

5ER-P01: การพัฒนาอุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้งานกับ รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

Development of power unit connection set from electric motor for use in a
Tuk Tuk electric vehicle.

ภักดี สิทธิฤทธิกาวิน^{1*} สมชาย แสงนวล¹ ไพฑูรย์ ยศภาศ¹ และ วีระ ควรเลี้ยง¹
Pakdee Sittirirkawin^{1*}, Paitoon Yodkhad¹, Somchai Saengnual¹ and Weera Khuanlieng¹

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์งานวิจัยครั้งนี้เพื่อพัฒนาดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังให้เปลี่ยนมาเป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง โดยทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากับชุดเกียร์เดิมของรถ ในการศึกษาจะคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสมและศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างรถที่ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังกับรถที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อตรงเข้าที่เฟืองท้าย โดยพิจารณาตามสมรรถนะการขับขี่ ในแง่ของ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด และจากการคำนวณออกแบบได้ต้นกำลังมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 10 kW และทดสอบอุปกรณ์เชื่อมต่อโดยการวิ่งทดสอบจริงในสภาวะต่างๆพบว่ารถสามารถออกตัวได้ดีกว่ารถตุ๊กตุ๊กที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่เข้าที่เฟืองท้าย เนื่องจากใช้อัตราทดเกียร์ได้ครบทุกเกียร์ตั้งแต่ เกียร์ 1 - 4 ในการทดสอบความเร็วในการขับขี่ระยะทาง 30 km ในสภาวะการขับขี่ในเมืองซึ่งจะเหมาะสมกับการใช้อัตราทดเกียร์ปกติ ซึ่งทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดเท่ากับ 25 km/hr ส่วนในสภาวะการขับขึ้นนอกเมือง อัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดเท่ากับ 50 km/hr สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดเท่ากับ 228 Wh/km ซึ่งน้อยกว่าแบบมอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อตรงเข้าที่เฟืองท้าย เพราะการออกตัวรถจากหยุดนิ่งทำได้ดีกว่าทำให้ไม่เสียพลังงานแรงบิดมอเตอร์มาก การทดสอบวิ่งทางชันที่ทำได้ 16 องศา การทดสอบน้ำหนักภาระโหลตสูงสุดได้ 1125 kg ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์เชื่อมต่อที่จะนำมาดัดแปลงเข้ากับรถตุ๊กตุ๊กเก่าในแง่ของสมรรถนะการออกตัวได้ดี ความสิ้นเปลืองพลังงานน้อย และงบประมาณที่ทำให้ราคารถถูกลงโดยประมาณร้อยละ 60

คำสำคัญ: อุปกรณ์เชื่อมต่อ ต้นกำลัง มอเตอร์ไฟฟ้า รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

Abstract

The purpose of this research is to develop a modified Tuk Tuk using an internal combustion engine. Changed to the electric motor by designing and building a connection device between the power plant from the electric motor and the original gearbox of the car, which will allow the car to use the clutch. In this study, suitable electric motor ratings were calculated and used for comparative studies of applications between vehicles with an electric motor connected to a vehicle with an electric motor directly connected to the rear differential. By considering the driving performance in terms of acceleration, power consumption, maximum load, steep climb capability, maximum speed, and calculated from the design calculation, the starting power of a 5 kW electric motor and testing the connected equipment by a test run. In various conditions, it was found that the vehicle was able to start better than a tuk-tuk with a direct drive system that was positioned at the rear differential. Due to the use of gear ratios for all gears from 1 - 4. Driving speed test 30 km distance urban driving conditions, Which are suitable for using normal gear ratios makes the average speed as much as 25 km/hr as for driving conditions outside the city gear 4 ratio has the highest average speed of 50 km/hr. For the lowest energy consumption is 228 Wh/km was less than the electric motor connected directly to the rear gear because it is better to start the car from a standstill, thus not wasting much motor torque power. The test runs on a steep slope with an angle of 16 degrees. The maximum load weight test was 1125 kg. The advantage of the connecting device to be adapted to the Tuk Tuk in terms of performance, the car starts well and consumes less energy. Including the budget that makes the car price lower by approximately 60 percent.

