

# **RMXplorer**

## **LAB2 : Brushed DC Motor และ Stepper Motor**

---

### **Name**

- |                    |         |             |
|--------------------|---------|-------------|
| • นายจิรภัทร       | ແຢ້ມແສງ | 66340500008 |
| • นางสาวເພື່ອງພິຈາ | ຂອບໜນ   | 66340500035 |
| • นายอรรถพ         | ແຫ້ໂຄ້ວ | 66340500061 |

### **Objectives**

- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถอธิบายหลักการทำงานของ Brushed DC Motor และ Stepper Motor ได้อย่างละเอียด
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำเข้าใจโครงสร้าง ส่วนประกอบ และหลักการทำงานของ Brushed DC Motor รวมถึงการคำนวณค่า Motor-Torque Constant และ Back-EMF Constant
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้าและกลศาสตร์ของ DC Motor และศึกษาความสัมพันธ์ของ Speed, Torque, Current, Power, และ %Efficiency ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของ Brushed DC Motor โดยใช้ Dynamic Torque Motor สร้าง Load Torque ต่างๆ เพื่อพิสูจน์สมการและการภาพที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของ DC Motor
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำศึกษาการควบคุมความเร็วและทิศทางของ Brushed DC Motor โดยใช้ H-Bridge Drive ในการควบคุมทิศทางของมอเตอร์ และปรับความเร็วด้วย PWM พร้อมทั้งป้องกันการ Shoot-Through
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ Duty Cycle, Frequency, Speed, และ Current ทั้งในสถานการณ์ No Load และ Full Load
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถศึกษาและอธิบายโดยการทดลองการทำงานของ H-Bridge Drive
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถวิเคราะห์สัญญาณจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor พร้อมอธิบายกระบวนการ Signal Conditioning, Signal Processing และการจัดการข้อมูล
- เพื่อให้คณะผู้จัดทำสามารถเขียนโปรแกรมที่ใช้บอร์ด Nucleo STM32G474RE เพื่อสั่งการ DC Motor โดยใช้สัญญาณจาก Incremental Encoder และ Hall Current Sensor เป็น Input และแสดงผลแบบ Real-Time ด้วย Data Inspector ใน MATLAB Simulink เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุม และกระแสไฟฟ้า

## 1. ศัพท์เฉพาะทาง

- 1.1. **Brushed DC Motor:** มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการทำงาน
- 1.2. **Stepper Motor:** มอเตอร์ที่หมุนเป็นขั้นตอนตามสัญญาณอินพุต
- 1.3. **Torque:** แรงหมุนที่เกิดจากมอเตอร์ (หน่วย: Nm)
- 1.4. **Speed:** ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ (หน่วย: rad/s หรือ RPM)
- 1.5. **Motor-Torque Constant ( $k_t$ ):** ค่าคงที่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส (หน่วย: Nm/A)
- 1.6. **Back-EMF Constant( $k_e$ ):** ค่าคงที่ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันย้อนกลับ (Back-EMF) กับความเร็ว เชิงมุม (หน่วย: V/rad/s)
- 1.7. **Efficiency (%Efficiency):** ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่แสดงสัดส่วนพลังงานที่ใช้งานได้จริงต่อพลังงานที่จ่ายเข้า
- 1.8. **H-Bridge Drive:** วงจรที่ใช้ควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์
- 1.9. **Sign-Magnitude Mode:** โหมดควบคุมที่ใช้สัญญาณ PWM เพื่อปรับความเร็ว และใช้สัญญาณขั้วเพื่อกำหนดทิศทาง
- 1.10. **Locked Anti-Phase Mode:** โหมดควบคุมที่ใช้ PWM สลับเฟสเพื่อปรับทิศทางและความเร็วพร้อมกัน
- 1.11. **Shoot-Through:** สถานการณ์ที่ทรานซิสเตอร์ใน H-Bridge เปิดทั้งคู่พร้อมกัน ทำให้เกิดกระแสไฟหลัดดวงจร
- 1.12. **PWM (Pulse Width Modulation):** เทคนิคการควบคุมสัญญาณเพื่อปรับความเร็วของมอเตอร์ โดยเปลี่ยนความกว้างของพัลส์
- 1.13. **Duty Cycle:** อัตราส่วนของเวลาที่สัญญาณ PWM เปิดต่อเวลารอบทั้งหมด (หน่วย: %)
- 1.14. **Incremental Encoder:** เซ็นเซอร์วัดตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์โดยส่งสัญญาณแบบเป็นชั้น
- 1.15. **Hall Current Sensor:** เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าผ่านหลักการของเอฟเฟกต์ฮอลล์
- 1.16. **Signal Conditioning:** การปรับสัญญาณให้เหมาะสมสำหรับการประมวลผล เช่น การกรองสัญญาณ
- 1.17. **Signal Processing:** การวิเคราะห์และแปลงข้อมูลสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้
- 1.18. **Unwrap:** กระบวนการแก้ปัญหาค่า Wrap-around ของตำแหน่งเชิงมุมเพื่อให้ได้ค่าต่อเนื่อง
- 1.19. **Calibrate Sensor:** การตั้งค่าให้เซ็นเซอร์ทำงานได้อย่างแม่นยำ
- 1.20. **Back-EMF (Electromotive Force):** แรงดันไฟฟ้าสวนทิศที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์
- 1.21. **Current (กระแสไฟฟ้า):** ปริมาณอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านวงจร (หน่วย: A)
- 1.22. **Voltage (แรงดันไฟฟ้า):** พลังงานศักย์ที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (หน่วย: V)
- 1.23. **Power (กำลังไฟฟ้า):** พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยเวลา (หน่วย: W)
- 1.24. **Simulink:** เครื่องมือใน MATLAB สำหรับการจำลองระบบและออกแบบวงจรควบคุม
- 1.25. **Dynamic Torque Motor:** มอเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดแบบไดนามิกเพื่อใช้ในการทดลอง
- 1.26. **No Load Condition:** สภาพที่มอเตอร์ทำงานโดยไม่มีแรงบิดจากภายนอก
- 1.27. **Full Load Condition:** สภาพที่มอเตอร์ทำงานภายใต้แรงบิดสูงสุดที่รับได้

1.28. Frequency (ความถี่): จำนวนรอบการเปลี่ยนแปลงต่อวินาทีของสัญญาณ PWM (หน่วย: Hz)

1.29. Phase Delay: ความล่าช้าของเฟสระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต

## 2. ตัวแปรต้น , ตัวแปรตาม และตัวแปรที่ต้องควบคุม

### 2.1. ตัวแปรต้น

2.1.1. แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage, V): กำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

2.1.2. Duty Cycle ของ PWM (%Duty Cycle): ปรับเปอร์เซ็นต์การทำงานของสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมความเร็ว

2.1.3. ความถี่ของ PWM (Frequency, Hz): กำหนดค่าความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ส่งไปยังมอเตอร์

2.1.4. โหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ (Load Torque, Nm): กำหนดแรงบิดที่ใช้ต้านการหมุนของมอเตอร์

2.1.5. โหมดการขับ H-Bridge

### 2.2. ตัวแปรตาม

2.2.1. ความเร็วของมอเตอร์ (Speed, RPM หรือ rad/s): ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตาม Duty Cycle หรือแรงดันไฟฟ้า

2.2.2. กระแสไฟที่มอเตอร์ใช้ (Current, A): ปริมาณกระแสที่มอเตอร์ดึงจากแหล่งจ่ายไฟ

2.2.3. แรงบิดของมอเตอร์ (Torque, Nm): แรงบิดที่มอเตอร์สามารถผลิตได้

2.2.4. กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (Power, W): พลังงานที่มอเตอร์ใช้ในการทำงาน

2.2.5. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%Efficiency): สัดส่วนพลังงานที่มอเตอร์เปลี่ยนเป็นแรงกล้า

2.2.6. ค่าแรงดันย้อนกลับ (Back-EMF, V): แรงดันที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ระหว่างการหมุน

### 2.3. ตัวแปรที่ต้องควบคุม

2.3.1. ค่าคงที่ของมอเตอร์: เช่น Motor-Torque Constant ( $k_t$ ) และ Back-EMF Constant ( $k_e$ )

2.3.2. ประเภทของมอเตอร์: ต้องใช้มอเตอร์รุ่นและคุณสมบัติเหมือนกันในการทดลอง

2.3.3. อุณหภูมิของอุปกรณ์: อุณหภูมิของมอเตอร์และเซ็นเซอร์ต้องคงที่เพื่อลดผลกระทบต่อการวัด

2.3.4. สภาพวงจรไฟฟ้า: เช่น ความต้านทานของสายไฟและการเชื่อมต่อที่ต้องเหมือนเดิมทุกครั้ง

2.3.5. แรงดันไฟฟ้าขาเข้า: หากไม่ได้เป็นตัวแปรต้น ต้องคงที่ระหว่างการทดลอง

2.3.6. เซ็นเซอร์และการสอบเทียบ: เซ็นเซอร์ทั้งหมดต้องผ่านการ Calibrate อย่างถูกต้อง

2.3.7. แรงเสียดทานหรือโหลดภายนอก: หากไม่ได้เป็นตัวแปรต้น ต้องคงที่เพื่อให้ผลการทดลองสม่ำเสมอ

2.3.8. ความดันบรรยากาศ: อาจมีผลต่อเซ็นเซอร์ในบางกรณี

## 3. สมมติฐาน

3.1. หากเพิ่ม ความถี่ของสัญญาณขาเข้า (Input Frequency) จะทำให้ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) ของ Stepper Motor เพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่เกิดการสูญเสียสเต็ป (Step Loss)

- 3.2. หากใช้โหมด Micro-Step Drive จะช่วยเพิ่มความละเอียดของการควบคุมตำแหน่งและลดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เมื่อเทียบกับโหมด Full-Step และ Half-Step
- 3.3. Stepper Motor จะสามารถรักษาความแม่นยำของตำแหน่งได้ดีเมื่อความถี่การขับเคลื่อน (Drive Frequency) อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับพิกัดของมอเตอร์ (Motor Specification)
- 3.4. ความเร่ง (Acceleration) ที่มากเกินไปในช่วงเริ่มต้นการหมุนจะเพิ่มโอกาสเกิดการสูญเสียสเต็ป (Step Loss)
- 3.5. การควบคุมด้วยโหมด Full-Step จะให้แรงบิดสูงสุด แต่จะมีการสั่นสะเทือนมากกว่าโหมด Half-Step และ Micro-Step
- 3.6. การควบคุมแบบ Micro-Step ช่วยให้การเคลื่อนที่ราบรื่นขึ้นและลดเสียงรบกวน แต่แรงบิดอาจลดลงเมื่อเทียบกับ Full-Step
- 3.7. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้า, กระแสไฟฟ้า และความเร็วเชิงมุม จะเป็นไปตามสมการที่สัมพันธ์กับค่าคงที่ของมอเตอร์ (Stepper Motor Constant)
- 3.8. การใช้ Incremental Encoder และ Hall Current Sensor จะสามารถวัดค่าตำแหน่ง, ความเร็วเชิงมุม และกระแสไฟฟ้าของ Stepper Motor ได้อย่างแม่นยำ หากผ่านการสอบเทียบ (Calibration) อย่างเหมาะสม
- 3.9. การสูญเสียสเต็ปจะเกิดขึ้นหากความถี่สัญญาณขาเข้าหรืออัตราเร่ง (Acceleration) สูงเกินขีดความสามารถของมอเตอร์
- 3.10. การใช้ MATLAB/Simulink จะสามารถแสดงความสัมพันธ์แบบเรียลไทม์ (Real-Time) ของ Input Signal และ Output Signal ของ Stepper Motor ผ่านกราฟที่แสดงความเร็วเชิงมุมและกระแสไฟฟ้า

## 4. นิยามเชิงปฏิบัติการ

### 4.1. Stepper Motor:

- 4.1.1. มอเตอร์ชนิดหนึ่งที่หมุนทีละขั้น (Step) โดยถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าดิจิทัล เพื่อการเคลื่อนที่ที่แม่นยำ สามารถปรับความเร็วและตำแหน่งได้โดยการควบคุมความถี่ของสัญญาณขาเข้า

### 4.2. DC Motor:

- 4.2.1. มอเตอร์กระแสตรงที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงควบคุมความเร็ว และแรงบิด

### 4.3. Duty Cycle (PWM):

- 4.3.1. อัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่สัญญาณเปิด (On) ต่อหนึ่งรอบสัญญาณ PWM ใช้ควบคุมความเร็วหรือแรงบิดของมอเตอร์

### 4.4. Frequency (PWM):

- 4.4.1. ความถี่ของสัญญาณ PWM (หน่วย Hz) มีผลต่อความเร็วในการหมุนของมอเตอร์

### 4.5. H-Bridge Drive:

**4.5.1.** วงจรที่ใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์กระสเตตรงในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง รวมถึงควบคุมความเร็ว ด้วย PWM

#### **4.6. Full-Step Drive Mode:**

**4.6.1.** โหมดการควบคุม Stepper Motor ที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อขั้ดลวด ทำให้ได้แรงบิดสูงสุดแต่มีการสั่นสะเทือน

#### **4.7. Half-Step Drive Mode:**

**4.7.1.** โหมดการควบคุม Stepper Motor ที่ผสมระหว่าง Full-Step และ Micro-Step เพื่อลดการสั่นสะเทือนและเพิ่มความละเอียด

#### **4.8. Micro-Step Drive Mode:**

**4.8.1.** โหมดที่แบ่งการหมุนของ Stepper Motor ออกเป็นขั้นเล็ก ๆ เพื่อให้การหมุนราบรื่นและแม่นยำขึ้น

#### **4.9. Torque:**

**4.9.1.** แรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์ มีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายเข้า

#### **4.10. RPM (Revolutions Per Minute):**

**4.10.1.** ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในหน่วยรอบต่อนาที

#### **4.11. Step Loss:**

**4.11.1.** การสูญเสียสเต็ปของ Stepper Motor เมื่อความถี่หรือแรงบิดเกินความสามารถของมอเตอร์

#### **4.12. Back-EMF:**

**4.12.1.** แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของขั้ดลวดมอเตอร์ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลต่อการทำงานของมอเตอร์

#### **4.13. Signal Conditioning:**

**4.13.1.** การปรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ให้เหมาะสมกับการประมวลผล เช่น การกรองสัญญาณหรือปรับค่าแรงดันไฟฟ้า

#### **4.14. Signal Processing:**

**4.14.1.** การประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์ เช่น การแปลงค่าตำแหน่งเป็นความเร็ว

#### **4.15. MATLAB/Simulink:**

**4.15.1.** ซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลสัญญาณและจำลองระบบควบคุม โดยใช้ในการแสดงผลข้อมูลจากการทดลอง

#### **4.16. Incremental Encoder:**

**4.16.1.** เซ็นเซอร์สำหรับวัดตำแหน่งหรือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ โดยใช้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของมุม

#### **4.17. Hall Current Sensor:**

**4.17.1.** เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดกระแสไฟฟ้าด้วยหลักการสนามแม่เหล็ก ช่วยให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้งาน

#### **4.18. Dynamic Torque Motor:**

**4.18.1.** อุปกรณ์ที่ใช้สร้างโหลดแรงบิด (Torque) ที่เปลี่ยนแปลงได้ เพื่อใช้ในการทดลอง

#### **4.19. Lock Anti-Phase Mode:**

**4.19.1.** โหมดการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้สัญญาณ PWM ในลักษณะสลับข้าม (Inverted) เพื่อควบคุมทิศทางและความเร็ว

#### **4.20. Sign-Magnitude Mode:**

**4.20.1.** โหมดการควบคุมมอเตอร์โดยใช้ PWM ควบคุมขั้วและความเร็วโดยตรง

#### **4.21. Calibration:**

**4.21.1.** กระบวนการปรับค่าหรือสอบเทียบอุปกรณ์ให้ได้ค่าที่แม่นยำ เช่น การปรับ Hall Current Sensor ให้สามารถแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้าที่ถูกต้อง

#### **4.22. Unwrap:**

**4.22.1.** กระบวนการปรับค่ามุ่งที่อ่านได้จาก Encoder ให้ต่อเนื่องแม้เกิด Wrap-around ที่ขอบมุ่ง (0-360 องศา)

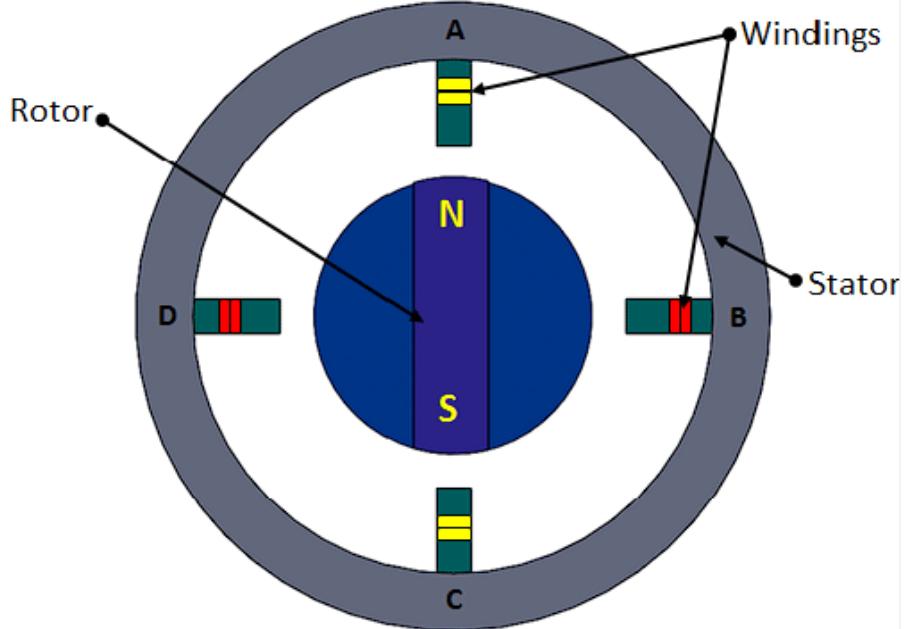
### **5. อุปกรณ์ที่ใช้**

#### **5.1. Stepper Motor**

Stepper Motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่หมุนทีละขั้น (Step) โดยการทำงานจะถูกควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้าพัลส์ ซึ่งส่งผลให้มันสามารถควบคุมมุมการหมุนและความเร็วได้อย่างแม่นยำ จึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการตำแหน่งที่แน่นอน โดย Stepper Motor สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

##### **5.1.1. Permanent Magnet (PM) Stepper Motor**

Permanent Magnet (PM) Stepper Motor เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ในโรเตอร์ โดยมีการทำงานที่โดยเด่นด้วยการเคลื่อนที่เป็นขั้น (step-by-step movement) เพื่อให้เข้าใจการทำงานของมอเตอร์ประเภทนี้ ให้พิจารณาหลักการสำคัญดังนี้:



รูปที่ 1 แสดง Disgram ของ Permanent Magnet (PM) Stepper Motor

#### 5.1.1.1. โครงสร้างของ PM Stepper Motor

##### โรเตอร์ (Rotor)

- โรเตอร์ของ PM Stepper Motor เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) แบ่งเป็นส่วนๆ รอบแกน

##### สเตเตอร์ (Stator)

- สเตเตอร์ประกอบด้วยชุดลวด (Coils) ที่วางอยู่รอบๆ โรเตอร์ และชุดลวดเหล่านี้จะถูกกระแสตุน (energized) ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

##### แหล่งจ่ายไฟและตัวควบคุม (Controller)

- ตัวควบคุมจะกำหนดลำดับของการกระแสตุนชุดลวดในสเตเตอร์เพื่อทำให้โรเตอร์หมุนทีละขั้น

#### 5.1.1.2. หลักการทำงาน

##### การสร้างสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์

- เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านชุดลวดในสเตเตอร์ จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และตำแหน่งของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนไปตามลำดับการกระแสตุนชุดลวด
- สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์จะดึงดูดขั้วของแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนเพื่อปรับตำแหน่งให้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์

##### การเคลื่อนที่ทีละขั้น

- ด้วยการกระแสตุนชุดลวดตามลำดับที่กำหนดไว้ล่วงหน้า (เรียกว่า stepping sequence) จะทำให้โรเตอร์หมุนทีละขั้นตามมุมที่กำหนด (มุมนี้เรียกว่า step angle เช่น  $1.8^\circ$  ต่อขั้น)

- Step Angle จะถูกกำหนดโดยจำนวนขดลวดของสเตเตอร์และจำนวนขั้วของแม่เหล็กภายในโรเตอร์

#### การคำนวณทิศทาง

- หากเปลี่ยนลำดับการกระตุ้นขดลวด (เช่น กลับลำดับเฟส) โรเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้าม

#### ความแม่นยำและแรงบิด

- PM Stepper Motor มีความแม่นยำสูงเนื่องจากนิวเคลียร์หมุนแต่ละขั้นถูกกำหนดไว้อีกชั้ดเจน และมอเตอร์ชนิดนี้ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วรอบต่ำ

### 5.1.1.3. การคำนวณเกี่ยวกับ Permanent Magnet Stepper Motor (PM Stepper Motor)

#### การคำนวณมุมต่อขั้น (Step Angle)

สูตร :

$$\text{Step Angle} = \frac{360^\circ}{N_s \times N_r}$$

- $N_s$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของสเตเตอร์
- $N_r$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของโรเตอร์

#### จำนวนขั้นต่อรอบ (Steps per Revolution)

สูตร :

$$\text{Step per Revolution} = \frac{360^\circ}{\text{Step Angle}}$$

#### การคำนวณความถี่การกระตุ้น (Stepping Frequency)

สูตร :

$$\text{Stepping Frequency} = \frac{\text{RPM} \times \text{Steps per Revolution}}{60}$$

- RPM = รอบต่อนาที (Revolutions Per Minute)

#### การคำนวณแรงบิด (Torque)

สูตร :

$$T = K_t \cdot I$$

- $T$  = แรงบิด (Torque) [Nm]

- $K_t$  = ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant) [Nm/A]
- I = กระแสไฟฟ้า (Current) [A]

