

Received: Mar 19, 2025

Revised: Jun 8, 2025

Accepted: Jun 18, 2025

การออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A CONVERTED ELECTRIC MOTORCYCLE USING AN INDUCTION MOTOR

พนัสชัย ศรีบำรุง¹ กริธา จิรัถฐิวิรุฒมกุล¹ วิโรจน์ เลิศธีระชาญชัย¹ อิศกฤตา โลหพรหม^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Panuschai Sribumrung¹ Kreetha Jirattthivarutku¹ Wirote Lerttheerachanchai¹

Itsagritta Lohaphrom^{2*}

¹Department of Next-Generation Automotive Technology, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Education,
Rajamangala University of Technology Krungthep

Corresponding Author: e-mail *itsagritta.l@mail.rmuk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างและความทนทานของระบบภายใต้สภาวะการทำงานต่อเนื่องที่ความเร็ว 45 km/h เป็นระยะเวลา 30 นาที การประเมินลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าและกลของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยระบบไดนาโมมิเตอร์ที่ความเร็วรอบสูงสุด 7,000 rpm และการทดสอบสมรรถนะการทำงานจริงบนถนนภายใต้สภาวะโหลดคงที่ 100 kg ผลการทดสอบไดนาโมมิเตอร์จากการทำซ้ำ 5 รอบแสดงกำลังขับสูงสุดเฉลี่ย 5.27 ± 0.07 kW ที่ความเร็วของรถต้นแบบ 70.79 ± 0.39 km/h และแรงบิดสูงสุดเฉลี่ย 77.36 ± 0.40 N·m ที่ความเร็ว 68.47 ± 0.87 km/h โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) น้อยกว่า 5% ในทุกพารามิเตอร์ของการวัดสะท้อนความเสถียรและความสามารถทำซ้ำได้ของระบบควบคุม การทดสอบสมรรถนะในสภาพการใช้งานจริงจำนวน 3 รอบ การทดลองแสดงระยะทางการขับขี่เฉลี่ย 68.43 กิโลเมตรต่อการชาร์จ และค่าการใช้พลังงานจำเพาะเฉลี่ย 56.3 Wh/km ภายใต้สภาวะความเร็วคงที่ไม่ต่ำกว่า 45 km/h การวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมการใช้พลังงานตามช่วงแรงดันระบบแบตเตอรี่เผยให้เห็นการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะ 71.2-76.8 Wh/km ช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 V) แสดงประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่ 12.2-31.9 Wh/km และช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 55.2-86.4 Wh/km ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีจุดทำงานเหมาะสมในช่วงแรงดันปานกลางของระบบไฟฟ้า ผลการวิจัยยืนยันความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พร้อมทั้งแสดงสมรรถนะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการเดินทางในเขตเมือง ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางสำหรับการ

พัฒนาเทคโนโลยีการดัดแปลงยานพาหนะในระดับการผลิตเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่และระบบส่งกำลังยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มระยะทางการขับขี่และความยั่งยืนของระบบ

คำสำคัญ: รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง, มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การดัดแปลงรถจักรยานยนต์, การทดสอบสมรรถนะ

Abstract

This research aimed to design and analyze the performance of a converted electric motorcycle using an induction motor. The research methodology comprised three main phases: structural integrity testing and system durability assessment under continuous operation at 45 km/h for 30 minutes, evaluation of electrical and mechanical characteristics of the induction motor using a dynamometer system at maximum speed of 7,000 rpm, and field performance testing on road conditions under constant load of 100 kg. Dynamometer test results from five repeated trials demonstrated an average maximum power output of 5.27 ± 0.07 kW at prototype vehicle speed of 70.79 ± 0.39 km/h, and average maximum torque of 77.36 ± 0.40 N·m at speed of 68.47 ± 0.87 km/h, with coefficient of variation (CV) less than 5% for all measured parameters, reflecting system stability and control repeatability. Real-world performance testing across three experimental cycles showed an average driving range of 68.43 kilometers per charge cycle and average specific energy consumption of 56.3 Wh/km under constant speed conditions of not less than 45 km/h. Energy consumption behavior analysis across battery system voltage ranges revealed significant efficiency variations, with high voltage range (58.0-51.1 V) exhibiting specific energy consumption of 71.2-76.8 Wh/km, medium voltage range (51.1-49.9 V) demonstrating optimal performance at 12.2-31.9 Wh/km, and low voltage range (49.0-43.1 V) showing increased specific energy consumption of 55.2-86.4 Wh/km. These findings correspond to the electrical characteristics of induction motors having optimal operating points within the medium voltage range of the electrical system. The research results confirmed the technical feasibility of motorcycle conversion to electric propulsion systems using induction motors, demonstrating suitable performance characteristics for urban transportation applications. This work provided guidelines for developing vehicle conversion technology at commercial production scale. However, improvements in battery efficiency and powertrain systems remain critical factors requiring further development to enhance driving range and system sustainability.

