การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

A COMPARATIVE STUDY OF POWERTRAIN SYSTEM PERFORMANCE IN CONVERTED ELECTRIC VEHICLES

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน[1] และ กาจ อิ่มบุญอาบ[2]
[1,2]อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย
199 ม. 6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ. เมือง จ.เชียงราย 57000,
[1]pakdee.me@gmail.com, [2]Kaj.me@gmail.com

Pakdee Sittiritkawin and Kaj Imboonarb
[1,2]Lecturer, Department of Mechanical engineering, Faculty of engineering,
Chiangrai college, 199 Moo 6 Paoordonchai Subdistric, Muang, Chiangrai, 57000, Thailand,
[1]pakdee.me@gmail.com, [2]Kaj.me@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อศึกษาออกแบบระบบส่งกำลังของรถโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในสองรูปแบบ คือแบบแรกที่ไม่ใช้เกียร์โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับเฟืองท้ายโดยตรง และแบบที่สองใช้เกียร์โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อผ่านเกียร์แล้วจึงส่งกำลังไปยังเฟืองท้ายของรถ จากนั้นจึงศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการขับขี่ของรถที่มีระบบส่งกำลังทั้งสองแบบ ในแง่ของความเร็วรถ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถการขึ้นทางชัน โดยการวิ่งทดสอบในเส้นภายในสถาบันและนอกสถาบันในสภาวะมีน้ำหนักบรรทุก หลังจากการคำนวณออกแบบพบว่ารถสามารถใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัด 10 kW แรงดันไฟฟ้า 72 V และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ความจุ 100 Ah แรงดัน 72 V และเมื่อทำการทดสอบการใช้งานกับระบบส่งกำลังแบบใช้เกียร์ที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัด 1,800 kg มีสมรรถนะการขับขี่วัฏจักรแบบที่ 1 (ภายในสถาบัน) ดีกว่าระบบส่งกำลังแบบไม่ใช้เกียร์สามารถขับได้ระยะ 20.4 km มีความเร็วรถ 37 km/hr สิ้นเปลืองพลังงานไป 5.4 kWh

คำสำคัญ: ระบบส่งกำลัง, มอเตอร์ไฟฟ้า, ยานยนต์ไฟฟ้า

ABSTRACT

The objective of this research was to study the design of a powertrain system for electric vehicles using two different configurations of electric motors: the first configuration directly

connects the electric motor to the rear differential without a gearbox, while the second configuration uses a gearbox between the electric motor and the rear differential. Subsequently, the study aimed to compare the driving performance of vehicles with both powertrain systems in terms of speed, acceleration rate, energy efficiency, payload weight, and hill climbing capability. Tests were conducted both on and off-campus under loaded conditions. After designing and calculations, it was found that the vehicle could effectively utilize an electric motor rated at 10 kW with an electrical voltage of 72 V. It employed a 72 V lithium iron phosphate (LiFePO4) battery with a capacity of 100 Ah. During operational tests with the gearbox-equipped powertrain system under full load (1,800 kg), the cycle driving type 1 (within the institute) better driving performance compared to the direct-drive system. Specifically, it achieved a driving range of 20.4 km, a speed of 37 km/hr, and consumed 5.4 kWh of energy.

KEYWORDS: powertrain system, electric motors, electric vehicles

1. บทนำ

จากสถานการณ์ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (BEVs) ในประเทศไทยปัจจุบันพบว่า การขอจดทะเบียนรถยนต์ใหม่ของไทยอ้างอิงข้อมูลของกรมขนส่งทางบกพบว่าในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาปริมาณยานยนต์ไฟฟ้าที่ขอจดทะเบียนใหม่มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงในทุกปี โดยเฉพาะในปี 2565 มียอดจดทะเบียนยานยนต์ไฟฟ้าใหม่ขยายตัวสูงถึงร้อยละ 98.0 มียอดจดทะเบียนแล้วจำนวน 31,493 คัน [1] เนื่องจากรถ BEVs มีความสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน มีงานวิจัยศึกษาเกี่ยวข้องกับการออกแบบรถดังกล่าวด้วยอย่างเช่น มีการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้านั่งส่วนบุคคลโดยมีการเสนอสมการการออกแบบหาพิกัดมอเตอร์ ความจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าระบบส่งกำลังของรถถูกประเมินจากการเปลี่ยนแปลงในความเร็วของรถและความเร่ง ความสามารถไต่ทางชัน รวมถึงชุดแบตเตอรี่ ระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ คอนเวอร์เตอร์ ระบบควบคุม [2] และยังพบว่ามีการออกแบบแบบจำลองใน MATLAB Simulink ใช้วิเคราะห์แบบจำลองระบบส่งกำลังของ BEVs ที่ถูกสร้างขึ้นและตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง SOC ความเร็ว แรงบิดของมอเตอร์ แรงบิดของเพลาเทียบกับเวลาตามลำดับและได้มีการสร้างแบบจำลองระบบส่งกำลังของรถยนต์ไฟฟ้านำไปทดสอบกับรถ Ford Focus และ Nissan Leaf EV เป็นพื้นฐาน [3] รวมไปถึงศึกษาการออกแบบมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าใช้ในเมือง เนื่องจากเป็นต้นกำลังที่สำคัญเข้ามาแทนเครื่องยนต์ มีการจำลองการทำงานมอเตอร์อินดักชันใน MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้

พบว่ามอเตอร์ที่ออกแบบไว้สามารถทำงานได้ดีและควบคุมการทำงานได้ [4]และยังพบการออกแบบรถบรรทุกไฟฟ้าที่เน้นศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบระบบส่งกำลังสำหรับรถบรรทุกไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ โดยการวิเคราะห์ประโยชน์ทางพลังงานของระบบเกียร์หลายระดับเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเกียร์หนึ่งระดับสำหรับรถบรรทุกไประยะไกล [5] มีการจำลองการใช้พลังงานของรถจากเครื่องมือคำนวณการใช้พลังงานของยานพาหนะ เพื่อการปรับปรุงแบตเตอรี่ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า และอัตราทดเกียร์