ค่าของ  $K_t$  และ I มักจะขึ้นอยู่กับการออกแบบมอเตอร์และคุณสมบัติของขดลวด

#### 5.1.1.4. การกำหนดลำดับการกระตุ้น (Stepping Sequence)

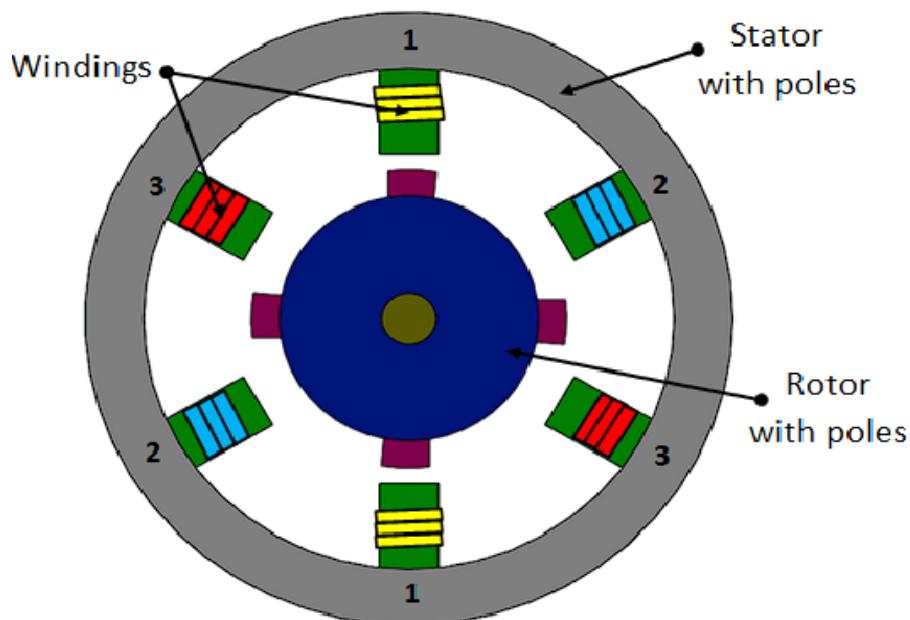
การหมุนของโรเตอร์ใน PM Stepper Motor จะขึ้นอยู่กับการกำหนดการกระตุ้นขดลวดในสเตเตเตอร์ ตัวอย่างการกระตุ้น 4 ขั้นตอนในมอเตอร์ 2 เฟส:

ขั้นตอน	ขดลวด A	ขดลวด B
1	ON	OFF
2	OFF	ON
3	ON	OFF
4	OFF	ON

ถ้าต้องการหมุนวนเข็มนาฬิกา ให้กลับลำดับการกระตุ้น เช่น 4 → 3 → 2 → 1

#### 5.1.2. Variable Reluctance (VR) Stepper Motor

Variable Reluctance (VR) Stepper Motor เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่ทำงานโดยใช้หลักการของการลดค่า reluctance หรือความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic Reluctance) ระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และสเตเตเตอร์ (Stator) ทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่เพื่อให้ตรงกับตำแหน่งที่ reluctance ต่ำที่สุด ซึ่งการทำงานของ VR Stepper Motor มีลักษณะเป็นขั้นตอน (Step) ตามสัญญาณที่ควบคุมผ่านขดลวดของสเตเตเตอร์



รูปที่ 2 แสดง Diagram ของ Variable Reluctance (VR) Stepper Motor

### 5.1.2.1. โครงสร้างของ VR Stepper Motor

#### โรเตอร์ (Rotor)

- เป็นชิ้นส่วนเหล็กหรือวัสดุแม่เหล็กอ่อนที่ไม่มีขดลวด มีฟันที่ทำให้เกิดความต่างเชิงกล (Mechanical Teeth) เพื่อให้จับกับสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์
- ทำจากเหล็กแม่เหล็กอ่อน (Soft Magnetic Material)
- ไม่มีแม่เหล็กถาวร
- มีฟัน (Teeth) หลายฟันที่จัดเรียงรอบแกน

#### สเตเตอร์ (Stator)

- ประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่วางรอบแกนสเตเตอร์เป็นชุด
- มีขดลวด (Coils) หลายชุดที่ติดตั้งไว้รอบแกน
- ขดลวดเหล่านี้จะสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไป

#### แหล่งจ่ายไฟและวงจรควบคุม (Driver Circuit)

- ใช้ในการสร้างลำดับของสัญญาณที่จ่ายให้ขดลวด
- ควบคุมลำดับการกระตุนขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่ดึงดูดฟันของโรเตอร์ให้เคลื่อนที่

### 5.1.2.2. หลักการทำงาน

#### การสร้างสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์

- เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในสเตเตอร์ สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้นรอบๆ ขดลวดนั้น
- สนามแม่เหล็กนี้จะพยายามดึงฟันของโรเตอร์ให้ตรงแนวกับขั้วของสเตเตอร์ เพื่อให้มีความเหนี่ยวนำแม่เหล็กต่ำที่สุด

#### การเคลื่อนที่ลีชั้น (Step-by-Step Movement)

- ตัวควบคุมจะกระตุนขดลวดในลำดับที่กำหนดไว้ (Stepping Sequence) ทำให้สนามแม่เหล็กหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์
- โรเตอร์จะเคลื่อนที่ทีละขั้น (Step) เพื่อติดตามสนามแม่เหล็กที่หมุนไป

#### การควบคุมทิศทางการหมุน

- ทิศทางการหมุนขึ้นอยู่กับลำดับการกระตุนขดลวด หากเปลี่ยนลำดับการกระตุน โรเตอร์จะหมุนในทิศทางตรงกันข้าม

### 5.1.2.3. การคำนวณเกี่ยวกับ Variable Reluctance (VR) Stepper Motor

การคำนวณมุมต่อขั้น (Step Angle)

สูตร :

$$\text{Step Angle} = \frac{360^\circ}{N_s \times N_r}$$

- $N_s$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของสเตเตอเริร์
- $N_r$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของสเตเตอเริร์

จำนวนขั้นต่อรอบ (Steps per Revolution)

สูตร :

$$\text{Step per Revolution} = \frac{360^\circ}{\text{Step Angle}}$$

การคำนวณความถี่การกระตุ้น (Stepping Frequency)

สูตร :

$$\text{Stepping Frequency} = \frac{\text{RPM} \times \text{Steps per Revolution}}{60}$$

- RPM = รอบต่อนาที (Revolutions Per Minute)

การคำนวณแรงบิด (Torque)

สูตร :

$$T = \frac{\Delta W}{\Delta \theta}$$

- $T$  = แรงบิด (Torque) [Nm]
- $\Delta W$  = การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ [Joules]
- $\Delta \theta$  = การเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุน (Radians)

การคำนวณพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (W):

พลังงานแม่เหล็กในระบบสามารถคำนวณได้จาก:

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

- $L$  = ความเหนี่ยวแน่น (Inductance) ของชด漉ด [Henries]

- $I$  = กระแสไฟฟ้าในชุดลวด [Amperes]

หากทราบค่า  $L$  และ  $I$  ก็สามารถหาค่าแรงบิดได้จากสูตรด้านบน

#### 5.1.2.4. การกำหนดลำดับการกระตุ้น (Stepping Sequence)

การหมุนของโรเตอร์ใน VR Stepper Motor จะขึ้นอยู่กับลำดับการกระตุ้นชุดลวดในสเตเตอร์ ตัวอย่างการกระตุ้น 4 ขั้นตอนในมอเตอร์ 3 เพส:

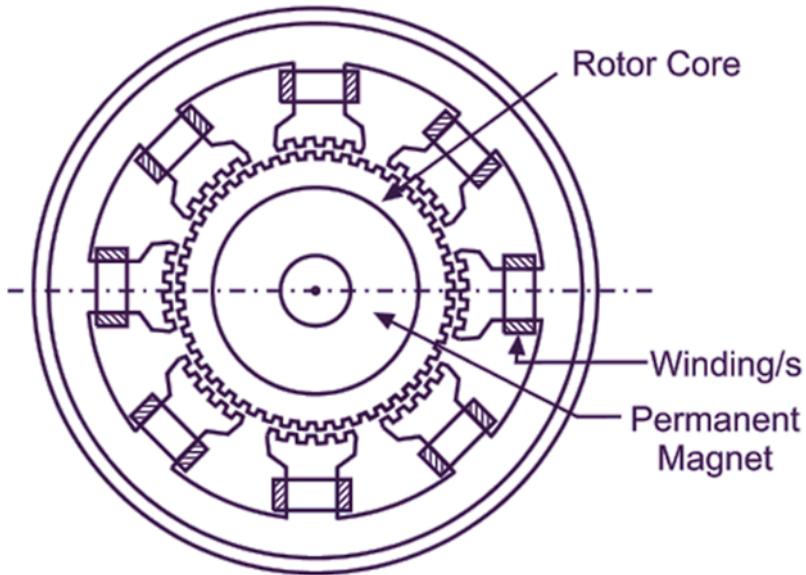
ขั้นตอน	ชุดลวด A	ชุดลวด B	ชุดลวด C	ตำแหน่งฟันของโรเตอร์
1	ON	OFF	OFF	ฟัน 1 ตรงกับข้อ A
2	OFF	ON	OFF	ฟัน 2 ตรงกับข้อ B
3	OFF	OFF	ON	ฟัน 3 ตรงกับข้อ C
4	ON	OFF	OFF	ฟัน 4 ตรงกับข้อ A

การทำงาน:

- เมื่อกระตุ้นชุดลวด A สนามแม่เหล็กจะดึงฟัน 1 ของโรเตอร์ให้ตรงกับข้อ A
- จากนั้นกระตุ้นชุดลวด B สนามแม่เหล็กจะหมุนไปดึงฟัน 2 ของโรเตอร์ให้ตรงกับข้อ B
- ทำเช่นนี้ต่อเนื่องจนโรเตอร์หมุนรอบตามลำดับการกระตุ้น

#### 5.1.3. Hybrid Stepper Motor

Hybrid Stepper Motor เป็นมอเตอร์ที่ผสมผสานคุณสมบัติของ Permanent Magnet Stepper Motor และ Variable Reluctance Stepper Motor โดยใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ในโรเตอร์ร่วมกับการออกแบบฟัน (Teeth) ในโรเตอร์และสเตเตอร์เพื่อเพิ่มความละเอียดและแรงบิด



รูปที่ 3 แสดง Diagram ของ Hybrid Stepper Motor

#### 5.1.3.1. โครงสร้างของ Hybrid Stepper Motor

##### โรเตอร์ (Rotor)

- มีแม่เหล็กถาวรที่แบ่งขั้วเหนือและใต้ (North-South Poles)
- มีฟัน (Teeth) ที่ช่วยเพิ่มความลับเฉียดของตำแหน่ง

##### สเตเตอร์ (Stator)

- มีชุดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าหลายชุด (มักจะมี 2 เฟสหรือ 4 เฟส)
- แต่ละชุดชุดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

##### ตัวควบคุม (Controller)

- ใช้ควบคุมลำดับการกระตุนชุดลวดในสเตเตอร์ (Stepping Sequence) เพื่อควบคุมการหมุนของโรเตอร์

#### 5.1.3.2. หลักการทำงานของ

##### การสร้างแรงแม่เหล็ก

- เมื่อชุดลวดในสเตเตอร์ถูกกระตุนด้วยกระแสไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจะถูกสร้างขึ้น
- สนามแม่เหล็กนี้จะพยายามดึงฟันของโรเตอร์ให้ตรงกับฟันของสเตเตอร์ที่มีสนามแม่เหล็กแรงที่สุด

##### การเคลื่อนที่ของโรเตอร์

- โรเตอร์จะหมุนไปทีละขั้น (Step) เพื่อติดตามการเปลี่ยนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นในสเตเตอร์
- การกระตุ้นชุดลวดในลำดับที่เหมาะสม (Stepping Sequence) จะทำให้โรเตอร์หมุนต่อเนื่อง

#### การทำงานแบบ Full-Step และ Half-Step

- Full-Step: กระตุ้นชุดลวดที่ลงทะเบียนหรือสองเฟสพร้อมกัน โรเตอร์จะหมุนทีละขั้นที่กำหนด (Step Angle)
- Half-Step: กระตุ้นชุดลวดในเฟสเดียวหรือสองเฟสสลับกัน ทำให้ Step Angle ลดลงครึ่งหนึ่ง เพิ่มความละเอียดในการหมุน

#### การทำงานแบบ Micro-Stepping

- ใช้การกระตุ้นชุดลวดด้วยกระแสที่ปรับเปลี่ยน ( เช่น ไซรุปคลื่น Sine) เพื่อทำให้การหมุนของโรเตอร์ละเอียดขึ้น
- ช่วยลดการสั่นสะเทือน (Vibration) และเพิ่มความแม่นยำ

#### 5.1.3.3. การคำนวณเกี่ยวกับ Hybrid Stepper Motor

##### การคำนวณมุมต่อขั้น (Step Angle)

สูตร :

$$\text{Step Angle} = \frac{360^\circ}{N_s \times N_r}$$

- $N_s$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของสเตเตอร์
- $N_r$  = จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs) ของสเตเตอร์

##### จำนวนขั้นต่อรอบ (Steps per Revolution)

สูตร :

$$\text{Step per Revolution} = \frac{360^\circ}{\text{Step Angle}}$$

##### การคำนวณความถี่การกระตุ้น (Stepping Frequency)

สูตร :

$$\text{Stepping Frequency} = \frac{\text{RPM} \times \text{Steps per Revolution}}{60}$$

- RPM = รอบต่อนาที (Revolutions Per Minute)

### การคำนวณแรงบิด (Torque)

สูตร :

$$T = \frac{\Delta W}{\Delta \theta}$$

- $T$  = แรงบิด (Torque) [Nm]
- $\Delta W$  = การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบ [Joules]
- $\Delta \theta$  = การเปลี่ยนแปลงของมุมการหมุน (Radians)

### การคำนวณพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (W):

เพื่อคำนวณพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า  $\Delta W$  คุณสามารถใช้สูตรพลังงานแม่เหล็กที่มีความหนึ่งiyawna (L) และกระแส (I) :

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

- $L$  = ความหนึ่งiyawna (Inductance) ของชด漉วด [Henries]
- $I$  = กระแสไฟฟ้าในชด漉วด [Amperes]

โดย  $L$  คือความหนึ่งiyawna (Inductance) ของชด漉วด และ  $I$  คือกระแสที่ไหลผ่านชด漉วด

#### 5.1.3.4. การกำหนดลำดับการกระตุ้น (Stepping Sequence)

การหมุนของโรเตอร์ใน VR Stepper Motor จะขึ้นอยู่กับลำดับการกระตุ้นชด漉วดในสเตเตอร์ ตัวอย่างการกระตุ้น 4 ขั้นตอนในมอเตอร์ 2 เฟสและโรเตอร์มี 50 พื้น:

ขั้นตอน	ชด漉วด A	ชด漉วด B	ตำแหน่งของโรเตอร์
1	ON	OFF	พื้นของโรเตอร์ตรงกับขั้ว A
2	OFF	ON	พื้นของโรเตอร์ตรงกับขั้ว B
3	ON	OFF	พื้นของโรเตอร์ตรงกับขั้ว A'
4	OFF	ON	พื้นของโรเตอร์ตรงกับขั้ว B'

#### 5.1.4. การขับเคลื่อน Stepper Motor (Drive Mode)

Stepper Motor สามารถขับเคลื่อนด้วยโหมดต่างๆ ซึ่งแต่ละโหมดจะส่งผลต่อความละเอียดและแรงบิดดังนี้:

##### 5.1.4.1. Full-Step Mode

ในโหมดนี้การหมุนจะเกิดขึ้นในแต่ละ Step แบบเต็มขั้น (เต็มขั้นหมายถึงการหมุนไปทีละมุนเต็มที่ เช่น  $1.8^\circ$  หรือ  $0.9^\circ$  ต่อ Step ขั้นอยู่กับมอเตอร์) โดยการกระตุ้นขาดลวดสเตเตอเรียนลำดับที่เหมาะสมจะทำให้โรเตอร์หมุนทีละ Step ตามลำดับ

###### 5.1.4.1.1. การทำงาน

- ชด漉ดบนสเตเตอเรจถูกกระตุ้นทีละชุด (หนึ่งเฟสหรือสองเฟส)
- เมื่อมีการกระตุ้นแต่ละเฟส โรเตอร์จะหมุนไปทีละตำแหน่งที่กำหนด โดยมีมุนหมุนที่แน่นอน เช่น  $1.8^\circ$  ต่อ Step
- เมื่อใช้วิธีนี้ในการขับเคลื่อน Stepper Motor จะให้แรงบิดสูงสุด แต่ความละเอียดจะต่ำ

##### 5.1.4.2. Half-Step Mode

โหมด Half-Step คือการใช้การกระตุ้นขาดลวดในรูปแบบสมรรถว่างการกระตุ้นทีละชุดและสองชุด ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มความละเอียดในการหมุนได้สองเท่าของ Full-Step

###### 5.1.4.2.1. การทำงาน

- ชด漉ดจะถูกกระตุ้นในลำดับที่สลับกันระหว่างการกระตุ้นขาดลวดเพียงเฟสเดียว (เหมือน Full-Step) และการกระตุ้นสองเฟส (ทำให้มีความละเอียดมากขึ้น)
- การหมุนของโรเตอร์จะมีมุนเล็กลง (เช่น  $0.9^\circ$  ต่อ Step ถ้าใช้มอเตอร์  $1.8^\circ$  ต่อ Step)

##### 5.1.4.3. Micro-Step Mode

Micro-Stepping คือการกระตุ้นที่แบ่งการหมุนของ Stepper Motor เป็นหลายๆ ขั้นย่อย เพื่อให้การหมุนเป็นไปอย่างนุ่มนวลและละเอียดมากขึ้น การกระตุ้นในโหมดนี้จะทำให้การหมุนของมอเตอร์มีความละเอียดสูงสุด

###### 5.1.4.3.1. การทำงาน

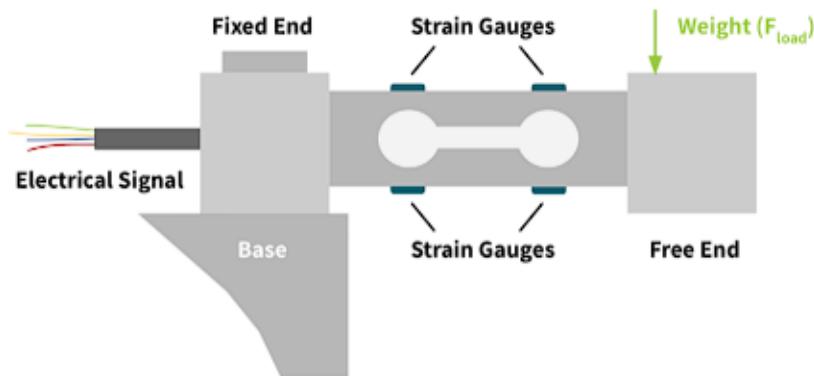
- ในโหมดนี้ ชด漉ดบนสเตเตอเรจถูกกระตุ้นในลำดับต่างๆ ทีละอีกด้วย เช่น การกระตุ้นให้เกิดแรงดันที่ไม่ใช่ค่าสูงสุดของเฟส ทำให้การหมุนสามารถแบ่งออกเป็นหลายขั้นตอนย่อย

- หากใช้มอเตอร์ที่มีมุน Step  $1.8^\circ$  การกระตุนในโหมด Micro-Step อาจทำให้ได้มุนหมุนที่ละเอียดถึง  $0.09^\circ$  หรือมากกว่านั้น
- ขนาดมุนหมุนจะขึ้นอยู่กับจำนวน Micro-steps ที่ใช้ เช่น  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  หรือ  $1/16$  ของขั้นเต็ม

## 5.2. Load Cell

Load Cell เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรง (Force) โดยทั่วไปแล้วแรงที่วัดมักเป็นแรงกด (Compression) หรือแรงดึง (Tension) อุปกรณ์นี้ใช้ในงานหลากหลาย

### 5.2.1. Strain Gauge Load Cell



รูปที่ 4 แสดง Diagram ของ Strain Gauge Load Cell

#### 5.2.1.1. หลักการทำงาน

##### 5.2.1.1.1. โครงสร้างพื้นฐาน

- Load cell ประกอบด้วย strain gauge ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนวัสดุที่สามารถยืดหยุ่นได้ (เช่น เหล็กหรืออลูมิเนียม)
- Strain gauge ทำจากลวดหรือแผ่นฟอยล์บางๆ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเฉพาะ

##### 5.2.1.1.2. การเกิด deformation

- เมื่อมีแรงมากระทำที่ load cell (เช่น แรงกดจากน้ำหนัก) ตัววัสดุที่ติดตั้ง strain gauge จะเกิดการยืดหรือหดตัว
- การยืดหรือหดตัวนี้ทำให้ strain gauge เปลี่ยนความยาวและพื้นที่หน้าตัด ซึ่งส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าของ strain gauge

##### 5.2.1.1.3. การเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า

- ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าของ strain gauge กับแรงที่กระทำอธิบายได้ด้วยกฎของ Ohm's Law:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

- $R$  = ความต้านทาน
- $\rho$  = Resistivity (ค่าความต้านทานเฉพาะ)
- $L$  = ความยาว
- $A$  = พื้นที่หน้าตัด

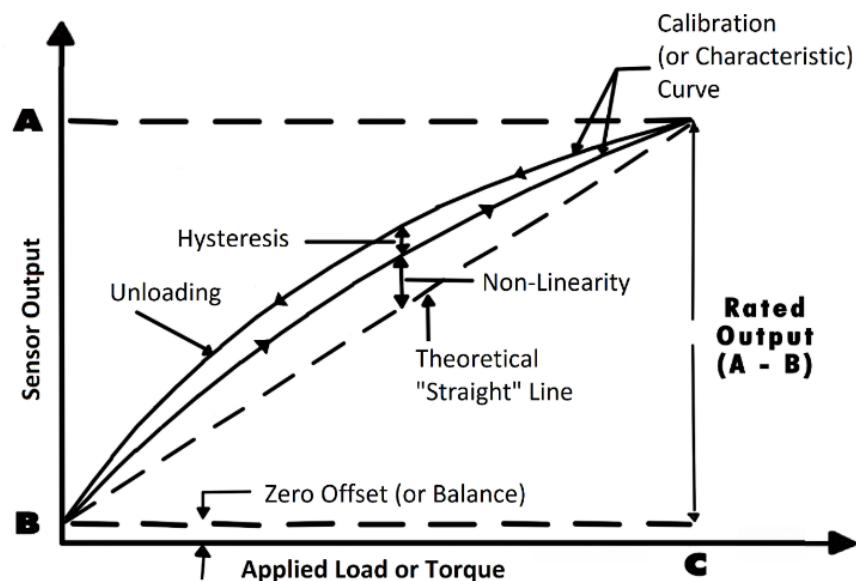
#### 5.2.1.1.4. การวัดค่าความต้านทาน

- วงจร Wheatstone Bridge ถูกใช้เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานได้อย่างแม่นยำ
- การเปลี่ยนแปลงแรงที่กระทำจะถูกแปลงเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage Output)

