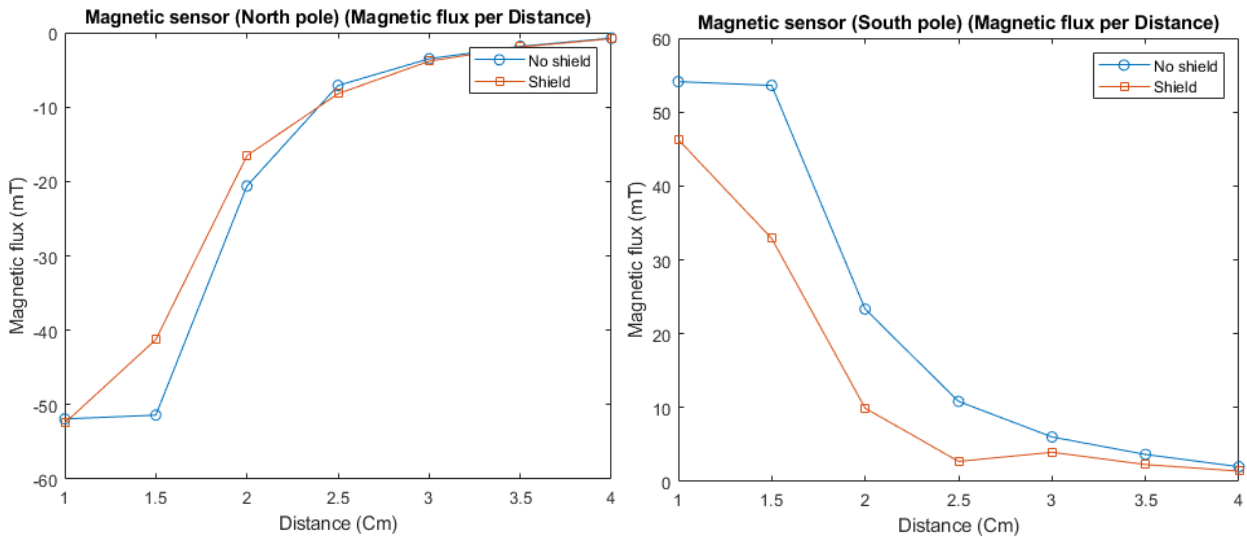
รูปแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเทียบกับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็ก ด้วยแม่เหล็กทั้งสองขั้ว ขณะที่ไม่มีและไม่มีแผ่นกัน

3.8.2 ผลการทดลองที่ 2 บันทึกค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไป ที่ระยะทางจากแม่เหล็กถึง เซ็นเซอร์ ณ ขั้วเหนือและขั้วใต้ ขณะที่ไม่มีแผ่นกันและไม่มีแผ่นกัน จะได้

ระยะทาง (เซนติเมตร)	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่แม่เหล็กขั้วเหนือ		ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่แม่เหล็กขั้วใต้	
	มีแผ่นกัน (mT)	ไม่มีแผ่นกัน (mT)	มีแผ่นกัน (mT)	ไม่มีแผ่นกัน (mT)
1	-52.4750	-51.9109	46.2691	54.1127
1.5	-41.2467	-51.4005	32.8919	53.6024
2	-16.5339	-20.6169	9.9250	23.3291
2.5	-8.2067	-7.1054	2.7261	10.8383
3	-3.8282	-3.5059	3.9617	6.0301
3.5	-1.9210	-1.8404	2.2963	3.6662
4	-0.8197	-0.7391	1.4098	2.0008

ตารางแสดงค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับระยะทางด้วยแม่เหล็กทั้งสองขั้ว ขณะที่ไม่มีและไม่มีแผ่นกัน