ในส่วนงานวิจัยด้านรถ BEVs ในประเทศไทยก็พบงานวิจัยออกแบบรถขนาดเล็กอย่าง เช่น การศึกษาออกแบบและพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบและประเมินสมรรถนะยานยนต์ไฟฟ้าที่ได้พัฒนา เป็นยานยนต์ 4 ล้อ ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดบัสเลสดีซีมอเตอร์เป็นต้นกำลัง ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟตเป็นแหล่งพลังงาน ทำความเร็วได้ 28.4 km/hr และเมื่อชาร์จประจุเต็มที่ 1 ครั้งรถจะสามารถวิ่งได้ 21.398 km โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 8 kWh [6] และยังได้ศึกษาออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กสำหรับผู้สูงอายุจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB & Simulink และทำการจำลองการขับขี่ในโปรแกรมทำให้ทราบว่ารถจะสามารถทำความเร็วในทางราบสูงสุดที่ 39.3 km/h ขับได้ระยะทาง 28 km ขึ้นทางชันได้ 2.29 องศา [7] และยังพบการศึกษาการออกแบบและสร้างรถสามล้อไฟฟ้าที่มีโครงสร้างน้ำหนักเบามอเตอร์ไฟฟ้าพิกัด 2 Hp แรงดัน 60 V ใช้โครงสร้างแบบท่อโครงถักใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V ความจุ 60 Ah รถสามารถวิ่งได้ระยะทาง 80 km ความเร็วสูงสุด 47 km/h รับน้ำหนักบรรทุกได้ 480 kg และขึ้นเนินได้ 35 องศา ระยะเวลาในการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ 7 ชั่วโมง [8, 9]

ในการพัฒนารถ BEVs ที่ประหยัดพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมพบว่ามีงานวิจัยในด้านการใช้แผงโซล่าเซลเข้ามาทำงานร่วมกับระบบเก็บประจุแบตเตอรี่ของรถซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางการวิ่งของรถให้เพิ่มมากขึ้นได้อีก อย่างเช่นการประดิษฐ์รถบรรทุกสามล้อไฟฟ้าอเนกประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์ตัวรถปรับปรุงดัดแปลงจากรถบรรทุกสามล้อไฟฟ้านำมาติดตั้งมอเตอร์พิกัด 3,000 W และใช้แผงโซล่าเซลล์ติดตั้งเป็นหลังคาที่ด้านบนของกระบะ [10] รวมไปถึงการดัดแปลงรถเครื่องยนต์เป็นรถยนต์ BEVs เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสิ่งสำคัญในการดัดแปลงรถประกาศหนึ่งก็คือ การคำนวณออกแบบต้นกำลังที่เป็นมอเตอร์และระบบส่งกำลัง เพื่อนำมาทดแทนเครื่องยนต์เดิมให้มีขนาดที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานเพื่อที่จะไม่ให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็นเนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ และระบบควบคุม มีราคาค่อนข้างแพง จึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบรถในกลุ่มดังกล่าว อย่างเช่น ได้ทำการศึกษาพัฒนาดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังให้เปลี่ยนมาเป็นการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด BLDC มีพิกัด 10 kW แรงดัน 72 V เป็นต้นกำลัง [11] และยังพบการนำโครงสร้างรถกระบะเครื่องยนต์ดีเซลเก่ามาดัดแปลงเป็นรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีประเด็นที่น่าสนใจ เนื่องจากระบบส่งกำลังของรถยนต์กระบะบรรทุกจะมีเกียร์และเฟืองท้ายที่จะช่วยสร้างอัตราทดให้กับมอเตอร์ช่วยในการออกตัวของรถได้ดี และสามารถเลือกใช้

อัตราทดที่เหมาะสมกับความเร็วที่ใช้วิ่งในสถานที่ต่าง ๆ ซึ่งรถกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ใช้ความเร็วต่ำไม่เกิน 35 km/hr ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดการพัฒนาดัดแปลงรถยนต์กระบะจากการใช้เครื่องยนต์เปลี่ยนมาใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการออกแบบและสร้างมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาออกแบบระบบส่งกำลังของรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในแบบที่ไม่ใช้เกียร์และแบบที่ใช้เกียร์ และ 2) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการขับขี่ของรถที่มีระบบส่งกำลังทั้งสองแบบ ในแง่ของความเร็วรถ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถการขึ้นทางชัน

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

2.1 เครื่องมือ

1) เครื่องวัดความสิ้นเปลืองพลังงานรุ่น C10s Compact แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 72 V, Accuracy class 1.5

2) อุปกรณ์ติดตามบันทึกความเร็ว ระยะทางรถ (GPS Tracker) C6 Car Truck Vehicle Tracking GSM GPRS / SMS GPS Tracker รุ่น TGPS6506_620, Accuracy class 1.5

2.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบขับเคลื่อน

กำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการออกแบบรถแสดงดังตารางที่ 1 นำข้อมูลมาคำนวณหาขนาดมอเตอร์และขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นจากจากการคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในส่วนต่าง ๆ ของรถ แล้วจึงทำการคำนวณหาแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนและคำนวณหาแรงบิดที่มอเตอร์ส่งกำลังผ่านชุดเกียร์และเฟืองท้ายของรถ สุดท้ายจึงนำผลมาคำนวณหากำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระการใช้จริง

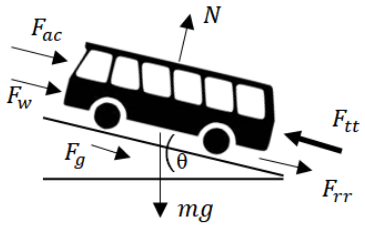
ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบรถไฟฟ้าดัดแปลง

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์	คุณลักษณะ
1	จำนวนผู้โดยสารรวมคนขับ		15 คน
2	มวลของรถ ผู้โดยสารและคนขับ	m	ไม่เกิน 2,000 kg
3	ความเร็วสูงสุด	V_{max}	35 km/hr (9.72 m/s)
4	ชนิดมอเตอร์	BLCD	แรงดัน 72 V
5	แบตเตอรี่ลิเธี่ยมฟอสเฟต หรือ $LiFePO_4$	V_B	72 V
6	มุมไต่ทางชัน	θ	10 องศา

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบรถไฟฟ้าดัดแปลง (ต่อ)

ลำดับ	รายละเอียด	สัญลักษณ์	คุณลักษณะ
7	เวลาที่ใช้อัตราเร่ง	t_a	20 วินาที at 0 – 35 km/hr
8	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านระหว่างล้อยางกับผิวถนน (พื้นถนน ลาดยาง)	C_{rr}	0.012
9	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	C_d	0.5
10	ความหนาแน่นอากาศที่อุณหภูมิ 35 °C	ρ	1.2 kg/m^3
11	พื้นที่ส่วนหน้าของรถ	A_f	1.5 m^2
12	รัศมีของล้อยาง ที่ขนาดยาง 265/70R16	R_w	0.3165 m
13	แฟคเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน	R_f	1.1
14	ความเร็วเชิงมุม คิดที่ความเร็วรถ 35 km/hr	ω	30.62 rad/s
15	อัตราทดเฟืองท้าย	G_r	4.29
16	อัตราทดเกียร์ 1, 2, 3	G_g	4.784, 2.423, 1.443

การคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ในส่วนต่าง ๆ ของรถในการหมุนของล้อ ในขณะที่รถเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้นโดยมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้



รูปที่ 1 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถในรูปแบบต่าง ๆ

1) แรงผลัก

ในการหาแรงผลักหรือแรงต้านทานรวมทั้งหมดที่ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า จะต้องใช้รถขับเคลื่อนไปได้ซึ่งจะประกอบไปด้วย แรงต้านทานการหมุนของล้อ (F_{rr}) แรงต้านทานของอากาศ (F_w) แรงต้านทานการขึ้นทางชันของรถ (F_g) แรงต้านทานการเร่ง (F_{ac})

$$F_{tt} = F_{rr} + F_w + F_g + F_{ac} \quad (1)$$

2) แรงต้านทานการหมุนของล้อ

เป็นแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของยาง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนน

$$F_{rr} = C_{rr} mg\cos(\theta) \tag{2}$$

โดยที่ F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุนของล้อ (N) C_{rr} คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทานการหมุน m คือ น้ำหนักของรถที่กดลงที่ล้อ (kg) g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2) θ คือ มุมองศาความชันของถนน

3) แรงต้านทานของอากาศ

การเกิดแรงต้านทานของอากาศจากรูปทรงพื้นที่หน้าตัดของรถส่วนที่ปะทะกับอากาศหรือกระแสลม

$$F_w = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \tag{3}$$

โดยที่ F_w คือ แรงต้านทานของอากาศ (N), ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3), C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ, A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถไฟฟ้า (m^2), v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้า (m/s)

4) แรงต้านทานการขึ้นทางชันของรถ

$$F_g = mg\sin(\theta) \tag{4}$$

โดยที่ F_g คือ แรงต้านทานการขึ้นทางชัน (N)

5) แรงต้านทานการเร่ง

เป็นผลเนื่องมาจากความเฉื่อยของรถขณะเคลื่อนที่รถยนต์จะเคลื่อนที่ได้จะต้องใช้กำลังของเครื่องยนต์บางส่วนส่งไปเป็นกำลังขับเคลื่อนที่ล้อกำลังที่ขับล้อนี้จะต้องมากพอที่จะเอาชนะกำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่อัตราเร็วขณะนั้นเมื่อรถวิ่งบนพื้นราบ

$$F_{ac} = \frac{m(v_2 - v_1)}{t_a} \tag{5}$$

โดยที่ F_{ac} คือ แรงต้านทานการเร่ง (N), v_2 คือ ความเร็วหลังการเร่ง (m/s), v_1 คือ ความเร็วเริ่มต้น (m/s), t_a คือ เวลาที่ใช้เร่งรถจากความเร็วเริ่มต้น v_1 ไปเป็น v_2 (s)

6) แรงบิดที่ล้อ

$$T_w = F_{tt} R_w R_f \tag{6}$$

โดยที่ T_w คือ แรงบิดที่ล้อยาง (N.m), R_w คือ รัศมีของล้อยาง (m), R_f คือ แฟคเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืนกำหนดให้เป็น 1.1 เมื่อเลือกล้อและยาง 265/70R16 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 633 mm

7) การเลือกพิกัดมอเตอร์

ส่วนของพิกัดมอเตอร์จะเป็นต้นกำลังของรถที่จะใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการ (7)

$$P_e = T_w \omega \tag{7}$$

โดยที่ P_e คือ กำลังที่เพลาของมอเตอร์ (W), T_w คือ แรงบิดกำลังที่เพลาของมอเตอร์ (N.m), ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s) การหาความเร็วรอบที่ต้องการในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั้น อัตราเร็วของรถจะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วรอบโดยขึ้นอยู่กับอัตราทดเฟืองท้ายและอัตราเกียร์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาอัตราเร็วของรถได้ ดังสมการ (8)

$$N = \frac{V \cdot 100}{2\pi r \cdot 60} \tag{8}$$

โดยที่ N คือ ความเร็วเพลาเฟืองท้าย (rpm), V คือ ความเร็วของรถ, r คือ รัศมีของล้อและยาง

ในการขับเคลื่อนตัวรถมีความจำเป็นต้องมีระบบเกียร์เพื่อมาช่วยปรับแรงบิดและความเร็วในย่านการทำงานเช่น การออกตัว การขับสภาวะปกติ ซึ่งการขับในพื้นที่จำกัดเช่นภายใน สถาบันฟาร์ม สถานที่ท่องเที่ยว โดยส่วนใหญ่จะถูกจำกัดความเร็วไม่เกิน 30-35 km/hr จึงทำให้เราสามารถลดพิกัดขนาดมอเตอร์ให้เล็กลงได้ความเร็วรอบมอเตอร์และพิกัดมอเตอร์ผ่านอัตราทดเกียร์และเฟืองท้ายสำหรับใช้ในการติดตั้งเป็นต้นกำลังให้กับรถ

$$N_m = N G_g G_r \tag{9}$$

$$P_m = \frac{P_e}{G_g G_r} \quad (10)$$

โดยที่ N_m คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ P_m คือ พิกัดมอเตอร์ G_g คือ อัตราทดเกียร์ต่าง ๆ G_r คือ อัตราทดเฟืองท้าย