#### 5.2.1.1.5. การแปลงสัญญาณ

- สัญญาณแรงดันที่ได้จาก Wheatstone Bridge จะถูกขยายด้วย amplifier และแปลงเป็นค่าดิจิทัล (ผ่าน ADC: Analog-to-Digital Converter) เพื่อคำนวณและแสดงผลเป็นน้ำหนักหรือแรงที่รับได้

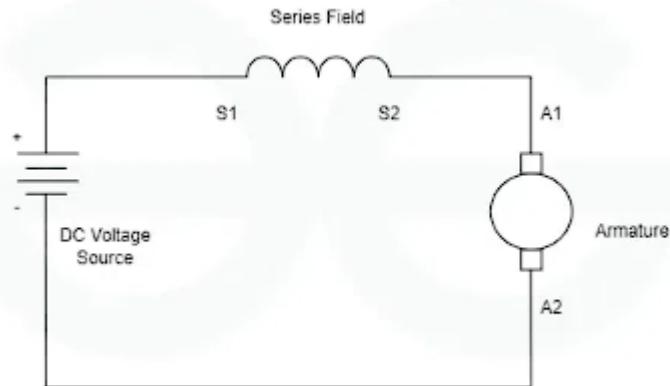
#### 5.2.1.1.6. กราฟการทำงานของ Strain Gauge Load Cell



### 5.3. DC Motor

DC Motor (มอเตอร์กระแสตรง) เป็นมอเตอร์ที่ทำงานด้วยกระแสไฟฟ้าตรง (Direct Current) และมีทั้งหมด 5 ประเภท โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อวงจรภายใน และคุณสมบัติการใช้งาน ดังนี้:

### 5.3.1. Series DC Motor



รูปที่ 5 แสดง Diagram ของ Series DC Motor

#### 5.3.1.1. โครงสร้างของ Series DC Motor

- ขาด漉ดสนามแม่เหล็ก (Field Winding):  
ต่ออนุกรมกับขาด漉ดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding)
- ขาด漉ดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding):  
อยู่ที่โรเตอร์ มีหน้าที่สร้างแรงบิด
- คอมมิวเตเตอร์ (Commutator):  
อุปกรณ์กลไกที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางกระแสในขาด漉ดอาร์เมเจอร์ เพื่อให้เกิดแรงบิดหมุนอย่างต่อเนื่อง
- แปรงถ่าน (Brushes):  
เชื่อมต่อวงจรไฟฟ้ากับคอมมิวเตเตอร์

#### 5.3.1.2. หลักการทำงาน

- การสร้างสนามแม่เหล็ก:  
เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขาด漉ดสนามแม่เหล็ก จะสร้างสนามแม่เหล็กรอบขาด漉ด
- การทำงานของอาร์เมเจอร์:  
กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขาด漉ดอาร์เมเจอร์ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) แรงนี้กระทำต่อขาด漉ดอาร์เมเจอร์ ทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ที่เพลาของมอเตอร์
- การหมุนต่อเนื่อง:

คอมพิวเตอร์เปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมจเจอร์ทุกครั้งรอบ ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีทิศทางเดียว ส่งผลให้มอเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่อง

### 5.3.1.3. การทำงานในสภาวะโหลดต่างๆ

#### กรณีไม่มีโหลด (No Load):

- กระแสไฟฟ้าต่ำ สนามแม่เหล็กอ่อน
- ความเร็วของมอเตอร์สูงมาก อาจทำให้เกิดความเสียหาย (Over-speed)

#### การทำงานในสภาวะโหลดต่างๆ (High Load):

- กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กแรงขึ้น
- แรงบิดเพิ่มขึ้นตามความต้องการของโหลด
- ความเร็วของมอเตอร์ลดลงเล็กน้อย

### 5.3.1.4. การคำนวณเกี่ยวกับ Series DC Motor

#### แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF):

$$E_b = k\Phi N$$

- $E_b$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Volt)
- $k$  = ค่าคงที่ของมอเตอร์
- $\Phi$  = พลักซ์สนามแม่เหล็ก (Weber)
- $N$  = ความเร็วรอบ (rpm)

#### แรงบิด (Torque):

$$T \times \Phi I_a$$

- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $I_a$  = กระแสอาร์เมจเจอร์ (Ampere)
- $\Phi$  = พลักซ์สนามแม่เหล็ก (Weber)

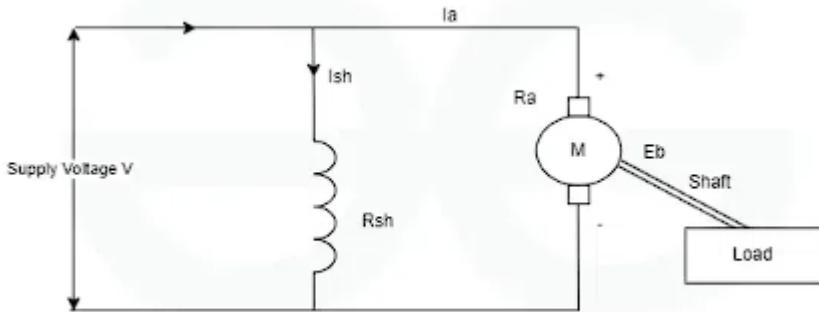
#### กำลังงานกลที่เพลา:

$$P_{mech} = T \cdot \omega$$

- $P_{mech}$  = กำลังงานกลที่เพลา (Watt)
- $T$  = แรงบิด (Nm)

- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

### 5.3.2. Shunt DC Motor



รูปที่ 6 แสดง Diagram ของ Shunt DC Motor

#### 5.3.2.1. โครงสร้างของ Shunt DC Motor

- **ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Winding):**  
ต่อขนาน (Shunt) กับขดลวดอาร์เมเจอร์
- **ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding):**  
อยู่ที่โรเตอร์ มีหน้าที่สร้างแรงบิด
- **คอมมิวเตเตอร์ (Commutator):**  
ใช้สำหรับเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์
- **แปรงถ่าน (Brushes):**  
เชื่อมต่อวงจรไฟฟ้ากับคอมมิวเตเตอร์

#### 5.3.2.2. หลักการทำงาน

- **การสร้างสนามแม่เหล็ก:**  
กระแสไฟฟ้าบางส่วนไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสร้างสนามแม่เหล็กคงที่ในสเตเตอร์ (Stator)
- **การสร้างแรงแม่เหล็กไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์:**  
กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ (ที่อยู่ในโรเตอร์) ซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยขดลวดสนาม ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ในโรเตอร์
- **การหมุนของโรเตอร์:**  
แรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ทำให้โรเตอร์หมุนตามมิวเตเตอร์จะเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อรักษาแรงบิดหมุนในทิศทางเดียวกัน

- ความเร็วคงที่:  
เนื่องจากสนามแม่เหล็กใน Shunt DC Motor มีความคงที่ ความเร็วของมอเตอร์จึงแทบไม่เปลี่ยนแปลงแม้โหลดจะเปลี่ยน

### 5.3.2.3. การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ

#### กรณีไม่มีโหลด (No Load):

- กระแสอาร์เมเจอร์ลดลง ความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
- แรงคลื่อนไฟฟ้าข้อนกลับ ( $E_b$ ) เพิ่มขึ้น จนกระแสไฟหล่อผ่านลดลงเพื่อรักษาสมดุล

#### การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ (High Load):

- กระแสอาร์เมเจอร์ ( $I_a$ ) เพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้น
- ความเร็วลดลงเล็กน้อย แรงคลื่อนไฟฟ้าข้อนกลับ ( $E_b$ ) ลดลง

### 5.3.2.4. การคำนวณเกี่ยวกับ Shunt DC Motor

#### แรงคลื่อนไฟฟ้าข้อนกลับ (Back EMF):

$$E_b = V - I_a R_a$$

- $E_b$  = แรงคลื่อนไฟฟ้าข้อนกลับ (Volt)
- $V$  = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Volt)
- $I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์ (Ampere)
- $R_a$  = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ohm)

#### แรงบิด (Torque):

$$T \times \Phi I_a$$

- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์ (Ampere)
- $\Phi$  = พลักช์สนามแม่เหล็ก (Weber)

#### กำลังงานกลที่เพลา (Mechanical Power):

$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega$$

- $P_{\text{mech}}$  = กำลังงานกลที่เพลา (Watt)
- $T$  = แรงบิด (Nm)

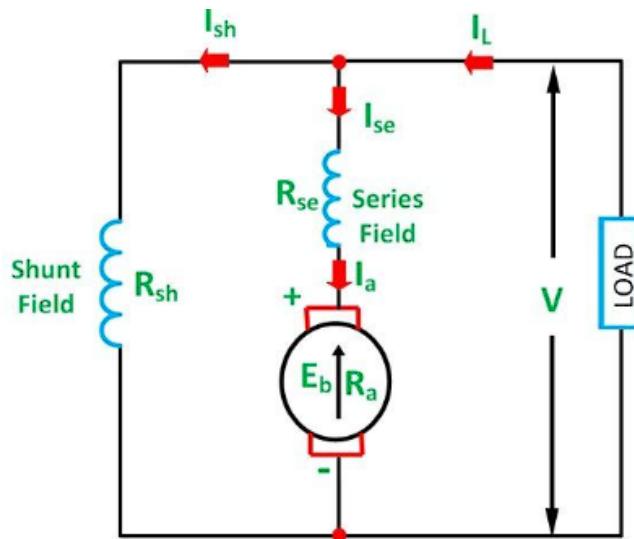
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

กระแสในวงจรสนามแม่เหล็ก (Field Current):

$$I_f = \frac{V}{R_f}$$

- $V$  = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Volt)
- $I_f$  = กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก
- $R_f$  = ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก

### 5.3.3. Compound DC Motor



รูปที่ 7 แสดง Diagram ของ Compound DC Motor

#### 5.3.3.1. โครงสร้างของ Compound DC Motor

Compound DC Motor มีการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กใน 2 รูปแบบ:

- **ขดลวดสนามแบบอนุกรม (Series Field Winding):**
  - ต้องนุ่มนวลกับขดลวดอาร์เมเจอร์
  - จำนวนรอบน้อย ลวดหนา ความต้านทานต่ำ

- ช่วยสร้างแรงบิดสูง
- ขดลวดสนามแบบขนาน (Shunt Field Winding):
  - ต่อขนานกับขดลวดอาร์เมเจอร์
  - จำนวนรอบมาก ลวดบาง ความต้านทานสูง
  - ช่วยควบคุมความเร็วคงที่

#### ประเภทของ Compound DC Motor

- Cumulative Compound Motor:

สนามแม่เหล็กจากทั้ง Series และ Shunt Winding ทำงานร่วมกัน (ในทิศทางเดียวกัน)

- แรงบิดเริ่มต้นสูง
- ความเร็วลดลงเล็กน้อยเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

- Differential Compound Motor:

สนามแม่เหล็กจาก Series และ Shunt Winding ทำงานต้านกัน (ในทิศทางตรงข้าม)

- ความเร็วสูงแต่แรงบิดเริ่มต้นต่ำ
- ไม่ค่อยนิยมใช้เพราะความเสถียรต่ำ

#### 5.3.3.2. หลักการทำงาน

- การสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux):

ขดลวด Shunt สร้างสนามแม่เหล็กคงที่ ขณะที่ขดลวด Series สร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามกระแสอาร์เมเจอร์ (ขึ้นอยู่กับโหลด)

- ใน Cumulative Compound Motor สนามแม่เหล็กจะรวมกัน ช่วยเพิ่มแรงบิด
- ใน Differential Compound Motor สนามแม่เหล็กจะหักล้างกันบางส่วน ส่งผลให้แรงบิดลดลง

- การสร้างแรงบิด (Torque):

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ในสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม ทำให้เกิดแรงบิดที่เพลา

- แรงบิดเพิ่มขึ้นตามโหลดใน Cumulative Compound Motor
- แรงบิดอาจลดลงใน Differential Compound Motor หากโหลดเพิ่มสูงมาก

- การควบคุมความเร็ว:

- ขดลวด Shunt ช่วยให้ความเร็วของมอเตอร์คงที่แม้โหลดเปลี่ยนแปลง
- ขดลวด Series เพิ่มแรงบิดเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลให้ความเร็วลดลงมาก

#### 5.3.3.3. การทำงานในสภาวะโหลดต่างๆ

##### กรณีไม่มีโหลด (No Load):

- กระแสในขดลวด Series ลดลง สนามแม่เหล็กอ่อนลง
- ความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ใน Cumulative Compound Motor)
- ใน Differential Compound Motor ความเร็วอาจสูงขึ้นเกินปกติจนเกิดปัญหา Over-speed

#### การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ (High Load):

- กระแสในขดลวด Series เพิ่มขึ้น ทำให้สนามแม่เหล็กแรงขึ้น
- แรงบิดเพิ่มขึ้นเพื่อรับโหลด
- ความเร็วลดลงเล็กน้อย (ใน Cumulative Compound Motor)

#### 5.3.3.4. สมการที่เกี่ยวข้อง

##### แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF):

$$E_b = V - I_a R_a$$

- $E_b$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Volt)
- $V$  = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Volt)
- $I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์ (Ampere)
- $R_a$  = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ohm)

##### แรงบิด (Torque):

$$T \times (\Phi_s + \Phi_f) I_a$$

- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $\Phi_s$  = พลักซ์สนามแม่เหล็กจากขดลวด Series
- $\Phi_f$  = พลักซ์สนามแม่เหล็กจากขดลวด Shunt
- $I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์

##### กำลังงานกล (Mechanical Power):

$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega$$

- $P_{\text{mech}}$  = กำลังงานกลที่เพลา (Watt)
- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

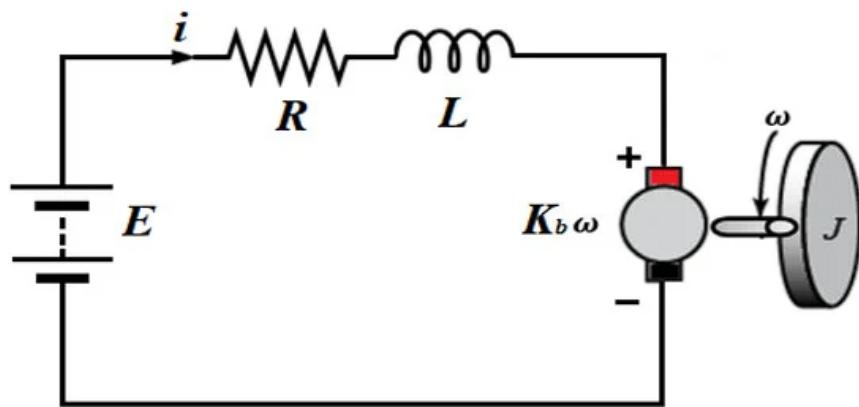
กระแสในวงจรสนามแม่เหล็ก Shunt:

$$I_f = \frac{V}{R_f}$$

- $V$  = แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Volt)
- $I_f$  = กระแสในขดลวดสนามแม่เหล็ก
- $R_f$  = ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก

#### 5.3.4. Permanent Magnet DC Motor (PMDC)

PMDC Motor เป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) แทนขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Winding) เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์ โครงสร้างที่เรียบง่ายและประสิทธิภาพสูงทำให้ PMDC มอเตอร์เหมาะสมสำหรับงานขนาดเล็กหรือการใช้งานเฉพาะด้าน เช่น ของเล่นไฟฟ้า พัดลม และเครื่องมือไฟฟ้าแบบพกพา



รูปที่ 8 แสดง Diagram ของ Permanent Magnet DC Motor (PMDC)

##### 5.3.4.1. โครงสร้างของ PMDC Motor

###### สเตเตอร์ (Stator):

- มีแม่เหล็กถาวรติดตั้งในตัวสเตเตอร์ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กคงที่
- ไม่มีขดลวดสนามแม่เหล็ก

###### โรเตอร์ (Rotor):

- ประกอบด้วยขดลวดอาร์เมเจอร์ที่พันอยู่บนแกน
- ตอกับแปรงถ่าน (Brushes) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

###### คอมมิวเตเตอร์ (Commutator):

- ทำหน้าที่สลับทิศทางกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ เพื่อรักษาแรงบิดหมุนในทิศทางเดียว

###### แปรงถ่าน (Brushes):

- ส่งกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ผ่านคอมมิวเตเตอร์

#### 5.3.4.2. หลักการทำงาน

##### การสร้างสนามแม่เหล็ก:

- แม่เหล็กถาวรในสเตเตอเรอร์สร้างสนามแม่เหล็กคงที่โดยไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า
- สนามแม่เหล็กนี้จะทำปฏิกิริยา กับ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์

##### การหมุนของโรเตอร์:

- เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยา กับ สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร
- เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force) ที่ผลักดันให้โรเตอร์หมุน
- คอมมิวเตเตอร์จะสลับทิศทางกระแสไฟในขดลวดอาร์เมเจอร์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แรงบิด มีทิศทางคงที่

##### ความเร็วและแรงบิด:

- ความเร็วของ PMDC Motor จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า
- แรงบิดจะสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์

#### 5.3.4.3. การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ

##### กรณีไม่โหลด (No Load):

- กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ลดลง
- แรงบิดลดลง
- ความเร็วเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

##### การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ (High Load):

- กระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น
- แรงบิดเพิ่มขึ้นเพื่อรับโหลด
- ความเร็วลดลงเล็กน้อย แต่สามารถปรับแรงดันเพิ่มเพื่อชดเชย

#### 5.3.4.4. สมการที่เกี่ยวข้อง

##### แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF):

$$E_b = k_e \cdot \Phi \cdot \omega$$

- $E_b$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Volt)
- $k_e$  = ค่าคงที่ทางไฟฟ้า
- $\Phi$  = พลังสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

แรงบิด (Torque):

$$T = k_t \cdot \Phi \cdot I_a$$

- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $k_t$  = ค่าคงที่ทางกล
- $\Phi$  = พลัง磁สนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร
- $I_a$  = กระแสอาร์เมเจอร์ (Ampere)

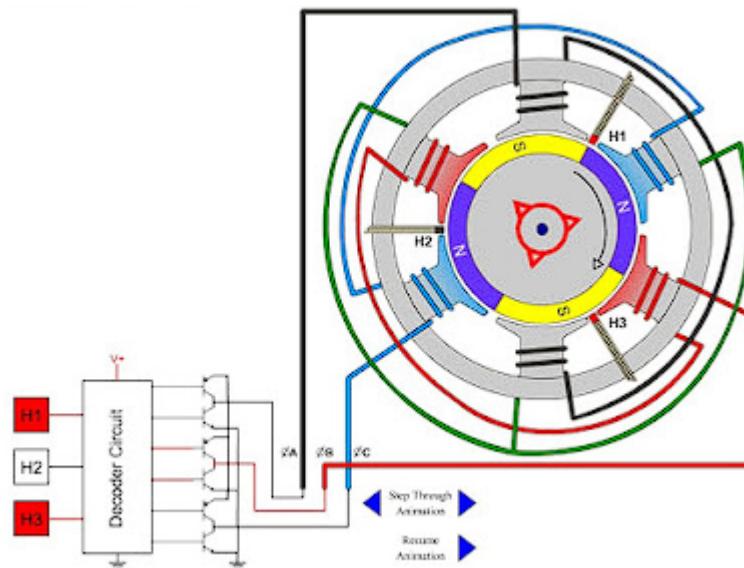
กำลังงานกลที่เพลา (Mechanical Power):

$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega$$

- $P_{\text{mech}}$  = กำลังงานกลที่เพลา (Watt)
- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

### 5.3.5. Brushless DC Motor (BLDC)

BLDC Motor เป็นมอเตอร์กระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) และคอมมิวเตเตอร์แบบกลไก ใช้ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller) แทนการสลับกระแสในขดลวดอาร์เมเจอร์ ทำให้มีประสิทธิภาพสูง ทนทานต่อการสึกหรอ และมีเสียงรบกวนต่ำ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเร็วสูง และความแม่นยำ



รูปที่ 9 แสดง Diagram ของ Brushless DC Motor (BLDC)

### 5.3.5.1. โครงสร้างของ BLDC Motor

#### โรเตอร์ (Rotor):

- ประกอบด้วย แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets)
- จำนวนขั้วแม่เหล็กอาจเป็น 2, 4, 6 หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับการออกแบบ

#### สเตเตอร์ (Stator):

- ประกอบด้วย ชุดลวดสามเฟส (Three-Phase Windings)
- ชุดลวดถูกจัดเรียงในลักษณะคล้ายกับมอเตอร์ซิจิโครนัส

#### ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Controller):

- ทำหน้าที่ควบคุมการสลับกระแสในชุดลวดสเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุน
- ใช้ ตัวเซนเซอร์ตำแหน่ง (Position Sensor) เช่น Hall Sensor หรือการควบคุมแบบไร้เซนเซอร์

### 5.3.5.2. หลักการทำงาน

#### การสร้างสนามแม่เหล็กในสเตเตอร์:

- กระแสไฟฟ้าถูกป้อนเข้าสู่ชุดลวดสามเฟส (U, V, W) โดยลำดับการจ่ายกระแสจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์
- สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์

#### การหมุนของโรเตอร์:

- สนามแม่เหล็กจากโรเตอร์และสเตเตอร์พยายามรักษาแนวนานกัน ทำให้โรเตอร์หมุนตามสนามแม่เหล็กหมุน
- การสลับกระแสในชุดลวดสเตเตอร์ถูกควบคุมอย่างแม่นยำ เพื่อให้โรเตอร์หมุนต่อเนื่อง

#### การควบคุมตำแหน่งและความเร็ว:

- เซนเซอร์ตำแหน่ง (เช่น Hall Sensor) จะตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์
- ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์จะปรับเฟสของกระแสในชุดลวดให้ตรงกับตำแหน่งของโรเตอร์