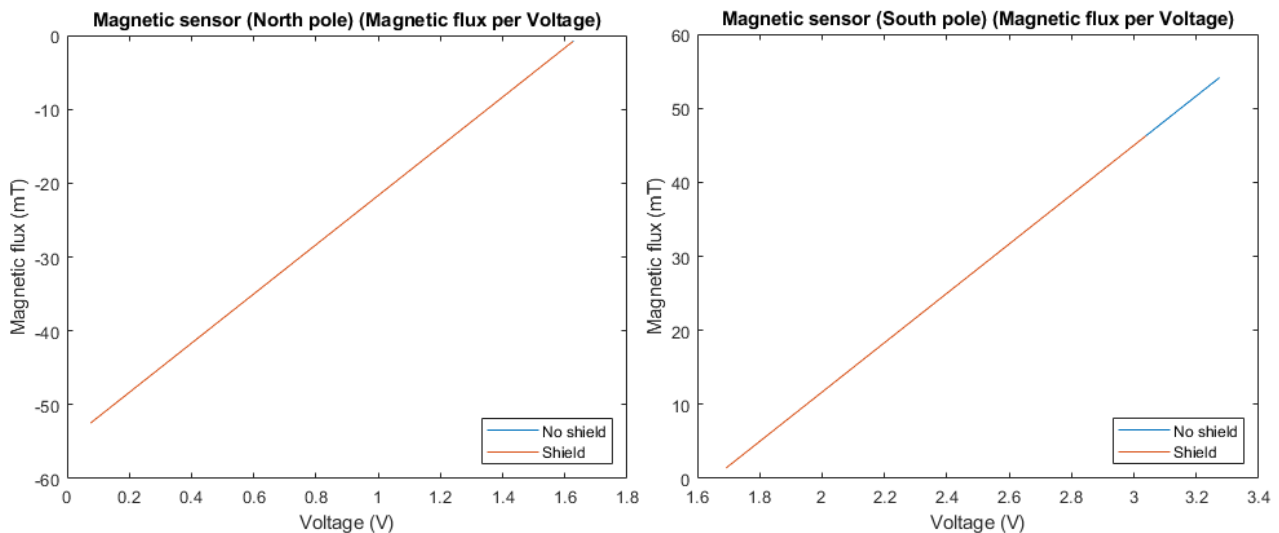
ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ในรูปแบบกราฟ โดยใช้สีที่แตกต่างกันเพื่อระบุเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อมูลความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่วัดได้เมื่อมีแผ่นกันจะแสดงด้วยเส้นกราฟสีแดง และข้อมูลความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่วัดได้เมื่อไม่มีแผ่นกันจะแสดงด้วยเส้นกราฟสีน้ำเงิน



รูปแสดงความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเทียบกับระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์และแม่เหล็ก ด้วยแม่เหล็กทั้งสองขั้ว ขณะที่ไม่มีและไม่มีแผ่นกั้น

3.8.3 ผลการทดลองที่ 3

นำข้อมูลที่บันทึกมาวิเคราะห์อีกครั้ง จะทราบว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันดังนี้

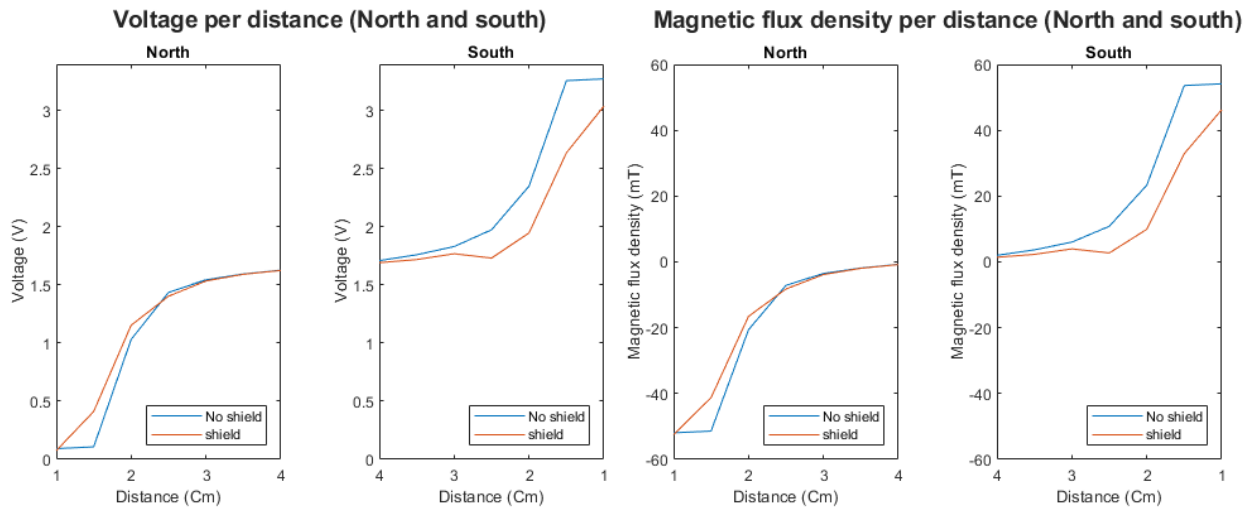


รูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ณ แม่เหล็กทั้งสองขั้ว

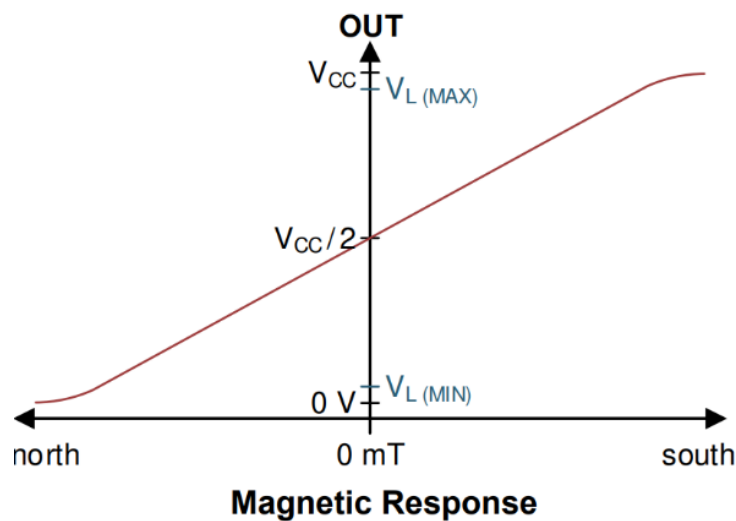
กราฟแสดงให้เห็นว่า เส้นกราฟข้อมูลมีแผ่นกั้นและข้อมูลไม่มีแผ่นกั้นซ้อนทับกันพอดี จึงสรุปได้ว่าการคำนวณค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) ใช้สูตรคำนวณที่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้า โดยไม่มีการยกกำลังหรือฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในตัวแปรตาม ดังนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าจึงเป็นแบบเชิงเส้น