Keywords: power unit, connection set, electric motor, Tuk Tuk electric vehicle

¹ วิทยาลัยเชียงราย

¹ Chiang Rai College

* Corresponding author. E-mail: pakdee.me@gmail.com

บทนำ

สืบเนื่องจากในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความนิยมจากผู้บริโภคอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจากระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนตัวรถไม่สร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมและยังประหยัดพลังงานกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน รวมไปถึงกลุ่มผู้ใช้งานรถตุ๊กตุ๊กรับจ้างทั่วไปที่มีใช้งานจำนวนมากโดยเฉพาะในเมืองใหญ่เช่นกรุงเทพฯ เชียงใหม่ ได้เปลี่ยนมาใช้ยานรถตุ๊กตุ๊กแบบใช้พลังงานไฟฟ้ากันมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่ามีผู้คิดค้นออกแบบและพัฒนาารถตุ๊กตุ๊กแบบใช้ไฟฟ้ากันมากมายหลากหลายรูปแบบ โดยส่วนใหญ่จะเน้นในระบบการทำงานของระบบต้นกำลังโดยนำชุดต้นกำลังหรือมอเตอร์ไฟฟ้าติดเข้ากับชุดเฟืองท้ายที่ใช้ในการขับเคลื่อนโดยตรงมีอัตราการส่งกำลังในอัตราทดเดียวมีขายทั่วไปในท้องตลาดและมีราคาต้นทุนที่สูง นอกจากนั้นยังพบรูปแบบอื่นๆที่ได้พัฒนาขึ้นมาโดยใช้โครงสร้างเดิมของรถตุ๊กตุ๊กในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของรถตุ๊กตุ๊ก ที่ดัดแปลงเป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ต้องคำนึงถึงการกระจายน้ำหนักของแบตเตอรี่ ในส่วนของระบบขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าดัดแปลงโดยส่วนใหญ่จะมีใช้ 3 รูปแบบ [1] ได้แก่ กรณีที่ 1 มอเตอร์แบบขับตรงขับเพลาลูกผ่าน Pinion โดยตรงมักจะประกอบเป็นชุดสำเร็จ เป็นวิธีที่แพร่หลายมากที่สุด ข้อดีติดตั้งง่ายแรงบิดสูงและประสิทธิภาพสูง ข้อเสีย คือราคาทั้งชุดค่อนข้างสูง และมอเตอร์ค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากขับตรง กรณีที่ 2 ขับผ่านเพลากลางและเฟืองท้าย ในการติดตั้งมอเตอร์ จะต้องหา Alignment ระหว่างเพลากลางกับมอเตอร์ เพื่อให้การขับไม่เกิดการสั่น มอเตอร์จะขับผ่านเพลากลางวิธีนี้ไม่ต้องเปลี่ยนเฟืองท้ายการติดตั้งไม่ยุ่งยากเฟืองท้ายมีอัตราทดประมาณ 8:1 ใกล้เคียงกับ Pinion ในแบบขับตรง ทำให้ขนาดมอเตอร์ใกล้เคียงกัน ต้นทุนต่ำลง เนื่องจากใช้เฟืองท้ายเดิมแรงบิดที่ได้ใกล้เคียงกับแบบขับตรง ส่วนกรณีที่ 3 ติดตั้งมอเตอร์ขับผ่านระบบเกียร์และชุดเฟืองท้ายโดยจะต้องหา Alignment ระหว่างเพลามอเตอร์กับเพลากเกียร์ เพื่อให้สามารถสวมเข้ากับหน้าแปลนเกียร์เพื่อให้การขับไม่เกิดการสั่นสะเทือน จะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ ออกแบบจุดจับยึดมอเตอร์ให้ความมั่นคงแข็งแรง มอเตอร์ขับเกียร์และส่งต่อไปยังเฟืองท้ายและเพลาลูก การติดตั้งง่ายและเร็วที่สุด มีข้อดีคือมอเตอร์ขนาดเล็กลง เนื่องผ่านเกียร์ทด อัตราทดของเฟืองท้ายลดลง ออกตัวได้ดีต้นทุนใกล้เคียงกับการขับผ่านเพลากลาง แต่ยังพบปัญหาในแง่การติดตั้งระหว่างมอเตอร์เข้ากับชุดเกียร์เดิมที่ยุ่งยากเพราะต้องมีชุดเชื่อมต่อที่ทำหน้าที่เหมือนสะพานให้มอเตอร์ส่งกำลังไปยังเกียร์ได้อย่างราบรื่นไม่สะดุด

วิรุณ และคณะ (2557) [2] มีการศึกษาการออกแบบและสร้างรถสามล้อไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ของการออกแบบคือโครงสร้างที่มีมาตรฐานความปลอดภัย น้ำหนักเบา และชุดต้นกำลังขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า จากการออกแบบและสร้างทำให้ได้รถสามล้อไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบท่อโครงถัก (tube space frame chassis) มีความปลอดภัย (F.O.S) เท่ากับ 4.22 โดยใช้ชุดต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 60 โวลต์ขนาด 2 แรงม้า และแหล่งป้อนกระแสไฟใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 60 แอมแปร์-ชั่วโมง 5 ลูก ต่อแบบอนุกรม ผลการทดสอบสมรรถนะใช้งาน สามารถวิ่งได้ระยะทาง 80 km ความเร็วสูงสุด 47 km/h รับน้ำหนักบรรทุกได้ 480 kg และขึ้นเนินได้ 35 องศา ระยะเวลาในการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ 7 ชั่วโมง สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตามความต้องการของผู้บริโภคในอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวและภาคธุรกิจบริการ

ไชยวัฒน์ และคณะ (2549) [3] มีการศึกษาพร้อมกับ บริษัท อารังไทย 2003 จำกัด ซึ่งประกอบธุรกิจเกี่ยวกับการรับจ้างผลิตรถสามล้อเครื่อง มีกำลังการผลิต 200 คันต่อปี พบว่าปัจจุบัน แนวโน้มความจำเป็นในการใช้

ยานพาหนะที่ประหยัดพลังงานและไม่ก่อมลพิษต่อแวดล้อมทั้งทางเสียงและอากาศมีมากขึ้นโดยเฉพาะมีความต้องการรถสามล้อหรือตุ๊กตุ๊กที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

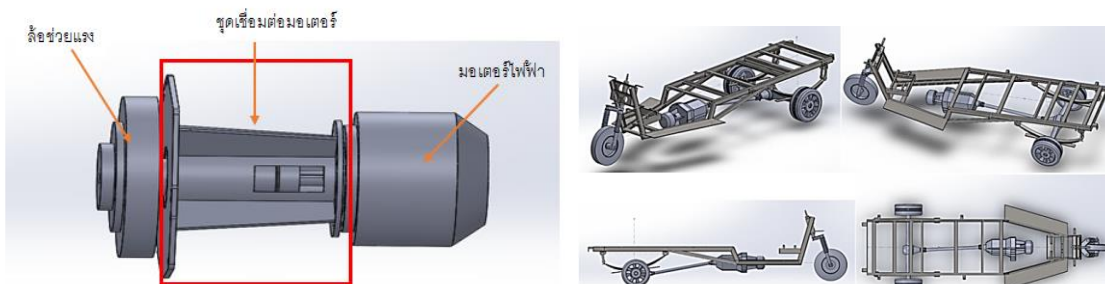
ธนิต และสุนันต์ (2018) [7] ได้ประดิษฐ์รถบรรทุกสามล้อไฟฟ้าอเนกประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถใช้งานได้หลากหลายวัตถุประสงค์ ทั้งการขับเคลื่อนบรรทุกขนย้ายสิ่งของและใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ตัวรถปรับปรุงดัดแปลงจากรถบรรทุกสามล้อไฟฟ้าเดิม โดยติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนเป็น 3,000 W 48 V ทดแทนของเดิมซึ่งมีขนาด 1,500 วัตต์ 60 V มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งเป็นหลังคาที่ด้านบนของกระบะบรรทุก ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้า เพื่อประจุเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่สำหรับใช้งาน มีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง 48 V จากแบตเตอรี่ให้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V สามารถทำความเร็วเฉลี่ยได้ประมาณ 25 km/hr ในขณะที่เมื่อมีภาระน้ำหนักบรรทุก 350 kg สามารถทำความเร็วเฉลี่ยได้ประมาณ 23 km/hr การทดสอบขับเคลื่อนขึ้นทางลาดชันพบว่าสามารถขับเคลื่อนขึ้นทางลาดชัน 9.5 องศา (ร้อยละ 16.67) ได้ทั้งกรณีที่ไม่มีภาระน้ำหนักบรรทุกและที่มีภาระน้ำหนักบรรทุก 350 kg