Keywords: converted electric motorcycle, induction motor, motorcycle conversion, performance testing

บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นได้กระตุ้นการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 30-70% เมื่อเทียบกับยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน พร้อมทั้งมีต้นทุนดำเนินงานและบำรุงรักษาที่ต่ำกว่าในระยะยาว [Acampa, et al., 2021]

ประเทศไทยสนับสนุนการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าผ่านนโยบาย Thailand 4.0 โดยกำหนดให้ยานยนต์สมัยใหม่เป็นอุตสาหกรรมเป้าหมายหลัก มีแผนพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าระยะที่ 2 (พ.ศ. 2566-2573) และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ตั้งเป้าหมายให้มียานยนต์ไฟฟ้า 1.5 ล้านคันภายในปี 2579 [สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2023]

รถจักรยานยนต์เป็นยานยนต์ที่ได้รับความนิยมสูงในประเทศไทย โดย ณ เดือนธันวาคม 2024 มีการจดทะเบียนสะสม 22.4 ล้านคัน [กรมการขนส่งทางบก, 2024] เนื่องจากมีความคล่องตัวในการจราจรหนาแน่น [Acampa, et al., 2021]

รถจักรยานยนต์มีศักยภาพสำหรับการดัดแปลงเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า [Sopha, et al., 2022] ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและทรัพยากรเมื่อเทียบกับการผลิตใหม่ทั้งคัน [Habib, et al., 2021]

การดัดแปลงยานยนต์เป็นยานยนต์ไฟฟ้า (EV Conversion) ต้องพิจารณาทั้งระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน [Mudaheranwa, et al., 2023] มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายประเภท ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบแม่เหล็กถาวร (BLDC) และ สวิทช์รีลัคแทนซ์มอเตอร์ (SRM) [Apribowo, et al., 2021]

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อได้เปรียบสำคัญ คือ โครงสร้างเรียบง่ายและทนทาน ไม่มีแปรงถ่าน [S. K, et al., 2022] ทำให้อายุการใช้งานยาวและต้องการการบำรุงรักษาน้อย [Camargos, P. H., et al., 2022] มีประสิทธิภาพดีในช่วงความเร็วกว้างและให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ [Dianati, B., et al., 2020] ใช้วัสดุต้นทุนต่ำ และไม่ต้องพึ่งพาแม่เหล็กหายากเหมือน BLDC [Kalt, S., et al., 2020] รวมทั้งมีเทคโนโลยีควบคุมที่เสถียรและห่วงโซ่อุปทานในท้องถิ่น [M. K. Metwaly, et al., 2021]

จากข้อได้เปรียบดังกล่าว การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์ 110 ซีซี ระบบส่งกำลังแบบโซ่ให้เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 4 kW โดยเน้นการใช้ชิ้นส่วนผลิตในประเทศให้มากที่สุด การเลือกรถจักรยานยนต์ประเภทนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบด้านกลไกการติดตั้งที่เรียบง่าย ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ และศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ วัตถุประสงค์หลักคือ ออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของชุดดัดแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถติดตั้งและใช้งานได้สะดวก เพื่อสร้างต้นแบบสำหรับการขยายผลไปสู่การผลิตระดับพาณิชย์ ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยให้เกิดความยั่งยืน สร้างความสามารถในการพึ่งพาตนเอง และเป็นแนวทางสำหรับการดัดแปลงยานยนต์เดิมให้เป็นยานยนต์ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัด

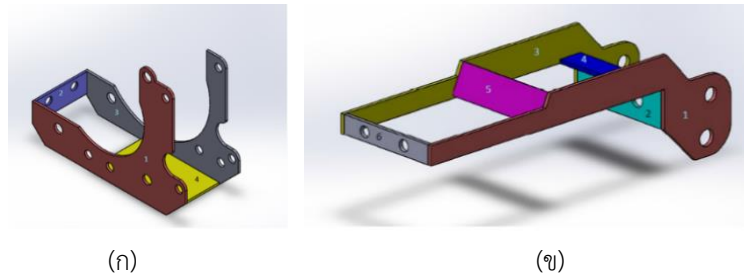
วิธีการวิจัย (Methodology)

การพัฒนาต้นแบบชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน มีองค์ประกอบหลักคือ ส่วนทางกล ส่วนทางไฟฟ้า และระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ โดยออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงในประเทศไทย

1 ส่วนประกอบทางกล

1.1 การออกแบบชุดโครงสร้างสำหรับติดตั้ง

การออกแบบโครงสร้างชุดขับเคลื่อนคำนึงถึงการกระจายน้ำหนักและจุดศูนย์ถ่วงที่สมดุล เพื่อความปลอดภัยขณะขับขี่และเข้าโค้ง กระบวนการเริ่มจากการใช้เครื่องสแกน 3 มิติ เพื่อสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถจักรยานยนต์ จากนั้นวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) เพื่อประเมินความแข็งแรงภายใต้สภาวะการใช้งานต่าง ๆ ก่อนออกแบบด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับงานวิศวกรรม ชุดยัดมอเตอร์ขนาด 4 kW และชุดยัดแบตเตอรี่ชนิด NMC ดังแสดงในภาพที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ ถูกออกแบบให้มีระบบป้องกันการสั่นสะเทือนแบบยางคู่ (Dual Rubber Dampening System) เพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันความเสียหาย โดยคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ ได้แก่ ความแข็งแรงทางโครงสร้าง วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อทดสอบภายใต้แรงบิดสูงสุด และการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่เหมาะสม