3.8.4 ผลการทดลองที่ 4

จากการทดลองทั้งหมด สามารถสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระยะทาง ณ แม่เหล็กขั้วใดๆ ในขณะที่มีหรือไม่มีแผ่นกันได้ดังนี้



รูปแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระยะทาง ณ แม่เหล็กขั้วใดๆ ขณะที่ไม่มีหรือมีแผ่นกัน



รูปแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระยะทาง ณ แม่เหล็กขั้วใดๆ จาก Datasheet

กราฟแสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงกับข้อมูลที่ถูกระบุไว้ใน Datasheet ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทำงานของ DRV5055 ในการทดลองมีความสอดคล้องกับค่ามาตรฐานที่กำหนด

3.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

3.9.1 สรุปผล

ระยะทางที่เซ็นเซอร์อยู่ห่างกับแม่เหล็กส่งผลต่อแรงดันขาออกและค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อติดตั้งแผ่นกัน (Shield) หรือเหล็กชนิดต่างๆจะส่งผลให้แรงดันขาออกลดลง เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีแผ่นกัน
ค่าแรงดันที่เกิดจากแม่เหล็กชั่วคราวและแม่เหล็กชั่วคราวที่ระยะทางเท่ากัน ส่งค่าแรงดันที่แตกต่างกัน

3.9.2 อภิปรายผล

ระยะทางมีผลต่อเซ็นเซอร์ เมื่อเซ็นเซอร์เข้าใกล้แม่เหล็กชั่วคราว แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในทางกลับกัน ยิ่งเซ็นเซอร์เข้าใกล้แม่เหล็กชั่วคราว แรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยแรงดันไฟฟ้าจากแม่เหล็กชั่วคราวเริ่มต้นที่ 0.0758 V และเพิ่มขึ้นจนถึง 1.6278 V ขณะที่แรงดันไฟฟ้าจากแม่เหล็กชั่วคราวเริ่มต้นที่ 3.2734 V และลดลงจนถึง 1.6923 V (อ้างอิงจากผลการทดลองที่ 1) ซึ่งข้อมูลนี้มีความสอดคล้องกับ Datasheet

นอกจากนี้ ระยะทางยังมีผลต่อค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเช่นกัน โดยความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเซ็นเซอร์เข้าใกล้แม่เหล็กชั่วคราว ในทางกลับกัน ยิ่งเซ็นเซอร์เข้าใกล้แม่เหล็กชั่วคราว ความหนาแน่นฟลักซ์จะลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กชั่วคราวอยู่ในช่วง -2.4750 mT ถึง 0.7391 mT และค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กชั่วคราวอยู่ในช่วง 54.1127 mT ถึง 1.4098 mT (อ้างอิงจากผลการทดลองที่ 2)

ทั้งนี้ แรงดันและความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากผลการทดลองที่ 3 โดยยืนยันถึงความสอดคล้องในการวัดและการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อใช้ Shield หรือเหล็กที่มีคุณสมบัติการต้านแม่เหล็กวางระหว่างแม่เหล็กและเซ็นเซอร์ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทฤษฎี Magnetic Field Shield เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้

สุดท้าย จากการทดลองเมื่อเปลี่ยนชั่วคราวแม่เหล็กแล้วพบว่าแรงดันไฟฟ้าทำการเปลี่ยนแปลงตามที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่เคยระบุไว้ใน Datasheet และแสดงถึงความถูกต้องและเชื่อถือได้ของผลการทดลองที่ได้ดำเนินการไว้

3.9.3 ข้อเสนอแนะ

- (1) ควรเลือกใช้อุปกรณ์ที่ได้รับการรับรองมาตรฐานจากองค์กรที่เชื่อถือได้ เช่น ISO หรือ IEC เพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์มีความแม่นยำและเชื่อถือได้
- (2) ควรใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำในการวัดผล จะได้ลดความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ (Human Error)

3.10 เอกสารอ้างอิง

ชาญณรงค์ น้อยบางยาง.\ \ การตรวจจับด้วยปรากฏการณ์ฮอลล์.\ \ วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)\ ปีที่ 1 \ (กรกฎาคม-ธันวาคม) 2552\ :15-29.