### 5.3.5.3. การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ

#### กรณีไม่โหลด (No Load):

- ตัวควบคุมจะลดกระแสในชุดลวด เพื่อไม่ให้มอเตอร์สร้างแรงบิดเกินความจำเป็น
- กำลังไฟฟ้าเข้า จะลดลง เนื่องจากการกระแสไฟฟ้าลดลง
- ความเร็วของโรเตอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อโหลดลดลง ส่งผลให้ เพิ่มขึ้น Back EMF เพิ่มขึ้น
- ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์จะปรับแรงตันไฟฟ้าลดลงเพื่อป้องกันมอเตอร์หมุนเร็วเกินไป

#### การทำงานในสภาพโหลดต่างๆ (High Load):

- กระแสไฟฟ้าในขดลวดจะถูกควบคุมให้คงที่ตามความต้องการแรงบิด
- Back EMF จะคงที่เนื่องจากความเร็วของโรเตอร์ไม่เปลี่ยน
- กำลังงานขาเข้าจะคงที่เท่ากัน
- ตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ไม่ต้องปรับกระแสมาก เนื่องจากสภาพโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลง

#### 5.3.5.4. สมการที่เกี่ยวข้อง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF):

$$E_b = k_e \cdot \Phi \cdot \omega$$

- $E_b$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Volt)
- $k_e$  = ค่าคงที่ทางไฟฟ้า
- $\Phi$  = พลักระดับนามแเม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ (rad/s)

แรงบิด (Torque):

$$T = k_t \cdot \Phi \cdot I$$

- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $k_t$  = ค่าคงที่ทางกล
- $\Phi$  = พลักระดับนามแเม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร
- $I$  = กระแสไฟฟ้าในขดลวด (Ampere)

กำลังงานกลที่เพลา (Mechanical Power):

$$P_{\text{mech}} = T \cdot \omega$$

- $P_{\text{mech}}$  = กำลังงานกลที่เพลา (Watt)
- $T$  = แรงบิด (Nm)
- $\omega$  = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

### 5.3.6. Motor Characteristics

ลักษณะสำคัญของมอเตอร์ไฟฟ้า เช่น แรงบิด ความเร็ว กำลัง และกราฟส์ จะสัมพันธ์กันในรูปแบบเฉพาะ ขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์ ตัวแปรเหล่านี้มีความสำคัญในการเลือกและใช้งานมอเตอร์ในระบบต่างๆ

#### 5.3.6.1. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว (Torque-Speed Characteristic)

ความสัมพันธ์นี้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด (Torque) ตามความเร็ว (Speed) โดยมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของมอเตอร์:

##### 5.3.6.1.1. DC Motor

###### Shunt DC Motor

- มีแรงบิดคงที่ไม่เปลี่ยน随著ความเร็ว
- ความเร็วลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น

###### Series DC Motor

- แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ
- ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น

###### Compound DC Motor

- มีคุณสมบัติที่ผสมระหว่าง Shunt และ Series โดยให้แรงบิดเริ่มต้นสูง และยังสามารถรักษาความเร็วคงที่ได้ดี

###### Permanent Magnet DC Motor (PMDC)

- คล้าย Shunt Motor แต่มีข้อจำกัดด้านแรงบิดสูงสุดเนื่องจากแม่เหล็กถาวร

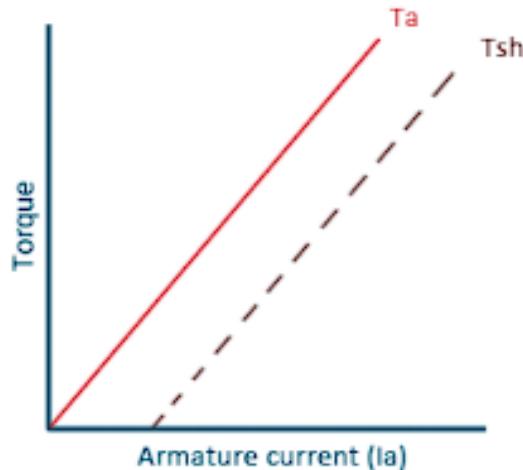
##### 5.3.6.1.2. Brushless DC Motor (BLDC)

- แรงบิดคงที่ในช่วงความเร็วปานกลางถึงสูง
- ที่ความเร็วต่ำ BLDC มักให้แรงบิดสูงเพื่อการเริ่มต้นการหมุน (Startup)

### 5.3.6.2. กราฟแรงบิด-ความเร็วตัวอย่าง

Shunt DC Motor

กราฟ Torque กับ Armature Current ( $T_a$  vs  $I_a$ )



รูปที่ 10 แสดงกราฟ Torque กับ Armature Current ของ Shunt DC Motor

- เส้นสีแดง ( $T_a$ ):

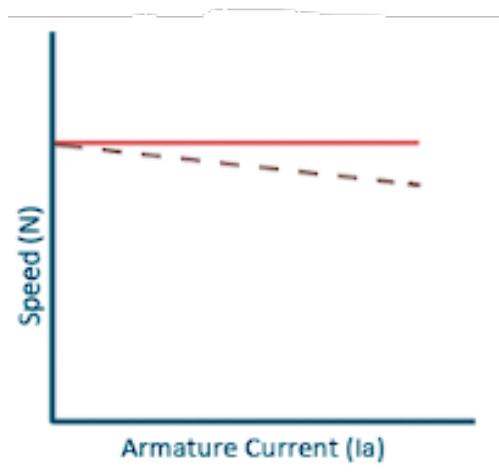
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ( $T_a$ ) และกระแสในอาร์มาเจอร์ ( $I_a$ )

- มีลักษณะเป็นเส้นตรง (Linear) เมื่อจากใน Shunt DC Motor แรงบิดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในอาร์มาเจอร์ ( $T_a \propto I_a$ )

- เส้นประสีน้ำตาล( $T_{sh}$ ):

แสดงแรงบิดในกรณีที่โหลดบางส่วน (Partial Load) ซึ่งต่ำกว่าแรงบิดสูงสุด

### 5.3.6.2.1. กราฟ Speed กับ Armature Current ( $N$ vs $I_a$ )



รูปที่11 แสดงกราฟ Speed กับ Armature Current ของ Shunt DC Motor

- เส้นสีแดง (N):

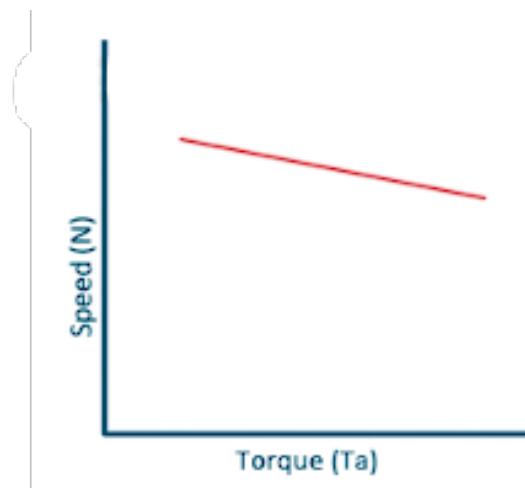
แสดงความเร็ว (N) ของโรเตอร์เมื่อเพิ่มกระแสในอาร์มาเจอร์ ( $I_a$ )

- ความเร็วลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อ ( $I_a$ ) เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าข้อนกลับ (Back EMF) ลดลงจากแรงดันตกคร่อมในอาร์มาเจอร์ ( $I_a R_a$ )
- แสดงให้เห็นว่า Shunt DC Motor มีความเร็วที่เกือบคงที่

- เส้นประสีน้ำตาล:

ใช้เปรียบเทียบในสถานการณ์ที่โหลดเพิ่มขึ้น

#### 5.3.6.2.2. กราฟ Speed กับ Torque (N vs $T_a$ )



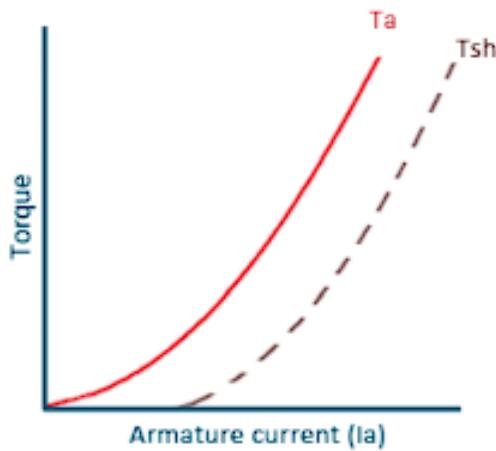
รูปที่12 แสดงกราฟ Speed กับ Torque ของ Shunt DC Motor

- แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (N) และแรงบิด ( $T_a$ ):

- เมื่อแรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงต้านจากโหลด
- ลักษณะการลดลงช้า (Slope ต่ำ) แสดงถึงความสามารถในการรักษาความเร็วคงที่ของ Shunt DC Motor

### Series DC Motor-

กราฟ Torque กับ Armature Current ( $T_a$  vs  $I_a$ )



รูปที่13 แสดงกราฟ Torque กับ Armature Current ของ Series DC Motor

- **เส้นสีแดง ( $T_a$ ):**

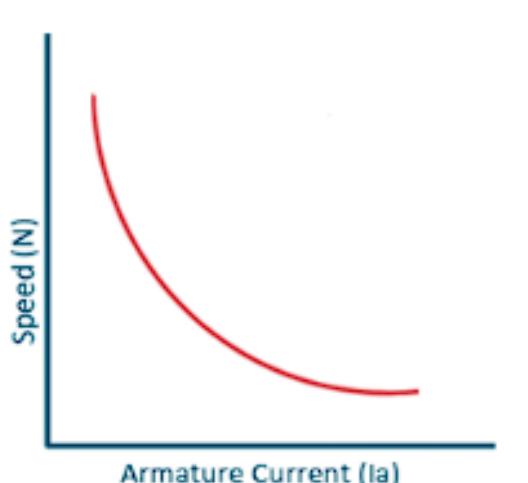
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด ( $T_a$ ) และกระแสในอาร์มาเจอร์ ( $I_a$ )

- กราฟเป็นลักษณะโค้งนูนขึ้น (Non-linear)
- เนื่องจากใน Series DC Motor แรงบิดเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลในช่วงกระแสต่ำ และเพิ่มข้าลงเมื่อกระแสสูงขึ้น

- **เส้นประสีน้ำตาล ( $T_{sh}$ ):**

แสดงถึงแรงบิดในสถานการณ์ที่โหลดเบาลง

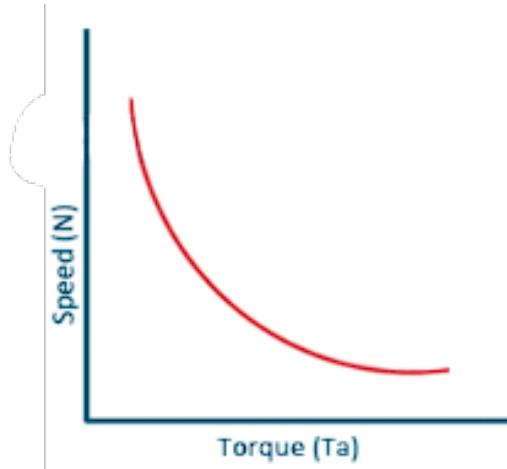
กราฟ Speed กับ Armature Current ( $N$  vs  $I_a$ )



รูปที่14 แสดงกราฟ Speed กับ Armature Current ของ Series DC Motor

- ความเร็ว ( $N$ ) ลดลงเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์ ( $I_a$ ) เพิ่มขึ้น
  - กราฟเป็นลักษณะโค้งลง (Non-linear)
  - เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) ลดลงเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์เพิ่มขึ้น และมอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อผลิตแรงบิด

กราฟ Speed กับ Torque ( $N$  vs  $T_a$ )

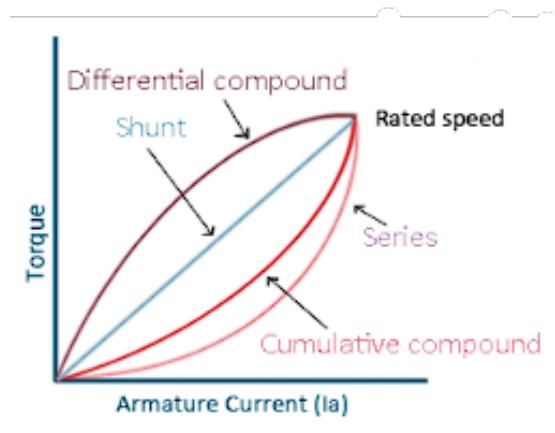


รูปที่15 แสดงกราฟ Speed กับ Torque ของ Series DC Motor

- ความเร็ว ( $N$ ) ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแรงบิด ( $T_a$ ) เพิ่มขึ้น
  - กราฟเป็นลักษณะโค้งลง (Non-linear) เช่นกัน
  - เป็นผลมาจากการ Series DC Motor ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ

### Compound DC Motor

กราฟ Torque vs. Armature Current ( $T_a$  vs  $I_a$ )



รูปที่16 แสดงกราฟ Torque vs. Armature Current ของ Compound DC Motor

### Series Motor

- กราฟเส้นสีส้ม
- Torque เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์ ( $I_{a1\_a2}$ ) เพิ่มขึ้น
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง

### Shunt Motor

- กราฟเส้นสีฟ้า
- Torque เพิ่มขึ้นอย่างค่อนข้างเส้นตรงและช้ากว่า Series Motor
- ความเร็วคงที่เหมาะสมสำหรับโหลดคงที่

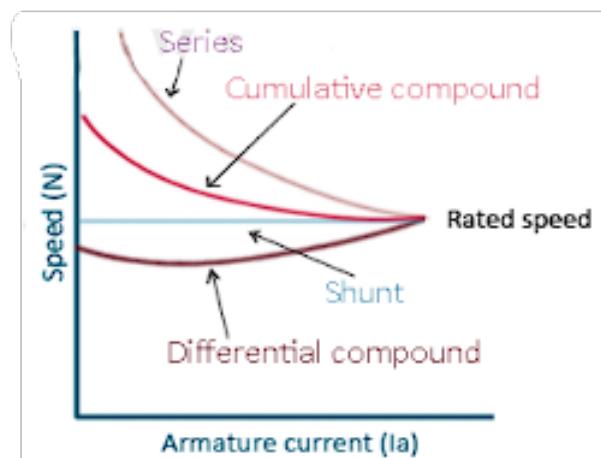
### Cumulative Compound Motor

- กราฟเส้นสีแดง
- ลักษณะเป็นการผสมระหว่าง Shunt และ Series Motor
- Torque เริ่มต้นใกล้เคียงกับ Shunt แต่สามารถเพิ่มขึ้นได้สูงเมื่อกระแสเพิ่มขึ้น

### Differential Compound Motor

- กราฟเส้นสีน้ำตาล
- Torque ลดลงเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์เพิ่มขึ้น
- ไม่เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการแรงบิดเริ่มต้นสูง

### กราฟ Speed vs. Armature Current ( $N$ vs $I_a$ )



รูปที่ 17 แสดงกราฟ Speed vs. Armature Current ของ Compound DC Motor

### Series Motor

- กราฟเส้นสีส้ม
- ความเร็วลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์เพิ่มขึ้น
- ความเร็วเปลี่ยนแปลงมากตามโหลด

### Shunt Motor

- กราฟเส้นสีฟ้า
- ความเร็วคงที่มากกว่า Series Motor
- ความเร็วลดลงเล็กน้อยเมื่อโหลดเพิ่ม

### Cumulative Compound Motor

- กราฟเส้นสีแดง
- มีความเร็วใกล้เคียงกับ Shunt Motor แต่ลดลงมากขึ้นในช่วงโหลดสูง

### Differential Compound Motor

- กราฟเส้นสีน้ำตาล
- ความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสอาร์มาเจอร์เพิ่มขึ้น
- มีความเร็วที่ผิดปกติ ไม่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความเร็วคงที่

#### 5.3.7. H-Bridge Drive

H-Bridge Drive คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) โดยสามารถควบคุมได้ทั้งทิศทางการหมุน (Forward/Reverse) และความเร็ว (Speed) ของมอเตอร์ ชิ้น H-Bridge Drive มีโครงสร้างที่สำคัญประกอบด้วยสวิตซ์ (Switch) หรือทรานซิสเตอร์ 4 ตัว (Q1, Q2, Q3, Q4) ที่จัดเรียงเป็นรูปตัว "H" และทำงานสอดคล้องกับโหลดที่อยู่ต่อทาง (มอเตอร์)

#### โครงสร้างพื้นฐานของ H-Bridge

##### ส่วนประกอบหลัก:

- สวิตซ์ 4 ตัว: ทรานซิสเตอร์หรือ MOSFET (Q1, Q2, Q3, Q4)
- แหล่งจ่ายไฟ: แรงดันไฟฟ้า (Vcc) ที่จ่ายพลังงานให้มอเตอร์
- โหลด: มอเตอร์ DC ที่เชื่อมต่อระหว่างกลางของ H-Bridge
- ตัวต้านทานเกต (Gate Resistor): ใช้ลดสัญญาณรบกวนที่เกตของทรานซิสเตอร์
- ไดโอด (Freewheeling Diodes): ป้องกัน Back-EMF จากมอเตอร์

##### การเชื่อมต่อ:

- ขา Q1 และ Q3: ทรานซิสเตอร์ด้านบน (High-side Switch)
- ขา Q2 และ Q4: ทรานซิสเตอร์ด้านล่าง (Low-side Switch)

#### การทำงานของ H-Bridge

การสลับการทำงานของทรานซิสเตอร์จะกำหนดทิศทางและความเร็วของมอเตอร์:

##### การหมุนไปข้างหน้า (Forward)

- Q1 เปิด (ON) และ Q4 เปิด (ON)

- Q2 ปิด (OFF) และ Q3 ปิด (OFF)
- กระแสไฟฟ้าไหลจาก Vcc → Q1 → มอเตอร์ → Q4 → GND

### การหมุนถอยหลัง (Reverse)

- Q2 เปิด (ON) และ Q3 เปิด (ON)
- Q1 ปิด (OFF) และ Q4 ปิด (OFF)
- กระแสไฟฟ้าไหลจาก Vcc → Q3 → มอเตอร์ → Q2 → GND

### หยุดหมุน (Brake Mode)

- Q1 และ Q3 เปิดพร้อมกัน หรือ Q2 และ Q4 เปิดพร้อมกัน
- กระแสไฟย้อนกลับมาลัดวงจรที่มอเตอร์ ทำให้มอเตอร์หยุดทันที

### สถานะหยุดนิ่ง (Coast Mode)

- ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดปิด (OFF)
- มอเตอร์หมุนอย่างอิสระจนกว่าจะหยุดเอง

## การควบคุมความเร็ว

การควบคุมความเร็วทำได้โดยใช้:

### PWM (Pulse Width Modulation)

- ส่งสัญญาณ PWM ไปยัง High-side หรือ Low-side Switch เพื่อปรับแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับ มอเตอร์
- Duty Cycle สูง → ความเร็วสูง
- Duty Cycle ต่ำ → ความเร็วต่ำ

### การปรับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Control)

- ปรับ Vcc ที่จ่ายให้กับ H-Bridge

## Shoot-Through

การป้องกันการ Shoot-Through ภายใน H-Bridge Drive เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบวงจร H-Bridge เนื่องจาก Shoot-Through เกิดจากการเปิดทรานซิสเตอร์สองตัวในขาเดียวกันพร้อมกัน เช่น Q1 และ Q3 หรือ Q2 และ Q4 ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลตรงจากแหล่งจ่ายไฟ (Vcc) ลงไปยังกราวด์ (GND) โดยไม่ผ่านโหลด (มอเตอร์) ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อวงจรหรืออุปกรณ์

### การควบคุมผิดพลาด:

- การส่งสัญญาณควบคุม (PWM) ผิดพลาดไปยังเกตของทรานซิสเตอร์ ทำให้เปิดพร้อมกัน

## Dead Time ไม่เพียงพอ

- ไม่มีการเว้นช่วง (Dead Time) ระหว่างการสลับสถานะของทรานซิสเตอร์บน (High-side) และล่าง (Low-side)

#### Noise

- สัญญาณรบกวน (Electrical Noise) อาจกระทุนให้ทรานซิสเตอร์ที่ไม่ควรทำงานเปิดโดยไม่ต้องจำเจ

#### วิธีป้องกัน Shoot-Through

เพิ่ม Dead Time ระหว่างสัญญาณควบคุม:

- Dead Time คือช่วงเวลาที่มั่นใจได้ว่าทรานซิสเตอร์ทั้งบน (High-side) และล่าง (Low-side) ในขาเดียวกันปิดพร้อมกันก่อนที่อีกตัวจะเปิด
- ในการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถปรับ Dead Time ได้ผ่านซอฟต์แวร์หรือฮาร์ดแวร์

ใช้ Gate Driver พร้อมฟังก์ชัน Dead Time:

- Gate Driver เช่น IC เบอร์ IR2101 หรือ L298 มีการออกแบบ Dead Time ในตัวเพื่อลดโอกาสเกิด Shoot-Through

ใช้ Bootstrapping Circuit สำหรับ High-Side Switch:

- ช่วยควบคุมการเปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ข้าง High-side ให้ทำงานอย่างถูกต้อง โดยลดโอกาสการเปิดพร้อมกัน

ใช้ Flyback Diodes (Freewheeling Diodes):

- ไส้ไดโอดแบบช็อตเก็ต (Schottky Diode) ไว้ขานกับทรานซิสเตอร์ทุกตัว เพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับ (Back-EMF) จากมอเตอร์ที่อาจทำให้ทรานซิสเตอร์เปิดโดยไม่ต้องจำเจ

การออกแบบวงจรควบคุมสัญญาณอย่างรัดกุม:

- ป้องกันการรบกวน (Noise) โดยใช้ตัวกรอง (Filter) เช่นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในวงจรอินพุต

เพิ่ม Resistor ที่ Gate:

- ใช้ตัวต้านทานที่ Gate ของทรานซิสเตอร์เพื่อลดการตอบสนองที่เร็วเกินไปและป้องกันการเปิด-ปิดที่ไม่ต้องจำเจ

ใช้ Hardware Interlock Circuit:

- วงจร Interlock ป้องกันการเปิดทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในขาเดียวกันพร้อมกันโดยฮาร์ดแวร์ เช่น การใช้ AND/OR Gate หรือ Logic IC

#### 5.3.8. Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) คือเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสัญญาณที่มีการเปิดและปิด (ON/OFF) เป็นช่วงๆ โดยการปรับระยะเวลาการเปิด (ON) ต่อรอบสัญญาณทั้งหมด ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น จอเตอร์ไฟฟ้า, หลอดไฟ LED, และเครื่องขยายเสียง เป็นต้น หลักการทำงานของ PWM