8) การคำนวณหาพิกัดความจุแบตเตอรี่

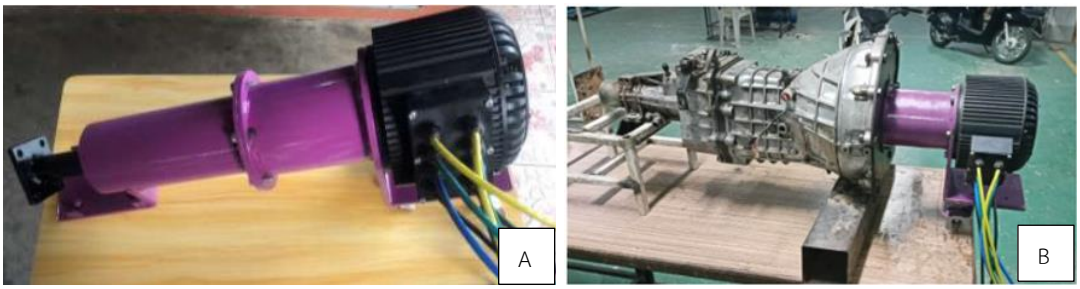
ในการหาขนาดพิกัดความจุของแบตเตอรี่เบื้องต้นที่เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยจะพิจารณาจากระยะทางการวิ่งของรถ ความเร็วที่ใช้หรือกำหนดจากระยะเวลาในการใช้งาน โดยใช้สมการ (11)

$$B_v = \frac{P_m H_r}{V_B} \quad (11)$$

โดยที่ B_v คือ ความจุแบตเตอรี่ที่ต้องการ (Ah) H_r คือ ระยะเวลาในการวิ่งของรถ (ชั่วโมง) V_B คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองการขับขี่ของรถจะแบ่งการทดสอบระบบส่งกำลังเป็น 2 แบบ ดังนี้ 1) ไม่ใช้เกียร์ โดยการใช้ต้นกำลังมอเตอร์ขับผ่านเพลากลางส่งกำลังไปยังชุดเฟืองท้าย แสดงดังรูปที่ 2A และ 2) ใช้เกียร์โดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์เชื่อมต่อกับเกียร์ที่มี 3 อัตราทด ผ่านเพลากลางไปยังชุดเฟืองท้ายแสดงดังรูปที่ 2B โดยมีเงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะการขับขี่ดังนี้



รูปที่ 2 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับระบบส่ง (A) ไม่ใช้เกียร์ และ (B) ใช้เกียร์

1) ทดสอบการขับขี่แบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกครบ 15 ที่นั่ง 1,050 kg.

2) การเก็บข้อมูลความเร็วและความสิ้นเปลืองพลังงานในแต่ละเส้นทางขับขี่โดยเก็บข้อมูลทดสอบจำนวน 3 ครั้ง แบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

2.1) วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 เส้นทางถนนภายในสถาบันเป็นที่มีสภาพการจราจรหนาแน่น มีสภาพถนนแคบ ทางแยกมากสลับกับตัวชะลอความเร็วและหยุดนิ่งจำนวน 4 ครั้ง ในช่วงเวลาเช้าเริ่มต้นระหว่างเวลา 07.00 น. ถึง 09.00 น. ระยะทาง 5.2 km

2.2) วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2 เส้นทางนอกสถาบันมีสภาพถนนทางตรง และทางโค้ง ไม่มีจุดหยุดนิ่งของรถ ในช่วงเวลาเดียวกันระยะทาง 5 km

ในการเก็บข้อมูลโดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แสดงพิกัดตำแหน่ง GPS Tracker ได้ติดตั้งไว้บริเวณด้านบนของหลังคาของรถตั้งค่าการเก็บข้อมูลความเร็วรถทุกๆ 1 วินาที ก่อนเริ่มต้นจัดเก็บข้อมูลใช้เวลาเก็บข้อมูล 1,200 วินาที เมื่อเก็บข้อมูลครบทั้ง 3 ครั้งในแต่ละเส้นทาง นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความเร็วแล้วจึงนำไปแสดงผลเป็นวัฏการขับขี่

3) การทดสอบด้านสมรรถนะการขับขี่จะทดสอบเฉพาะในสภาวะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 เท่านั้นเนื่องจากรถออกแบบเพื่อใช้งานภายในสถาบันเป็นหลัก โดยรถขับแบบไม่ใช้เกียร์และแบบใช้เกียร์ ด้านสมรรถนะการขับขี่ พิจารณาจากในแง่ของ อัตราเร่ง ความสามารถการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด และ ทดสอบหาน้ำหนักสูงสุดที่รถยังคงสามารถวิ่งได้ในทางราบ

4) การทดสอบความสิ้นเปลืองพลังงานและระยะทางที่รถวิ่งสูงสุด จะทำการวิ่งทดสอบจนระดับพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ (State of Charge) ลดลงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ ใช้วัฏจักรการขับขี่ในแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 โดยรถขับแบบไม่ใช้เกียร์และแบบใช้เกียร์ เก็บข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง ในสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกัน อุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 30 องศา ความชื้นสัมผัสในอากาศ 60-70%

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ข้อมูลจากการคำนวณหาขนาดต้นกำลังมอเตอร์

จากข้อมูลทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบรถในตารางที่ 1 นำมาคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถทั้งหมดและคำนวณหาพิกัดมอเตอร์ทำให้ได้ข้อมูลจากสมการการคำนวณต่าง ๆ ที่ผ่านมาข้างต้นนำมาแสดงในตารางที่ 2 และแสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

แรงบิดการหมุนล้อทั้งหมด จากสมการที่ (6) T_w = 3,020 N x 0.3165 m x 1.1 = 1,051.6 N.m

กำลังที่ใช้ขับเคลื่อน จากสมการที่ (7) P_e = 1,051.6 N.m x 3.72 rad/s = 32.2 kW

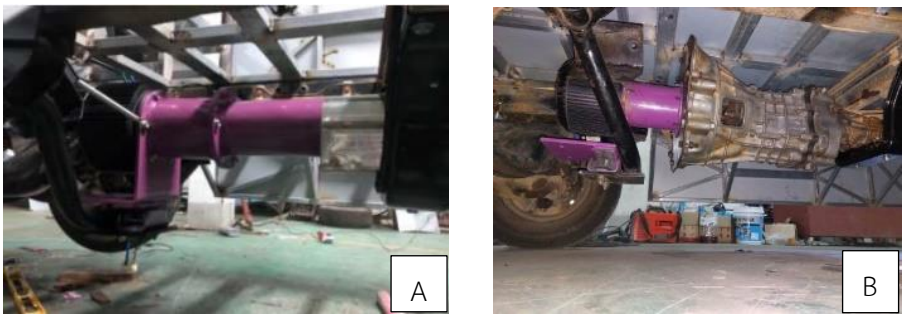
กำลังที่ใช้ขับเคลื่อน จากสมการที่ (8) P_m = 32.2 kW / 4.29 = 7.67 kW โดยคิดเฉพาะอัตราทดเฟืองท้าย 4.29 จากตารางที่ 1 กรณีที่ต้องการใช้กำลังสูงสุดแบบไม่ใช้เกียร์ นำไปสู่การเลือกพิกัดมอเตอร์ที่เหมาะสมได้ 7.67 kW แต่ขนาดดังกล่าวไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดจึงเลือกมอเตอร์พิกัด 10 kW ชนิด BLDC 72 V เมื่อได้พิกัดมอเตอร์ที่ต้องการนำมาคำนวณหาขนาดความจุของแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟตโดยใช้สมการที่ (11) แสดงตัวอย่างการคำนวณดังนี้