https://www.ti.com/product/DRV5055?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=asc-null-null-gpn_en-cpc-pf-google-soas&utm_content=drv5055&ds_k=DRV5055&dcms=yes&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUucrr-ejAQc53wdKGLhiDGxF-7ssFVyTKULfgeyHk34IZbePcdLQ5QaAm8IEALw_wcB&gclsrc=aw.ds
<https://radiopaedia.org/articles/magnetic-shielding?lang=us>

บทที่ 4 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier

4.1 วัตถุประสงค์

4.1.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของ Load Cell แบบ Strain Gauge, Wheatstone Bridge, Strain Gauge, Second Op-amps Differential Amplifier

4.1.2 เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ Input กับค่าสัญญาณ Output ของ Load Cell

4.2 สมมติฐาน

อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก

4.3 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรต้น : น้ำหนักของมวลบน Load Cell

ตัวแปรตาม : การเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาออก

ตัวแปรควบคุม : แรงดันไฟฟ้าที่ขา VCC และแรงดันไฟฟ้าที่ขา GND

4.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

4.4.1 มวล

น้ำหนักจากถุงทราย ซึ่งถุงทรายหนึ่งหนักประมาณ 500 กรัม

4.4.2 Load Cell

เซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับวัดแรงกดโดยตรง โดยมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของวัสดุเมื่อมีแรงกดเข้ามา การเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

4.4.3 INA 125

แอมพลิฟายเออร์ที่มีความสามารถในการเสริมกำลังสัญญาณขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำ โดยรักษาความแม่นยำและลดสัญญาณรบกวน

4.4.4 R_G

ตัวต้านทานที่ต้องปรับเพื่อเพิ่ม-ลด อัตราขยายในวงจร INA125

4.4.5 G หรือ อัตราขยาย

อัตราขยายเพื่อเพิ่ม-ลด แรงดันไฟฟ้าขาออกตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้

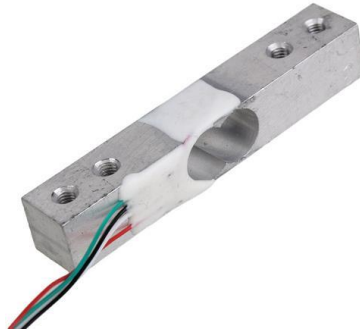
4.5 นิยามเชิงปฏิบัติการ

4.5.1 เก็บค่า Error ที่ได้เพื่อใช้ในการประเมินความแม่นยำของการออกแบบการทดลอง

4.5.2 Single Point Load Cell with INA125 Instrumentation Amplifier คือระบบที่ใช้ในการวัดน้ำหนักหรือแรงกดของวัตถุ โดยมีการแปลงสัญญาณจาก Load Cell ที่ตอบสนองต่อน้ำหนักที่กระทำให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ขยายโดย INA125 ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดและการประมวลผล

4.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.6.1 Single Point Load Cell YZC-131A



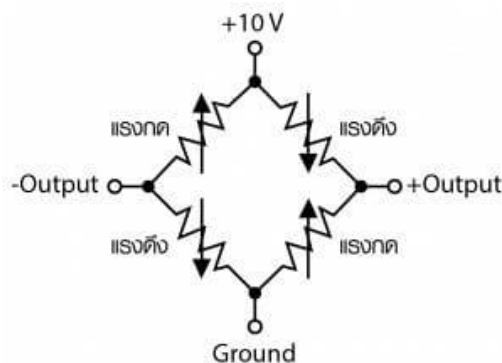
รูป Single Point Load Cell YZC-131A

แหล่งที่มา : <https://www.kuonshun-ks.com/uno/uno-sensor/weighing-load-cell-sensor-10kg-for-electronic-kitc.html>

Load Cell คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัว Load Cell เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าประเภท Analog ซึ่ง Single Point Load Cell YZC-131A คือ Load Cell ประเภท Single Point หรือรับค่าน้ำหนักที่จุดเดียว มักใช้กับงานชั่งที่น้ำหนักน้อยกว่า 1 ตัน เนื่องจาก Single Load Cell มีความบอบบางและเสียหายได้ง่ายหากถูกน้ำหนักกระแทกมากกว่าค่าที่รับได้ โดยมีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้

- (1) Single Point Load Cell YZC-131A สามารถรับน้ำหนักได้ 10 กิโลกรัม
- (2) มีการทำงานแบบ Strain Gauge

Strain Gauge ทำงานด้วยการรับค่าน้ำหนักหรือแรงที่กระทำต่อ Load Cell จะเกิดความเครียดในระบบ และความเครียดจะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนที่แปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าขาออกในที่สุด มักจะใช้ Wheatstone Bridge เป็นกลไกในการวัดค่าความเครียดใน Load Cell เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้งด้านแรงดึงและแรงกด ซึ่ง Wheatstone Bridge เป็นวงจรที่มีความแม่นยำสูงในการวัดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงแม้เพียงเล็กน้อย เนื่องจากมีเกจวัดแรงดันทั้งหมด 4 เกจดังภาพ



รูปตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Wheatstone Bridge กับ Strain Gauge

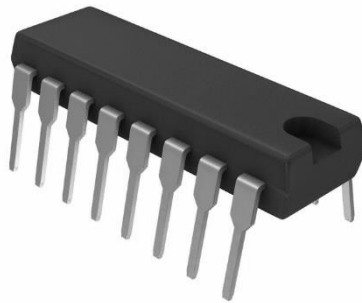
แหล่งที่มา <https://mall.factomart.com/load-cell-design-not-only-from-strain-gauge/>

- (3) ให้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำมาก จึงต้องมี Amplifier ขยายสัญญาณในภายหลัง (หน่วย mV/V)

4.6.2 Differential Amplifier

Differential Amplifier ใช้ในการขยายสัญญาณ โดยทั่วไปจะสร้างขึ้นจาก Operational Amplifier หรือ Op-Amp 3 ตัว โดยใช้สัญญาณ INPUT ที่มีขั้วบวกและขั้วลบสองขั้วที่ต่างกัน (Differential Input) ทำให้สามารถขยายเฉพาะสัญญาณที่ต้องการและลดสัญญาณที่เป็นสัญญาณร่วม (Common Mode) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.6.3 INA125 Instrumentation Amplifier



รูป INA125 Instrumentation Amplifier

แหล่งที่มา : <https://www.digikey.co.th/th/products/detail/texas-instruments/INA125P/254670>

INA125 เป็นวงจรขยายสัญญาณ (Instrumentation Amplifier) ใช้สำหรับขยายสัญญาณที่มีระดับต่ำมาก และช่วยลดสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรก ใช้หลักการ Differential Amplifier ในการขยายสัญญาณ โดยสามารถปรับอัตราขยายได้ที่ R_G และสามารถควบคุมแรงดันขาออกได้ที่ V_{ref} มีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้

(1) Voltage Response

$$V_{out} = (V_{in}^+ - V_{in}^-) \times G$$

เมื่อ V_{out} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาออก (V),

V_{in}^+ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาเข้า ขั้วบวก (V),

V_{in}^- คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขาเข้า ขั้วลบ หรือ 0V (V) และ

G คือ อัตราขยาย

(2) Gain

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

เมื่อ G คือ อัตราขยาย และ

R_G คือ ค่าตัวต้านทานที่ต้องปรับค่า (Ω)

4.7 วิธีการดำเนินการทดลอง

4.7.1 วัสดุอุปกรณ์

- (1) Single Point Load Cell YZC-131A
- (2) INA125 Instrumentation Amplifier
- (3) ตัวต้านทานปรับค่าได้ $100\text{ k}\Omega$
- (4) ตัวต้านทานธรรมดา $4.7\text{ k}\Omega$
- (5) Nucleo STM32G474RE
- (6) LoadCellXplorer
- (7) สายจัมเปอร์

4.7.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- (1) นำแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ขั้วบวกเข้าสายเขียว, แรงดันไฟฟ้าขาเข้า ขั้วลบเข้าสายเหลือง, และต่อแหล่งจ่ายไฟเข้าที่ขาสีแดงและขาสีดำ ของ Load Cell
- (2) นำแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ขั้วบวกต่อที่ ขา 6 ของ INA125, แรงดันไฟฟ้าขาเข้าขั้วลบต่อที่ขา 7 ของ INA125 และต่อขา A0 ของบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้ากับขาที่ 9 และ 10 ของ INA125
- (3) เขียนโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่าน ADC (Analog to Digital Converter) ที่อ่านได้จาก Microcontroller มาแปลงเป็นสมการ ซึ่งสมการนี้เกิดจากการเทียบสัญญาณไตรยางค์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและจำนวนบิตที่ Microcontroller ส่งออกมา

$$\frac{3.3}{V} = \frac{4095}{ADC}$$

จะได้สมการสรุปว่า

$$V = (ADC \times \frac{3.3}{4095})$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการหา (V),
ADC คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ Microcontroller ปลอยออกมา (Bit),
3.3 คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้งานได้ (V) และ
4095 คือ ค่าดิจิทัลสูงสุดที่ Microcontroller สามารถส่งออกได้ (Bit)

- (4) นำมวล 10 กิโลกรัมมาวางลงบน Load Cell เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่มากที่สุด ที่ขา 1 และขา 16 ของ INA125

(5) คำนวณหา G หรืออัตราขยาย ด้วยการสลับสมการ Voltage Response

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}^+ - V_{in}^-}$$

เมื่อ G คือ อัตราขยาย และ

$V_{in}^+ - V_{in}^-$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่มากที่สุด - $0V$ (V)