PWM เป็นการสร้างสัญญาณดิจิทัลที่มีสองสถานะคือ HIGH (ON) และ LOW (OFF) โดย:

- ความถี่ (Frequency): จำนวนรอบที่สัญญาณเกิดขึ้นในหนึ่งวินาที (หน่วย: Hz) เช่น 1 kHz = 1000 รอบต่อวินาที
- Duty Cycle: อัตราส่วนระหว่างเวลาที่สัญญาณอยู่ในสถานะ HIGH ต่อรอบสัญญาณทั้งหมด ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)  
  - $\text{Duty Cycle (\%)} = (\text{เวลา ON} \div \text{เวลารอบสัญญาณ}) \times 100$

#### Duty Cycle

- Duty Cycle 25%: สัญญาณ ON 25% และ OFF 75%

#### 25% duty cycle



- Duty Cycle 50%: สัญญาณ ON และ OFF เท่ากัน

#### 50% duty cycle



- Duty Cycle 75%: สัญญาณ ON 75% และ OFF 25%

#### 75% duty cycle



สมการที่เกี่ยวข้อง  
แรงดันเฉลี่ย ( $V_{avg}$ ):

$$V_{avg} = V_{max} \times \frac{\text{Duty Cycle}}{100}$$

- $V_{max}$  = แรงดันสูงสุดของระบบ

### การใช้งาน PWM

#### ควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า:

PWM ถูกใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการปรับ Duty Cycle เพื่อเปลี่ยนแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้มอเตอร์

- Duty Cycle สูง → ความเร็วมอเตอร์เพิ่ม
- Duty Cycle ต่ำ → ความเร็วมอเตอร์ลดลง

#### หรี่แสงหลอด LED:

การปรับ Duty Cycle จะควบคุมความสว่างของ LED

- Duty Cycle สูง → แสงสว่างมาก
- Duty Cycle ต่ำ → แสงสว่างน้อย

#### การส่งข้อมูลในระบบการสื่อสาร:

ใช้ PWM เพื่อเข้ารหัสข้อมูลดิจิทัลและส่งข้อมูลในระบบไร้สาย

#### แหล่งจ่ายไฟแบบ Switching:

ใช้ PWM ใน การควบคุมทรานซิสเตอร์ในวงจร Switching เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ

## 5.4. Cytron MDD20A Motor Driver

Cytron MDD20A Motor Driver เป็นไดรฟ์มอเตอร์แบบ H-Bridge Dual Channel ที่ออกแบบมาสำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ได้ 2 ตัวพร้อมกัน โดยรองรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 30V และกระแสสูงสุดต่อเนื่องที่ 20A ต่อช่อง (สามารถรองรับกระแสเพิ่มขึ้นได้สูงถึง 60A)



รูปที่ 18 แสดง Cytron MDD20A Motor Driver

### 5.4.1. โครงสร้างและพัฒนาการทำงาน

Cytron MDD20A ใช้หลักการทำงานแบบ H-Bridge ซึ่งช่วยควบคุมทั้งทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ DC โดยการจัดการแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปยังขั้วของมอเตอร์

#### พัฒนาการทำงาน

- รองรับมอเตอร์ 2 ตัว: ทำงานแยกอิสระในแต่ละช่องสัญญาณ
- โหมดควบคุม 2 รูปแบบ:
  - Sign-Magnitude: ใช้สัญญาณ PWM ควบคุมความเร็ว และสัญญาณ Logic ควบคุมทิศทาง
  - Lock Anti-Phase: ใช้สัญญาณ PWM เดียวควบคุมทั้งความเร็วและทิศทาง
- ป้องกันไฟกระชาก: ด้วยวงจรป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน
- ขั้วต่อ Input: รองรับ Logic ระดับ 3.3V และ 5V
- การระบายน้ำร้อน: มีช่องดูดอากาศเพื่อช่วยลดความร้อนระหว่างการทำงาน
- ป้องกันแรงดันไฟย้อนกลับ
- ป้องกัน Overcurrent (กระแสเกิน)

## หลักการทำงาน

### การควบคุมทิศทาง

- ทิศทางของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยการจัดการแรงดันไฟฟ้าที่ข้าวของมอเตอร์
  - Forward (หมุนตามเข็มนาฬิกา): ข้าวบากของแบตเตอรี่ต่อกับข้าวบากมอเตอร์
  - Reverse (หมุนตามเข็มนาฬิกา): ข้าวลบของแบตเตอรี่ต่อกับข้าวบากมอเตอร์

### การควบคุมความเร็ว

- ความเร็วของมอเตอร์ถูกควบคุมด้วยเทคนิค Pulse Width Modulation (PWM)
  - Duty Cycle สูง → ความเร็วเพิ่ม
  - Duty Cycle ต่ำ → ความเร็วลด

### การควบคุมในโหมด Sign-Magnitude

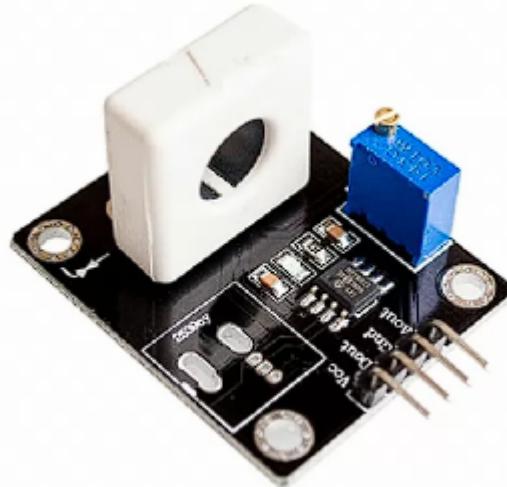
- DIR (Direction Pin): กำหนดทิศทางของมอเตอร์
- PWM (Pulse Width Modulation): ควบคุมความเร็ว
- ตัวอย่างการทำงาน
  - DIR = HIGH → Forward
  - DIR = LOW → Reverse
  - PWM = 100% Duty Cycle → ความเร็วสูงสุด

### การควบคุมในโหมด Lock Anti-Phase

- 50% Duty Cycle:
  - หาก PWM มี Duty Cycle อยู่ที่ 50% จะทำให้แรงดันไฟฟ้าสูตรที่ส่งไปยังมอเตอร์เป็นศูนย์ มอเตอร์จะหยุดการหมุน (Neutral State)
- Duty Cycle > 50%:
  - หาก Duty Cycle สูงกว่า 50% จะทำให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง Forward (ตามเข็มนาฬิกา)
  - ยิ่ง Duty Cycle สูง ความเร็วในการหมุนก็ยิ่งเพิ่มขึ้น
- Duty Cycle < 50%:
  - หาก Duty Cycle ต่ำกว่า 50% จะทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse (วนเข็มนาฬิกา)
  - ยิ่ง Duty Cycle ต่ำลง ความเร็วในการหมุนในทิศทางนี้ก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

## 5.5. WCS1700 Hall Current Sensor

เซ็นเซอร์วัดกระแสแบบชอล์ล (Hall Current Sensor) รุ่น WCS1700 ใช้หลักการทำงานของ Hall Effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก แล้วเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) ในทิศทางที่ตั้งจากกับกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 19 แสดง WCS1700 Hall Current Sensor

### 5.5.1. หลักการทำงาน

#### องค์ประกอบของ WCS1700

- Hall Element: เป็นส่วนที่ตรวจจับสนามแม่เหล็กและสร้างแรงดันไฟฟ้า
- Core Magnetic Circuit: โครงสร้างสนามแม่เหล็กรูปวงแหวนที่ออกแบบมาเพื่อรับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า
- วงจรขยายสัญญาณ (Signal Amplifier): เพื่อขยายสัญญาณที่วัดได้ให้ใช้งานได้สะดวก

#### การตรวจจับสนามแม่เหล็ก

- เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่อยู่ภายใต้เซ็นเซอร์ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นรอบตัวนำตามกฎของมือขวา (Right-Hand Rule)
- สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปยัง Hall Element ผ่าน Core Magnetic Circuit ที่ออกแบบให้รวมสนามแม่เหล็กเข้าสู่ Hall Element ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### การสร้างแรงดันไฟฟ้าชอล์ล (Hall Voltage)

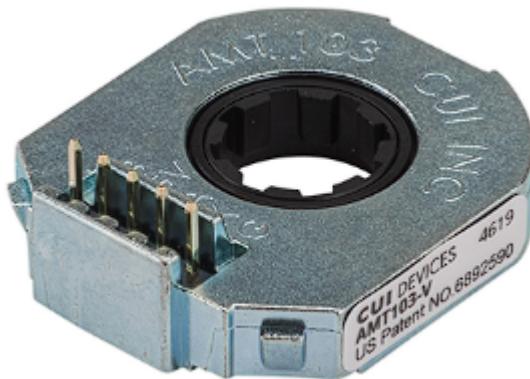
- สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าชอล์ล (Hall Voltage) ใน Hall Element
- แรงดันนี้มีค่าเปรียบเท่ากับความแรงของสนามแม่เหล็ก และในทางกลับกัน สนามแม่เหล็กนี้ยังเปรียบเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำ

## การขยายและประมวลผลสัญญาณ

- สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Hall Element จะถูกขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ เพื่อให้มีขนาดแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน
- สัญญาณที่ขยายแล้วจะส่งออกผ่านขา Output ของเซ็นเซอร์ในรูปแบบสัญญาณแรงดัน (Analog Voltage)

### 5.6. Incremental Encoder AMT103-V

Incremental Encoder รุ่น AMT103-V เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่งเชิงมุม ความเร็ว หรือการหมุน โดยใช้หลักการตรวจจับการหมุนของเพลาผ่านการนับพัลส์ (Pulse) ซึ่งผลิตจากการเคลื่อนที่ของดิสก์ที่มีลายบนพื้นผิว



รูปที่ 20 แสดง Incremental Encoder AMT103-V

#### 5.6.1. หลักการทำงาน

##### การหมุนของดิสก์:

- เมื่อดิสก์ที่มีลายเส้นหมุนตามเพลา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของแสงที่ส่องผ่านช่องของลายเส้นไปยังเซ็นเซอร์

##### การสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse Signal):

- สัญญาณที่ได้เรียกว่า Channel A และ Channel B ซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา
- ใช้หลักการ Quadrature Detection เพื่อตรวจจับทิศทางการหมุน (Clockwise/Counterclockwise) และความละเอียดในการวัด

##### การกำหนดทิศทางการหมุน:

- หาก Channel A นำ Channel B หมายถึงหมุนตามเข็มนาฬิกา

- หาก Channel B นำ Channel A หมายถึงหมุนทวนเข็มนาฬิกา

#### การนับพลส์ (Pulse Counting):

- ทุกพลส์ที่เกิดขึ้นแสดงถึงการเคลื่อนที่เชิงบูรณาการของเพลา
- จำนวนพลส์ทั้งหมดในหนึ่งรอบของดิสก์ขึ้นอยู่กับความละเอียด (Resolution) เช่น 2048 CPR (Counts Per Revolution)

#### 5.6.2. คุณสมบัติของ AMT103-V

##### ความละเอียด (Resolution):

- สามารถตั้งค่าได้ตั้งแต่ 48 ถึง 2048 CPR ตามความต้องการ

##### แหล่งจ่ายไฟ:

- ใช้แรงดันไฟฟ้าทำงาน 3.3V หรือ 5V

## 6. ขั้นตอนการทำการทดลอง

### 6.1. Brushed DC Motor : การทดลองที่ 1

#### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น
  - ค่าความถี่หรือสัญญาณ PWM
  - ค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า
  - โหมดการขับ H-Bridge
- ตัวแปรตาม
  - ความเร็วรอบของมอเตอร์
  - กระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้
  - แรงบิดของมอเตอร์
- ตัวแปรควบคุม
  - แหล่งจ่ายไฟ
  - สภาพแวดล้อมและอุณหภูมิในห้อง
  - การตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE

#### วัสดุอุปกรณ์

- Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter

2. Incremental Encoder AMT103-V
3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12
4. WCS1700 Hall Current Sensor
5. Cytron MDD20A Motor Driver
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด
7. MotorXplorer

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

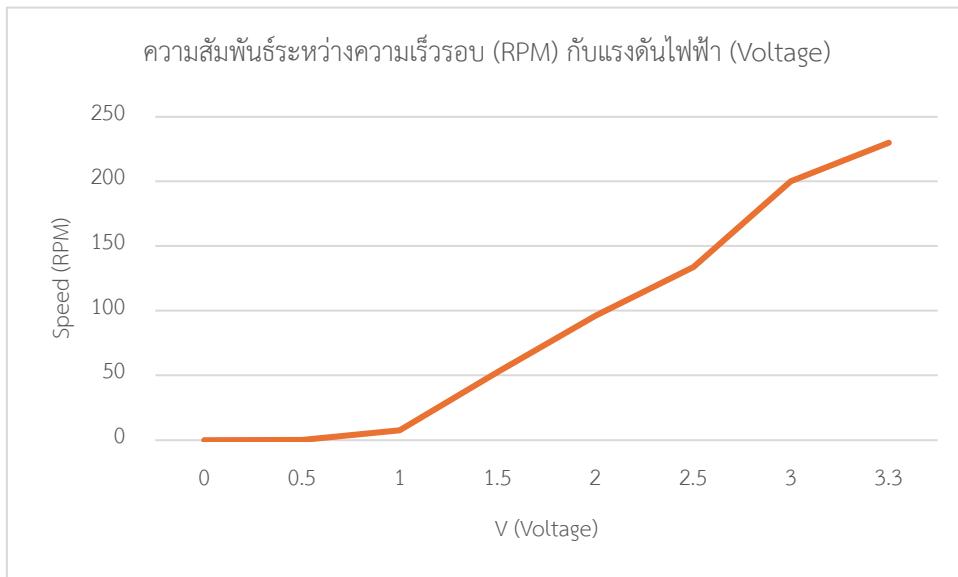
1. เชื่อมต่อ Incremental Encoder AMT103-V เข้ากับ STM32G474RE
2. เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าตั้งแต่ 0 – 3.3 V โดยที่เพิ่มครั้งละ 0.5 V พร้อมทั้งเก็บค่าความเร็วรอบและแรงบิด
3. หาค่าเฉลี่ยของค่าที่เก็บได้
4. เก็บค่ากระแสไฟฟ้าจาก Power Supply เพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 0 – 3.3 V ครั้งละ 0.5 V

### ผลการทดลอง

#### ความเร็วรอบ (Speed)

V (Volt)	Speed (RPM)
0	0
0.5	0.225495
1	7.765011
1.5	52.77814
2	96.07936
2.5	133.9902
3	200.3272
3.3	230.0128

ตารางที่ 1 ความเร็วรอบ (RPM) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

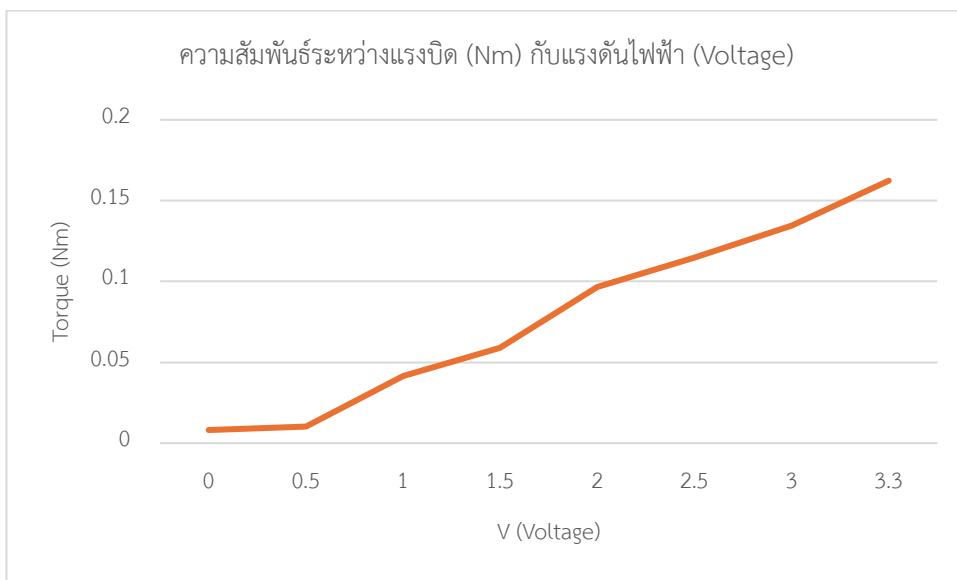


รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ (RPM) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

## แรงบิด (Torque)

V (Volt)	Torque (Nm)
0	0.008132
0.5	0.010374
1	0.041364
1.5	0.059057
2	0.096745
2.5	0.11476268
3	0.13441
3.3	0.16236

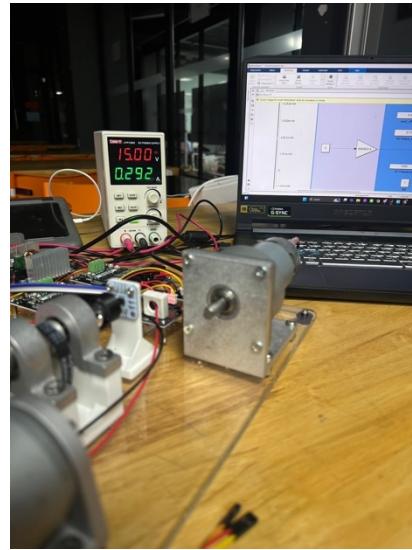
ตารางที่ 2 แรงบิด (Nm) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)



รูปที่ 22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด (Nm) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

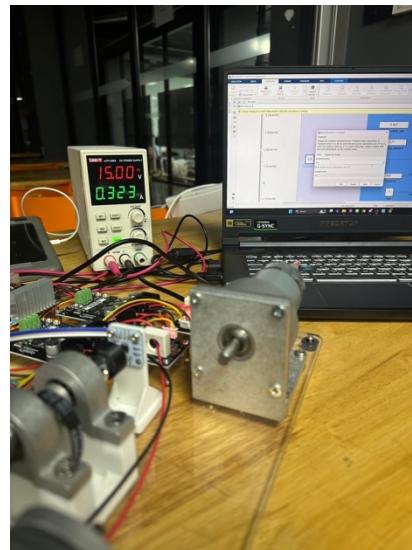
## กระแสนไฟฟ้า

- ที่แรงดัน 0 V



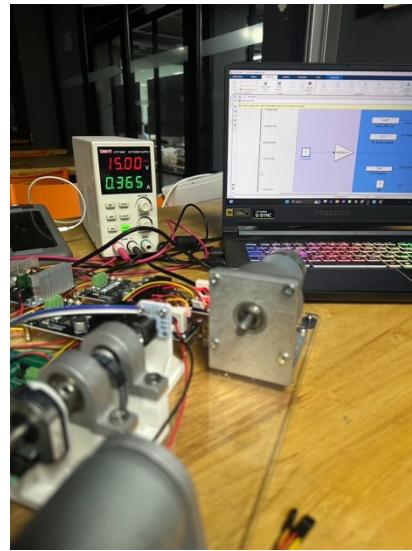
รูปที่ 23 กระแสนไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 0 V

- ที่แรงดัน 0.5 V



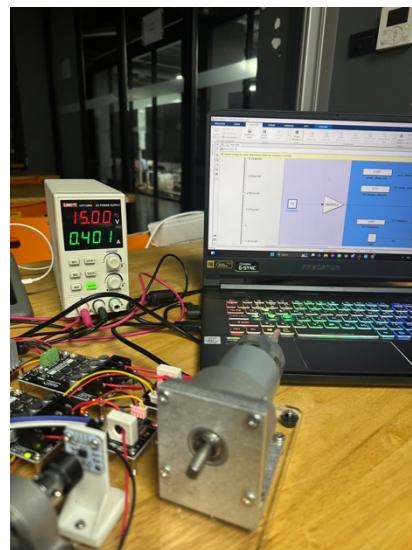
รูปที่ 24 กระแสนไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 0.5 V

- ที่แรงดัน 1 V



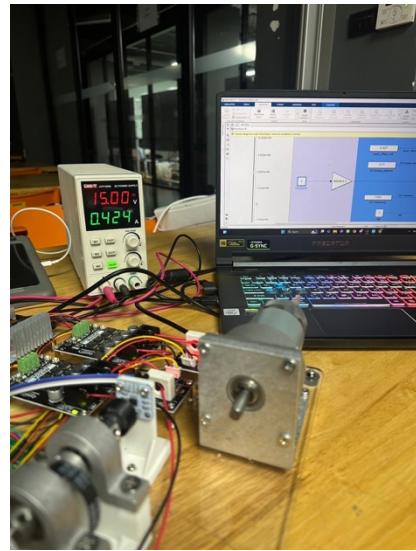
รูปที่ 25 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 1 V

- ที่แรงดัน 1.5 V



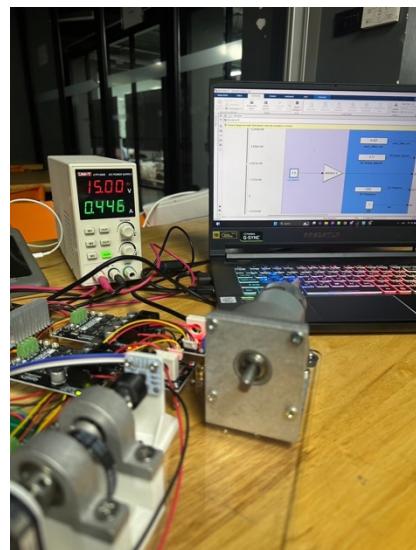
รูปที่ 26 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 1.5 V

- ที่แรงดัน 2 V



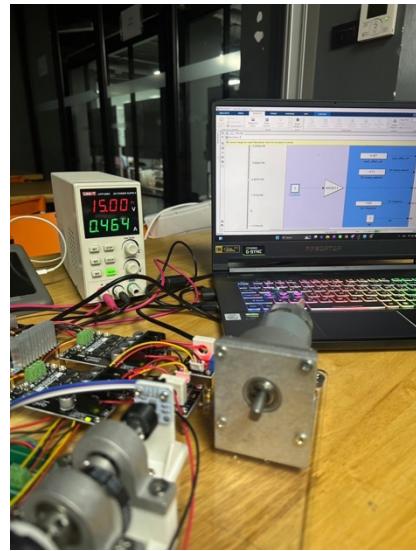
รูปที่ 27 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 2 V

