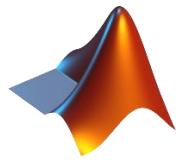


# RMXplorer



## LAB2 : Brushless DC Motor

### Name

นายราชนพนธ์	กิตติภัณฑ์	66340500071
นายปาริษ	ตั้งตระกูล	66340500074

### Objectives

- เพื่อออกแบบการทดลองโดยใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ในการสืบเสาะพัฒนาระบบ ประมวลผลการทดลอง สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง เช้าใจหลักการทำงานของเซ็นเซอร์ และอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องได้ ตลอดจนใช้หลักการทำงานทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ สกัติ และศาสตร์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรม MATLAB เพื่อเก็บผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลอง วิเคราะห์ความเที่ยงตรง ความแม่นยำ ได้อย่างถูกต้อง และมีเหตุผลรองรับ ตรวจสอบความถูกต้องเทียบกับทฤษฎีที่นำเสนอ
- เพื่ออธิบายความสามารถในการรับรู้ปริมาณทางฟิสิกส์ของเซ็นเซอร์ทั้งหมด ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการได้ เช่น การอธิบายการวัดความเร็วของ Brushless DC Motor จาก Hall Sensor (จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้าแปลงเป็นความเร็วได้อย่างไร)
- เพื่อกำหนด ตัวแปรในการทดลอง ได้อย่างถูกต้องและสมเหตุสมผล ไม่ว่าจะเป็นตัวแปรต้น ตัวแปรตาม ตัวแปรควบคุม อธิบายจุดประสงค์การทดลอง อธิบาย สมมติฐาน ให้สอดคล้องกับตัวแปรที่กำหนด นิยามเชิงปฏิบัติการ และมีทฤษฎีที่นำเสนอรองรับ เช่น ทฤษฎีทางฟิสิกส์ หรือข้อมูลจาก Datasheet
- เพื่อออกแบบวิธีการทดลองเพื่อหาคำตอบ ให้สอดคล้องกับผลการเรียนรู้อย่างทั้งหมด ได้ด้วยตนเองอย่างถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ รวมทั้ง บันทึกผล สรุปผล อภิปรายผล ตามข้อมูลที่บันทึกได้จริง มีกระบวนการทำซ้ำ อธิบายที่มาของผลการทดลองนั้นได้ โดยใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ ไฟล์ Simulink, mlx

ฯลฯ และชุดการทดลองพร้อมบอร์ด Microcontroller ที่ TA จัดเตรียมให้เป็นต้น

- เพื่อเขียนรายงาน สัญลักษณ์ และสมการทางวิทยาศาสตร์ ได้อย่างถูกต้อง ทั้งขนาด และรูปแบบอักษร การเว้นช่องไฟ การเว้นขอบกระดาษ การเว้นระยะพิมพ์ ให้ได้ระยะที่เหมาะสมตามหลักสากล

# การทดลองที่ 1 Brushless DC Motor

## 1. จุดประสงค์

1.1 สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ เช่น สัญญาณจาก Hall Sensor, สัญญาณ PWM, สัญญาณ Back EMF และความเร็วรอบ

1.2 สามารถอธิบายหลักการทำงานของและการ Brushless DC Motor แบบใช้เซ็นเซอร์ (Sensor-based Control) ด้วยวิธีการควบคุมแบบ 6-Step (Trapezoidal Control)

## 2. สมมติฐานการทดลอง

2.1 ถ้าเพิ่ม Duty Cycle ของสัญญาณ PWM ที่จ่ายให้กับ BLDC Motor แล้ว ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้น

## 3. กำหนดตัวแปร

3.1 ตัวแปรต้น

3.1.1 ความถี่ PWM

3.2 ตัวแปรตาม

3.2.1 ความเร็วรอบของมอเตอร์

3.3 ตัวแปรควบคุม

3.3.1 บอร์ด BLDCXplorer

3.3.2 Nucleo STM32G474RE

3.3.3 สายจัมเปอร์

3.3.4 วิธีการควบคุมมอเตอร์

## 4. นิยามศัพท์เฉพาะ

4.1 การปรับความเร็วรอบBLDC Motor หมายถึง การปรับค่าความเร็วรอบซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง -10,000 - 10,000 RPM โดยปรับเพิ่มลดขึ้นทีละ 2,000 RPM ซึ่งจะสามารถเก็บค่าได้ทั้งหมด 10 ค่า

## 5. นิยามเชิงปฏิบัติการ

5.1 BLDC Motor (Brushless DC Motor) หมายถึง อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปแบบของการหมุน โดยเมื่อจ่าย

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมผ่านวงจรควบคุม มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว รอบที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้านั้น และสามารถวัดค่าต่างๆ

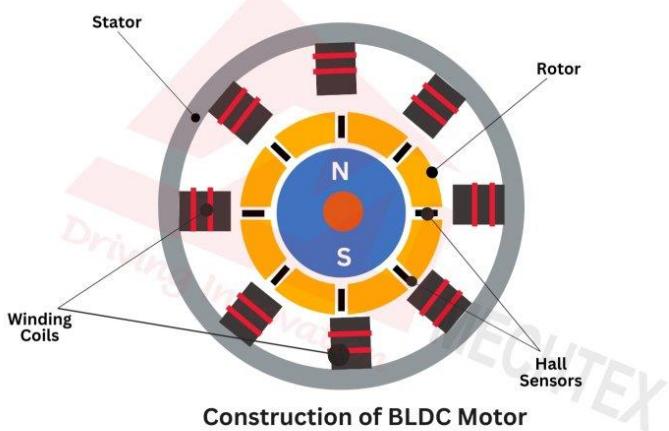
5.2 บอร์ด BLDCXplorer หมายถึง บอร์ดที่ประกอบไปด้วยฐานที่สามารถบรรจุบอร์ดควบคุม, Breadboard และ 3D-Print ที่ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor

5.3 Nucleo STM32G474RE หมายถึง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้พัฒนาการควบคุมและอ่านค่าจากเซนเซอร์หรืออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้ มาพร้อมพอร์ต เชื่อมต่อ USB และรองรับการเขียนโปรแกรมผ่านซอฟต์แวร์ต่าง ๆ

## 6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 6.1.1 BLDC Motor (Brushless DC Motor)

Brushless DC Motor หรือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างเด่นที่ใช้การสลับการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวด (Commutation) แบบอิเล็กทรอนิกส์ แทนการใช้แปรงถ่าน ทำให้มีประสิทธิภาพสูง อายุการใช้งานยาวนาน และเสียงรบกวนต่ำ



รูปที่ 1 โครงสร้างของ Brushless DC Motor

ที่มา: <https://mechtex.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-bldc-motors>

### 6.1.2 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ (Rotor) คือส่วนที่เคลื่อนที่ (หมุน) ของมอเตอร์ โดยทั่วไปแล้ว โรเตอร์ของ BLDC Motor จะเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) แม่เหล็กถาวرنี้อาจเป็นแบบฝังภายใน (Interior Permanent Magnet - IPM) หรือแบบติดบนพื้นผิว (Surface-Mounted Permanent Magnet - SPM) ก็ได้ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole) บนโรเตอร์จะแตกต่างกัน ไปตามการออกแบบ แต่ที่นิยมใช้กันจะมีตั้งแต่ 2 ขั้วขึ้นไป ลักษณะของโรเตอร์ใน BLDC Motor หลักๆ แล้วมี 2 แบบ

#### 6.1.2.1 Inrunner (Inner Rotor)

ลักษณะ: แม่เหล็กถาวรจะถูกติดตั้งอยู่บนแกนโรเตอร์ที่อยู่ด้านใน สเตเตอร์ (ชุดลวด) จะอยู่ล้อมรอบโรเตอร์

ข้อดี:

- แรงเฉียบ (Inertia) ต่ำ: ทำให้สามารถเร่งและลดความเร็วได้รวดเร็ว ตอบสนองได้ไว

- ระบบความร้อนได้ดีกว่า: ชุดลวดสเตเตอร์อยู่ด้านนอก ส้มผ้าสากาศได้โดยตรง ทำให้ระบบความร้อนได้ดีกว่า
- หมายเหตุ: หมายเหตุที่ต้องการความเร็วรอบสูง: เนื่องจากแรงเนื้อyleต่ำและระบบความร้อนได้ดี

ข้อเสีย:

- แรงบิด (Torque) ต่ำกว่าแบบ Outrunner: เนื่องจากขนาดของแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยพื้นที่ภายใน
- โครงสร้างซับซ้อนกว่าเล็กน้อย: เนื่องจากต้องมีเพลาส่งกำลังออกมานอก

#### 6.1.2.2 Outrunner (Outer Rotor)

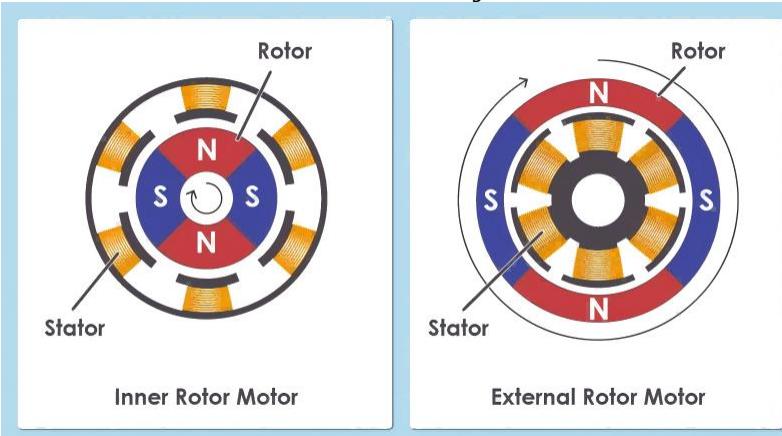
ลักษณะ: แม่เหล็กถาวรจะถูกติดตั้งอยู่บนตัวเรือนโรเตอร์ (กระดิ่ง) ที่อยู่ด้านนอก สเตเตอร์ (ชุดลวด) จะอยู่ตรงกลางภายในโรเตอร์

ข้อดี:

- แรงบิด (Torque) สูงกว่าแบบ Inrunner: เนื่องจากสามารถติดตั้งแม่เหล็กได้มากกว่าและมีรัศมีมากกว่า
- โครงสร้างเรียบง่ายกว่า: มักจะไม่มีเพลาแยกออกมาระบายน้ำ สามารถต่อโหลดได้โดยตรงกับตัวเรือนโรเตอร์

ข้อเสีย:

- แรงเฉียบ (Inertia) สูงกว่า: ทำให้เร่งและลดความเร็วได้ช้ากว่า ตอบสนองช้ากว่า
- ระบบความร้อนได้ยากกว่า: ชุดลวดสเตเตอร์อยู่ด้านใน ถูกล้อมรอบด้วยโรเตอร์ ทำให้ระบบความร้อนได้ยากกว่า
- หมายเหตุ: หมายเหตุที่ต้องการแรงบิดสูง ความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง



- รูปที่ 2 เปรียบเทียบ Inner Rotor และ Outer Rotor
- ที่มา: <https://www.gian-transmission.com/a-comprehensive-guide-to-brushless-dc-motor/>

•

### 6.1.3 สเตเตอร์ (Stator)

คือส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ ประกอบด้วยแกนเหล็ก (Stator Core) และชุดลวด (Winding) พันอยู่รอบแกนเหล็ก ชุดลวดในสเตเตอร์มักพันเป็น 3 เพส (3 ชุด) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลวดแต่ละชุดตามลำดับที่เหมาะสม จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนซึ้งภายในสเตเตอร์

### 6.1.4 Hall Effect Sensor

ใช้สำหรับตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (สนามแม่เหล็ก) และส่งสัญญาณไปยังวงจรอควบคุม (ESC) เพื่อให้วงจรอควบคุมสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลวดในสเตเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์อย่างเหมาะสม

### 6.1.5 Pulse Width Modulation (PWM)

เป็นเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสัญญาณแอนะล็อกสมูว์น โดยใช้สัญญาณดิจิทัล โดยหัวใจหลักของ PWM อยู่ที่การปรับเปลี่ยนความกว้างของพัลส์ (Pulse Width) หรือค่า Duty Cycle ของสัญญาณดิจิทัล เพื่อควบคุมปริมาณพลังงานเฉลี่ยที่ส่งไปยังอุปกรณ์หรือโหลด PWM ทำงานโดยการสร้างสัญญาณดิจิทัลที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse) ซึ่งสลับกันระหว่างสถานะ "เปิด" (ON หรือ HIGH) และ "ปิด" (OFF หรือ LOW) อย่างรวดเร็ว องค์ประกอบสำคัญของสัญญาณ PWM ประกอบด้วย:

**ความถี่ (Frequency):** คือจำนวนรอบของการเปิด-ปิดสัญญาณต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยทั่วไปจะวัดเป็น เฮิรตซ์ (Hz) ความถี่ของ PWM มักจะคงที่ในการใช้งานหนึ่งๆ

**ค่าเวลา (Period):** คือระยะเวลาที่ครบหนึ่งรอบของการเปิด-ปิดสัญญาณ เป็นส่วนกลับของความถี่ ( $\text{Period} = 1/\text{Frequency}$ )

**ความกว้างพัลส์ (Pulse Width):** คือระยะเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ "เปิด" (ON หรือ HIGH) ภายในหนึ่งค่าเวลา

**Duty Cycle:** คืออัตราส่วนระหว่างความกว้างพัลส์ต่อค่าเวลา มักแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ คำนวนได้จาก

$$\text{Duty Cycle}(\%) = \left( \frac{T_{on}}{T_{Total}} \right) \times 100$$

โดยที่  $T_{on}$  คือ ช่วงเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะเปิด (*HIGH*) มีหน่วย เป็นวินาที (*s*)

$T_{total}$  คือ คาบของสัญญาณ (*Period*) เป็นระยะเวลาของ 1 รอบ สัญญาณหั้งหมด มีหน่วยเป็นวินาที (*s*)

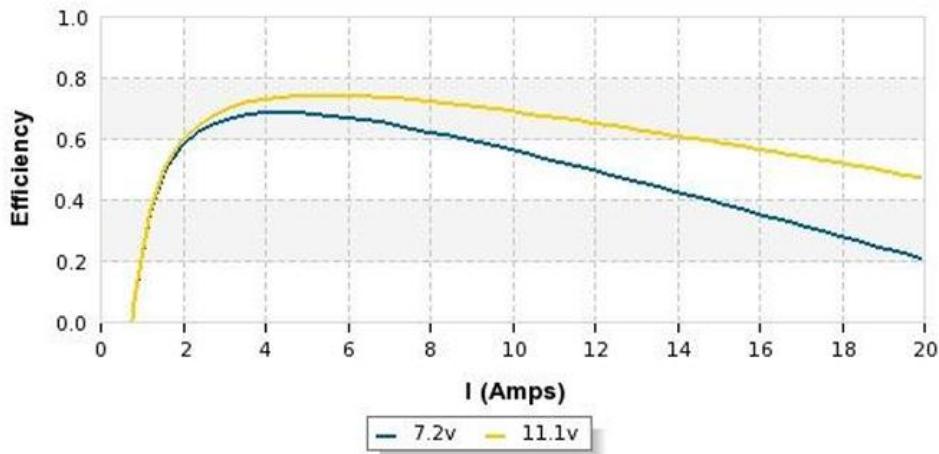
## 6.2 Datasheet Brushless DC Motor A2212/13T



No. of Cells:	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
Kv:	1000 RPM/V
Max Efficiency:	80%
Max Efficiency Current:	4 - 10A (>75%)
No Load Current:	0.5A @10V
Resistance:	0.090 ohms
Max Current:	13A for 60S
Max Watts:	150W
Weight:	52.7 g / 1.86 oz
Size:	28 mm dia x 28 mm bell length

Shaft Diameter:	3.2 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800g / 10.5 - 28.2 oz