(6) คำนวณหา R_G ที่จะให้อัตราส่วน (Gain) มีค่ามากที่สุด จากสมการหาค่า Gain

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

เมื่อ G คือ อัตราขยาย และ

R_G คือ ค่าตัวต้านทานที่ต้องปรับค่า (Ω)

(7) เริ่มต้นเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้ด้วยการนำมวล 500 กรัมมาวางไว้บน Load Cell

(8) บันทึกค่า และเพิ่มน้ำหนักของมวลเพิ่มครั้งละ 500 กรัม จนมวลมีค่า 10 กิโลกรัม

4.8 ผลการทดลอง

4.8.1 คำตอบที่ 1 : ค่า Gain

เริ่มต้นหาค่า Gain ด้วยสมการ

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}^+ - V_{in}^-}$$

จากการวัดค่าแรงดันขาเข้า ขั้วบวกที่มากที่สุด เท่ากับ 4.4 mV ทำให้สามารถหาอัตราขยายได้ว่า

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}^+ - V_{in}^-} = \frac{2.5}{4.4 \times 10^{-3} - 0} \approx 568$$

เมื่อ V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกที่มีค่ามากที่สุด เนื่องจากการกำหนด V_{ref} ใน INA125 ที่ 2.5 V

และ V_{IN}^- คือ 0 V (เป็น GND)

4.8.2 คำตอบที่ 2 : ค่า R_G

เริ่มต้นหาค่า R_G ด้วยสมการ

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

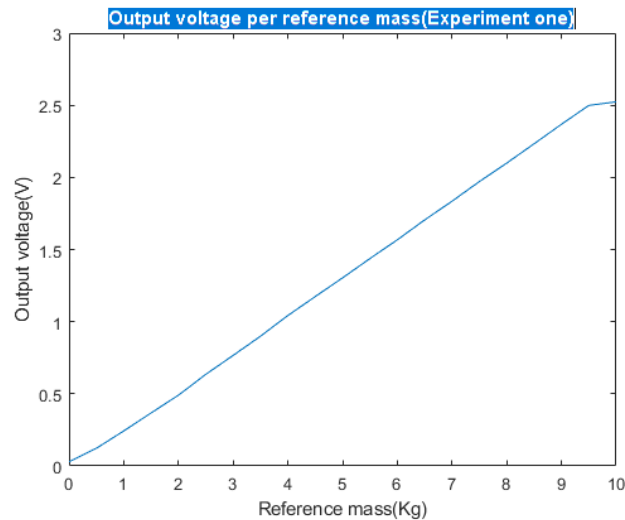
จากข้อที่ 4.8.1. ทำให้ทราบว่าอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 568 จึงสามารถหาค่า R_G ได้ว่า

$$R_G = \frac{60,000}{G - 4} = \frac{60,000}{568 - 4} \approx 106 \Omega$$

จึงสามารถเปลี่ยนค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ (R_G) เป็น 106Ω

4.8.3 ผลการทดลองที่ 1

สามารถเก็บค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากผ่าน INA125 เทียบกับน้ำหนักได้ แสดงผลเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปกราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับมวลที่เกิดขึ้นจริง

เมื่อเก็บค่ามวลที่เกิดขึ้นจริงเรียบร้อยแล้ว เราสามารถนำแรงดันไฟฟ้าที่เก็บค่าได้ มาวัดค่า Error ได้ด้วยการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเทียบกับมวลที่ควรจะได้ ด้วยสมการจากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ดังนี้

$$M = \frac{10}{2.5} \times V_{out}$$

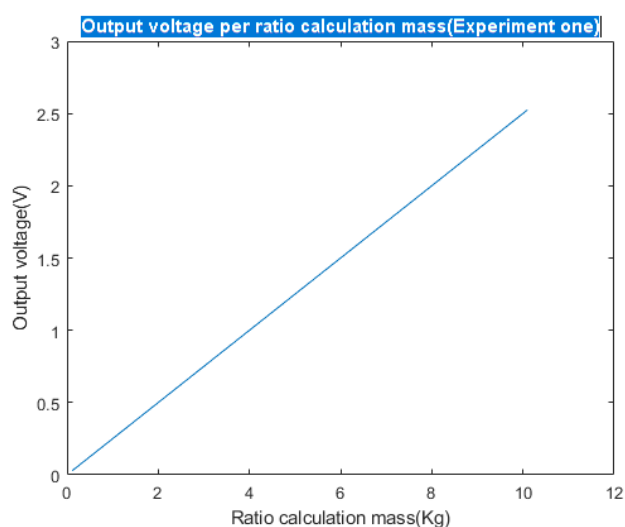
เมื่อ M คือ มวลที่ต้องการทราบ ที่ V_{out} (kg) ,

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการหาค่ามวล (V) ,

10 คือ มวลมากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (kg) และ

2.5 คือ แรงดันไฟฟ้ามากที่สุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ (V)