- ที่แรงดัน 2.5 V



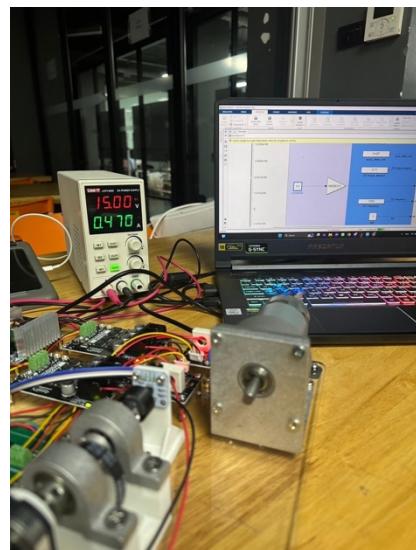
รูปที่ 28 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 2.5 V

- ที่แรงดัน 3 V

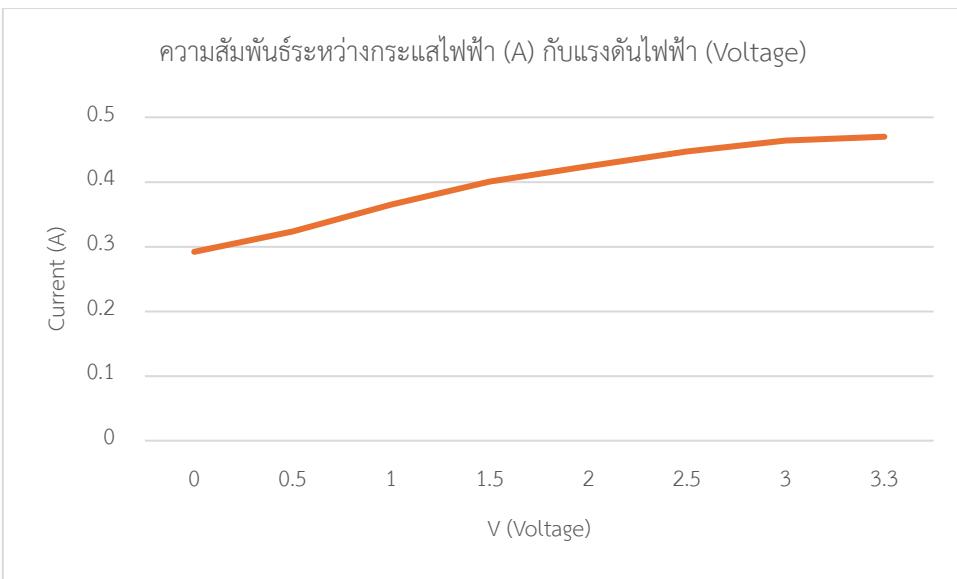


รูปที่ 29 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 3 V

- ที่แรงดัน 3.3 V



รูปที่ 30 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากระดับแรงดันไฟฟ้า 3.3 V



รูปที่ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

### สรุปผลการทดลอง

- กราฟ Speed (RPM) – Voltage (V)

- ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Speed) เพิ่มขึ้นในเชิงเส้นตามแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ในช่วงแรก เนื่องจากแรงดันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มอเตอร์หมุนเร็วขึ้น ในช่วงแรงดันสูงสุด อัตราการเพิ่มขึ้นของความเร็วอาจเริ่มชะลอตัว เนื่องจากผลกระทบจากโหลดและข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น แรงเสียดทานหรือแรงดันย้อนกลับ (Back EMF) ที่เพิ่มขึ้น

- กราฟ Torque (Nm) – Voltage (V)

- แรงบิด (Torque) เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

- กราฟ Current (A) – Voltage (V)

- กระแสไฟฟ้า (Current) เพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้า

### อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบร่วมกับแรงดันไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของมอเตอร์ DC ทั้งความเร็ว แรงบิด และกระแสไฟฟ้า แต่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จะมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น การสูญเสียพลังงานและข้อจำกัดทางกายภาพของมอเตอร์เข้ามามีบทบาท

## 6.2. Brushed DC Motor : การทดลองที่ 2.1

### สมมติฐาน

- เมื่อ Load Torque เพิ่มขึ้น
  - Speed จะลดลง เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงบิดที่สูงขึ้น
  - Current จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอเตอร์ต้องดึงกระแสเพิ่มเพื่อสร้างแรงบิดที่สูงขึ้น
  - Power (กำลังไฟฟ้า) จะเพิ่มขึ้น แต่ไม่ใช่เชิงเส้น เนื่องจากพลังงานที่สูญเสีย (Losses) จะเพิ่มขึ้นด้วย
  - %Efficiency จะลดลงที่โหลดสูง เนื่องจากพลังงานสูญเสียในรูปของความร้อนเพิ่มขึ้น (แรงเสียดทานและความต้านทานในชุดลวด)

### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter
2. Incremental Encoder AMT103-V
3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12
4. WCS1700 Hall Current Sensor
5. Cytron MDD20A Motor Driver
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด
7. MotorXplorer

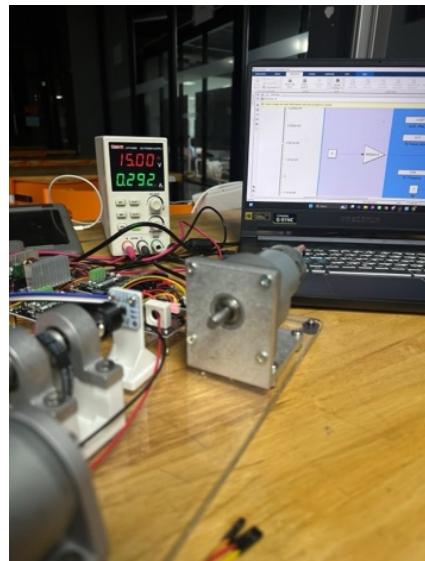
### ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เตรียมมอเตอร์ในสภาวะ No Load หรือ ไม่มี Load Torque
2. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0-3.3 V ครั้งละ 0.5 V
3. เก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละครั้ง เมื่อไม่มี Load Torque
4. เตรียมมอเตอร์ในสภาวะ Stall Load หรือ Load Torque สูงสุดและทำซ้ำเดียวกัน

## ผลการทดลอง

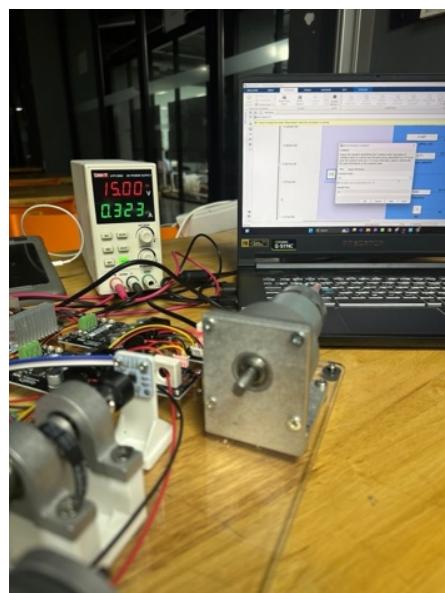
กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อไม่มี Load Torque

- ที่ 0 V



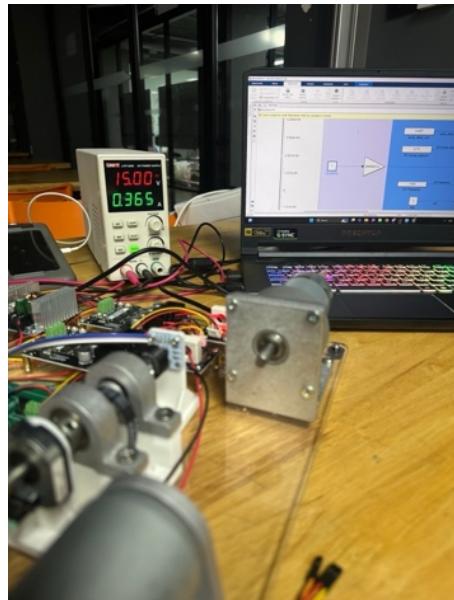
รูปที่ 32 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 0 V

- ที่ 0.5 V



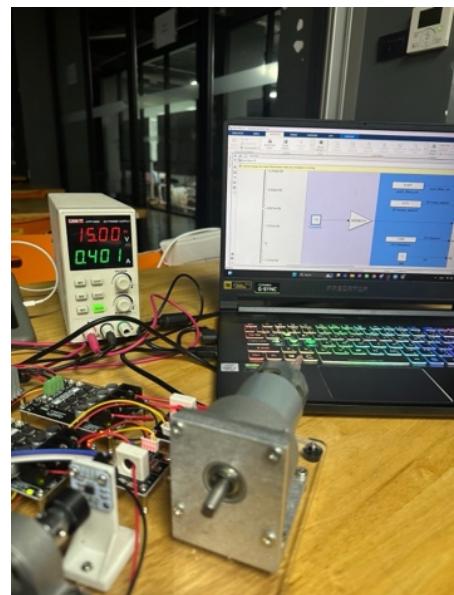
รูปที่ 33 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 0.5 V

- ที่ 1 V



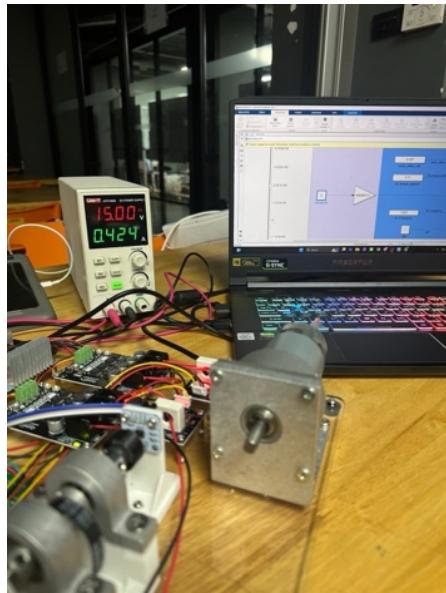
รูปที่ 34 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 1 V

- ที่ 1.5 V



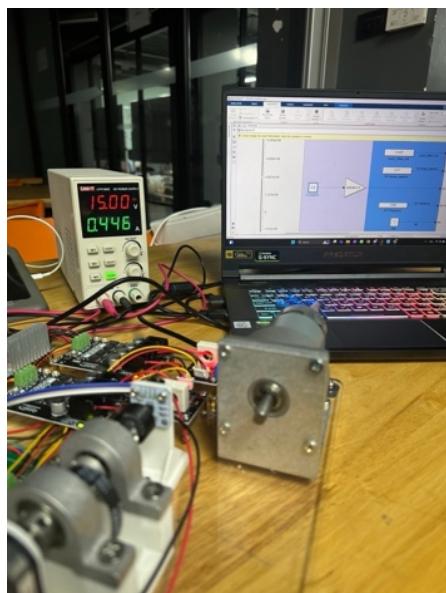
รูปที่ 35 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 1.5 V

- ที่ 2 V



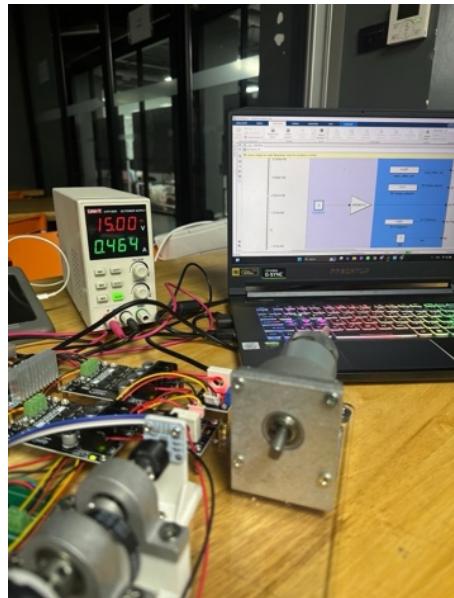
รูปที่ 36 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 2 V

- ที่ 2.5 V



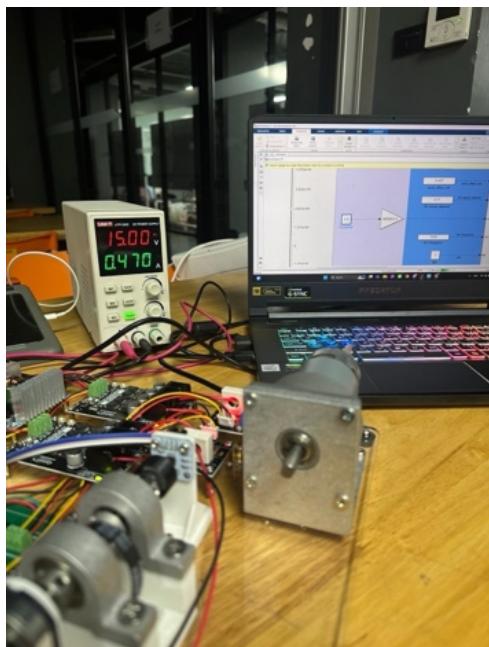
รูปที่ 37 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 2.5 V

- ที่ 3 V



รูปที่ 38 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 3 V

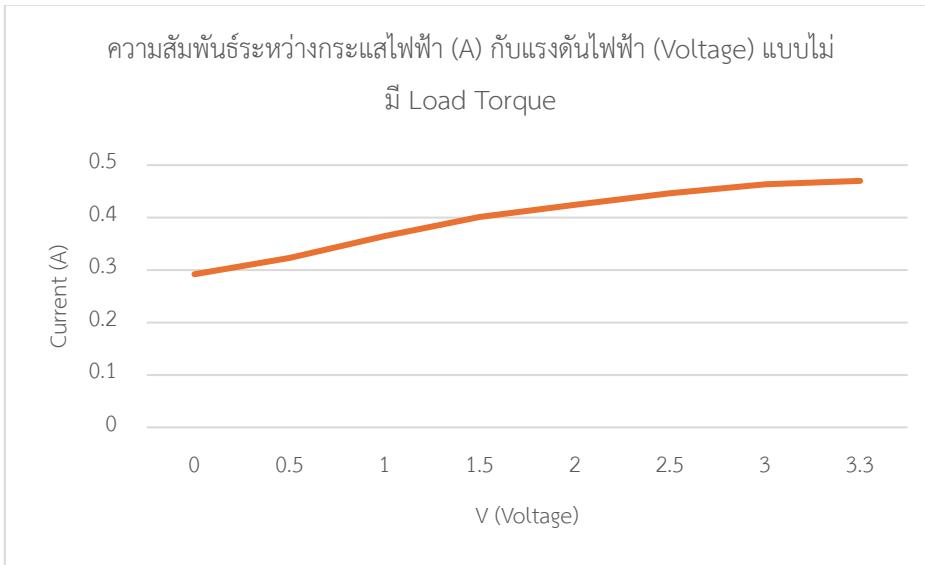
- ที่ 3.3 V



รูปที่ 39 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 3.3 V

V (Volt)	Current (A)
0	0.292
0.5	0.323
1	0.365
1.5	0.401
2	0.424
2.5	0.446
3	0.464
3.3	0.47

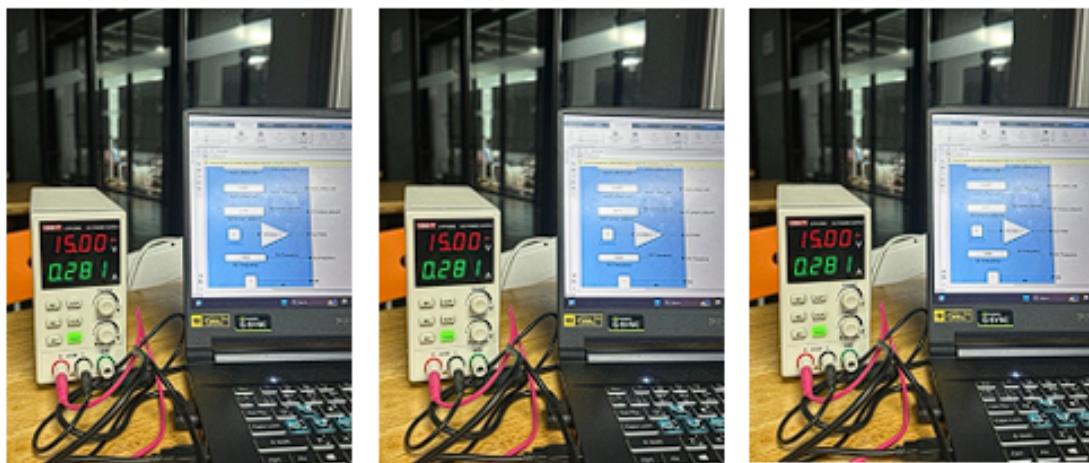
ตารางที่ 3 กระแสไฟฟ้า (A) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)



รูปที่ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) แบบไม่มี Load Torque

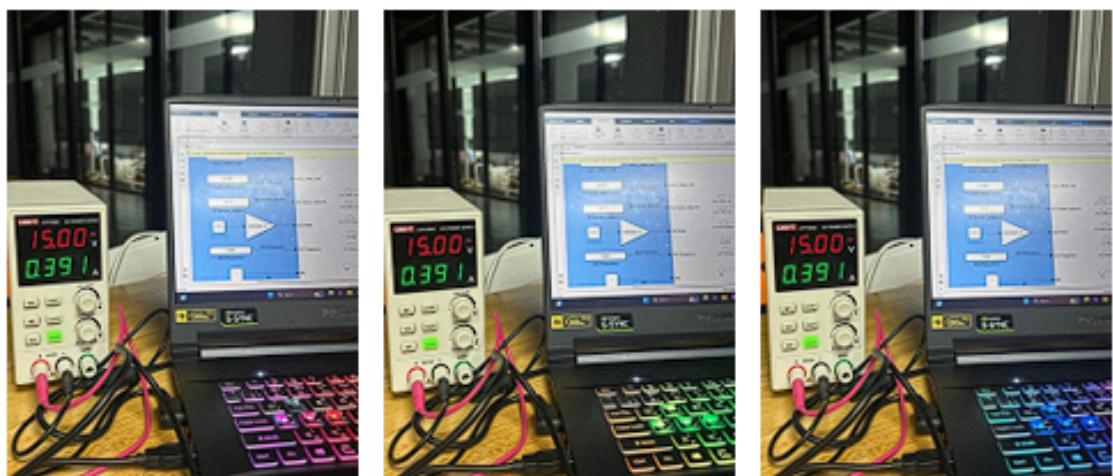
กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เมื่อมี Load Torque สูงสุด

- ที่ 0 V



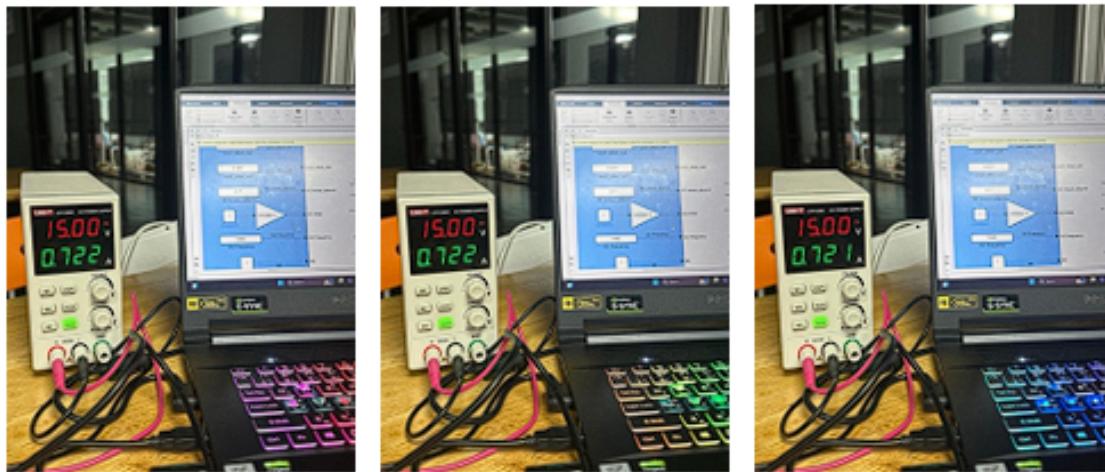
รูปที่ 41- 43 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 0 V

- ที่ 0.5 V



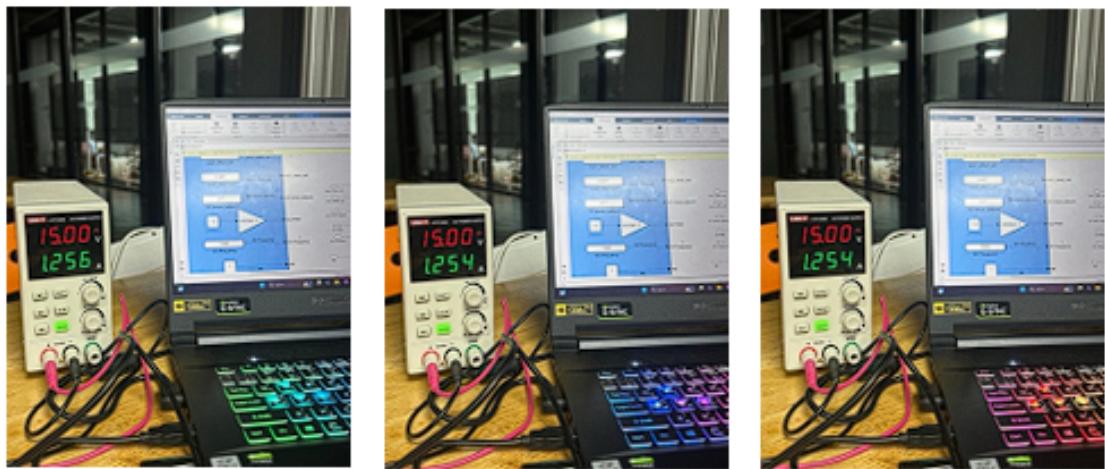
รูปที่ 44 - 46 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 0.5 V