- รูปที่ 3 แสดงข้อมูลคุณสมบัติของ Brushless DC Motor A2212/13T
- ที่มา: [https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC\\_A2212\\_13T.pdf](https://www.rhydolabz.com/documents/26/BLDC_A2212_13T.pdf)



- รูปที่ 4 แสดงข้อมูลคุณสมบัติของ Brushless DC Motor A2212/13T

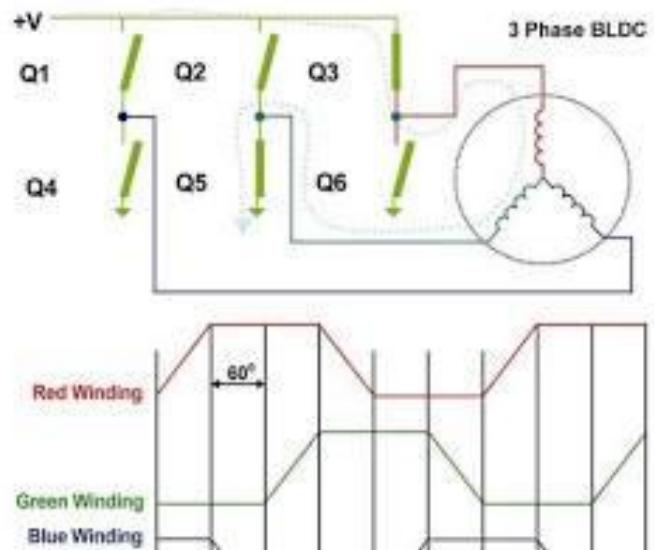
Propeller	Gear Ratio	Volts	Amps	Watts	RPM
GWS HD 8x4	1	7	3.35	23	6630
GWS HD 8x4	1	7.9	4.1	32	7410
GWS HD 8x4	1	8.9	4.85	43	8220
GWS HD 8x4	1	9.9	5.65	55	8940
GWS HD 8x4	1	10.9	6.5	70	9660
GWS HD 9x5	1	6.9	5.5	37	6000
GWS HD 9x5	1	7.9	6.7	52	6660
GWS HD 9x5	1	8.9	7.85	69	7290
GWS HD 9x5	1	9.9	9.25	91	7920
APC E 10x5	1	6.9	7	48	5610
APC E 10x5	1	7.9	8.45	66	6120
APC E 10x5	1	8.9	9.9	88	6690
APC E 10x5	1	9.9	11.45	113	7170
APC E 10x5	1	10.9	13	141	7650
GWS HD 10x6	1	6.9	7.2	49	5610
GWS HD 10x6	1	7.9	8.7	68	6180
GWS HD 10x6	1	8.9	10.1	89	6690
GWS HD 10x6	1	9.9	11.7	115	7200
GWS HD 10x6	1	10.9	13.25	144	7680
GWS HD 10x8	1	10.8	18.2	196	6390

- รูปที่ 5 แสดงข้อมูลคุณสมบัติของ Brushless DC Motor A2212/13T

### 6.3 การควบคุมมอเตอร์ (Motor Control)

#### 6.3.1 6-Step Control (Trapezoidal Control)

จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดลวดของ BLDC Motor เป็นลำดับทีลักษณะ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนเป็น 6 จังหวะ (Step) ต่อหนึ่งรอบการหมุนทางไฟฟ้า มักใช้ร่วมกับ Hall Effect Sensor เพื่อตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์

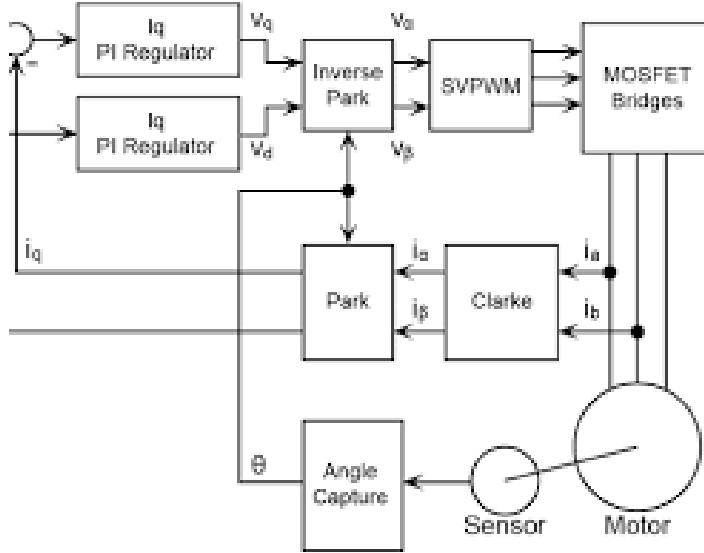


รูปที่ 6 6-Step Control

ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Six-step-commutation-The-easiest-method-of-detecting-the-rotor-position-is-Hall-Effect\\_fig2\\_334077552](https://www.researchgate.net/figure/Six-step-commutation-The-easiest-method-of-detecting-the-rotor-position-is-Hall-Effect_fig2_334077552)

### 6.3.2 FOC (Field-Oriented Control)

ควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบพิกัดที่หมุนตามโรเตอร์ (dq frame) โดยแยกควบคุมองค์ประกอบของกระแสที่สร้างแรงบิด (q-axis) และองค์ประกอบของกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก (d-axis) ทำให้สามารถควบคุมแรงบิดและความเร็วได้อย่างแม่นยำ มักใช้ร่วมกับเทคนิค Space Vector Modulation (SVM) ในการสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 7 FOC

ที่มา: <https://www.roboteq.com/applications/all-blogs/13-field-oriented-control-foc-made-ultra-simple>

### 6.3.3 Sensorless Control

ควบคุม BLDC Motor ไม่ใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แต่จะใช้วิธีการทางซอฟต์แวร์ในการประมาณตำแหน่งของโรเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้การตรวจจับ Back EMF (แรงดันไฟฟ้าขับกลับ) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดของมอเตอร์ หรือใช้เทคนิคอื่นๆ เช่น การฉีดสัญญาณความถี่สูง (High-Frequency Injection)

ข้อดี:

- ต้นทุนต่ำ: ไม่ต้องใช้เซ็นเซอร์
- ขนาดเล็ก: ไม่มีเซ็นเซอร์ทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลง
- ความนำเชื้อถือสูงขึ้น: ไม่มีเซ็นเซอร์ที่อาจเสียหายได้
- เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง: หน้านานต่ออุณหภูมิสูง ความชื้น ฝุ่นละออง

ข้อเสีย:

- ความแม่นยำต่ำกว่า: การประมาณตำแหน่งโรเตอร์มีความแม่นยำน้อยกว่าการใช้เซ็นเซอร์
- ทำงานได้ไม่ดีที่ความเร็วตอบตัว: การตรวจจับ Back EMF ทำได้ยากที่ความเร็วตอบตัวหรือหยุดนิ่ง
- การควบคุมซับซ้อนกว่า: ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนในการประมาณตำแหน่งโรเตอร์

- เริ่มต้นหมุนยากกว่า: อาจต้องใช้เทคโนโลยีพิเศษในการเริ่มหมุน มอเตอร์
- ประสิทธิภาพต่ำกว่าในช่วงเริ่มต้น: ประสิทธิภาพการควบคุมจะต่ำกว่าในช่วงเริ่มต้นของการหมุน

#### 6.3.4 Sensor-based Control

ใช้เซ็นเซอร์ในการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์ เช่น Hall Effect Sensors, Encoders, หรือ Resolvers ข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกป้อนกลับ (feedback) ไปยังตัวควบคุม (controller) เพื่อใช้ในการคำนวณและกำหนดรูปแบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังชุดลวดของมอเตอร์ (commutation)

ข้อดี:

- ความแม่นยำสูง: สามารถระบุตำแหน่งของโรเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ทำให้ควบคุมความเร็วและแรงบิดได้ดี
- ทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบต่ำ: เซ็นเซอร์สามารถให้ข้อมูลตำแหน่งที่ถูกต้องแม่นในขณะที่มอเตอร์หมุนช้าหรือหยุดนิ่ง
- การควบคุมราบรื่น: การเปลี่ยนเฟส (commutation) ทำได้ราบรื่น ส่งผลให้การทำงานของมอเตอร์เสียงและสั่นสะเทือนน้อย
- ง่ายต่อการเริ่มต้นหมุน: สามารถเริ่มหมุนมอเตอร์ได้ง่ายและแม่นยำ

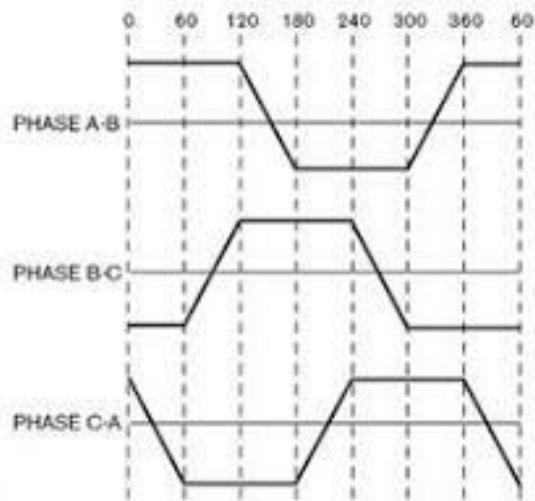
ข้อเสีย:

- ต้นทุนสูงขึ้น: เนื่องจากต้องใช้เซ็นเซอร์เพิ่มเติม
- ความซับซ้อนเพิ่มขึ้น: ต้องมีการติดตั้งและเดินสายเซ็นเซอร์
- ความนำเชื้อถือลดลง: เซ็นเซอร์อาจเสียหายได้จากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ฝุ่นละออง
- ขนาดใหญ่ขึ้น: การติดตั้งเซ็นเซอร์ทำให้ขนาดของมอเตอร์ใหญ่ขึ้น
- จำกัดอุณหภูมิการทำงาน: เซ็นเซอร์บางชนิดมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิการทำงาน

## 6.4

### 6.4.1 Back EMF (แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกลับ)

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่เกิดขึ้นภายในชุดลวดของมอเตอร์ไฟฟ้า ขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน แรงดันไฟฟ้านี้มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จึงเรียกว่า "แรงเคลื่อนไฟฟ้า ต้านกลับ" หรือ "แรงเคลื่อนไฟฟ้า เหนี่ยวนำกลับ"

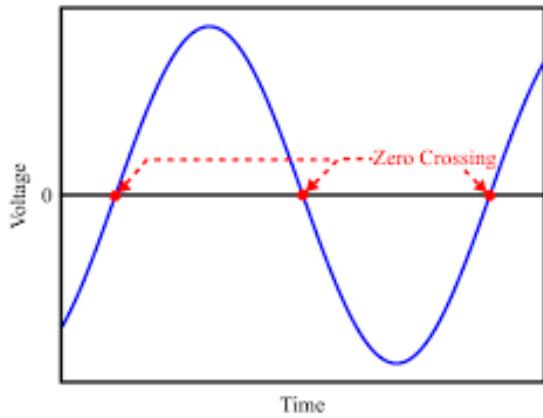


รูปที่ 8 Trapezoidal Back EMF Waveform

ที่มา: <https://www.motioncontrolltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>

### 6.4.2 Zero Crossing

จุดที่สัญญาณไฟฟ้า (เช่น แรงดันหรือกระแส) เปลี่ยนจากค่าบวกเป็นค่าลบ หรือจากค่าลบเป็นค่าบวก ซึ่งก็คือจุดที่สัญญาณมีค่าเป็น "ศูนย์" สามารถเกิดขึ้นได้ในสัญญาณไฟฟารูปแบบอื่นๆ เช่น สัญญาณสี่เหลี่ยม (Square Wave) สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangle Wave) หรือสัญญาณ Back EMF ในมอเตอร์ โดย Zero Crossing จะเป็นจุดที่สัญญาณตัดผ่านแกนศูนย์



รูปที่ 9 Trapezoidal Back EMF Waveform

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Zero\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_crossing)

#### 6.4.3 Space Vector Modulation (SVM)

เทคนิคการmodดูเลตสัญญาณขั้นสูงที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC motors) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร (PMSM) และ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) SVM มักใช้ร่วมกับ Field-Oriented Control (FOC) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

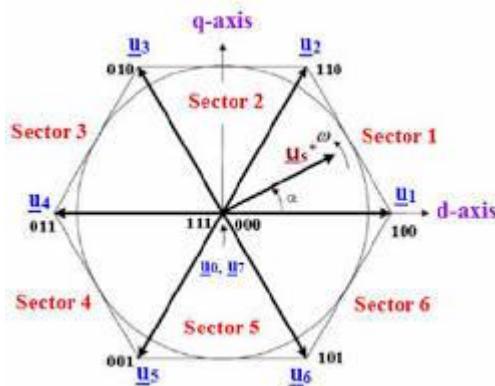
SVM มองแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์เป็น เวกเตอร์ (Vector) แทนที่จะมองเป็นรูปคลื่นไซน์ແຍກกันสามรูป โดยเวกเตอร์นี้จะหมุนอยู่ในระนาบ 2 มิติ (เรียกว่า ระนาบ  $\alpha$ - $\beta$  หรือ ระนาบ  $d$ - $q$ ) และแทนสถานะแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ในขณะนั้น

การสร้างเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Voltage Vector) ที่ต้องการ โดยใช้การ合成 (synthesize) จากเวกเตอร์แรงดันพื้นฐาน (Basic Voltage Vectors) ที่มีอยู่ ซึ่งเวกเตอร์แรงดันพื้นฐานเหล่านี้เกิดจากการเปิด-ปิดสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์สามเฟส (Three-Phase Inverter) ที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์

ข้อดีของ SVM:

- แรงดันไฟฟ้าใช้งานสูงกว่า: SVM สามารถใช้แรงดันไฟฟ้า DC bus ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อเทียบกับ Sinusoidal PWM (SPWM) ทำให้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่าประมาณ 15%
- ลดการสูญเสียจากการสวิตช์: SVM มีการสวิตช์ที่น้อยกว่า SPWM ส่งผลให้การสูญเสียพลังงานลดลง

- ลดารมณ์อนิก: SVM สร้างอาร์มอนิกของกระแสและแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า SPWM ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ราบรื่นขึ้น ลดเสียงรบกวนและการสั่นสะเทือน
  - ประสิทธิภาพสูง: โดยรวมแล้ว SVM ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
- ข้อเสียของ SVM:
- ความซับซ้อน: การคำนวณและการใช้งาน SVM ซับซ้อนกว่า SPWM
  - ต้องการตัวประมวลผลที่เร็ว: ต้องการตัวประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าในการคำนวณแบบเรียลไทม์



รูปที่ 10 Space Vector Diagram

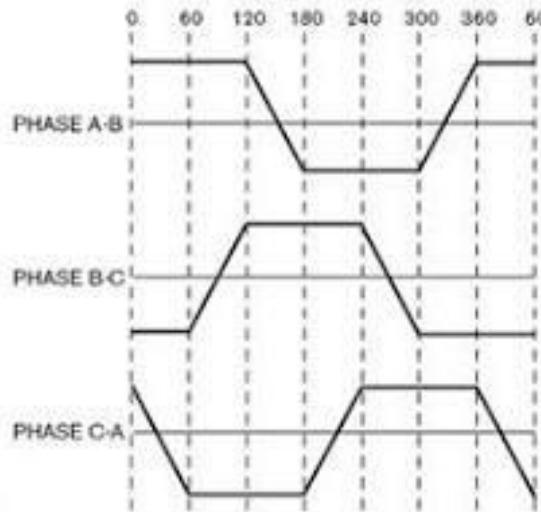
ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Space-Vector-Diagram-for-a-Two-Level-Inverter\\_fig3\\_282859436](https://www.researchgate.net/figure/Space-Vector-Diagram-for-a-Two-Level-Inverter_fig3_282859436)

#### 6.4.4 Trapezoidal Back EMF

รูปแบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดสเตเตอร์ของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor - BLDC) ที่มีลักษณะเป็น รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal)