จากแนวความคิดการพัฒนารถสามล้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในพัฒนาดัดแปลงรถตุ๊กตุ๊กเครื่องยนต์ให้เปลี่ยนมาเป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า โดยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังผ่านไปยัง ชุดคลัทช์ ชุดเกียร์ ชุดเพลา และชุดเฟืองท้ายเดิมของรถตุ๊กตุ๊ก และศึกษาเปรียบเทียบการใช้งานรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใน 2 กรณี กรณีแรกใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังร่วมกับเกียร์รถเดิมและกรณีที่สองไม่ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อและเกียร์รถโดยมอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อตรงเข้ากับเฟืองท้าย พิจารณาด้านสมรรถนะการขับเคลื่อนในแง่ของ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด

วิธีการศึกษา

1. เครื่องมือ

- เครื่องวัดความสิ้นเปลืองพลังงาน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 72 V.
- เครื่องวัดความสิ้นเปลืองพลังงาน (kW-hr) แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V.
- นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 1 แนวคิดการจัดวางชุดเชื่อมต่อต้นกำลังเข้ากับโครงรถตุ๊กตุ๊กจริง ก.ชุดเชื่อมต่omotor ข.การติดตั้งชุดเชื่อมต่omotorเข้ากับเกียร์รถ

2. ขั้นตอนการออกแบบระบบขับเคลื่อน

การหาขนาดมอเตอร์และตำแหน่งจุดติดตั้งที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 1 สำหรับขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กโดยเริ่มจากการคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถก่อนแล้วจึงทำการคำนวณหาแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนและคำนวณหาแรงบิดเครื่องยนต์ (ที่เฟืองปลายเกียร์) สุดท้ายจึงนำผลมาคำนวณหากำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้จริงโดยกำหนดน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 800 kg.

ในขณะที่รถเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้นมีผลทำให้สิ้นเปลืองกำลังหรือพลังงานเครื่องยนต์หรือระบบต้นกำลังแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในขณะที่รถเคลื่อนที่ได้แก่

- 1) แรงต้านทานของอากาศเกิดจากรูปทรงพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ปะทะกับอากาศหรือกระแสลม
- 2) แรงต้านทานการหมุนของยางหรือล้อ เป็นแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของยาง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนน
- 3) แรงต้านทานการขึ้นทางชัน
- 4) แรงต้านทานการเร่ง เป็นผลเนื่องมาจากความเฉื่อยของรถขณะเคลื่อนที่

รถยนต์จะเคลื่อนที่ได้จะต้องใช้กำลังของเครื่องยนต์บางส่วนส่งไปเป็นกำลังขับเคลื่อนที่ล้อขับเคลื่อนที่ล้อกำลังที่ขับเคลื่อนจะต้องมากพอที่จะเอาชนะกำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่อัตราเร็วขณะนั้นเมื่อรถวิ่งบนพื้นราบ จะได้ว่า

$$F_T = R \quad (1)$$

$$R = R_a + R_r + R_g + R_f \quad (2)$$

เมื่อ $R_a = C_D \frac{\rho}{2} A V^2$

$$R_r = K_r W \cos \theta$$

$$R_g = W \sin \theta$$

$$R_f = \frac{W_a}{g}$$

เมื่อ F_T แรงบิดที่ล้อ (N)

V ความเร็วของรถยนต์ 45 km/hr.

η_t ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง 80 %

W น้ำหนักรถยนต์ (450 N)

R แรงต้านทั้งหมด (N)

R_a แรงต้านทานจากอากาศ (N)

R_r แรงต้านทานจากการหมุนของยาง (N)

R_g แรงต้านทานจากน้ำหนักรถขณะขึ้นถนนชัน (N)

R_f แรงต้านทานเกิดจากแรงเฉื่อยของรถยนต์เมื่อเร่งเครื่อง

θ มุมองศาความชัน 20 องศา

เนื่องจากถ้าเราคำนวณหาแรงต้านทานได้แรงต้านที่มากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นแรงต้านในการขึ้นถนนชัน แรงต้านอากาศ แรงต้านการหมุนของล้อหรือยาง เราจะสามารถนำค่าแรงต้านทางไปหาแรงบิดที่ล้อรถได้ โดยให้ R สูงสุด (แรงต้านสูงสุด) = F_T (แรงบิดที่ล้อ)

โดย คำนวณหาจากสูตร

$$T_w = F_T \times r \quad (3)$$

เมื่อ T_w = แรงบิดการหมุนลื้อทั้งหมด (N)

r = รัศมีของลื้อ (m)