จะได้กราฟที่แสดงมวลที่ควรเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับที่เก็บค่าได้ดังนี้



รูปกราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับมวลทางทฤษฎี

กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับมวลที่เกิดขึ้นจริง และรูปกราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับมวลทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความไม่สอดคล้องกัน หรือเกิดข้อผิดพลาด (Error) ภายในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องคำนวณและวิเคราะห์ค่า Error เพื่อประเมินผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ

เริ่มหาค่า Error โดยการนำค่ามวลที่วัดได้จากแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกไว้ในทั้งสองรูปแบบ คือ ค่าทางทฤษฎี และ ค่าที่วัดได้จริง มาเปรียบเทียบกับ ผ่านสมการ Error เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนระหว่างทั้งสองค่า ดังนี้

$$\text{Error} = |a - b|$$

เมื่อ Error คือ ค่าที่ผิดพลาดในระบบ,

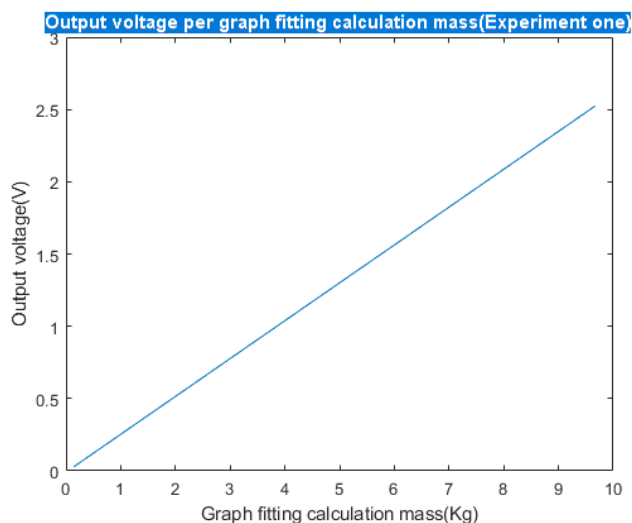
a คือ ค่ามวลที่เกิดขึ้นจากทางทฤษฎี (kg) และ

b คือ ค่ามวลที่เกิดขึ้นจากทางปฏิบัติ (kg)

เมื่อได้ค่า Error ที่เกิดขึ้นในทุกแรงดันไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว จะนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่า Average ซึ่งค่า Error ในระบบมีค่า 0.2251 kg

4.8.4 ผลการทดลองที่ 2

ให้นำกราฟที่แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับมวลที่วัดได้จริงเข้าโปรแกรม MATLAB และทำการ Fitting กราฟด้วยคำสั่ง polyfit เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงเส้นหรือเชิงพหุนามของข้อมูลการวัดที่เกิดขึ้น จะได้กราฟซึ่งมีความใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากกว่ากราฟต้นแบบดังนี้



รูปกราฟหลังจากถูก Fitting

นำค่ากราฟหลังจากถูก Fitting ไปหาค่า Error เทียบกับมวลทางทฤษฎีอีกครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าวิธีการวัดค่าแบบไหนทำให้ค่ามวลตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ซึ่งกราฟหลังจากถูก Fitting จะให้ Slope และค่า C ของสมการเชิงเส้นกลับมา เราสามารถนำข้อมูลค่า Slope และค่า C ของสมการไปใช้ต่อได้ด้วยการประยุกต์เข้ากับสมการนี้

$$M_{\text{mass}} = V_{\text{out}} \times m_{\text{slope}} + C$$

เมื่อ M_{mass}	คือ ค่ามวลที่ควรเกิดขึ้นเมื่อมีแรงดันไฟฟ้า V_{out}	(kg),
V_{out}	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง	(V),
m_{slope}	คือ ค่าที่ได้จาก Fitting กราฟ	(kg) และ
C	คือ ค่าที่ได้จาก Fitting กราฟ	

เริ่มหาค่า Error โดยการนำค่ามวลที่วัดได้จากแรงดันไฟฟ้าที่บันทึกไว้ในทั้งสองรูปแบบ คือ ค่าทางทฤษฎี และ ค่าที่วัดได้จริง มาเปรียบเทียบกับ ผ่านสมการ Error เพื่อวัดความคลาดเคลื่อนระหว่างทั้งสองค่า ดังนี้

$$\text{Error} = |a - b|$$

เมื่อ Error คือ ค่าที่ผิดพลาดในระบบ,

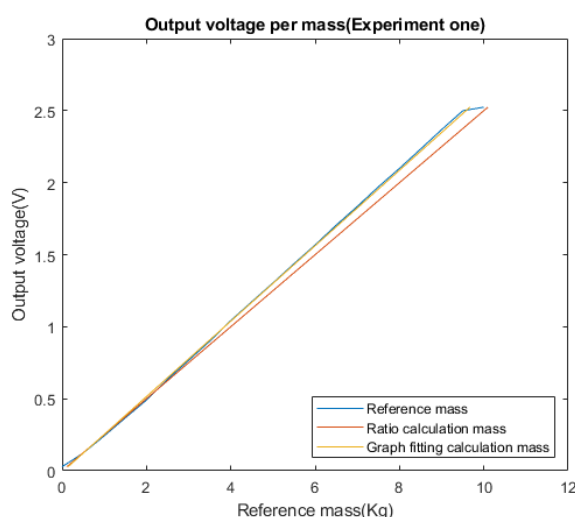
a คือ ค่ามวลที่เกิดขึ้นจากทางทฤษฎี (kg) และ

b คือ ค่ามวลที่เกิดขึ้นจากการ Fitting กราฟ (kg)