- จ่ายแรงดัน/กระแสให้กับชุดลวดมอเตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู
- ใช้หลักการสวิตซิ่ง 6 จังหวะ (Six-Step) โดยในแต่ละจังหวะจะมีชุดลวด 2 ชุดที่ได้รับแรงดัน
- เหมากับมอเตอร์ที่มี Trapezoidal Back EMF
- โครงสร้างการควบคุมเรียบง่าย ต้นทุนต่ำ

- เกิด Torque Ripple 多得多 ทำให้มอเตอร์สั่นและมีเสียงดัง



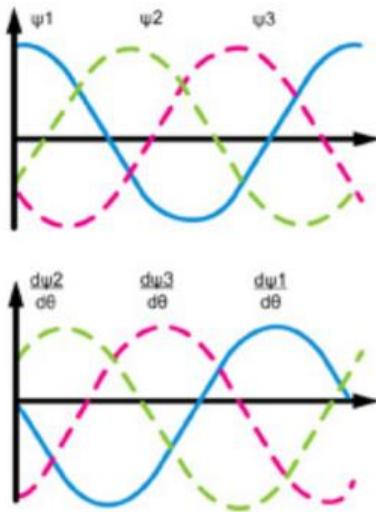
รูปที่ 11 Trapezoidal Back EMF Waveform

ที่มา: <https://www.motioncontroltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>

#### 6.4.5 Sinusoidal Back EMF

รูปแบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าขอนกลับ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นในชุดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าบางประเภท โดยมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal)

- จ่ายแรงดัน/กระแสให้กับชุดลวดมอเตอร์เป็นรูปคลื่นไซน์
- ใช้เทคนิค Field-Oriented Control (FOC) หรือ Vector Control เพื่อควบคุมสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ
- เหมากับมอเตอร์ที่มี Sinusoidal Back EMF
- โครงสร้างการควบคุมซับซ้อน ต้องการการประมวลผลมากกว่า
- ให้แรงบิดที่เรียบ เสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนต่ำ ประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 12 Sinusoidal Back EMF waveform

ที่มา: <https://www.motioncontrolltips.com/faq-sinusoidal-emf-sinusoidal-current/>

ความแตกต่างที่สำคัญ:

- รูปคลื่น: Trapezoidal ใช้รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคงหมุน ส่วน Sinusoidal ใช้รูปคลื่นไซน์
- ความราบรื่น: Sinusoidal ให้การควบคุมที่ราบรื่นกว่า แรงบิดคงที่กว่า เสียงรบกวนและการสั่นสะเทือนน้อยกว่า
- ความซับซ้อน: Trapezoidal เรียนรู้ง่ายกว่า ส่วน Sinusoidal ซับซ้อนกว่า
- ประสิทธิภาพ: Sinusoidal มีประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย การเลือกใช้งาน:
  - Trapezoidal Control: เหมาะสมสำหรับงานทั่วไปที่ต้องการความเรียนรู้ง่าย ต้นทุนต่ำ เช่น พัดลม ปั๊มน้ำ เครื่องใช้ไฟฟ้า
  - Sinusoidal Control: เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง การควบคุมที่แม่นยำ แรงบิดเรียนรู้ เสียงรบกวนต่ำ เช่น หุ่นยนต์ เครื่องจักร CNC ยานยนต์ไฟฟ้า

#### 6.4.6 Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ชนิดหนึ่งที่ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) บนโรเตอร์ (ส่วนที่หมุน) เพื่อสร้าง

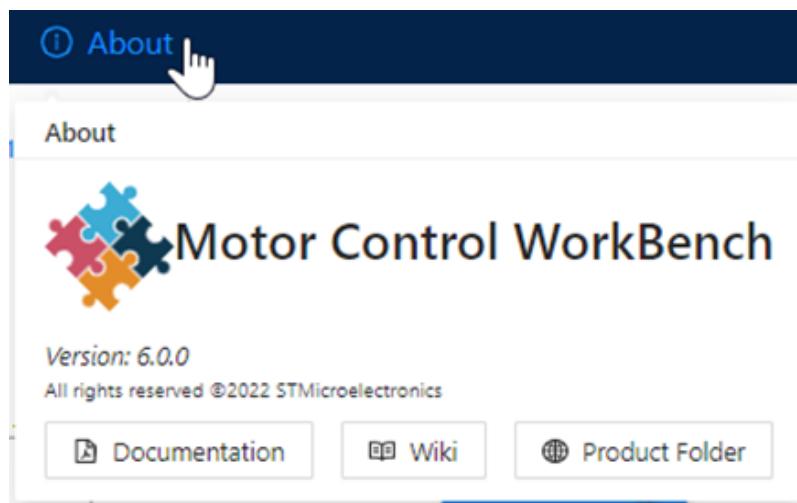
สนาમแม่เหล็ก และทำงานที่ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) กับความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ

ส่วนประกอบหลักของ PMSM:

1. Stator (สเตเตอร์): ส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยชุดลวดพันอยู่โดยรอบเมื่อจ่ายไฟกระแสสลับให้กับชุดลวดสเตเตอร์ จะเกิดสนาມแม่เหล็กหมุนขึ้น
2. Rotor (โรเตอร์): ส่วนที่หมุน ประกอบด้วยแม่เหล็กการ ซึ่งสร้างสนาມแม่เหล็กคงที่
3. Air Gap (ช่องอากาศ): ช่องว่างระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์

## 6.5 Motor Workbench

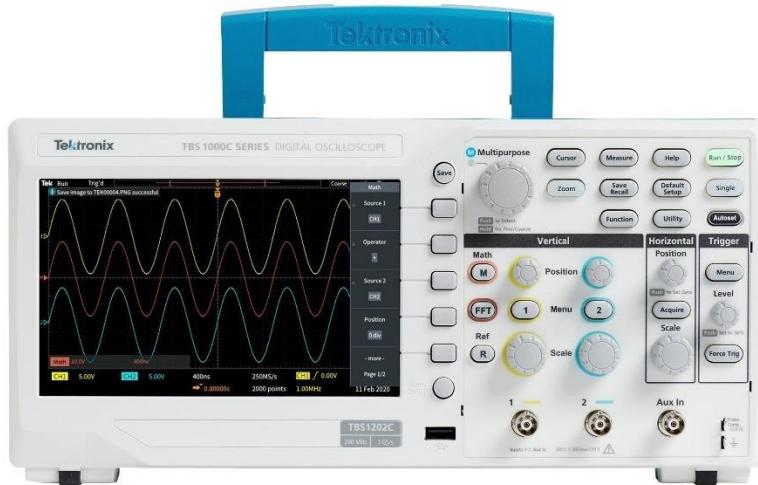
Motor Workbench คือ คือ ซอฟต์แวร์จากบริษัท STMicroelectronics ที่ออกแบบมาเพื่อช่วยในการพัฒนาและปรับแต่งระบบควบคุมมอเตอร์ โดยเฉพาะมอเตอร์แบบ Brushless DC (BLDC) และ PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)



รูปที่ 13 Motor Workbench  
ที่มา: [https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32MotorControl:STM32\\_MC\\_Workbench](https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32MotorControl:STM32_MC_Workbench)

## 6.6 Oscilloscope

เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้แสดงรูปคลื่นสัญญาณ ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณต่างๆ ในการทดลอง เช่น สัญญาณ PWM, สัญญาณ Hall Sensor, สัญญาณ Back EMF



รูปที่ 14 Oscilloscope  
ที่มา: <https://th.element14.com/tektronix/tbs1072c/dso-2-ch-70mhz-1gsps/dp/3463444>

## 7. วิธีดำเนินการทดลอง

- 7.1 ศึกษาหลักการทำงานของ BLDC Motor
- 7.2 ต่อวงจร BLDCXplorer เข้ากับ Nucleo STM32G474RE
- 7.3 ต่อสายอัปโหลดเข้ากับบอร์ดและคอมพิวเตอร์
- 7.4 เข้าโปรแกรม motor workbench เพื่อสั่งงาน BLDC Motor
- 7.5 เริ่มทำการทดลอง โดยปรับความเร็ว rob ของ BLDC Motor
- 7.6 ทำการเก็บค่าจาก โปรแกรม motor workbench และ Oscilloscope
- 7.7 สรุปผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

## 8. วัสดุอุปกรณ์

- 8.1 BLDC Motor จำนวน 1 อัน
- 8.2 STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 จำนวน 1 อัน
- 8.3 Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด จำนวน 1 ชุด

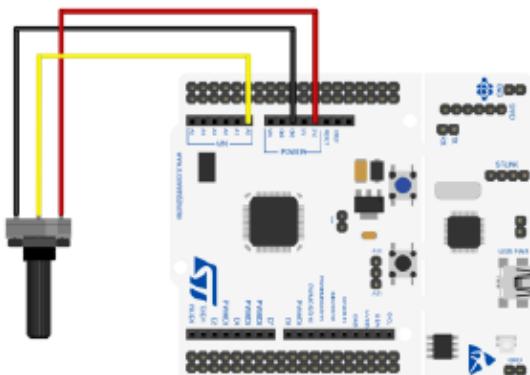
8.4 BLDCXplorer จำนวน 1 ชุด - ฐานสามารถบรรจุบอร์ดควบคุม,  
Breadboard, 3D-Print ใช้สำหรับการประกอบกับ BLDC Motor8.5  
PDB181-K420K-103C จำนวน 1 ชุด

8.5 สายจัมเปอร์

## 9. ขั้นตอนการดำเนินงาน

9.1 ศึกษาวิธีการใช้บอร์ด X-NUCLEO-IHM08M1 ผ่านวิดีโอใน Google Classroom

9.2 เชื่อมบอร์ด Nucleo STM32G474RE เข้ากับบอร์ด  
STMICROELECTRONICS X-NUCLEO-IHM08M1 เพื่อควบคุม BLDC  
Motor ตามรูปที่ 14

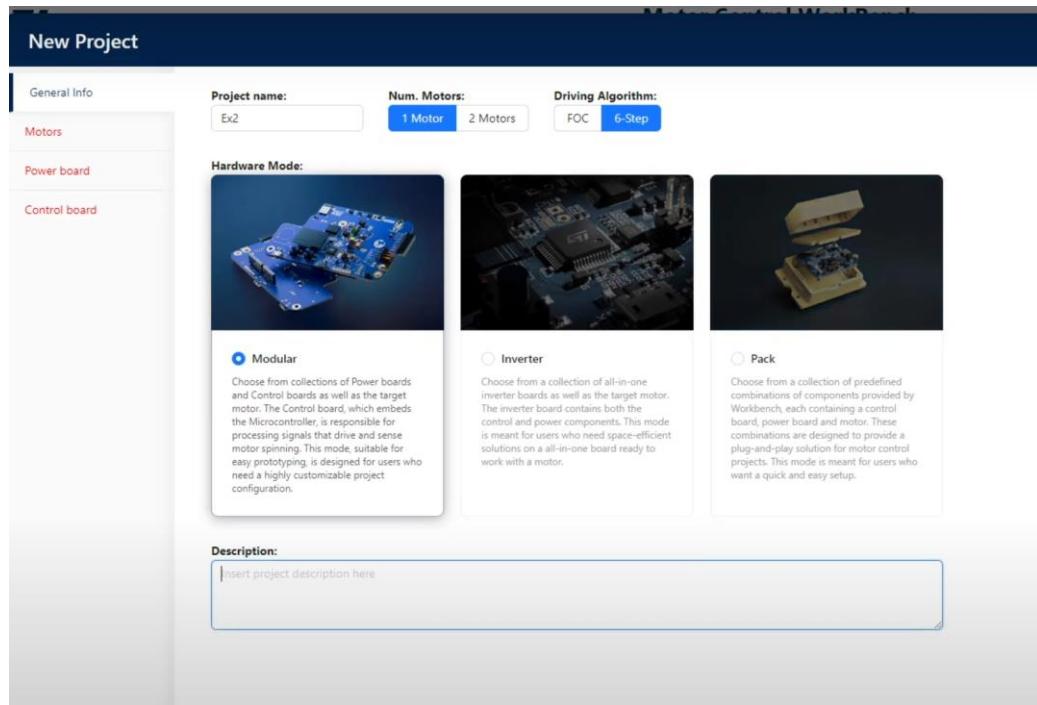


รูปที่ 15 การต่อวงจรการทดลอง Potentiometer

9.3 นำสายอปปโหลดของ Nucleo STM32G474RE ต่อเข้าคอมพิวเตอร์

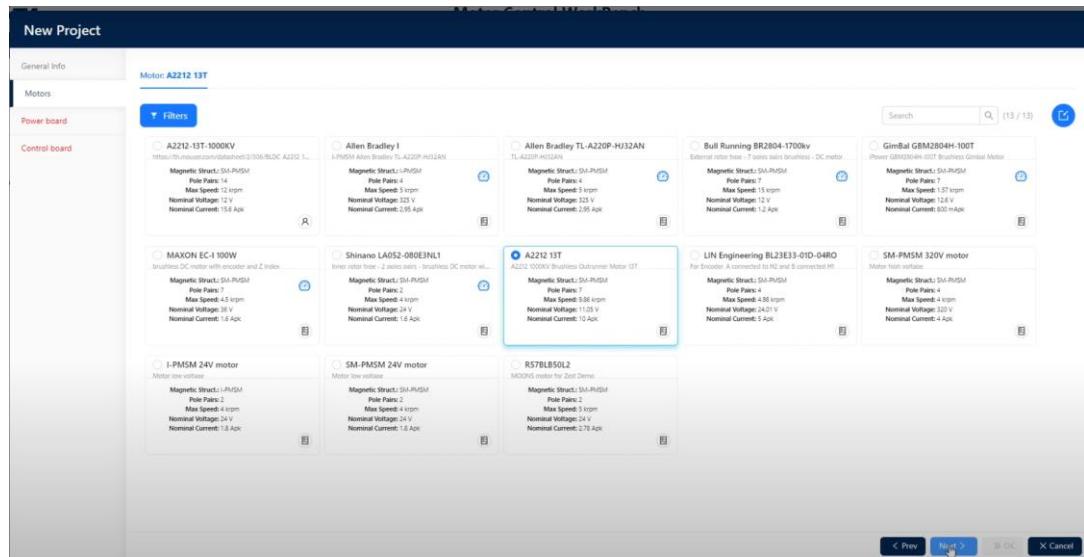
9.4 เปิดโปรแกรม MotorControl Workbench

9.5 เข้าไปยังหน้า New Project -> General info จากนั้นให้ตั้งค่าตามรูปที่



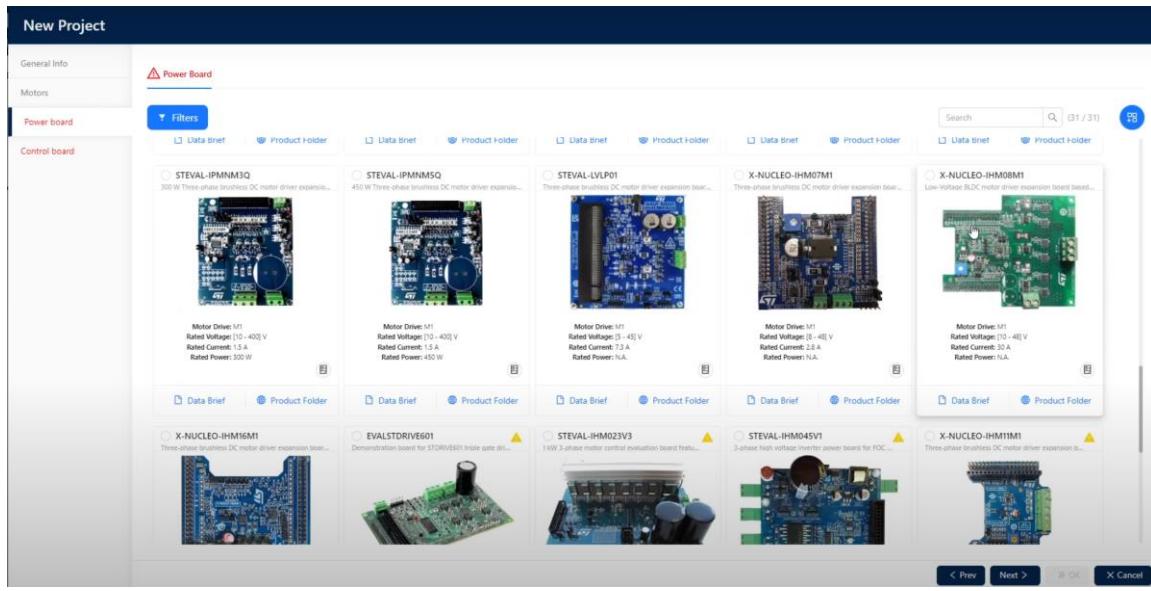
รูปที่ 16 การตั้ง Num.Motors เป็น 1 และ Driving Algorithm เป็น 6-Step