เมื่อเราได้แรงบิดการหมุนลื้อทั้งหมด (T_w) จะหาแรงบิดที่เฟืองหัวปลายชุดเกียร์ ที่ย่อนจากเฟืองท้าย เพลากลาง เข้าสู่ท้ายของชุดเกียร์ เข้าสู่อัตราทดเกียร์ในห้องเกียร์และออกสู่เฟืองปลายเกียร์

แรงบิดที่ปลายเกียร์เปรียบเหมือนกำลังหรือแรงบิดของเครื่องยนต์ที่จะใช้ในการขับเคลื่อน จะสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$T_e = \frac{T_w}{a_g \times a_r} \quad (4)$$

เมื่อ T_e = แรงบิดเครื่องยนต์ ที่เฟืองปลายเกียร์ (N)

T_w = แรงบิดการหมุนลื้อทั้งหมด (N)

a_g = อัตราทดในแต่ละเกียร์

a_r = อัตราทดเฟืองท้าย

เมื่อได้แรงบิดทั้งหมดของระบบส่งกำลัง จะนำค่าแรงบิดที่ได้มาคำนวณหา กำลังหรือกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ขับเคลื่อน จะสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$P_e = \frac{2\pi n}{60} \times T_e \quad (5)$$

เมื่อ P_e = กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน (W)

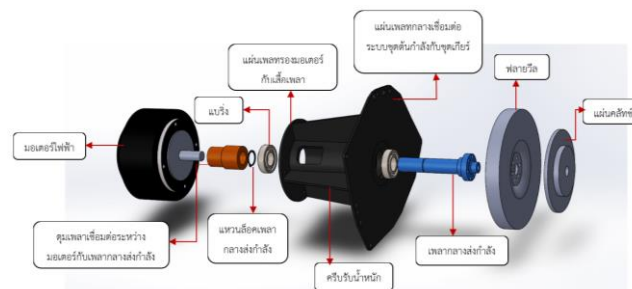
n = ความเร็วรอบ (rpm)

T_e = แรงบิดเครื่องยนต์ ที่เฟืองปลายเกียร์ (N)

3. การออกแบบอุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้า

เพื่อติดตั้งเข้ากับชุดคลัทช์ และชุดเกียร์ของรถดู้กิ้ง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายทอดแรงจากมอเตอร์ผ่านเพลาลงไปสู่ฟลายวีลกับชุดคลัทช์ โดยชุดเชื่อมต่อจะประกอบไปด้วย เพลาส่งกำลัง เลื้อเพลลา แผ่นเพลทของมอเตอร์กับเลื้อเพลลา แผ่นเพลทกลางเชื่อมต่อหัวเกียร์ และครีบริบน้ำหนัก ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2

การคำนวณหาขนาดเพลลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังนั้นมุมบิดของเพลลาที่เกิดขึ้นในขณะใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ นั่นคือเพลลาจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ในพิสัยที่ต้องการ ถ้ามุมบิดมากเกินไป นอกจากจะเสียความเที่ยงตรงทางด้านตำแหน่งแล้วยังอาจก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนมีผลให้เฟืองและแบริ่งที่รองรับเพลลาอยู่เกิดความเสียหายได้ง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 รายละเอียดชิ้นส่วนของชุดเชื่อมต่อต้นกำลัง

เพลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เป็นวัฏจักร ทั้งนี้เพราะเพลานอนอยู่ ตลอดเวลานอกจากนั้นแรงที่กระทำยังอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาได้ ดังนั้นจึงเกิดการเสียหายเนื่องมาจากความล้าเป็นส่วนใหญ่สำหรับวิธีการคำนวณของ ASME ใช้วิธีการสถิติศาสตร์ ดังนั้นจึงต้องมีตัวประกอบความล้า (Fatigue Factor) มาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพลาด้วยสมการที่ (6)

$$d^3 = \frac{16}{\pi \tau} ((C_t T)^2 + (C_m M)^2)^{1/2} \quad (6)$$

เมื่อ C_m ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัดเลือกที่ 3.0 กรณีแรงกระตุกอย่างแรง [4]

C_t ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิดเลือกที่ 3.0 กรณีแรงกระตุกอย่างแรง [4]

τ ความเค้นเฉือน

T โมเมนต์บิดของเพล

M โมเมนต์คดของเพล

หาค่า τ จากสูตร $\tau_d = 0.3 \sigma_y$ [4]

$\sigma_y = 63$ Ksi (Yield Strength) หาได้จากตารางคุณสมบัติของเหล็ก AISI 4140 HRA [4]

4. ขั้นตอนการทดลอง

- ทดสอบเปรียบเทียบการใช้งานรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใน 2 กรณี

- กรณีแรกใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังร่วมกับเกียร์รถเดิมโดยเริ่มต้นด้วยเกียร์ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ ทดสอบการขับที่แบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 800 kg. ใน 2 สภาวะการขับ คือ ขับในเมืองและขับที่ทางไกลนอกเมือง พิจารณาด้านสมรรถนะการขับ ในแง่ของ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด

- กรณีที่สองไม่ใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อและเกียร์รถโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเชื่อมต่อตรงเข้าที่เฟืองท้าย ทดสอบการขับที่แบบไม่มีน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักบรรทุกสูงสุด 800 kg. ใน 2 สภาวะการขับ คือ ขับในเมืองและขับที่ทางไกลนอกเมือง พิจารณาด้านสมรรถนะการขับ ในแง่ของ อัตราเร่ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน น้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการขึ้นทางชัน ความเร็วสูงสุด

ผลการศึกษา และอภิปรายผล



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อต้นกำลังเข้ากับตัวรถตุ๊กตุ๊กจริงที่นำเครื่องยนต้ออกแล้ว



รูปที่ 4 การติดอุปกรณ์เชื่อมต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าต้นกำลังกับชุดเกียร์ และการติดตั้งเข้ากับตัวรถ

1. ผลการคำนวณการหาขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊ก

จากการคำนวณหาแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของรถ ได้คำนวณหาจากแรงต้านทานต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ได้แก่ แรงต้านทานอากาศ แรงต้านทานการหมุนของล้อหรือยาง แรงต้านทานเนื่องจากการเร่ง และแรงต้านทานจากการขึ้นถนนขึ้นได้แรงต้านทานที่มีผลกระทบต่อรถทั้งหมดเท่ากับ $R_{รวม} = 2880 \text{ N}$ แรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนเพื่อให้ขับเคลื่อนขึ้นอยู่กับแรงขับเคลื่อน (โดยให้แรงขับเคลื่อนเท่ากับแรงต้านทานทั้งหมดของรถ) และรัศมีของล้อขับเคลื่อน ซึ่งคำนวณหาแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนได้เท่ากับ $T_w = 720 \text{ N.m}$ แรงบิดที่ปลายเกียร์เปรียบเหมือนกำลังหรือแรงบิดของเครื่องยนต์ที่จะใช้ในการขับเคลื่อน โดยจากแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนผ่านอัตราทดเฟืองท้าย และผ่านอัตราทดเกียร์ที่มีอัตราทดสูงสุด คำนวณหาแรงบิดเครื่องยนต์ (ที่เฟืองปลายเกียร์) ได้เท่ากับ $T_e = 26.6 \text{ N.m}$

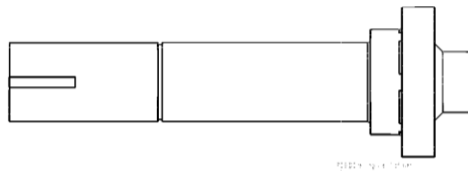
ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

รายการคำนวณ	สัญลักษณ์	ผลการคำนวณ
1. แรงต้านทานจากอากาศ (N)	R_a	17.8
2. แรงต้านทานจากการหมุนของยาง (N)	R_r	203.7
3. แรงต้านทานจากน้ำหนักรถขณะขึ้นถนนขึ้น (N)	R_g	2200
4. แรงต้านทานเกิดจากแรงเฉื่อยของรถยนต์เมื่อเร่งเครื่อง	R_f	458.3
5. แรงต้านทั้งหมด (N)	R	2880 N
6. แรงบิดการหมุนล้อทั้งหมด (N)	T_w	720 N.m
7. แรงบิดเครื่องยนต์ ที่เฟืองปลายเกียร์ (N)	T_e	26.6 N.m
8. กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน (W)	P_e	9.14 kW
9. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพลาลูกเบี้ยว	d	10 mm.
10. ขนาดมอเตอร์ที่เลือก BLDC 72 V	P_m	10 kW

มอเตอร์ประเภท BLDC ความเร็วรอบที่แรงบิดสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 4000 rpm ฉะนั้นจะได้กำลังงานทั้งหมด และจะสามารถใช้กำลังเทียบเพื่อหาขนาดมอเตอร์ที่จะใช้ให้รถเคลื่อนที่ การคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน (หรือกำลังที่จะใช้เลือกมอเตอร์) ได้เท่ากับ $P_e = 9.14 \text{ kW}$ หรือมอเตอร์ขนาด 10 kW (ในกรณีที่ให้แรงบิดมอเตอร์สูงสุด 100%) ทั้งนี้เนื่องจากในการที่จะทำให้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนรถได้ โดยที่ใช้ความเร็วรอบของมอเตอร์สูงสุดที่ Max Torque เท่ากับ 4000 rpm ในมอเตอร์ประเภท BLDC แต่ในความเป็นจริงเนื่องจากการขับเคลื่อนไม่ใช่จะ

ใช้แรงบิดสูงสุดตลอดเวลา มีการเร่งและการผ่อน และมีการวิ่งทางราบและขึ้นทางชันเป็นครั้งคราวตามสภาพจริงในการขับขี่ จึงคิดความเร็วรอบในการขับขี่ที่ 50% ของความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์ที่ 2000 rpm เพื่อป้องกันการทำงานหนักของมอเตอร์ ดังนั้นกำลังสูงสุดที่ทำให้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนรถได้ในสภาพจริงของการขับขึ้นเนินเท่ากับ 10 kW หรือใช้มอเตอร์ขนาด 10 kW (ในกรณีที่ใช้แรงบิดมอเตอร์ 50%) โดยเลือกใช้มอเตอร์เป็นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเท่ากับมอเตอร์ประเภท BLDC ขนาด 10 kW

ขนาดของเพลากลางส่งกำลัง ที่ใช้รับกำลังเพื่อให้รถขับเคลื่อน จากที่ได้คำนวณหา กำลังสูงสุดที่จะทำให้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนได้นั้น $P_e = 10\text{ kW}$ หรืออ้างอิงในมอเตอร์ 10 kW เท่ากับ 10 mm เราจะเลือกเพลากลางส่งกำลังที่มีขนาดโตกว่าที่คำนวณได้ 2 เท่า เลือกที่ 30 mm เพื่อรองรับมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน



รูปที่ 5 เพลาส่งกำลังที่ใช้ในชุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 2 การทดสอบการขับขึ้นระยะทาง 200 เมตร

หัวข้อทดสอบ	ภาระ No load		ภาระ Full load	
	อัตราทดเกียร์	อัตราทดเดียว	อัตราทดเกียร์	อัตราทดเดียว
1.เวลาวิ่งทั้งหมด (วินาที)	27.18	28.65	27.85	38.47
2.ความเร็วสูงสุด (km/hr)	26.5	25.9	25.13	18.47
3.ความสามารถขึ้นทางชัน (องศา)	-	-	16	5
4.น้ำหนักบรรทุกสูงสุด(kg)	-	-	1125	750