ภาพที่ 1 (ก) โครงสร้างชุดยึดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาด 4 kW (ข) โครงสร้างชุดยึดแบตเตอรี่ชนิด NMC ขนาด 2.1 kWh

1.2 การออกแบบระบบทางกลที่ใช้ขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชันขนาด 4 kW เป็นต้นกำลัง พร้อมระบบส่งกำลังแบบโซ่ตรง (Direct Chain Drive) ซึ่งมีประสิทธิภาพการส่งกำลังสูง (97-98%) และบำรุงรักษาง่าย [Hasan, et al.,2021] รถจักรยานยนต์ การคำนวณอัตราทดเกียร์อาศัยสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ล้อและแรงบิดที่มอเตอร์ โดยแรงบิดที่ล้อเท่ากับแรงบิดที่มอเตอร์คูณด้วยอัตราทดเกียร์และประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง [Chen, et al.,2019]

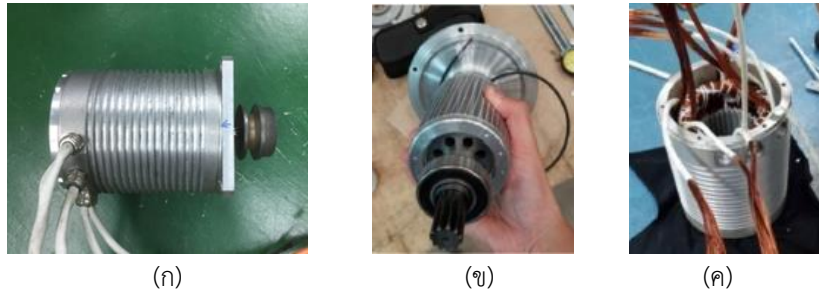
การออกแบบอัตราทดของสเตอร์ตัวขับและตัวตามเพื่อให้ได้ค่าแรงบิดและความเร็วของรถคำนวณโดยค่าพารามิเตอร์ของรถจักรยานยนต์ ดังนี้

- 1) ขนาดยางและเส้นรอบวง: ยาง 80/90-17 คิดเป็นความยาวเส้นรอบวง 1.809 เมตร
- 2) ความเร็วสูงสุดที่ต้องการ: $110 \text{ km/h} = 110 \text{ (km/h)} \times 1000 \text{ (m/km)} \times 1/60 \text{ (h/min)} = 1833.33 \text{ m/min}$
- 3) ความเร็วล้อ = $1833.33 \text{ (m/min)} \times 1/1.809 \text{ (รอบ)} = 1013.45 \text{ rpm}$
- 4) ความเร็วรอบสูงสุดมอเตอร์ = 8000 rpm
- 5) ความเร็วล้อ = $1,833.33/1.809 = 1,013.45 \text{ rpm}$
- 6) อัตราทดเกียร์ = $8000/1013.45 = 7.89$
- 7) แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ = 25 Nm
- 8) แรงบิดสูงสุดที่ล้อ (กรณีอัตราทด 7.89) = $25 \times 7.89 = 197.25 \text{ Nm}$
- 9) สเตอร์ที่หาได้ หน้า 12 ฟัน หลัง 70 ฟัน (12:70 ฟัน) คิดเป็นอัตราทด $70/12 = 5.83$
- 10) แรงบิดสูงสุดที่ล้อ = $25 \times 5.83 = 145.75 \text{ Nm}$
- 11) ความเร็วสูงสุด = $[8000 \text{ (รอบ/นาที)} / 5.83] \times 1.809 \text{ (m/รอบ)} \times [1/1000 \text{ (km/min)} \times 60 \text{ (min/h)}]$
 $= 1,372.38 \times 1.809 \times 0.06 = 148.94 \text{ km/h}$

2 ส่วนประกอบทางไฟฟ้า

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

การพัฒนามอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชันขนาด 4 kW ดังแสดงในภาพที่ 2 มีเหตุผลสำคัญในการเลือกใช้คือ ความคงทนสูง ค่าบำรุงรักษาต่ำ หางอะไหล่ภายในประเทศ และทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง การออกแบบโรเตอร์แบบกรงกระรอกใช้วัสดุอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Die Casting เพื่อลดต้นทุนและน้ำหนัก แต่ยังคงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดี ตามตารางที่ 1



ภาพที่ 2 (ก) ต้นแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ข) ส่วนโรเตอร์ (ค) ส่วนสเตเตอร์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของมอเตอร์