## 9.6 ไปที่หน้า Motors -> เลือก A2212 13T



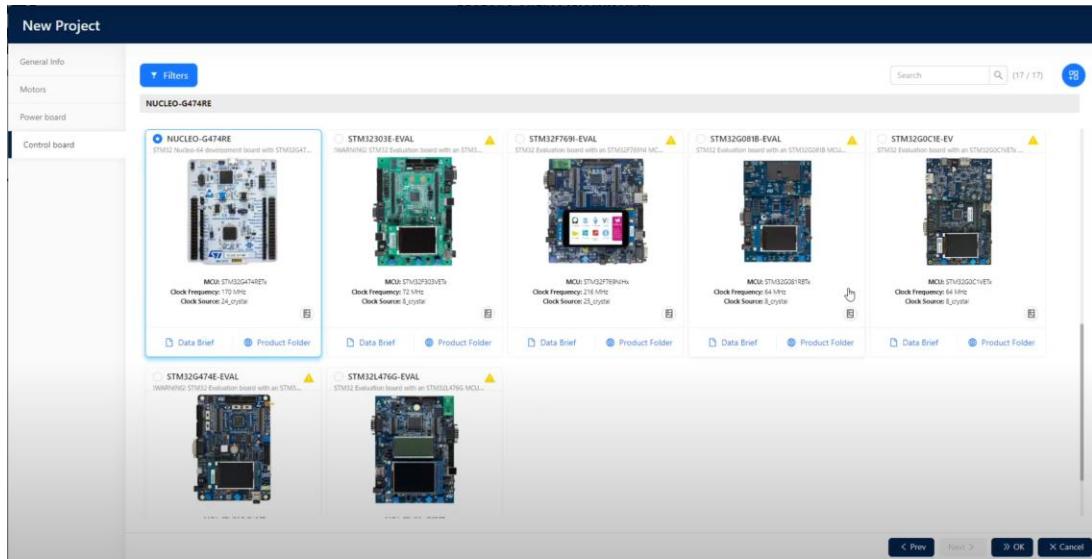
รูปที่ 17 หน้าเลือก A2212 13T

## 9.7 ไปที่หน้า Power borad -> เลือก X-NUCLEO-IHM08M1



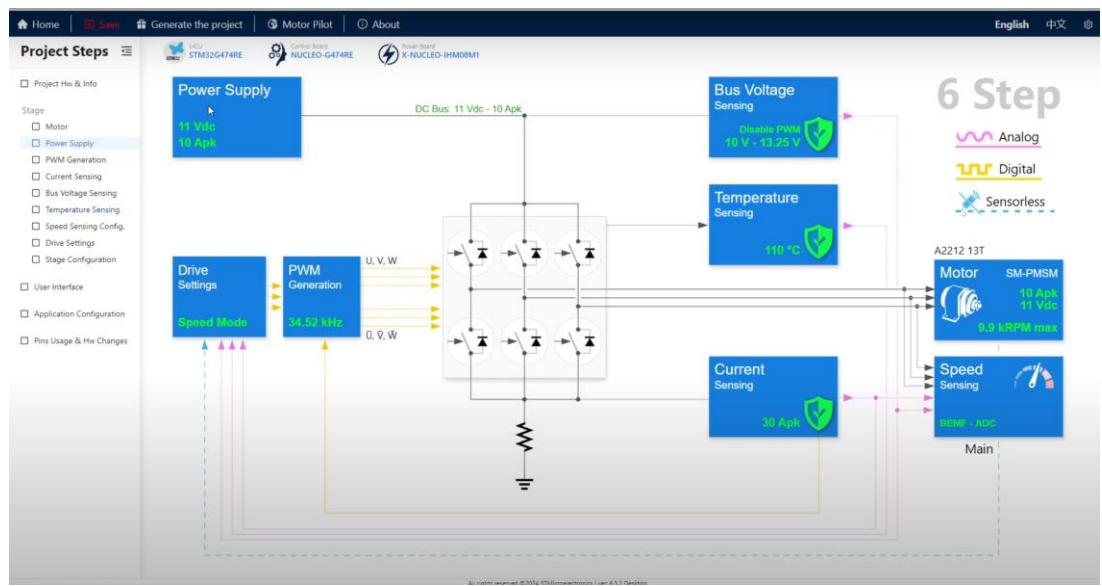
รูปที่ 18 หน้าเลือก X-NUCLEO-IHM08M1

9.8 ไปที่หน้า Control borad -> เลือก Nucleo STM32G474RE



รูปที่ 19 หน้าเลือก Nucleo STM32G474RE

9.9 กดไปที่ Power supply -> ตั้งค่า Motor Max current เป็น 15 Apc, Max DC Voltage เป็น 12 V

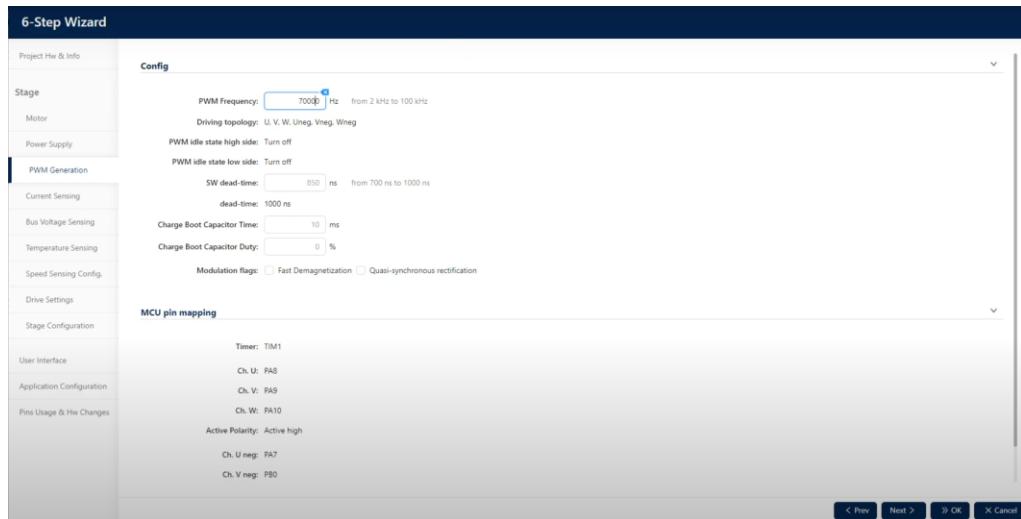


รูปที่ 20 หน้าProject

The screenshot shows the '6-Step Wizard' configuration screen for a motor. The left sidebar lists stages: Stage (Motor), Power Supply, PWM Generation, Current Sensing, Bus Voltage Sensing, Temperature Sensing, Speed Sensing Config., Drive Settings, Stage Configuration, User Interface, Application Configuration, and Pins Usage & Hw Changes. The main panel shows 'General Info' for a motor named 'A2212 13T' with a description 'A2212 1000KV Brushless Outrunner Motor 13T'. Under 'Motor parameters', it specifies 'Motor magnetic structure: SM-PMSM' and 'Pole Pairs: 7'. Under 'Electrical parameters', it shows 'Max current: 15 Apeak', 'Max DC Voltage: 12 V', 'Rs: 0.1 Ω', 'Ls: 0.002 mH', 'B-Emf constant: 0.822 Vrms/kRPM', and 'Rated Flux: 0.005752 V/V·Hz'. Under 'Mechanical parameters', it lists 'Inertia: 0.55 μN·m·s²'.

รูปที่ 21 การตั้งค่า Motor

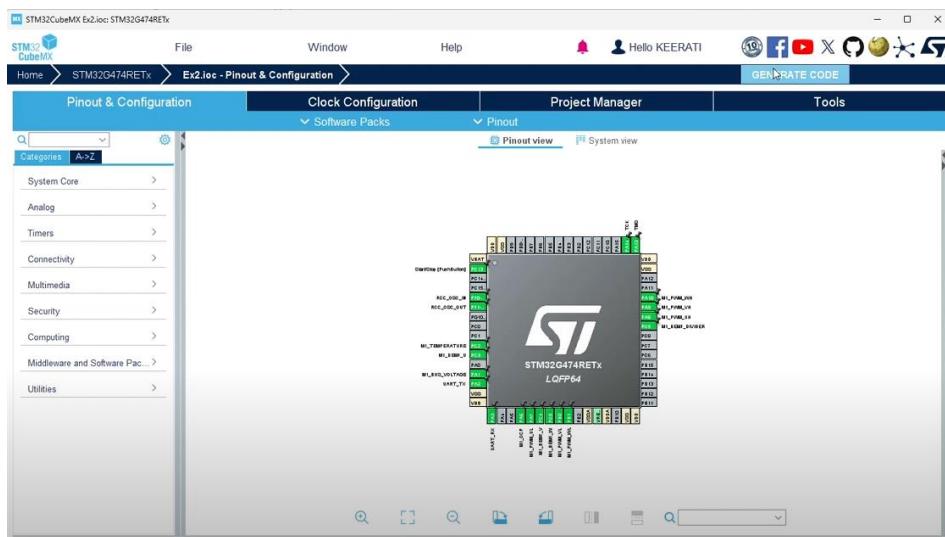
9.10 จากนั้นให้เข้าไปที่หน้า PWM Generation -> ตั้งค่า PWM Frequency เป็น 70000 Hz



รูปที่ 22 การตั้งค่า PWM Generation

9.11 กด Generate The Project -> Run STM32CubeMX

9.12 หลังจากเปิด STM32CubeMX -> กด Generate Code ตามรูปที่ 22



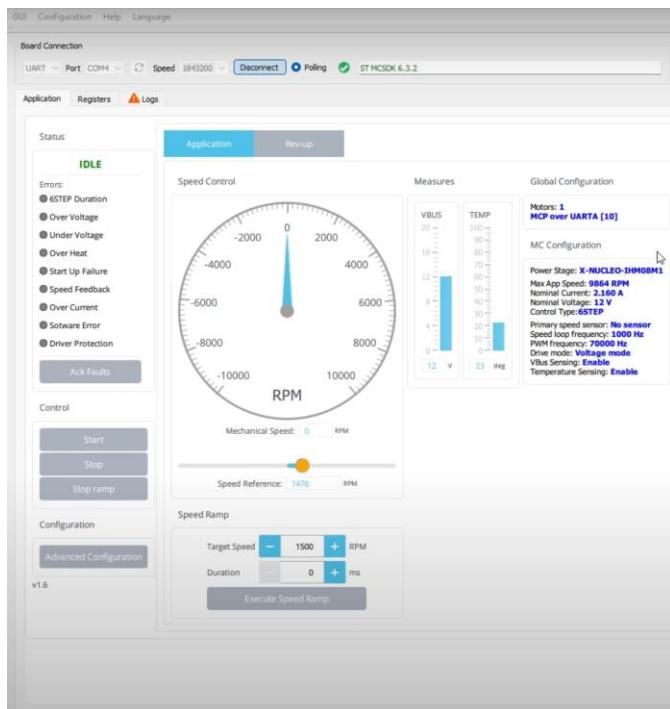
รูปที่ 23 หน้า STM32CubeMX

9.13 หลังจากเปิด STM32CubeIDE -> กด Run Code

9.14 กลับมาเปิด MotorControl Workbench -> กด Motor Pilot

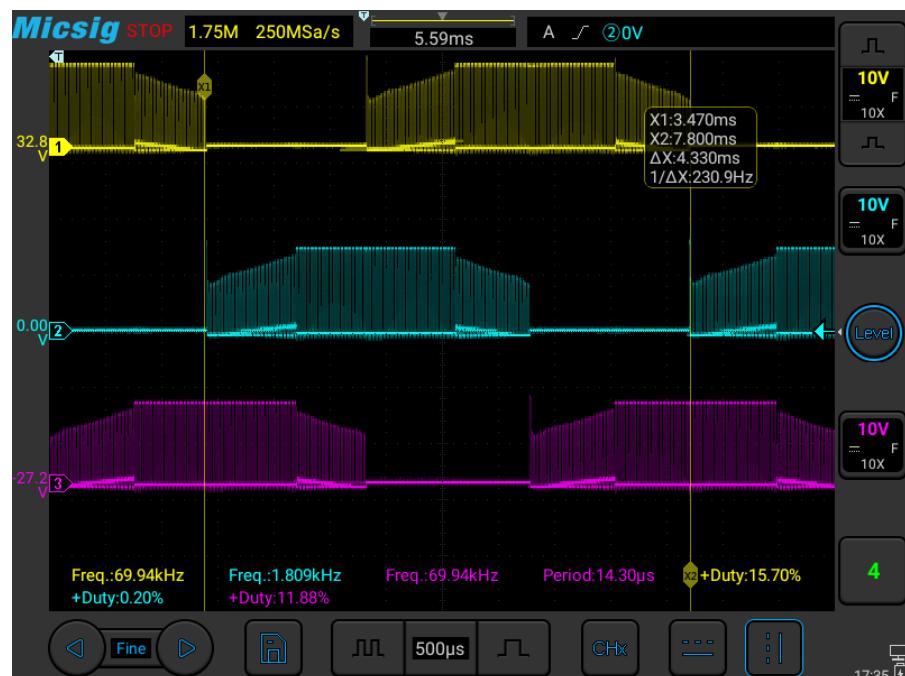
9.15 ต่อสาย Oscilloscope ที่บอร์ด

9.16 เก็บค่าบันทึกผลจาก MotorControl Workbench ที่ช่วงความห่างที่ ละ 2000 RPM เริ่มที่ 2000 RPM