ขนาดแบตเตอรี่ B_v = (10,000 W x 0.5 hr) / 72V = 69.4 Ah

โดยกำหนดระยะทางที่ใช้ในการวิ่งภายในสถาบัน 10 km ใช้เวลาประมาณไม่เกิน 0.5 ชั่วโมง ในการวิ่งแต่ละรอบทำให้ได้แบตเตอรี่ขนาด 69.4 Ah ตามผลการคำนวณข้างต้น แต่ผู้วิจัยได้เลือกแบตเตอรี่ขนาด 7.2 kW.hr 100 Ah แรงดัน 72 V ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

ตารางที่ 2 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

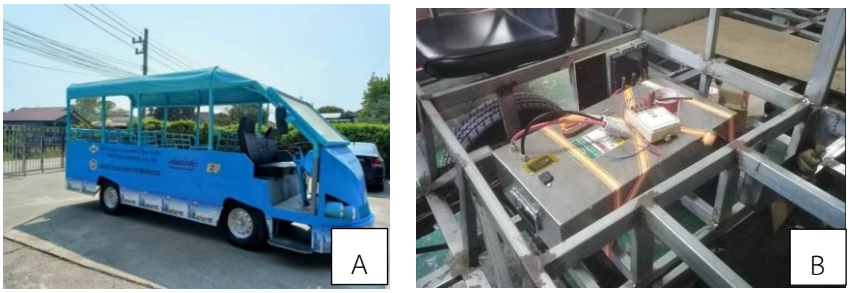
รายการคำนวณ	สัญลักษณ์	ผลการคำนวณ
1. แรงต้านทานจากอากาศ	F_w	42.5 N
2. แรงต้านทานจากการหมุนของยาง	F_{rr}	266.6 N
3. แรงต้านทานจากน้ำหนักรถขณะขึ้นถนนชัน	F_g	1,966.4 N
4. แรงต้านทานเกิดจากแรงเฉื่อยของรถยนต์เมื่อเร่งเครื่อง	F_a	745.2 N
5. แรงต้านทั้งหมด	F_{tt}	3,020 N
6. แรงบิดการหมุนล้อทั้งหมด	T_w	1,051.6 N.m
7. กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนโดยไม่ใช้อัตราทดเกียร์และเฟืองท้าย	P_e	32.2 kW
8. กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนผ่านอัตราทดเกียร์และเฟืองท้าย	P_m	7.67 kW
9. พิกัดมอเตอร์ที่เลือก ชนิด BLDC 72 V	-	10 kW
10. ขนาดแบตเตอรี่	B_v	100 Ah



รูปที่ 3 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับตัวรถ: ไม่ใช้เกียร์ (A) และ ใช้เกียร์ (B)

จากนั้นนำข้อมูลขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่มาออกแบบติดตั้งลงในตัวรถบริเวณใต้ที่นั่งคนขับรถแสดงดังรูปที่ 4B โดยมอเตอร์ต้นกำลังจะมีการเชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังในสองลักษณะคือ แบบที่ 1 ไม่ใช้เกียร์โดยการใช้ต้นกำลังมอเตอร์ขับผ่านเพลากลางส่งกำลังไปยังชุดเฟืองท้ายแสดงดังรูปที่ 3A และ แบบที่ 2 ใช้เกียร์โดยใช้ต้นกำลังมอเตอร์เชื่อมต่อกับเกียร์ที่มี 3 อัตราทด ผ่านเพลากลางไปยังชุดเฟืองท้าย แสดงดังรูปที่ 3B

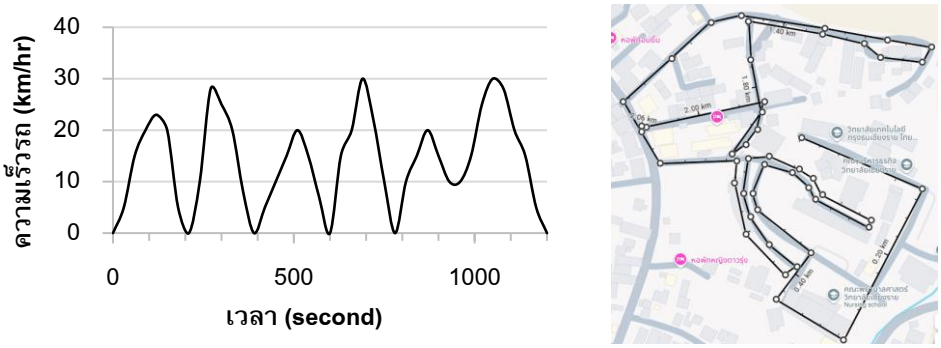
เมื่อดำเนินการติดตั้งมอเตอร์ แบตเตอรี่ และระบบควบคุมการทำงานของรถเสร็จเรียบร้อย จึงทำการประกอบตัวถังรถ เก้าอี้นั่ง หลังคา และกระจกด้านหน้ารถ แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4A จากนั้นจึงนำรถไปทดสอบตามเงื่อนไขสภาวะต่าง ๆ โดยเริ่มต้นด้วยการชั่งน้ำหนักรถเปล่าไม่มีผู้โดยสาร และ บรรทุกผู้โดยสารเต็มพิกัดจำนวน 15 คน มีน้ำหนัก 1,050 kg และ 1,850 kg ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไม่เกิน 2,000 kg



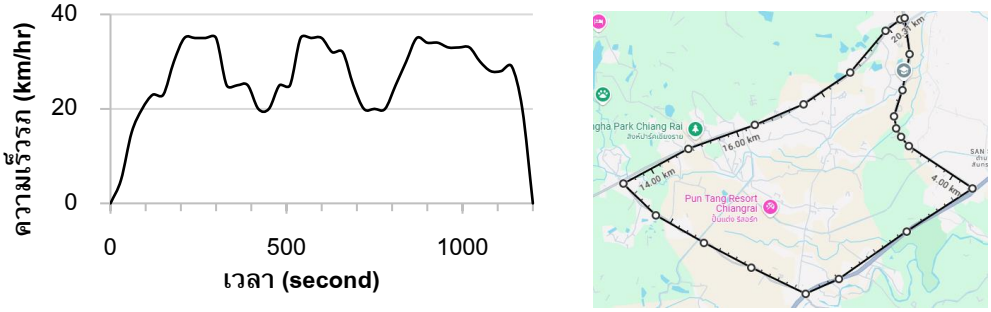
รูปที่ 4 รถรับส่งนักศึกษาในโครงการวิจัย (A) และ การติดตั้งแบตเตอรี่ (B)