เมื่อได้ค่า Error ที่เกิดขึ้นในทุกแรงดันไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว จะนำมาหาค่าเฉลี่ยหรือค่า Average ซึ่งค่า Error ในระบบมีค่า 0.06655 kg

4.8.5 ผลการทดลองที่ 3

จากผลการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 สามารถนำค่า Error ที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันได้ โดยพบว่า ค่า Error ที่ได้จากการหาค่าด้วยวิธีการ Fitting กราฟ มีค่าต่ำกว่าค่า Error ที่ได้จากการหาค่าด้วยวิธีการเปรียบเทียบมวลโดยไม่ใช้การ Fitting กราฟถึงประมาณ $\frac{0.2251}{0.06655} \approx 3.38$ เท่า



รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกราฟต่างๆ ซึ่งกราฟที่เก็บค่าได้จากการปฏิบัติเป็นสีฟ้า, กราฟที่เก็บค่าได้จากการเทียบ บัญญัติไตรยางค์เป็นสีแดง, และกราฟที่เกิดจากการ Fitting กราฟที่เก็บค่าได้จากการปฏิบัติ

4.9 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

4.9.1 สรุปผล

อัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออก เนื่องจาก Load Cell เป็นอุปกรณ์ที่แปลงค่าของน้ำหนักหรือแรงกดให้เป็น สัญญาณไฟฟ้า ซึ่งแรงดันขาออกจะเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักที่กระทำต่อเซลล์โดยอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถใช้ Load Cell ในการวัดน้ำหนักหรือแรงได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากแรงดัน ขาออกจะมีการปรับตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในอัตราที่สม่ำเสมอ

4.9.2 อภิปรายผล

ในการทดลองนี้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่กระทำต่อ Load Cell มีผลอย่างชัดเจนต่อแรงดันไฟฟ้าที่ขาออก ซึ่งสามารถเห็นได้จากการเปรียบเทียบกราฟแรงดันไฟฟ้าจริงกับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงและกราฟทฤษฎี โดยที่ Load Cell มีหลักการทำงานด้วยการแปลงแรงกดหรือน้ำหนักที่กระทำให้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าผ่านวงจร Wheatstone Bridge และ Strain Gauge ซึ่งทำให้สัญญาณตอบสนองต่อแรงกดหรือน้ำหนักที่แปรผันไปอย่างสม่ำเสมอ

ในผลการทดลองเมื่อใช้กราฟที่ได้รับการ Fitting หรือปรับแต่งแล้วเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างมวลที่วัดได้จริงกับมวลที่คำนวณตามทฤษฎี พบว่าค่า Error ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการปรับสัญญาณให้อิงค่าทฤษฎีได้ใกล้เคียงมากขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มความแม่นยำของการวัดผลได้ดียิ่งขึ้น โดยการใช้การ Fitting กราฟช่วยให้ข้อมูลที่ได้มีความสัมพันธ์กับทฤษฎีมากขึ้น และเป็นไปตามคาดการณ์ที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักควรส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ การที่ Load Cell มีการขยายสัญญาณที่ต่ำมากด้วย INA125 ซึ่งเป็นแอมพลิฟายเออร์แบบ Instrumentation Amplifier ที่มีความแม่นยำสูงช่วยให้สามารถขยายสัญญาณไฟฟ้าให้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้สะดวกขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดสัญญาณรบกวน ทำให้การวัดสัญญาณจาก Load Cell มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น การวัดค่า Error จากกราฟที่ Fitting แล้วจึงแสดงถึงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าจากแรงกดใน Load Cell ไปสู่ค่ามวลอย่างชัดเจน

4.9.3 ข้อเสนอแนะ

ควรประยุกต์ใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ในการเก็บค่าแบบใหม่ เพื่อลดการเกิดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ (Human Error)

4.10 เอกสารอ้างอิง

<https://mitec.co.th/load-cell-%E0%B8%84%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%B0%E0%B9%84%E0%B8%A3>

<https://mall.factomart.com/load-cell-design-not-only-from-strain-gauge/>

https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina125.pdf?ts=1730338236231&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.kr%252F

<https://www.elprocus.com/what-is-an-instrumentation-amplifier-circuit-diagram-advantages-and-applications/>