รูปที่ 24 หน้าโปรแกรม Motor Pilot

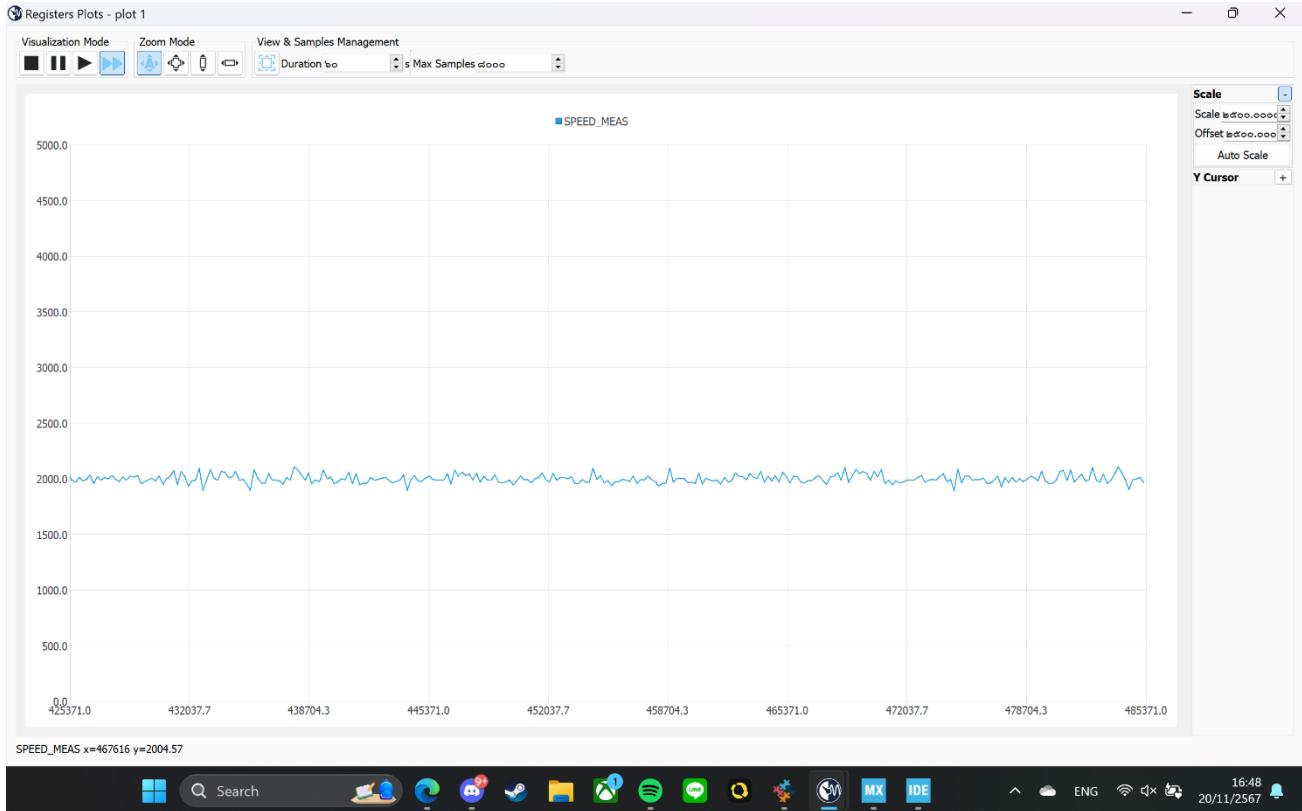
9.17 เก็บค่าบันทึกผลจาก Oscilloscope ที่ช่วงความห่างทีละ 2000 RPM เริ่มที่ 2000 RPM โดยเก็บค่าที่ 5 μs 1 รอบ และที่ 500 μs 3 รอบ



รูปที่ 25 ค่าที่ได้จาก Oscilloscope

## 10. ผลการทดลอง

### 10.1 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ 2,000 RPM



รูปที่ 26 ผลการทดลอง 2,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

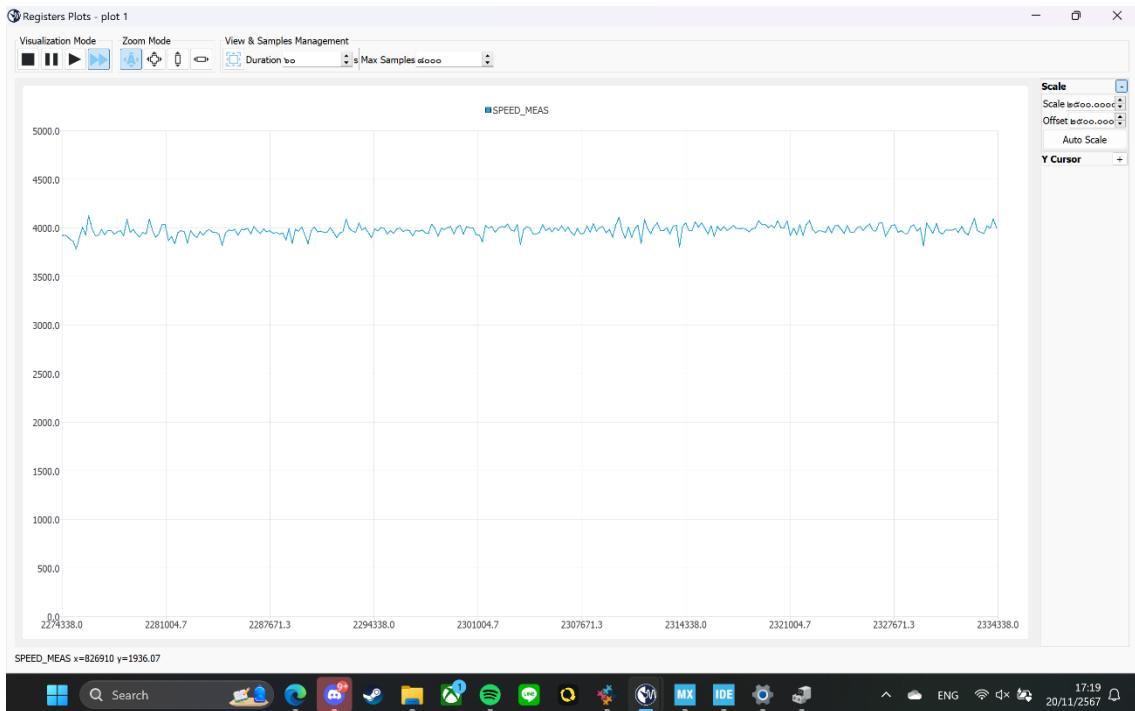


รูปที่ 27 ผลการทดลอง 2,000 RPM จาก Oscilloscope



รูปที่ 28 ผลการทดลอง 2,000 RPM จาก Oscilloscope

## 10.2 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ 4,000 RPM



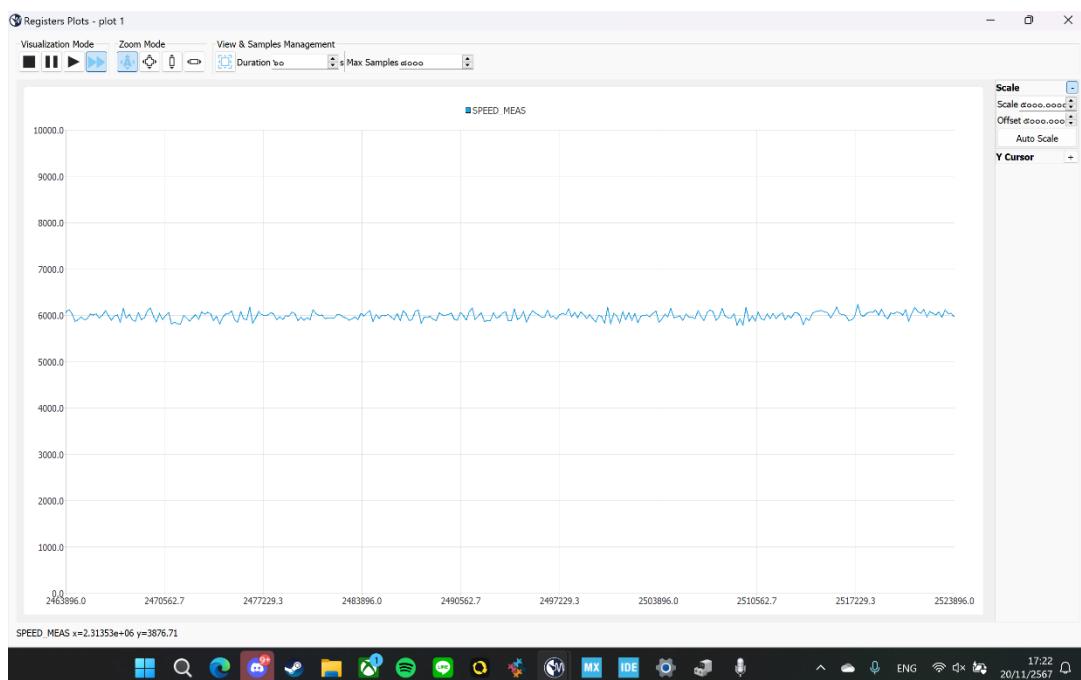
รูปที่ 29 ผลการทดลอง 4,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot



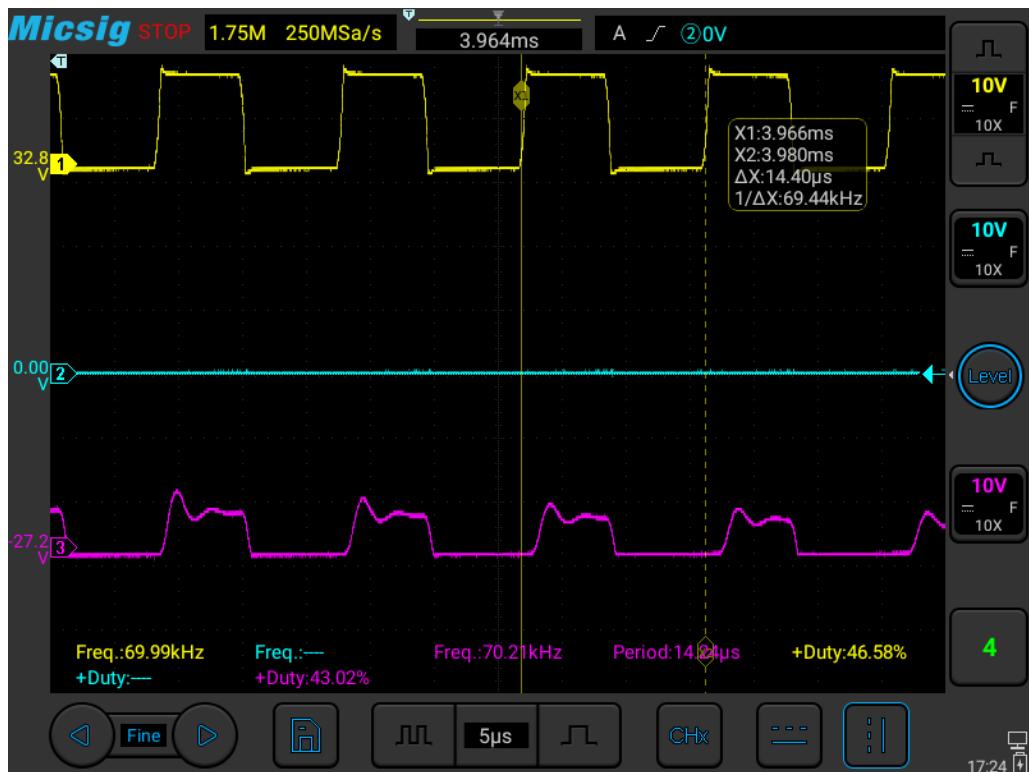
รูปที่ 30 ผลการทดลอง 4,000 RPM จาก Oscilloscope



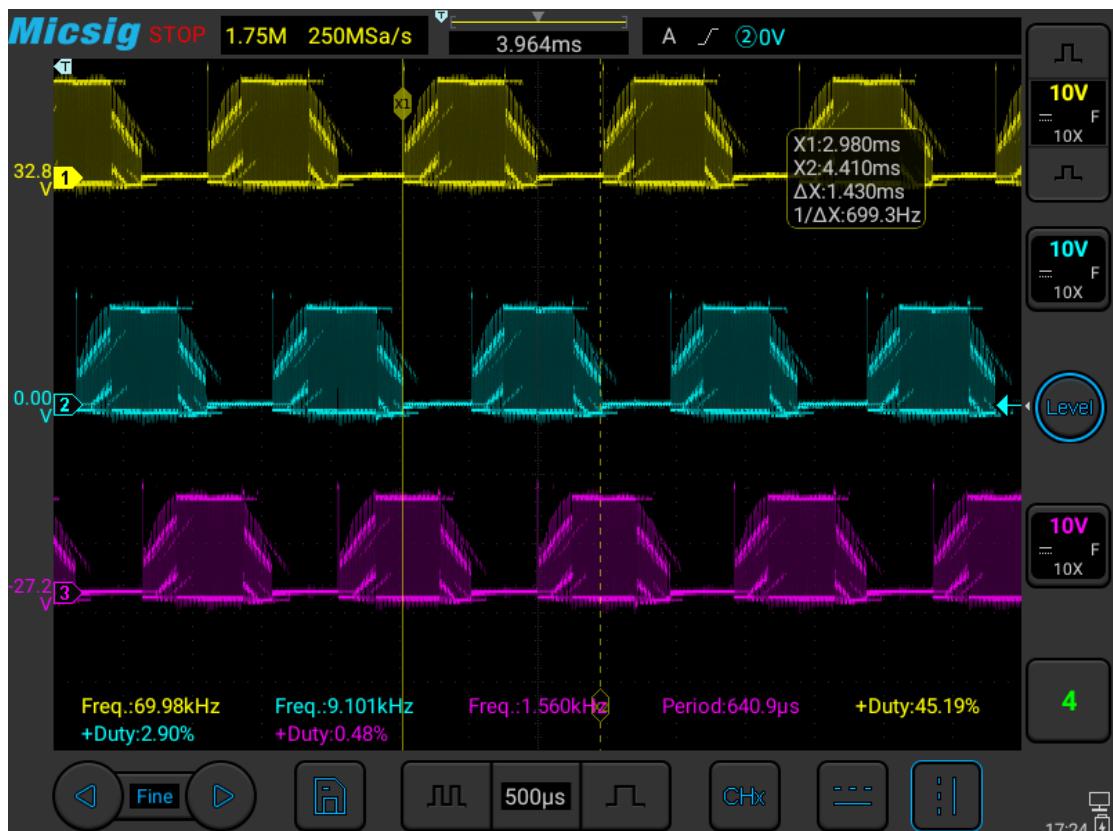
รูปที่ 31 ผลการทดลอง 4,000 RPM จาก Oscilloscope  
10.3 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ 6,000 RPM