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน	หมายเหตุ
Motor Type	Induction Motor	ระบบขดลวด: Y-connection 3 เฟส
Maximum Power (kW @ rpm)	10 @ 3,800 -- 8,000	สามารถทำงานที่กำลังสูงสุดได้ต่อเนื่อง 3 นาที
Continuous Power (kW @ rpm)	4 @ 3,800 -- 8,000	สามารถทำงานได้ต่อเนื่องไม่จำกัดเวลา
Maximum Torque (Nm @ rpm)	25 @ 0 -- 3,800	ค่าแรงบิดคงที่ช่วง 0-3,800 rpm
Continuous Torque (Nm @ rpm)	10 @ 0 -- 3,800	ทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่เกิดความร้อนสูง
DC Voltage (V)	48	แรงดันการทำงาน 48V DC (มาตรฐานระบบ)
Cooling System	Natural air cooling	-
Weight (kg) / Dimensions (mm)	16 kg /170	อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก 0.25 kW/kg
Efficiency	89-92%	ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 4,000-6,000 rpm

2.2 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

การขับเคลื่อนมอเตอร์อินดักชันในรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้องใช้อุปกรณ์ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่รองรับการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างรวดเร็ว เช่น การเร่ง การเบรก และการขึ้นทางลาดชัน คณะผู้จัดทำเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ร่วมกับ Field-Oriented Control (FOC) ตามตารางที่ 2 เนื่องจากเทคนิค FOC สามารถแยกควบคุมแรงบิดและสนามแม่เหล็กอิสระ ทำให้ตอบสนองการขับได้ดีราบรื่น เทคโนโลยี SiC MOSFET ที่ความถี่ 20 kHz ให้ประสิทธิภาพ 94-97% รองรับกระแสสูงสุด 450 A และกระแสต่อเนื่อง 180 A สำหรับการเร่งและขับขึ้นเนิน ระบบทำงานในช่วงแรงดัน 20-69 V พร้อมเบรกป้อนกลับพลังงาน 0-80% ลดการสูญเสียพลังงาน อุปกรณ์มีระบบป้องกันครบครัน (กระแสเกิน แรงดันเกิน/ต่ำ อุณหภูมิสูง ไฟฟ้าลัด) น้ำหนัก 5 กก. ขนาด 200x200 มม. พร้อมการสื่อสาร CAN Bus และ UART เหมาะสำหรับการดัดแปลงรถจักรยานยนต์



ภาพที่ 3 อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบอินดักชัน (IM)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวงจรอินเวอร์เตอร์

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน
Nominal Voltage (V)	48
Maximum Voltage (V)	69
Minimum Voltage (V)	20
Peak Current (A)	450
Continuous Current (A)	180
Switching Technology	SiC MOSFET [Peng et al., 2022]
Switching Frequency (kHz)	20
Control Method	Field-Oriented Control (FOC)
Power Stage Efficiency (%)	94-97
Protection Features	Over-current, over-voltage, under-voltage, over-temperature, short-circuit
Cooling System	Natural air cooling with aluminum heatsink
Weight (kg) / Dimensions (mm)	5 kg / Diameter 200 x Length 200
Communication Interface	CAN Bus, UART
Regenerative Braking	Supported (Adjustable 0-80%)

2.3 ระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงานใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide: NMC) ซึ่งคุณลักษณะของแบตเตอรี่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง เกิดความร้อนในระหว่างการชาร์จต่ำ และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมในยานยนต์ไฟฟ้าปัจจุบัน ระบบมีการติดตั้งระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) เพื่อควบคุมและตรวจสอบสถานะของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ ระบบนี้สามารถขับขี่ได้ในระยะทาง 60-70 กิโลเมตรต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

คุณลักษณะ	ค่าที่ใช้งาน
Nominal Battery Voltage (V)	51.8
Maximum Voltage (V)	58.8
Minimum Voltage (V)	42
Cell Type	NMC
Charge Rate	4C
Discharge Rate	6C
Weight (kg) / Dimensions (mm)	15 kg / 250 x 210 x 220

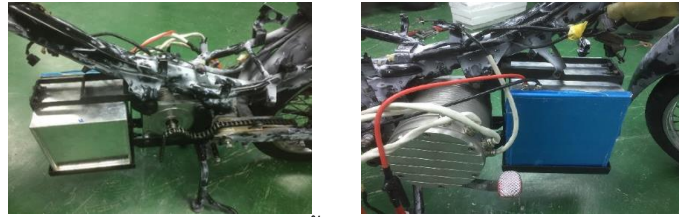
ผลการวิจัย

การวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนและการใช้พลังงานของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบทางกล การทดสอบทางไฟฟ้า และการทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

1 การทดสอบทางกล

ชุดติดตั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่ ถูกติดตั้งไว้ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งการทดสอบทางกลประเมินความแข็งแรงของชุดโครงสร้างสำหรับติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการขับขี่จริง โดยทดสอบที่ความเร็ว 45 กม./ชม. เป็น

เวลา 30 นาที ผลการทดสอบพบว่าโครงสร้างสามารถรองรับน้ำหนักได้โดยไม่มีการแตกร้าวหรือเสียรูปเชิงกล ซึ่งบ่งชี้ว่ามีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานจริง



ภาพที่ 4 ชุดติดตั้งมอเตอร์และแบตเตอรี่

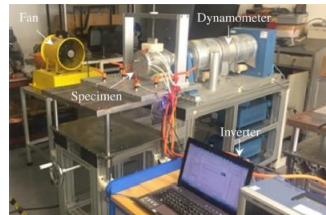
2 การทดสอบทางไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าประเมินสมรรถนะของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สภาวะไม่มีโหลด ดังรูปที่ 5(ก) โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์วัดการตอบสนองที่ความเร็วรอบสูงสุด 7,000 รอบต่อนาที ซึ่งมีแสดงผลแบบกราฟในรูปที่ 5(ข) ผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์ทำงานได้ภายในขีดจำกัดของพิกัดที่กำหนด โดยไม่พบความผิดปกติหรือการสูญเสียพลังงานที่ไม่คาดคิด

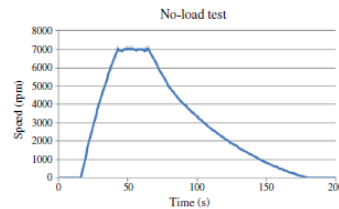
3 การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

3.1 การทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์

ภายหลังการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดขับเคลื่อนเข้ากับโครงสร้างรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงเรียบร้อยแล้ว ดังภาพที่ 6 ได้ทำการทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์ ดังภาพที่ 7 เพื่อวัดค่ากำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วต่างๆ โดยทดสอบซ้ำ 5 รอบ ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4 และตัวอย่างแผนภูมิแสดงสมรรถนะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิดกับความเร็วรอบเครื่องยนต์จากการทดสอบ ดังภาพที่ 8



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 (ก) ชุดทดสอบขณะไม่มีโหลด และ (ข) ผลตอบสนองของมอเตอร์ (IM) ขณะไม่มีโหลด

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงบนไดนาโมมิเตอร์

รอบการทดสอบ	กำลังสูงสุด (kW)	ความเร็วที่กำลังสูงสุด (km/h)	แรงบิดสูงสุด (N·m)	ความเร็วที่แรงบิดสูงสุด (km/h)
1	5.31	70.98	77.60	68.64
2	5.18	70.25	76.82	67.20
3	5.27	71.05	77.15	69.35
4	5.22	70.45	77.40	68.10
5	5.35	71.22	77.85	69.05
ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD	5.27 ± 0.07	70.79 ± 0.39	77.36 ± 0.40	68.47 ± 0.87
ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV)	1.33%	0.55%	0.52%	1.27%

หมายเหตุ: ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$, ระดับประจุแบตเตอรี่เริ่มต้น $90 \pm 2\%$, และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 5\%$

การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction Motor: IM) ได้ดำเนินการบนไดนาโมมิเตอร์ภายใต้สภาวะควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิห้อง $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ระดับประจุแบตเตอรี่เริ่มต้น $90 \pm 2\%$ และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 5\%$ โดยอ้างอิงตามหลักวิศวกรรมการทดสอบมาตรฐานสำหรับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า การทดสอบซ้ำจำนวน 5 รอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสถียร ความน่าเชื่อถือ และสมรรถนะสูงสุดของระบบขับเคลื่อนของต้นแบบชุดดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จากผลการทดสอบด้านกำลังสูงสุด พบว่าค่าเฉลี่ยของกำลังสูงสุดอยู่ที่ $5.27 \pm 0.07 \text{ kW}$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) เท่ากับ 1.33% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม ($\text{CV} < 5\%$) แสดงให้เห็นถึงความเสถียรของระบบควบคุมมอเตอร์ที่พัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วที่มีกำลังสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ $70.79 \pm 0.39 \text{ km/h}$ (ประมาณ 19.7 m/s) ตำแหน่งของจุดกำลังสูงสุดดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีลักษณะโค้งกำลัง-ความเร็วแบบพาราโบลา กล่าวคือ กำลังจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วในช่วงก่อนถึงความเร็วเชิงไครนัส และลดลงภายหลังเนื่องจากผลของสลลิป (Slip) และการสูญเสียพลังงานในโรเตอร์ (Rotor Loss)

ในด้านแรงบิดสูงสุด พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $77.36 \pm 0.40 \text{ N.m}$ ณ ความเร็วเฉลี่ย $68.47 \pm 0.87 \text{ km/h}$ ซึ่งสูงกว่าค่าของรถจักรยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดใกล้เคียงกัน โดยแรงบิดสูงสุดที่เกิดในช่วงความเร็ว $68-69 \text{ km/h}$ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเร่งและบรรทุกของระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

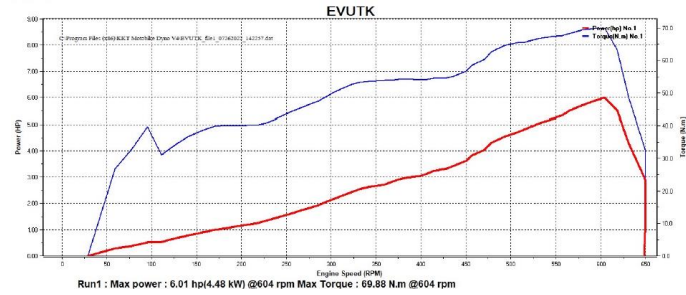
ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่เกิดกำลังสูงสุดและแรงบิดสูงสุดในช่วงความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ($65-75$ กิโลเมตรต่อชั่วโมง) บ่งชี้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้มีช่วงความเร็วที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริง โดยเฉพาะในเขตเมืองและถนนสายรอง ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของการดัดแปลงเพื่อการใช้งานที่ยั่งยืนและเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย



ภาพที่ 6 มอเตอร์ชุดขับเคลื่อนและแบตเตอรี่ที่ติดตั้งเข้ากับจักรยานยนต์ไฟฟ้า



ภาพที่ 7 การทดสอบสมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงบนไดนาโมมิเตอร์



ภาพที่ 8 แผนภูมิแสดงสมรรถนะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและแรงบิดกับความเร็วรอบเครื่องยนต์จากการทดสอบ

3.2 การทดสอบสมรรถนะจากการขับขึ้นจริง

การทดสอบอัตราการใช้พลังงานต่อระยะทางดำเนินการภายใต้สภาวะมาตรฐาน โดยมีน้ำหนักบรรทุก 100 กิโลกรัม และรักษาความเร็วคงที่ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จนกระทั่งระบบตัดการทำงานเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ลดลงถึงระดับต่ำสุด (43.1 โวลต์) การทดสอบดำเนินการซ้ำทั้งหมด 3 รอบ เพื่อตรวจสอบความเชื่อถือได้และความสม่ำเสมอของผลการทดสอบ ในแต่ละรอบการทดสอบ ดังแสดงผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 5 คณะผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วงตามระดับแรงดันแบตเตอรี่ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบในช่วงการใช้งานที่แตกต่างกัน การแบ่งช่วงนี้ช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น เช่น อุณหภูมิแบตเตอรี่ สภาพอากาศ และสภาพการจราจร

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากการขับขึ้นจริงจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

รอบ ที่	การ ทดสอบ	แรงดันแบตเตอรี่ (V)			กระแส เฉลี่ย (A)	เวลา (นาท)	ความเร็ว เฉลี่ย (km/h)	ระยะทาง (km)	อัตราการ ใช้พลังงาน (Wh/km)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	ลดลง (%)						
1	1	58.0	51.1	11.9	2.48	32.2	45	24.16	71.2	-
	2	51.1	49.9	2.3	0.46	31.7	52	26.85	12.2	-
	3	49.0	43.1	12.0	2.87	19.8	53	17.43	86.4	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	1.96	83.7	50	68.44	56.3	
2	1	58.0	51.1	11.9	2.61	29.9	45	22.40	76.8	-
	2	53.5	49.9	6.7	1.59	34.7	51	29.45	31.9	-
	3	47.0	43.1	8.3	2.11	18.4	54	16.56	62.9	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	2.10	83.0	50	68.41	56.3	
3	1	58.0	51.1	11.9	2.48	32.2	45	24.16	71.2	-
	2	52.8	49.9	5.5	1.23	32.2	50	26.85	29.9	-
	3	46.7	43.1	7.7	1.84	19.0	55	17.43	55.2	Cut-off
	รวม	58.0	43.1	25.7	1.85	83.4	50	68.44	56.3	
เฉลี่ย	-	58.0	43.1	25.7	1.97	83.4	50	68.43	56.3	-

การคำนวณอัตราการใช้พลังงาน

$$\text{อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km)} = (\text{แรงดันเฉลี่ย} \times \text{กระแสเฉลี่ย} \times \text{เวลา}) / \text{ระยะทาง} \quad (1)$$

ตัวอย่างการคำนวณ (รอบที่ 1, การทดสอบที่ 1):

$$\text{แรงดันเฉลี่ย} = (58.0 + 51.1) / 2 = 54.55 \text{ V}$$

$$\text{กระแสเฉลี่ย} = 2.48 \text{ A}$$

$$\text{เวลา} = 32.2 \text{ นาที} = 0.537 \text{ ชั่วโมง}$$

$$\text{ระยะทาง} = 24.16 \text{ km}$$

$$\text{อัตราการใช้พลังงาน} = (54.55 \times 2.48 \times 0.537) / 24.16 = 71.2 \text{ Wh/km}$$

การทดสอบสมรรถนะของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงแสดงให้เห็นความเสถียรสูง โดยมีระยะทางการวิ่งที่สม่ำเสมอในทุกรอบ (68.41-68.44 กิโลเมตร) ซึ่งสะท้อนถึงเสถียรภาพของระบบแบตเตอรี่และการควบคุมพลังงานมอเตอร์ไฟฟ้า อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km อยู่ในเกณฑ์ดีเมื่อเทียบกับมาตรฐานยานพาหนะไฟฟ้าประเภทเดียวกัน

ผลการทดสอบเผยให้เห็นประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความเร็วปานกลาง (45-55 km/h) และการลดลงของแรงดันแบตเตอรี่เฉลี่ย 25.7% ในแต่ละรอบ แสดงถึงลักษณะการคายประจุที่มีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานแบตเตอรี่

การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่ ช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 โวลต์) ในช่วงเริ่มต้นการใช้งาน อัตราการใช้พลังงานอยู่ที่ 71.2-76.8 Wh/km ซึ่งสูงกว่าช่วงอื่น สาเหตุเกิดจากระบบควบคุมพลังงานมอเตอร์ต้องปรับตัวให้เข้ากับแรงดันสูง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนที่อินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ยังไม่อยู่ในจุดประสิทธิภาพสูงสุด และช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 โวลต์) ช่วงนี้แสดงประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ โดยมีอัตราการใช้พลังงานเพียง 12.2-31.9 Wh/km ซึ่งต่ำที่สุดในการทดสอบ สอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่ามอเตอร์ไฟฟ้า DC มีประสิทธิภาพสูงสุดที่จุดทำงานเหมาะสม (optimal operating point) ในช่วงแรงดันปานกลาง และช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 โวลต์) อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 55.2-86.4 Wh/km เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้กระแสสูงขึ้นเพื่อรักษาระดับพลังงานให้คงที่ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานตามกฎของโอห์ม และประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์ลดลงเมื่อทำงานที่แรงดันต่ำ

ผู้วิจัยได้แบ่งช่วงในการทดสอบเนื่องจากระยะทางที่ไกล และช่วยให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิแบตเตอรี่ สภาพอากาศ และสภาพการจราจร การทดสอบในช่วงเวลาที่แยกจากกันช่วยลดผลกระทบของตัวแปรเหล่านี้ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากตารางจะเห็นข้อดีคือ สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในแต่ละช่วงการใช้งานได้อย่างละเอียด ซึ่งจะไม่สามารถทำได้หากทดสอบแบบต่อเนื่องตลอดทั้งรอบการใช้งาน การวิเคราะห์นี้จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของระบบและสามารถปรับปรุงการออกแบบให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ข้อมูลพฤติกรรมการคายประจุในแต่ละช่วงมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

การอภิปราย

1 สมรรถนะมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากผลการทดสอบแสดงกำลังสูงสุด 5.27 ± 0.07 kW ที่ความเร็ว 70.79 km/h และแรงบิดสูงสุด 77.36 ± 0.40 N·m ที่ความเร็ว 68.47 km/h ค่า $CV < 5\%$ ชี้ให้เห็นความเสถียรของระบบควบคุม ลักษณะการกระจายของกำลังและแรงบิดในช่วงความเร็วใกล้เคียงกันสอดคล้องกับทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งแรงบิดสูงสุดเกิดก่อนความเร็วเชิงโคโรนัสและกำลังสูงสุดเกิดที่ความเร็วสูงกว่า

2 ประสิทธิภาพพลังงาน อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่พบว่า ช่วงแรงดันสูง (58.0-51.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานสูงสุด (71.2-76.8 Wh/km) จากการสูญเสียในอินเวอร์เตอร์และสเตเตอร์ ช่วงแรงดันกลาง (51.1-49.9 V) แสดงประสิทธิภาพสูงสุด (12.2-31.9 Wh/km) ณ จุดทำงานเหมาะสม ส่วนช่วงแรงดันต่ำ (49.0-43.1 V) มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น (55.2-86.4 Wh/km) จากการสูญเสียตามกฎของโอห์ม

3 ความเหมาะสมของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีข้อดีในด้านความทนทาน ต้นทุนต่ำ และไม่ต้องบำรุงรักษาเนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดคือประสิทธิภาพต่ำกว่า PMSM และต้องการระบบควบคุมที่ซับซ้อน การใช้ Vector Control หรือ FOC จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพได้

4 ระบบจัดการพลังงาน ความสามารถในการรักษาการคายประจุสม่ำเสมอ (แรงดันลดลง 25.7% ในทุกรอบ) แสดงประสิทธิภาพของ BMS การตัดที่แรงดัน 43.1 V เหมาะสมสำหรับการปกป้องแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน 48V (13S)

5 การประยุกต์ใช้งานจริง ระยะทางการวิ่ง 68.43 km ต่อการชาร์จเหมาะสำหรับการใช้งานในเขตเมือง สมรรถนะที่เสถียรในช่วงความเร็ว 45-55 km/h สอดคล้องกับสภาพการใช้งานในประเทศไทย

สรุปผล

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ผลการทดสอบยืนยันความเป็นไปได้ทางเทคนิคและประสิทธิภาพที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม

การทดสอบทางกลยืนยันความแข็งแรงของโครงสร้างที่รับน้ำหนักได้โดยไม่เกิดการเสียรูป การทดสอบทางไฟฟ้าแสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ทำงานภายในขีดจำกัด และการทดสอบสมรรถนะบนไดนาโมมิเตอร์ให้ค่ากำลังสูงสุด 5.27 ± 0.07 kW และแรงบิดสูงสุด 77.36 ± 0.40 N·m ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนต่ำกว่า 5% แสดงความเสถียรของระบบ

การทดสอบภาคสนามแสดงอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 56.3 Wh/km และระยะทางการวิ่ง 68.43 km ต่อการชาร์จซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในเขตเมือง การวิเคราะห์ตามช่วงแรงดันแบตเตอรี่เผยให้เห็นจุดทำงานที่เหมาะสมของระบบในช่วงแรงดันกลาง

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงลักษณะการทำงานที่สอดคล้องกับทฤษฎี โดยมีแรงบิดสูงสุดและกำลังสูงสุดในช่วงความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ระบบจัดการแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพในการควบคุมการคายประจุและป้องกันการคายประจุเกินขีดจำกัด ความแปรปรวนต่ำของผลการทดสอบยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบควบคุม

ผลการวิจัยสนับสนุนแนวทางการดัดแปลงรถจักรยานยนต์เป็นรถไฟฟ้าในระดับท้องถิ่น ซึ่งมีศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน สมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานในเขตเมืองและความเสถียรของระบบทำให้เป็นทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับการขนส่งที่ยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การพัฒนาต่อยอดในด้านระยะทางการขับขี่และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ยังคงเป็นประเด็นสำคัญ เพื่อให้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นำไปสู่การพัฒนาเชิงพาณิชย์และการส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณบริษัทเรียล ปีพีเอ็ม จำกัด และสถาบันไทย-ญี่ปุ่น ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดสอบอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการวิจัยตลอดระยะเวลาของโครงการ การสนับสนุนจากทุกฝ่ายมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. (2024). สถิติการขนส่งประจำปี 2024. กรุงเทพฯ: กระทรวงคมนาคม.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2023). แผนขับเคลื่อนพลังงานแห่งชาติ 2023-2037. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- Acampa, G., Campisi, T., Grasso, M., Marino, G., & Torrisi, V. (2021). *Exploring European strategies for the optimization of the benefits and cost-effectiveness of private electric mobility*. Lecture Notes in Computer Science, 12891, 715-729. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86976-2_49
- Apribowo, C. H. B., & Maghfiroh, H. (2021). Fuzzy logic controller and its application in brushless DC motor (BLDC) in electric vehicle-A review. *Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology*, 3(1), 35-43. <https://doi.org/10.20961/jeeict.3.1.50651>
- Bindal, R. K., & Kaur, I. (2020). Torque ripple reduction of induction motor using dynamic fuzzy prediction direct torque control. *ISA Transactions*, 99(9), 322-338.

- Camargos, P. H., & Caetano, R. E. (2022). A performance study of a high-torque induction motor designed for light electric vehicles applications. *Electrical Engineering*, 104(2), 797-805. <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01331-4>
- Chen, P.-T., Shen, D.-J., Yang, C.-J., & Huang, K. D. (2019). Development of a hybrid electric motorcycle that accords energy efficiency and controllability via an inverse differential gear and power mode switching control. *Applied Sciences*, 9(9), 1787. <https://doi.org/10.3390/app9091787>
- Dianati, B., Kahourzade, S., & Mahmoudi, A. (2020). Optimization of axial-flux induction motors for the application of electric vehicles considering driving cycles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(3), 1522-1533. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.2976625>
- Habib, A. K. M. A., Hasan, M. K., Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Ibrahimya, M. I., & Islam, S. (2021). A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application. *IET Power Electronics*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.1049/pel2.12013>
- Hasan, M. K., Mahmud, M., Habib, A. K. M. A., Motakabber, S. M. A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>
- Kalt, S., Stolle, K. L., Neuhaus, P., Herrmann, T., Koch, A., & Lienkamp, M. (2020). Dependency of machine efficiency on the thermal behavior of induction machines. *Machines*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.3390/machines8010009>
- Metwaly, M. K., Abdel-Majeed, M. S., Abdel-Khalik, A. S., Hamdy, R. A., Hamad, M. S., & Ahmed, S. (2021). Smart integration of drive system for induction motor applications in electric vehicles. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 12(1), 20-28. <https://doi.org/10.11591/ijped.v12.i1>
- Mudaheeranwa, E., Berkem, H., Cipcigan, L., & Ugalde-loo, C. E. (2023). Feasibility study and impacts mitigation with the integration of Electric Vehicles into Rwanda's power grid. *Electric Power Systems Research*, 220, 109341. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109341>
- S. K, Pillai, N. K., Marri, N. R., Baiju, T. K., & P. P. K. (2022). *Simulation of high efficiency switched reluctance motor (SRM) drive control scheme by alternate rotation motor firing*. In 2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT) (pp. 1381-1386). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICT54557.2022.9917825>
- Sopha, B. M., Purnamasari, D. M., & Ma'mun, S. (2022). Barriers and enablers of circular economy implementation for electric-vehicle batteries: From systematic literature review to conceptual framework. *Sustainability*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/su14106359>

Translated Thai References

- Department of Land Transport. (2024). Annual transport statistics 2024. Bangkok: Ministry of Transport.
- Eppo Energy Policy and Planning Office . (2023). National Energy Driving Plan 2023-2037. Bangkok: Ministry of Energy.