

การจำลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวัฏจักรขับทดสอบของ WLTP Simulation Comparison of the Energy Consumption of Electric Vehicles via the WLTP Driving Cycle

บรรณณัติ บริบูรณ์* ณัฐพงศ์ บุตรธนู นพรัตน์ ธรรมวงษา ไพบุลย์ บุปผา และ นิวัตร ภูมิพันธ์
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
Banyat Boribun* Nuttapong Bootthanu Nopparat Thammawongsa Phaiboon Bouppha
and Niwat Bhumiphan
Department of Smart Electronics and Electric Vehicles, Faculty of Technology, Udon Thani
Rajabhat University

(Received: May 31, 2022; Revised: September 19, 2022; Accepted: October 13, 2022)

*ผู้ประสานงาน : บรรณณัติ บริบูรณ์ อีเมล : banyat.bo@udru.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า 3 รุ่น อัตราเร็วที่ใช้จำลองพลวัตสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นข้อมูลของวัฏจักรขับทดสอบตามขั้นตอนของ (World harmonized light-duty vehicles test procedure, WLTP) Class 3 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบแซสซีไดนาโมมิเตอร์ เพื่อคำนวณหาการปล่อยไอเสียและการบริโภคเชื้อเพลิงของยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก พารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของยานยนต์ไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาในแบบจำลองคือความกว้าง/ความสูง น้ำหนักรวม ความจุและแรงดันขั้วบวกของแบตเตอรี่ เมื่อพิจารณาผลการจำลองของพลังงานที่ใช้ขณะขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 3 รุ่นด้วยระยะเวลา 1,800 s พบว่ามีค่าแตกต่างกัน ยานยนต์ไฟฟ้าที่มีน้ำหนักรวมและแรงดันขั้วแบตเตอรี่มากกว่าจะใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมากกว่า ข้อมูลสำคัญดังกล่าวนี้ผู้บริโภคสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเปรียบเทียบสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกระบุโดยผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 3 รุ่นได้

คำสำคัญ: การจำลองยานยนต์ไฟฟ้า, พลังงานยานยนต์ไฟฟ้า, การจำลองพลวัตยานยนต์ไฟฟ้า

ABSTRACT

This paper presents the comparison of simulation in term of the energy consumption of three electric vehicle (EV) models. The speeds for electric vehicles' dynamic modeling are the data of the test drive cycle according to the WLTP procedure. This is the chassis dynamometer test for the determination of emissions and fuel consumption from light-duty vehicles. The different parameters of electric vehicles are considered in the type of batteries, efficiency of electric drive circuits and motors, and the temperature of the atmosphere around the vehicle. When considering the simulation results of the energy consumption while driving of the three electric vehicles, it was found that they were different. The EVs with higher gross weight and battery terminal voltage will also consume more electric power for propulsion. This important information can be used by consumers to compare the performance of electric vehicles specified by the manufacturers of the three electric vehicle models.

Keywords: EV simulation, EV energy usage, EV dynamic modeling

1. บทนำ

ยานยนต์ไฟฟ้าคือยานยนต์สำหรับโลกอนาคตเพราะไม่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน อีกทั้งแหล่งพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันก็มีทางเลือกและความหลากหลายมากขึ้น เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น ดังนั้นหลายประเทศจึงกำหนดนโยบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์เผาไหม้ภายในไปเป็นยานยนต์ไฟฟ้าภายในช่วงเวลาชัดเจน ปัญหาสำคัญที่ผู้บริโภคยังไม่มั่นใจในสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าคือระยะทางทั้งหมดที่ยานยนต์ขับเคลื่อนได้ต่อการอัดประจุหนึ่งครั้ง ดังนั้นสมรรถนะดังกล่าวนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเลือกซื้อยานยนต์ไฟฟ้า

พลังงานที่ยานยนต์ไฟฟ้าใช้ขณะขับเคลื่อนเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนั้นบทความของงานวิจัยในอดีตจึงมีการนำเสนอผลการวิเคราะห์และสรุปผลเกี่ยวกับแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์หาพลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าไว้อย่างหลากหลาย บทความของงานวิจัย [1] ระบุว่าการใช้พลังงานการควบคุมอัตราเร็วของเรือไฟฟ้ามีผลต่อการใช้พลังงาน ดังนั้นการควบคุมอัตราเร็วของเรือไฟฟ้าจึงมีผลต่อการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ งานวิจัยของ [2, 3] นำเสนอการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับประสบการณ์ของคนขับที่ คนขับที่มีประสบการณ์มากกว่าสามารถประหยัด

พลังงานได้มากกว่าคนขับที่มีประสบการณ์น้อยกว่า งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์และแสดงผลพลังงานขณะยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนที่นำเสนอโดย [4] เป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองและขั้นตอนวิธีของการหาค่าพลังงาน ซึ่งผลการวิจัยดังกล่าวนี้ยังมีความสอดคล้องกับบทความวิจัยของ [5] สำหรับงานวิจัยที่นำเสนอโดย [6] มีการพิจารณาเส้นทางการเดินทางและข้อมูลของการอัดประจุ งานวิจัยของ [7] นำเสนอการประยุกต์ใช้ข้อมูลจาก OpenStreetMap และ Shuttle Radar Topography Mission เป็นการคำนวณพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นการขับเคลื่อนจริง มีการพิจารณาอัตราเร็วลม อุณหภูมิ และความลาดชันของพื้นถนน สำหรับการวิเคราะห์หาพลังงานในกรณีขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าบนเส้นทางในตัวเมืองและทางด่วน มีการศึกษาและนำเสนอโดย [8, 9] บทความงานวิจัยของ [10] คำนวณประสิทธิภาพการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากลักษณะนิสัยเฉพาะของคนขับเหมือน [11, 12] แต่มีการพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบของอัตราเร็วการขับ เงื่อนไขของสภาพจราจร และสภาพของพื้นผิวถนน

บทความของงานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า 3 รุ่น คือ MG ZS EV, Nissan Leaf, และ Tesla Model 3 Standard Range อัตราเร็วที่ใช้จำลองพลวัตและคำนวณหาพลังงานที่ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นข้อมูลของวัฏจักรขับทดสอบตามขั้นตอนของ WLTP (world harmonized light-duty vehicles test procedure) ผลการจำลองที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลสำคัญที่ผู้บริโภคนำไปเปรียบเทียบสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าที่ถูกระบุโดยผู้ผลิตเพื่อประกอบการตัดสินใจในการซื้อยานยนต์ไฟฟ้าได้

2. แบบจำลองยานยนต์ไฟฟ้า

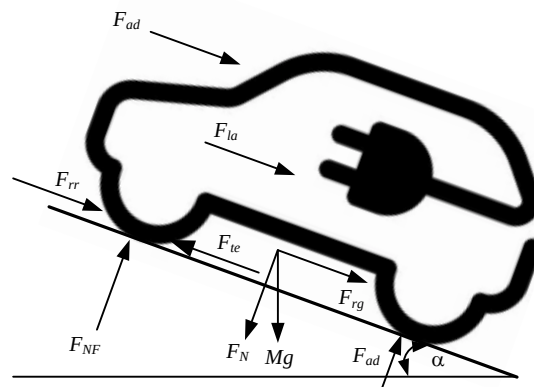
แบบจำลองยานยนต์ไฟฟ้าประกอบไปด้วยรายละเอียดของแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ยานยนต์ไฟฟ้าบนถนนที่มีพื้นผิวเอียง และแบบจำลองมอเตอร์และระบบขับเคลื่อน แบบจำลองดังกล่าวนี้ใช้ข้อมูลของไฟฟ้า 3 รุ่น และอ้างอิงกับวัฏจักรขับทดสอบตามขั้นตอนของ WLTP แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แบบจำลองยานยนต์ไฟฟ้า

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองพลวัตของการเคลื่อนที่ของยานยนต์ไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 1 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

M	คือ	มวลรวบยอดของยานยนต์ไฟฟ้า (kg)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของยานยนต์ไฟฟ้า (m^2)
α	คือ	มุมของพื้นผิวถนนเมื่ออ้างอิงกับแนวระนาบ (องศา)
s	คือ	ระยะทางรวมที่ยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งได้ (km)

v	คือ	อัตราเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า (km/s)
a	คือ	อัตราเร่งของยานยนต์ไฟฟ้า (km/s ²)
μ_{rr}	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนของล้อ
ρ	คือ	ความหนาแน่นอากาศ (kg/m ³)
C_d	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ
G	คือ	อัตราทดเฟืองของการเชื่อมต่omotorกับล้อยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 1 แผนภาพวัตถุอิสระของแรงกระทำต่อยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่

แรงที่กระทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าคือแรงขับเคลื่อนที่ (F_t) ต้องมีค่ามากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบไปด้วยแรงต้านอากาศพลศาสตร์ (F_{ad}) แรงต้านการไต่ชัน (F_{hc}) แรงต้านการหมุนของล้อ (F_{rr}) แรงต้านอากาศพลศาสตร์ (F_{ad}) แรงที่ใช้เร่งเครื่องยานยนต์แบบเชิงเส้น (F_{la}) และแรงที่ใช้เร่งเครื่องยานยนต์แบบเชิงมุม ($F_{\omega a}$) แบบจำลองสมการของแรงที่กระทำกับยานยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [3]

สมการคำนวณแรงต้านการหมุนของล้อ (F_{rr}):

$$F_{rr} = \mu_{rr} Mg \cos(\alpha) \quad (1)$$

สมการคำนวณแรงต้านอากาศพลศาสตร์ (F_{ad}):

$$F_{rr} = \mu_{rr} Mg \cos(\alpha) \quad F_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (2)$$

สมการคำนวณแรงต้านการไถ่ซัน (F_{hc}):

$$F_{hc} = Mg \sin(\alpha) \quad (3)$$

สมการคำนวณแรงต้านการหมุนกลิ้งของล้อ (F_{rr}):

$$F_{rr} = \mu_{rr} Mg \cos(\alpha) \quad (4)$$

สมการคำนวณแรงต้านอากาศพลศาสตร์ (F_{ad}):

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (5)$$

สมการคำนวณแรงต้านการไถ่ซัน (F_{hc}):

$$F_{hc} = Mg \sin(\alpha) \quad (6)$$

สมการคำนวณแรงที่ใช้เร่งเครื่องยนต์แบบเชิงเส้น (F_{la}):

$$F_{la} = Ma = M \frac{dv}{dt} = M \frac{d^2s}{dt^2} \quad (7)$$

สมการคำนวณแรงที่ใช้เร่งเครื่องยนต์แบบเชิงมุม ($F_{\omega a}$):

$$F_{\omega a} = \frac{IG^2 a}{\eta_g r^2} \quad (8)$$

สมการคำนวณแรงขับเคลื่อนที่ทำให้ยานยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (F_t) คือผลรวมของแรงทั้งหมดที่กล่าวถึงข้างต้น มีรายละเอียดของนิพจน์ดังนี้

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (9)$$

สมการผลต่างข้างหน้าและผลต่างย้อนหลังสำหรับคำนวณอัตราเร่งและระยะทางที่ยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ d โดยใช้อัตราเร็วจากวิถีการขับเคลื่อนคือ

$$a(t) = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$s(t) = v(t - \Delta t) + \frac{1}{2} a(t) t^2 \quad (11)$$

โดยที่ Δt คือค่าขั้นเวลาของการจำลอง

2.2 แบบจำลองมอเตอร์และระบบขับเคลื่อน

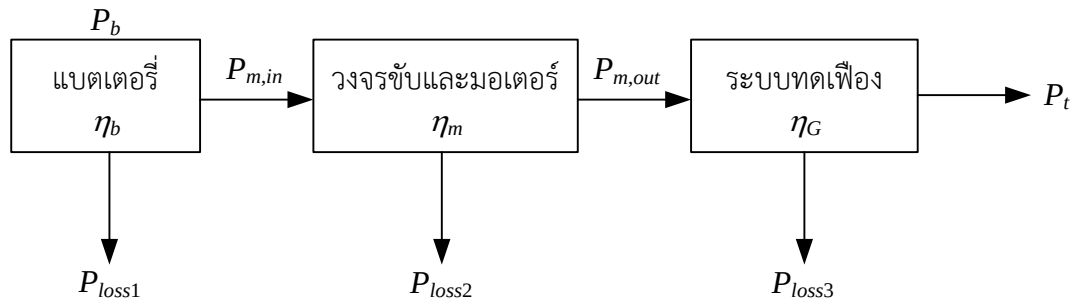
แผนภาพบล็อกของระบบขับเคลื่อนโดยทั่วของยานยนต์ไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2 กำลังที่แบตเตอรี่ (P_b) จ่ายออกไปประกอบไปด้วย กำลังอินพุตของวงจรขับเคลื่อนและมอเตอร์ ($P_{m,in}$) และกำลังสูญเสีย (P_{loss1}) กำหนดให้ η_G และ η_m คือประสิทธิภาพของระบบทดเฟืองและมอเตอร์ตามลำดับ P_t คือกำลังขับเคลื่อนให้ยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งด้วยอัตราเร็ว v กำลังเอาต์พุตที่มอเตอร์จ่ายให้ระบบทดเฟืองคือ $P_{m,out}$ สำหรับทุกช่วงเวลา Δt สามารถคำนวณกำลังในระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้ [13]

สมการคำนวณกำลังขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า (P_t):

$$P_t = F_t v \quad (12)$$

สมการคำนวณกำลังเอาต์พุตที่มอเตอร์จ่ายให้ระบบทดเฟือง ($P_{m,out}$):

$$P_{m,out} = \frac{P_t}{\eta_G} \quad (13)$$



รูปที่ 2 แผนภาพบล็อกระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า [6]

สมการคำนวณกำลังอินพุตของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ($P_{m,in}$):

$$P_{m,in} = \frac{P_{m,out}}{\eta_m} \quad (14)$$

สมการคำนวณกำลังที่แบตเตอรี่ (P_b) จ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

$$P_b = P_{m,in} + P_{loss1} \quad (15)$$

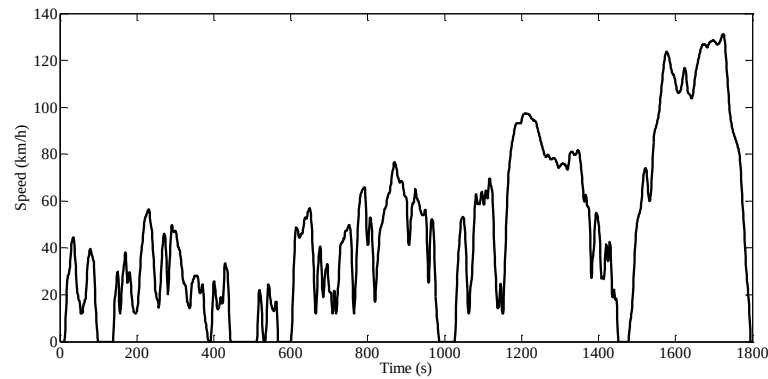
ค่าทั่วไปที่ใช้ในการจำลองพลวัตของการเคลื่อนที่ยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับประสิทธิภาพระบบทดเฟือง η_G คือ 95% [13] ส่วนค่าประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ η_m คือ 90% [14]

2.3 แบบจำลองตัวเหนี่ยวนำวัฏจักรขับเคลื่อนทดสอบ

วัฏจักรขับเคลื่อนทดสอบตามขั้นตอนของ WLTP ที่นำมาใช้เป็นข้อมูลของการจำลองคือ WLTC Class 3 มีอัตราเร็วอยู่ในช่วง 56.5 – 131.3 km/h เส้นโค้งอัตราเร็วและเวลาขณะขับเคลื่อนตามขั้นตอนนี้แสดงในรูปที่ 3 [11] ระดับของการขับเคลื่อนทดสอบจำแนกออกเป็น 4 ระดับดังนี้

- ระดับต่ำ อัตราเร็วไม่เกิน 56.5 km/h
- ระดับกลาง อัตราเร็วไม่เกิน 76.6 km/h
- ระดับสูง อัตราเร็วไม่เกิน 97.4 km/h
- ระดับสูงพิเศษ อัตราเร็วไม่เกิน 131.3 km/h

ข้อมูลของการขับเคลื่อนตามวัฏจักรขับเคลื่อนทดสอบตามขั้นตอนของ WLTP Class 3 มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3 เส้นโค้งอัตราเร็วและเวลาของวัฏจักรขับทดสอบ WLTC Class 3

2.4 ข้อมูลยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าที่นำมาจำลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้า 3 รุ่นคือ MG ZS EV, Nissan Leaf, และ Tesla Model 3 Standard Range มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 วัฏจักรขับทดสอบตามขั้นตอนของ WLTP Class 3

ข้อมูล	ระดับอัตราเร็ว			
	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงพิเศษ
ช่วงเวลา (s)	589	433	455	323
ช่วงเวลาการหยุดยานยนต์ (s)	150	49	31	8
ระยะทาง (m)	3095	4756	7162	8254
% ของการหยุดยานยนต์	26.50%	11.10%	6.80%	2.20%
อัตราเร็วสูงสุด (km/h)	56.5	76.6	97.4	131.3
อัตราเร็วเฉลี่ยและไม่มีการหยุดยานยนต์ (km/h)	25.3	44.5	60.7	94
อัตราเร็วเฉลี่ยและมีการหยุดยานยนต์ (km/h)	18.9	39.4	56.5	91.7
อัตราเร่งต่ำสุด (m/s^2)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.44
อัตราเร่งสูงสุด (m/s^2)	1.611	1.611	1.666	1.055

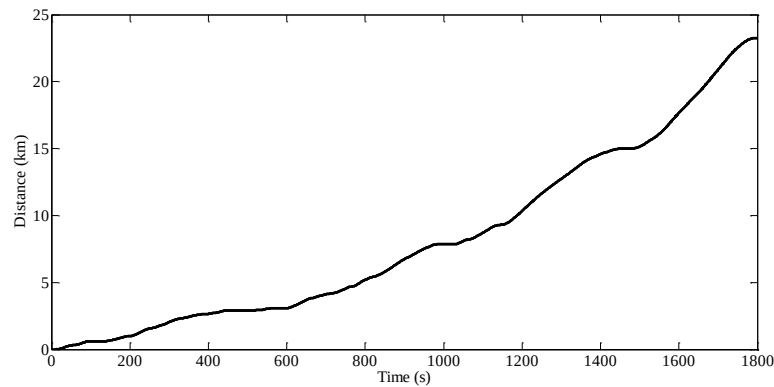
ตารางที่ 2 ข้อมูลยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับการจำลอง

รายการข้อมูล	MG ZS EV	Nissan Leaf	Tesla Model 3
ความกว้าง/ความสูง (m)	1.809/1.644	1.788/1.530	1.850/1.443
น้ำหนักรวมของรถ (kg)	1,966	1,995	2,126
ความจุแบตเตอรี่ (k·Wh)	44.5	40	50
แรงดันขั้วกระแสตรง (V)	400	360	350

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

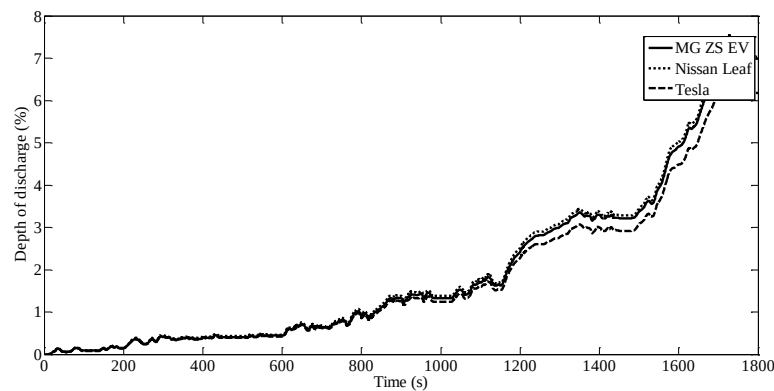
ยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 3 รุ่นถูกกำหนดให้ขับเคลื่อนตลอดเส้นทางเป็นระยะเวลา 1,800 s ด้วยรูปแบบการขับที่สอดคล้องกับวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐานแบบ WLTC Class 3 สมบัติทางกายภาพที่กำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 รุ่นคือ 0.005 ความหนาแน่นอากาศ (ρ) ที่อุณหภูมิ 40 °C เท่ากับ 1.127 kg/m³ สมบัติทางแรงต้านของลม (C_d) ในสภาวะดังกล่าวข้างต้น กำหนดให้มีค่าเท่ากันทั้ง 3 รุ่นเท่ากับ 0.36 เนื่องจากการจำลองกำหนดให้ยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งบนทางเรียบ ดังนั้นมุมเอียงของถนนจึงมีค่าเท่ากับ 0° ประสิทธิภาพระบบทดเฟืองและระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ กำหนดให้ยานยนต์ไฟฟ้าทั้ง 3 รุ่นมีค่าเท่ากับ 95% และ 90% ตามลำดับ

การพัฒนารหัสคำสั่งด้วยโปรแกรม GNU Octave กำหนดเวลารวมของการจำลองเท่ากับ 1,800 s ค่าขั้นเวลาของการจำลองคือ $\Delta t = 1$ s ดังนั้นผลการจำลองสำหรับแต่ละพารามิเตอร์จึงมีจำนวนทั้งสิ้น 2,001 ตัวอย่าง ผลการจำลองสำหรับช่วงเวลา $t = 0 - 1,800$ s แสดงใน Error! Reference source not found. -7 เส้นโค้งที่แสดงในรูปที่ 4 คือระยะทางสะสม 23.26 km ที่ยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งได้ทั้งหมด เส้นโค้งในรูปที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ความลึกการคายประจุของแบตเตอรี่ เส้นโค้งในรูปที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์สถานะประจุของแบตเตอรี่ และเส้นโค้งในรูปที่ 7 แสดงความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้แสดงในรูปที่ 6

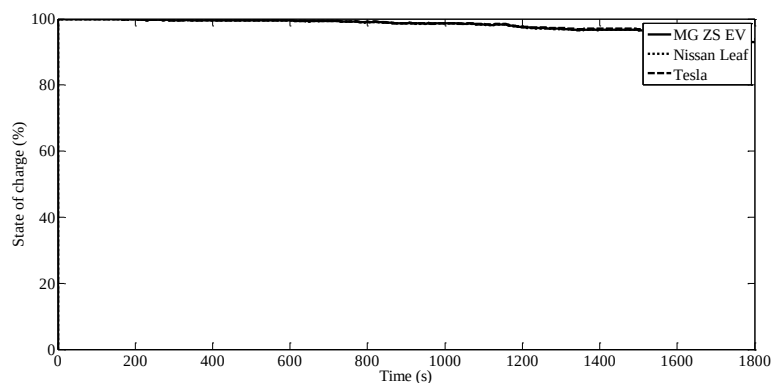


รูปที่ 4 ระยะทางสะสมที่ยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งได้ในเวลา 1,800 s

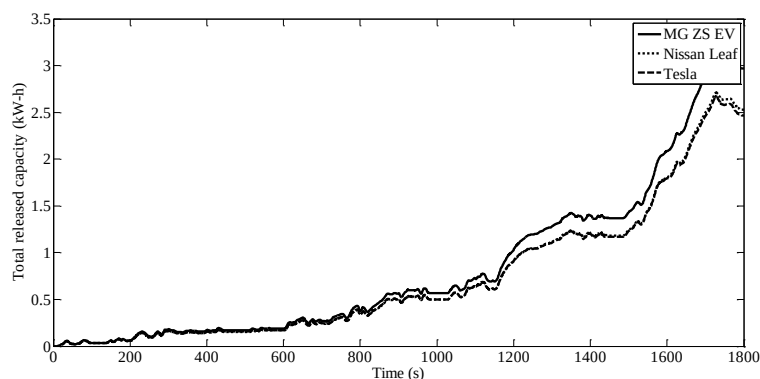
จากผลการจำลองสามารถอภิปรายผลลัพธ์ได้ดังนี้ เมื่อพิจารณาความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่ในรูปที่ 5 ยานยนต์ไฟฟ้า Tesla คายประจุน้อยกว่า MG ZS EV และ Nissan Leaf ดังนั้นเมื่อพิจารณาสถานะประจุของแบตเตอรี่สำหรับการขับเคลื่อน 1,800 s ที่แสดงในรูปที่ 5 Tesla



รูปที่ 5 ความลึกของการคายประจุแบตเตอรี่สำหรับเวลา $t = 0 - 1,800$ s



รูปที่ 6 สถานะประจุแบตเตอรี่สำหรับเวลา $t = 0 - 1,800$ s



รูปที่ 7 ความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้สำหรับเวลา $t = 0 - 1,800$ s

จึงมีสถานะประจุคงเหลือมากกว่า MG ZS EV และ Nissan Leaf ซึ่งทั้ง 2 รุ่นนี้มีค่าสถานะประจุใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้เพื่อจ่ายพลังงานสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าในรูปที่ 6 Tesla ถูกใช้ไปน้อยกว่า Nissan Leaf และ MG ZS EV โดยผลลัพธ์ดังกล่าวนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากมวลของ Tesla มีค่าน้อยที่สุด มีความสอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวไว้ว่ายานยนต์ที่มีมิติและมวลมากกว่าใช้พลังงานขับเคลื่อนมากกว่ายานยนต์ที่มีมิติและมวลน้อยกว่า

5. สรุปผลการวิจัย

บทความงานวิจัยนี้นำเสนอการจำลองเพื่อวิเคราะห์หาการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยรูปแบบการขับซิ่งที่สอดคล้องกับวัฏจักรขับทดสอบมาตรฐานแบบ WLTC Class 3 สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในประเทศไทย 3 รุ่น ผลการจำลองสามารถระบุความลึกของการคายประจุ สถานะประจุ และความจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้สำหรับรถทั้ง 3 รุ่นได้อย่างชัดเจน ข้อมูล

ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับผู้บริโภคเพื่อตัดสินใจซื้อยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขการประหยัดพลังงานของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่กำหนดพิสัยสูงสุดของการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ

เอกสารอ้างอิง

- [1] De Cauwer, C., Messagie, M., Heyvaert, S., Coosemans, T. and Van Mierlo, J. (2015). Electric vehicle use and energy consumption based on real world electric vehicle fleet trip and charge data its impact on existing EV research models. **World Electric Vehicle Journal**, 7, 436-446.
- [2] Grüner, J. and Marker, S. (2016). A Tool for Generating Individual Driving Cycles – IDCB. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, 9, 1-12.
- [3] Wang, J. Besselink, I. and Nijmeijer, H. (2015). Electric vehicle energy consumption modelling and prediction based on road information. **World Electric Vehicle Journal**, 7(3), 447-458.
- [4] Wang, J., Besselink, I. and Nijmeijer, H. (2018). Battery electric vehicle energy consumption prediction for a trip based on route information. **In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 232(11), 1528-1542.
- [5] Wang, J., Gu, W., Zhu, J. and Zhang, J. (2009). Energy Consumption Analysis of Electric Propulsion System Used in Autonomous Surface Vehicle, **In Proceedings of International Conference on Computer and Automation Engineering**, pp. 191-195. Bangkok, Thailand: IEEE.
- [6] Břoušek, J. Z., Tomáš. (2018). Experimental study of electric vehicle gearbox efficiency. **MATEC Web of Conferences**, 234, 02004.
- [7] Hu, K. Wu, J. and Schwanen, T. (2017). Differences in Energy Consumption in Electric Vehicles: An Exploratory Real-World Study in Beijing. **Journal of Advanced Transportation**, 2017, 4695975.
- [8] Brandstetter, P., Vanek, J. and Verner, T. (2014). Electric vehicle energy consumption monitoring. **In Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**, pp. 589-592.

- [9] Abousleiman, R. and Rawashdeh, O. (2015). Energy consumption model of an electric vehicle. In **Proceedings of IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)**, pp. 1-5. Dearborn, MI, USA: IEEE.
- [10] Kubaisi, R., Gauterin, F. and Giessler, M. (2014). A method to analyze driver influence on the energy consumption and power needs of electric vehicles. In **Proceedings of International Electric Vehicle Conference (IEVC)**, pp. 1-4. Florence, Italy: IEEE.
- [11] Asthenopoulos, V., Kosmides, P., Adamopoulou, E. and Demestichas, K. (2014). Intelligent energy consumption estimation for electric vehicles: Business processes and services. In **Proceedings of International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)**, pp. 293-298. Vienna, Austria: IEEE.
- [12] Wu, X., Freese, D. Cabrera, A. and Kitch, W. (2015). Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, **34**, 52 - 67.
- [13] Hofman, T. and Dai, C. (2010). Energy efficiency analysis and comparison of transmission technologies for an electric vehicle. In **Proceedings of IEEE vehicle power and propulsion conference**, pp. 1-6. Lille, France: IEEE.
- [14] Olivier, M.-G. (2022). **The energy efficiency of an electric car motor**. Retrieved from <https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-energy-efficiency-of-an-electric-car-motor/>.