รูปที่ 32 ผลการทดลอง 6,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

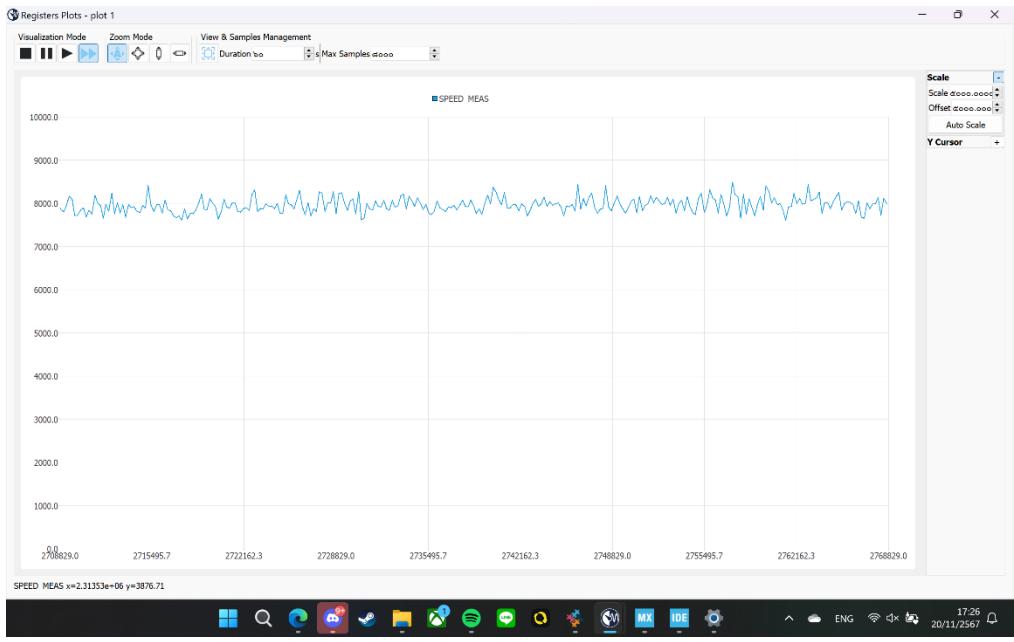


รูปที่ 33 ผลการทดลอง 6,000 RPM จาก Oscilloscope

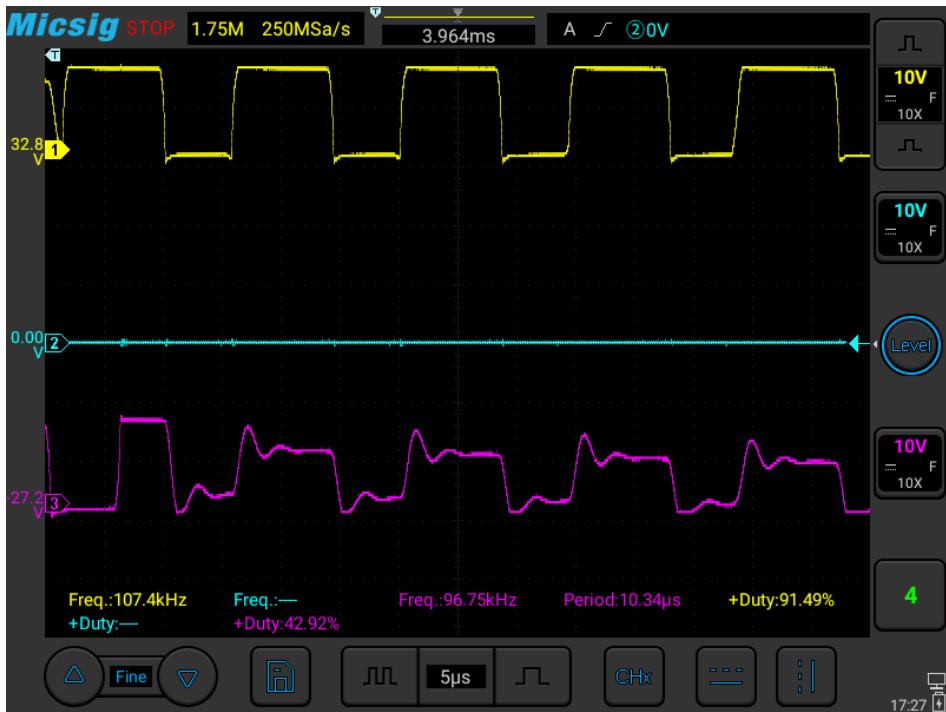


รูปที่ 34 ผลการทดลอง 6,000 RPM จาก Oscilloscope

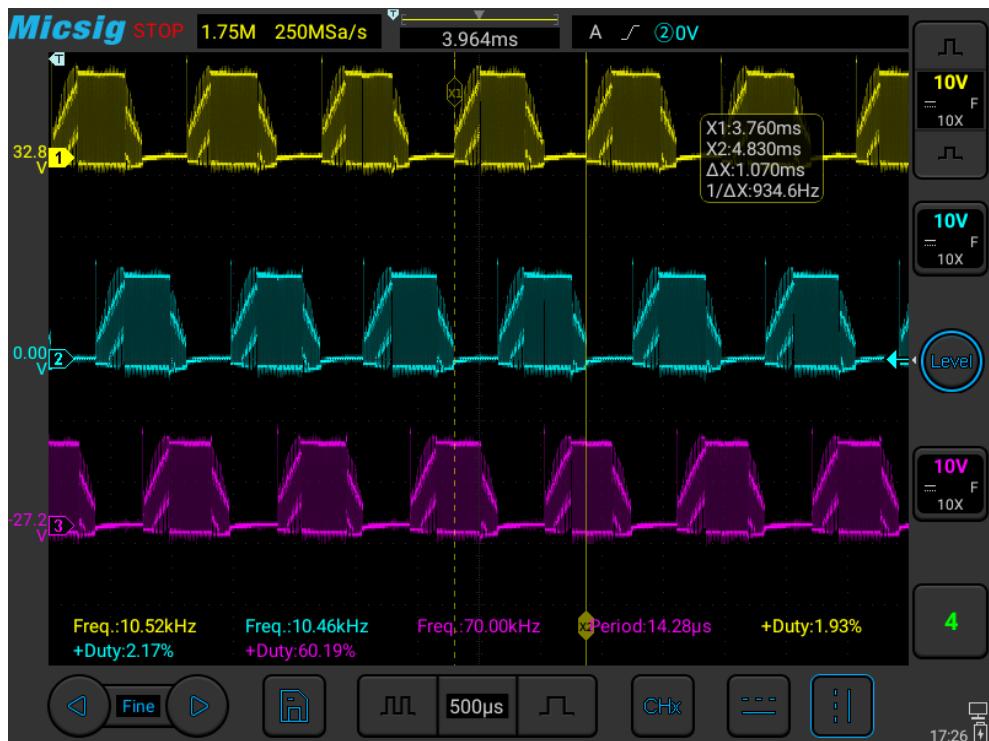
#### 10.4 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ 8,000 RPM



รูปที่ 35 ผลการทดลอง 8,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

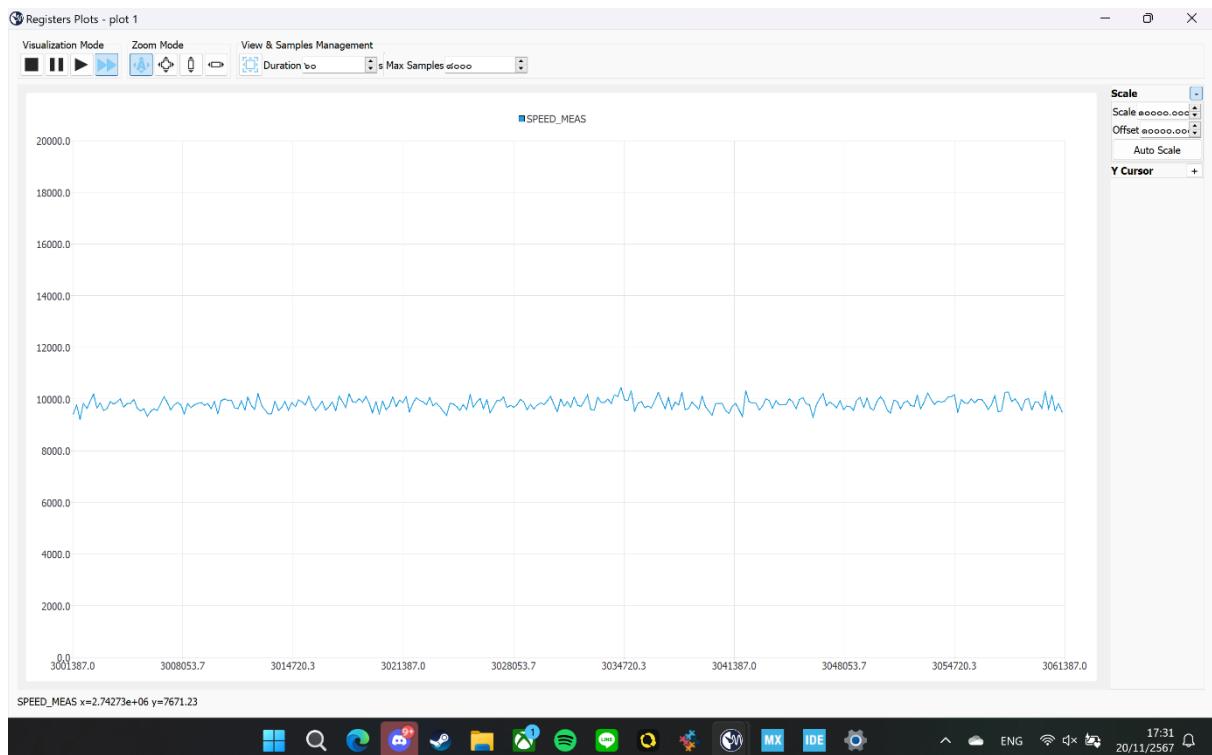


รูปที่ 36 ผลการทดลอง 8,000 RPM จาก Oscilloscope

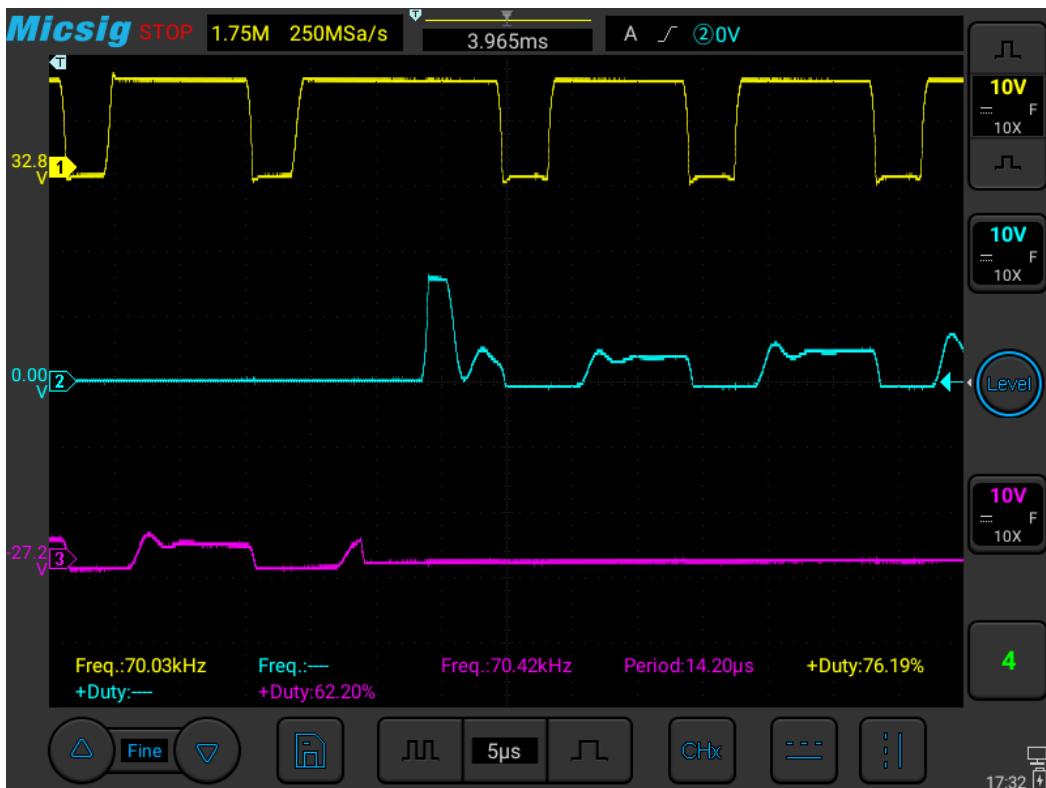


รูปที่ 37 ผลการทดลอง 8,000 RPM จาก Oscilloscope

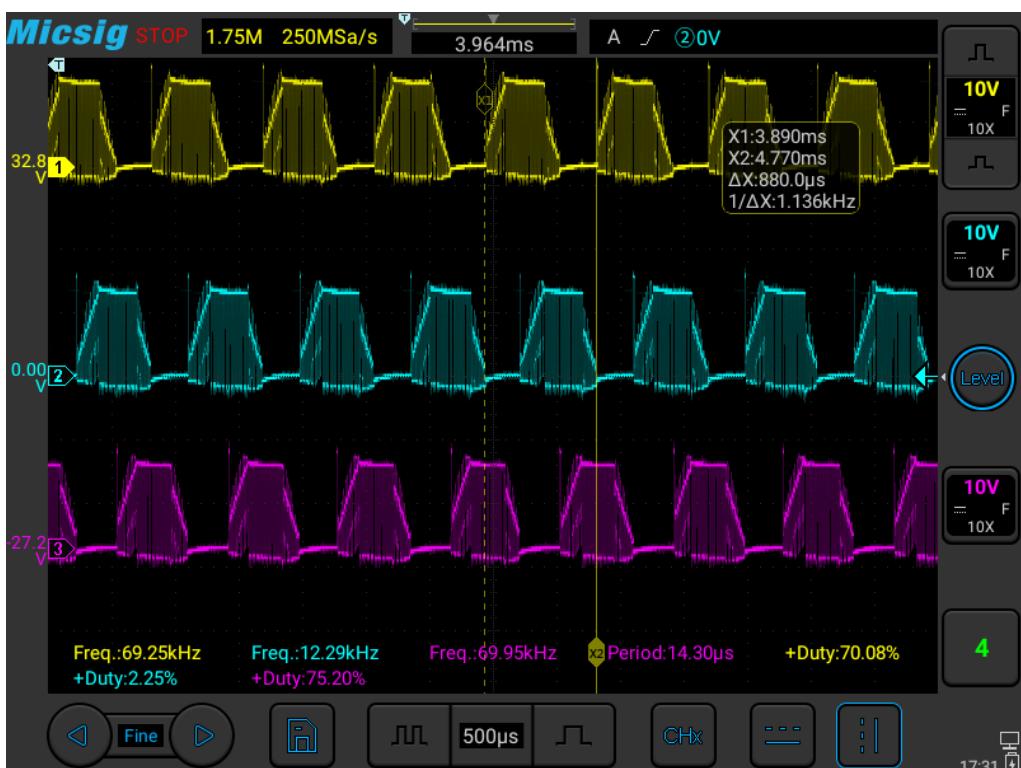
## 10.5 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ 10,000 RPM