จากตารางที่ 2 การทดสอบความเร็วในทางราบ กำหนดระยะทาง 200 m โดยการทดสอบแบบกรณี No Load กำหนดน้ำหนักบรรทุกคนขับ รวม 875 kg และแบบกรณี Full Load กำหนดน้ำหนักบรรทุกคนขับจำนวน 5 คน รวม 1175 kg โดยการขับขึ้นอัตราทดเกียร์ปกติเริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1-5 และอัตราทดเกียร์ 3 กับ 4 ทำการขับเพียงอัตราทดเดียว แสดงรูปที่ 4.9 ความเร็วที่ได้จากการทดสอบทางราบ ในการทดสอบน้ำหนักกรณี No Load การขับขึ้นอัตราทดเกียร์ปกติทำความเร็วได้มากที่สุดที่ 26.50 km/hr อัตราทดเกียร์ 3 ทำความเร็วได้ที่ 25.80 km/hr และอัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วได้น้อยที่สุดที่ 25.13 km/hr เนื่องจากอัตราทดเกียร์ปกติใช้เวลาในการออกตัวรถจากหยุดนิ่งทำเวลาได้ดีกว่าอัตราทดเกียร์ 3 และ 4 เพราะการใช้อัตราทดเกียร์ปกติจะเริ่มต้นออกตัวจากเกียร์ 1 เป็นเกียร์ที่ใช้ในการออกตัวรถในทุกกรณีได้ดีและต่อเข้ากับอัตราทดเกียร์ถัดไป 2-3-4-5 ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้ความเร็วช่วงต้นและช่วงปลายทำได้ดีกว่าการขับเพียงแค่อัตราทดเดียว ซึ่งอัตราทดเกียร์ 3 และ 4 ทำความเร็วได้ดีแค่ช่วงปลาย ในการทดสอบน้ำหนักกรณี Full Load การขับขึ้นอัตราทดเกียร์ปกติทำความเร็วได้มากที่สุดที่ 25.90 km/hr อัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วได้ที่ 18.47 km/hr และอัตราทดเกียร์ 3 ทำความเร็วได้น้อยที่สุดที่ 15.30 km/hr จากอัตราทดเกียร์ 3 ที่ทำความเร็วได้น้อยที่สุด เพราะอัตราทดเกียร์ 3 ทำความเร็วช่วงต้นที่ระยะทาง 50 m แรกได้ดี แต่ในช่วงระยะทางจาก 50 – 200 m ในช่วงปลายทำความเร็วได้ช้ากว่าอัตราทดเกียร์ 4 ที่ทำความเร็วได้ดีในช่วง 50 – 200 m อย่างไรก็ตามในการกรณี Full Load ก็ควรใช้การขับอัตราทดปกติซึ่งสามารถทำความเร็วทั้งช่วงต้นและช่วงปลายได้ดี เมื่อ

เปรียบเทียบการขับขี่ในทางราบทั้งขนาด Full Load และ No Load ในการขับขี่อัตราทดปกติทำความเร็วได้ใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 3 การทดสอบความเร็วในการขับขี่ระยะทาง 5 km

เกียร์	สภาวะการขับขี่	ภาระโหลด	เวลา (min)	ความเร็วเฉลี่ย (km/hr)	ความสิ้นเปลือง (W/hr)
ปกติ	ในเมือง	Full Load	12.25	24.49	1284
	นอกเมือง		7.03	42.67	1104
เกียร์ 3	ในเมือง	Full Load	13.14	22.80	1143
	นอกเมือง		9.25	32.46	628
เกียร์ 4	ในเมือง	Full Load	13.52	22.19	1616
	นอกเมือง		7.01	42.80	846

จากตาราง 3 ทดสอบการขับขี่ระยะทาง 5 km กำหนดสภาวะแวดล้อมการขับขี่ในเมืองและนอกเมือง มีทางโค้ง,ทางตรง,ลูกระนาด,สัญญาณไฟจราจร,หลุมบ่อ และสภาวะการขับขี่ในการใช้อัตราทดเกียร์ปกติ โดยการขับขี่อัตราทดเกียร์ปกติเริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1-5 และอัตราทดเกียร์ 3 กับ 4 ทำการขับเพียงอัตราทดเดียว โดยการทดสอบจะใช้แบบกรณีน้ำหนัก Full Load การทดสอบความเร็วในการขับขี่ระยะทาง 5 km ในเมือง การขับขี่ในอัตราทดเกียร์ปกติทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดที่ 24.49 km/hr อัตราทดเกียร์ 3 ทำความเร็วเฉลี่ยได้ที่ 22.80 km/hr และอัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วเฉลี่ยได้น้อยที่สุดที่ 22.19 km/hr

เนื่องจากการขับขี่ในอัตราทดปกติทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุด เพราะการขับขี่ในสภาวะแวดล้อมในเมืองซึ่งมีลูกระนาด หลุมบ่อ และการติดสัญญาณไฟจราจรค่อนข้างมาก อีกทั้งรถที่ใช้ในการสัญจรก็มากขึ้น การขับขี่ในอัตราทดปกติได้ทำการเปรียบเทียบโดยใช้เวลาออกตัวรถจากหยุดนิ่งได้ทำให้ไม่เสียเวลาในการทำความเร็วในการขับขี่จึงทำให้ทำความเร็วเฉลี่ยได้ดีกว่าการขับขี่แบบการขับเพียงอัตราทดเดียวในอัตราทดเกียร์ 3 และอัตราทดเกียร์ 4 ในสภาวะการขับขี่นอกเมือง ในการขับขี่อัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดที่ 42.80 km/hr การขับขี่ในอัตราทดปกติทำความเร็วเฉลี่ยได้ที่ 42.67 km/hr และการขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 3 ทำความเร็วเฉลี่ยได้น้อยที่สุดที่ 32.46 km/hr เนื่องจากการขับขี่ในสภาวะแวดล้อมนอกเมืองย่านชนบททำความเร็วเฉลี่ยได้ดี เพราะถนนไม่ได้มีลูกระนาด สัญญาณไฟจราจรมากนัก ถนนเป็นเส้นทางยาววกกับทางโค้ง การขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 4 และอัตราทดปกติจึงทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดส่วนการขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 3 ที่ทำความเร็วเฉลี่ยได้น้อยที่สุดเป็นเพราะอัตราทดเกียร์ 3 ทำแรงบิดเริ่มต้นจากการออกตัวได้ดีแต่ทำความเร็วในช่วงปลายได้ไม่ดี ความสิ้นเปลืองพลังงานในสภาวะแวดล้อมการขับขี่ในเมืองระยะทาง 5 km การขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 3 ใช้พลังงานน้อยที่สุดที่ 1143 W/hr อัตราทดเกียร์ปกติใช้พลังงาน 1284 W/hr และอัตราทดเกียร์ 4 ใช้พลังงานไปมากที่สุดที่ 1616 W/hr เนื่องจากการขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 3 ที่ใช้พลังงานไปน้อยที่สุดเพราะทำความเร็วในช่วงต้นการออกตัวได้ดีใช้แรงบิดมอเตอร์ไม่มาก เหมาะสำหรับการขับขี่ในระยะสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราทดเกียร์ 4 ใช้แรงบิดมอเตอร์มากในการออกตัวจึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก

ในการขับขี่สภาวะแวดล้อมนอกเมืองการขับขี่ในอัตราทดเกียร์ 3 ใช้พลังงานน้อยที่สุดที่ 628 W/hr อัตราทดเกียร์ 4 ใช้พลังงานที่ 846 W/hr และอัตราทดเกียร์ปกติใช้พลังงานไปมากที่สุดที่ 1104 W/hr อัตราทดเกียร์ 3 ใช้พลังงานไป

น้อยที่สุดเพราะการออกตัวรถจากหยุดนิ่งทำได้ค่อนข้างดีทำให้ไม่เสียพลังงานแรงบิดมอเตอร์มาก แต่ทำความเร็วเฉลี่ยในช่วงปลายได้ไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับรถขับที่ในอัตราทดเกียร์ 4 ใช้พลังงานที่สูญเสียจากแรงบิดของมอเตอร์ไปมากกว่าแต่สามารถทำความเร็วเฉลี่ยช่วงปลายได้ค่อนข้างดี

ตารางที่ 4 การทดสอบวิ่งทางชัน

เกียร์	ภาระโหลด	เวลา (s)	ระยะทาง (m)	มุมที่ได้ (θ)
ปกติ	Full Load	15	40	16
เกียร์ 3	Full Load	13	16.2	5

จากตารางที่ 4 การทดสอบวิ่งทางชัน ในการใช้อัตราทดเกียร์ปกติ โดยการขับที่อัตราทดเกียร์ปกติเริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1-5 และอัตราทดเกียร์ 3 กับ 4 ทำการขับเพียงอัตราทดเดียว โดยการทดสอบจะใช้แบบกรณีน้ำหนัก Full Load อัตราทดเกียร์ปกติใช้เวลาที่ได้ 15 s ระยะทาง 40 m มุมที่ได้ 16 องศา อัตราทดเกียร์ 3 เวลาที่ได้ 13 s ระยะทาง 16.2 m มุมที่ได้ 5 องศา และอัตราทดเกียร์ 4 ที่ไม่สามารถวิ่งไต่ขึ้นทางชันได้ เนื่องจากอัตราทดปกติใช้เกียร์เริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1 ซึ่งเป็นอัตราทดเกียร์ต่ำที่ใช้ในการเริ่มต้นออกตัวหรือไต่ขึ้นทางชันได้ดีกว่าในการขับเพียงอัตราทดเดียวคือเกียร์ 3 และเกียร์ 4 ทำให้มีแรงบิดในขึ้นทางชันได้ดีกว่า

ตารางที่ 5 การทดสอบระยะทางต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

ภาระโหลด	ระยะทาง	เวลา	ความสิ้นเปลือง	ความเร็วสูงสุด	แรงดันแบตเตอรี่
	(km)	(min)	(W/h)	(km/h)	(V)
Full Load	20	57.28	5733	40	66.6

จากตาราง 5 การทดสอบระยะทางต่อการประจุแบตเตอรี่ กำหนดกระแสไฟเริ่มต้น 78.3 V กำหนดอัตราทดเกียร์ปกติเริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1-5 ใช้แบบกรณีน้ำหนัก Full Load สามารถวิ่งได้ระยะทาง 20 km ในเวลา 57.28 min ความเร็วสูงสุดที่ได้ 40 km/hr ความสิ้นเปลืองในการขับ 5733 W/hr แรงดันแบตเตอรี่ที่เหลือ 66.6 V

ตารางที่ 6 การทดสอบน้ำหนักภาระโหลดสูงสุด

สภาวะการขับ	อัตราทด	ระยะทาง	เวลา (min)	ความเร็วสูงสุด	ความสิ้นเปลือง	น้ำหนักสูงสุด
		(km)		(km/hr)	(W/hr)	(kg)
	ปกติ	1	1.43	42	278	1125
Full Load	เกียร์ 3	1	1.59	29	162	975
	เกียร์ 4	1	1.40	42	279	750

จากตาราง 6 การทดสอบน้ำหนักภาระโหลดสูงสุดและแสดงความเร็วสูงสุดดังรูปที่ 4.12 กำหนดอัตราทดเกียร์ปกติเริ่มต้นตั้งแต่เกียร์ 1-5 กำหนดภาระโหลดสูงสุดที่ 15 คนรวมคนขับรวมเท่ากับ 1125 kg รวมกับน้ำหนักรถ 875 kg เท่ากับ 2000 kg ที่ระยะทาง 1 km เวลาที่ได้ 1.43 min ความเร็วสูงสุดที่ได้ 42 km/hr ความสิ้นเปลืองในภาระโหลดสูงสุดได้ 278 W/hr อัตราทดเกียร์ 3 ขับเพียงอัตราทดเดียว กำหนดภาระโหลดสูงสุดที่ 13 คนรวม