3.2 วัฏจักรการขับขี่

จากการนำรถวิ่งทดสอบโดยบรรทุกผู้โดยสารเต็มพิกัด 15 คน ด้วยการเชื่อมต่อต้นกำลังมอเตอร์แบบใช้เกียร์ เพื่อศึกษาวัฏจักรการขับขี่ในเส้นทางภายในสถาบันและด้านนอกสถาบัน ทำให้ได้วัฏจักรการขับขี่เส้นทางนอกพื้นที่สถาบันแสดงดังรูปที่ 5 มีสภาพการการจราจรไม่หนาแน่น ใช้เวลาเก็บข้อมูล 1,200 วินาที รถใช้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 31 km/hr ทำความเร็วสูงสุดได้ 35.5 km/hr ในส่วนการขับขี่รถภายในพื้นที่ของสถาบันมีวัฏจักรการขับขี่แสดงดังรูปที่ 6 รถใช้ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 18 km/hr ทำความเร็วสูงสุดได้ 30 km/hr เนื่องจากพื้นที่มีสภาพถนนทางโค้ง ตัวชะลอความเร็ว การจราจรหนาแน่น ทำให้รถทำความเร็วสลับกับหยุดนิ่งรถจึงไม่สามารถทำความเร็วสูงสุด



รูปที่ 5 วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1



รูปที่ 6 วัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2

3.3 การทดสอบสมรรถนะการขับขี่

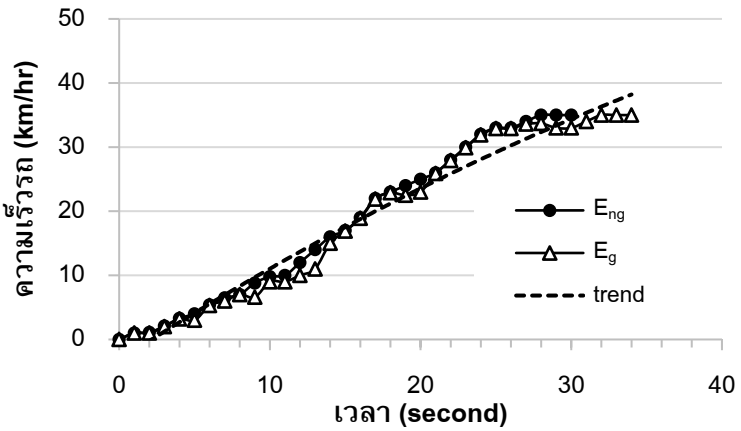
จากการทดสอบสมรรถนะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 ตามลักษณะการเชื่อมมอเตอร์กับระบบส่งกำลังแบบไม่ใช้เกียร์กับแบบที่ใช้เกียร์แสดงข้อมูลดังในตารางที่ 3 พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์สามารถทำระยะทางสูงสุดที่รถวิ่งได้ต่อการชาร์จประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้งความจุ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อรถบรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดรถสามารถวิ่งได้ระยะสูงสุด 18.6 km มีความเร็วสูงสุด 34 km/hr และขึ้นทางชันได้สูงสุด 11 องศา และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบด้านความเร็วสูงสุดได้ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ที่ 35 km/hr ซึ่งอาจเกิดจากแรงต้านทานการหมุนของล้อสัมผัสระหว่างยางกับผิวถนนคอนกรีต ซึ่งขณะออกแบบได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของถนนลาดยางมะตอยอาจน้อยกว่าถนนคอนกรีตเล็กน้อยจึงทำให้ความเร็วรถลดลงจากที่ออกแบบ ส่วนมุมทางชันทำได้ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้ 10 องศา

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1

ลักษณะการใช้งาน	สภาวะบรรทุก	การขึ้นทางชัน (องศา)	ระยะทางการวิ่ง (km)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kW.hr)	อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน (Wh/km)	น้ำหนักสูงสุด (kg)
ไม่ใช้เกียร์	NL	17	26.2	43	5.4	206	1,200
	FL	11	18.6	34	6.2	322	
ใช้เกียร์	NL	23	25.3	45	6.1	241	1,800
	FL	15	20.4	37	5.4	293	

หมายเหตุ: NL คือ ไม่มีน้ำหนักบรรทุก, FL คือ บรรทุกเต็มพิกัด

ในส่วนของการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบที่ใช้เกียร์รถสามารถวิ่งได้ระยะสูงสุด 20.4 km มีความเร็วสูงสุด 37 km/hr และขึ้นทางชันได้สูงสุด 15 องศา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมต่อมอเตอร์ทั้ง 2 แบบ พบว่ารถที่มีการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบใช้เกียร์สามารถทำความเร็วและระยะทางที่วิ่งได้ไกลกว่ารวมไปถึงมีความสามารถขึ้นทางชันได้ดีกว่าเนื่องจากคนขับรถสามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดให้เหมาะสมกับความเร็วของรถ เนื่องจากผู้ขับขี่สามารถใช้เกียร์ 1 ขณะรถออกตัว และใช้เกียร์ 2 และ 3 ในความเร็วถัดไป รวมไปถึงการขึ้นทางชันได้มากกว่าเพราะว่าสามารถใช้เกียร์ 1 ที่อัตราทดสูงจึงส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิดเพียงพอในการขับเคลื่อนรถไปข้างหน้าได้และยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุด 1800 kg ซึ่งมากกว่ารถไม่ใช้เกียร์ที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราทดได้



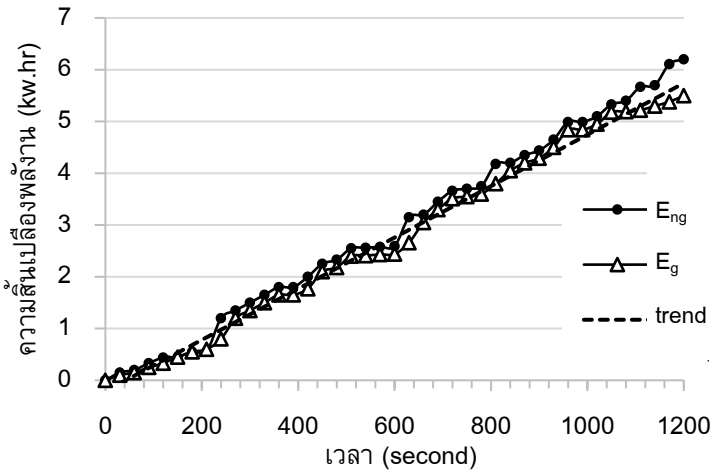
รูปที่ 7 การทดสอบอัตราเร่งของรถ

จากการทดสอบอัตราเร่งของรถที่บรรทุกเต็มพิกัดจากความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์จนไปถึงความเร็ว 35 km/hr พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้เวลา 30 วินาที ส่วนรถที่ใช้เกียร์ใช้เวลา 35 วินาที ซึ่งการใช้เวลามากว่าเนื่องจากรถจะต้องมีการเปลี่ยนเกียร์จากอัตราทดที่ 1–3 ซึ่งในขณะที่มีการเปลี่ยนอัตราทดรถจะสูญเสียความเร็วช่วงเวลา 10, 18 และ 25 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่รถเปลี่ยนเกียร์แสดงให้เห็นดังรูปที่ 7 แต่เมื่อเทียบกับข้อมูลการออกแบบพบว่าอัตราเร่งของรถทำได้ต่ำกว่าค่าการออกแบบที่ใช้เวลา 20 วินาที ในการทำความเร็วจาก 0–35 km/m อาจเกิดจากระบบส่งกำลังที่นำมาใช้เป็นของเก่าผ่านการใช้งานมานานทำให้มีค่าแรงเสียดทานสูงกว่าปกติ

3.4 การทดสอบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน

การทดสอบความสิ้นเปลืองพลังงานกรณีใช้เส้นทางวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 แสดงดังรูปที่ 8 เป็นการขับแบบมีภาระน้ำหนักเต็มพิกัดโดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบที่ไม่ใช้เกียร์ (E_{ng}) กับแบบใช้เกียร์ (E_g) พบว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้พลังงานไปทั้งหมด 6.2 kW.hr

มากกว่ารถที่ใช้เกียร์ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 5.4 kW.hr เนื่องจากการขับขี่วัฏจักรการขับขี่แบบที่1 มีการขับขี่วิ่งสลับการหยุดจอดเป็นช่วง ๆ แสดงวัฏจักรการขับขี่ดังรูปที่ 5 ทำให้รถที่ใช้อัตราทดเดียวไม่สามารถปรับอัตราทดช่วยในการออกตัวในแต่ละครั้งได้ซึ่งการออกตัวจากสภาวะหยุดนิ่งแต่ละครั้งรถจะต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์สูงกว่าขณะใช้ความเร็วคงที่ซึ่งจะสังเกตได้จากความสิ้นเปลืองพลังงานในรูปการขับขี่ดังรูปที่ 8 ที่เวลา 220, 600, 880 วินาที เป็นจุดที่รถออกตัวจากการจอด กราฟจะมีความชันเพิ่มอย่างเห็นได้ชัด จึงทำให้รถกินพลังงานมากกว่าแบบที่ใช้เกียร์

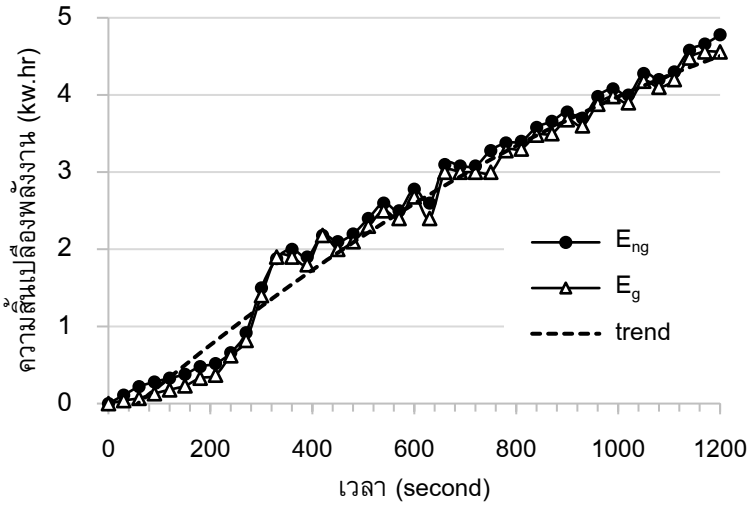


รูปที่ 8 ความสิ้นเปลืองพลังงานวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1

การพิจารณาในแง่อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานโดยพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป ต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่รถสามารถวิ่งได้ (Wh/km) พบว่ารถที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดขับผ่านชุดเกียร์มีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 293 Wh/km น้อยกว่ารถที่ไม่ใช้เกียร์แต่เมื่อเปรียบเทียบกับยานยนต์ไฟฟ้าที่จำหน่ายในท้องตลาดปัจจุบันโดยปกติแล้วอยู่ที่ 166-208 Wh/km ซึ่งรถจากงานวิจัยจะมีอัตราการใช้พลังงานสูงกว่าอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดการออกแบบ วัสดุที่ใช้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

กรณีใช้เส้นทางวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 9 เป็นการขับแบบมีภาระน้ำหนักเต็มพิกัดโดยศึกษาเปรียบเทียบกันระหว่างการเชื่อมต่อมอเตอร์แบบไม่ใช้เกียร์กับแบบใช้เกียร์พบว่ารถจะใช้พลังงานมากในช่วงแรกของการออกตัวในช่วง 0-200 วินาที และเมื่อใช้เวลา 1,200 วินาที ซึ่งรถที่ไม่ใช้เกียร์ใช้พลังงานไปทั้งหมด 4.8 kW.hr ใกล้เคียงกับรถที่ใช้เกียร์ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 5.1 kW.hr เนื่องจากการวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2 มีการขับขี่วิ่งที่มีความเร็วรถ

สม่ำเสมอไม่มีจุดหยุดนิ่งแสดงวัฏจักรดังรูปที่ 6 ทำให้รถที่ใช้อัตราทดเดียวสามารถรักษาความเร็วได้ดีไม่ต้องใช้พลังงานในการออกตัวในแต่ละครั้ง



รูปที่ 9 ความสิ้นเปลืองพลังงานวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 2

จากการทดสอบการใช้งานแบตเตอรี่แบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟตขนาด 7.2 kW.hr 100 Ah แรงดัน 72 V โดยการชาร์จเต็ม 100 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่ารถไม่ใช้เกียร์และไม่มีน้ำหนักบรรทุกจะวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 26.2 km มีระยะทางการวิ่งได้มากกว่ารถบรรทุกเต็มพิกัดที่วิ่งได้ 18.6 km ทั้งนี้เนื่องจากรถที่บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดขณะวิ่งทดสอบตัวมอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องใช้พลังงานมากกว่าและกินกระแสสูงกว่ามีการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่ไปใช้มากกว่าจึงทำให้รถวิ่งได้ระยะทางน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบพบว่ารถใช้ระยะทางวิ่งได้สูงสุด 26.2 km ใช้เวลา 28 นาที ใช้เวลาได้น้อยกว่าการออกแบบที่ 30 นาที ซึ่งอาจเกิดจากแรงต้านทานอากาศและแรงเสียดทานของระบบส่งกำลังที่มากกว่าค่าที่ออกแบบ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาออกแบบรถรับส่งนักศึกษาโดยการคำนวณจากข้อมูลจำเพาะของรถทำให้ได้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด BLDC ที่มีขนาดพิกัด 10 kW แรงดันไฟฟ้า 72 V และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ความจุ 100 Ah แรงดัน 72 V และทำการทดสอบการใช้ต้นกำลังมอเตอร์กับระบบส่งกำลัง จากผลการทดสอบพบว่ารถที่ใช้บรรทุกน้ำหนักเต็มพิกัดใช้ระบบส่งกำลังแบบใช้เกียร์มีสมรรถนะการขับขี่ในวัฏจักรแบบที่ 1 ในสถาบันดีกว่าระบบส่งกำลังแบบที่ไม่ใช้เกียร์ โดยที่รถแบบใช้เกียร์สามารถขับได้ระยะ 20.4 km มีความเร็วรถ 37 km/hr สิ้นเปลืองพลังงานไป

5.4 kWh เนื่องจากมีเกียร์ช่วยในการขับเคลื่อนตามช่วงความเร็วต่าง ๆ ที่เกิดจากการหยุดจอดเป็นช่วง ๆ ขณะวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 จึงทำให้ประหยัดพลังงานได้ดีกว่า แต่รถที่ไม่ใช้เกียร์จะประหยัดพลังงานได้ดีกว่าในการขับขี่ในวัฏจักรแบบที่ 2 นอกเขตสถาบันเนื่องจากรถวิ่งในความเร็วสม่ำเสมอไม่มีการจอดหยุดนิ่งและใช้พลังงานน้อยกว่า รวมไปถึงการขับขี่แบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกในวัฏจักรการขับขี่แบบที่ 1 รถไม่ใช้เกียร์กินพลังงานน้อยกว่า เนื่องจากรถไม่มีเกียร์มีน้ำหนักน้อยกว่าและไม่มีน้ำหนักบรรทุกทำให้รถมีน้ำหนักรวมต่ำกว่ามาก รถจึงออกตัวได้ง่ายกว่าผู้ขับขี่จึงไม่จำเป็นต้องใช้อัตราทดเกียร์ช่วยขณะออกตัวเป็นขับขี่สบายกว่าไม่ต้องเปลี่ยนเกียร์บ่อย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทอุตสาหกรรมท่อน้ำไทยจำกัด และ วิทยาลัยเชียงราย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

References

[1] Office of Industrial Economics. Documents for the 1st Morning Talk seminar: Report on the situation of the modern automotive industry towards the goal of a sustainable economy, the situation of electric vehicles. Bangkok, Thailand: Office of Industrial Economics; 2023. (In Thai)

[2] Mali A, Shukla A, Husain A, Hole K, Edake V. Design and analysis of powertrain for electric vehicle. International Research Journal of Engineering and Technology. 2021;8(8):1222-42.

[3] Tomar V, Chitra A, Krishnachaitanya D, Raghavendra Rao NS, Indragandhi V, Raziasultana W. Design of powertrain model for an electric vehicle using MATLAB/Simulink. Proceedings of the 2021 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT); 2021 Nov 27-29; Kuala Lumpur, Malaysia. p. 1-7.

[4] Güneùer MT, Dalcali A, Öztürk T, Ocak C, Cernat M. An induction motor design for urban use electric vehicle. Proceedings of the 2016 International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC); 2016 Sep 25-28; Varna, Bulgaria. p. 261-66.

[5] Verbruggen R, Rangarajan V, Hofman T. Powertrain design optimization for a battery electric heavy-duty truck. Proceedings of 2019 American Control Conference; 2019 Jul 10-12; Philadelphia, USA. p. 1488-93.

[6] Ludsui M, Khobkhan P, Kunkiang V, Pothi N. Design and development of prototype electric vehicle. Journal of Science, Engineering and Technology 2021;1(1):19-29. (In Thai)

[7] Jensanyayut T. Design of a small electric vehicle for the elderly [Master of Engineering]. Pathum Thani, Thailand: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2020. (In Thai)

[8] Monatrakul W, Thirasuwan W, Hemarat P. Design of the utility electrical tricycle vehicle. Proceeding of the 28th Conference of The Mechanical Engineering Network of Thailand; 2014 Oct 15-17; Khon Kaen, Thailand. p. 485-92. (In Thai)

[9] Suksing P, Trapsingh W. Design and build a driverless miniature electric train guiding control system. Proceeding of the 15th Conference on Energy Network of Thailand; 2011 May 3-5; Phuket, Thailand. p. 361-72. (In Thai)

[10] Ruangrungchaikul T, Aumkratum S. Multipurpose three wheel solar mini truck. Thai Journal of Science and Technology 2022;8(2):200-11. (In Thai)

[11] Sittiritkawin P, Yodkhad P, Saengnual S, Khuanlieng W. Development of power unit connection set from electric motor for use in a Tuk Tuk electric vehicle. Proceeding of the 5th National Conference on Science and Technology of Thailand; 2021 Jan 15-16; Nonthaburi, Thailand. p. 224-35. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ

ภักดี สิทธิฤทธิ์กวิน ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย เลขที่ 199 ม.6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 086-3023878 Email: pakdee.me@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: ด้านพลังงานความร้อนจากเตาเผาขยะ และยานยนต์ไฟฟ้า

กาจ อิ่มบุญอาบ ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล (สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเชียงราย เลขที่ 199 ม.6 ต.ป่าอ้อดอนชัย อ.เมือง จ.เชียงราย 57000 โทรศัพท์ 092-993077 Email: Kaj.me@gmail.com
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมยานยนต์

Article History:

Received: August 29, 2024

Revised: December 18, 2024

Accepted: December 19, 2024