รูปที่ 38 ผลการทดลอง 10,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

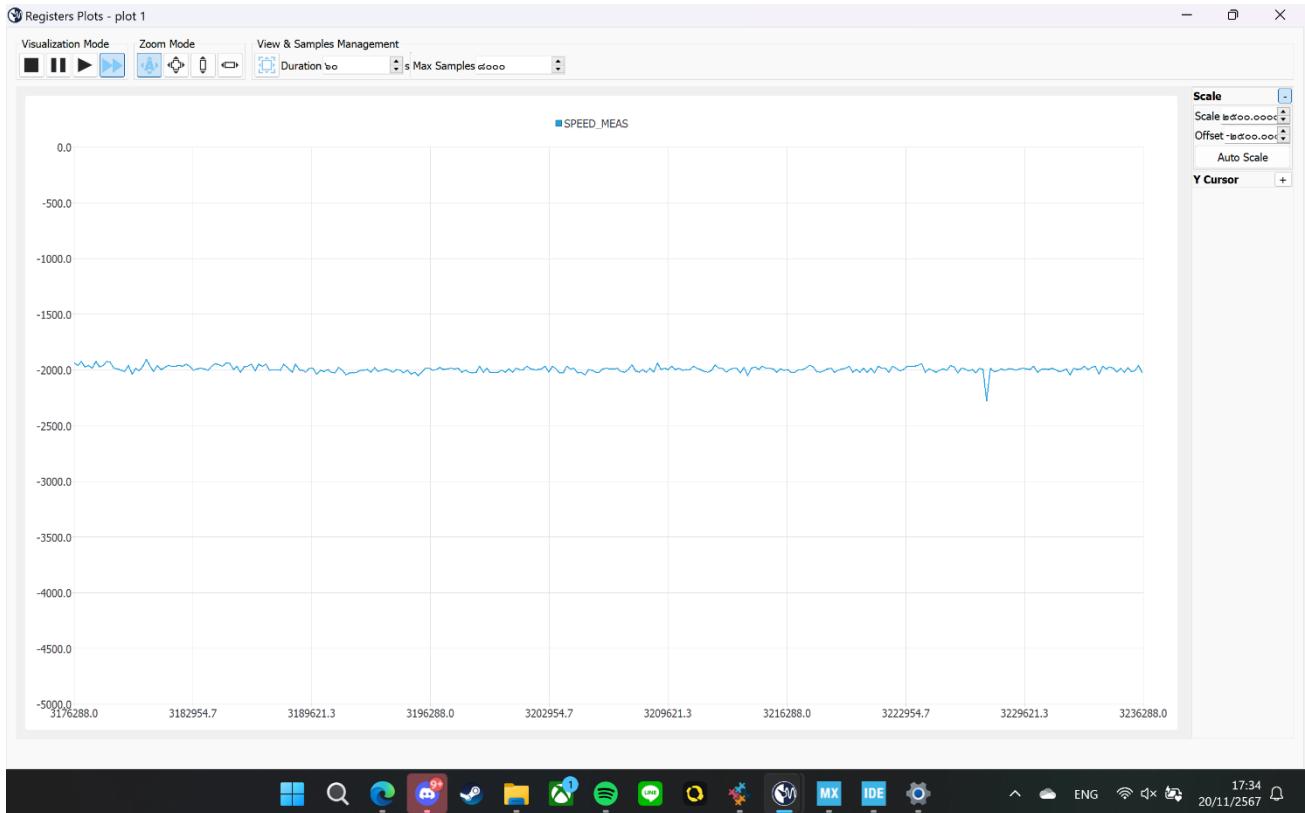


รูปที่ 39 ผลการทดลอง 10,000 RPM จาก Oscilloscope



รูปที่ 40 ผลการทดลอง 10,000 RPM จาก Oscilloscope

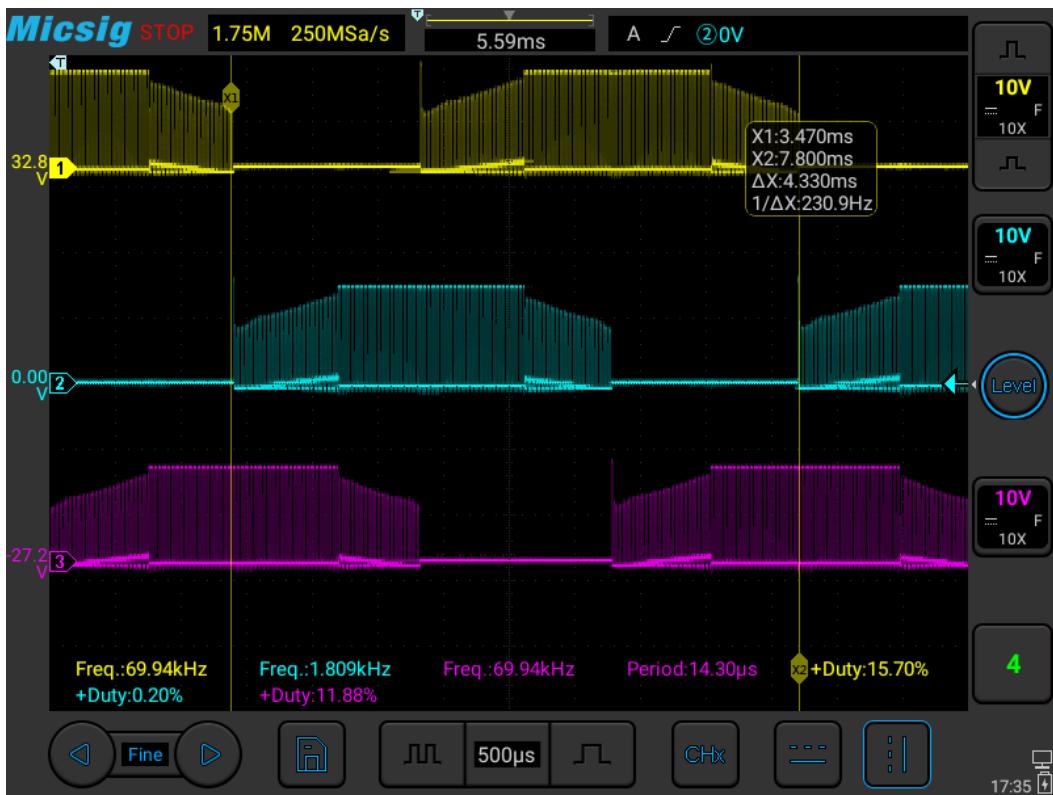
## 10.6 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ -2,000 RPM