คนขับรวมเท่ากับ 975 kg รวมกับน้ำหนักรถ 875 kg เท่ากับ 1850 kg ที่ระยะทาง 1 km เวลาที่ทำได้ 1.59 min ความเร็วสูงสุดที่ทำได้ 29 km/hr ความสิ้นเปลืองในภาระโหลดสูงสุดได้ 162 W/hr อัตราทดเกียร์ 4 ขับเพียงอัตราทดเดียว กำหนดภาระโหลดสูงสุดที่ 10 คนรวมคนขับรวมเท่ากับ 750 kg รวมกับน้ำหนักรถ 875 kg เท่ากับ 1625 kg ที่ระยะทาง 1 km เวลาที่ทำได้ 1.40 min ความเร็วสูงสุดที่ทำได้ 42 km/hr ความสิ้นเปลืองในภาระโหลดสูงสุดได้ 279 W/hr เนื่องจากการขับขึ้นในอัตราทดปกติและการขับขึ้นอัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วสูงสุดได้เท่ากัน แต่อัตราทดเกียร์ปกติสามารถรับภาระโหลดสูงสุดได้มากกว่าอัตราทดเกียร์ 4 เพราะการขับขึ้นในอัตราทดปกติสามารถออกตัวรถจากหยุดนิ่งได้ดีกว่าอัตราทดเกียร์ 4

สรุป

เมื่อนำมาติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้ากับชุดเกียร์และนำเอาเข้าประกอบกับรถตุ๊กตุ๊กเมื่อนำไปทดสอบวิ่งจริงในสภาวะต่างๆพบว่ารถสามารถออกตัวได้ดีกว่ารถตุ๊กตุ๊กที่ใช้ระบบขับเคลื่อนที่เพลาลงเนื่องจากใช้อัตราทดเกียร์ได้ครบทุกเกียร์ตั้งแต่ เกียร์ 1 – เกียร์ 4 ในการทดสอบความเร็วในการขับขึ้นระยะทาง 30 km ในสภาวะการขับขึ้นในเมืองซึ่งจะเหมาะสมกับการใช้อัตราทดเกียร์ปกติ ซึ่งทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดเท่ากับ 25 km/hr ส่วนในสภาวะการขับขึ้นนอกเมือง อัตราทดเกียร์ 4 ทำความเร็วเฉลี่ยได้มากที่สุดเท่ากับ 50 km/hr สำหรับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทั้งสภาวะแวดล้อมการขับขึ้นในเมืองและนอกเมือง สิ้นเปลืองพลังงานน้อยที่สุดเท่ากับ 228 Wh/km ซึ่งน้อยกว่ากรณีขับขึ้นแบบใช้อัตราทดเดียวชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าติดตั้งที่เพลาลงจะมีความสิ้นเปลืองพลังงานอยู่ที่ 325 Wh/km เพราะการออกตัวรถจากหยุดนิ่งทำได้ดีกว่าทำให้ไม่เสียพลังงานแรงบิดมอเตอร์มาก การทดสอบวิ่งทางขึ้นพบว่าการวิ่งโดยใช้อัตราทดเกียร์ปกติเหมาะสมกับการไต่ขึ้นทางชันโดยมุมที่ทำได้ 16 องศา การทดสอบน้ำหนักภาระโหลดสูงสุด เหมาะสมกับการขับขึ้นในอัตราทดปกติ ซึ่งสามารถรับภาระโหลดสูงสุดได้เท่ากับ 1125 kg ออกตัวได้ดีทำความเร็วสูงสุดได้เท่ากับ 45 km/hr เหมาะสมกับรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้ขับขึ้นในเมืองและบางครั้งอาจต้องรองรับน้ำหนักบรรทุกจากสัมภาระสิ่งของ

จากข้อมูลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าข้อได้เปรียบของอุปกรณ์เชื่อมต่อที่จะนำมาดัดแปลงเข้ากับรถตุ๊กตุ๊กเก่าแบบเครื่องยนต์ให้เปลี่ยนมาใช้เป็นรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ในแง่ของสมรรถนะการออกตัวได้ดี ความสิ้นเปลืองพลังงานน้อย และงบประมาณที่ทำให้ราคาถูกลงโดยประมาณ 60 % ซึ่งคณะผู้วิจัยคาดว่าจะถ้านำอุปกรณ์เชื่อมดังกล่าวต่อไปขยายผลโดยนำไปผลิตใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์จะสามารถเพิ่มโอกาสในทางการตลาดให้บริษัทรถไฟฟ้าเชียงใหม่จำกัด เพิ่มยอดขายจากกลุ่มลูกค้ารถตุ๊กตุ๊กเครื่องยนต์ได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] อังศรี ศรีภาคาร (2554). ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทางานและการออกแบบ, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] พนตรี สุขสิงห์, วันชัย ทรัพย์สิงห์ (2554). การออกแบบและสร้างระบบควบคุมรถไฟฟ้าแบบไร้คนขับขนาดเล็ก, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, จังหวัดภูเก็ต
- [3] ไชยวัฒน์ พึ่งผล, ธนวิทย์ ชราปรี (2549). การออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตรถสามล้อเครื่องนักศึกษา บริษัท ธาตไทย 2003 จำกัด ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

- [4] Brendan. J. Waterman (2011). Design and Construction of a Space-frame Chassis, University of Western Australia.
- [5] ชุมพล ศฤงคารศิริ (2545). การวางแผนและควบคุมการผลิต, กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี
- [6] วิรุณ โมนะตระกูล, วสันต์ เขียวสุวรรณและปรีดถกร เหมะรัตน์ (2557). การออกแบบรถสามล้อไฟฟ้าเอนกประสงค์ต้นแบบ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2557 ขอนแก่น.
- [7] ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล และสุนันต์ ชั่วมกระทุม (2562), รถสามล้อเอนกประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์, Thai Journal of Science and Technology, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน 2562.