- ที่ 1 V



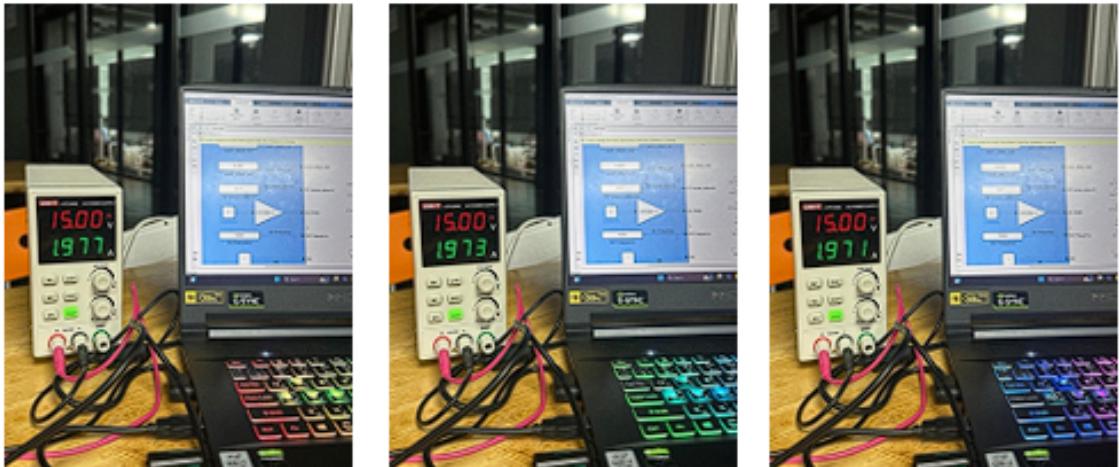
รูปที่ 47 - 49 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 1 V

- ที่ 1.5 V



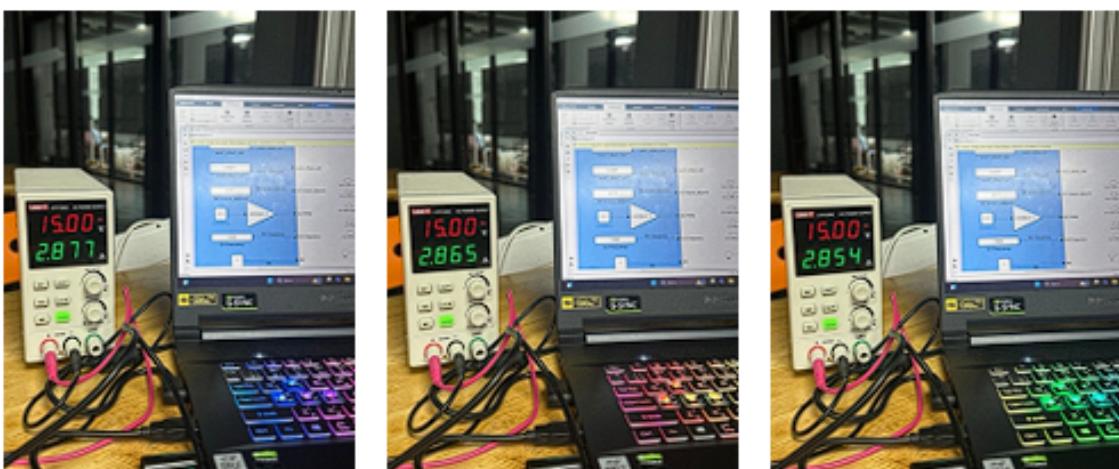
รูปที่ 50 - 52 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 1.5 V

● ที่ 2 V



รูปที่ 53 - 55 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 2 V

● ที่ 2.5 V



รูปที่ 56 - 58 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 2.5 V

- ที่ 3 V



รูปที่ 59 - 61 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 3 V

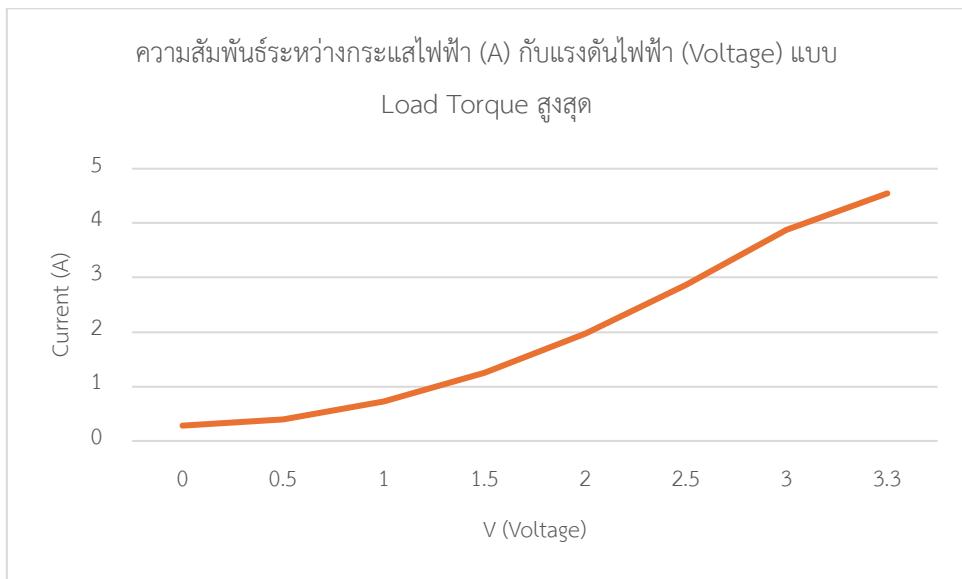
- ที่ 3.3 V



รูปที่ 62 - 64 กระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ในระดับ 3.3 V

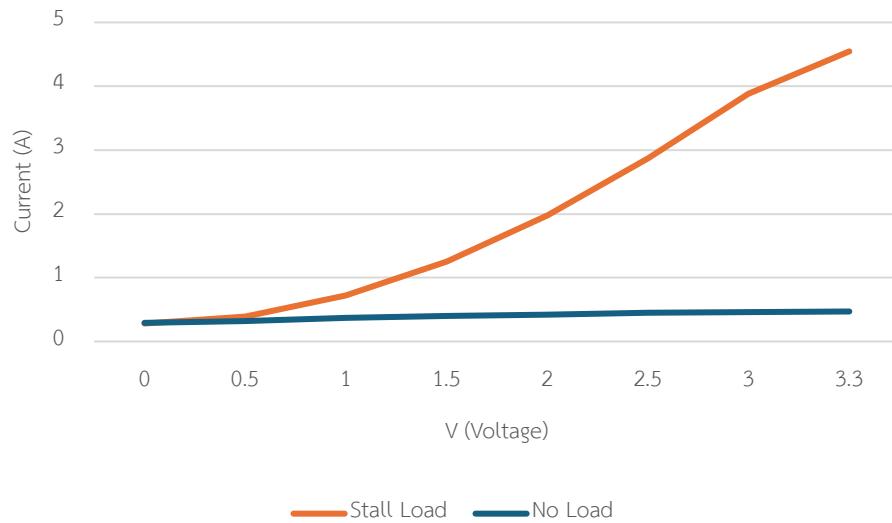
V (Volt)	Current (A)
0	0.292
0.5	0.323
1	0.365
1.5	0.401
2	0.424
2.5	0.446
3	0.464
3.3	0.47

ตารางที่ 4 กระแสไฟฟ้า (A) เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)



รูปที่ 65 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) กับแรงดันไฟฟ้า (Voltage) แบบ Load Torque สูงสุด

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) และ Load Torque สูงสุดกับแบบ  
ไม่มี Load Torque เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)



รูปที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) และ Load Torque สูงสุดกับแบบไม่มี Load Torque เมื่อ  
เทียบกับแรงดันไฟฟ้า (Voltage)

## สรุปผลการทดลอง

- ในสภาวะ No-load:

- Current จะต่ำและคงที่: เมื่อมอเตอร์ไม่ได้รับแรงบิดจากโหลด (No-load), กระแสที่มอเตอร์ดึงจะไม่สูงมาก เนื่องจากมอเตอร์ทำงานเพียงเล็กน้อยและไม่มีการต่อต้านจากแรงบิด (Torque) สูง
- กราฟจะมีค่า Current ที่คงที่ในระดับต่ำเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น

- ในสภาวะ Stall-load:

- Current จะสูงขึ้นตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น: เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นมอเตอร์จะต้องดึงกระแสมากขึ้นเพื่อเอาชนะแรงบิดที่สูงขึ้น
- กราฟของ Current ในสภาวะนี้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มแรงดัน และจะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่ชัดเจนขึ้นเมื่อเทียบกับในสภาวะ No-load

## อภิปรายผลการทดลอง

- ผลการทดลองยืนยันสมมติฐานที่ว่าเมื่อ Load Torque เพิ่มขึ้น Current จะเพิ่มขึ้นในสภาวะ Load Torque สูงสุดเนื่องจากมอเตอร์ต้องการกระแสเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่เพียงพอในการเอาชนะแรงต้านทานจาก Load
- ในสภาวะ No-load Current ไม่ได้รับผลกระทบจากการเพิ่ม Load Torque มากนัก เพราะมอเตอร์ไม่มีการต่อต้านจาก Load ที่มีขนาดใหญ่ จึงแสดงให้เห็นว่า Current ยังคงอยู่ในระดับต่ำและคงที่

### 6.3. การทดลองที่ 2.2

#### ตัวแปร

- ตัวแปรต้น

- Load Torque (แรงบิดที่กระทำกับมอเตอร์ ซึ่งถูกปรับโดย Magnetic Particle Clutches)

- ตัวแปรตาม

- Current (กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์)

- ตัวแปรควบคุม

- แหล่งจ่ายไฟ

- สภาพแวดล้อม อุณหภูมิในห้อง

- แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

## อุปกรณ์การทดลอง

1. Nidec Components Geared DC Geared Motor, 12 V dc, 20 Ncm, 70 rpm, 6mm Shaft Diameter
2. Incremental Encoder AMT103-V
3. Warner Electric Magnetic Particle Clutches MPB12
4. WCS1700 Hall Current Sensor
5. Cytron MDD20A Motor Driver
6. Nucleo STM32G474RE พร้อมสายอัปโหลด
7. MotorXplorer

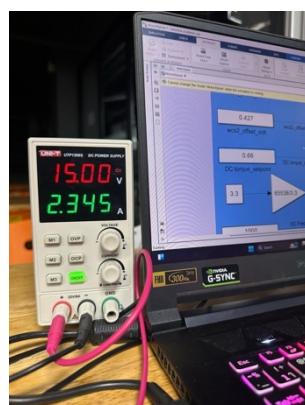
## ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. เชื่อมต่อ Incremental Load Cell เข้ากับ STM32G474RE
2. เพิ่มขนาด Load Torque ตั้งแต่ 0.6 – 0.85 Nm ครั้งละ 0.01 Nm
3. เปิดใช้งาน DC Motor และเก็บค่า Current ที่อ่านได้ในแต่ละครั้ง

## ผลการทดลอง

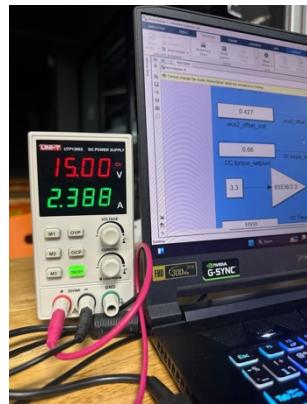
กระแสไฟฟ้าที่อ่านที่แรงดัน 3.3 V

- ที่ Load Torque 0.6 Nm



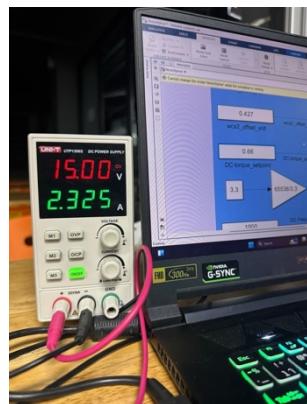
รูปที่ 67 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.6 Nm

- ที่ Load Torque 0.61 Nm



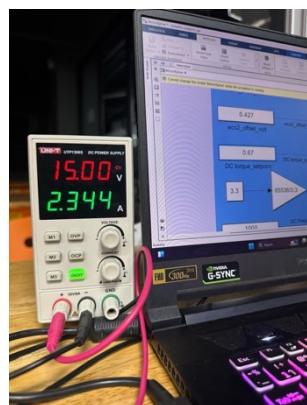
รูปที่ 68 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.61 Nm

- ที่ Load Torque 0.62 Nm



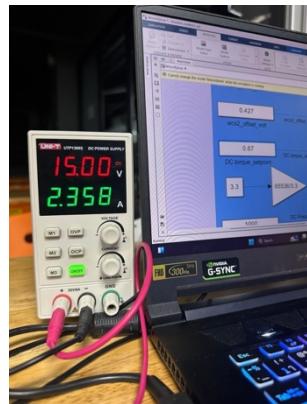
รูปที่ 69 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.62 Nm

- ที่ Load Torque 0.63 Nm



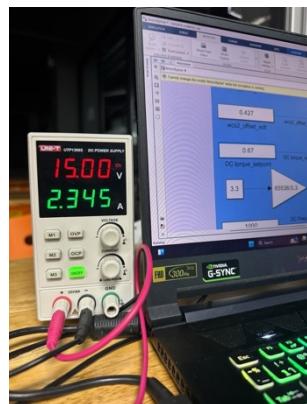
รูปที่ 70 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.63 Nm

- ที่ Load Torque 0.64 Nm



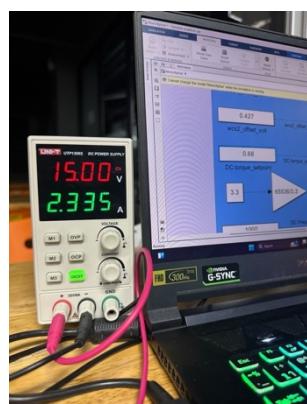
รูปที่ 71 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.64 Nm

- ที่ Load Torque 0.65 Nm



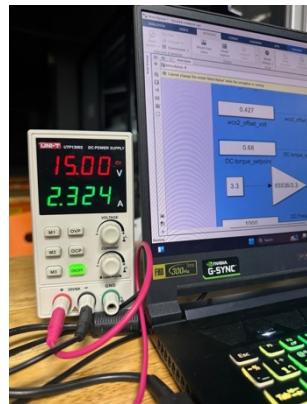
รูปที่ 72 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.65 Nm

- ที่ Load Torque 0.66 Nm



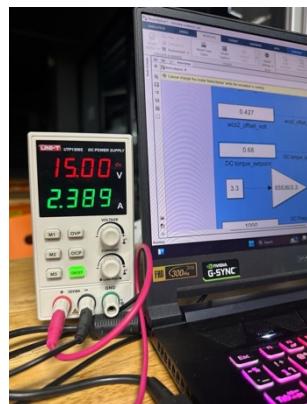
รูปที่ 73 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.66 Nm

- ที่ Load Torque 0.67 Nm



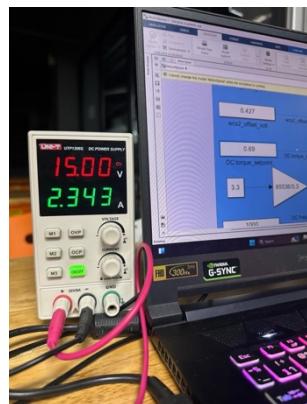
รูปที่ 74 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.67 Nm

- ที่ Load Torque 0.68 Nm



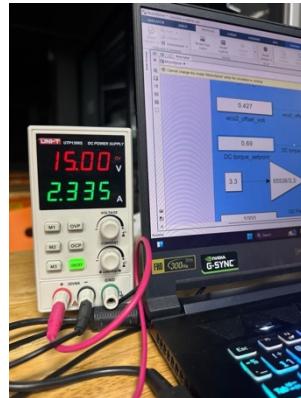
รูปที่ 75 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.68 Nm

- ที่ Load Torque 0.69 Nm



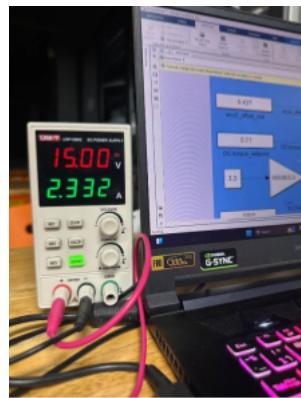
รูปที่ 76 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.69 Nm

- ที่ Load Torque 0.70 Nm



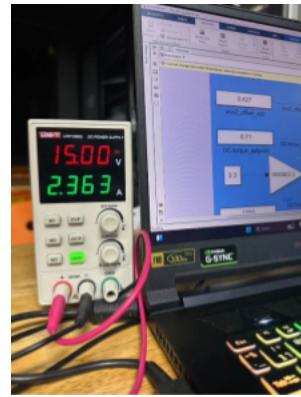
รูปที่ 77 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.70 Nm

- ที่ Load Torque 0.71 Nm



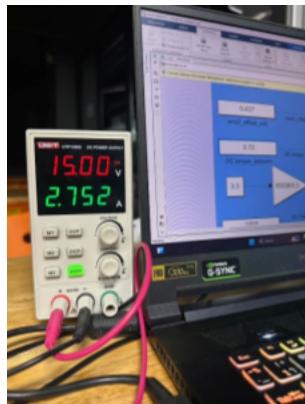
รูปที่ 78 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.71 Nm

- ที่ Load Torque 0.72 Nm



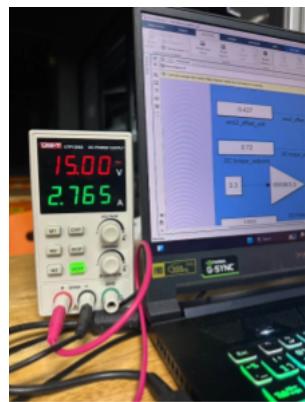
รูปที่ 79 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.72 Nm

- ที่ Load Torque 0.73 Nm



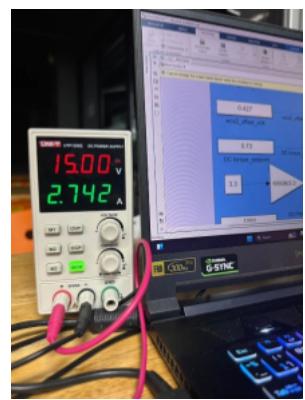
รูปที่ 80 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.73 Nm

- ที่ Load Torque 0.74 Nm



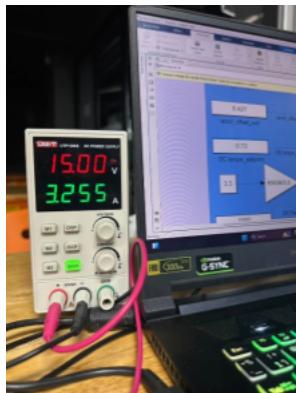
รูปที่ 81 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.74 Nm

- ที่ Load Torque 0.75 Nm



รูปที่ 82 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.75 Nm

- ที่ Load Torque 0.76 Nm



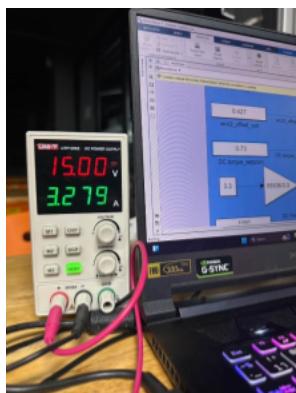
รูปที่ 83 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.76 Nm

- ที่ Load Torque 0.77 Nm



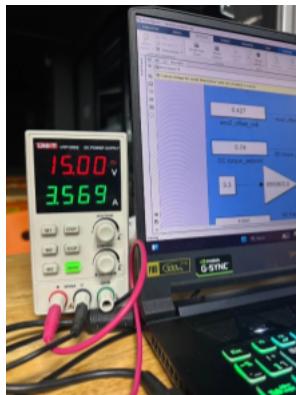
รูปที่ 84 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.77 Nm

- ที่ Load Torque 0.78 Nm



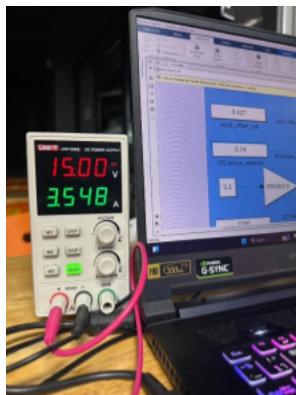
รูปที่ 85 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.78 Nm

- ที่ Load Torque 0.79 Nm



รูปที่ 86 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.79 Nm

- ที่ Load Torque 0.80Nm



รูปที่ 87 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.80 Nm

- ที่ Load Torque 0.81Nm



รูปที่ 88 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.81 Nm

- ที่ Load Torque 0.82Nm



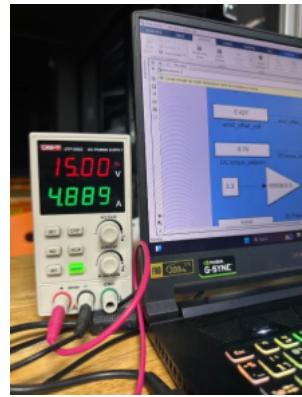
รูปที่ 89 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.82 Nm

- ที่ Load Torque 0.83Nm



รูปที่ 90 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.83 Nm

- ที่ Load Torque 0.84Nm



รูปที่ 91 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.84 Nm

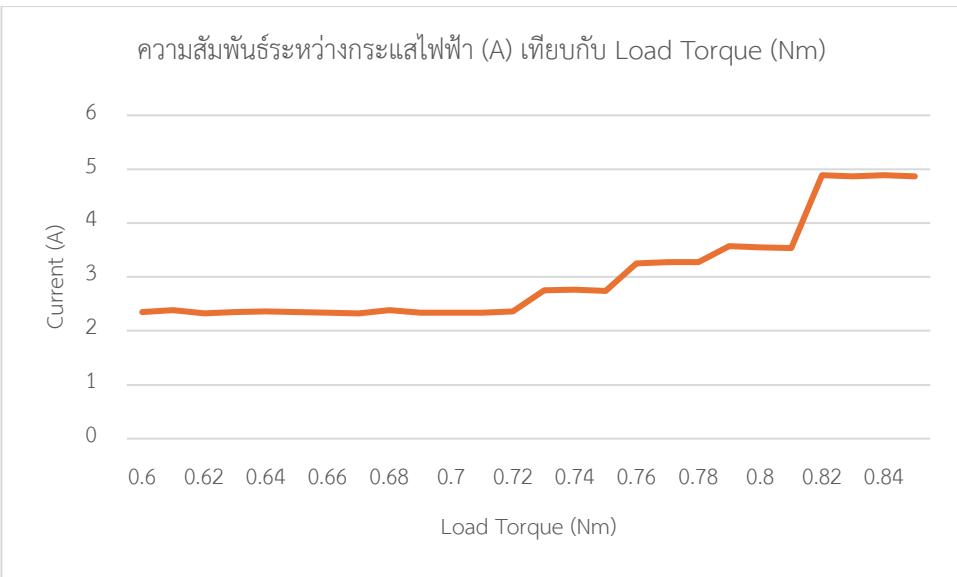
- ที่ Load Torque 0.85Nm



รูปที่ 92 กระแสไฟฟ้า (A) ที่อ่านได้ที่ Load Torque 0.85 Nm

Load Torque (Nm)	Current (A)
0.6	2.345
0.61	2.388
0.62	2.325
0.63	2.344
0.64	2.358
0.65	2.345
0.66	2.335
0.67	2.324
0.68	2.389
0.69	2.343
0.7	2.335
0.71	2.332
0.72	2.363
0.73	2.752
0.74	2.765
0.75	2.742
0.76	3.255
0.77	3.281
0.78	3.279
0.79	3.569
0.8	3.548
0.81	3.536
0.82	4.889
0.83	4.871
0.84	4.889
0.85	4.862

ตารางที่ 5 Load Torque(Nm) เทียบกับ Current (A)



รูปที่ 93 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (A) เทียบกับ Load Torque (Nm)

### สรุปผลการทดลอง

- ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current) และแรงบิดที่โหลด (Load Torque)
  - กราฟ Current vs Load Torque แสดงแนวโน้มว่า Current เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Load Torque
  - ความสัมพันธ์มีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้นในช่วง Load Torque ที่ต่ำ แต่เริ่มมีการเบี่ยงเบนจากความเป็นเส้นตรงเมื่อ Load Torque อยู่ในช่วงสูงกว่า 0.72 Nm
- ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด
  - กระแสไฟฟ้าต่ำสุดถูกวัดที่ Load Torque = 0.6, ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาพะโหลดเบา
  - กระแสไฟฟ้าต่ำสุดถูกวัดที่ Load Torque = 0.6, ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาพะโหลดเบา
- กระแสไฟฟ้าต่ำสุดถูกวัดที่ Load Torque = 0.6, ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาพะโหลดเบา
  - กระแสไฟฟ้าต่ำสุดถูกวัดที่ Load Torque = 0.6 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าต่ำสุดที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาพะโหลดเบา
  - ในช่วงหลัง (0.72 - 0.85), อัตราการเพิ่มขึ้นของ Current เริ่มชะลอตัวเล็กน้อยอาจเป็นเพราะผลกระทบจากการสูญเสียพลังงาน (Losses) หรือข้อจำกัดทางกลของมอเตอร์

## อภิปรายผลการทดลอง

- จากทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) พบว่า กระแสไฟฟ้า (Current) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงบิด (Torque) ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการว่า  $T = k_t \cdot I$  กล่าวคือ แรงบิดมีค่าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าที่เหล่านมอเตอร์ ในช่วงที่โหลดเบา มอเตอร์ต้องการกระแสไฟฟ้าต่ำเพื่อสร้างแรงบิดที่เทียบพอต่อการหมุนของโรเตอร์ แต่เมื่อโหลดเพิ่มขึ้น มอเตอร์จำเป็นต้องดึงกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่มากขึ้นให้สามารถเอาชนะแรงต้านจากโหลดได้ ส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของโหลดแรงบิด (Load Torque)
- และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงที่แรงบิดอยู่ในช่วงที่สูง การเพิ่มของกระแสไฟฟ้าจะมาพร้อมกับการสูญเสียพลังงานในระบบ (Losses)

## Stepper Motor : การทดลองที่ 1

### ตัวแปร

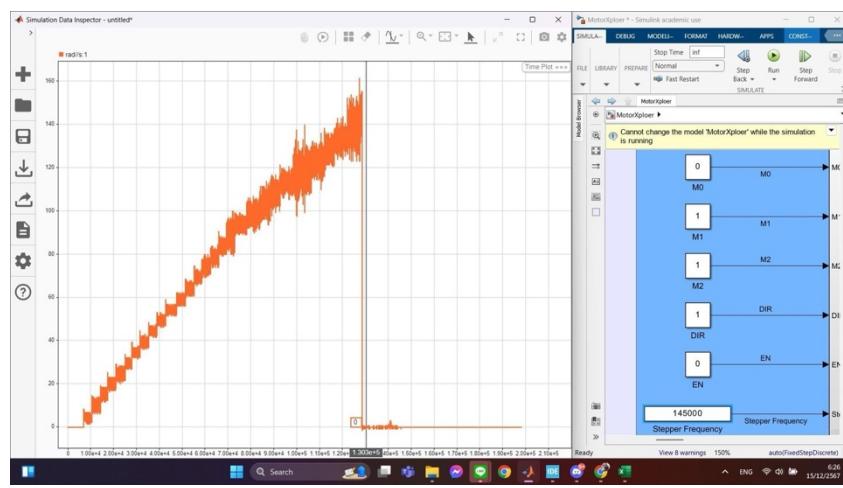
- ตัวแปรต้น
  - รูปแบบการ Drive Stepper Motor แบบ Full - Step และ Half Step
  - ความถี่ (Frequency) ในการสั่ง Drive Stepper Motor
- ตัวแปรตาม
  - ลักษณะการหมุน
  - ความเร็ว (Speed) ในการหมุน
- ตัวแปรควบคุม
  - แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ
  - การตั้งค่าไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G474RE
  - Stepper Motor
  - Stepper Driver

### วิธีดำเนินการทดลอง

1. เชื่อมต่อ Nucleo STM32G474RE เข้ากับบอร์ด MotorXplorer
2. ปรับโหมดของ Stepper Motor Driver
3. ปรับความถี่ของ Stepper Motor ให้มีความถี่ที่ต่างกัน 10 ความถี่
4. เปลี่ยนโหมดของ Stepper Motor Driver และทำข้อที่ 3 อีกครั้ง

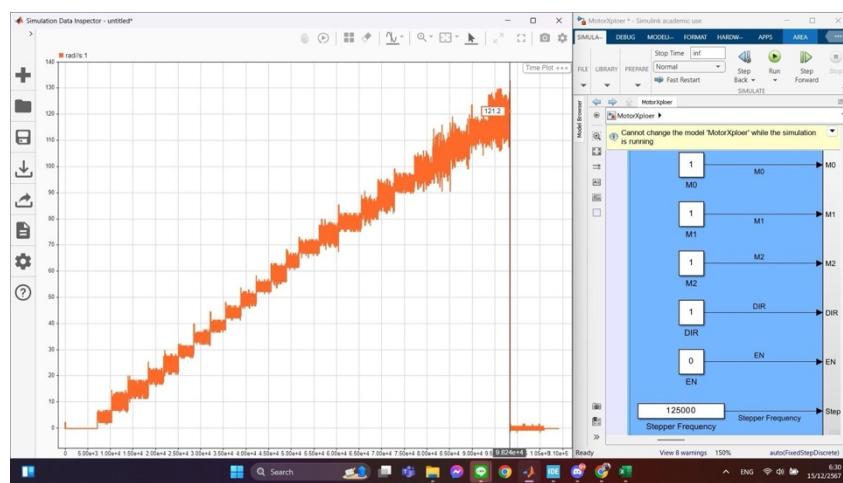
## ผลการทดลอง

- โหมด 111 (Full – Step)
  - มีความเร็วสูงสุดประมาณ 140 rad/s
  - ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 145000



รูปที่ 94 โหมด 111 (Full – Step)

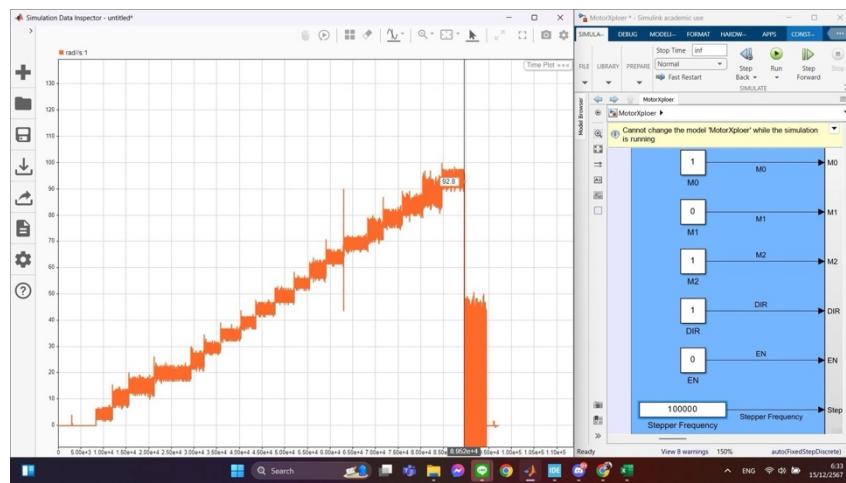
- โหมด 011 (Half – Step)
  - มีความเร็วสูงสุดประมาณ 120 rad/s
  - ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 125000



รูปที่ 95 โหมด 011 (Half – Step)

- โหมด 101 (Micro – Step 1/4)

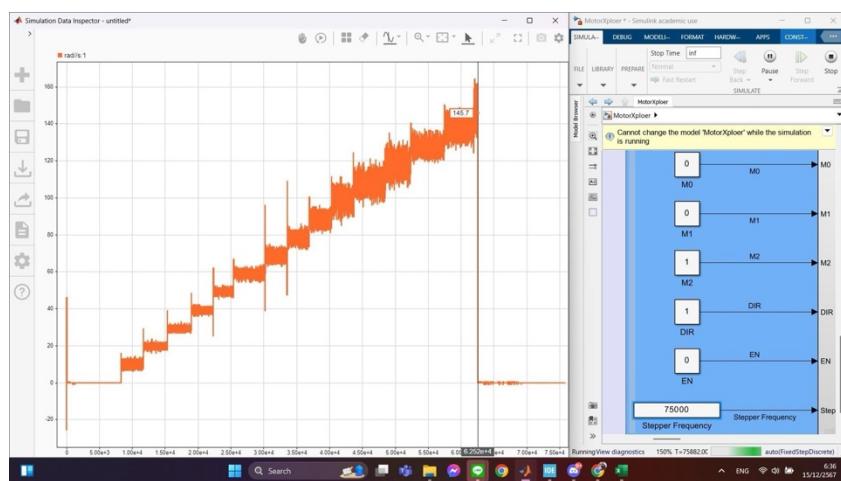
- มีความเร็วสูงสุดประมาณ 90 rad/s
- ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 100000



รูปที่ 96 โหมด 101 (Micro – Step 1/4)

- โหมด 001 (Micro – Step 1/8)

- มีความเร็วสูงสุดประมาณ 145 rad/s
- ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 75000

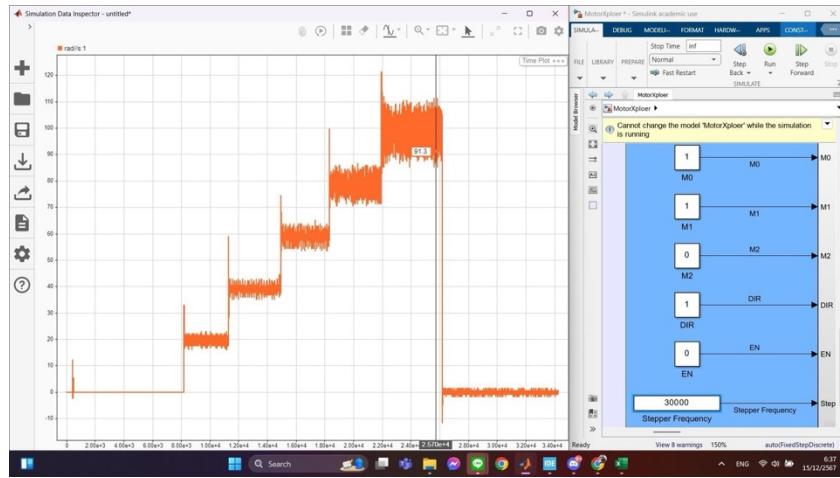


รูปที่ 97 โหมด 001 (Micro – Step 1/8)

- โหมด 110 (Micro – Step 1/16)

- มีความเร็วสูงสุดประมาณ 110 rad/s

- ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 30000

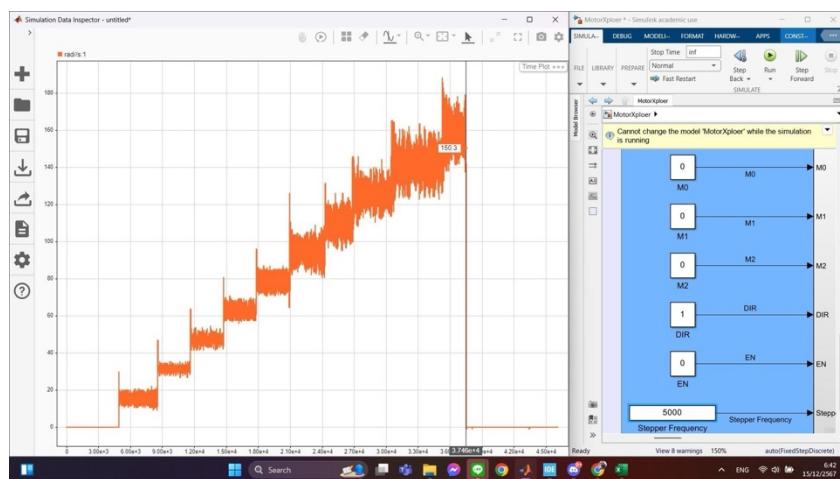


รูปที่ 98 โหมด 110 (Micro – Step 1/16)

- โหมด 000 (Micro – Step 1/32)

- มีความเร็วสูงสุดประมาณ 160 rad/s

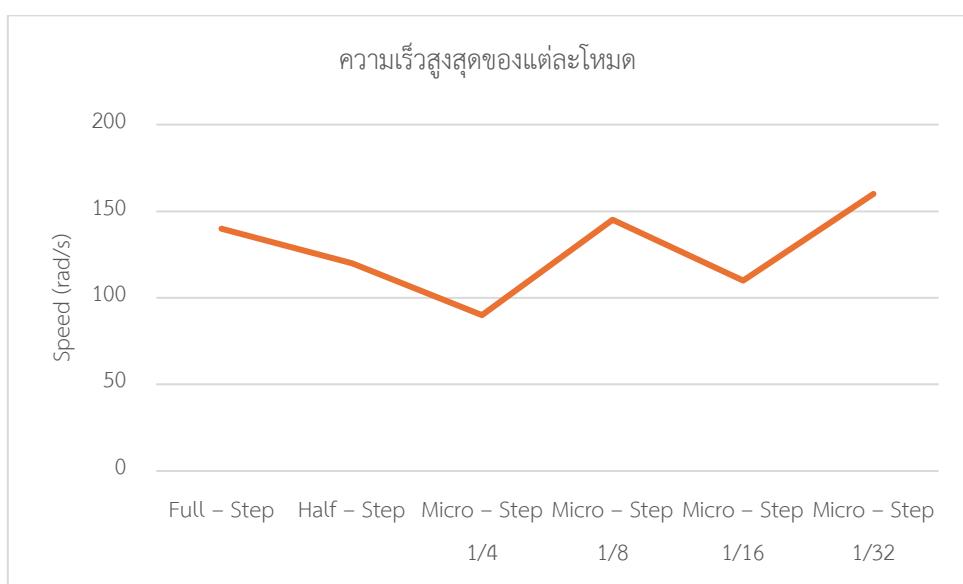
- ความถี่สูงสุดที่ปรับได้คือ 5000



รูปที่ 99 โหมด 000 (Micro – Step 1/32)

Drive Type	Speed (rad/s)
Full – Step	140
Half – Step	120
Micro – Step 1/4	90
Micro – Step 1/8	145
Micro – Step 1/16	110
Micro – Step 1/32	160

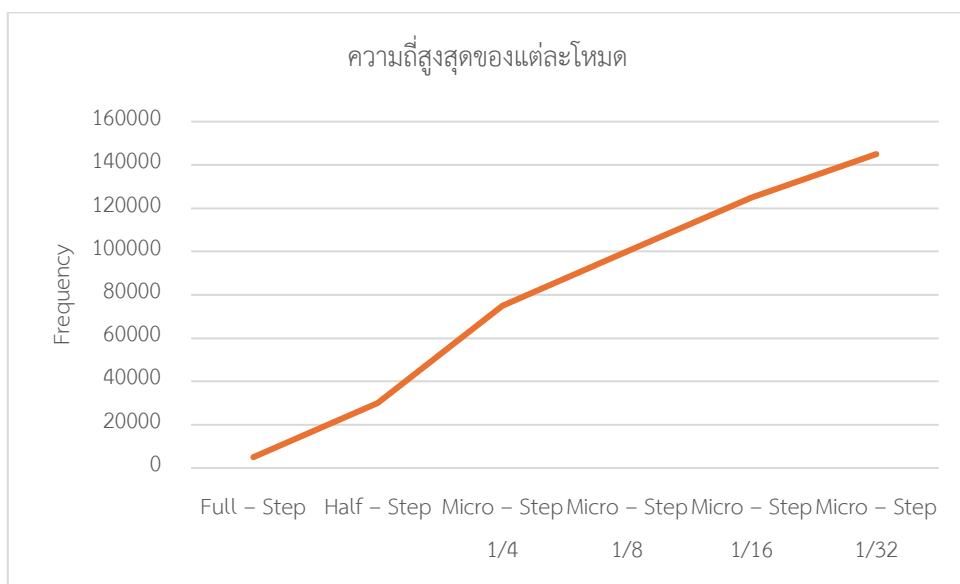
ตารางที่ 6 ความเร็วสูงสุดของแต่ละโหมด



รูปที่ 100 ความเร็วสูงสุดของแต่ละโหมด

Drive Type	Frequency
Full – Step	145000
Half – Step	125000
Micro – Step 1/4	100000
Micro – Step 1/8	75000
Micro – Step 1/16	30000
Micro – Step 1/32	5000

ตารางที่ 7 ความถี่สูงสุดของแต่ละโหมด



รูปที่ 101 ความถี่สูงสุดของแต่ละโหมด

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์ภายใต้แรงดันไฟฟ้าคงที่

- ความเร็วสูงสุดจะลดลงตามระดับของ Micro – Stepping ยิ่งละเอียดจะยิงชัลวงเรื่อย ๆ
  - Full – Step ความเร็วสูงสุดมากที่สุด
  - Half – Step ลดลงเมื่อเทียบกับ Full-Step
  - Micro – Step ยิ่งละเอียด ความเร็วจะลดลงมากขึ้นเรื่อย ๆ
- Frequency สูงสุดที่ตัวมอเตอร์และระบบขับเคลื่อนรองรับจะเพิ่มขึ้นตามระดับของ Micro-Stepping เพราะต้องส่ง Pulses จำนวนมากขึ้นเพื่อให้ได้การเคลื่อนที่ที่ละเอียดและแม่นยำ
  - Full – Step ใช้ Frequency ต่ำสุด

- Half – Step ใช้ Frequency สูงกว่า Full – Step
- Micro – Step ใช้ Frequency มากที่สุด ໄล่ตามจำนวน Micro – Steps

#### อภิปรายผลการทดลอง

- ในโหมด Full-Step มอเตอร์สามารถทำความเร็วสูงสุดได้มากที่สุด เนื่องจากจำนวน Step ต่อรอบมีค่าน้อยที่สุด (200 Step ต่อรอบ) จึงไม่ต้องการ Pulses มาก
- ในโหมด Half-Step และ Micro-Step ความเร็วสูงสุดควรจะลดลง เพราะจำนวน Pulses ต่อรอบเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของโหมด
- ความถี่ที่ต้องใช้ในโหมด Micro – Step สูงขึ้นมากตามความละเอียด เช่น
  - Full – Step ต้องการ Frequency ต่ำสุด
  - 1/32 Micro – Step ต้องการ Frequency มากกว่าถึง 16 เท่าของ Full – Step

## 7. แหล่งข้อมูลอ้างอิง

- [https://www.researchgate.net/figure/Permanent-magnet-stepper-motor-2\\_fig3\\_339738022](https://www.researchgate.net/figure/Permanent-magnet-stepper-motor-2_fig3_339738022)
- <https://www.fibossensor.com/how-to-use-a-piezoelectric-load-cell.html>
- <https://www.futek.com/load-cell-accuracy>
- <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-dc-series-motor-and-shunt-motor/>
- <https://jana155.blogspot.com/2020/03/type-of-dc-motor-shunt-series-and.html?m=1>
- [https://www.researchgate.net/publication/373841103\\_Output\\_Feedback\\_Control\\_of\\_Two-Time-Scale\\_Permanent-Magnet\\_DC\\_Motor\\_Using\\_High-Gain\\_Observers](https://www.researchgate.net/publication/373841103_Output_Feedback_Control_of_Two-Time-Scale_Permanent-Magnet_DC_Motor_Using_High-Gain_Observers)
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024013021>
- <https://www.electricleeasy.com/2014/07/characteristics-of-dc-motors.html>
- <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pulse-width-modulation/duty-cycle>
- [https://soldered.com/learn/pwm-pulse-width-modulation/?srsltid=AfmBOorPrEnvhYo2m79ZvOS9aASB5dAVM5JH\\_6hFaypuwpJmdN9zxOj3](https://soldered.com/learn/pwm-pulse-width-modulation/?srsltid=AfmBOorPrEnvhYo2m79ZvOS9aASB5dAVM5JH_6hFaypuwpJmdN9zxOj3)
- <https://store.fut-electronics.com/products/dual-channel-dc-motor-driver-10a-each>
- <https://www.arduintronics.com/product/305/wcs1700-hall-current-sensor-over-current-detection-sensor-70a>

## 8. ข้อเสนอแนะ

- การใช้เมมโมเตอร์หลายตัว สำหรับการทดลองในอนาคต การใช้เมมโมเตอร์หลายตัวร่วมกัน เช่น การควบคุมการหมุนของ DC Motor และ Stepper Motor ในการเคลื่อนที่หรือการควบคุมร่วมกันในทุนยนต์หรือระบบที่มีหลายมอเตอร์ เช่น ทุนยนต์เคลื่อนที่ในหลายทิศทาง หรือใช้ในการควบคุมมุมของอุปกรณ์ที่มีการหมุนหลายมุม
- การใช้ตัวควบคุมที่ซับซ้อนมากขึ้น: แนะนำให้ทดลองใช้ ตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative) สำหรับการควบคุมความเร็วหรือการหมุนของมอเตอร์ โดยที่สามารถปรับพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองอย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำสูง