

การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 350W สำหรับรถจักรยานไฟฟ้า Design and Construction of a 350W Brushless DC Motor Controller for an Electric Bicycle

ขวัญใจ นาชัยภูมิ และ อารักษ์ บุญมัตย์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น arak.bu@muti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ ร่วมกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สำหรับรถจักรยานไฟฟ้า โดยใช้เซ็นเซอร์ฮอลล์ตรวจจับตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ที่เหมาะสม ส่งผ่านไปยังวงจรถับเกต เพื่อขยายสัญญาณควบคุมทรานซิสเตอร์ชนิดมอสเฟตกำลังในวงจรเอชบริดจ์แบบ 3 เฟส จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดทั้งสามของมอเตอร์อย่างเป็นลำดับ ส่งผลให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนได้อย่างแม่นยำ และมีประสิทธิภาพตามทิศทางและความเร็วที่ต้องการ ผลการทดสอบ พบว่ารถจักรยานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ทำความเร็วสูงสุด 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ระยะทาง 500 เมตร เมื่อรับน้ำหนักผู้ขับขี่ 60 กิโลกรัม และวิ่งได้ระยะทาง 3 กิโลเมตรต่อการชาร์จแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

คำสำคัญ: รถจักรยานไฟฟ้า มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

Abstract

This research aims to design and construct a 36-volt, 350-watt Brushless DC (BLDC) motor control unit for an electric bicycle, integrated with a lithium-ion battery. The system utilizes a Hall Sensor to detect the rotor's angular position, sending this information to a microcontroller for processing. The microcontroller then generates appropriate Pulse Width Modulation (PWM) signals, which are transmitted to a Gate Driver circuit. This circuit amplifies the signals to control power MOSFET transistors within a 3-phase H-bridge, which in turn sequentially supplies electric current to the three motor windings. This process creates a rotating magnetic field that drives the motor precisely and efficiently according to the desired direction and speed. Test results indicate that the developed electric bicycle can move forward as specified. It achieved a maximum speed of 30 km/hr over a distance of 500 m with a 60 kg rider and achieved a range of 3 kilometers per single battery charge at a speed of 20 km/hr.

Keywords: Electric Bicycle, Brushless DC Motor, Lithium-ion Battery

1. บทนำ

ปัจจุบัน การใช้ยานยนต์สันดาปจากเชื้อเพลิงฟอสซิลก่อให้เกิดมลพิษและปัญหาพลังงานอย่างรุนแรง การพัฒนายานพาหนะทางเลือกจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งยานพาหนะไฟฟ้า (EV) โดยเฉพาะรถจักรยานไฟฟ้า กำลังได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงาน แต่ยานพาหนะไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่านยังคงมีข้อจำกัดเรื่องน้ำหนัก เสียงดัง การสูญเสียพลังงาน และการสึกหรอ เพื่อแก้ปัญหานี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC) จึงเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง บำรุงรักษาน้อย เสียงเงียบ ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และอายุการใช้งานยาวนาน [1]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน เช่น รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน [2] นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ BLDC 24/48 โวลต์ 350 วัตต์ ด้วยไอซี MC33033 ใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดขนาด 12V ความจุ 7 Ah จำนวน 4 ลูก พบว่าสามารถควบคุมได้เป็นอย่างดีทั้งทางราบเรียบ และทางชัน และการออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซล่าเซลล์ [3] นำเสนอการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ด้วยไอซี MC33035 พบว่า สามารถทำความเร็วสูงสุด 8.15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงที่น้ำหนักโหลด 60 กิโลกรัม และกระแสไฟฟ้าสูงสุดในขณะออกตัวมีค่าเท่ากับ 37.24 แอมป์ และมากขึ้นตามน้ำหนักโหลด

ด้วยเหตุผล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงได้การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดไร้แปรงถ่าน ร่วมกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery) สำหรับรถจักรยานไฟฟ้า เพื่อให้ได้รถจักรยานไฟฟ้าต้นแบบที่สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor: BLDC)

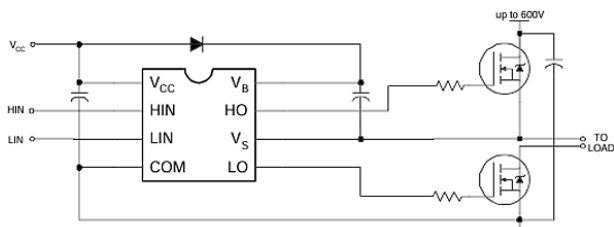
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน คือมอเตอร์ที่ถูกออกแบบมาโดยไม่มีแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ การควบคุมมอเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะอาศัยหลักการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดมอเตอร์อย่างเหมาะสม โดยเลือกใช้มอเตอร์ฮับ (Hub Motor) [4] เนื่องจากให้การขับเคลื่อนที่เรียบง่าย มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับรถจักรยานไฟฟ้า ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 มอเตอร์คูล์ (Hub Motor) ขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์

3. วงจรขับเกต (Gate Drivers)

วงจรขับเกตจะถูกใช้เพื่อรับสัญญาณควบคุมกำลังต่ำจากตัวควบคุมและขยายสัญญาณนั้นให้เป็นกระแสเอาต์พุตที่สูงขึ้นเพื่อขับเคลื่อนมอสเฟตกำลัง (Power MOSFET) วงจร IR2101 เป็นวงจรขับเกตแบบฝั่งสูงและฝั่งต่ำ ซึ่งใช้สำหรับขับเคลื่อนมอสเฟตกำลัง ที่ใช้ในวงจรแปลงผัน (Converter) มีความสามารถในการทำงานที่แรงดัน และความเร็วสูง [5] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังวงจรขับเกต IR2101

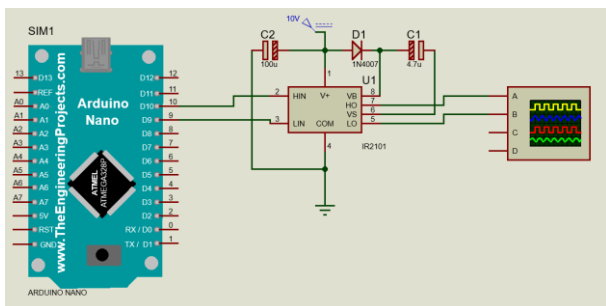
4. การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน

4.1 การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายพลังงาน

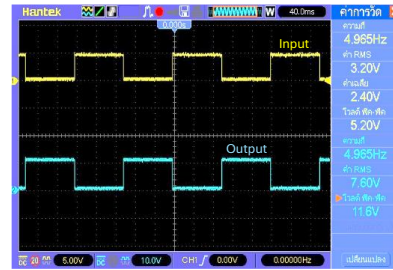
งานวิจัยนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่น 18650 ขนาด 3.7 โวลต์ ความจุ 3000 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง จำนวน 20 ก้อน จัดเรียงแบบ 10s 2p ทำให้ได้แบตเตอรี่แพ็คขนาด 37 โวลต์ 6000 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อการจ่ายพลังงานให้ระบบ

4.2 การออกแบบวงจรทดสอบการทำงานของวงจรขับเกต

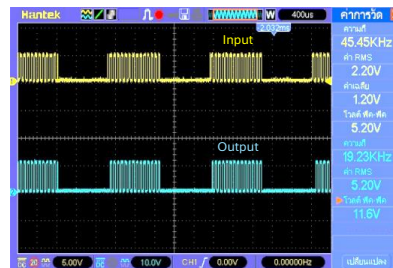
จากทฤษฎี สามารถออกแบบวงจรขับเกตฝั่งสูงและฝั่งต่ำในโปรแกรม Proteus 8 ดังแสดงในรูปที่ 3 และได้ผลการทดสอบฝั่งแรงดันต่ำ และฝั่งแรงดันสูงที่ Duty cycle 50% และ 100% ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 6



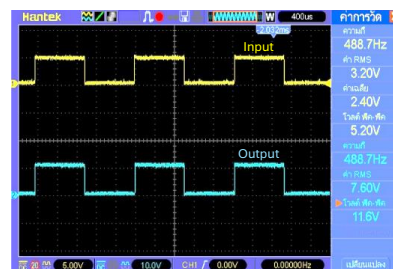
รูปที่ 3 วงจรทดสอบการทำงานของวงจรขับเกต



รูปที่ 4 ทดสอบวงจรขับเกตฝั่งแรงดันต่ำ



รูปที่ 5 ทดสอบวงจรขับเกตฝั่งแรงดันสูง ที่ Duty cycle 50%

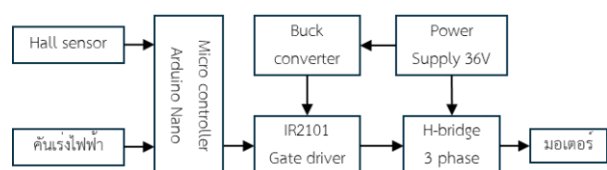


รูปที่ 6 ทดสอบวงจรขับเกตฝั่งแรงดันสูง ที่ Duty cycle 100%

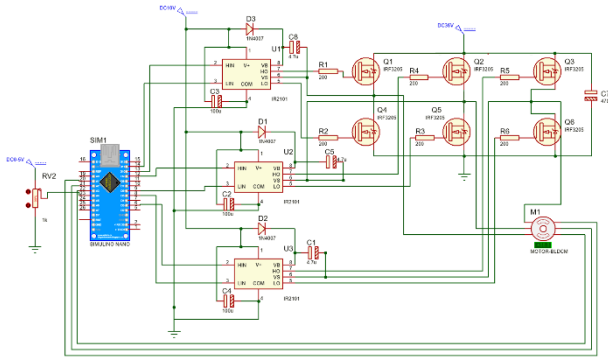
จากผลการทดสอบโดยการจ่ายสัญญาณอินพุตและปรับค่า Duty cycle ที่ 50 และ 100% จะเห็นได้ว่าด้าน High-side ของ IR2101 เอาต์พุตจะมีสถานะตรงกับอินพุต และจะมีการขยายแรงดันเอาต์พุตจากวงจรขยาย Bootstrap เพื่อไปขับขาเกตของมอสเฟตด้านแรงสูงได้

4.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์แบ่งการทำงานออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนอุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูล และส่วนวงจรกำลังสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลกลาง ดังแสดงในรูปที่ 7 และออกแบบวงจรและทดสอบภายในโปรแกรม Proteus 8 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

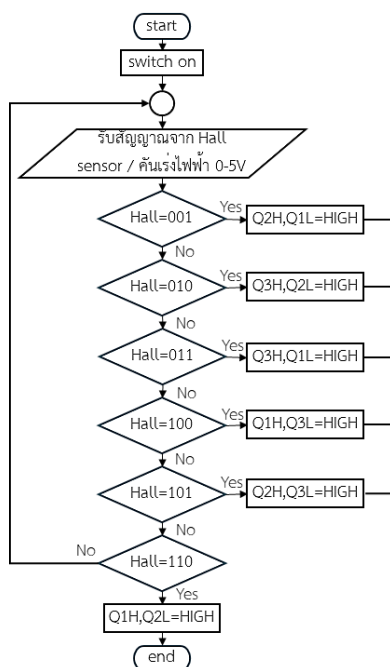


รูปที่ 8 วงจรชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 8 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณอนาล็อกจากคันเร่งไฟฟ้า (0-5V) เพื่อคำนวณความกว้างของสัญญาณ PWM พร้อมทั้งรับข้อมูลตำแหน่งโรเตอร์จากเซ็นเซอร์ฮอลล์ในเวลาเดียวกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้ข้อมูลตำแหน่งนี้ในการเลือกเฟสที่ต้องการสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก และส่งสัญญาณ PWM ไปยังวงจรขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์เฟสกำลัง ในวงจรเอชบริดจ์ (H-bridge) แบบ 3 เฟส จากนั้นวงจรเอชบริดจ์ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดมอเตอร์ BLDC อย่างเป็นลำดับ และสัมพันธ์กับการหมุนของโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างแม่นยำตามทิศทางและความเร็วที่กำหนด

4.4 การออกแบบซอฟต์แวร์

ออกแบบการจำลองสัญญาณอินพุตจากเซ็นเซอร์ฮอลล์ ด้วยแหล่งจ่ายสัญญาณดิจิทัล เพื่อป้อนลำดับสัญญาณตำแหน่งโรเตอร์เข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังโฟลว์ชาร์ตรูปที่ 9 และได้สัญญาณเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ฮอลล์ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

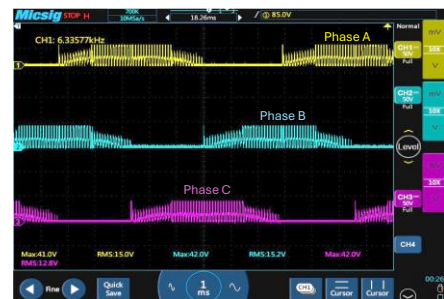


รูปที่ 10 สัญญาณ Hall Sensor ของมอเตอร์แบบ 120 องศา

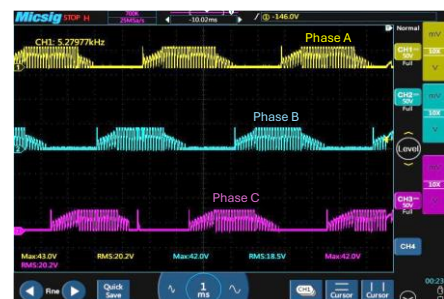
5. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

5.1 ทดสอบชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

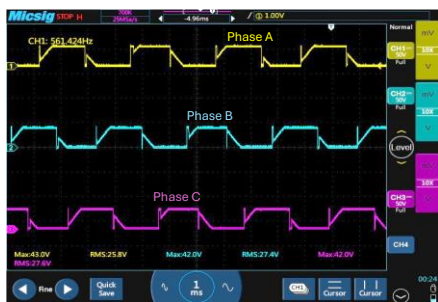
การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยเน้นการตรวจสอบสัญญาณเฟสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ การทำงานของชุดควบคุมอาศัยข้อมูลตำแหน่งการหมุนของโรเตอร์ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์สนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) เพื่อให้ชุดควบคุมสามารถสร้างและส่งสัญญาณสวิตซ์ซึ่งต้องไปยังวงจรขับเคลื่อน ซึ่งจะส่งผลให้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังมอเตอร์อย่างเหมาะสม โดยทำการวัดสัญญาณเฟสควบคุมมอเตอร์ A, B และ C โดยทำการบิดคันเร่งที่ 25, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงสัญญาณเอาต์พุต ในรูปที่ 11 ถึง 13 ตามลำดับ



รูปที่ 11 สัญญาณเฟสควบคุมมอเตอร์ A, B และ C โดยทำการบิดคันเร่งที่ 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 12 สัญญาณเฟสควบคุมมอเตอร์ A, B และ C โดยทำการบิดคันเร่งที่ 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 13 สัญญาณเฟสควบคุมมอเตอร์ A, B และ C
โดยทำการปิดคันเร่งที่ 100 เปอร์เซนต์

จากรูปที่ 11 ถึง 13 แสดงผลการทดสอบชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ BLDC โดยวัดสัญญาณเฟสควบคุมมอเตอร์ A, B และ C ที่การปิดคันเร่ง 25, 50 และ 100% ตามลำดับ พบว่าแรงดันทั้ง 3 เฟส มีค่าเพิ่มขึ้นตามการปิดคันเร่ง และที่ 100% ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตต่อเฟสที่ 25.8Vrms, 27.4Vrms และ 27.6Vrms ตามลำดับ

5.2 ทดสอบความเร็วสูงสุดที่สามารถทำได้ในระหว่างและน้ำหนักผู้ขับขี่ที่แตกต่างกัน

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถของชุดควบคุมและมอเตอร์ในการขับเคลื่อนรถจักรยานไฟฟ้า ดังรูปที่ 15 โดยทดสอบบนถนนเรียบและสม่ำเสมอในระหว่าง 500 เมตร ด้วยแบตเตอรี่ที่ชาร์จเต็ม 100% มีการทดสอบซ้ำโดยเปลี่ยนน้ำหนักผู้ขับขี่ที่ 60, 70 และ 80 กิโลกรัม พร้อมบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า แรงดัน และความเร็วสูงสุดเทียบกับเวลา ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 15 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนรถจักรยานไฟฟ้า

ตารางที่ 1 การทดสอบการรับน้ำหนักและความเร็วของรถ

น้ำหนักบรรทุก (kg)	แรงดันไฟฟ้า (V)		กระแสไฟฟ้า (A)		กำลังไฟฟ้า (W)		ประสิทธิภาพ (%)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)
	In	Out	In	Out	In	Out		
60	36	25	19	14	684	606	87.72	30
70	36	22	20	15	720	571	79.31	29
80	36	19	22	17	792	559	70.58	29

จากการทดสอบในตารางที่ 1 พบว่ารถจักรยานไฟฟ้าต้นแบบที่พัฒนาขึ้น สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อรับน้ำหนักผู้ขับขี่ 60 กิโลกรัม และมีประสิทธิภาพ 87.72% เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้น และให้ประสิทธิภาพลดลง

6. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (BLDC) ขนาด 36 โวลต์ 350 วัตต์ สำหรับรถจักรยานไฟฟ้า โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณ PWM ส่งไปยังวงจรขับเคลื่อน IR2101 เพื่อขยายสัญญาณควบคุมมอเตอร์กำลังในวงจร H-bridge แบบ 3 เฟส จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดของมอเตอร์ จากการทดสอบ พบว่ารถจักรยานไฟฟ้าต้นแบบสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด และเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำความเร็วสูงสุดได้ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ที่ระยะทาง 500 เมตร และหากวิ่งที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะสามารถวิ่งได้ 3 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง (น้ำหนักบรรทุก 60 กิโลกรัม) อย่างไรก็ตาม หากต้องการให้รถจักรยานไฟฟ้าวิ่งได้นานขึ้นในอนาคต ควรเพิ่มขนาดแบตเตอรี่ให้ใหญ่ และมีความจุมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการนำเสนองานวิจัยสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติศักดิ์ หมักแดง และอดิศักดิ์ คามพิณิจ, "รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553
- [2] จิตติกร ปันดอกไม้ ฤกษ์ภูมิ ปันงาม ญัฐพล แดนประสาธ วัชรพล พลีสัตย์ อธิธิพล เหลาพรม และรุ่งโรจน์ สวงวัฒนา, "รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน," รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ สำหรับนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 2, 2565, หน้า 786-794
- [3] ดุสิต อุทิศสุนทร และ คมสันต์ บันลือหาญ, "การออกแบบสร้างรถสามล้อไฟฟ้าด้วยมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยประยุกต์ใช้การอัดประจุแบตเตอรี่จากโซลาร์เซลล์," วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, ปีที่ 8, ฉบับที่ 2, 2567, หน้า 1-20
- [4] คณิตภูมิ ครามสำโรง และพณิชน จำปาวงษ์, "ต้นแบบรถจักรยานยนต์ไฮบริดเพื่ออนุรักษ์พลังงาน," มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2558
- [5] N. S. Shanbog, "Double Input Boost/Y-Source DC-DC Converter for Renewable Energy Sources," Master's Dissertation, Department of Electrical and Electronics Engineering, PES University, Bengaluru, Karnataka, India, 2019.