รูปที่ 41 ผลการทดลอง -2,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

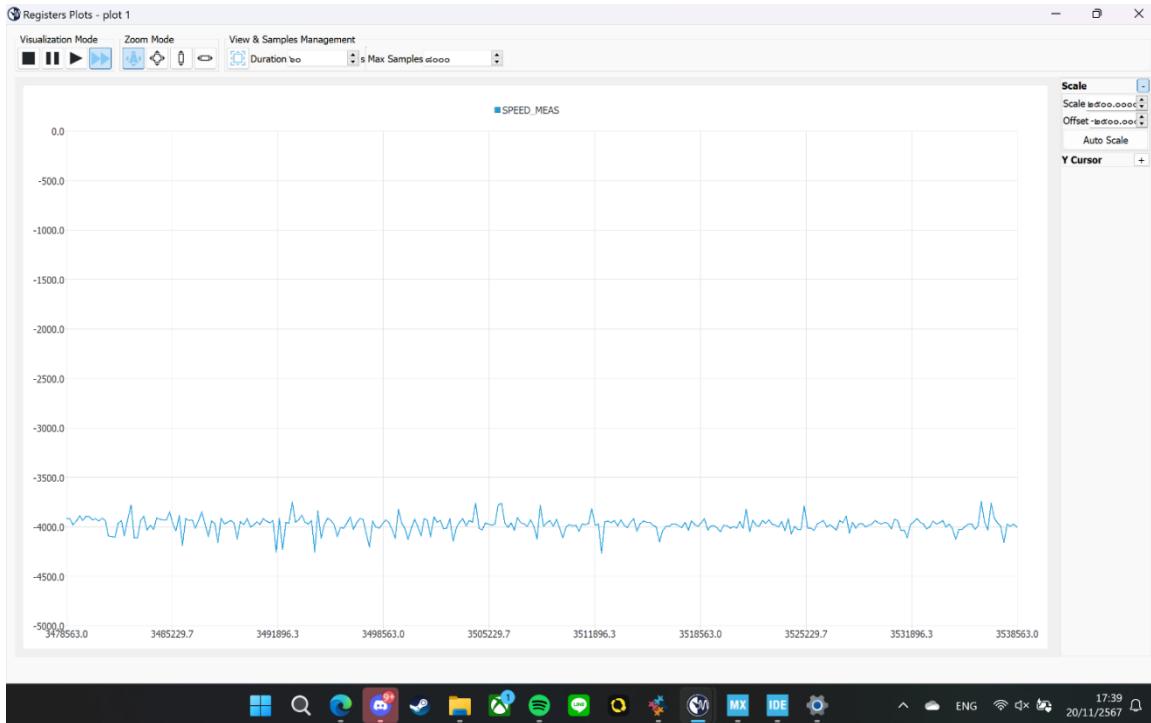


รูปที่ 42 ผลการทดลอง -2,000 RPM จาก Oscilloscope

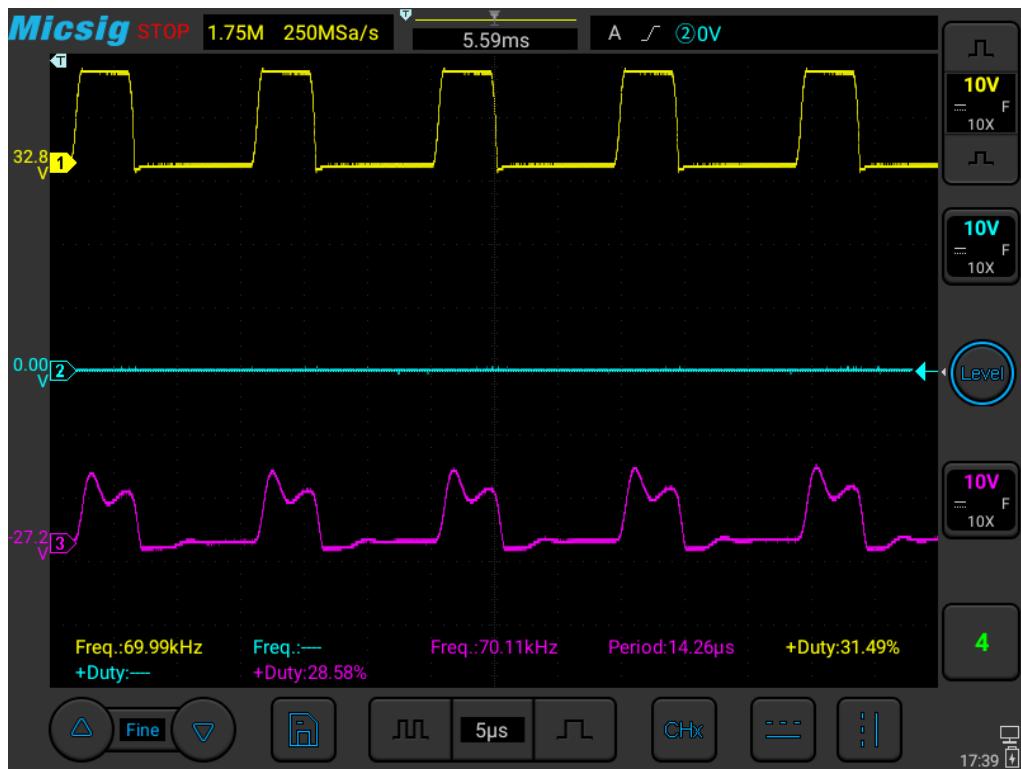


รูปที่ 43 ผลการทดลอง -2,000 RPM จาก Oscilloscope

## 10.7 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ -4,000 RPM



รูปที่ 44 ผลการทดลอง -4,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

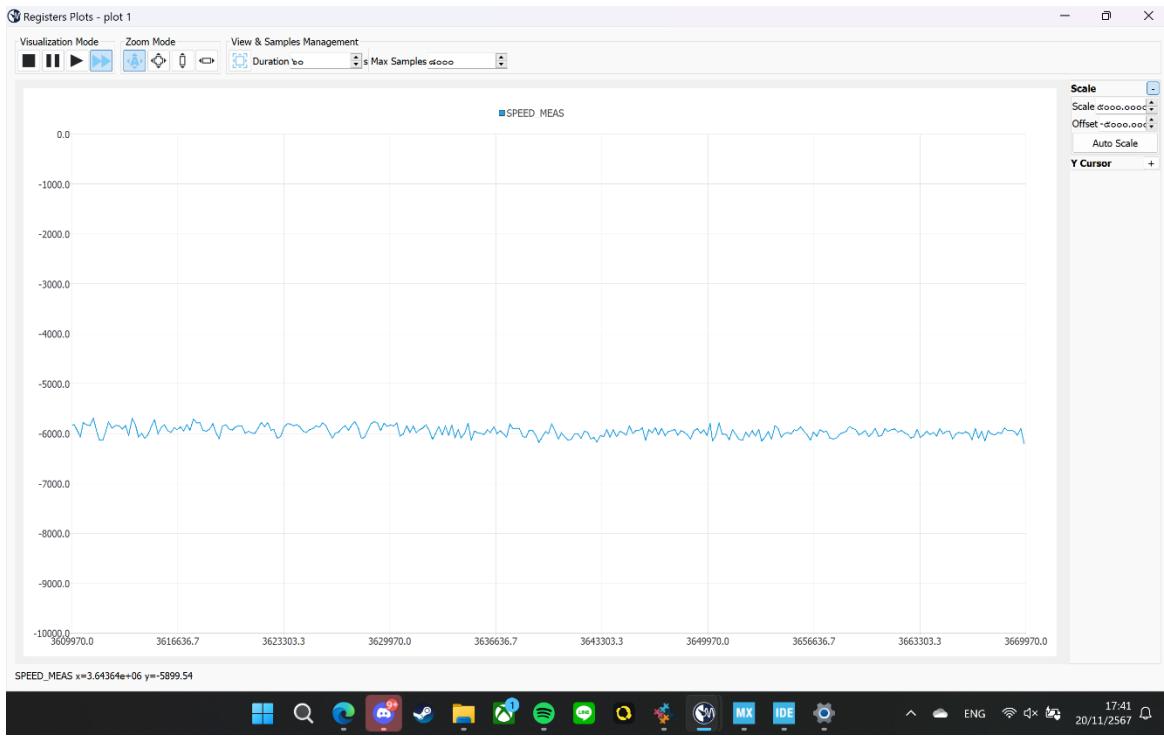


รูปที่ 45 ผลการทดลอง -4,000 RPM จาก Oscilloscope



รูปที่ 46 ผลการทดลอง -4,000 RPM จาก Oscilloscope

## 10.8 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ -6,000 RPM



รูปที่ 47 ผลการทดลอง -6,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot

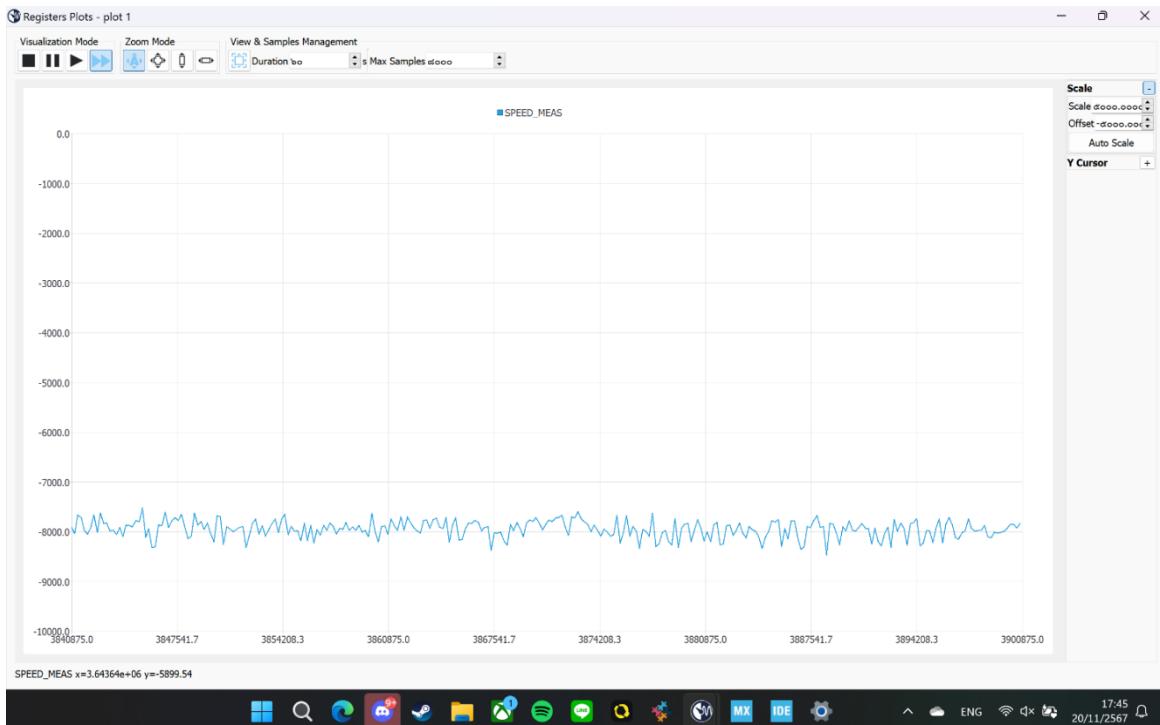


รูปที่ 48 ผลการทดลอง -6,000 RPM จาก Oscilloscope

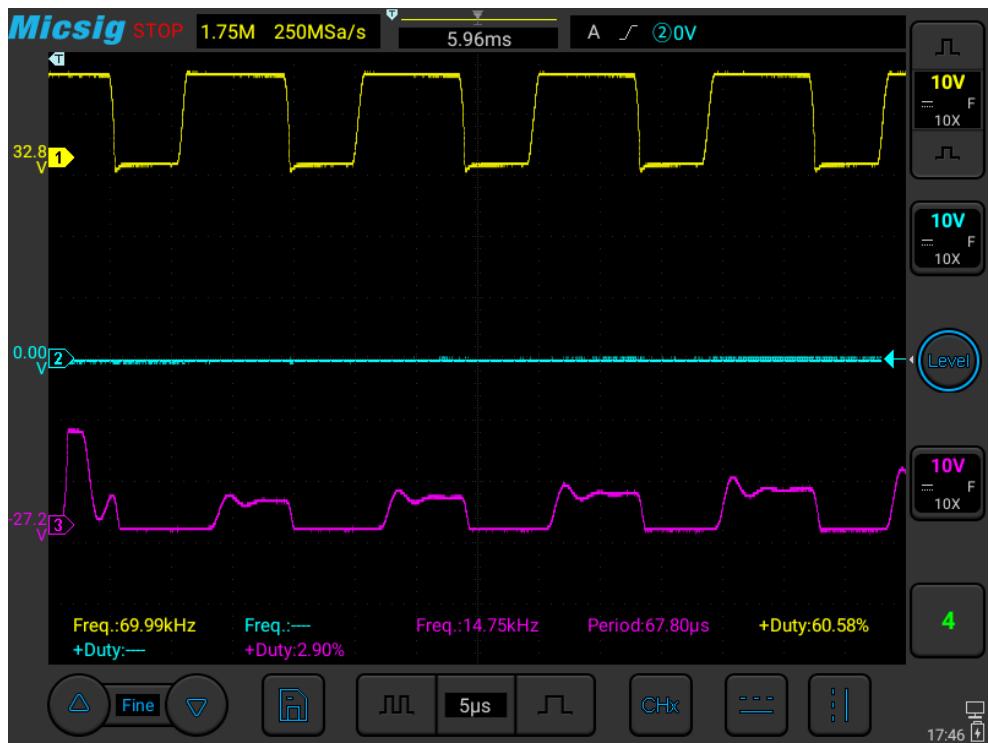


รูปที่ 49 ผลการทดลอง -6,000 RPM จาก Oscilloscope

## 10.9 การเก็บค่าที่ความเร็วรอบ -8,000 RPM



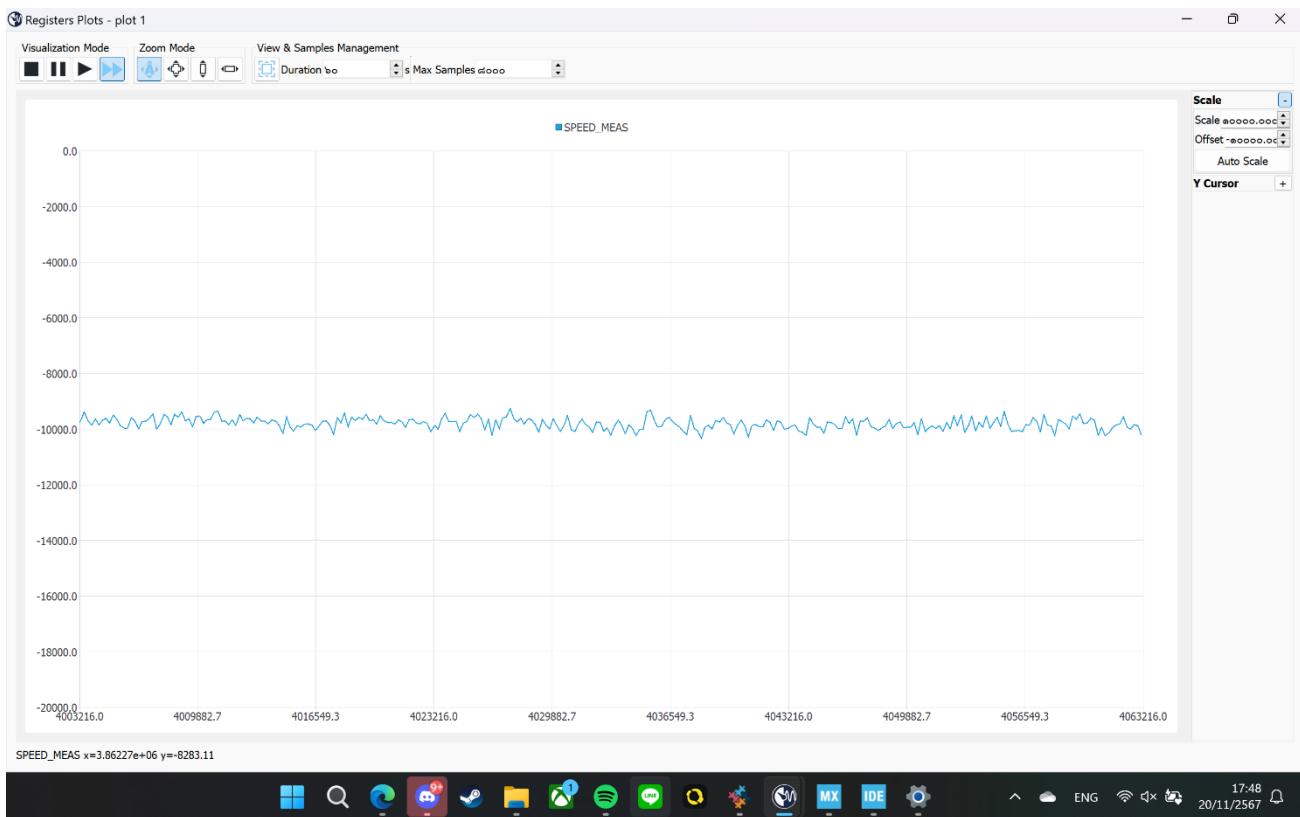
รูปที่ 50 ผลการทดลอง -8,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot



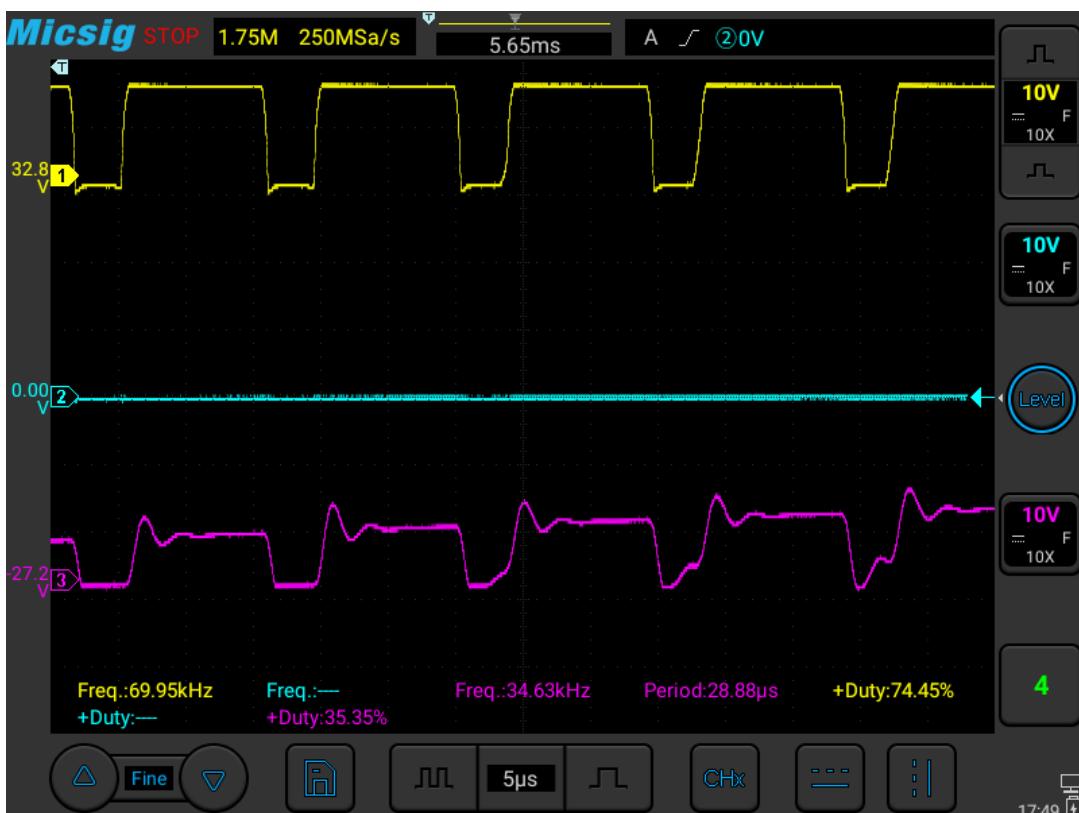
รูปที่ 51 ผลการทดลอง -8,000 RPM จาก Oscilloscope



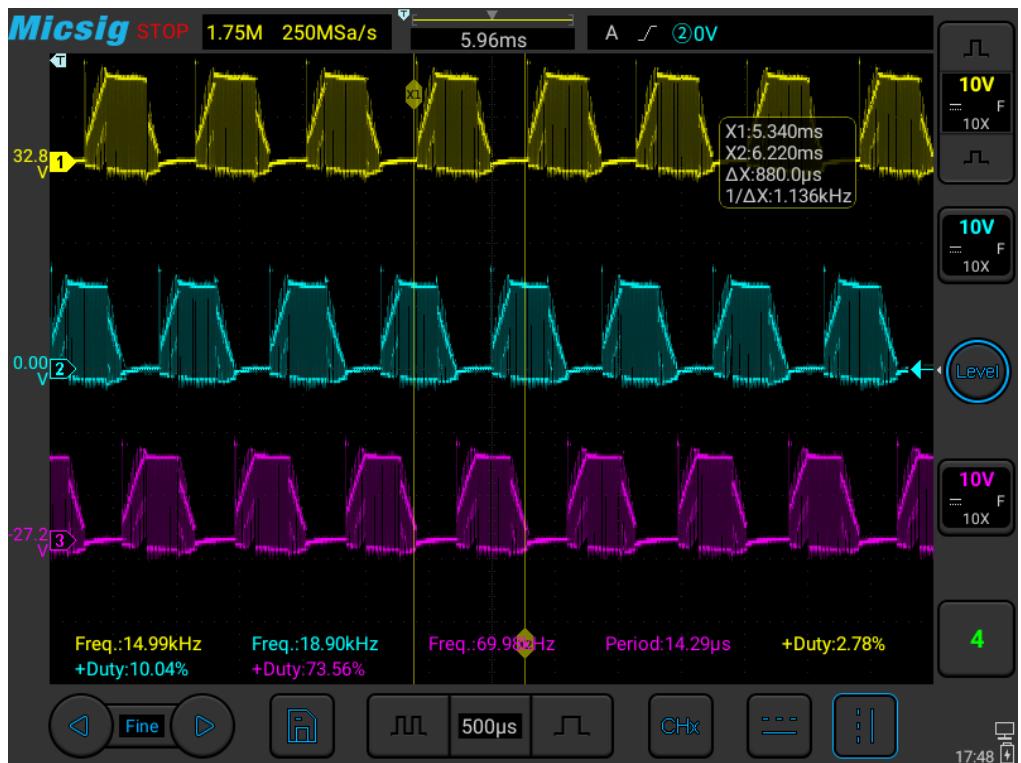
รูปที่ 52 ผลการทดลอง -8,000 RPM จาก Oscilloscope  
10.10 การเก็บค่าที่ความเร็ว rob -10,000 RPM



รูปที่ 53 ผลการทดลอง -10,000 RPM จากโปรแกรม Motor Pilot



รูปที่ 54 ผลการทดลอง -10,000 RPM จาก Oscilloscope



รูปที่ 55 ผลการทดลอง -10,000 RPM จาก Oscilloscope

จากผลการทดลองพบว่า  
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของมอเตอร์หมุนทิศตามเข็ม

ความเร็ว�อบจากโปรแกรม(RPM)	ความถี่ที่วัดได้( $1/\Delta X$ )(Hz)			ค่าเฉลี่ย
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	
2,000	237.5	230.4	225.7	231.2
4,000	487.8	476.2	471.8	478.6
6,000	709.2	699.3	704.2	704.2
8,000	934.6	917.4	925.9	926
10,000	1,136	1,124	1,120	1,126.6

## ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของมอเตอร์หมุนทิศทางเดียว

ความเร็วรอบจาก โปรแกรม(RPM)	ความถี่ที่วัดได้(1/ΔX)(Hz)			ค่าเฉลี่ย
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	
2,000	246.9	233.6	230.9	237.1
4,000	456.6	460.8	456.6	458.00
6,000	704.2	689.7	704.2	699.37
8,000	934.6	940.4	925.9	933.63
10,000	1,136	1,136	1,136	1,136

แปลง Hz เป็น RPM ได้โดยสูตร

$$RPM = \frac{f \times 120}{p}$$

โดย RPM คือ ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที (RPM)

f คือ ความถี่ของสัญญาณที่วัดได้ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (Pole Pair)

### ตารางที่ 3 ความเร็วรอบที่กำหนดกับความเร็วของมอเตอร์

ความเร็วที่กำหนดในโปรแกรม (RPM)	ความเร็วที่คำนวณได้ (RPM)
ตามเข็มนาฬิกา	
2,000	1981.71
4,000	4102.29
6,000	6036.00
8,000	7937.14
10,000	9656.57
ทวนเข็มนาฬิกา	
2,000	2032.54
4,000	3925.71
6,000	5994.6
8,000	7999.97
10,000	9737.14

นำมาหาความคลาดเคลื่อนต่อจากสูตร

$$\% Error = \frac{|(\text{ค่าที่วัดได้} - \text{ค่าจริง})|}{\text{ค่าจริง}} \times 100$$

ตารางที่ 4 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบที่กำหนดกับความเร็วของมอเตอร์

ความเร็วรอบจากโปรแกรม ( <i>RPM</i> )	<i>RPM</i> ที่คำนวณได้ ( <i>P=14</i> )	% Error
ตามเข็มนาฬิกา		
2,000	1981.71	0.91%
4,000	4102.29	2.56%
6,000	6036	0.60%
8,000	7937.14	0.79%
10,000	9656.57	3.43%
ทวนเข็มนาฬิกา		
2,000	2032.54	1.63%
4,000	3925.71	1.86%
6,000	5994.6	0.09%
8,000	7999.97	0.00%
10,000	9737.14	2.63%

ดังนั้นจึงสามารถระบุได้ว่า

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ RPM: ผลการทดลองจากห้องส่องทางแสงแสดงให้เห็นว่าค่าความถี่เฉลี่ย ( $f$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของโปรแกรมเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างความถี่ที่วัดได้กับความเร็วของมอเตอร์

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน: เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยทั่วไปอยู่ในระดับต่ำ (ส่วนใหญ่ต่ำกว่า 5%) อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความถี่ การปัดเศษทศนิยม, หรือคุณสมบัติทางกลของมอเตอร์

## 12. ခက်ပရာယုလ်

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ไร้แปรงถ่าน (BLDC) แบบ Six-Step Control และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) ทิศทางการหมุน และสัญญาณที่วัดได้จากอิสซิล โลสโคลป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สัญญาณที่แสดงถึงลำดับการกระตุน (Commutation) ของแต่ละเฟส (U, V, W)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ ( $1/\Delta X$ ) กับ RPM: ผลการทดลองทั้งสองตาราง (ตามเข็มและหวานเข็ม) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความถี่เฉลี่ย ( $1/\Delta X$ ) ที่วัดได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบที่กำหนดจากโปรแกรม เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความถี่เฉลี่ยก็เพิ่มขึ้นตาม และเมื่อนำค่าความถี่เฉลี่ยมาคำนวณกลับเป็น RPM โดยใช้สูตร  $RPM = (f * 120) / P$  (โดยที่  $P=14$ ) พบร่วมค่า RPM ที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับความเร็วรอบที่กำหนดไว้

ผลกระทบของทิศทางการหมุน: แม้ว่าทิศทางการหมุนจะเปลี่ยนแปลงลำดับการกระตุน (Commutation Sequence) แต่ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ทิศทางการหมุนไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความถี่เฉลี่ย ( $1/\Delta X$ ) ที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์ BLDC ที่ความถี่ของสัญญาณ Hall Sensor หรือ Back EMF ขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ไม่ใช่ทิศทาง

ถึงแม้ค่า RPM ที่คำนวณได้จะใกล้เคียงกับความเร็วรอบจากโปรแกรม แต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความถี่ การปัดเศษทศนิยม, หรือปัจจัยอื่นๆ

## 13. ข้อเสนอแนะ

13.1 เก็บค่าให้ละเอียดมากขึ้น อาจเป็นทุก ๆ 1000 RPM

## 14. เอกสารอ้างอิง

14.1 [https://en.wikipedia.org/wiki/Zero\\_crossing](https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_crossing)

14.2 <https://www.motioncontrolltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>

14.3 [https://www.researchgate.net/figure/Six-step-commutation-The-easiest-method-of-detecting-the-rotor-position-is-Hall-Effect\\_fig2\\_334077552](https://www.researchgate.net/figure/Six-step-commutation-The-easiest-method-of-detecting-the-rotor-position-is-Hall-Effect_fig2_334077552)

14.4 <https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview>