

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้น
ที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน

นายวชิรา นิลประพันธ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sensitivity Analysis of the Total Cost of Ownership for Electric Feeder Bus
Using Various Types of Energy Storage

Mr. Wachira Nilprapunt



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของ
สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่มีชนิดของแหล่งเก็บ
พลังงานที่แตกต่างกัน

โดย

นายวชิรา นิลประพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อังคีร์ ศรีภคการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อังคีร์ ศรีภคการ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันทศ จันทรานูวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชินะ เพ็ญชาติ)

วชิรา นิลประพันธ์ : การวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน (Sensitivity Analysis of the Total Cost of Ownership for Electric Feeder Bus Using Various Types of Energy Storage) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อังคิรี ศรีภคการ, 97 หน้า.

รถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นเป็นแนวโน้มการพัฒนาที่สำคัญในปัจจุบัน แต่ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น ความจุแบตเตอรี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดและมีระยะเวลาการชาร์จนาน เป็นต้น การเปลี่ยนชนิดของแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้าให้มีความจุพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นและการใช้การชาร์จที่รวดเร็วเป็นทางเลือกที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้ได้ แต่อย่างไรก็ตามทางเลือกเหล่านั้น ย่อมส่งผลต่อต้นทุนของรถโดยสารที่แตกต่างกันด้วย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการคำนวณและเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน และศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่ถูกนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ รถโดยสารไฟฟ้าไฮบริด (รถโดยสารที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบัน) รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับรถโดยสารสันดาปภายในที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายท้องตลาดอีกด้วย จากผลการศึกษพบว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุดภายใต้การให้บริการในปัจจุบัน ซึ่งต่ำกว่ารถโดยสารสันดาปภายในและไฮบริดอยู่ 17% และ 6% ตามลำดับ โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด 2 อันดับแรกคือ ระยะทางการวิ่งของรถโดยสารและระยะเวลาการให้บริการรถโดยสาร ที่ควรนำมาใช้เป็นข้อกำหนดในเชิงคุณภาพของการให้บริการรถโดยสาร นอกจากนี้ในเฉพาะกรณีรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ การเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จระหว่างเส้นทางการเดินรถสามารถลดขนาดแบตเตอรี่ให้เล็กลงได้ นำไปสู่การลดต้นทุนการเป็นเจ้าของได้มากถึง 23% ด้วยเหตุนี้เองรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่รวดเร็วจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาให้บริการที่มีประสิทธิภาพต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5870235821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRIC BUS / FEEDER BUS / FAST CHARGING / TOTAL COST OF OWNERSHIP / SENSITIVITY ANALYSIS

WACHIRA NILPRAPUNT: Sensitivity Analysis of the Total Cost of Ownership for Electric Feeder Bus Using Various Types of Energy Storage. ADVISOR: ASSOC. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., 97 pp.

Electric feeder bus is currently an important development for urban mobility. Technology options for electric feeder, however, is to be improved. The current battery used in feeder bus contains limited energy capacity and takes too much time to a full charge. Among others, changing the battery type along with the fast charging technology can be considered as an option to negate the limitations of the electric feeder bus. Nevertheless, the investment cost for those options vary strongly depending on the different type of energy storage system. This thesis aims to examine the total cost of ownership (TCO) of the electric feeder buses using various types of energy storage and to reveal the main parameters that posed a significant influence to the TCOs by applying the sensitivity analysis. The electric feeder buses compared in this thesis are hybrid bus (currently in operation), lithium-ion battery bus and supercapacitor bus. In addition, conventional bus based on internal combustion engine, which is widely used, was also compared. According to the results, the lowest TCO belongs to the fast charging system with lithium-ion battery bus which is lower than the conventional bus and the hybrid bus by 17% and 6% respectively. The two most influential factors that affected the TCO are the travel distance and the operational years which supposed to be used in determining qualitative requirements of fleet service. Furthermore, only for supercapacitor bus, the increasing number in fast charging stations in the fleet can cause the shrinkage in battery size, which eventually leads to reducing the TCO up to 23%. This study concludes that lithium-ion battery bus and supercapacitor bus with fast charging technology are the cost-effective options for the electric feeder bus technology.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อังคิรี ศรีภคากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนคอยติดตาม สอบถามความคืบหน้างานวิจัยอย่างสม่ำเสมอ อันเป็น ประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆระหว่างการดำเนินงาน ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และขอ กราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดต์ รัตนสุมาวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันเทพศ จันทรานุกวัฒน์ และ ดร.ชินะ เพ็ญชาติ ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ คำปรึกษา เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คุณพิพัฒน์ ตั้งสิริไพศาล ผู้จัดการ บริษัท พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด และผู้ที่เกี่ยวข้องสำหรับการสนับสนุนรถยนต์ที่ใช้เก็บข้อมูล รวมถึงข้อมูล คำแนะนำ และ ความช่วยเหลือในทุกๆด้านของการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นายธิดิภัทร์ ธิตะจารี และนายศรวัสย์ ตรีนก ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บ ข้อมูลและประมวลผลข้อมูลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และคอย สนับสนุนผู้วิจัยในทุกๆด้าน ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลืออีกมาก ที่ผู้วิจัยไม่สามารถ กล่าวนามได้หมดในที่นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและความปรารถนาดีของท่านเป็น อย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 7 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 7 |
| 1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย..... | 8 |
| 1.4.1 ข้อมูลและแหล่งข้อมูล | 8 |
| 1.4.2 การเก็บข้อมูล | 8 |
| 1.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล | 8 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 8 |
| 1.6 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน | 9 |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 10 |
| 2.1 ความหมายของรถโดยสารระยะสั้น..... | 10 |
| 2.2 ต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 11 |
| 2.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว..... | 15 |
| 2.4 ชนิดของแหล่งเก็บพลังงาน | 19 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 21 |

| | |
|--|----|
| 3.1 แบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 21 |
| 3.1.1 ค่าลงทุนเริ่มต้น..... | 22 |
| 3.1.2 ค่าใช้จ่ายในการให้บริการ..... | 22 |
| 3.1.3 ค่าขายคืน..... | 23 |
| 3.2 รูปแบบการให้บริการของรถโดยสาร..... | 24 |
| 3.3 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสาร..... | 25 |
| 3.4 พลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร..... | 26 |
| 3.4.1 การตรวจสอบข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร..... | 28 |
| 3.4.2 การทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร..... | 29 |
| 3.5 การออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้า..... | 37 |
| 3.5.1 ผลของมวลต่อพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร..... | 39 |
| 3.6 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์..... | 39 |
| 3.6.1 ข้อมูลสำหรับต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 39 |
| 3.6.2 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ความอ่อนไหว..... | 45 |
| บทที่ 4 ผลการศึกษา..... | 48 |
| 4.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 48 |
| 4.1.1 ผลของจำนวนสถานีชาร์จที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 54 |
| 4.2 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว..... | 57 |
| 4.2.1 แผนผังใยแมงมุม..... | 57 |
| 4.2.2 แผนผังทอร์นาโด..... | 62 |
| 4.3 การประยุกต์ใช้ต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 69 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ..... | 75 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 75 |

| | |
|--|----|
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 76 |
| รายการอ้างอิง | 77 |
| ภาคผนวก..... | 83 |
| ภาคผนวก ก การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลความเร็ว | 84 |
| ภาคผนวก ข การแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูล..... | 86 |
| ภาคผนวก ค การประมาณอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้า | 95 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 97 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1.1 ตารางเวลาและแผนดำเนินงานวิจัย | 9 |
| ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 | 26 |
| ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการใช้พลังงานและอัตราเร็วเฉลี่ยของรถโดยสารไฟฟ้าที่บันทึกได้ต่อรอบ | 28 |
| ตารางที่ 3.3 นิยามของ VSP แต่ละโหมด | 32 |
| ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของข้อมูลในรถโดยสารที่ใช้เก็บข้อมูล | 35 |
| ตารางที่ 3.5 ตารางเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารของระบบขับเคลื่อนที่ได้จาก ข้อมูลจริงและการทำนาย | 36 |
| ตารางที่ 3.6 น้ำหนักรวมของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารแต่ละชนิด | 40 |
| ตารางที่ 3.7 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีแหล่งเก็บพลังงานแต่ละชนิด | 41 |
| ตารางที่ 3.8 ค่าใช้จ่ายที่ถูกประเมินโดยผู้ให้บริการรถโดยสารและจากการรวบรวมข้อมูล | 42 |
| ตารางที่ 3.9 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสารสันดาปภายใน | 42 |
| ตารางที่ 3.10 ค่าใช้จ่ายของรถโดยสารสันดาปภายในสำหรับคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ | 45 |
| ตารางที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารสันดาปภายใน | 46 |
| ตารางที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารไฮบริด | 46 |
| ตารางที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียม | 46 |
| ตารางที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ | 47 |
| ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบสัดส่วนของค่าลงทุนเริ่มต้นกับค่าใช้จ่ายในการให้บริการของรถ โดยสารในงานวิจัยต่างๆที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีสถานีชาร์จที่รวดเร็ว 1 สถานี | 52 |
| ตารางที่ 4.2 ขนาดของแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า | 55 |
| ตารางที่ 4.3 รอบการใช้งานและอายุของแหล่งเก็บพลังงาน | 56 |
| ตารางที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงในต้นทุนการเป็นเจ้าของเทียบกับกรณีฐานในแผนผังใยแมง มุม | 60 |

| | |
|--|----|
| ตารางที่ 4.5 ตารางการให้บริการของรถโดยสารที่กำหนดไว้ | 64 |
| ตารางที่ 4.6 ข้อมูลของรถสองแถว | 70 |
| ตารางที่ 4.7 ขนาดแบตเตอรี่และอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า..... | 72 |
| ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบความจุผู้โดยสารและจำนวนรถของรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้า..... | 72 |
| ตารางที่ 4.9 ข้อมูลจากการสำรวจการให้บริการรถสองแถว | 74 |



สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2555 [3]..... | 1 |
| รูปที่ 1.2 การแก้ไขปัญหาการขนส่งในเมืองด้วยระบบขนส่งสาธารณะ [6] | 3 |
| รูปที่ 1.3 ปัจจัยและขั้นตอนการใช้บริการของรถโดยสารสาธารณะ | 4 |
| รูปที่ 1.4 สัดส่วนของสาเหตุหลักของผู้ที่ไม่ใช้รถโดยสารสาธารณะ [6]..... | 4 |
| รูปที่ 1.5 รถโดยสารไฟฟ้าที่ให้บริการภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | 6 |
| รูปที่ 1.6 เส้นทางเดินรถโดยสารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1) | 7 |
| รูปที่ 2.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าโดย Nurhadi et al. [19]..... | 13 |
| รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแผนผังใยแมงมุมแสดงความอ่อนไหวของรายจ่ายต่อครั้งของบริการตามการเปลี่ยนแปลงของค่าวัสดุ [21] | 15 |
| รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผนผังทอร์นาโด [22] | 16 |
| รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดย Wu et al. [17] | 17 |
| รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดย Nurhadi et al. [18] | 17 |
| รูปที่ 3.1 แบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้า..... | 21 |
| รูปที่ 3.2 รูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้า | 25 |
| รูปที่ 3.3 สภาพภายนอกของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... | 25 |
| รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล (ก) Hall Effect Sensor (ข) Voltage Divider Circuit (ค) Arduino UNO R3 (ง) Ublox NEO 6M GPS | 27 |
| รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้ง (ก) ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล (ข) ตัวรับสัญญาณ GPS บนรถโดยสารไฟฟ้า..... | 27 |
| รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปแบบข้อมูลพลังงานที่บันทึกจากรถโดยสารไฟฟ้า..... | 28 |
| รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์แรงสำหรับการสร้างแบบจำลอง VSP [36] | 30 |
| รูปที่ 3.8 แบบจำลอง VSP ของรถโดยสารที่ใช้ทดสอบ | 33 |
| รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละ VSP โหมดสำหรับเส้นทางเดินรถสาย 1 | 33 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร | 35 |
| รูปที่ 3.11 ช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [38] | 38 |
| รูปที่ 3.12 สถานการณ์การชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้า [39] | 38 |
| รูปที่ 3.13 ค่ากำลังจำเพาะของรถโดยสารสันดาปภายในจากงานวิจัยของ Guo et al. [44]..... | 43 |
| รูปที่ 3.14 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารสันดาปภายใน ยูโร 4 [37]..... | 44 |
| รูปที่ 4.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี | 48 |
| รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารของโครงการจัดทำแนวทางการ พัฒนารถโดยสารไฟฟ้าในประเทศไทย [56]..... | 50 |
| รูปที่ 4.3 ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มระยะทางการวิ่งเป็น 250 กม./วัน และเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการ 20 ปี | 50 |
| รูปที่ 4.4 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารโดย Nurhadi et al. [18] | 51 |
| รูปที่ 4.5 ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มระยะทางการวิ่งเป็น 310 กม./วัน และเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการ 8 ปี..... | 51 |
| รูปที่ 4.6 สถานการณ์การชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้าเมื่อมีการชาร์จระหว่างจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร [39]..... | 54 |
| รูปที่ 4.7 ผลของการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จที่รวดเร็วต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ..... | 56 |
| รูปที่ 4.8 แผนผังใยแมงมุมแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถ โดยสารแต่ละเทคโนโลยี..... | 59 |
| รูปที่ 4.9 แผนผังทอร์นาโดแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถ โดยสารแต่ละเทคโนโลยี..... | 63 |
| รูปที่ 4.10 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของหลังจากลดภาษีค่าลงทุนเริ่มต้น..... | 65 |
| รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของหลังจากลดภาษีแบตเตอรี่..... | 66 |
| รูปที่ 4.12 สภาพภายนอกของรถสองแถวในเส้นทางเดินรถสายที่ 1256..... | 69 |
| รูปที่ 4.13 เส้นทางเดินรถสองแถว สายที่ 1256..... | 70 |
| รูปที่ 4.14 ตัวอย่างข้อมูลอัตราเร็วของรถสองแถวในเส้นทางเดินรถสายที่ 1256..... | 71 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถวกับรถโดยสารไฟฟ้า..... | 72 |
| รูปที่ 4.16 ต้นทุนการเป็นเจ้าของทั้งระบบการเดินรถของรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้า..... | 73 |

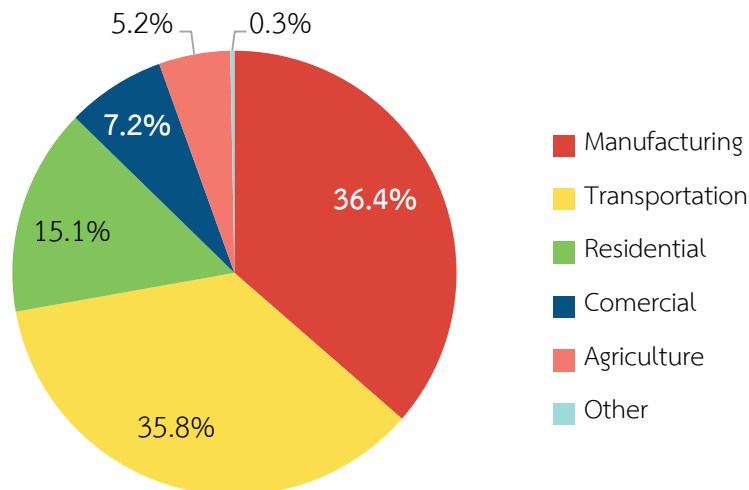


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทุกวันนี้ปัญหามลพิษและสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการเดินทางขนส่ง เป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ซึ่งจำเป็นต้องมีการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ไม่เพียงแต่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ปัญหานี้ยังส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจกซึ่งก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อนขึ้น [1] การคมนาคมขนส่งมีปริมาณการใช้พลังงานเป็นหนึ่งในห้าส่วนของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดภายในโลก [2] ในปี พ.ศ. 2555 ปริมาณการใช้พลังงานสูงสุดในประเทศไทยตั้งรูปที่ 1.1 เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมคิดเป็น 36.4% ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมดในประเทศไทย และปริมาณการใช้พลังงานสูงสุดเป็นอันดับที่สองคิดเป็น 35.8% เกิดขึ้นจากการคมนาคมขนส่ง



รูปที่ 1.1 สัดส่วนการใช้พลังงานของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2555 [3]

การคมนาคมขนส่งมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ การขนส่งทางบก การขนส่งทางน้ำ และการขนส่งทางอากาศ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วการขนส่งที่เป็นที่นิยมมากที่สุดก็คือการขนส่งทางบก เนื่องจากความสะดวกรวดเร็วของการขนส่งและมีต้นทุนไม่สูงจนเกินไป โดยทั่วไปการจัดประเภทของการขนส่งทางบกหรือระบบขนส่งทางบก แบ่งออกเป็น 3 ประเภท [4] ดังนี้

- ก. ระบบขนส่งสาธารณะ (Public transportation) เป็นระบบขนส่งที่ทุกคนสามารถใช้บริการได้ และจำเป็นต้องจ่ายค่าโดยสาร มีตารางการให้บริการและการกำหนดเส้นทาง

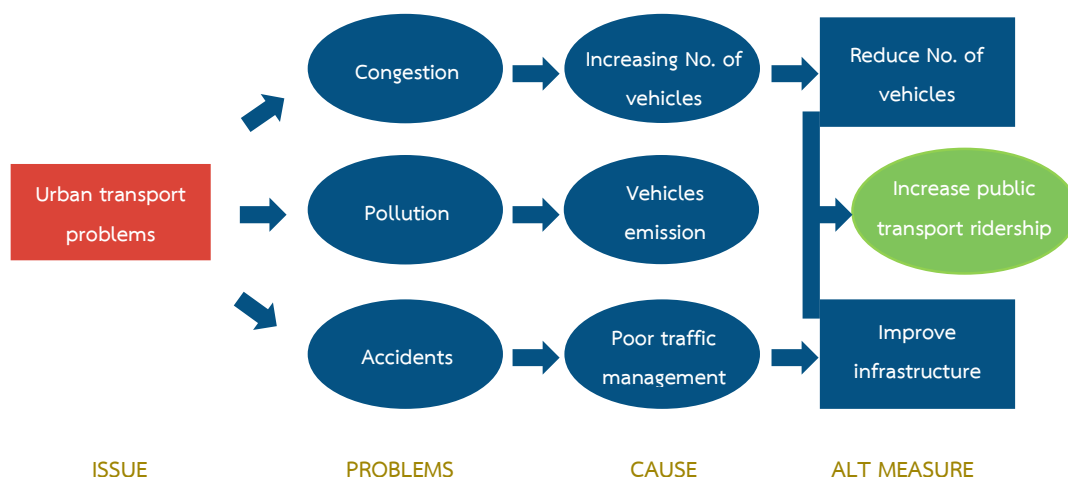
ที่แน่นอน ระบบขนส่งที่จัดอยู่ในประเภทนี้ ได้แก่ รถโดยสารประจำทาง รถไฟฟ้า รถราง เป็นต้น

- ข. ระบบขนส่งกึ่งสาธารณะ (Paratransit) เป็นระบบขนส่งที่ทุกคนสามารถใช้บริการได้เช่นเดียวกัน และมีค่าจ้างสำหรับการเดินทางเป็นครั้ง รูปแบบการขนส่งมักจะไม่มีการกำหนดเส้นทางและตารางการให้บริการที่แน่นอน รูปแบบการขนส่งที่จัดอยู่ในระบบขนส่งกึ่งสาธารณะ ได้แก่ รถแท็กซี่ รถมอเตอร์ไซด์รับจ้าง รถสองแถว รถตุ๊กตุ๊ก เป็นต้น
- ค. ระบบขนส่งส่วนบุคคล (Private transportation) เป็นระบบขนส่งสำหรับผู้ที่ครอบครองยานพาหนะเป็นผู้ใช้พาหนะนั้นในการเดินทางด้วยตนเอง มักใช้ในการเดินทางบนเส้นทางสาธารณะที่จัดไว้สำหรับการสัญจร ยานพาหนะที่จัดอยู่ในการขนส่งประเภทนี้ ได้แก่ รถยนต์ส่วนบุคคล รถบรรทุก จักรยานยนต์ จักรยาน และรวมไปถึงการเดินทางด้วยการเดินด้วย

จากข้อมูลของกรมการขนส่งทางบกเริ่มตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2532 พบว่าสถิติจำนวนรถยนต์ส่วนบุคคลในประเทศไทยยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [5] และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์นั้นไม่เพียงแต่จะเป็นการเพิ่มปริมาณมลพิษในชั้นบรรยากาศแล้ว แต่ยังก่อให้เกิดปัญหาการจราจรอีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2554 Jaiswal และ Sharma ได้ศึกษาเกี่ยวกับความต้องการใช้งานรถโดยสารสาธารณะในเมืองโภพาล (Bhopal) ประเทศอินเดีย [6] โดยในงานวิจัยได้แสดงถึงประเด็นปัญหาสาเหตุ และทางออกของปัญหาการจราจรภายในเมืองดังแสดงในรูปที่ 1.2 ซึ่งพบว่าการเพิ่มปริมาณการใช้งานรถโดยสารสาธารณะเป็นทางออกที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ไขปัญหาการจราจรเหล่านี้

นอกจากนี้ Jaiswal และ Sharma ยังทำการสำรวจข้อมูลความต้องการใช้รถโดยสารสาธารณะจากประชากรเมืองโภพาลในประเทศอินเดีย ซึ่งพบว่าความต้องการใช้รถโดยสารสาธารณะของประชากรขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยและมีขั้นตอนการให้บริการดังรูปที่ 1.3 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ได้แก่

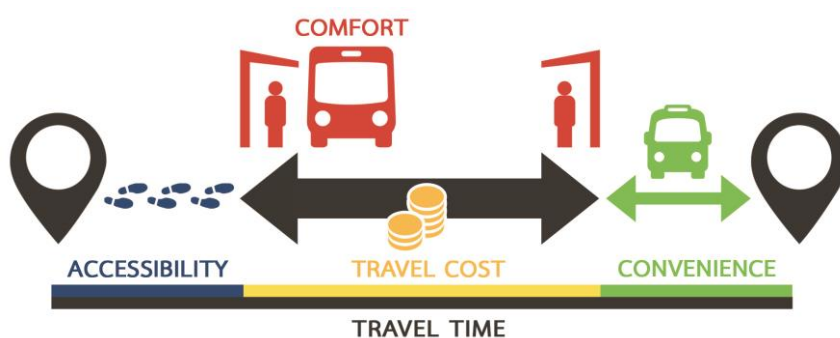


รูปที่ 1.2 การแก้ไขปัญหาการขนส่งในเมืองด้วยระบบขนส่งสาธารณะ [6]

- ก. ค่าโดยสาร (Travel cost) เป็นตัวแสดงถึงค่าใช้จ่ายในการเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะเทียบกับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้รถยนต์ส่วนบุคคล ถ้าหากค่าใช้จ่ายของชนิดการเดินทางใดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการที่จะใช้ชนิดการเดินทางนั้นลดลง
- ข. ระยะเวลาการเดินทาง (Travel time) เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาการเดินทางนั้นอาจรวมถึงการเดินไปยังสถานีรถโดยสาร ระยะเวลาจอดรถโดยสาร และระยะเวลาการเดินทางจริง โดยทั่วไประยะเวลาการเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะจะถูกเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเดินทางโดยรถโดยสารส่วนบุคคล การทำให้ระยะเวลาการเดินทางด้วยรถโดยสารลดลงนั้น ไม่เพียงแต่ทำให้ระบบขนส่งสาธารณะมีความต้องการสูงขึ้น แต่แสดงถึงการมีการจัดการจราจรและระบบโครงสร้างพื้นฐานที่ดีอีกด้วย
- ค. ความสบายใจ (Comfort) เป็นปัจจัยที่ระบุได้ค่อนข้างยาก โดยตัวอย่างความสบายใจของการใช้รถโดยสารระบบขนส่งสาธารณะ เช่น สถานีจอดรถโดยสารมีความสะอาด มีความดึงดูดต่อการใช้งาน รถโดยสารออกแบบและตกแต่งมีความลงตัว มีระบบปรับอากาศที่ดี เป็นต้น โดยความสบายใจของผู้โดยสารจะยิ่งเพิ่มขึ้นอีกถ้าหากรถโดยสารมีพื้นที่ที่กว้าง นั่งสบาย รวมถึงการทำให้ผู้โดยสารมีความปลอดภัยในการเดินทาง ตลอดจนการได้รับความเคารพจากพนักงานผู้ให้บริการรถโดยสาร
- ง. ความสะดวก (Convenience) เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสะดวกในการเดินทางมายังสถานีรถโดยสาร เช่น การมีรถโดยสารระยะสั้นรับ-ส่งระหว่างจุดต่างๆมายังสถานีรถโดยสารตามตารางเวลาที่กำหนด การมีทางเดินที่อำนวยความสะดวกต่อผู้ใช้บริการไม่ว่า

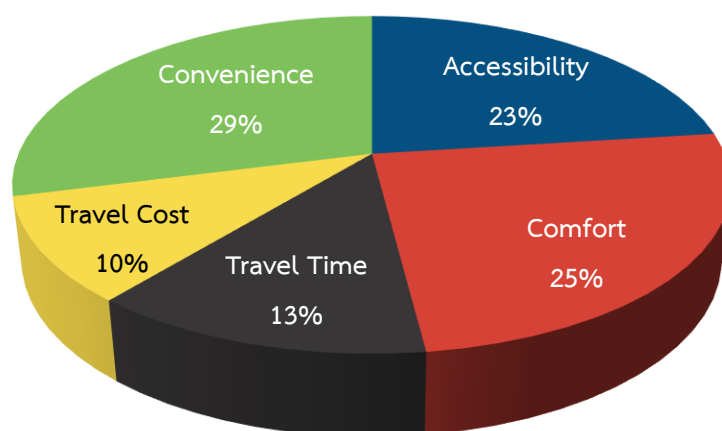
จะเป็นทางเดินเท้าหรือทางสำหรับรถเข็นผู้พิการ เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงความถี่ของรถโดยสารอีกด้วย

- จ. การเข้าถึง (Accessibility) เป็นปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานีรถโดยสารแต่ละสถานีเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้วระยะทางที่ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจที่จะเดินไปยังสถานีรถโดยสารคือ 500 เมตร ถ้าหาระยะทางนี้มากกว่า 500 เมตร จะทำให้ความต้องการใช้รถโดยสารสาธารณะลดลง



รูปที่ 1.3 ปัจจัยและขั้นตอนการให้บริการของรถโดยสารสาธารณะ

จากการสำรวจของ Jaiswal และ Sharma ยังพบว่าสาเหตุหลักของผู้ที่ไม่ใช้รถโดยสารสาธารณะมาจากความไม่พึงพอใจในด้านความสะดวกมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 29 ดังรูปที่ 1.4 โดยผู้โดยสารให้เหตุผลว่าความถี่ของรถโดยสารที่มารับ-ส่งผู้โดยสารในแต่ละสถานีนั้นมีความถี่ต่ำ รวมถึงการที่ไม่มีรถโดยสารระยะสั้นคอยให้บริการผู้โดยสารตามจุดย่อยๆ จึงทำให้ผู้โดยสารไม่ใช้รถโดยสารสาธารณะ



รูปที่ 1.4 สัดส่วนของสาเหตุหลักของผู้ที่ไม่ใช้รถโดยสารสาธารณะ [6]

สำหรับระบบขนส่งสาธารณะในเมืองที่ไม่สามารถสร้างระบบขนส่งสาธารณะให้ครอบคลุมทั่วทั้งเมืองได้ จึงทำให้มีการใช้ระบบขนส่งกึ่งสาธารณะเข้ามาช่วยในการรับช่วงต่อผู้โดยสารจากระบบขนส่งสาธารณะไปยังจุดหมายปลายทางที่อยู่ในถนนสายย่อยหรือตามซอยต่างๆเป็นระยะทางสั้นๆ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งสาธารณะได้ โดยในงานวิจัยของ Tangphaisankun et al. [7, 8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบขนส่งกึ่งสาธารณะที่มีอยู่ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งได้แก่ รถมอเตอร์ไซค์รับจ้าง รถสองแถว และรถตุ๊กตุ๊ก ซึ่งพบว่ารถโดยสารกึ่งสาธารณะเหล่านี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้การเข้าถึงรถโดยสารสาธารณะนั้นง่ายขึ้น แต่ยังสามารถขยายขอบเขตการให้บริการรถโดยสารสาธารณะได้ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งสาธารณะให้ดียิ่งขึ้นนั้น สามารถทำได้ด้วยการใช้รถโดยสารกึ่งสาธารณะนั่นเอง

นอกจากนี้งานวิจัยของ Veng และ Yai [9] ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับรถโดยสารกึ่งสาธารณะพื้นเมืองที่มีอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนาของทวีปเอเชีย ซึ่งส่วนใหญ่แล้วมีระยะทางการให้บริการที่สั้นจากการศึกษาพบว่ารถโดยสารกึ่งสาธารณะหรือรถโดยสารระยะสั้นของแต่ละประเทศมีเทคโนโลยีที่แตกต่างกันออกไป และที่สำคัญคือรถโดยสารส่วนใหญ่จะเป็นรถโดยสารที่เก่า รวมถึงมีการบำรุงรักษาไม่ดีเท่าที่ควร จึงทำให้รถโดยสารเหล่านี้มีการปล่อยมลพิษออกมามากกว่าปกติ ด้วยความต้องการที่จะพัฒนาให้มีการบริการของรถโดยสารระยะสั้นที่ดีขึ้นด้วยการใช้เทคโนโลยีของรถโดยสารที่ทันสมัยยิ่งขึ้น และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมยิ่งขึ้นด้วยการใช้พลังงานทางเลือกหรือการใช้ไฟฟ้าที่สามารถลดปริมาณการปล่อยมลพิษในอากาศได้ จึงมีการออกแบบรถโดยสารไฟฟ้าขึ้น เช่น การออกแบบรถสามล้อ (Motorized tricycle) ของประเทศฟิลิปปินส์ ในการพัฒนาช่วงแรกมีการพัฒนารถสามล้อให้เป็นรถสามล้อไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งเก็บพลังงาน และหลังจากนั้นมีการพัฒนาต่อโดยเปลี่ยนจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมซึ่งมีน้ำหนักแบตเตอรี่ที่เบากว่าอายุการใช้งานมากกว่า รวมถึงการวิ่งได้ระยะทางที่ไกลขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนชนิดของแบตเตอรี่นั้นก็ทำให้ต้นทุนของรถโดยสารนั้นเพิ่มขึ้นถึง 33% ด้วยการที่รถโดยสารมีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นอุปสรรคต่อผู้ให้บริการรถโดยสารอย่างหนึ่งในการพัฒนาจากรถโดยสารดั้งเดิมมาเป็นรถโดยสารไฟฟ้า ถึงแม้ว่ารถโดยสารไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าก็ตาม

สำหรับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีการให้บริการรถโดยสารระยะสั้นซึ่งเป็นรถโดยสารไฟฟ้าเพื่อลดการปล่อยมลพิษทางอากาศภายในมหาวิทยาลัยและบริเวณโดยรอบมหาวิทยาลัย ให้บริการสำหรับนิสิต บุคลากร และผู้ที่มาติดต่อกับทางมหาวิทยาลัย ดังรูปที่ 1.5 โดยใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าในรถโดยสาร แต่อย่างไรก็ตามระบบการเดินรถโดยสารไฟฟ้ายังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น แบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้น้อยจึงจำเป็นต้องมีการชาร์จที่

บ่อยครั้ง แต่ว่าการชาร์จในแต่ละครั้งนั้น ใช้เวลานานในการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม (2-3 ชั่วโมง) จึงได้เกิดการพัฒนารถโดยสารไฮบริดที่ใช้แหล่งพลังงานเสริมเป็นก๊าซหุงต้ม (Liquefied Petroleum Gas: LPG) มาช่วยเพิ่มพลังงานไฟฟ้าให้กับรถโดยสารให้สามารถให้บริการได้นานขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนชนิดของแบตเตอรี่ในรถโดยสารให้สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น เช่น การเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งมีราคาของแบตเตอรี่สูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น สังเกตได้ว่าชนิดของแบตเตอรี่ในแต่ละรถโดยสารนั้นแตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้ต้นทุนของรถโดยสารนั้นแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามคุณภาพในการให้บริการก็แตกต่างกันไปด้วย

เนื่องด้วยความต้องการที่จะพัฒนารถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นทั้งต่างประเทศและในประเทศที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยร่วมเป็นส่วนหนึ่งในความต้องการที่จะพัฒนาด้วย ทำให้เป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาและใช้งานรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นอย่างแพร่หลาย แต่ด้วยความแตกต่างของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารนี้เอง จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกันและศึกษาว่าปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารดังกล่าว และพิจารณาว่าในแต่ละปัจจัยจะส่งผลมากหรือน้อยเพียงใด เพื่อเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจเลือกลงทุนในระบบรถโดยสารที่เหมาะสมต่อการใช้งานและการให้บริการที่ดีที่สุด



รูปที่ 1.5 รถโดยสารไฟฟ้าที่ให้บริการภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

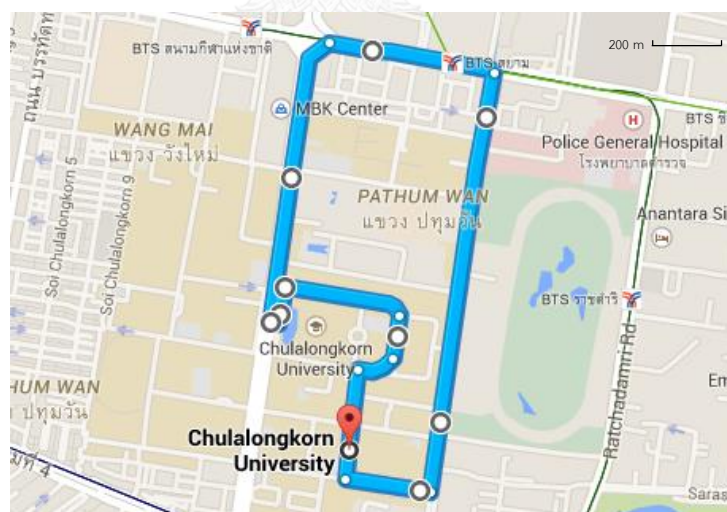
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารที่มีแหล่งเก็บพลังงานชนิดต่างๆ

- เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารที่มีแหล่งเก็บพลังงานชนิดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้น และเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน รถโดยสารที่นำมาใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีความยาว 8 เมตร จำนวนที่นั่ง 22 ที่นั่ง ให้บริการ รับ-ส่งนิสิต บุคลากร และผู้ที่มาติดต่อกับทางจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตามเส้นทางที่ถูกระบุไว้ (สาย 1) ดังรูปที่ 1.6 ซึ่งมีเส้นทางผ่านถนนสายหลักและสายรอง เทคโนโลยีของรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่ใช้วิเคราะห์ ได้แก่ รถโดยสารไฟฟ้าไฮบริด (รถโดยสารที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบัน) รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยมีการใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่รวดเร็วในรถโดยสารที่กล่าวในหัวข้อ 3.6 ด้วย



รูปที่ 1.6 เส้นทางรถโดยสารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1)

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

1.4.1 ข้อมูลและแหล่งข้อมูล

ข้อมูลในส่วนของต้นทุน เช่น ค่าตัวรถโดยสาร ค่าระบบการชาร์จ ค่าแบตเตอรี่ จะใช้การค้นคว้าข้อมูลจากงานวิจัยอื่นและการสำรวจราคาในตลาด พร้อมทั้งมีการตรวจสอบข้อมูลจากผู้ให้บริการรถโดยสารและผู้มีประสบการณ์ ส่วนค่าใช้จ่ายในด้านการเดินทาง ค่าดูแลซ่อมบำรุง ค่าจ้างพนักงาน และสถิติการให้บริการของรถโดยสารไฟฟ้า จะใช้การสอบถามข้อมูลจากผู้ให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าโดยตรง

1.4.2 การเก็บข้อมูล

ข้อมูลพลังงานที่ใช้ในการเดินทางโดยสารจะใช้การเก็บข้อมูลจากการเดินทางโดยสารไฟฟ้าจริง โดยบันทึกค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าที่รถโดยสารใช้ รวมถึงพิกัดตำแหน่งของรถโดยสารที่ได้จากระบบบอกตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (Global Positioning System: GPS) ณ เวลาต่างๆ เพื่อนำไปคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถโดยสาร ความเร็วของรถโดยสาร และออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในรถโดยสารต่อไป

1.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้จะสร้างแบบจำลองการใช้พลังงานของรถโดยสารขึ้นเพื่อให้สามารถนำแบบจำลองไปใช้กับเส้นทางการเดินทางเส้นทางอื่นได้และเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลจากรถโดยสารที่มีจำนวนรถโดยสารหลายคัน นอกจากนี้ยังสร้างแบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารในแต่ละเทคโนโลยี แล้ววิเคราะห์ความอ่อนไหวเพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ และแสดงผลด้วยแผนผังใยแมงมุม (Spider plot graph) และแผนผังทอร์นาโด (Tornado graph)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- งานวิจัยนี้จะช่วยในการตัดสินใจของหน่วยงานการเดินรถโดยสารว่ารถโดยสารที่มีเทคโนโลยีชนิดใดที่เหมาะสมกับการเดินรถโดยสารมากที่สุดและปัจจัยทางการเงินปัจจัยใดที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารมากที่สุดและรองลงมา

- สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในระยะเวลาถัดกับรถโดยสารที่มีเส้นทางการเดินทางอื่นหรือใช้กับรถโดยสารที่มีเทคโนโลยีอื่น

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนของรถโดยสารระยะสั้นชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแล้วหากพิจารณาเฉพาะราคาขายเท่านั้นอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากรถโดยสารระยะสั้นแต่ละชนิดมีเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในระหว่างการใช้งานนั้นแตกต่างกันด้วย จึงจำเป็นต้องดูจากต้นทุนการเป็นเจ้าของ ที่ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายต่างๆอย่างครอบคลุม แต่ต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานหรือการแปรผันของค่าใช้จ่ายต่างๆที่ส่งผลให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นจะถูกแสดงด้วยกราฟวิเคราะห์ความอ่อนไหว แต่วารถโดยสารระยะสั้นที่มีเทคโนโลยีชนิดใดจะเหมาะสมต่อการใช้งานมากที่สุด เช่น เทคโนโลยีของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าก็มีอยู่หลากหลายเทคโนโลยี มีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาต่อไป

2.1 ความหมายของรถโดยสารระยะสั้น

อันเนื่องมาจากมาจากการใช้งานรถโดยสารสาธารณะที่เป็นทางออกของปัญหาการจราจรภายในเมือง และยิ่งไปกว่านั้นสิ่งที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบขนส่งสาธารณะได้นั้นก็คือรถโดยสารระยะสั้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ฟีดเดอร์ (Feeder) เป็นรถโดยสารที่มีเส้นทางการเดินรถส่วนใหญ่ผ่านถนนสายรองและถนนในซอยที่เชื่อมต่อกับถนนสายหลัก มุ่งเน้นการให้บริการเชื่อมต่อกับเส้นทางการขนส่งด้วยรถโดยสารและการขนส่งแบบราง โดยทั่วไปแล้วประเภทของรถโดยสารที่ถูกนำมาใช้เป็นฟีดเดอร์นั้น จะใช้รถโดยสารขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ เช่น รถสองแถว รถสี่ล้อเล็ก (รถกระบะป้อ) รถสามล้อ (รถตุ๊กตุ๊ก) รถจักรยานยนต์รับจ้าง เป็นต้น เนื่องจากลักษณะของตัวรถที่มีขนาดเล็ก สามารถให้บริการในเส้นทางที่มีพื้นที่แคบหรือตามซอยต่างๆได้อย่างคล่องตัว

สุรเมศวร์ [10] ได้ให้ความหมายของ การขนส่งระยะสั้น (Short-haul transit) ว่า เป็นระบบขนส่งที่ให้บริการด้วยความเร็วต่ำ ภายในพื้นที่ขนาดเล็กที่มีปริมาณการเดินทางสูง เช่น พื้นที่ศูนย์กลางธุรกิจและชุมชน ภายในบริเวณมหาวิทยาลัย สนามบิน และพื้นที่ที่มีการจัดแสดงนิทรรศการ เป็นต้น

และนอกจากนี้ สุรเมศวร์ ยังได้ให้ความหมายของระบบขนส่งป้อนเข้าหรือฟีดเดอร์ คือ ระบบขนส่งสาธารณะที่ให้บริการสำหรับการเดินทางภายในแต่ละพื้นที่ย่อย โดยทำหน้าที่ป้อนผู้เดินทางที่อยู่ในแต่ละพื้นที่ย่อยเข้าสู่ศูนย์บริการระบบขนส่งสาธารณะของพื้นที่ย่อยนั้นๆ ระยะทางที่ให้บริการ

ของระบบขนส่งประเภทนี้จะไม่ยาวมากนัก โดยมากแล้วระยะเวลาในการวิ่งครบรอบไม่ควรเกินรอบละ 60 นาที ตัวอย่างของการขนส่งประเภทนี้ ได้แก่ รถโดยสารประจำทางระยะสั้น (Shuttle buses) เป็นต้น

สำหรับรถโดยสารระยะสั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะความหมายเช่นเดียวกับที่กล่าวในข้างต้นหรือกล่าวโดยสรุปได้ว่า รถโดยสารขนาดเล็กจะมีเส้นทางการเดินรถเชื่อมต่อกับถนนสายหลักที่มีระบบขนส่งสาธารณะ ได้แก่ รถโดยสารประจำทาง และรถไฟฟ้า และผ่านเส้นทางการเดินรถที่มีพื้นที่แคบหรือเป็นเขตชุมชน เขตโรงเรียน ตลอดจนเขตธุรกิจ ซึ่งมีการใช้ความเร็วในการเดินรถที่ต่ำและมีระยะทางที่ให้บริการไม่ยาวมาก

2.2 ต้นทุนการเป็นเจ้าของ

ต้นทุนการเป็นเจ้าของ (Total Cost of Ownership: TCO) หมายถึง ต้นทุนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดอายุของการเป็นเจ้าของ ตัวอย่างต้นทุน เช่น ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น ค่าดูแลรักษา ค่าซ่อมแซมบำรุงรักษา ค่าดำเนินการต่างๆ เป็นต้น การวิเคราะห์การลงทุนในระบบต่างๆได้มีการนำต้นทุนการเป็นเจ้าของไปใช้กันอย่างแพร่หลาย [11-13] ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงรายละเอียดค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วนของระบบทั้งหมดได้อย่างชัดเจน และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงเพิ่ม-ลดค่าใช้จ่ายในแต่ละส่วนให้ลดลงได้ โดยทั่วไปต้นทุนการเป็นเจ้าของจะถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบต่างๆที่มีคล้ายคลึงกัน ประกอบกับใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการช่วยตัดสินใจสำหรับการลงทุน ซึ่งต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นสามารถปรับเปลี่ยนรายละเอียดการคำนวณได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่เราต้องการวิเคราะห์ เช่น สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า อาจมีรายละเอียดในด้านแบตเตอรี่ การซ่อมบำรุง หรือแม้แต่ในส่วนของประกันภัยของรถยนต์ก็เช่นกัน

ในประเทศไทยมีการทำวิจัยเกี่ยวกับต้นทุนการเป็นเจ้าของ เช่น ในปี พ.ศ. 2550 งานวิจัยของ Goedecke et al. [14] ได้ทำการวิจัยในส่วนของค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของรถยนต์ทั้งหมด 13 ชนิด โดยแบ่งชนิดของรถยนต์ออกเป็นประเภทหลัก คือ รถยนต์สันดาปภายใน และรถยนต์ไฮบริด ซึ่งรถยนต์แต่ละประเภทมีการใช้เชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน ก๊าซหุงต้ม และก๊าซธรรมชาติ ผลการวิจัยพบว่ารถยนต์ที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุด เนื่องจากก๊าซธรรมชาติมีราคาต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับราคาเชื้อเพลิงชนิดอื่น ในทางกลับกันรถยนต์ไฮบริดมีต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด เนื่องจากรถยนต์ไฮบริดมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่ารถยนต์ประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2559 ยังมีงานวิจัยของ Kerdlap และ Gheewala [15] ทำการวิจัยเกี่ยวกับต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถจักรยานยนต์ที่ใช้ใน

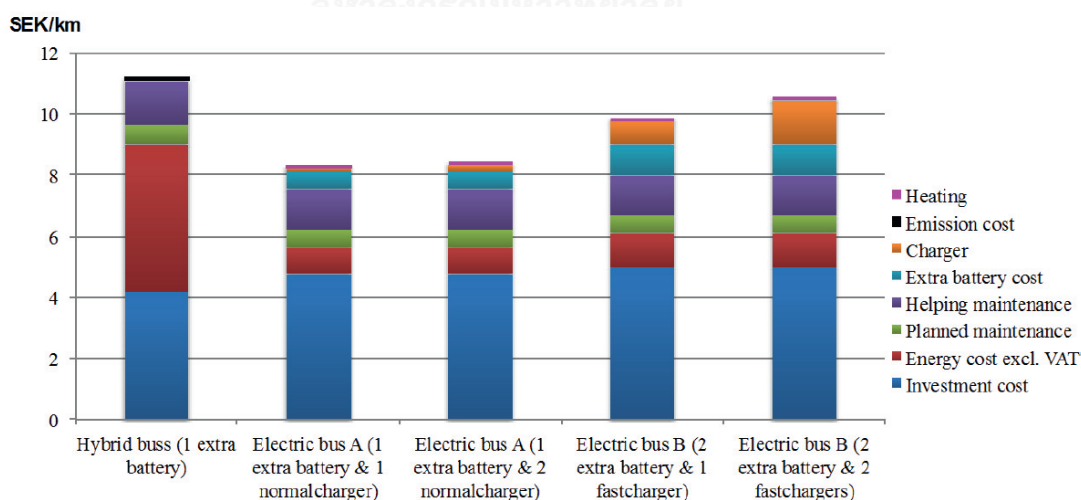
ประเทศไทย โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างรถจักรยานยนต์ 3 ชนิด ได้แก่ รถจักรยานยนต์ เครื่องยนต์เชื้อเพลิง รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรด และรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ผลการวิจัยพบว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีต้นทุนการ เป็นเจ้าของต่ำที่สุด

จากงานวิจัยทั้งสองนี้จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยียานยนต์ที่เป็นสมัยใหม่ ได้แก่ เทคโนโลยีไฮบริด และการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จะมีต้นทุนสูงกว่าเทคโนโลยีอื่นๆ เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มี อุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์เหล่านี้ จึงจำเป็นต้องนำเข้าอุปกรณ์มาจากต่างประเทศซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง โดยสามารถสังเกตอย่างง่ายจากราคารถยนต์ไฮบริดหรือรถยนต์ไฟฟ้าจะมีราคาสูงกว่ารถยนต์สันดาป ภายใน

งานวิจัยในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์ไฟฟ้าที่มีการวิเคราะห์ต้นทุนการเป็นเจ้าของ เช่น ในปี พ.ศ. 2556 งานวิจัยของ Lin et al. [16] อธิบายเกี่ยวกับต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถยนต์ ไฮบริดรุ่นต่างๆในประเทศจีน และนำไปเปรียบเทียบกับรถยนต์สันดาปภายใน ซึ่งพบว่าต้นทุนการ เป็นเจ้าของในรถยนต์ไฮบริดและรถยนต์สันดาปภายในมีความใกล้เคียงกันเนื่องจากต้นทุนที่สูงของ รถยนต์ไฮบริดและราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงของรถยนต์สันดาปภายใน ทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของมี ความใกล้เคียงกัน และ Lin et al. ยังกล่าวอีกว่า หากในอนาคตมีเทคโนโลยีการผลิตอะไหล่รถยนต์ใน ส่วนที่ใช้ไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น ควรมีการผลักดันให้เปลี่ยนรถโดยสารสาธารณะให้เป็นรถยนต์ไฮบริด เพื่อใช้ ประโยชน์ของระยะทางการวิ่งของรถยนต์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นลดลง นอกจากนี้ ในปี พ.ศ. 2558 ยังมีงานวิจัยของ Wu et al. [17] ได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนการเป็นเจ้าของใน รถยนต์ส่วนบุคคลในขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ที่ปริมาณการใช้รถยนต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งดูจากระยะ ทางการวิ่งของรถยนต์เฉลี่ยต่อวัน โดยชนิดของรถยนต์ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบนั้น ได้แก่ รถยนต์ สันดาปภายใน รถยนต์ไฮบริด และรถยนต์ไฟฟ้า พบว่ารถยนต์ไฟฟ้าที่มีระยะทางการวิ่งมาก จะมี ต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุด

สำหรับงานวิจัยที่วิเคราะห์ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้า เช่น งานวิจัยของ Nurhadi et al. ในปี พ.ศ. 2557 [18] ซึ่งวิเคราะห์ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารชนิดต่างๆ ได้แก่ รถโดยสารที่ใช้ก๊าซชีวภาพ ไบโอดีเซล และน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง รถโดยสารระบบไฮบริด และรถโดยสารไฟฟ้า แล้วนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาที่ยั่งยืนของเทคโนโลยีในรถโดยสาร สาธารณะที่ให้บริการในเมืองขนาดกลางของประเทศสวีเดน งานวิจัยนี้พบว่ารถโดยสารไฟฟ้ามีต้นทุน การเป็นเจ้าของต่ำที่สุด นอกจากนี้ Nurhadi et al. [19] ยังได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมจากงานวิจัยก่อน หน้าในปีเดียวกัน โดยทำการวิเคราะห์ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่มีระยะทางการวิ่ง

และชนิดของเทคโนโลยีการชาร์จที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2.1 พบว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่มีระยะทางการวิ่งที่สั้นกว่าประกอบกับการใช้เทคโนโลยีการชาร์จแบบปกติ (ใช้เวลาการชาร์จจนเต็มความจุแบตเตอรี่มากกว่า 3 ชั่วโมง) มีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุด เนื่องจากระยะการวิ่งที่สั้นกว่านี้เองทำให้รถโดยสารสามารถวิ่งได้เพียงพอต่อการชาร์จเพียงหนึ่งครั้งในช่วงเวลากลางคืนหรือเวลาพักรถ อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องทำการชาร์จในขณะที่ให้บริการจึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีการชาร์จอย่างรวดเร็วที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้รถโดยสารไฟฟ้าที่มีระยะทางการวิ่งที่สั้นกว่าและใช้เทคโนโลยีการชาร์จแบบปกติมีต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวมต่ำที่สุด นอกจากนี้ยังมีรายงานเทคโนโลยีทางเลือกของรถโดยสารในทวีปยุโรปในปี พ.ศ. 2555 [20] โดยรวบรวมข้อมูลจากบริษัทที่ให้บริการรถโดยสาร ประกอบกับได้รับความร่วมมือจากรัฐบาลในการเสาะหาเทคโนโลยีทางเลือกของรถโดยสารเพื่อให้บริการที่มีประสิทธิภาพและเป็นการพัฒนาอย่างยั่งยืน ซึ่งได้แก่ รถโดยสารเทคโนโลยีสันดาปภายในที่ใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหรือแม้แต่รถโดยสารระบบไฮบริด ตลอดจนรถรางไฟฟ้า รถโดยสารไฟฟ้า และรถโดยสารเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน พบว่าปัจจุบันต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวมของรถโดยสารเทคโนโลยีสันดาปภายในและรถโดยสารระบบไฮบริดมีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำกว่ารถโดยสารชนิดอื่นๆ แต่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต ซึ่งสำหรับต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าและรถโดยสารเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่จะลดลง โดยในปี พ.ศ. 2573 ต้นทุนการเป็นเจ้าของจะลดลงจนใกล้เคียงกับรถโดยสารชนิดอื่นซึ่งสามารถเป็นคู่แข่งในด้านการลงทุนได้ อีกทั้งยังได้เปรียบในด้านเทคโนโลยีที่มีการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์อีกด้วย



รูปที่ 2.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าโดย Nurhadi et al. [19]

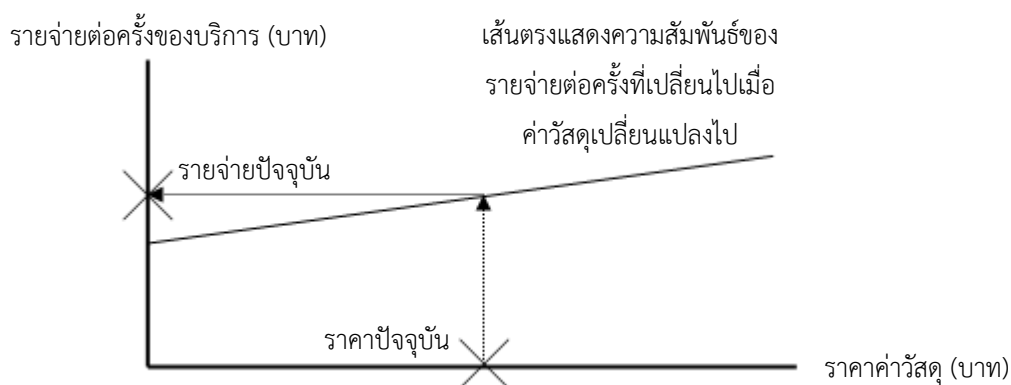
เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในแต่ละงานวิจัย พบว่าปัจจัยส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในแต่ละงานวิจัย ได้แก่ ค่าลงทุนเริ่มต้น ค่าพลังงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าแบตเตอรี่ และค่าระบบการชาร์จ ส่วนปัจจัยที่แตกต่างกันในแต่ละงานวิจัย ได้แก่ ค่าภาษีมลพิษ ค่าพนักงานขับรถโดยสาร ค่าติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ และค่าขายทิ้ง ซึ่งความแตกต่างของปัจจัยที่นำมาใช้นั้นอาจเกิดจากความแตกต่างของประเทศที่ทำการวิจัยแต่ละประเทศมีนโยบายที่แตกต่างกัน เช่น ค่าภาษีมลพิษในบางประเทศมีการคิดภาษีซึ่งแยกออกมาจากราคาขายของรถโดยสาร แต่สำหรับในประเทศไทยค่าภาษีมลพิษนั้นจะรวมอยู่ในตัวราคาขายของรถโดยสารอยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องแสดงค่าใช้จ่ายในส่วนนี้แยกออกมาต่างหาก ส่วนค่าพนักงานขับรถโดยสารนั้น ในบางงานวิจัยจะไม่พิจารณาถึงเนื่องจากค่าใช้จ่ายในส่วนนี้อาจมองได้ว่าเป็นค่าใช้จ่ายที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวรถโดยสาร แต่ในความเป็นจริงแล้วถ้าหากรถโดยสารไม่มีพนักงานขับรถ รถโดยสารก็ไม่สามารถให้บริการได้ จึงทำให้ปัจจัยในส่วนของคุณค่าพนักงานขับรถเป็นปัจจัยที่ทำให้การคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นครอบคลุมมากยิ่งขึ้น ส่วนค่าติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การติดตั้งระบบการชาร์จหรือการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ในบางกรณีสามารถนำค่าใช้จ่ายเหล่านี้ไปรวมอยู่กับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่นๆ ได้ เช่น การรวมค่าติดตั้งระบบการชาร์จและค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่เอาไว้ในค่าซ่อมบำรุง เนื่องจากในส่วนของค่าซ่อมบำรุงนั้นได้ครอบคลุมถึงการจ้างพนักงานสำหรับการดำเนินงานต่างๆ จึงไม่จำเป็นต้องแสดงค่าใช้จ่ายในส่วนของการติดตั้งหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆ และนอกจากนี้สำหรับแบตเตอรี่บางชนิดที่หมดอายุการใช้งานแล้วสามารถนำไปรีไซเคิลหรือแปรรูปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้แบตเตอรี่เหล่านี้ยังคงมีมูลค่าอยู่ถึงแม้จะหมดอายุการใช้งานแล้ว จึงสามารถนำมาคิดเป็นส่วนหนึ่งของต้นทุนการเป็นเจ้าของได้ ดังนั้นปัจจัยในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าลงทุนเริ่มต้น ค่าพลังงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าแบตเตอรี่ ค่าระบบการชาร์จ ค่าพนักงานขับรถโดยสาร และค่าขายทิ้ง

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงข้างต้นได้กล่าวถึงรถยนต์ส่วนบุคคลและรถโดยสารขนาดใหญ่เท่านั้น รวมถึงอัตราการใช้พลังงานของรถยนต์แต่ละชนิดส่วนใหญ่ นำมาจากอัตราการใช้พลังงานที่ทางผู้ผลิตรถยนต์ได้ระบุเอาไว้ ซึ่งอาจมีเงื่อนไขในการใช้งานรวมถึงสภาพการจราจรที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาในส่วนของรถโดยสารขนาดเล็ก ซึ่งมีน้ำหนักและบรรจุผู้โดยสารได้น้อยกว่ารถโดยสารขนาดใหญ่ และคาดว่าอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารขนาดเล็กจะมีอัตราการใช้พลังงานที่แตกต่างกับรถโดยสารขนาดใหญ่หรือรถยนต์ประเภทอื่นๆ ยิ่งไปกว่านั้นข้อมูลอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานจากรถโดยสารไฟฟ้าโดยตรงภายใต้การใช้งานและสภาพการจราจรจริงในปัจจุบัน เพื่อให้ค่าตัวแปรที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไปนั้นมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น

2.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

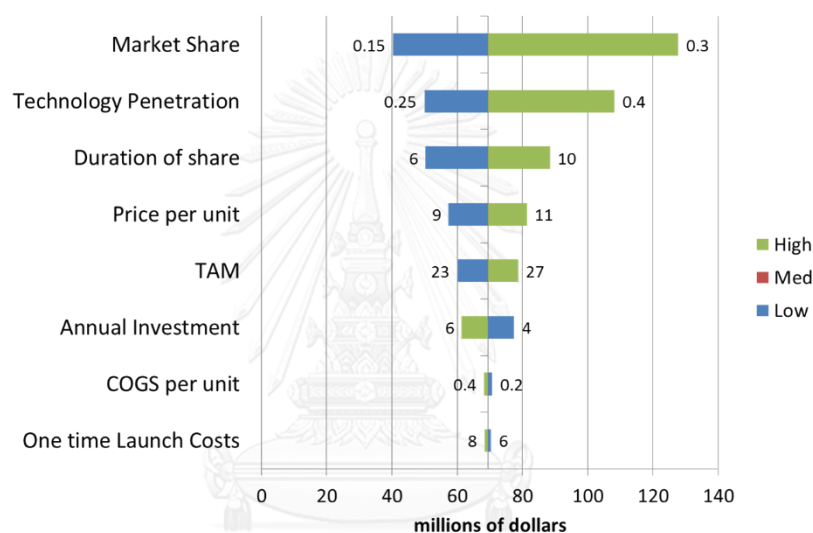
การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis) เป็นการวิเคราะห์ความไหวตัวหรือการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆที่ละหนึ่งตัวแปร สองตัวแปร หรือสามตัวแปร เพื่อช่วยให้ทราบถึงตัวแปรที่อาจก่อให้เกิดความผันแปร และใช้ประกอบกับการประเมินผลลัพธ์ให้ได้ออกมาตามที่ต้องการ สำหรับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของ จะทำให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรใดในต้นทุนการเป็นเจ้าของจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดและรองลงมา เพื่อนำไปสู่การวางแผนควบคุมไม่ให้ตัวแปรเหล่านั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงที่อาจทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวยังสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดจากข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนหรือมีความคลาดเคลื่อนได้อีกด้วย โดยผลลัพธ์มักถูกแสดงในรูปแบบของแผนผังใยแมงมุม (Spider plot graph) หรือแผนผังทอร์นาโด (Tornado chart)

แผนผังใยแมงมุม เป็นแผนภูมิเส้นที่เกิดจากการลากเส้นเชื่อมต่อกันระหว่างจุดต่อจุดตามลำดับ ซึ่งจุดต่างๆหรือผลลัพธ์เหล่านั้น ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวทีละตัว เช่น การวิเคราะห์ดูผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาค่าวัสดุต่อรายจ่ายต่อครั้งของบริการ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สมมติว่าปัจจุบันราคาค่าวัสดุอยู่ที่ 5 บาทต่อชิ้น ในขณะที่รายจ่ายต่อครั้งของการบริการอยู่ที่ 20 บาทต่อครั้ง โดยความสัมพันธ์ระหว่างรายจ่ายต่อครั้งและราคาค่าวัสดุคือ รายจ่ายต่อครั้ง = $10 + (2 \times \text{ราคาค่าวัสดุต่อชิ้น})$ หากราคาค่าวัสดุเพิ่มเป็น 7 บาทต่อชิ้น จะทำให้วิเคราะห์ได้ว่า รายจ่ายต่อครั้งของการบริการจะเพิ่มจาก 20 ต่อครั้ง เป็น 24 บาทต่อครั้ง รายจ่ายดังกล่าวจะทำให้ตัวเลขในการจัดงบประมาณต่างๆ ต้องเปลี่ยนแปลงไป



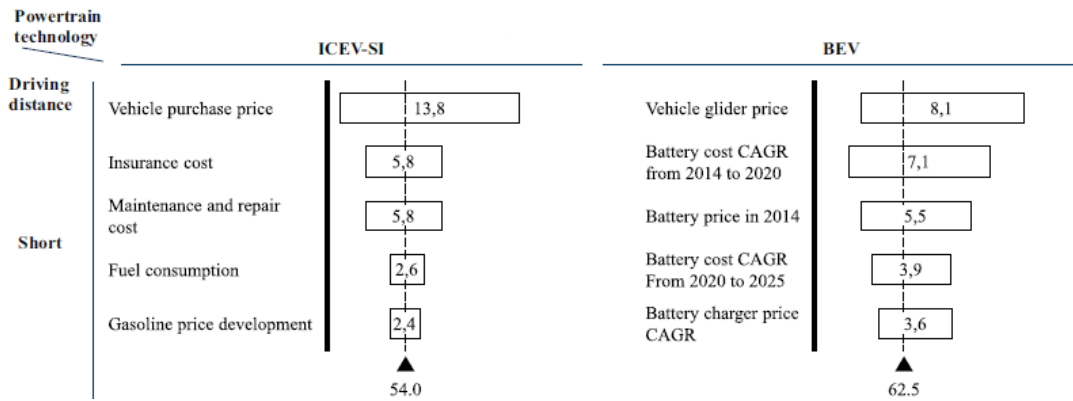
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแผนผังใยแมงมุมแสดงความอ่อนไหวของรายจ่ายต่อครั้งของการบริการตามการเปลี่ยนแปลงของค่าวัสดุ [21]

แผนผังทอร์นาโด เป็นแผนภูมิแท่งชนิดหนึ่งที่น่าเสนอแท่งข้อมูลในแนวนอน โดยที่แท่งข้อมูลที่มีความกว้างที่สุดจะถูกเรียงลำดับอยู่ด้านบนสุดของแผนภูมิ และแท่งข้อมูลที่มีความกว้างรองลงมาจะถูกจัดอยู่เป็นอันดับที่สอง และเรียงลำดับลงมาเรื่อยๆจนครบทุกแท่งข้อมูล ซึ่งทำให้ลักษณะของแผนภูมิที่ได้ จะคล้ายกับลักษณะของทอร์นาโดหรือพายุหมุน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แผนผังทอร์นาโด มักใช้ในการเปรียบเทียบช่วงการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ในแต่ละตัวแปร โดยจำเป็นต้องกำหนดกรณีฐาน กรณีขั้นต่ำ และกรณีขั้นสูง เพื่อสังเกตผลลัพธ์ของแต่ละตัวแปรอันเนื่องมาจากกรณีเหล่านี้ ซึ่งจะทำให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจนว่าผลลัพธ์ของตัวแปรใดมีช่วงการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด และให้ความสำคัญกับตัวแปรนั้นเป็นพิเศษ



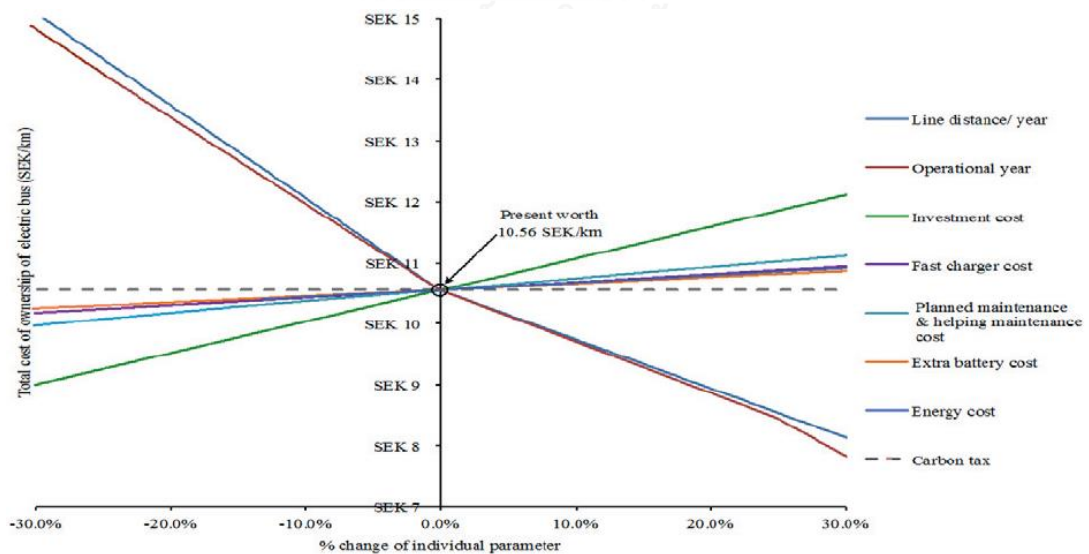
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแผนผังทอร์นาโด [22]

งานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของรถยนต์ไฟฟ้า เช่น งานวิจัยของ Lin et al. ในปี พ.ศ. 2556 [16] แสดงความอ่อนไหวของแต่ละปัจจัยในต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถยนต์ ได้แก่ ระบบมอเตอร์ ระบบแบตเตอรี่ ระยะทางการวิ่งต่อปี และราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ในรูปแบบของแผนผังใยแมงมุม โดยสังเกตได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดสองอันดับแรก คือ ระยะทางการวิ่งต่อปีและราคาน้ำมันเชื้อเพลิง และงานวิจัยของ Wu et al. ในปี พ.ศ. 2558 [17] ที่แสดงให้เห็นถึงต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถยนต์แต่ละชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรต่างๆในต้นทุนการเป็นเจ้าของ โดยแสดงผลลัพธ์ด้วยแผนผังทอร์นาโดดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดย Wu et al. [17]

สำหรับงานวิจัยที่มีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของรถโดยสารไฟฟ้า เช่น ในปี พ.ศ. 2557 งานวิจัยของ Nurhadi et al. [18] มีปัจจัยที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ระยะทางการวิ่ง ระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร ค่าลงทุนเริ่มต้น ค่าซ่อมบำรุง ค่าพลังงาน ค่าแบตเตอรี่ และค่าอุปกรณ์การชาร์จ แสดงผลด้วยแผนผังใยแมงมุมระหว่างการเปลี่ยนแปลงของค่าในแต่ละตัวแปรคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับต้นทุนการเป็นเจ้าของที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดสองอันดับแรกคือ ระยะทางการวิ่งและระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร ดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้ Nurhadi et al. ยังจับคู่และเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรแต่ละคู่แล้วนำผลกระทบของต้นทุนการเป็นเจ้าของไปแสดงในแผนผังเทอร์นาโดอีกด้วย โดยตัวแปรที่จับคู่กันแล้วส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดคือ ระยะทางการวิ่งกับระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร



รูปที่ 2.5 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดย Nurhadi et al. [18]

ในงานวิจัยอื่น ๆ ก็มีการนำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวไปใช้เช่นเดียวกัน เช่น ในปี พ.ศ. 2555 งานวิจัยของ Ong et al. [23] ได้นำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวไปใช้กับค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม เพื่อทำการทดสอบความแปรผันของราคาในแต่ละตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการผลิต ต่อมาในปี พ.ศ. 2557 งานวิจัยของ MacGillivray et al. [24] ก็มีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเช่นเดียวกัน โดยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรเพียงเล็กน้อย ก็ส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อค่าใช้จ่ายในการลงทุนเกี่ยวกับพลังงานทดแทนทางทะเล นอกจากผลกระทบแล้วงานวิจัยยังระบุถึงแนวทางในการลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนอีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2559 ประเทศไทยมีงานวิจัยของ Kerdlap และ Gheewala [15] ได้วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยปัจจัยที่ถูกละเลยเปลี่ยนแปลง คือ อัตราการใช้พลังงานของรถจักรยานยนต์และอัตราดอกเบี้ย ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการใช้พลังงานของรถจักรยานยนต์น้อยลงและอัตราดอกเบี้ยเพิ่มขึ้น จะสามารถทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์เชื้อเพลิงน้อยกว่ารถจักรยานยนต์ที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวเพียงแค่สองปัจจัยในต้นทุนการเป็นเจ้าของเท่านั้น ซึ่งสองปัจจัยนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยกว่าปัจจัยอื่นๆ เช่น การซ่อมบำรุงของรถจักรยานยนต์ที่แตกต่างกันของรถจักรยานยนต์ที่ต่างชนิดกัน เป็นต้น

จากงานวิจัยต่างๆข้างต้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงปัจจัยของต้นทุนการเจ้าของนั้น มีการแสดงผลทั้งในรูปแบบแผนผังใยแมงมุมและแผนผังทอร์นาโด ซึ่งแผนผังทอร์นาโดสามารถแสดงต้นทุนการเป็นเจ้าของที่ถูกละเลยเปลี่ยนแปลงไปตามอิทธิพลของปัจจัยต่างๆได้อย่างชัดเจน แต่ไม่สามารถแสดงให้เห็นได้ว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากหรือน้อยกว่ากัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแต่ละปัจจัยในสถานการณ์จริงนั้นไม่เท่ากัน คือ ปัจจัยที่มีอิทธิพลน้อยอาจจะส่งผลให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเปลี่ยนแปลงมาก เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของปัจจัยนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การแสดงผลในรูปแบบของแผนผังใยแมงมุมควบคู่กันเพื่อแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยและการแปรผันของต้นทุนการเป็นเจ้าของได้อย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงแสดงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยในรูปแบบของแผนผังใยแมงมุมและแสดงการแปรผันของต้นทุนการเป็นเจ้าของด้วยแผนผังทอร์นาโด นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงอิทธิพลและการแปรผันสำหรับแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกันของรถโดยสารไฟฟ้าอีกด้วย โดยชนิดของแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด แบตเตอรี่ลิเทียม และซูเปอร์คาปาซิเตอร์

2.4 ชนิดของแหล่งเก็บพลังงาน

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่ที่เก่าแก่ที่สุดและมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง แบตเตอรี่ตะกั่วกรดประกอบด้วยขั้วบวกซึ่งเป็นแคโทด ขั้วลบเป็นแอโนด และมีสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ข้อดีของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดนั้นมีมากมาย เช่น มีต้นทุนค่อนข้างต่ำ ผลิตได้ง่าย มีปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่รวดเร็ว และมีอายุการใช้งานที่ค่อนข้างนานเมื่อใช้งานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ จึงทำให้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดนั้นเป็นที่น่าสนใจและถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง [25] ตัวอย่างชนิดของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วพลวง (Lead Antimony Battery) แบตเตอรี่แห้ง (Valve Regulated Lead Acid Battery) แบตเตอรี่ตะกั่วแคลเซียม (Lead Calcium Battery) แบตเตอรี่ชนิดแห้ง (Absorbed Glass Mat Battery) แบตเตอรี่ชนิดเจล (Gel Cell) และแบตเตอรี่ดีไซเคิล (Deep Cycle Battery) [26] เนื่องด้วยเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้านั้นเป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ จึงทำให้ระยะแรกของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้านั้นมีการใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานานประกอบกับรถยนต์ไฟฟ้าใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงสำหรับการขับเคลื่อน สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดทั่วไปเมื่อถูกใช้งานภายใต้กระแสไฟฟ้าที่สูง จะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ได้จริงในแบตเตอรี่นั้นลดลงหรือมีช่วงการใช้งานที่แคบ [27] แบตเตอรี่ดีไซเคิลจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีช่วงการใช้งานที่กว้างยิ่งขึ้นเหมาะสำหรับใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบด้วยโลหะลิเทียมหรือโลหะผสมลิเทียมซึ่งใช้เป็นขั้วแอโนด ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีน้ำหนักเบา จึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่อย่างแพร่หลาย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความหนาแน่นของพลังงานมากถึง 100-150 Wh/kg ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ด้วยราคาของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากตัววัตถุดิบที่ใช้ผลิตแบตเตอรี่เองและการนำเข้าต่างๆ จึงทำให้เป็นอุปสรรคสำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในการแข่งขันกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น [28] อย่างไรก็ตาม ด้วยขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นถูกนำไปใช้อย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน และนอกจากนี้ด้วยคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เกือบเต็มความจุของแบตเตอรี่ภายใต้การใช้งานกระแสไฟฟ้าที่สูง [27] จึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้เปรียบแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในด้านของพลังงานที่เก็บสะสมในแบตเตอรี่ แบตเตอรี่จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งในชนิดของแบตเตอรี่ที่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้

เนื่องด้วยระยะเวลาการใช้งานที่สั้นและระยะเวลาการชาร์จที่นานของแบตเตอรี่ หลากๆชนิด จึงทำให้เกิดแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าขึ้นมาใหม่ เรียกว่า ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการเก็บและคายประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็วโดยมีการเสื่อมอายุตามกาลเวลาน้อย โดยทั่วไปซูเปอร์คาปาซิเตอร์มักใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเสริม เพื่อช่วยในการเริ่มต้นการหมุนของมอเตอร์ในอุปกรณ์ต่างๆ หรือแม้แต่ในรถยนต์ เช่น รถยนต์ไฮบริด และรถยนต์ไฟฟ้า ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกของรถยนต์กลับมาผ่านมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีความหนาแน่นพลังงานเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นแบตเตอรี่หลักในรถยนต์ได้ โดย Mir et al. [29] ได้ศึกษาเกี่ยวกับแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าหลักชนิดต่างๆของรถรางไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าหลักได้และตอบโจทยความต้องการของรถรางไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ Lu et al. [30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการระบบแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน พบว่าการสังเกตและการจัดการความต่างศักย์ กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิของซูเปอร์คาปาซิเตอร์แต่ละชุดอยู่ตลอดเวลา จะเป็นการป้องกันไม่ให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เก็บหรือคายประจุเกินกำหนด ซึ่งทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์และลดค่าใช้จ่ายของรถโดยสารได้ ด้วยความได้เปรียบของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่สามารถเก็บและคายประจุได้อย่างรวดเร็วโดยมีการเสื่อมอายุตามกาลเวลาน้อย ประกอบกับการใช้งานในรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้งานตลอดวันที่ต้องมีการเก็บและคายประจุไฟฟ้าอยู่เสมอ จึงทำให้อายุการใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นมากกว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและแบตเตอรี่ลิเทียมอยู่หลายเท่าตัว ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ชุดใหม่อยู่บ่อยครั้งในระยะเวลาการใช้งานที่เท่ากัน ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จึงเป็นหนึ่งในแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและถูกนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการพิจารณาในงานวิจัยนี้สำหรับเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานในรถโดยสารไฟฟ้า

จากข้อจำกัดของแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถโดยสารไฟฟ้าที่มีขนาดความจุไฟฟ้าน้อย ซึ่งไม่เพียงพอต่อการให้บริการรถโดยสาร ทำให้ชนิดของแบตเตอรี่ที่คาดว่าจะมีศักยภาพเพียงพอต่อการให้บริการคือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่มีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ส่วนข้อจำกัดในด้านระยะเวลาการชาร์จไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์อาจเป็นสิ่งที่สามารถเอาชนะข้อจำกัดได้ดีที่สุด ด้วยประสิทธิภาพการเก็บและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว แต่แบตเตอรี่ชนิดใดที่จะเหมาะสมกับรถโดยสารไฟฟ้าที่สุด จำเป็นจะต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป

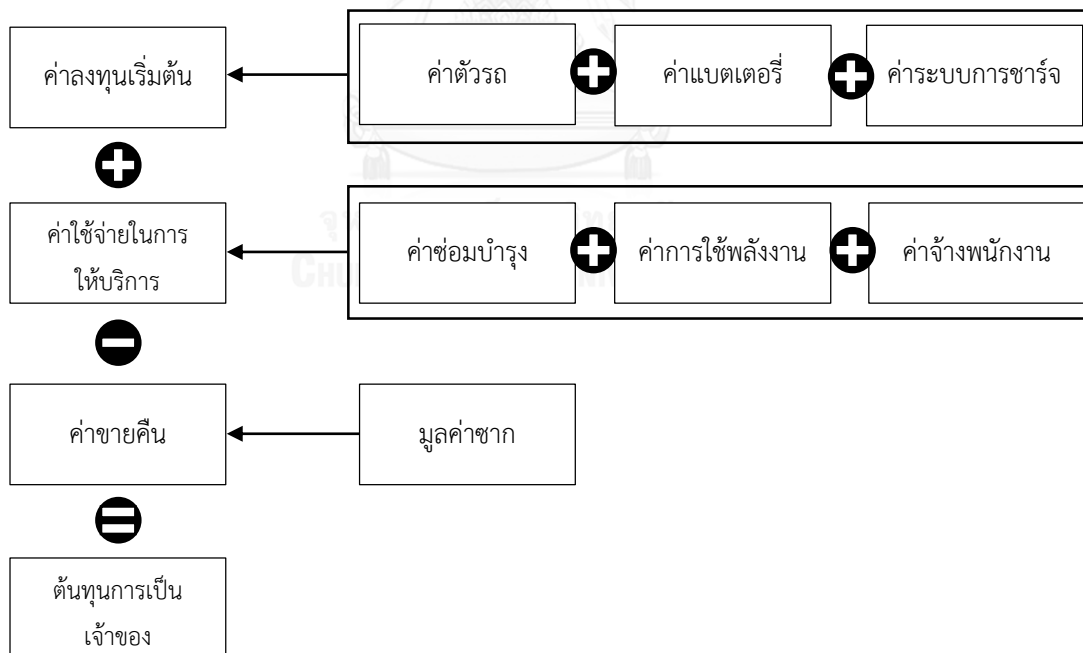
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของขึ้น เพื่อแสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการเป็นเจ้าของ หลังจากนั้นจึงอธิบายถึงรูปแบบการให้บริการโดยสารและลักษณะของรถโดยสารที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ แล้วจึงทำการเก็บข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร สำหรับนำไปทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารและออกแบบขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมต่อการให้บริการต่อไป หลังจากนั้นจึงพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

3.1 แบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของ

แบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารประกอบด้วยต้นทุนทั้งหมด 3 ด้าน ได้แก่ ค่าลงทุนเริ่มต้น ค่าใช้จ่ายในการให้บริการและค่าขายคืน ดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดของต้นทุนแต่ละด้านดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้า

3.1.1 ค่าลงทุนเริ่มต้น

ค่าลงทุนเริ่มต้น (Initial purchase cost) ของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละชนิดที่นำมาเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นจะมีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของเทคโนโลยีในรถโดยสาร สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าลงทุนเริ่มต้นสามส่วน คือ ค่าตัวรถ ค่าแบตเตอรี่และค่าระบบการชาร์จ โดยทั่วไปค่าระบบการชาร์จหมายถึงตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สถานีชาร์จ ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC to DC converter) และรวมถึงระบบกลไกหัวชาร์จด้วย เช่น ปลั๊กไฟฟ้า กลไกหัวชาร์จเหนือหลังคารถโดยสาร และการชาร์จแบบไร้สาย เป็นต้น สำหรับรถโดยสารที่มีระดับการชาร์จที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในส่วนระบบการชาร์จนั้นแตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือ รถโดยสารที่ชาร์จด้วยกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า จะมีค่าระบบการชาร์จที่สูงกว่า เนื่องจากจำเป็นต้องออกแบบให้ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับกำลังไฟฟ้ากำลังสูงได้ซึ่งมีต้นทุนที่มากกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าติดตั้งสถานีชาร์จอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปค่าติดตั้งจะมีค่าใช้จ่ายประมาณครึ่งหนึ่งของค่าระบบการชาร์จ [31] สำหรับค่าตัวรถหมายถึงต้นทุนของรถโดยสารทั้งหมดที่หักค่าแบตเตอรี่และค่าระบบการชาร์จออกไป ซึ่งในค่าตัวรถนี้เองจะรวมถึงมอเตอร์ขับเคลื่อน ตัวแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าตรงเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ (DC to AC converter) ระบบจัดการแบตเตอรี่บนรถโดยสาร และระบบปรับอากาศ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลจริงจากผู้ให้บริการรถโดยสารประกอบการสำรวจราคาขายจริงในตลาดด้วย

3.1.2 ค่าใช้จ่ายในการให้บริการ

ค่าใช้จ่ายในการให้บริการรถโดยสาร (Operating cost) ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร ค่าจ้างพนักงานขับรถโดยสาร ค่าดูแลรักษาซ่อมบำรุงรถด้วย โดยค่าดูแลรักษาซ่อมบำรุงสามารถแยกออกมาได้อีกสองส่วน คือ ส่วนของการดูแลรักษาและส่วนของการซ่อมบำรุง สำหรับส่วนของการดูแลรักษาประกอบไปด้วยการดูแลรักษาแบตเตอรี่ เครื่องยนต์หรือมอเตอร์ ระบบไฟฟ้าต่างๆในรถโดยสาร เป็นต้น สำหรับส่วนของการซ่อมบำรุงประกอบไปด้วยการเปลี่ยนและติดตั้งอะไหล่หรืออุปกรณ์ในรถโดยสารที่หมดอายุการใช้งานแล้ว รวมถึงแบตเตอรี่ที่หมดอายุการใช้งานด้วยซึ่งถูกแทนที่ด้วยแบตเตอรี่ชุดใหม่ แต่อย่างไรก็ตามการดูแลรักษาซ่อมบำรุงรถโดยสารนั้นจำเป็นต้องมีพนักงานเป็นผู้ดำเนินการ ดังนั้นค่าใช้จ่ายในส่วนนี้จึงรวมค่าจ้างพนักงานในการดูแลรักษาซ่อมบำรุงด้วยเช่นกัน สำหรับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนและพลังงานที่ใช้ในเครื่องปรับอากาศของรถโดยสาร ในงานวิจัยนี้จะวัดปริมาณการใช้พลังงานของรถโดยสารจากการให้บริการจริง โดยพิจารณาถึงความแปรผันของปริมาณการใช้พลังงานอันเนื่องมาจากผลของการจราจรอีกด้วย

3.1.3 ค่าขายคืน

ค่าขายคืน (Resale value) หมายถึง จำนวนเงินที่ได้จากการนำอุปกรณ์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วแต่ยังคงมีมูลค่าอยู่หรือเรียกว่า “มูลค่าซาก” (Salvage value) ไปขายให้กับผู้ที่รับซื้อเพื่อนำไป recycle แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ สำหรับในงานวิจัยนี้อุปกรณ์ที่หมดอายุแล้วแต่ยังคงมีมูลค่าอยู่ก็คือแบตเตอรี่ชุดเก่า โดยแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีการนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกัน ส่งผลให้แบตเตอรี่แต่ละชนิดมีมูลค่าซากที่แตกต่างกันไปด้วย

ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารจะถูกแสดงในรูปแบบของต้นทุนต่อกิโลเมตร โดยที่มีการพิจารณาถึงมูลค่าเงินตามเวลาด้วย โดยสมการการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของเป็นดังสมการที่ (3.1)

$$TCO = \frac{(IPC - RV \times PVF) \times CRF + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{AOC}{(1+i)^n}}{AKT} \quad (3.1)$$

| | | | |
|--------|------------|-----|--|
| โดยที่ | <i>TCO</i> | คือ | ต้นทุนการเป็นเจ้าของต่อกิโลเมตร (บาท/กิโลเมตร) |
| | <i>IPC</i> | คือ | ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (บาท) |
| | <i>RV</i> | คือ | ค่าขายคืน (บาท) |
| | <i>PVF</i> | คือ | แฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบัน = $1 / (1+i)^N$ |
| | <i>CRF</i> | คือ | แฟกเตอร์กอบกู้ทุน = $i(1+i)^N / ((1+i)^N - 1)$ |
| | <i>AOC</i> | คือ | ค่าใช้จ่ายในการให้บริการรถโดยสารต่อปี (บาท) |
| | <i>AKT</i> | คือ | ระยะทางการวิ่งของรถโดยสารต่อปี (กิโลเมตร) |
| | <i>i</i> | คือ | อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราคิดลด (เปอร์เซ็นต์) |
| | <i>N</i> | คือ | ระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร (ปี) |

ตัวแปรแฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบัน แฟกเตอร์กอบกู้ทุน อัตราดอกเบี้ย ระยะทางการวิ่งของรถโดยสารต่อปี และระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันสำหรับรถโดยสารทุกชนิดที่วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ โดยระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารจะกำหนดให้รถโดยสารมีการใช้งานเป็นเวลา 10 ปี ซึ่งเป็นระยะเวลาให้บริการโดยเฉลี่ยของรถโดยสารในปัจจุบัน ส่วนตัวแปรแฟกเตอร์มูลค่าปัจจุบันและแฟกเตอร์กอบกู้ทุนใช้ระยะเวลาการคำนวณอยู่ที่ 10 ปีเช่นเดียวกัน ด้วยอัตราดอกเบี้ย 2.0% ซึ่งเป็นดอกเบี้ยโดยเฉลี่ยในปัจจุบัน ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นค่าขายคืนจะถูกนำมาคิดเป็นมูลค่าเงินในปัจจุบันแล้วจึงนำมาหักลบกับค่าใช้จ่ายเริ่มต้นแล้วจึงคิดเป็นค่าใช้จ่ายรายปีด้วยแฟกเตอร์กอบกู้ทุน ส่วนค่าใช้จ่ายในการให้บริการต่อปีจะนำค่าใช้จ่ายรายปีใน

อนาคตมาคิดเป็นค่าใช้จ่ายรายปีในปัจจุบันแล้วนำมาเฉลี่ย ได้เป็นค่าใช้จ่ายรายปีเฉลี่ยในปัจจุบัน หลังจากนั้นค่าใช้จ่ายรายปีในปัจจุบันทั้งหมดจะถูกนำมาหารด้วยระยะทางการวิ่งของรถโดยสารต่อปี จึงได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นต้นทุนการเป็นเจ้าของ โดยที่ตัวแปรค่าใช้จ่ายเริ่มต้น ค่าขายคืน และค่าใช้จ่ายในการให้บริการต่อปี จะแตกต่างกันไปตามชนิดของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสาร

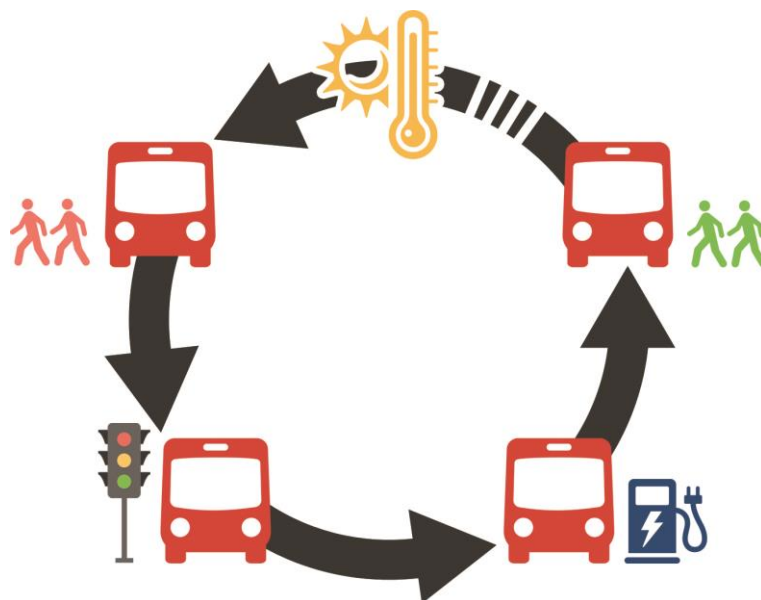
ปัจจุบันจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยให้บริการรถโดยสารที่เป็นรถโดยสารไฟฟ้าระบบไฮบริด ซึ่งมีแหล่งเก็บพลังงาน 2 แหล่ง คือ ก๊าซหุงต้มกับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด สำหรับรถโดยสารที่ใช้เทคโนโลยีนี้ จะไม่มีค่าใช้จ่ายในส่วนของการชาร์จ เนื่องจากข้อจำกัดของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ไม่สามารถใช้การชาร์จที่รวดเร็วได้จึงไม่มีสถานีชาร์จที่จุดรับส่งผู้โดยสารสำหรับรถโดยสารระบบไฮบริด แต่จะชาร์จที่อุ้งรถโดยสารนอกเส้นทางการเดินรถเท่านั้น นอกจากนี้สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด เมื่อแบตเตอรี่หมดอายุการใช้งาน ยังสามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ จึงทำให้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดยังคงมีมูลค่าซากอยู่สามารถนำไปขายได้ แต่สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้น ยังไม่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์ได้ในปัจจุบันจึงทำให้แบตเตอรี่สองชนิดนี้ไม่มีมูลค่าซาก

สำหรับค่าใช้จ่ายในการให้บริการรถโดยสารรายปีซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในด้านพลังงาน ค่าจ้างพนักงาน และค่าดูแลรักษาซ่อมบำรุงรถนั้น ในส่วนของค่าจ้างพนักงานและค่าดูแลรักษาซ่อมบำรุงจะนำมาจากบันทึกรายจ่ายในรถโดยสารระบบไฮบริดของผู้ให้บริการรถโดยสารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้บริการในปัจจุบัน แล้วนำค่าใช้จ่ายเหล่านี้ไปใช้กับรถโดยสารที่มีเทคโนโลยีชนิดอื่นๆ ซึ่งกำหนดให้มีค่าใช้จ่ายเท่ากัน สำหรับการเปลี่ยนแบตเตอรี่ชุดใหม่ในรถโดยสารนั้นจะดูจากอายุของแบตเตอรี่ซึ่งคำนวณจากรอบการใช้งานแบตเตอรี่กับพลังงานไฟฟ้าที่รถโดยสารใช้จริง โดยที่ กำหนดให้เมื่อแบตเตอรี่มีความลึกของการคายประจุ (Depth of discharge: DOD) ต่ำกว่า 80% จึงจะเปลี่ยนชุดแบตเตอรี่ สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่รถโดยสารใช้นั้น งานวิจัยนี้จะทำการบันทึกค่าพลังงานในขณะที่รถโดยสารไฟฟ้าให้บริการจริงในแต่ละรอบการวิ่งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย นอกจากนี้ยัง กำหนดให้อัตราค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานเท่ากับ 3.0 บาทต่อหน่วย ซึ่งเป็นอัตราค่าไฟฟ้าจริงในปัจจุบัน

3.2 รูปแบบการให้บริการของรถโดยสาร

รถโดยสารไฟฟ้าที่ให้บริการภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีลักษณะเส้นทางการเดินรถเป็นวงกลม ดังรูปที่ 3.2 เริ่มต้นที่สถานีต้นทาง รับผู้โดยสารออกจากสถานี วิ่งตามเส้นทางที่ถูกกำหนดไว้ ซึ่งมีการจอดรับส่งผู้โดยสารระหว่างทางตามจุดที่กำหนด แล้วจึงวนกลับมายังสถานีต้นทางอีกครั้ง งานวิจัยนี้จะกำหนดให้รถโดยสารมีการชาร์จไฟฟ้า 1 ครั้งที่สถานีต้นทาง สำหรับเส้นทางเดินรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 เป็นเส้นทางที่มีทั้งส่วนที่อยู่ภายในและภายนอกจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดย

ให้บริการตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 19.00 น. ทำให้การให้บริการในเส้นทางสาย 1 นี้ ประสบกับสภาพการจราจรโดยรอบมหาวิทยาลัยซึ่งมีสภาพการจราจรที่แตกต่างกันไปตามเวลาระหว่างวัน ถ้าหากสภาพการจราจรติดขัดก็จะทำให้รถโดยสารไฟฟ้าใช้พลังงานมากขึ้น



รูปที่ 3.2 รูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้า

3.3 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสาร

รถโดยสารปรับอากาศพิเศษภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสาย 1 เป็นรถโดยสารไฟฟ้าขนาด 7 ตัน รองรับผู้โดยสารได้สูงสุดประมาณ 45 คน ดังรูปที่ 3.3 ผลิตโดยบริษัท พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด (Energy for Environment Co., Ltd.) ให้บริการกับนิสิตและบุคลากรที่มาติดต่อกับทางมหาวิทยาลัย เส้นทางการเดินทางรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 คิดเป็นระยะทางรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 4.0 กิโลเมตร และรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 มีข้อมูลจำเพาะอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.3 สภาพภายนอกของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

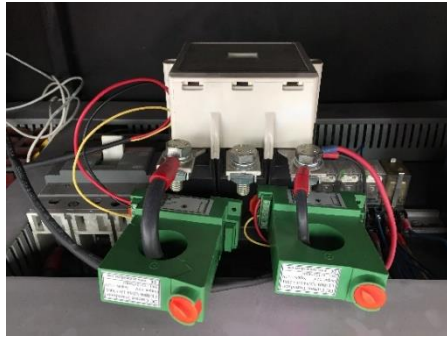
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1

| รายการ | ข้อมูล |
|------------------------|------------------------------------|
| ความจุสูงสุด (ที่นั่ง) | 45 (22) คน |
| ความกว้างฐานล้อ | 3.8 ม. |
| กว้าง / ยาว / สูง | 2.35 ม. / 8.2 ม. / 2.85 ม. |
| ชนิดของแบตเตอรี่ | ตะกั่วน้ำกรด (48 ลูก, 307.2 โวลต์) |
| อัตราเร็วสูงสุด | 80 กม. / ชม. |
| ขนาดเครื่องปรับอากาศ | 50,000 บีทียู |
| ระยะเวลาการชาร์จ | 6-8 ชั่วโมง |

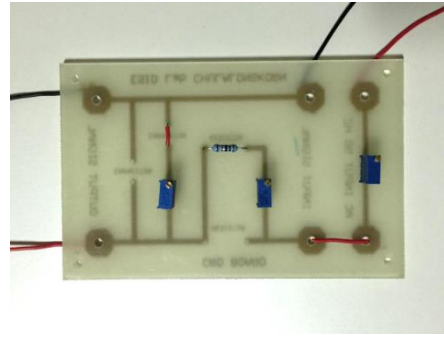
3.4 พลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร

การเก็บข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้น ในเบื้องต้นจะทำการเก็บข้อมูลสำหรับการนำไปสร้างแบบจำลองค่ากำลังจำเพาะของยานยนต์ (Vehicle Specific Power : VSP) ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป สำหรับทำนายการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยการใช้ข้อมูลจำนวนมาก เพื่อให้ข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้นครอบคลุมทุกๆสภาพการจราจรและสภาพแวดล้อม และนำไปออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในรถโดยสารซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป โดยข้อมูลพลังงานที่ใช้ในการเดินรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 จะมีทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ พลังงานระบบขับเคลื่อน และพลังงานระบบปรับอากาศ ซึ่งในการเก็บข้อมูลพลังงานจะทำการเก็บข้อมูลแยกกันระหว่าง 2 ส่วนนี้ เนื่องจากแบตเตอรี่ในรถโดยสารนี้แบ่งออกเป็น 2 ชุด สำหรับระบบขับเคลื่อนและระบบปรับอากาศ ในการเก็บข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารสำหรับงานวิจัยนี้ จะเก็บข้อมูลจากการให้บริการจริงตามปกติซึ่งมีจำนวนผู้โดยสารในแต่ละรอบแตกต่างกันออกไปรวมถึงสภาพการจราจรที่แตกต่างกันอีกด้วย และใช้รอบที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดเป็นตัวแทนการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าเพื่อกำหนดให้เป็นกรณีศึกษาที่เลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นได้สำหรับการคำนวณในขั้นตอนต่อไป

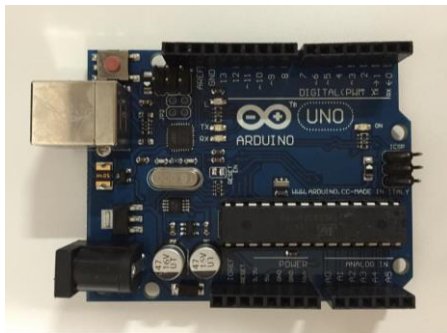
การเก็บข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้นจะทำการเก็บข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า และอัตราเร็วของรถโดยสาร ณ เวลาต่างๆ โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล ได้แก่ Hall Effect sensor ใช้อ่านค่ากระแสไฟฟ้า, Voltage divider circuit ใช้ลดค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่, Ublox NEO 6M GPS ใช้อ่านค่าอัตราเร็วของรถโดยสาร และ Arduino UNO R3 ใช้บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอัตราเร็ว ดังรูปที่ 3.4 โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บนรถโดยสารที่ใช้ทำการทดสอบดังรูปที่ 3.5



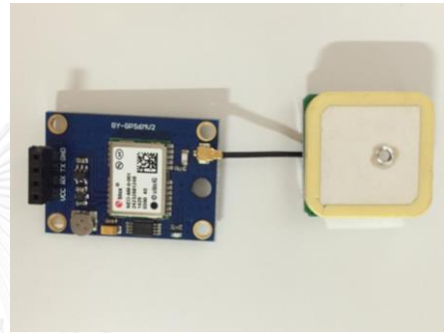
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล (ก) Hall Effect Sensor (ข) Voltage Divider Circuit
(ค) Arduino UNO R3 (ง) Ublox NEO 6M GPS



(ก)

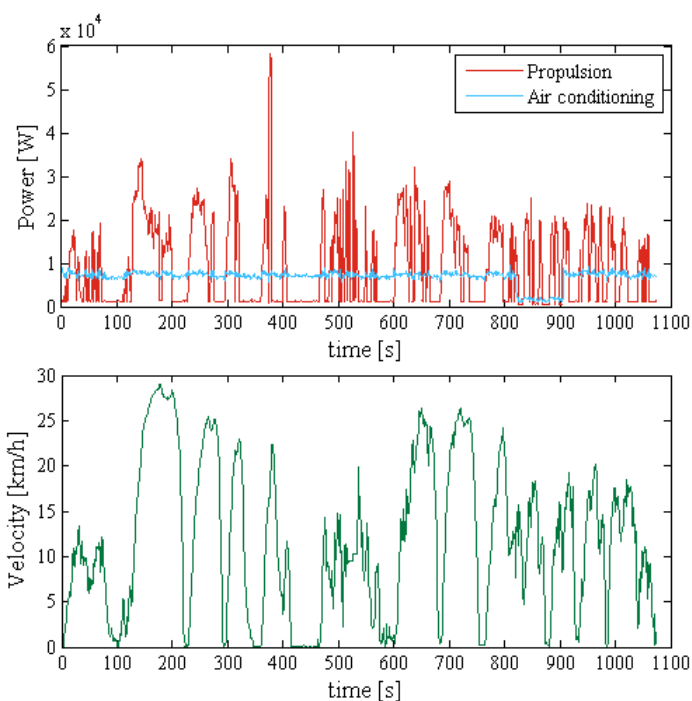


(ข)

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้ง (ก) ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล (ข) ตัวรับสัญญาณ GPS บนรถโดยสารไฟฟ้า

3.4.1 การตรวจสอบข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร

ตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 ในการให้บริการ 1 รอบ เป็นดังรูปที่ 3.6 และจากการเก็บข้อมูลทั้งหมด 7 ครั้ง สามารถสรุปเป็นตารางข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารต่อรอบ ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างรูปแบบข้อมูลพลังงานที่บันทึกจากรถโดยสารไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการใช้พลังงานและอัตราเร็วเฉลี่ยของรถโดยสารไฟฟ้าที่บันทึกได้ต่อรอบ

| ครั้งที่ | พลังงานระบบ ขับเคลื่อน (Wh) | พลังงานระบบ ปรับอากาศ (Wh) | พลังงานรวม (Wh) | อัตราเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.) |
|----------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| 1 | 1,648 | 1,230 | 2,878 | 7.50 |
| 2 | 2,273 | 1,711 | 3,984 | 9.84 |
| 3 | 2,370 | 1,402 | 3,772 | 8.72 |
| 4 | 2,594 | 1,483 | 4,077 | 11.14 |
| 5 | 2,728 | 1,442 | 4,170 | 8.59 |
| 6 | 2,642 | 1,971 | 4,613 | 9.77 |
| 7 | 2,660 | 1,854 | 4,515 | 10.91 |

จากการเก็บข้อมูลทั้งหมด 7 รอบ สำหรับการขับเคลื่อนพบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถโดยสารไฟฟ้าสาย 1 ใช้มีค่าประมาณ 58 kW ซึ่งจะพบได้จากในบางกรณี เช่น การออกตัวของรถโดยสารด้วยความเร่งสูง เป็นต้น ซึ่งจากรูปที่ 3.6 พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของการขับเคลื่อนจะอยู่เพียง 7.82 kW และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยขณะหยุดนิ่งมีค่าประมาณ 1 kW ซึ่งเป็นการใช้งานจากอุปกรณ์เสริมในรถโดยสาร เช่น ปั๊มลมที่ใช้ในระบบเบรกและระบบประตู สำหรับระบบปรับอากาศมีการใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยคงที่อยู่ที่ประมาณ 6.78 kW ซึ่งแตกต่างกับกำลังไฟฟ้าจากการขับเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในระหว่างการขับเคลื่อน จากตารางที่ 3.2 ข้อมูลการใช้พลังงานและอัตราเร็วเฉลี่ยของรถโดยสารไฟฟ้าที่บันทึกได้ต่อรอบ พบว่ารอบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมดเท่ากับ 4,613 Wh คิดเป็น 1,153 Wh/km

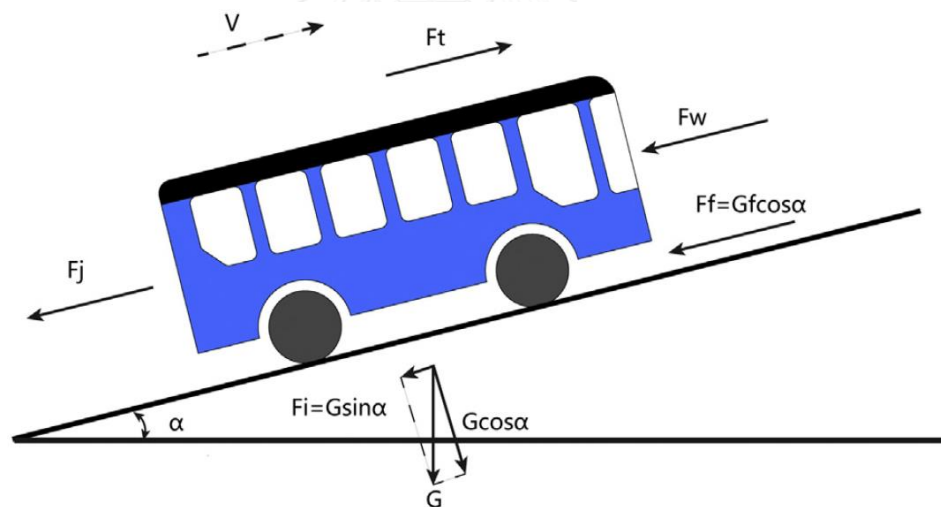
รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บข้อมูลใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่มีความจุแบตเตอรี่ 130 Ah ซึ่งพบว่าจากการทดสอบ เมื่อแบตเตอรี่ในรถโดยสารคันนี้เก็บพลังงานไฟฟ้าจะเต็มความจุของแบตเตอรี่ จะสามารถให้บริการได้จำนวนทั้งหมด 2 รอบ จากรายงานการทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าของผู้ให้บริการรถโดยสาร [32] พบว่าช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ในรถโดยสารนั้นจะอยู่ในช่วงค่าสถานะประจุไฟฟ้า 30-80% เพื่อเป็นการรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้พลังงานในแบตเตอรี่หมดระหว่างการให้บริการ ในปี พ.ศ. 2556 ทิพย์วัลย์ พิศาลปิติ และคณะ [33] ได้ทำการทดสอบเกี่ยวกับความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ลดลงอันเนื่องมาจากการใช้งานภายใต้กระแสไฟฟ้าสูง จากข้อมูลการใช้พลังงานในรถโดยสารที่บันทึกได้นั้น พบว่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่รถโดยสารไฟฟ้าใช้งานอยู่ที่ประมาณ 20 แอมแปร์ ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 130 Ah สามารถใช้พลังงานได้เพียง 69.6 Ah [33] และเมื่อพิจารณาาร่วมกับการใช้งานแบตเตอรี่ในช่วงค่าสถานะประจุไฟฟ้า 30-80% จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่สามารถนำมาใช้ได้จริงคือ 34.8 Ah ดังนั้นด้วยข้อมูลเหล่านี้จึงยืนยันได้ว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่นำมาทดสอบจึงสามารถให้บริการจริงได้เพียง 2 รอบ (ใช้พลังงานทั้งหมด 24 Ah) โดยพลังงานส่วนต่างที่เหลือ (10.8 Ah) คือพลังงานสำรองสำหรับป้องกันไม่ให้รถโดยสารพลังงานหมดระหว่างการให้บริการรวมถึงการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่เนื่องจากอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

3.4.2 การทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร

ในงานวิจัยก่อนหน้าของสิริอร [34] ให้นำเสนอการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถยนต์ด้วยการใช้ค่า VSP พบว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนในระดับที่สามารถยอมรับได้และมีความสะดวกในการนำไปใช้กับรถยนต์ที่มีเส้นทางการจราจรอื่นๆ อีกทั้งในการสร้างแบบจำลอง VSP นั้นจะใช้จำนวนข้อมูลในการสร้างที่น้อย ซึ่งทำให้ใช้ระยะเวลาการเก็บข้อมูลมีระยะเวลาที่สั้นกว่าการเก็บ

ข้อมูลทั้งหมดโดยตรง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่า VSP เข้ามาช่วยในการทำนายอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสาร ด้วยการสร้างแบบจำลอง VSP ของรถโดยสารขึ้นมา ซึ่งการใช้ค่า VSP นั้นถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย [35-37] รวมถึงการใช้แบบจำลอง VSP นั้น ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลได้อีกด้วย เนื่องจากไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลพลังงานในรถโดยสารทุกคัน เพียงแต่ใช้ข้อมูลการเดินทางจาก GPS ของรถโดยสารแต่ละคัน ซึ่งครอบคลุมถึงการแปรผันของสภาพการจราจรตลอดทั้งวันอีกด้วย นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิเคราะห์การเดินทางรถโดยสารในสายการเดินทางอื่นได้เช่นเดียวกัน

ค่ากำลังจำเพาะของยานยนต์เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความต้องการกำลังต่อมวลของยานยนต์ในระยะเวลาใดหนึ่งเวลาหนึ่ง ซึ่งนิยมใช้ในการทำนายอัตราการใช้พลังงานและอัตราการปล่อยมลพิษของยานยนต์ โดย VSP คำนวณได้จากกำลังที่ยานยนต์ต้องการในขณะนั้น ซึ่งประกอบไปด้วย แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance : F_f) แรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag force : F_w) แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force : F_i) และแรงต้านความเฉื่อย (Inertia resistance : F_j) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เทียบกับมวลรวมของยานยนต์ [36] ดังสมการที่ (3.2)



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์แรงสำหรับการสร้างแบบจำลอง VSP [36]

$$VSP = \frac{Power}{Mass} = \frac{(F_f + F_w + F_i + F_j)v}{m} \quad (3.2)$$

เมื่อแทนค่าแรงต้านการหมุนของล้อ (F_f) แรงต้านอากาศ (F_w) แรงโน้มถ่วงของโลก (F_i) แรงต้านความเฉื่อย (F_j) และจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการที่ (3.3)

$$VSP = \frac{[mgf \cos \alpha + 0.5\rho_a C_D A v^2 + mg \sin \alpha + (1 + \varepsilon_i)ma]v}{m}$$

$$VSP = [(1 + \varepsilon_i)a + gf + g \sin \alpha]v + 0.5\rho_a \frac{C_D A}{m} v^3 \quad (3.3)$$

| | | | |
|--------|-----------------|-----|---|
| โดยที่ | VSP | คือ | ค่ากำลังจำเพาะของยานยนต์ (kW/kg) |
| | v | คือ | ความเร็วของรถยนต์ (m/s) |
| | a | คือ | ความเร่งของรถยนต์ (m/s ²) |
| | g | คือ | ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (m/s ²) |
| | m | คือ | มวลรวมของรถยนต์ (kg) |
| | ρ_a | คือ | ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m ³) |
| | A | คือ | พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ (m ²) |
| | α | คือ | ความชันของพื้นถนน (องศา) |
| | f | คือ | สัมประสิทธิ์แรงต้านทานการกลิ้ง |
| | C_D | คือ | สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ |
| | ε_i | คือ | mass factor |

สำหรับรถโดยสารที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ มีน้ำหนักตัวรถเท่ากับ 7 ตัน โดยเส้นทางการเดินรถที่ใช้ทดสอบนั้น เป็นพื้นที่ที่อยู่ในเขตเมืองซึ่งสมมติให้พื้นถนนนั้นไม่มีความชัน ($\alpha = 0$) และมีสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการกลิ้งเท่ากับ 0.0135 ส่วนความหนาแน่นของอากาศ กำหนดให้เท่ากับ 1.1644 kg/m³ ซึ่งเป็นความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 30°C สำหรับสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ กำหนดให้เท่ากับ 0.6 และรถโดยสารมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 6.6975 m² (กว้าง 2.35 m สูง 2.85 m) สำหรับ mass factor กำหนดให้เป็น 0.1 และมีแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 m/s² จะได้สมการ VSP สำหรับรถโดยสารที่ใช้ทดสอบในงานวิจัยนี้ มีหน่วยเป็น kW/t ดังสมการที่ (3.4)

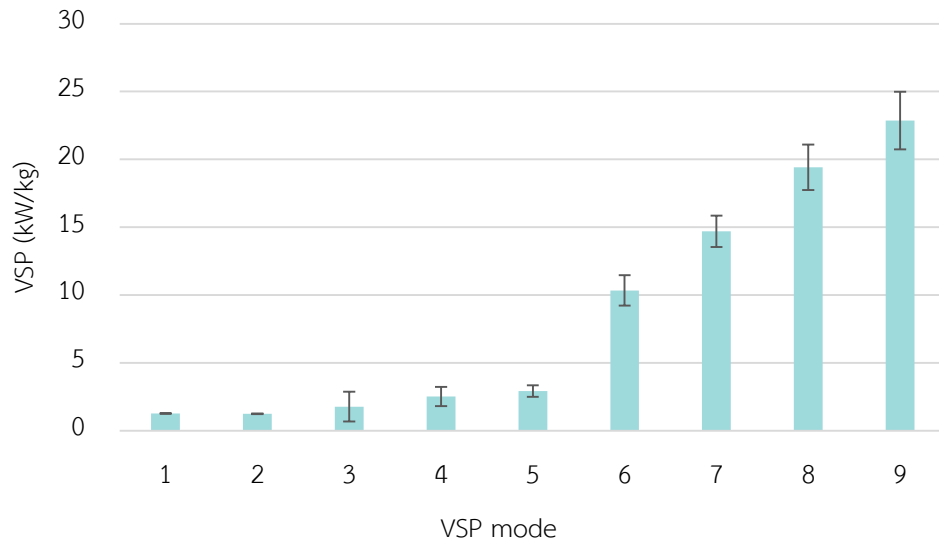
$$VSP = (1.1a + 0.132)v + 0.000334v^3 \quad (3.4)$$

ในการคำนวณค่า VSP จะถูกแบ่งออกเป็นโหมต ดังตารางที่ 3.3 ในแต่ละโหมตจะใช้ค่าอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยมาเป็นตัวแทนของโหมตนั้นๆ โดยหลักการในการแบ่งโหมตของ VSP [35] นั้นมีอยู่ 2 ข้อ คือ 1) แต่ละโหมตจะต้องมีค่าอัตราการใช้พลังงานที่แตกต่างจากโหมตอื่นๆ 2) การกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละโหมตจะต้องใกล้เคียงกันและไม่มาจากโหมตใดโหมตหนึ่งเป็นส่วนใหญ่

ตารางที่ 3.3 นิยามของ VSP แต่ละโหมด

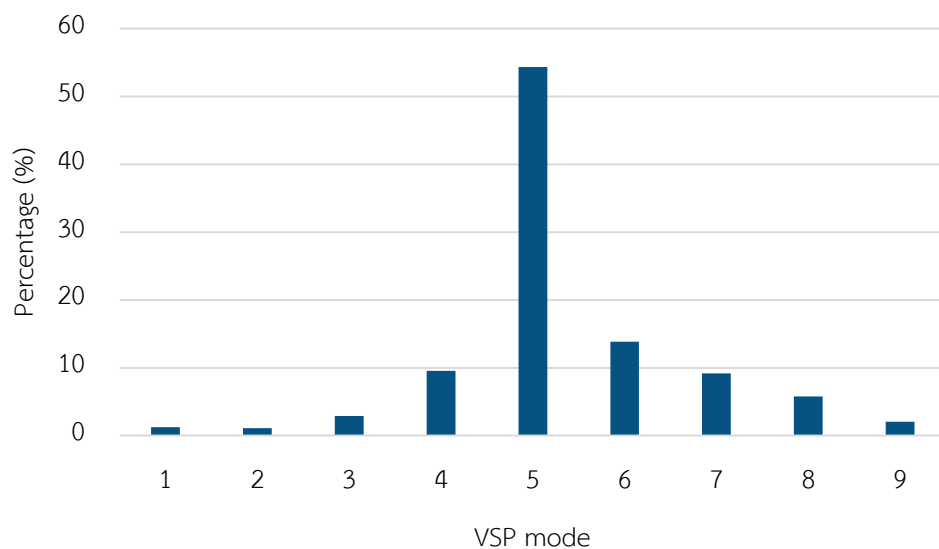
| VSP โหมด | ช่วง VSP |
|----------|----------------------|
| 1 | $VSP < -1.5$ |
| 2 | $-1.5 \leq VSP < -1$ |
| 3 | $-1 \leq VSP < -0.5$ |
| 4 | $-0.5 \leq VSP < 0$ |
| 5 | $0 \leq VSP < 0.5$ |
| 6 | $0.5 \leq VSP < 1$ |
| 7 | $1 \leq VSP < 1.5$ |
| 8 | $1.5 \leq VSP < 2$ |
| 9 | $VSP \geq 2$ |

ในการสร้างแบบจำลอง VSP จะใช้ข้อมูลพลังงานที่ใช้จริงในรถโดยสารที่เก็บข้อมูลมาในหัวข้อ 3.4.1 มาเป็นข้อมูลสำหรับการทำแบบจำลอง VSP ซึ่งผลการสร้างแบบจำลอง VSP ของรถโดยสารที่ใช้ทดสอบรวมถึงความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยใน VSP แต่ละโหมดในช่วงความเชื่อมั่น 95% เป็นดังรูปที่ 3.8 พบว่าแนวโน้มของค่า VSP ในโหมดที่ 1 ถึง 4 มีแนวโน้มของค่า VSP ที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเป็นช่วงของค่า VSP ที่มีค่าเป็นลบ ซึ่งเป็นช่วงที่รถโดยสารทำการเบรกเพื่อหยุดรถ จึงไม่มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ส่วนในโหมดที่ 6 ถึง 9 ค่า VSP มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามโหมดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงของค่า VSP ที่มีค่าเป็นบวก ซึ่งเป็นช่วงที่รถโดยสารทำการเร่งเพื่อเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในกรณีที่มีการเร่งน้อยหรือมีค่า VSP ที่ต่ำ รถโดยสารจึงใช้พลังงานในการเคลื่อนที่น้อย ในทางกลับกันเมื่อมีการเร่งที่มากขึ้นหรือมีค่า VSP สูงขึ้น ก็จะมีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนที่สูงขึ้นตามไปด้วย และนอกจากนี้การขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงก็ยิ่งส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนสูงเช่นเดียวกัน ส่วนความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ VSP แต่ละโหมดพบว่ามีความเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ประมาณ 10% ของค่าเฉลี่ยแต่ละโหมด ยกเว้นในโหมดที่ 3 และ 5 ที่มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากถึง 60% เนื่องจากเป็นโหมดที่สลับไปมาระหว่างการเร่งกับการเบรกในช่วงเวลาอันสั้น ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลอัตราการใช้พลังงานมีการแกว่งขึ้นลงเป็นช่วงกว้าง รวมกับความล่าช้าที่อาจเกิดขึ้นได้ระหว่างการบันทึกข้อมูล จึงทำให้มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่าโหมดอื่นๆ



รูปที่ 3.8 แบบจำลอง VSP ของรถโดยสารที่ใช้ทดสอบ

การกระจายตัวของข้อมูลใน VSP แต่ละโหมดเป็นดังรูปที่ 3.9 พบว่าจำนวนข้อมูลใน VSP โหมดที่ 5 มีจำนวนข้อมูลมากที่สุด เนื่องจากลักษณะการวิ่งของรถโดยสารที่ใช้ทดสอบ มีการขับเคลื่อนที่ใช้ความเร็วค่อนข้างต่ำและมีการเร่งที่นุ่มนวล ส่วนจำนวนข้อมูลใน VSP โหมดอื่นๆ มีการลดต่ำลงไปจากโหมด 6 ไปยังโหมด 9 และในทางกลับกันจากโหมด 4 ไปยังโหมด 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลใน VSP นี้เอง อาจใช้เป็นวิธีการสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะของสภาพการจราจรในเส้นทางที่ใช้เก็บข้อมูลได้วิธีหนึ่ง



รูปที่ 3.9 การกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละ VSP โหมดสำหรับเส้นทางรถสาย 1

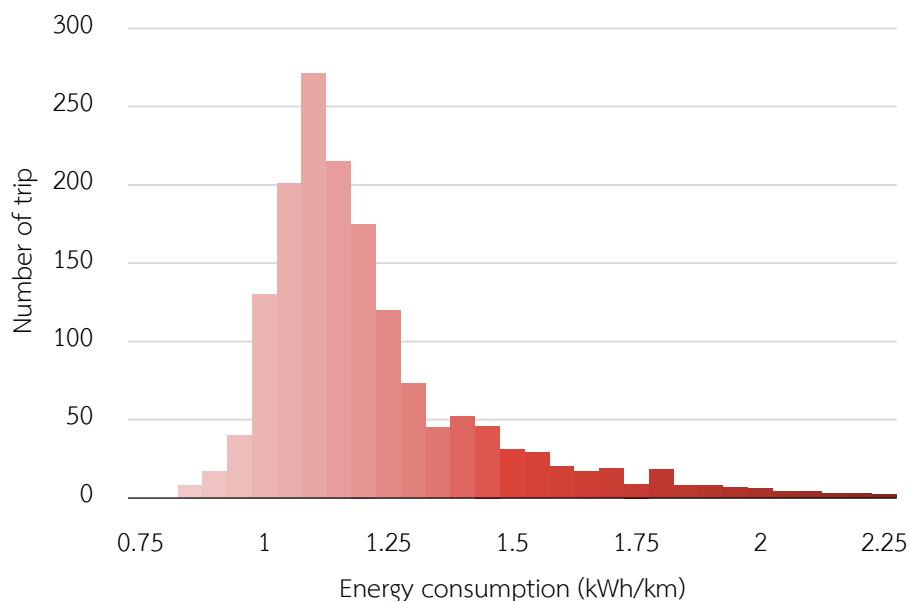
สำหรับการคำนวณค่าอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร เป็นดังสมการที่ (3.5)

$$E = \frac{T \times \frac{1}{100} \sum_{i=1}^N D_i W_i}{VKT} \quad (3.5)$$

| | | | |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | E | คือ | อัตราการใช้พลังงาน (kWh/km) |
| | N | คือ | จำนวนโหนดของ VSP |
| | T | คือ | เวลาการวิ่ง 1 รอบ (ชั่วโมง) |
| | i | คือ | โหนดของ VSP |
| | D_i | คือ | การกระจายตัวของข้อมูลใน VSP โหนด i (%) |
| | W_i | คือ | อัตราการใช้พลังงานใน VSP โหนด i (kW) |
| | VKT | คือ | ระยะทางการวิ่ง 1 รอบ (กิโลเมตร) |

ในระหว่างการให้บริการรถโดยสารนั้น สภาพการจราจรและสภาพแวดล้อมทั่วไปของเส้นทางที่ใช้วิ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร เช่น เมื่อรถโดยสารประสบกับสภาพการจราจรที่ติดขัด ก็จะทำให้รถโดยสารใช้พลังงานมากขึ้นกว่าปกติ ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารมีความแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงทำการเก็บข้อมูลการวิ่งของรถโดยสารจาก GPS เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้รถโดยสารทั้งหมด 6 คันในการเก็บข้อมูล ทำให้ได้ข้อมูลการวิ่งของรถโดยสารทั้งหมด 1,596 รอบ แล้วจึงนำข้อมูลจาก GPS ซึ่งได้แก่ ความเร็ว ความเร่งที่วินาทีต่างๆ และระยะเวลาการวิ่งต่อรอบ ไปใช้กับแบบจำลอง VSP เพื่อทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร โดยการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยแบบจำลอง VSP นั้นจะทำนายเฉพาะพลังงานระบบขับเคลื่อนเท่านั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ระบบปรับอากาศของรถโดยสารทำงานตลอดการให้บริการ ซึ่งจะมีอัตราการใช้พลังงานระบบปรับอากาศที่เท่ากับ 6.78 kWh/hour ภายใต้ระยะทางการวิ่งของรถโดยสารสายนี้ซึ่งเท่ากับ 4.0 กิโลเมตร พบว่าการกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเป็นดังรูปที่ 3.10

จากการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยการเก็บข้อมูลการวิ่งของรถโดยสารจำนวน 6 คัน เป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal distribution) ซึ่งมีอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเฉลี่ยแบบล็อกเท่ากับ 1.2046 kWh/km และความเบี่ยงเบนของข้อมูลแบบล็อกเท่ากับ 0.2677 kWh/km



รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลในรถโดยสารแต่ละคันพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบ ล็อกปกติเช่นเดียวกันทั้ง 6 คัน โดยมีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดง ในตารางที่ 3.4 พบว่าอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยแบบล็อกมีความแตกต่างกันไม่เกิน 10% และความ เบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.23 – 0.30 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแปรผันของสภาพการจราจร ในเส้นทางที่ใช้เก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ จะทำให้อัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้ามีการกระจาย ตัวเช่นเดียวกับในรูปที่ 3.10 เสมอ และคาดว่า การกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร ไฟฟ้าที่มีเส้นทางเดินรถอื่นๆ ที่มีลักษณะเส้นทางคล้ายกับเส้นทางเดินรถในงานวิจัยนี้ จะม ีการกระจายตัวแบบล็อกปกติเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ข้อมูลในรถโดยสารที่ใช้เก็บข้อมูล

| คันที่ | ค่าเฉลี่ยแบบล็อก | ความเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบล็อก |
|--------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 1.1952 | 0.2351 |
| 2 | 1.2646 | 0.2952 |
| 3 | 1.2188 | 0.2905 |
| 4 | 1.2377 | 0.3081 |
| 5 | 1.1537 | 0.2355 |
| 6 | 1.2044 | 0.2691 |

ในกรณีที่ให้นำหลักการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไปใช้กับเส้นทางการเดินรถโดยสารระยะสั้นเส้นทางอื่นในเขตเมือง ด้วยการใช้จำนวนข้อมูลการเดินรถจำนวนน้อยซึ่งไม่ครอบคลุมการแปรผันของสภาพการจราจร งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการประมาณอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าที่เป็นค่าเฉลี่ยจากการการแปรผันของสภาพการจราจรด้วยการใช้การกระจายตัวแบบล็อกปกติที่ได้จากการคำนวณข้างต้น เมื่อทราบว่าอัตราการใช้พลังงานที่ได้จากข้อมูลจำนวนน้อยมีค่าความน่าจะเป็นอยู่เท่าไรในการแจกแจงแบบล็อกปกติ ก็จะสามารถนำไปสร้างการกระจายตัวแบบล็อกปกติของข้อมูลชุดใหม่ด้วยความเบี่ยงเบนมาตรฐานเดิม (0.2677 kWh/km) และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลต่อไป

ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง VSP นั้น งานวิจัยนี้ใช้วิธีการนำข้อมูลจากการวิ่งจริงแต่ละรอบทั้งหมด 7 รอบ มาสร้างเป็นแบบจำลอง VSP แล้วทำนายอัตราการใช้พลังงานที่รถโดยสารใช้ขับเคลื่อนจากขั้นตอนที่ได้กล่าวถึงข้างต้น แล้วจึงเปรียบเทียบกับการคำนวณอัตราการใช้พลังงานที่รถโดยสารใช้ขับเคลื่อนโดยตรงจากข้อมูลในรอบเดียวกัน ด้วยการใช้ค่ากำลังไฟฟ้าที่วินาทีต่างๆมาคำนวณเป็นพลังงานจริงที่รถโดยสารใช้ขับเคลื่อน โดยอัตราการใช้พลังงานที่ได้จากแบบจำลอง VSP และอัตราการใช้พลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยตรงของข้อมูลแต่ละรอบ แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่าอัตราการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนที่ได้จากการทำนายมีความแตกต่างกับอัตราการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลจริงมากที่สุดเท่ากับ 4.4% อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับและนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไปได้

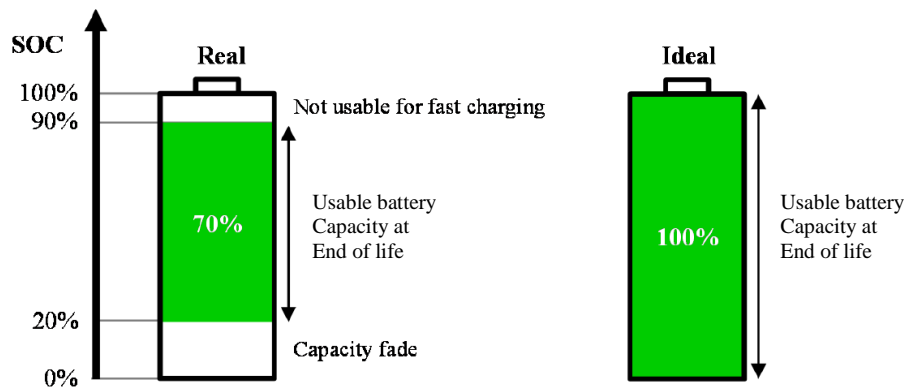
ตารางที่ 3.5 ตารางเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารของระบบขับเคลื่อนที่ได้จากข้อมูลจริงและการทำนาย

| ครั้งที่ | อัตราการใช้พลังงานขับเคลื่อนจริง (kWh/km) | อัตราการใช้พลังงานขับเคลื่อนที่ทำนาย (kWh/km) | ความแตกต่าง (%) |
|----------|---|---|-----------------|
| 1 | 0.405 | 0.399 | 1.328 |
| 2 | 0.577 | 0.552 | 4.406 |
| 3 | 0.612 | 0.609 | 0.461 |
| 4 | 0.659 | 0.654 | 0.715 |
| 5 | 0.688 | 0.691 | 0.360 |
| 6 | 0.678 | 0.678 | 0.055 |
| 7 | 0.675 | 0.695 | 2.866 |

3.5 การออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้า

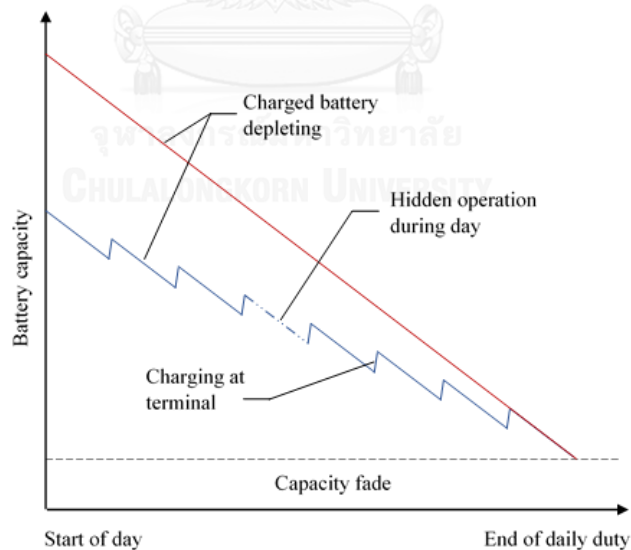
หลังจากทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารแล้ว จึงนำอัตราการใช้พลังงานไปออกแบบขนาดแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสาร เพื่อให้รถโดยสารมีพลังงานไฟฟ้าเพียงพอต่อการให้บริการตลอดวัน การออกแบบขนาดแบตเตอรี่สำหรับการคำนวณในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการออกแบบของ Rogge et al. [38] โดยมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ได้แก่ หาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในรถโดยสารตลอดทั้งวัน หาระยะเวลาการชาร์จ และคำนวณกำลังไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ที่สามารถทำให้รถโดยสารมีพลังงานไฟฟ้าเพียงพอต่อการบริการตลอดทั้งวัน แล้วจึงนำไปกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ขั้นต่ำที่รถโดยสารต้องการต่อไป เพื่อให้รถโดยสารมีต้นทุนในส่วนของแบตเตอรี่ต่ำที่สุด

ช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น แสดงดังรูปที่ 3.11 เนื่องจากตามปกติแล้ว ความจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะไม่คงที่ตลอดอายุการใช้งาน โดยความจุจะลดลงไปตามอายุการใช้งานแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความจุของแบตเตอรี่เหลือน้อยกว่า 80% จะถือว่าแบตเตอรี่ก้อนนั้นหมดอายุการใช้งาน ดังนั้นจึงจำกัดช่วงการใช้งานแบตเตอรี่ ไม่ให้แบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าต่ำกว่า 20% เพื่อเป็นการเผื่อความจุของแบตเตอรี่ในขณะที่แบตเตอรี่นั้นหมดอายุการใช้งานแล้ว ส่วนสำหรับการชาร์จที่รวดเร็วนั้นจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เกินแรงดันสูงสุดเมื่อทำการชาร์จในขณะที่แบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าเกือบเต็ม จึงจำเป็นต้องลดระดับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ซึ่งทำให้มีอัตราการชาร์จที่ช้าลง ไม่เหมาะสมต่อการชาร์จที่รวดเร็ว ดังนั้นการชาร์จที่รวดเร็วจึงสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้เพียงประมาณ 90% ของความจุทั้งหมด เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบขนาดแบตเตอรี่ จะกำหนดให้แบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมอุดมคติ ที่มีช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่เป็น 100% และเมื่อได้ขนาดแบตเตอรี่ออกมาแล้ว จะถูกนำไปคูณด้วยแฟกเตอร์ 1.43 [38] เพื่อเพิ่มขนาดของแบตเตอรี่ให้ใหญ่ขึ้นเสมือนกับว่ามีการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ 20-90% ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ในสภาวะการใช้งานจริง สำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะคูณด้วยแฟกเตอร์ 2.00 เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะประมาณได้ว่ามีอัตราการลดลงอย่างเป็นเส้นตรง ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังนั้นเพื่อให้หม้อแปลงไฟฟ้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ตามปกติ จึงกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าของซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 150 โวลต์ หรือมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ และนอกจากนี้เพื่อให้ขนาดของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น สำหรับการชาร์จที่รวดเร็วจึงกำหนดให้มีประสิทธิภาพในการชาร์จเท่ากับ 0.95



รูปที่ 3.11 ช่วงการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [38]

สำหรับการออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างกับงานวิจัยข้างต้น โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดระยะเวลาการชาร์จและกำลังการชาร์จขึ้น โดยกำหนดให้มีการชาร์จที่สถานีต้นทางทุกๆครั้งที่รถโดยสารวิ่งมาถึง แล้วจึงนำไปคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ขั้นต่ำต่อไป ซึ่งสถานการณ์การชาร์จนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าการชาร์จทุกๆครั้งที่สถานีต้นทาง (เส้นล่าง) จะทำให้ขนาดของแบตเตอรี่ขั้นต่ำในรถโดยสารนั้นเล็กกว่าขนาดของแบตเตอรี่ในกรณีที่ไม่มีการชาร์จระหว่างวัน (เส้นบน) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนแบตเตอรี่ของรถโดยสารที่ทำให้ต้นทุนแบตเตอรี่นั้นลดลง และยังส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.12 สถานการณ์การชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้า [39]

3.5.1 ผลของมวลต่อพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร

เนื่องด้วยมวลของแหล่งเก็บพลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละชนิด มีน้ำหนักที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถโดยสารนั้นเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานในรถโดยสารนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [39]

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของมวลที่มีต่อการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ระหว่างมวลและพลังงานที่ใช้มีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.6)

$$E = 0.1518 W + 360.87 \quad (3.6)$$

โดยที่ E คือ พลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร (Wh)
 W คือ มวลรวมของรถโดยสาร (กิโลกรัม)

รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้มีน้ำหนักรถโดยสารเท่ากับ 4,250 กิโลกรัม ซึ่งแตกต่างกับรถโดยสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แต่จะกำหนดให้ผลของมวลต่อพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้นมีความสัมพันธ์เช่นเดียวกัน โดยเมื่อมวลรวมของรถโดยสารเปลี่ยนแปลงไป 10% จะทำให้พลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้นเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 6.04%

3.6 ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนของต้นทุนการเป็นเจ้าของและส่วนของการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยในส่วนของต้นทุนการเป็นเจ้าของจะพิจารณาด้วยข้อมูลกรณีฐานสำหรับนำต้นทุนการเป็นเจ้าของมาเปรียบเทียบกับเทียบระหว่างรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี ส่วนการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะพิจารณาถึงข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปจากกรณีฐานและสังเกตต้นทุนการเป็นเจ้าของที่เปลี่ยนแปลงไป

3.6.1 ข้อมูลสำหรับต้นทุนการเป็นเจ้าของ

งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานต่างๆ ได้แก่ รถโดยสารที่ใช้ระบบไฮบริด (รถโดยสารที่ให้บริการในปัจจุบัน) รถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ เนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดให้รถโดยสารมีการชาร์จไฟฟ้าในขณะที่จอดรับส่งผู้โดยสารที่สถานี ซึ่งระยะเวลาในการจอดรับส่งผู้โดยสารนั้นมีระยะเวลาที่สั้น ดังนั้นเพื่อให้รถโดยสารสามารถสะสมพลังงานไฟฟ้าได้ปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น จึงต้องใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่รวดเร็วเข้ามาช่วย

รถโดยสารไฮบริดที่ให้บริการในปัจจุบันเป็นระบบไฮบริดแบบอนุกรมที่มีแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรด เนื่องจากลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดชนิดนี้ ที่จำกัดกระแสไฟฟ้าในการชาร์จสูงสุดอยู่ที่ 25 แอมแปร์ [40] (ใช้เวลาการชาร์จจนเต็มความจุแบตเตอรี่ 5-6 ชั่วโมง) จึงไม่สามารถใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่รวดเร็วได้ แต่สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นมีลักษณะจำเพาะซึ่งมีระยะเวลาในการชาร์จจนเต็มความจุเป็น 1 ชั่วโมง [41] และ 5 นาที [42] ตามลำดับ ภายใต้ขนาดความจุที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ จึงทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีศักยภาพที่เพียงพอต่อการใช้เทคโนโลยีการชาร์จที่รวดเร็ว

ด้วยความแตกต่างกันของเทคโนโลยีการชาร์จของแหล่งเก็บพลังงานแต่ละชนิด ทำให้ขนาดของความจุของแต่ละแหล่งเก็บพลังงานแตกต่างกันไปด้วย ในหัวข้อ 3.4 ได้ระบุไว้ว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้เก็บข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้น ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าจำนวน 48 ลูก ดังนั้นน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ในการเก็บข้อมูล อ้างอิงจากข้อมูลจากผู้ผลิตแบตเตอรี่ [40] ดังแสดงในตารางที่ 3.6 สำหรับการกำหนดขนาดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ในขั้นต้นจะกำหนดให้รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แหล่งเก็บพลังงาน 2 ชนิดนี้ มีการชาร์จเพียง 1 ครั้งต่อรอบที่สถานีต้นทางเป็นเวลา 5 นาที (ระยะเวลาในการปล่อยรถโดยสารในปัจจุบัน) ด้วยข้อกำหนดสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมที่ชาร์จด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 1C โดยที่ซีเรท (C-Rate) คือหน่วยของการชาร์จ จะคิดเป็นจำนวนเท่าของความจุของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ขนาด 10 Ah ชาร์จที่ 1C หมายความว่า จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 10 แอมแปร์ เข้าแบตเตอรี่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แบตเตอรี่จึงจะมีประจุเต็ม ถ้าชาร์จที่ 2C หมายความว่า จ่ายกระแสไฟฟ้าขนาด 20 แอมแปร์ เข้าแบตเตอรี่เป็นเวลา 0.5 ชั่วโมง แบตเตอรี่จึงจะมีประจุเต็ม สำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะใช้การชาร์จที่ 63.5 กิโลวัตต์ ซึ่งการชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่กำหนดนั้น เป็นระดับการชาร์จปกติของแหล่งเก็บพลังงานทั้ง 2 ชนิด [41, 42] หลังจากนั้นจึงใช้วิธีการออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในหัวข้อก่อนหน้า ได้ขนาดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 น้ำหนักรวมของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารแต่ละชนิด

| ชนิดของเทคโนโลยี | ตะกั่วกรด | ไฮบริด | ลิเทียมไอออน | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ |
|----------------------------|-----------|--------|--------------|--------------------|
| ขนาดแบตเตอรี่ (kWh) | 79.87 | 39.94 | 50.47 | 9.56 |
| ความหนาแน่นพลังงาน (Wh/kg) | 47.27 | 47.27 | 94.12 | 5.96 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (กก.) | 1689.6 | 844.8 | 536.28 | 1,603.82 |

ยิ่งไปกว่านั้น ด้วยความหนาแน่นพลังงานของแหล่งเก็บพลังงานแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ทำให้น้ำหนักโดยรวมของแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารนั้นแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.6 และจากหัวข้อก่อนหน้าที่กล่าวถึงผลของมวลต่อพลังงานที่ใช้ในรถโดยสาร สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ เมื่อมวลรวมของรถโดยสารเปลี่ยนแปลงไป 10% จะทำให้พลังงานที่ใช้ในรถโดยสารนั้นเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 6.04% ซึ่งจากการทำนายอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าด้วยค่ากำลังจำเพาะของยานยนต์ พบว่ารถโดยสารที่ใช้ทดสอบมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 1,205 Wh/km เมื่อพิจารณาถึงน้ำหนักรวมของแหล่งเก็บพลังงานที่ลดลงสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้รถโดยสารไฟฟ้าที่มีแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า 2 ชนิดนี้มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งข้อมูลอื่นๆและอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีแหล่งเก็บพลังงานแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.7 โดยข้อมูลพลังงานที่ใช้ในรถโดยสารระบบไฮบริดได้มาจากรายงานการทดสอบรถโดยสารไฟฟ้าของผู้ให้บริการรถโดยสาร [32] แล้วจึงนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง VSP และทำนายอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าตามขั้นตอนข้างต้น

ตารางที่ 3.7 ตารางเปรียบเทียบข้อมูลของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีแหล่งเก็บพลังงานแต่ละชนิด

| ชนิดของเทคโนโลยี | ไฮบริด | ลิเทียมไอออน | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ |
|-----------------------|--------------------|--------------|--------------------|
| เทคโนโลยีการชาร์จ | ชาร์จปกติ | ชาร์จเร็ว | ชาร์จเร็ว |
| ระดับการชาร์จ | 3.84 กิโลวัตต์ | 1C | 63.50 กิโลวัตต์ |
| รอบการใช้งานแบตเตอรี่ | 920 cycles | 3,000 cycles | 1,000,000 cycles |
| อัตราการใช้พลังงาน | 4 L/h, 0.69 kWh/km | 1.08 kWh/km | 1.15 kWh/km |

ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้น ข้อมูลค่าใช้จ่ายในด้านต่างๆ ได้แก่ การซ่อมบำรุงมูลค่าซาก และค่าจ้างพนักงานจะถูกประมาณการและประเมินจากผู้ให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปัจจุบันและวิศวกรผู้ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับรถโดยสาร สำหรับข้อมูลในส่วนของค่าตัวรถ ระบบการชาร์จ และราคาแหล่งเก็บพลังงานจะได้มาจากการสำรวจราคาขายจริงในตลาดและถูกตรวจสอบด้วยผู้ให้บริการรถโดยสารด้วย (1 USD = 35.30 บาท : ข้อมูล ณ วันที่ 17 มิถุนายน 2559) ดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ค่าใช้จ่ายที่ถูกประเมินโดยผู้ให้บริการรถโดยสารและจากการรวบรวมข้อมูล

| ชนิดของเทคโนโลยี | ไฮบริด | ลิเทียมไอออน | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ |
|-------------------------|-----------|--------------|--------------------|
| ตัวรถ (บาท) | 3,000,000 | 3,000,000 | 3,000,000 |
| ระบบการชาร์จ (บาท) | - | 300,000 | 750,000 |
| แบตเตอรี่ (บาท/kWh) | 2,704.33 | 20,000 | 353,035 |
| มูลค่าซาก (บาท/ก้อน) | 500 | - | - |
| การซ่อมบำรุง (บาท/ปี) | 160,000 | 160,000 | 160,000 |
| พนักงาน (บาท/ปี) | 240,000 | 240,000 | 240,000 |
| ค่าเชื้อเพลิง (บาท/กก.) | 20.29* | - | - |
| ไฟฟ้า (บาท/หน่วย) | 3.00 | 3.00 | 3.00 |

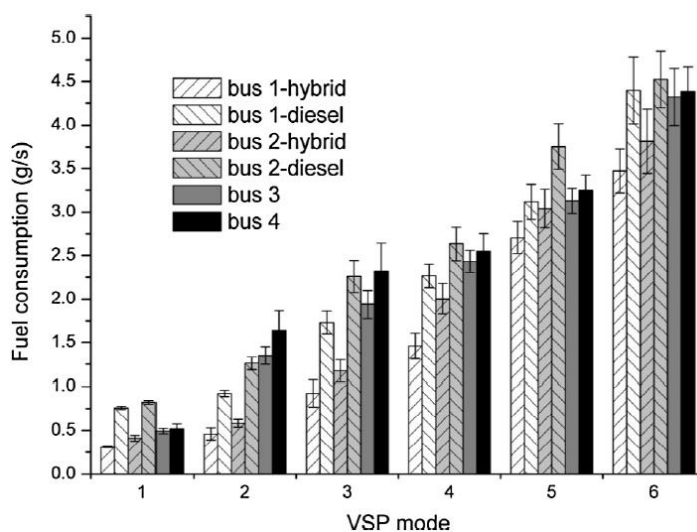
*ที่มา : กระทรวงพลังงาน ข้อมูล ณ วันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2559 [43]

นอกจากข้อมูลของรถโดยสารไฟฟ้าแล้ว งานวิจัยนี้ยังนำเสนอต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่รถโดยสารไฟฟ้าและมีใช้งานอยู่ทั่วไปในปัจจุบันเพื่อเป็นการเปรียบเทียบ โดยชนิดของรถโดยสารที่นำมาเปรียบเทียบจะใช้รถโดยสารสันดาปภายในที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยข้อมูลของรถโดยสารอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Guo et al. [44] ดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลจำเพาะของรถโดยสารสันดาปภายใน

| รายการ | ข้อมูล |
|------------------------|-------------|
| น้ำหนักตัวรถ | 12.5 ตัน |
| ความยาวตัวรถ | 12 เมตร |
| ชนิดของเชื้อเพลิง | น้ำมันดีเซล |
| กำลังเครื่องยนต์สูงสุด | 165 kW |
| มาตรฐานการปล่อยมลพิษ | ยูโร 4 |

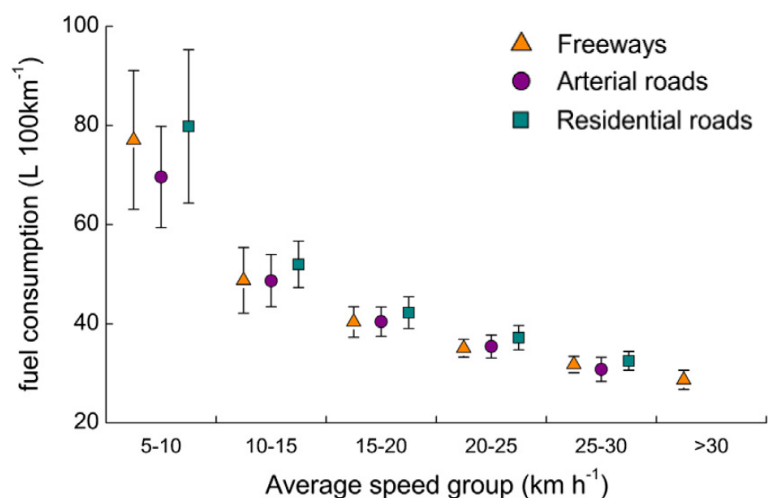
สำหรับข้อมูลอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารสันดาปภายใน จะนำมาจากค่ากำลังจำเพาะของรถโดยสารคันที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เนื่องจากรถโดยสารคันที่ 3 เป็นรถโดยสารสันดาปภายในและมีน้ำหนักใกล้เคียงกับรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้มากที่สุด โดยจากการทดสอบในงานวิจัยของ Guo et al. [44] ได้ผลอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารสันดาปภายในคันที่ 3 นี้ เท่ากับ 38.96 ลิตร/100กม. ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยของการวิ่งเท่ากับ 17 กม./ชม.



รูปที่ 3.13 ค่ากำลังจำเพาะของรถโดยสารสันดาปภายในจากงานวิจัยของ Guo et al. [44]

หลังจากนั้นจึงนำค่ากำลังจำเพาะของรถโดยสารคันที่ 3 นี้ ไปจำลองเส้นทางการวิ่งในเส้นทางของรถโดยสารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1) โดยใช้ข้อมูลความเร็วของรถโดยสารที่วินาทีต่างๆในการจำลองการวิ่ง แล้วจึงนำไปทำนายอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ของรถโดยสารสันดาปภายในต่อไป ซึ่งผลการทำนายอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารสันดาปภายในที่นำมาจำลองการวิ่งในเส้นทางของรถโดยสารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1) เท่ากับ 63.46 ลิตร/100กม. ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยของการวิ่งเท่ากับ 10 กม./ชม.

เมื่อได้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากการทำนายแล้ว จึงนำไปตรวจสอบความสมเหตุสมผลของข้อมูลกับงานวิจัยอื่น โดยจากงานวิจัยของ Zhang et al. [37] ได้แสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารสันดาปภายใน ความยาว 12 เมตร ที่มีมาตรฐานการปล่อยมลพิษ ยูโร 4 ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งพบว่าการทำนายอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารสันดาปภายในที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ที่อัตราเร็วเฉลี่ย 10 กม./ชม. และ 17 กม./ชม. มีความสอดคล้องกับผลจากงานวิจัยของ Zhang et al. [37] กล่าวคือ ที่อัตราเร็วเฉลี่ย 17 กม./ชม. มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเท่ากับ 38.96 ลิตร/100กม. ซึ่งอยู่ภายในในช่วงความแปรปรวนของข้อมูล ส่วนที่อัตราเร็วเฉลี่ย 10 กม./ชม. มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเท่ากับ 63.46 ลิตร/100กม. ซึ่งอยู่ในแนวโน้มของข้อมูลในการขับที่ภายใต้บริเวณย่านที่พิทกาศัย ดังนั้นการทำนายอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงนี้จึงถือได้ว่ามีความสมเหตุสมผล สามารถนำไปใช้พิจารณาต่อไปได้



รูปที่ 3.14 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารสันดาปภายใน ยูโร 4 [37]

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการทำนายข้างต้นนั้น เป็นของรถโดยสารที่มีน้ำหนักตัวรถ 12.5 ตัน ซึ่งยังไม่สามารถนำมาใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ได้โดยตรง เนื่องจากรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้มีน้ำหนักตัวรถ 7 ตัน จากงานวิจัยของ Bi et al. [39] ได้กล่าวไว้ว่า สำหรับรถโดยสารสันดาปภายใน เมื่อน้ำหนักของรถโดยสารลดลง 10% แล้ว จะทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง 5% ซึ่งพบว่าน้ำหนักของตัวรถโดยสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีน้ำหนักน้อยกว่ารถโดยสารในงานวิจัยของ Guo et al. อยู่เท่ากับ 44% ดังนั้นจากการทำนายข้างต้นที่ทำนายอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงได้เท่ากับ 63.46 ลิตร/100กม. จึงลดลงเป็น 49.50 ลิตร/100กม. หรือคิดเป็น 4.95 ลิตร/ชม. ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารสันดาปภายในในหัวข้อถัดไป

ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารสันดาปภายใน ข้อมูลด้านค่าใช้จ่ายต่างๆ ได้แก่ ตัวรถ ค่าจ้างพนักงาน และการซ่อมบำรุง จะถูกประมาณการและการประเมินจากผู้ให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปัจจุบัน โดยจะกำหนดให้รถโดยสารไฟฟ้ามีค่าซ่อมบำรุงน้อยกว่ารถโดยสารสันดาปภายในอยู่ 20% ส่วนราคาน้ำมันนั้นอ้างอิงข้อมูลราคาน้ำมันดีเซล ณ วันที่ 7 มิถุนายน 2559 ดังแสดงในตารางที่ 3.10

สำหรับการให้บริการของรถโดยสารภายในของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น โดยเฉลี่ยแล้วใน 1 วัน จะมีจำนวนรอบการวิ่งทั้งหมดเท่ากับ 21 รอบ และภายใน 1 ปี จะมีรถโดยสารให้บริการนิสิตและบุคลากรที่มาติดต่อกับทางมหาวิทยาลัยประมาณ 300 วัน โดยในสายการเดินรถนี้ (สาย 1) จะมีจำนวนรถที่ให้บริการพร้อมกันทั้งหมด 8 คัน การคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้ กำหนดให้รถโดยสารจะต้องสามารถให้บริการได้ตลอดเป็นระยะเวลา 10 ปี โดยมีการดูแล ซ่อมบำรุง

รถโดยสารตามอายุการใช้งาน เพื่อให้รถโดยสารสามารถให้บริการได้ตลอด ไม่จำเป็นต้องจอดซ่อมทีู่่เป็นเวลานาน สำหรับค่าใช้จ่ายในส่วนของสถานีชาร์จ ในการคำนวณจะแบ่งค่าสถานีชาร์จให้กับรถโดยสารทุกคันเท่าๆกันภายในสายการเดินรถเดียวกัน เนื่องจากรถโดยสารแต่ละคันต่างใช้สถานีชาร์จร่วมกัน

ตารางที่ 3.10 ค่าใช้จ่ายของรถโดยสารสันดาปภายในสำหรับคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ

| รายการ | หน่วย | ราคา |
|----------------|----------|-----------|
| ตัวรถ | บาท | 2,500,000 |
| การซ่อมบำรุง | บาท/ปี | 200,000 |
| พนักงาน | บาท/ปี | 240,000 |
| ค่าน้ำมันดีเซล | บาท/ลิตร | 25.09* |

*ที่มา : กระทรวงพลังงาน ข้อมูล ณ วันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2559

3.6.2 ข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ความอ่อนไหว

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะช่วยบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของในกรณีในตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลง และทำให้ทราบว่าตัวแปรใดจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด โดยในการวิเคราะห์นั้นจะยึดเอากรณีฐานเป็นเกณฑ์และสังเกตว่าเมื่อค่าของแต่ละตัวแปรเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีฐาน แล้วต้นทุนการเป็นเจ้าของจะเป็นอย่างไร

การแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไววนั้นจะแสดงผลด้วยแผนผัง 2 ชนิด ได้แก่ แผนผังทอร์นาโดและแผนผังใยแมงมุม ซึ่งแผนผังทอร์นาโดจะแสดงให้เห็นถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของในแต่ละตัวแปร ที่เปลี่ยนแปลงจากข้อมูลกรณีฐานไปยังข้อมูลกรณีขั้นต่ำและกรณีขั้นสูง ซึ่งข้อมูลของรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยีในแต่ละกรณีแสดงในตารางที่ 3.11 - 3.14 การแสดงผลด้วยแผนผังทอร์นาโดจะทำให้เห็นว่าตัวแปรใดที่มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด สำหรับแผนผังใยแมงมุมจะแสดงให้เห็นถึงอันดับของผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของว่าตัวแปรใดมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดหรือน้อยกว่ากัน โดยตัวแปรที่มีความชันของเส้นผลลัพธ์มากที่สุดจะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด ไม่ว่าความชันนั้นจะเป็นบวกหรือลบก็ตาม ซึ่งในการแสดงผลจะแสดงในลักษณะของร้อยละที่เปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลในกรณีฐานที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงไป 20%

ตารางที่ 3.11 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารสันดาปภายใน

| ข้อมูลในการคำนวณ | กรณีขั้นต่ำ | กรณีฐาน | กรณีขั้นสูง |
|-------------------------------|-------------|---------|-------------|
| ค่าลงทุนเริ่มต้น (ล้านบาท) | 1.75 | 2.50 | 3.25 |
| ระยะทางที่วิ่งต่อวัน (กม.) | 72 | 84 | 100 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ (ปี) | 8 | 10 | 12 |
| อัตราการใช้พลังงาน (ลิตร/ชม.) | 4.54 | 4.95 | 5.27 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี (ล้านบาท) | 1.92 | 2.40 | 2.88 |

ตารางที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารไฮบริด

| ข้อมูลในการคำนวณ | กรณีขั้นต่ำ | กรณีฐาน | กรณีขั้นสูง |
|-------------------------------|-------------|---------|-------------|
| ค่าลงทุนเริ่มต้น (ล้านบาท) | 2.10 | 3.00 | 3.90 |
| ค่าแบตเตอรี่ (บาท/kWh) | 2,295 | 2,704 | 4,236 |
| ระยะทางที่วิ่งต่อวัน (กม.) | 72 | 84 | 100 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ (ปี) | 8 | 10 | 12 |
| รอบการใช้งานแบตเตอรี่ (cycle) | 500 | 920 | 1,000 |
| อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km) | 500 | 690 | 887 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี (ล้านบาท) | 1.54 | 1.92 | 2.30 |

ตารางที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียม

| ข้อมูลในการคำนวณ | กรณีขั้นต่ำ | กรณีฐาน | กรณีขั้นสูง |
|-------------------------------|-------------|----------|-------------|
| ค่าลงทุนเริ่มต้น (ล้านบาท) | 2.13 | 3.04 | 3.95 |
| ค่าแบตเตอรี่ (บาท/kWh) | 16,593 | 20,000 | 24,712 |
| ระยะทางที่วิ่งต่อวัน (กม.) | 72 | 84 | 100 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ (ปี) | 8 | 10 | 12 |
| รอบการใช้งานแบตเตอรี่ (cycle) | 2,000 | 3,000 | 10,000 |
| อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km) | 737 | 1,084.83 | 1,536 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี (ล้านบาท) | 1.54 | 1.92 | 2.30 |

ตารางที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆสำหรับรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์

| ข้อมูลในการคำนวณ | กรณีขั้นต่ำ | กรณีฐาน | กรณีขั้นสูง |
|-------------------------------|-------------|-----------|-------------|
| ค่าลงทุนเริ่มต้น (ล้านบาท) | 2.17 | 3.09 | 4.02 |
| ค่าแบตเตอรี่ (บาท/kWh) | 210,868 | 353,035 | 421,771 |
| ระยะทางที่วิ่งต่อวัน (กม.) | 72 | 84 | 100 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ (ปี) | 8 | 10 | 12 |
| รอบการใช้งานแบตเตอรี่ (cycle) | 500,000 | 1,000,000 | 5,000,000 |
| อัตราการใช้พลังงาน (Wh/km) | 812 | 1,196 | 1,693 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี (ล้านบาท) | 1.54 | 1.92 | 2.30 |

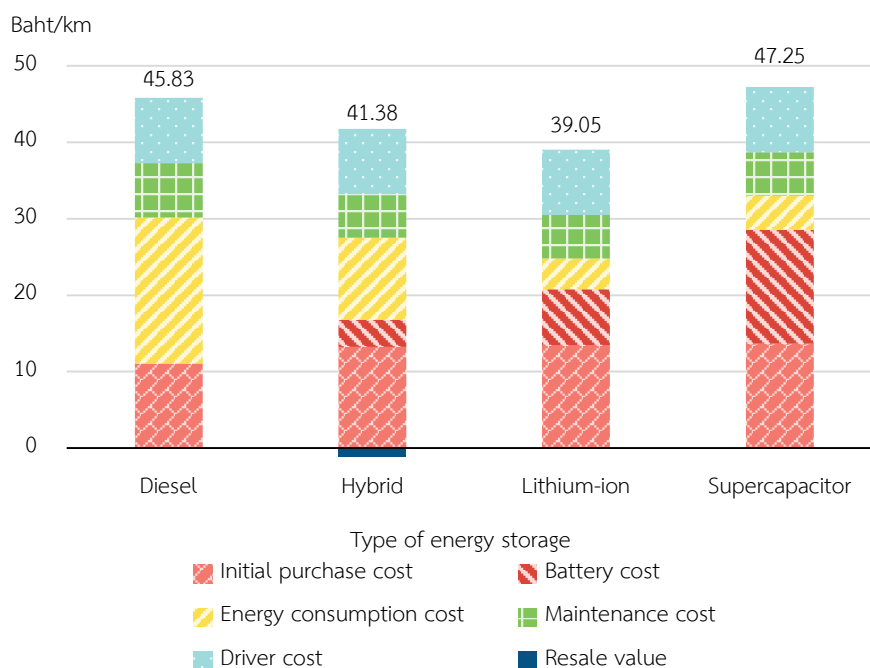
สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลในกรณีขั้นต่ำและกรณีขั้นสูง ในส่วน of ค่าลงทุนเริ่มต้นจะมาจากการสำรวจราคาขายของรถโดยสารที่มีลักษณะใกล้เคียงกับรถโดยสารที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ [45, 46] (1 USD = 35.30 บาท : ข้อมูล ณ วันที่ 17 มิถุนายน 2559) โดยพิจารณาถึงค่าภาษีอากร 80% ภาษีสรรพสามิต 40% ภาษีเพื่อมหาดไทย 10% และภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% นอกจากนี้ยังรวมถึงการสำรวจราคาของระบบการชาร์จที่มีอยู่ในท้องตลาดอีกด้วย [47, 48] ซึ่งพบว่ามีช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 30% ส่วนค่าแบตเตอรี่จะถูกแยกออกมาจากค่าลงทุนเริ่มต้น โดยค่าแบตเตอรี่และรอบการใช้งานแบตเตอรี่แต่ละชนิดมาจากการสำรวจราคาของแบตเตอรี่ที่มีอยู่จริงในปี พ.ศ. 2558 [49-54] ส่วนระยะทางการวิ่งต่อวันในกรณีขั้นต่ำได้มาจากจำนวนรอบโดยเฉลี่ยต่อวันจากสถิติการวิ่งของรถโดยสารในปัจจุบัน สำหรับในกรณีขั้นสูงได้มาจากจำนวนรอบการวิ่งต่อวันที่มากที่สุดที่รถโดยสารสามารถวิ่งได้ ส่วนระยะเวลาที่ให้บริการ อ้างอิงจากรายงานวิจัยของ ณรงค์ ป้อมหลักทอง และคณะ [55] เรื่องมาตรฐานด้านความปลอดภัยของรถในระบบรถโดยสารประจำทาง โดยระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสารขนาดเล็กในประเทศไทยถูกกำหนดให้มีระยะเวลาไม่เกิน 12 ปี และนอกจากนี้ Center of Road Research Institute ของประเทศอินเดียได้กำหนดระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสารอยู่ที่ 8 ปี ในกรณีสำหรับการวิเคราะห์การวางแผนการลงทุนต่างๆ ส่วนค่าซ่อมบำรุงต่อปี ใช้การอ้างอิงช่วงการเปลี่ยนแปลงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จากงานวิจัยของ Nurhadi et al. [19] โดยมีช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ประมาณ 20% ส่วนอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในรถโดยสาร มาจากการคำนวณทางสถิติด้วยข้อมูลการวิ่ง 1 เดือน โดยช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงาน จะอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นเท่ากับ 95%

บทที่ 4 ผลการศึกษา

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาดังกล่าวออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ และผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยเริ่มจากการอธิบายและอภิปรายผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของที่ได้จากในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่นๆ รวมถึงเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารระยะสั้นชนิดอื่นที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบันด้วย หลังจากนั้นจึงแสดงผลจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว เพื่อแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่เลือกมาปัจจัยใดส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด โดยมีการแสดงผลทั้งในรูปแบบของแผนผังใยแมงมุมและแผนผังทอร์นาโด เพื่อแสดงถึงช่วงความเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

4.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ

ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยีถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 รถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุด เท่ากับ 39.05 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งต่ำกว่ารถโดยสารสันดาปภายใน รถโดยสารไฮบริด และรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์อยู่ 17% 6% และ 21% ตามลำดับ รถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีต้นทุนการเป็นเจ้าของสูงที่สุดเท่ากับ 47.25 บาทต่อกิโลเมตร



รูปที่ 4.1 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี พบว่ารถโดยสารสันดาปภายในมีสัดส่วนต้นทุนการเป็นเจ้าของที่มาจากอัตราการใช้พลังงานมากถึง 42% ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับรถโดยสารเทคโนโลยีอื่นๆ และมีสัดส่วนที่ลดลงในรถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารไฟฟ้า ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่ารถโดยสารสันดาปภายในมีค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นหลัก

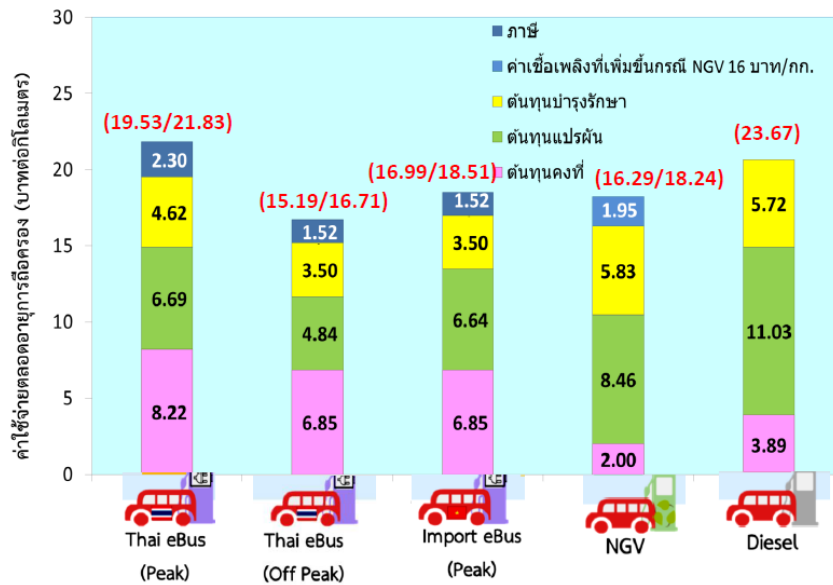
นอกจากนี้สัดส่วนต้นทุนการเป็นเจ้าของในแหล่งเก็บพลังงานในรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์พบว่ามีสัดส่วนที่มากที่สุดถึง 30% เนื่องจากซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีความหนาแน่นพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับแหล่งเก็บพลังงานชนิดอื่น ทำให้ต้องใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จำนวนมากในการเก็บพลังงานไฟฟ้า และยิ่งไปกว่านั้นสัดส่วนของค่าแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้ายังมากกว่าสัดส่วนของอัตราการใช้พลังงานถึง 1-3 เท่า จึงทำให้ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ของรถโดยสารไฟฟ้านั้นเป็นค่าใช้จ่ายของค่าแบตเตอรี่

สำหรับต้นทุนการเป็นเจ้าของในส่วนของค่าขายคินนัน พบว่าค่าขายคินนันจะมีเฉพาะในรถโดยสารไฮบริดเท่านั้น เนื่องจากรถโดยสารไฮบริดใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งเก็บพลังงาน ซึ่งสามารถนำไปรีไซเคิลได้ ส่วนรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหรือซูเปอร์คาปาซิเตอร์จะไม่มีค่าขายคินนัน เนื่องจากว่าในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ยังไม่สามารถนำไปรีไซเคิลได้นั่นเอง

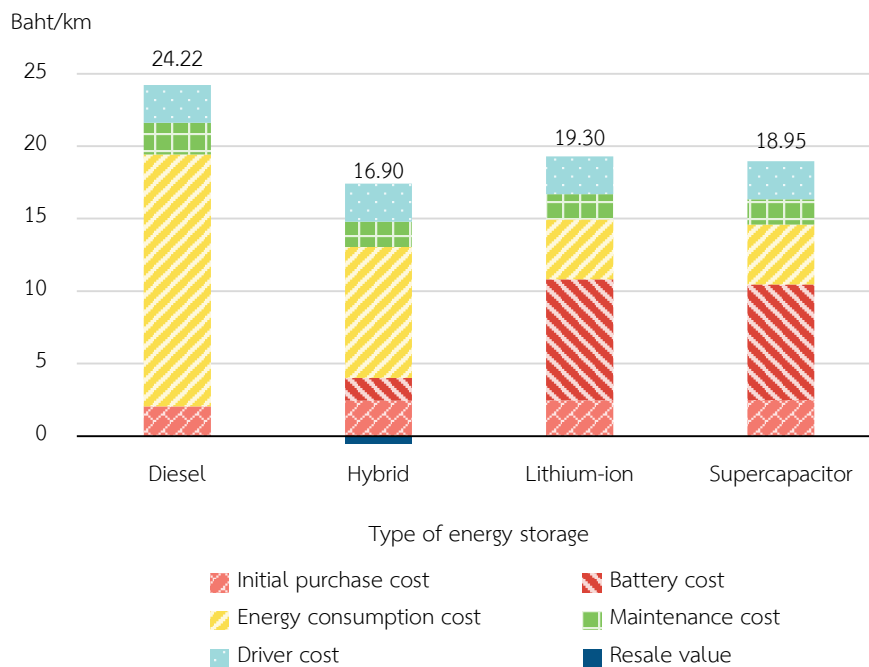
จากผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสารไฟฟ้าเช่นเดียวกัน ในงานประชุมระดมสมองเรื่อง “วิจัยรถเมล์ไฟฟ้า” ที่จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) [56] เพื่อยกระดับความรู้ความสามารถด้านการวิจัยในการใช้พลังงานในภาคขนส่งและเป็นทางเลือกใหม่ของรถเมล์ไทย พบว่าต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารชนิดต่างๆเป็นดังรูปที่ 4.2

ผลการคำนวณของโครงการนี้พบว่า รถโดยสารไฟฟ้ามีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุด เท่ากับ 15 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งแตกต่างกับผลการคำนวณในงานวิจัยชิ้นนี้ (ต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุดเท่ากับ 39 บาทต่อกิโลเมตร) เมื่อพิจารณาถึงระยะทางวิ่งของรถโดยสารในโครงการจัดทำแนวทางการพัฒนารถโดยสารไฟฟ้าพบว่าระยะทางการวิ่งที่ใช้ในการคำนวณนี้คาดการณ์ให้รถโดยสารใช้งานเป็นระยะทาง 250 กิโลเมตรต่อวัน และรถโดยสารยังถูกคาดการณ์ให้มีระยะเวลาการใช้งานถึง 20 ปี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองปรับระยะทางการวิ่งและระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสารที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ให้เท่ากัน ได้ผลการคำนวณออกมาดังรูปที่ 4.3 พบว่าต้นทุนการเป็น

เจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละเทคโนโลยีมีต้นทุนโดยประมาณอยู่ที่ 15-20 บาทต่อกิโลเมตร เช่นเดียวกัน

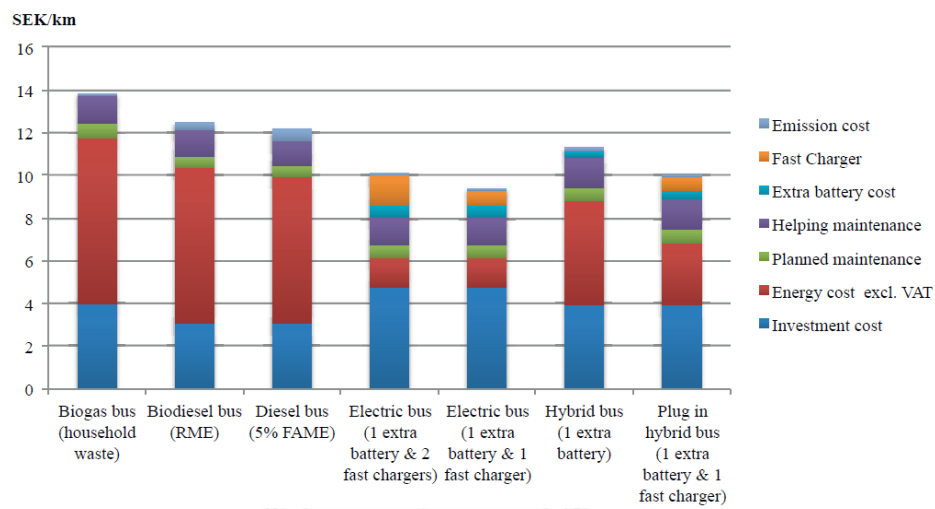


รูปที่ 4.2 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารของโครงการจัดทำแนวทางการพัฒนารถโดยสารไฟฟ้าในประเทศไทย [56]

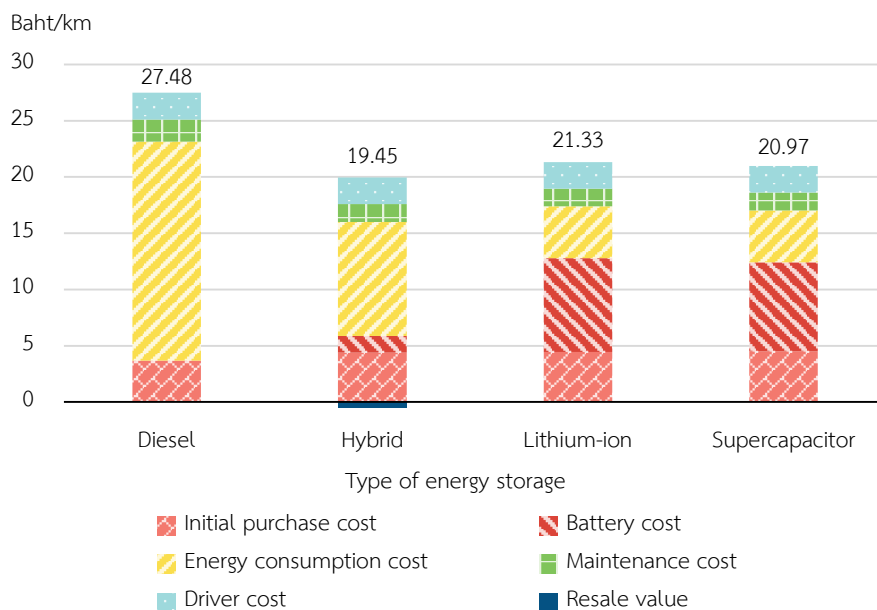


รูปที่ 4.3 ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่ปรับเปลี่ยนระยะทางการวิ่งเป็น 250 กม./วัน และเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการ 20 ปี

สำหรับการเปรียบเทียบผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้ากับงานวิจัยอื่นๆในต่างประเทศ งานวิจัยของ Nurhadi et al. [18] มีผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ ดังรูปที่ 4.4 พบว่าต้นทุนการเป็นเจ้าของที่ต่ำที่สุดของงานวิจัยนี้ เท่ากับ 9.3 SEK/km คิดเป็น 39.43 บาท/กม. (อัตราแลกเปลี่ยน 1 SEK = 4.24 บาท ณ วันที่ 13 มิถุนายน 2559) โดยระยะทางการวิ่งของรถโดยสารที่ Nurhadi ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 310 กิโลเมตรต่อวัน และรถโดยสารมีระยะเวลาที่ให้บริการ 8 ปี ดังนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของ งานวิจัยนี้จึงทำการปรับข้อมูลให้เท่ากันด้วยวิธีการเช่นเดียวกับข้างต้น ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารโดย Nurhadi et al. [18]



รูปที่ 4.5 ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่ปรับเพิ่มระยะทางการวิ่งเป็น 310 กม./วัน และเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการ 8 ปี

จากการปรับข้อมูลทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้จะอยู่ประมาณ 20-22 บาท/กม. ซึ่งแตกต่างกับต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยอื่นมากถึง 77% เนื่องจากค่าครองชีพในประเทศสวีเดนมีค่าสูงกว่าค่าครองชีพในประเทศไทยอยู่ถึง 89% [57] ประกอบกับค่าไฟฟ้าต่อหน่วยในประเทศสวีเดนแพงกว่าในประเทศไทยอยู่ 19% [18] ส่งผลให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าในงานวิจัยของ Nurhadi สูงกว่าต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของค่าใช้จ่ายในต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่มีสถานีชาร์จที่รวดเร็ว 1 สถานี ใช้งานในช่วง Off peak มาแบ่งกลุ่มของค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายในการให้บริการ ซึ่งค่าลงทุนเริ่มต้น ได้แก่ ค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าแบตเตอรี่ ส่วนค่าใช้จ่ายในการให้บริการ ได้แก่ ค่าการใช้พลังงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าจ้างพนักงาน และค่าขายคืน จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบสัดส่วนของค่าลงทุนเริ่มต้นกับค่าใช้จ่ายในการให้บริการของรถโดยสารในงานวิจัยต่างๆที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีสถานีชาร์จที่รวดเร็ว 1 สถานี

| ระยะทางการวิ่ง / ระยะเวลาที่ให้บริการ | 250 กม.ต่อวัน / 20 ปี | | 310 กม.ต่อวัน / 8 ปี | |
|--|-----------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | งานวิจัยนี้ | งานวิจัยอื่น [56] | งานวิจัยนี้ | งานวิจัยอื่น [18] |
| ค่าลงทุนเริ่มต้น | 55% | 51% | 60% | 61% |
| ค่าใช้จ่ายในการให้บริการ | 45% | 49% | 40% | 39% |

จากตารางจะสังเกตได้ว่า ในกรณีที่มีระยะทางการวิ่งและระยะเวลาการให้บริการที่เท่ากัน สัดส่วนของค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายในการให้บริการนั้นจะใกล้เคียงกันในทุกผลการวิจัย โดยแตกต่างกันประมาณ 4% แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะทางการวิ่งและระยะเวลาการให้บริการที่แตกต่างกัน จะทำให้สัดส่วนของค่าลงทุนเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายในการให้บริการนั้นแตกต่างกันมากขึ้นเป็น 10% ซึ่งการที่ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของถูกเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้เกิดผลกระทบ 2 ประการ คือ ประการแรกต้นทุนการเป็นเจ้าของจะเปลี่ยนแปลงไป ส่วนประการที่สองก็คือสัดส่วนของค่าใช้จ่ายในแต่ละด้านก็จะเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาภายใต้ข้อกำหนดเดียวกัน แต่ว่าการที่ข้อมูลในแต่ละด้านนั้นจะส่งผลดีหรือผลเสียต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นหรือการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในด้านใดจะมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากกว่ากัน จะต้องพิจารณาถึงความอ่อนไหวของแต่ละปัจจัยในต้นทุนการเป็นเจ้าของต่อไป

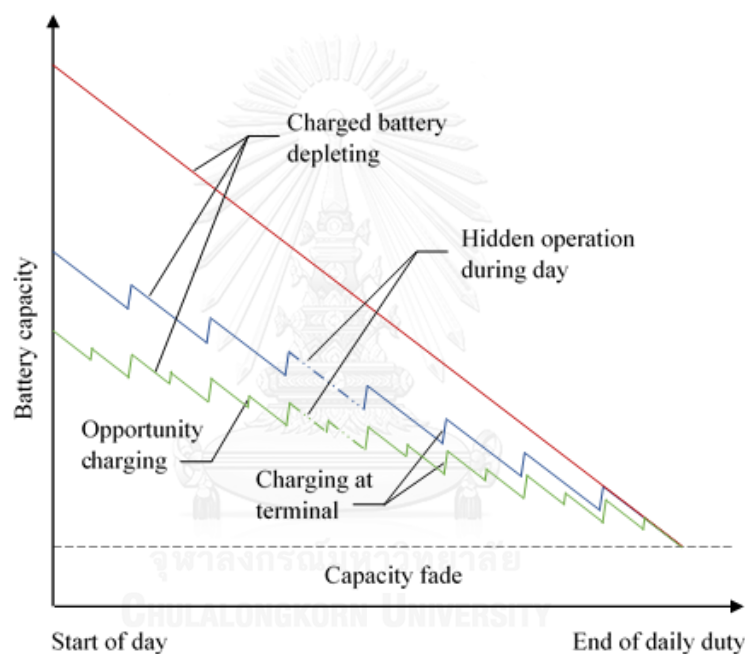
เมื่อพิจารณาถึงเทคโนโลยีการชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละชนิดที่นำมาคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ สำหรับรถโดยสารไฮบริดที่ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า ไม่สามารถใช้งานชาร์จที่รวดเร็วได้ เนื่องจากข้อจำกัดของแบตเตอรี่ จึงต้องใช้การชาร์จแบบปกติ (ใช้เวลาการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม 5-6 ชั่วโมง) ส่วนรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหรือซูเปอร์คาปาซิเตอร์ สามารถใช้งานชาร์จที่รวดเร็วได้ (ใช้เวลาการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มภายใน 1 ชั่วโมง) ด้วยข้อได้เปรียบของการชาร์จที่รวดเร็วทำให้สามารถให้บริการได้มากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มระยะทางการวิ่งของรถโดยสาร ที่สามารถลดต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารได้ โดยปกติแล้วรถโดยสารไฮบริดจะมีการหยุดพักรถเพื่อทำการชาร์จไฟฟ้าที่อุ้งรถโดยสารวันละ 2 รอบ รอบละ 1 ชั่วโมง ซึ่งถ้าหากรถโดยสารใช้งานชาร์จที่รวดเร็วและสามารถให้บริการได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพักรถ จะทำให้รถโดยสารให้บริการได้เพิ่มขึ้นประมาณ 4 รอบ หรือ 16 กิโลเมตร ซึ่งสามารถทำให้มีระยะทางการวิ่งเพิ่มขึ้นได้ถึง 19%

นอกจากนี้การชาร์จที่รวดเร็วยังทำให้จำนวนรถโดยสารในระบบการเดินรถนั้นมีน้อยลงอีกด้วย เนื่องจากรถโดยสารไฟฟ้ามีระยะเวลาการชาร์จที่สั้น สามารถทำการชาร์จที่สถานีต้นทางในขณะที่จอดรอผู้โดยสารได้ ในทางกลับกันหากรถโดยสารมีระยะเวลาการชาร์จนาน ทำให้รถโดยสารไฟฟ้าต้องออกมาจากระบบการเดินรถเพื่อนำไปชาร์จที่อุ้งรถโดยสารนอกเส้นทางเดินรถ ซึ่งจำเป็นต้องมีรถโดยสารไฟฟ้าสำรองสำหรับทดแทนรถโดยสารไฟฟ้าที่ออกมาจากระบบการเดินรถ เพื่อให้ระบบการเดินรถมีความถี่ของรถโดยสารคงที่ ด้วยจำนวนรถโดยสารในระบบที่น้อยลงนี้เองส่งผลให้การคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นควรคำนวณในเชิงของทั้งระบบการเดินรถซึ่งจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป

สำหรับนโยบายสนับสนุนการใช้รถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นยังไม่มีกำหนดนโยบายอย่างแน่ชัด ซึ่งจากผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรูปที่ 4.1 พบว่ารถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ลิเทียมไอออนมีต้นทุนการเป็นเจ้าของที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเพียงแค่เปลี่ยนมาใช้รถโดยสารไฮบริด ก็ทำให้มีต้นทุนการเป็นเจ้าของเทียบเท่ากับการใช้รถโดยสารไฟฟ้าแล้ว แต่อย่างไรก็ตามรถโดยสารไฮบริดยังคงมีการปล่อยมลพิษอยู่ ในขณะที่รถโดยสารไฟฟ้านั้นไม่มีการปล่อยมลพิษในขณะที่ขับเคลื่อน ถ้าหากรัฐบาลเริ่มมีการใช้นโยบายที่สนับสนุนการใช้รถยนต์ไฟฟ้าอย่างจริงจังเช่นในประเทศสหรัฐอเมริกา อังกฤษ หรือญี่ปุ่น ที่มีการสนับสนุนเรื่องของภาษี จะทำให้ราคาของรถยนต์ไฟฟ้าและต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้านั้นลดลงต่ำกว่าของรถโดยสารไฮบริด ส่งผลต่อความได้เปรียบของการเปลี่ยนสู่รถโดยสารไฟฟ้าได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

4.1.1 ผลของจำนวนสถานีชาร์จที่เพิ่มขึ้นต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ

ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของแสดงให้เห็นสัดส่วนของค่าใช้จ่ายในส่วนของแบตเตอรี่มีมากถึง 30% ในต้นทุนการเป็นเจ้าของ (รูปที่ 4.1) สำหรับรูปแบบในการศึกษานี้มีการชาร์จที่สถานีต้นทางหรือสถานีปลายทางเท่านั้น ซึ่งในงานวิจัยของ Miles และ Potter [58] ได้แสดงให้เห็นว่าการชาร์จที่รวดเร็วในระหว่างจอดรับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานี (Opportunity charging) หรือการชาร์จที่สถานีย่อยระหว่างเส้นทางการเดินทางทำให้รถโดยสารมีระยะทางการวิ่งได้ไกลยิ่งขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ในรถโดยสารได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในส่วน of แบตเตอรี่นั้นลดลง อีกทั้งยังทำให้มวลรวมของรถโดยสารนั้นลดลงอีกด้วย



รูปที่ 4.6 สถานการณ์การชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้าเมื่อมีการชาร์จระหว่างจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร [39]

ในงานวิจัยนี้จึงทดลองเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จที่รวดเร็วให้มากขึ้นสำหรับรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ด้วยความต้องการที่จะลดขนาดของแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้าให้เล็กลง โดยที่รถโดยสารไฟฟ้ายังคงมีพลังงานไฟฟ้าเพียงพอต่อการวิ่งตลอดทั้งวัน ซึ่งคาดว่าจะสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วน of แบตเตอรี่ลงได้ โดยกำหนดให้ที่สถานีต้นทางมีการชาร์จเป็นระยะเวลา 5 นาทีเช่นเดิม แต่สำหรับการชาร์จที่สถานีย่อยระหว่างเส้นทางการเดินทาง จะชาร์จเป็นระยะเวลา 30 วินาที ซึ่งอยู่ในช่วงระยะเวลาโดยประมาณของการจอดรับ-ส่งผู้โดยสาร [59] และใช้การชาร์จที่รวดเร็วด้วยระดับการชาร์จพิกัดของแบตเตอรี่แต่ละชนิด โดยมีหลักการในการออกแบบ

ขนาดแบตเตอรี่เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3 ภายใต้ข้อสมมติฐานที่กำหนดให้ค่าใช้จ่ายในระบบการชาร์จต่อ 1 สถานีมีค่าคงที่ดังแสดงในตารางที่ 3.8 ได้ขนาดของแหล่งเก็บพลังงานดังตารางที่ 4.2

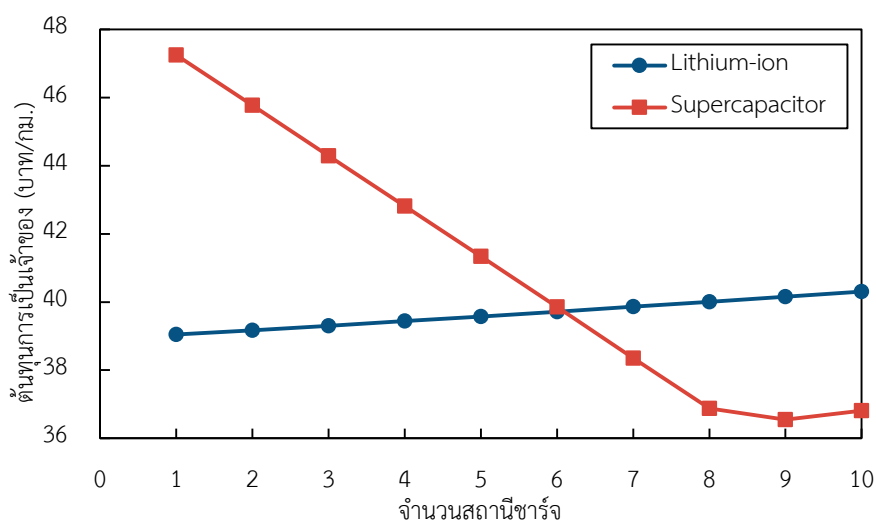
ตารางที่ 4.2 ขนาดของแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า

| จำนวนสถานีชาร์จทั้งหมด | ขนาดของแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า (kWh) | |
|------------------------|------------------------------------|--------------------|
| | ลิเทียมไอออน | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ |
| 1 | 50.47 | 9.56 |
| 2 | 47.29 | 8.39 |
| 3 | 44.42 | 7.23 |
| 4 | 41.89 | 6.06 |
| 5 | 39.68 | 4.90 |
| 6 | 37.65 | 3.73 |
| 7 | 35.84 | 2.55 |
| 8 | 34.20 | 1.39 |
| 9 | 32.69 | 0.93 |
| 10 | 31.30 | 0.83 |

ขนาดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและซูเปอร์คาปาซิเตอร์เมื่อมีจำนวนสถานีชาร์จทั้งหมด 10 สถานีสามารถลดลงได้ถึง 38% และ 91% ตามลำดับ แต่เนื่องด้วยระยะเวลาการชาร์จที่กำหนด ประกอบกับขนาดของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่เล็กลง ส่งผลให้ทุกครั้งที่รถโดยสารเข้าสู่สถานีชาร์จ รถโดยสารจะชาร์จจนมีประจุไฟฟ้าเต็มความจุก่อนเวลาที่กำหนดเสมอ โดยผลของการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของเป็นดังรูปที่ 4.7

จากผลของการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จที่รวดเร็วต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ พบว่าสำหรับรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถลดต้นทุนการเป็นเจ้าของได้สูงสุดถึง 23% เมื่อมีการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จอยู่ระหว่างเส้นทางการเดินทางเป็นจำนวน 9 สถานี และเมื่อเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จย่อยให้มากขึ้น ต้นทุนการเป็นเจ้าของจะเริ่มกลับมาเพิ่มขึ้นจากจุดที่ต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุด แต่สำหรับรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ถึงแม้ว่าจะเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จย่อยและลดขนาดแบตเตอรี่ลง กลับทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นเพิ่มขึ้นประมาณสถานีละ 0.35% เนื่องจากการที่ลดขนาดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในขณะที่จำนวนรอบการเดินทางเป็นเช่นเดิมนั้นส่งผลให้จำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่ต่อวันเพิ่มขึ้น ทำให้อายุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นลดลง ดัง

แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเพิ่มความถี่ของการเปลี่ยนแบตเตอรี่ชุดใหม่ให้บ่อยขึ้น และทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเพิ่มขึ้นในที่สุด



รูปที่ 4.7 ผลของการเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จที่รวดเร็วต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ

ตารางที่ 4.3 รอบการใช้งานและอายุของแหล่งเก็บพลังงาน

| จำนวน สถานีชาร์จ ทั้งหมด | รอบการใช้งานแบตเตอรี่ต่อวัน (cycle) | | อายุแบตเตอรี่ (ปี) | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------|-------------|
| | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ | | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ | |
| | ลิเทียมไอออน | คาปาซิเตอร์ | ลิเทียมไอออน | คาปาซิเตอร์ |
| 1 | 1.72 | 10.01 | 5.82 | 333.13 |
| 2 | 1.84 | 11.40 | 5.45 | 292.52 |
| 3 | 1.95 | 13.23 | 5.12 | 251.91 |
| 4 | 2.07 | 15.78 | 4.83 | 211.29 |
| 5 | 2.19 | 19.53 | 4.57 | 170.68 |
| 6 | 2.31 | 25.63 | 4.34 | 130.07 |
| 7 | 2.42 | 37.50 | 4.13 | 88.90 |
| 8 | 2.54 | 69.03 | 3.94 | 48.28 |
| 9 | 2.65 | 102.98 | 3.77 | 32.37 |
| 10 | 2.77 | 114.64 | 3.61 | 29.08 |

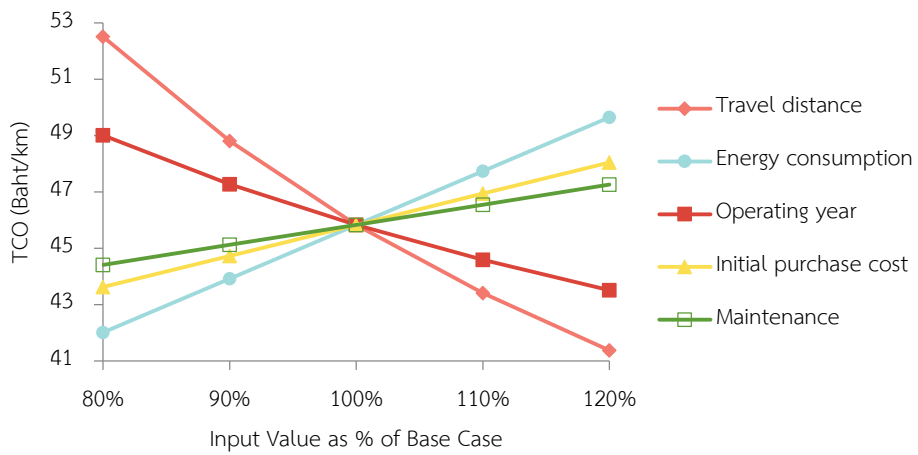
ส่วนอายุของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นก็ลดลงเช่นเดียวกัน แต่อายุที่ลดลงนี้ยังคงมีอายุมากกว่าระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร ซึ่งไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ชุดใหม่เหมือนกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ส่งผลให้ให้รถโดยสารที่ใช้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์สามารถลดต้นทุนการเป็นเจ้าของได้ และยิ่งไปกว่านั้น ถ้าหากมีการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการเดินรถมากที่สุด (Optimization) เช่นในงานวิจัยของ Xu et al. [60] อาจสามารถทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นลดลงได้มากยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่เพิ่มจำนวนสถานีชาร์จนั้นอาจลดต้นทุนการเป็นเจ้าของได้อีก ด้วยการพิจารณาต้นทุนการเป็นเจ้าของแบบทั้งระบบการเดินรถ โดยที่แต่ละสายการเดินรถมีการใช้สถานีชาร์จร่วมกันและมีการจัดการการชาร์จของรถโดยสารดังเช่นในงานวิจัยของ De Filippo et al. [61]

4.2 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหว

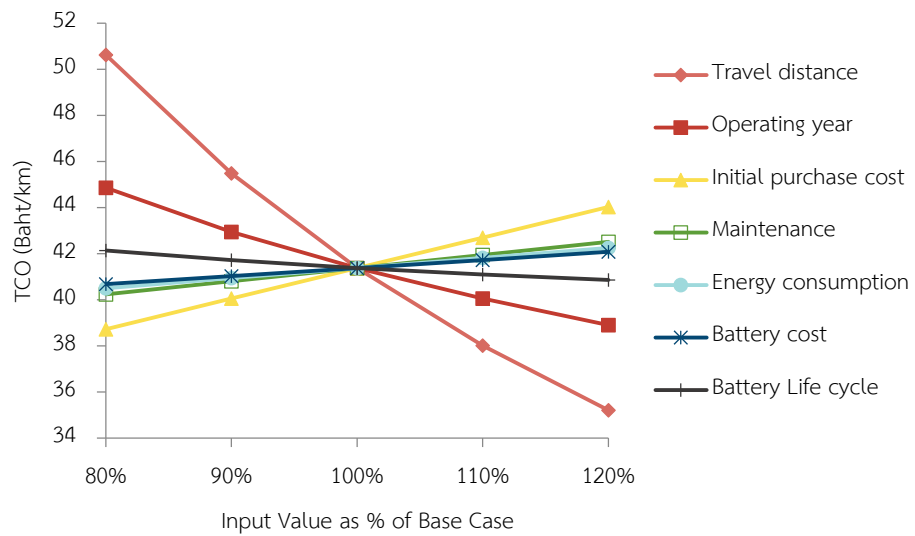
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจะเริ่มจากการแสดงผลด้วยแผนผังใยแมงมุม ที่มีการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ หลังจากนั้นจึงแสดงผลด้วยแผนผังทอร์นาโด ที่แสดงให้เห็นถึงช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของด้วยค่าสูงสุดและต่ำสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัย

4.2.1 แผนผังใยแมงมุม

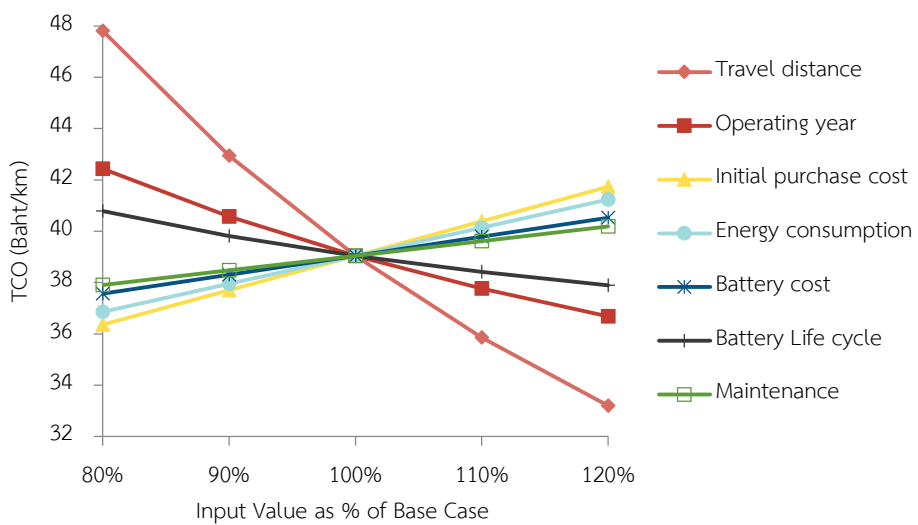
เนื่องด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ โดยแผนผังใยแมงมุมจะแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ในแต่ละปัจจัยจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากหรือน้อยกว่ากัน ซึ่งผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่มีต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของถูกแสดงด้วยแผนผังใยแมงมุม ดังรูปที่ 4.8 โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงเท่ากับ 20% เทียบกับกรณีฐานในตารางที่ 3.11 – 3.14 สังเกตได้ว่ารถโดยสารทุกเทคโนโลยีมีปัจจัยด้านระยะทางการวิ่งของรถโดยสาร และระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด ตามลำดับ ยกเว้นในรถโดยสารสันดาปภายในที่อัตราการใช้พลังงานมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากกว่าระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร ส่วนค่าซ่อมบำรุงนั้นส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยที่สุดในรถโดยสารสันดาปภายในและรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ในขณะที่จำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยที่สุดในรถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารที่ใช้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์ และยิ่งไปกว่านั้นคือ จำนวนรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ในรถโดยสารที่ใช้ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นไม่มีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ



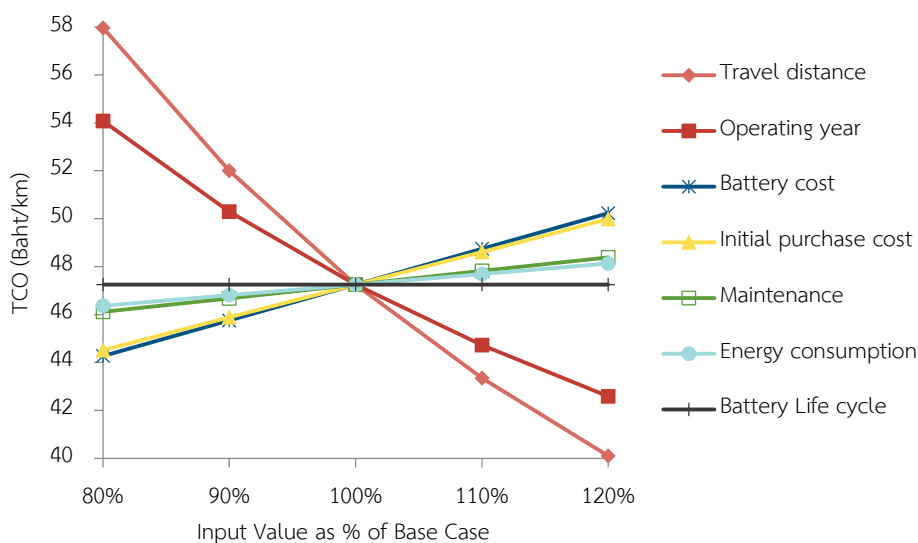
4.8 (ก) Diesel



4.8 (ข) Hybrid



4.8 (ค) Lithium-ion



4.8 (ง) Supercapacitor

รูปที่ 4.8 แผนผังใยแมงมุมแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี

สำหรับผลกระทบของแต่ละปัจจัยในต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยอื่นนั้น Lin et al. [16] ได้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถยนต์ไฮบริด คือ ระยะทางการวิ่งของรถยนต์ ยิ่งไปกว่านั้นในงานวิจัยของ Nurhadi et al. [19] ที่วิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้า พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของสูงสุด 2 อันดับแรก ได้แก่ ระยะทางการวิ่ง และระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในงานวิจัยนี้

จากผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี พบว่าตัวแปรค่าลงทุนเริ่มต้นส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารสันดาปภายในน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 4.4 เนื่องจากรถโดยสารสันดาปภายในมีราคาตัวรถต่ำที่สุด อีกทั้งการใช้งานของรถโดยสารสันดาปภายในอย่างแพร่หลายที่มีการแข่งขันด้านการค้าในตลาด ทำให้ราคาารถโดยสารของผู้ผลิตแต่ละเจ้ามีราคาใกล้เคียงกัน รวมถึงรถโดยสารสันดาปภายในไม่มีค่าสถานีชาร์จไฟฟ้ารวมอยู่ด้วย จึงทำให้รถโดยสารเทคโนโลยีนี้มีผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าลงทุนเริ่มต้นน้อยที่สุด

สำหรับตัวแปรระยะทางการวิ่งต่อวัน สังเกตเห็นได้ว่าพารามิเตอร์นี้ส่งผลกระทบต่อรถโดยสารสันดาปภายในน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับรถโดยสารเทคโนโลยีอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เนื่องจากรถโดยสารสันดาปภายในมีแหล่งพลังงานเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานชนิดอื่น เช่น ไฟฟ้า ถึงแม้การเพิ่มระยะทางการวิ่งต่อวันจะทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของ

ลดลงได้ แต่ด้วยราคาที่สูงของน้ำมันเชื้อเพลิง จึงทำให้อัตรากาลลดลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของมี อัตรากาลลดลงที่น้อยกว่ารถโดยสารเทคโนโลยีอื่นๆ ซึ่งทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับรถโดยสารเทคโนโลยี อื่นแล้ว ระยะทางการวิ่งต่อวันจึงส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารสันดาปภายใน น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการเปลี่ยนแปลงในต้นทุนการเป็นเจ้าของเทียบกับกรณีฐานในแผนผังใยแมงมุม

| รายการ | ช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของ (%) | | | |
|-----------------------|--|--------|--------------|--------------------|
| | สันดาปภายใน | ไฮบริด | ลิเทียมไอออน | ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ |
| ค่าลงทุนเริ่มต้น | 8.62 | 12.81 | 13.75 | 11.57 |
| ค่าแบตเตอรี่ | - | 3.39 | 7.54 | 12.62 |
| ระยะทางที่วิ่งต่อวัน | 21.74 | 37.27 | 37.39 | 37.77 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ | 11.13 | 14.38 | 14.74 | 24.30 |
| รอบการใช้งานแบตเตอรี่ | - | 3.10 | 7.42 | 0.00 |
| อัตรากาลใช้พลังงาน | 19.13 | 4.22 | 11.22 | 3.74 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี | 5.57 | 5.51 | 5.84 | 4.83 |

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ จากตารางที่ 4.4 พบว่าระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ ในรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มากที่สุดเมื่อเทียบกับรถโดยสารเทคโนโลยีอื่น เนื่องมาจาก ซูเปอร์คาปาซิเตอร์มีอายุการใช้งานที่สูงมากดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งมากกว่าระยะเวลาที่ ให้บริการรถโดยสาร อีกทั้งยังสอดคล้องกับความอ่อนไหวในพารามิเตอร์รอบการใช้งานของซูเปอร์ คาปาซิเตอร์ที่ไม่ส่งผลใดๆต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ เปรียบเสมือนค่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นไป รวมอยู่ในค่าลงทุนเริ่มต้นของรถโดยสาร กล่าวคือ สำหรับรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นจะ ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เพียงชุดเดียวตลอดระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสาร ไม่มีการเปลี่ยน ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชุดใหม่มาทดแทน และเมื่อรถโดยสารจะไม่สามารถใช้งานต่อไปได้แล้ว แต่ตัว ซูเปอร์คาปาซิเตอร์เองยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อรถโดยสารหมดระยะเวลาการ ให้บริการแล้ว จะไม่ทำการถอดอุปกรณ์ต่างๆในรถโดยสารที่ยังสามารถใช้งานได้เข้าไปใส่ให้กับรถ โดยสารคันใหม่ที่มาทดแทน ดังนั้นการที่รถโดยสารมีอายุการใช้งานที่สั้นจะทำให้เสียผลประโยชน์ใน เรื่องของอายุการใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไป จึงทำให้ระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสารที่ ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากกว่ารถโดยสารเทคโนโลยีอื่น

สำหรับพารามิเตอร์รอบการใช้งานแบตเตอรี่ พบว่ารถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานแบตเตอรี่ เนื่องจากอายุการใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่สูงกว่าระยะเวลาที่ให้บริการของรถโดยสาร ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น และนอกจากนี้ยังพบว่ารอบการใช้งานแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฮบริดมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยกว่าของรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากรถโดยสารไฮบริด มีแหล่งพลังงานอื่นนอกเหนือจากพลังงานไฟฟ้าที่ช่วยส่งพลังงานให้กับรถโดยสาร ทำให้แบตเตอรี่ในรถโดยสารไฮบริดไม่ถูกใช้งานตลอดเวลาเหมือนกับรถโดยสารไฟฟ้าเทคโนโลยีอื่น ซึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงรอบการใช้งานแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฮบริดมีผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยกว่าในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

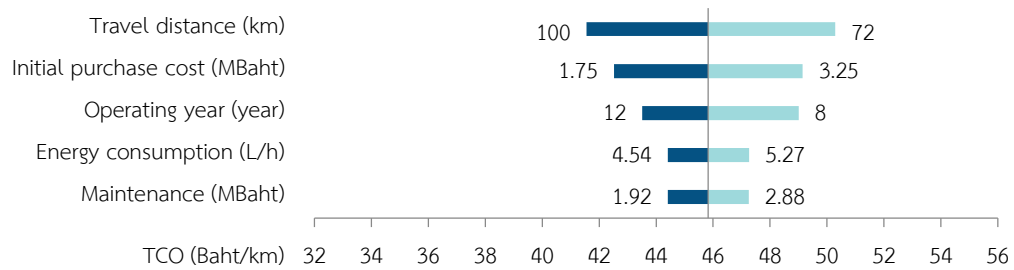
ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารซึ่งเกิดจากสภาพการจราจรและสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในเส้นทางการเดินรถ สังเกตจากรูปที่ 4.8 ได้ว่าสำหรับรถโดยสารสันดาปภายใน อัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารมีผลกระทบใกล้เคียงกับระยะทางการวิ่งของรถโดยสารมาก เนื่องจากแหล่งพลังงานของรถโดยสารสันดาปภายในคือน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานชนิดอื่น เช่น ไฟฟ้า จึงทำให้เมื่ออัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเปลี่ยนแปลงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของใกล้เคียงกัน แต่น้อยกว่าของรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากรถโดยสารไฮบริดที่มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยกว่ารถโดยสารที่ใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ภายใต้อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กำหนดให้มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงคงที่ ส่วนรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มีจำนวนรอบการใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่สูง และเมื่ออัตราการใช้พลังงานมีการเปลี่ยนแปลง เช่น อัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้อายุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นลดลง เนื่องจากมีการใช้งานแบตเตอรี่เพิ่มมากขึ้น แต่ว่าอายุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้นก็ยังคงสูงอยู่เมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ให้บริการของรถโดยสารดังที่ได้กล่าวข้างต้น ด้วยสาเหตุเหล่านี้เองจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยกว่าในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียม

สุดท้ายคือการเปลี่ยนแปลงของค่าซ่อมบำรุงที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของ ซึ่งจากตารางที่ 4.4 พบว่ารถโดยสารแต่ละเทคโนโลยีมีผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าซ่อมบำรุงใกล้เคียงกัน

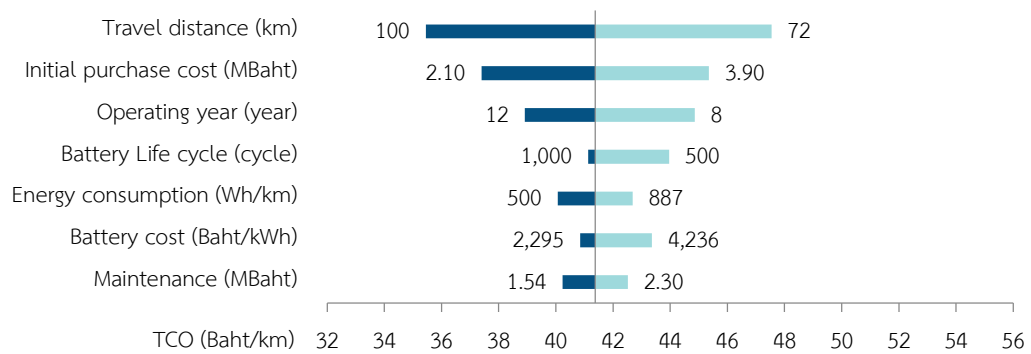
4.2.2 แผนผังทอร์นาโด

แผนผังทอร์นาโดจะแสดงถึงค่าสูงสุดและต่ำที่สุดของต้นทุนการเป็นเจ้าของที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจากการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.11 – 3.14 เป็นดังรูปที่ 4.9 ระยะทางการวิ่งต่อวันยังคงมีช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุดในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยี ส่วนช่วงการเปลี่ยนแปลงที่มากเป็นอันดับรองลงมาในรถโดยสารแต่ละเทคโนโลยีนั้นแตกต่างไปจากในแผนผังใยแมงมุม ส่วนค่าซ่อมบำรุงนั้นยังคงมีช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของน้อยที่สุดในเกือบทุกเทคโนโลยีของรถโดยสาร ยกเว้นรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ที่จำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่ไม่ส่งผลให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของมีการเปลี่ยนแปลงใดๆทั้งสิ้น

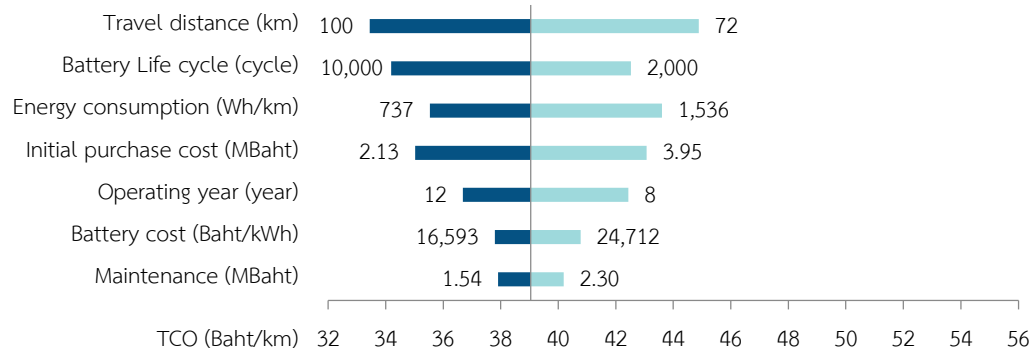
จากการเปลี่ยนแปลงของระยะทางการวิ่งต่อวันที่ทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของมีช่วงการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดนั้น เมื่อพิจารณาถึงจำนวนชั่วโมงการให้บริการที่แท้จริงของรถโดยสารที่กำหนดไว้ หรือช่วงที่รถโดยสารไม่ได้ถูกนำมาให้บริการ (Downtime) เป็นดังตารางที่ 4.5 โดยที่พื้นที่แรเงาคือช่วงเวลาที่รถโดยสารให้บริการตามปกติ ส่วนพื้นที่สีขาวคือช่วงเวลาพักรถโดยสาร พบว่าช่วงเวลาการให้บริการดังตารางที่ 4.5 นั้น ซึ่งถูกใช้เป็นกรณีฐาน รถโดยสารจะมี Downtime โดยเฉลี่ยเท่ากับ 19% คิดเป็นรอบได้ประมาณ 21 รอบต่อวัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อนำตารางการให้บริการนี้ไปใช้จริงพบว่าสามารถวิ่งได้เฉลี่ยเพียง 17 รอบต่อวันเท่านั้น ซึ่งทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเพิ่มขึ้นจากเดิมได้มากถึง 15% ในทางกลับกัน ถ้าหากนำช่วงเวลาพักรถมาให้บริการรถโดยสารอย่างต่อเนื่องหรือหมายถึง Downtime เป็น 0% จะทำให้รถโดยสารสามารถวิ่งได้ประมาณ 25 รอบต่อวัน ซึ่งทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของลดลงจากเดิม 15% ดังนั้นสำหรับการให้บริการรถโดยสาร จึงควรที่จะตระหนักถึงการเปลี่ยนแปลงระยะทางการวิ่งของรถโดยสารที่ทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุดในทุกปีจจัย โดยจำเป็นต้องรักษาจำนวนรอบการให้บริการไม่ให้ลดลงไปกว่าที่คาดการณ์เอาไว้ไม่ว่าด้วยกรณีใดก็ตาม ซึ่งสะท้อนไปถึงความเชื่อถือได้ (Reliability) ของรถโดยสารที่จะต้องมีความพร้อมใช้งานอยู่เสมอ และจะต้องไม่เกิดปัญหาใดๆที่ทำให้รถโดยสารต้องหยุดให้บริการ ซึ่งเป็นการเพิ่ม Downtime ของรถโดยสารนั่นเอง



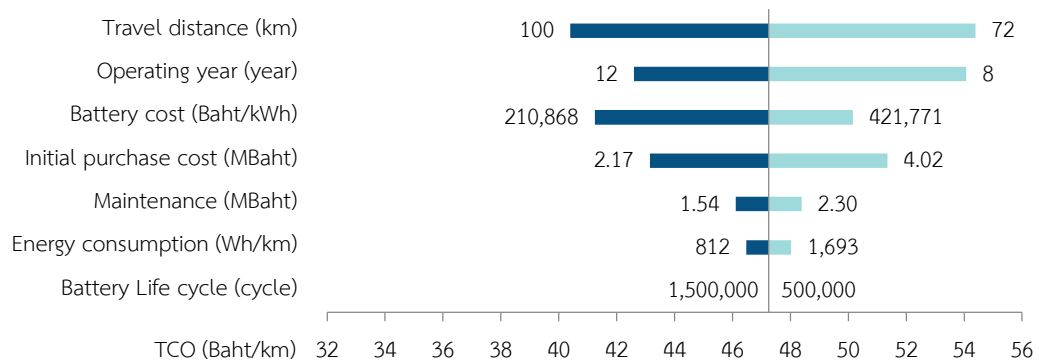
4.9 (ก) Diesel



4.9 (ข) Hybrid



4.9 (ค) Lithium-ion



4.9 (ง) Supercapacitor

รูปที่ 4.9 แผนผังทอร์นาโดแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถ
โดยสารแต่ละเทคโนโลยี

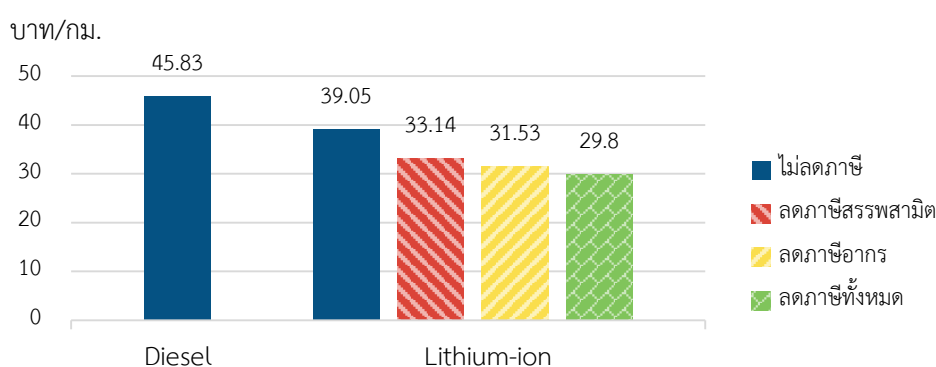
ตารางที่ 4.5 ตารางการให้บริการของรถโดยสารที่กำหนดไว้

| คันที่ | 7.00 น. | 9.00 น. | 11.00 น. | 13.00 น. | 15.00 น. | 17.00 น. | 19.00 น. |
|--------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 2 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 3 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 4 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 5 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 6 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 7 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| 8 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

สำหรับปัจจัยการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ให้บริการก็เช่นเดียวกัน ถ้าหากรถโดยสารไม่มีความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ทำให้รถโดยสารนั้นต้องออกไปจากระบบรถโดยสารก่อนระยะเวลาที่ถูกคาดการณ์เอาไว้ ซึ่งเป็นผลมาจากข้อกำหนดของผู้ว่าจ้าง (Term of Reference: TOR) ที่กำหนดในเชิงของคุณสมบัติของรถโดยสารที่ถูกนำมาใช้งาน รถโดยสารทุกคันล้วนผ่านข้อกำหนดเหล่านี้ แต่รถโดยสารจะมีความน่าเชื่อถือได้หรือไม่ นั้น จะไม่สามารถทราบได้จนกระทั่งถูกนำมาใช้งานจริง และเมื่อเกิดปัญหาขึ้นประการใดประการหนึ่งอันเนื่องมาจากความไม่น่าเชื่อถือของรถโดยสาร ที่ทำให้ระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารสั้นลงกว่าที่ได้วางแผนเอาไว้ ส่งผลให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารนั้นเพิ่มขึ้นได้มาก ด้วยเหตุนี้เองการให้บริการรถโดยสารจึงจำเป็นต้องตระหนักถึงความเชื่อถือได้ของรถโดยสารด้วย หรือสามารถแก้ไขด้วยการกำหนด TOR ในเชิงคุณภาพของการให้บริการ ที่รถโดยสารจะต้องสามารถให้บริการได้ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้และรวมถึงการกำหนดระยะเวลาทางการวิ่งต่อวันอีกด้วย นอกจากนี้หากมีการดูแลซ่อมบำรุงที่ดีก็จะสามารถยืดระยะเวลาการให้บริการของรถโดยสารได้นานขึ้น โดยทั้งนี้ทั้งนั้นการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารที่นำมาวิเคราะห์นั้น มาจากข้อกำหนดทางกฎหมายของกรมขนส่งทางบกทั้งในประเทศและต่างประเทศ ที่ตระหนักถึงสภาพของรถโดยสารเป็นหลัก เนื่องจากรถโดยสารที่มีสภาพไม่พร้อมใช้งานมีโอกาสเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุสูงกว่ารถโดยสารที่มีสภาพพร้อมใช้งาน แต่ในบางกรณี เมื่อรถโดยสารนั้นมีระยะเวลาการใช้งานครบกำหนดแล้วยังสามารถต่ออายุการใช้งานออกไปได้อีกเล็กน้อย โดยที่จะต้องมีการตรวจสอบสภาพรถโดยสารเป็นประจำ อย่างไรก็ตามกฎหมายเหล่านี้ยังคงเป็นเพียงรายละเอียดให้เบื้องต้น ยังไม่มีผลบังคับใช้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการประชุมหารือและสรุปข้อตกลงต่อไปในอนาคต

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของการลงทุนเริ่มต้นที่ทำให้เกิดช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้น จากรูปที่ 4.9 พบว่าขนาดช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของมากเป็นอันดับที่ 2 สำหรับรถโดยสารสันดาปภายในและรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งพบว่าสาเหตุที่

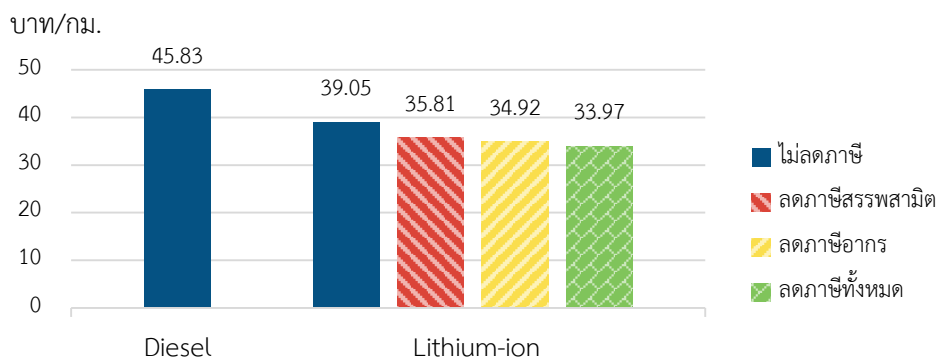
ต้นทุนการเป็นเจ้าของมีช่วงการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ มาจากการนำเข้ารถโดยสารและสถานีชาร์จ ซึ่งการนำเข้านั้นจะต้องเสียภาษีอากร 80% ภาษีสรรพสามิต 40% ภาษีเพื่อมหาดไทย 10% และภาษีมูลค่าเพิ่ม 7% ซึ่งโดยรวมแล้วจะทำให้ราคาของรถโดยสารหรือสถานีชาร์จนั้นเพิ่มขึ้นเป็น 251% จากราคาเดิม ด้วยเหตุนี้เองถ้าหากลดการนำเข้แล้วหันมาผลิตรถโดยสารใช้เองในประเทศก็เป็นวิธีหนึ่งที่จะทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนลดลงได้มากถึง 24% ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และจากเดิมที่มีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำกว่ารถโดยสารสันดาปภายในอยู่ 17% จะเพิ่มขึ้นเป็น 35%



รูปที่ 4.10 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของหลังจากลดภาษีค่าลงทุนเริ่มต้น

สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของราคาแบตเตอรี่พบว่า ช่วงการเปลี่ยนแปลงในรถโดยสารไฮบริดและรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อย ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่แบตเตอรี่ 2 ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ราคาของแบตเตอรี่อยู่ในระดับกลางๆ และมีแนวโน้มของราคาในอนาคตที่จะลดต่ำลงอีก ส่วนสำหรับรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้น เป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่และยังไม่มีนำมาใช้อย่างแพร่หลาย อยู่ในขั้นตอนการวิจัยพัฒนาต่อไป จึงทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่ารถโดยสารเทคโนโลยีอื่น แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มการลดลงของราคาแบตเตอรี่ในอนาคตยังคงเป็นผลดีต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของที่สามารถทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของลดลงได้มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้สำหรับการสร้างอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ในประเทศนั้นอาจเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องใช้การนำเข้าแบตเตอรี่จากต่างประเทศที่มีการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตแบตเตอรี่มาเป็นระยะเวลานาน มีความเชี่ยวชาญและความปลอดภัยต่อการใช้งาน ดังนั้นการมีนโยบายลดภาษีนำเข้าแบตเตอรี่ก็อาจเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถลดราคาของแบตเตอรี่ลงได้ ซึ่งสามารถลดต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ราว

13% ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และจากเดิมที่มีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำกว่ารถโดยสารสันดาปภายในอยู่ 17% จะเพิ่มขึ้นเป็น 26%



รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของหลังจากลดภาษีแบตเตอรี่

จากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารที่ทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของเกิดการเปลี่ยนแปลงนั้น พบว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของอันเนื่องมาจากอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารเกือบทุกเทคโนโลยีมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อย ยกเว้นช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากการที่อัตราการใช้พลังงานนั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อายุของแบตเตอรี่นั้นสั้นลง เพราะมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มากขึ้น ด้วยการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนภายใต้การให้บริการที่กำหนดจะทำให้มีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีอายุการใช้งานอยู่ที่ประมาณ 3-5 ปี ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นเมื่อเทียบกับระยะเวลาที่ให้บริการ 10 ปี และเมื่ออายุของแบตเตอรี่นั้นสั้นลงอีก จึงทำให้ต้องเปลี่ยนแบตเตอรี่ชุดใหม่บ่อยครั้งขึ้น ซึ่งแตกต่างกับในกรณีของแบตเตอรี่ตะกั่วน้ำกรดและซูเปอร์คาปาซิเตอร์ดังที่ได้กล่าวในข้างต้น จึงทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของอันเนื่องมาจากอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่ารถโดยสารเทคโนโลยีอื่น

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของจำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่ที่ทำให้เกิดช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้น จากรูปที่ 4.9 พบว่าการเปลี่ยนแปลงของจำนวนรอบการใช้งานแบตเตอรี่ในรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของมากเป็นอันดับที่ 2 จากปัจจัยทั้งหมด เมื่อพิจารณาถึงรอบการใช้งานแบตเตอรี่ในกรณีขั้นสูงที่มีรอบการใช้งานแบตเตอรี่มากถึง 10,000 รอบ และมีการทดสอบยืนยันว่าเป็นไปได้จริง แต่เมื่อนำมาใช้กับรถโดยสารไฟฟ้าที่มีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ปริมาณมาก อาจทำให้รอบการใช้งานที่เป็นจริงนั้นไม่ถึง 10,000 รอบ เนื่องจากในการใช้งานจริงมีการใช้งานที่แตกต่างไปจากการทดสอบ ซึ่งถ้าใช้ค่าในกรณี

ขั้นสูงนี้ในการประมาณการณ์ก็จะทำให้ได้ต้นทุนการเป็นเจ้าของออกมาน้อยกว่าปกติถึง 12% ส่วนช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์นั้น ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดอันเนื่องมาจากรอบการใช้งานที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากอายุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มากกว่าระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสาร เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวในข้างต้น

สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าซ่อมบำรุง จากรูปที่ 4.9 สังเกตได้ว่าช่วงการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นมีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อยในรถโดยสารทุกเทคโนโลยี หรือมองอีกมุมหนึ่งได้ คือสามารถเพิ่มการซ่อมบำรุงให้มากขึ้นกว่าเดิมได้ เพื่อเป็นการรักษาระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารไม่ให้ลดลง หรือเป็นการรักษาระยะทางการวิ่งให้ได้ตามที่กำหนด โดยไม่ต้องหยุดซ่อมแซมรถโดยสารฉุกเฉินระหว่างที่ให้บริการ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อช่วงการเปลี่ยนแปลงต้นทุนการเป็นเจ้าของมากกว่าค่าซ่อมบำรุง แต่ในทางกลับกันเมื่อรถโดยสารที่มีอายุการใช้งานนานมากขึ้น ก็จะมีค่าซ่อมบำรุงที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นระยะเวลาที่ให้บริการของรถโดยสารคันๆหนึ่งจึงไม่สามารถขยายออกไปได้เรื่อยๆ ซึ่งจะขยายออกไปได้จนกว่าที่ค่าซ่อมบำรุงนั้นจะเพิ่มสูงมากจนไม่คุ้มค่าต่อซ่อมแซม และจำเป็นต้องหยุดการให้บริการในที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของ สามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ให้บริการรถโดยสารในการให้บริการเดินรถได้ เช่น การควบคุมระยะทางการวิ่งของรถโดยสารเพื่อควบคุมต้นทุนการเป็นเจ้าของให้คงที่ หรือเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารเพื่อลดต้นทุนการเป็นเจ้าของ ซึ่งผู้ให้บริการรถโดยสารในที่นี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ภาคเอกชน และภาครัฐ สำหรับภาคเอกชนนั้นจะทำหน้าที่บริหารการเดินรถด้วยตนเองทั้งหมด ตั้งแต่การจัดการรถโดยสาร การจ้างพนักงาน การดูแลซ่อมบำรุง การสำรวจปริมาณผู้ใช้รถโดยสาร ตลอดจนการบริหารจัดการค่าใช้จ่าย และจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆให้เป็นไปตามที่ประเมินไว้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการควบคุมนั้นเป็นไปได้ยาก เช่น การควบคุมระยะทางการวิ่ง ภายใต้สภาพการจราจรในเมืองที่แปรผันอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้ต้นทุนการเป็นเจ้าของสูงขึ้นกว่าเดิมและส่งผลให้การลงทุนในระยะยาวนั้นขาดทุนได้

สำหรับภาครัฐนั้น ตัวภาครัฐเองอาจลงทุนด้วยตัวเองทั้งหมดเช่นเดียวกับภาคเอกชน ซึ่งมีโอกาสประสบปัญหาเช่นเดียวกับภาคเอกชนได้ หรืออีกแนวทางหนึ่งก็คือ ตัวภาครัฐนั้นอาจจัดทำสัญญาว่าจ้างขึ้นมา โดยให้ภาคเอกชนเสนอรายชื่อเข้าร่วมทำธุรกิจการเดินรถ ภายใต้ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพและการบริการที่ภาครัฐกำหนดขึ้นมา ซึ่งแต่เดิมแล้วข้อกำหนดเหล่านี้จะกำหนดในเชิงของคุณสมบัติของตัวรถโดยสาร เช่น ตัวรถโดยสารจะต้องใช้แบตเตอรี่อะไร ขนาดเท่าใด มีการ

ชาร์จอย่างไร วิ่งได้ระยะทางสูงสุดกี่กิโลเมตร เป็นต้น โดยไม่ได้คำนึงถึงความเชื่อถือได้ของตัวรถ โดยสารว่าจะให้บริการได้ตลอดช่วงอายุการใช้งานหรือไม่ หากตัวรถโดยสารไม่มีความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ย่อมเสี่ยงต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนการเป็นเจ้าของ แต่อย่างไรก็ตามความเสี่ยงเหล่านี้จะลดลงได้ด้วยการใช้ข้อกำหนดในเชิงของคุณภาพของการให้บริการ โดยพิจารณาควบคู่กับผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยเฉพาะปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุด 2 อันดับแรก กล่าวคือ รถโดยสารจะต้องวิ่งได้ระยะทางตามที่กำหนดเป็นระยะเวลาจำนวนกี่ปี สามารถให้บริการได้ตลอดทั้งวัน รวมถึงความสะดวกสบายและความปลอดภัยของผู้โดยสารอีกด้วย ซึ่งข้อกำหนดเหล่านี้เป็นข้อกำหนดที่มีลักษณะเปิดกว้างแก่ภาคเอกชนที่จะเข้ามาลงทุน เช่น ภาคเอกชนรายแรกอาจใช้รถโดยสารไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาดใหญ่ มีการชาร์จเพียงหนึ่งครั้งต่อวัน ส่วนภาคเอกชนรายที่สองอาจใช้รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยมีการชาร์จระหว่างเส้นทางการเดินทาง และภาคเอกชนรายที่สามอาจใช้รถโดยสารไฮบริด มีแบตเตอรี่ขนาดเล็ก และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวเพิ่มระยะทางการวิ่ง เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ารายละเอียดของรถโดยสารของภาคเอกชนแต่ละรายนั้นแตกต่างกันออกไป แต่สิ่งที่จะต้องเหมือนกันก็คือคุณภาพการให้บริการ และจะต้องให้บริการไปตลอดช่วงระยะเวลาตามข้อตกลงในสัญญาว่าจ้าง ซึ่งการจัดทำสัญญาว่าจ้างเช่นนี้ ถือเป็นการทำทลายความสามารถของภาคเอกชนที่จะต้องดึงศักยภาพและความสามารถของตนเองออกมาแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่นๆ และการจัดทำสัญญาว่าจ้างนี้เอง ไม่เพียงแต่เป็นการทำทลายความสามารถของภาคเอกชนเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการช่วยพัฒนาและส่งเสริมอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์อีกด้วย เนื่องจากภาคเอกชนแต่ละรายก็มีความคิดที่แตกต่างกันออกไป และโดยทั่วไปแล้วภาคเอกชนก็มักจะนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาใช้อยู่เสมอ ทำให้เทคโนโลยีเหล่านี้ถูกนำมาเปิดเผยแก่สายตาประชาชนภายในประเทศมากยิ่งขึ้น มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย และนำไปสู่อุตสาหกรรมการลงทุนอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ล้ำสมัยในที่สุด

อย่างไรก็ตามภาพรวมของเทคโนโลยีรถโดยสารไฟฟ้านั้น จะไม่สามารถก้าวเดินไปข้างหน้าได้ ถ้าหากยังคงมีข้อกั่วงวลในการใช้การชาร์จที่รวดเร็วอยู่ เช่น ข้อกั่วงวลเกี่ยวกับความปลอดภัยต่อตัวผู้ใช้งานเองที่จะต้องอยู่ในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าสูง หรือตัวแบตเตอรี่ที่มีการเสื่อมสภาพการใช้งานเร็วขึ้น เป็นต้น ในขณะที่เดียวกันทางด้านของผู้ผลิตแบตเตอรี่ก็ได้นำเสนอว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานมากและสามารถชาร์จด้วยกระแสไฟฟ้าที่สูงได้ แต่ก็ยังไม่สามารถลบข้อกั่วงวลเหล่านี้ให้หมดไปได้ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ไม่มีการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้งานจริง ซึ่งไม่ตอบโจทย์ในแง่ของการลงทุนและสิ่งแวดล้อมในการใช้งานรถโดยสารไฟฟ้าที่สามารถตอบโจทย์ได้ดีกว่ารถโดยสารสันดาปภายใน

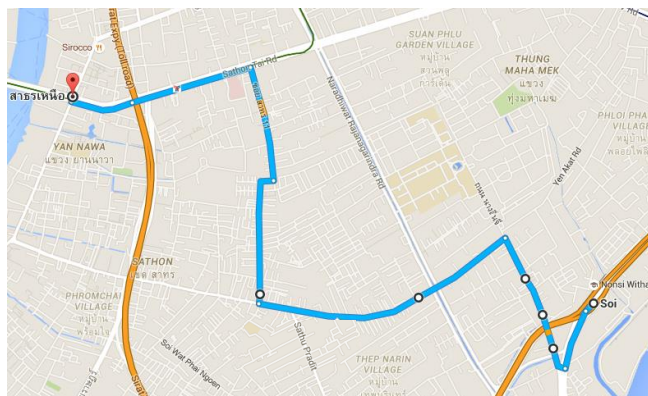
4.3 การประยุกต์ใช้ต้นทุนการเป็นเจ้าของ

หลังจากการศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารระยะสั้นเทคโนโลยีต่างๆ จึงทดสอบการนำไปประยุกต์ใช้กับรถโดยสารระยะสั้นชนิดอื่น เพื่อแสดงให้เห็นว่าหลักการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งรถโดยสารระยะสั้นชนิดอื่นที่นำมาพิจารณาเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้และมีการให้บริการอยู่จริง คือ รถโดยสารขนาดเล็กร่วมบริการ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า รถสองแถว ซึ่งเป็นรถที่มีความยาว 5 เมตร น้ำหนักตัวรถประมาณ 1.6 ตัน มีที่นั่ง 12 ที่นั่ง รองรับผู้โดยสารได้สูงสุดโดยประมาณ 18 คน ลักษณะของรถสองแถวเป็นดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สภาพภายนอกของรถสองแถวในเส้นทางการเดินรถสายที่ 1256

เส้นทางการเดินรถสองแถวที่เลือกพิจารณาในงานวิจัย คือ เส้นทางการเดินรถ สายที่ 1256 สะพานเฉลิมพันธ์ – วัดช่องลม ดังรูปที่ 4.13 มีระยะทางรวมทั้งสิ้นเท่ากับ 14.8 กิโลเมตร โดยเส้นทางที่เลือกพิจารณานี้มีเส้นทางการเดินรถผ่านถนนสายรองและในซอยที่เชื่อมต่อกับถนนสายหลักที่มีระบบขนส่งมวลชน ได้แก่ รถโดยสารประจำทางและรถไฟฟ้า ภายในเส้นทางการเดินรถผ่านเขตชุมชนที่อยู่อาศัย เขตโรงเรียน โรงพยาบาล และสถานที่ทำงาน จึงทำให้เส้นทางการเดินรถสายนี้มีความเหมาะสมต่อการนำมาพิจารณาเป็นรถโดยสารระยะสั้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.13 เส้นทางรถโดยสารสองแถว สายที่ 1256

หลักการในการประยุกต์ใช้ต้นทุนการเป็นเจ้าของกับเส้นทางรถโดยสารสองแถวนี้ คือ คำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถวที่ให้บริการตามปกติ เปรียบเทียบกับการนำรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้ไปให้บริการแทนรถสองแถว โดยมีเส้นทางรถโดยสาร จำนวนรอบการวิ่ง และจำนวนผู้โดยสารที่รับ-ส่ง เช่นเดียวกับรถสองแถว

ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถว นั้น จะใช้ข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยข้อมูลราคารถกระบะ จำนวนรอบที่วิ่งต่อวันโดยเฉลี่ย อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง ได้มาจากการสอบถามโดยตรงกับผู้ขับรถสองแถว ส่วนค่าซ่อมบำรุงต่อปีอ้างอิงจากรายงานของ นักรัฐพร และ อดุลยวัฒน์ [62] สำหรับค่าจ้างพนักงานขับรถต่อเดือนและระยะเวลาที่ให้บริการจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้ โดยผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถวดังแสดงในรูปที่ 4.15

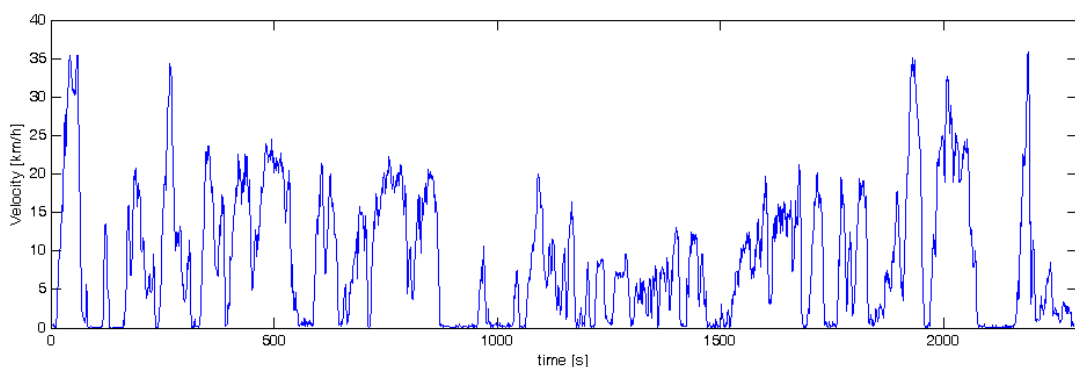
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลของรถสองแถว

| รายการ | หน่วย | ข้อมูล |
|------------------------------------|-------------|---------|
| ราคารถกระบะ | บาท | 800,000 |
| จำนวนรอบที่วิ่งต่อวันโดยเฉลี่ย | รอบ | 5 |
| ค่าน้ำมัน (ดีเซล) | บาท/ลิตร | 25.09* |
| อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง | ลิตร/100กม. | 12.15 |
| ค่าซ่อมบำรุงต่อปี | บาท | 50,000 |
| ค่าจ้างพนักงานขับรถต่อเดือน | บาท | 12,000 |
| ระยะเวลาที่ให้บริการ | ปี | 10 |

*ที่มา : กระทรวงพลังงาน ข้อมูล ณ วันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2559 [43]

สำหรับการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าที่จะนำมาเปรียบเทียบกับรถสองแถวนั้น จะต้องรู้ถึงพลังงานที่ใช้ในการเดินรถสำหรับเส้นทางนี้เสียก่อน เพื่อนำไปกำหนดขนาดแบตเตอรี่ และทำการปรับลดอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารอันเนื่องมาจากน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ ซึ่งกำหนดให้รถโดยสารใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับหัวข้อในบทที่ 3 กล่าวคือใช้ข้อมูลการวิ่งของรถสองแถวที่เก็บมาจาก GPS แล้วนำไปทำนายอัตราการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP ในรูปที่ 3.8 โดยไม่คิดถึงการใช้พลังงานในส่วนจากระบบปรับอากาศเพื่อให้รถโดยสารมีลักษณะเช่นเดียวกับรถสองแถวที่ไม่มีระบบปรับอากาศ

งานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกข้อมูลรูปแบบอัตราเร็วของรถสองแถวเป็นจำนวน 4 เที่ยว (2 รอบ) ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 11.00 น. โดยตัวอย่างข้อมูลอัตราเร็วของรถสองแถวในเส้นทางการเดินรถสายที่ 1256 เป็นดังรูปที่ 4.14 ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยมีระยะเวลาที่ใช้วิ่งต่อรอบโดยเฉลี่ยประมาณ 40 นาที และพบว่าการอบที่มีอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารสูงที่สุดมีอัตราการใช้พลังงานเท่ากับ 809 Wh/km และเมื่อนำไปประมาณอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยจากการจราจรตลอดทั้งวัน จะได้อัตราการใช้พลังงานเท่ากับ 542 Wh/km



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างข้อมูลอัตราเร็วของรถสองแถวในเส้นทางการเดินรถสายที่ 1256

จากการนำข้อมูลรูปแบบการวิ่งรถสองแถวไปทำนายการใช้พลังงานในรถโดยสาร จะได้อัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารออกมา และสามารถนำไปกำหนดขนาดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่อไปได้ หลังจากนั้นจึงทำการปรับลดอัตราการใช้พลังงานอันเนื่องมาจากน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในตารางที่ 3.6 ได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ขนาดแบตเตอรี่และอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า

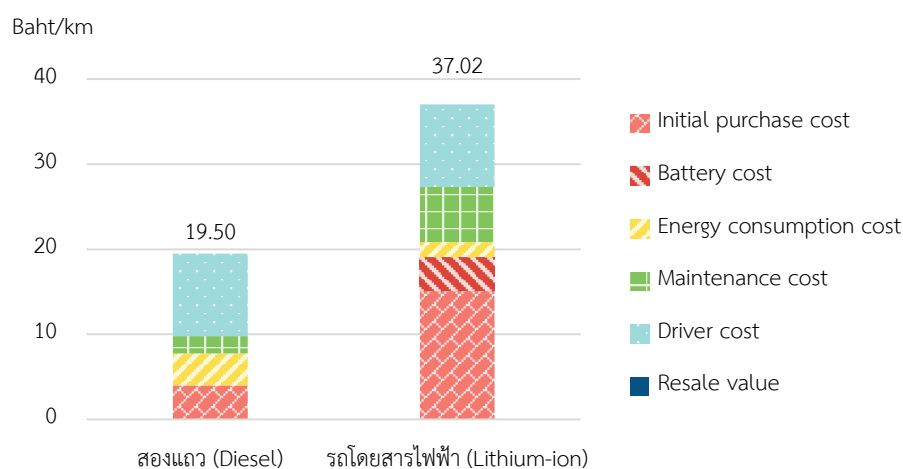
| รายการ | หน่วย | ข้อมูล |
|-----------------------------|-------|--------|
| ขนาดแบตเตอรี่ | kWh | 42.08 |
| อัตราการใช้พลังงาน | Wh/km | 542 |
| อัตราการใช้พลังงาน (ปรับลด) | Wh/km | 478 |

นอกจากนี้จากการสอบถามข้อมูลจากคนขับรถสองแถวพบว่าจำนวนรถสองแถวที่ให้บริการทั้งหมด และความจุผู้โดยสารของรถสองแถว เป็นดังตารางที่ 4.8 สำหรับในงานวิจัยนี้ เพื่อให้รถโดยสารไฟฟ้ามีความจุผู้โดยสารรวมทั้งระบบการเดินรถเท่ากับของรถสองแถว จึงพบว่าจำนวนรถโดยสารไฟฟ้าที่จะต้องใช้พิจารณาในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของจึงเท่ากับ 20 คัน

ตารางที่ 4.8 ตารางเปรียบเทียบความจุผู้โดยสารและจำนวนรถของรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้า

| ชนิดของรถ | ความจุ (คน) | จำนวน (คัน) |
|---------------|-------------|-------------|
| รถสองแถว | 18 | 50 |
| รถโดยสารไฟฟ้า | 45 | 20 |

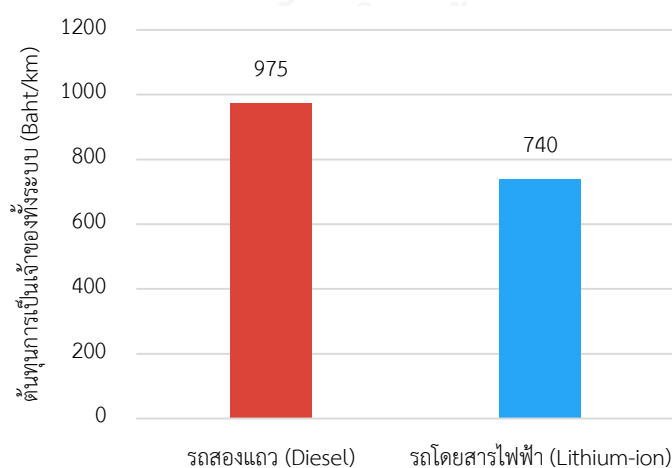
ในการให้บริการของรถโดยสารไฟฟ้า กำหนดให้รถโดยสารไฟฟ้ามีการชาร์จที่สถานีต้นทางและสถานีปลายทางครั้งละ 5 นาที ด้วยระดับการชาร์จปกติ และสำหรับข้อมูลอื่น ๆ ในการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ จะใช้ข้อมูลเดียวกับรถโดยสารที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 ได้ผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของดังรูปที่ 4.15 ภายใต้ขนาดของรถโดยสารที่มีความจุผู้โดยสารแตกต่างกัน แต่มีระยะทางวิ่งต่อวันเท่ากัน



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถวกับรถโดยสารไฟฟ้า

จากผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้า พบว่ารถโดยสารไฟฟ้ามีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่อคันราว 37 บาทต่อกิโลเมตร และรถสองแถวมีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่อคันราว 20 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งน้อยกว่าต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้าอยู่ถึง 49% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าสัดส่วนของค่าแบตเตอรี่ในรถโดยสารไฟฟ้ามีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับค่าลงทุนเริ่มต้น เนื่องจากในการคำนวณนี้จะไม่รวมการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ เพื่อให้รถโดยสารมีลักษณะเช่นเดียวกับรถสองแถวที่ไม่มีระบบปรับอากาศ จึงทำให้รถโดยสารใช้พลังงานน้อยลง แบตเตอรี่จึงมีขนาดเล็กและมีค่าแบตเตอรี่น้อยนั่นเอง ยิ่งไปกว่านั้นรถสองแถวยังมีต้นทุนเริ่มต้นและค่าซ่อมบำรุงน้อยกว่ารถโดยสารไฟฟ้า เนื่องจากรถสองแถวมีขนาดเล็กกว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่นำมาพิจารณา จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในสองส่วนนี้น้อยกว่า

สำหรับการเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของระหว่างรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้านั้น พบว่าต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารไฟฟ้ามากกว่าของรถสองแถวอยู่ถึง 2 เท่าตัว แต่เมื่อพิจารณาถึงขนาดความจุผู้โดยสารของรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้านั้นพบว่ามีความแตกต่างกัน ทำให้ในการรับ-ส่งผู้โดยสารจำนวนเท่ากัน จะต้องใช้จำนวนรถโดยสารที่ต่างกัน โดยจำนวนรถโดยสารที่ใช้ในการให้บริการจะน้อยลงเมื่อใช้รถโดยสารไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดสำหรับการนำมาเปรียบเทียบกันด้วยการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของแบบทั้งระบบการเดินรถ ซึ่งมีจำนวนรถเป็นดังตารางที่ 4.8 ได้ต้นทุนการเป็นเจ้าของทั้งระบบการเดินรถดังรูปที่ 4.16 ซึ่งต้นทุนการเป็นเจ้าของในระบบรถโดยสารไฟฟ้ามีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำกว่าในระบบรถสองแถวอยู่ถึง 24%



รูปที่ 4.16 ต้นทุนการเป็นเจ้าของทั้งระบบการเดินรถของรถสองแถวและรถโดยสารไฟฟ้า

นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลการเข้ามาใช้บริการรถสองแถวและความถี่ในการออกรถที่สถานีต้นทางของรถสองแถว โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 7.30 น. – 8.30 น. ซึ่ง

เป็นช่วงเวลาที่ผู้มาใช้บริการรถสองแถวค่อนข้างมากหรือเป็นช่วงเวลาเร่งด่วน ผลการเก็บข้อมูลเป็นดังตารางที่ 4.9 แต่ว่าการที่กำหนดให้มีรถโดยสารไฟฟ้าในระบบการเดินรถลดลงเหลือเพียงจำนวน 20 คันนั้น จะส่งผลต่อความถี่ในการออกรถที่สถานีต้นทางที่ทำให้ความถี่ของการออกรถนั้นน้อยลงหรือเปลี่ยนแปลงเป็น 5 นาทีต่อคัน แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการออกรถที่เพิ่มขึ้นเป็น 5 นาทีนั้นยังคงอยู่ช่วงระยะเวลาที่ยอมรับได้และสามารถให้บริการได้ตามปกติ

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลจากการสำรวจการให้บริการรถสองแถว

| รายการ | หน่วย | ข้อมูล |
|-------------------------|----------|--------|
| อัตราการเข้ามาใช้บริการ | คน/นาที | 5-6 |
| ความถี่ในการออกรถ | นาที/คัน | 2 |

แต่อย่างไรก็ตามการใช้รถสองแถวที่เป็นรถยนต์ที่มีเทคโนโลยีสันดาปภายในนั้น ย่อมก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศจากไอเสียมากกว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่ปราศจากการปล่อยมลพิษ ดังนั้นเมื่อมองในเชิงของสิ่งแวดล้อมแล้ว จึงทำให้รถโดยสารไฟฟ้าได้เปรียบรถสองแถวอย่างชัดเจน และถึงแม้ว่าผลการคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของทั้งระบบของรถโดยสารไฟฟ้าจะต่ำกว่าระบบรถสองแถว แต่ด้วยระยะเวลาการเก็บข้อมูลที่สั้น การคำนวณในงานวิจัยนี้จึงคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของที่มีการเก็บข้อมูลการให้บริการรถสองแถวในช่วงเวลาที่สภาพการจราจรติดขัด และประมาณอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยจากการจราจรตลอดทั้งวันจากข้อมูลทางสถิติขึ้น ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารได้ แต่ว่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารนั้นส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของเพียง 3% จากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการใช้พลังงานไป 20% ซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหว ดังนั้นการเปรียบเทียบและประยุกต์ใช้ต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้ได้อย่างสมเหตุสมผล

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

รถโดยสารไฟฟ้าที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน ย่อมมีต้นทุนของรถโดยสารที่แตกต่างกันด้วย งานวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณและเปรียบเทียบต้นทุนการเป็นเจ้าของในรถโดยสารที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน และศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหว รถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่ถูกนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ รถโดยสารไฟฟ้าไฮบริด (รถโดยสารที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบัน) รถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับรถโดยสารสันดาปภายในที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายท้องตลาดอีกด้วย

งานวิจัยนี้เริ่มจากการสร้างแบบจำลองต้นทุนการเป็นเจ้าของขึ้น เพื่อแสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับต้นทุนการเป็นเจ้าของ หลังจากนั้นจึงอธิบายถึงรูปแบบการให้บริการรถโดยสารและลักษณะของรถโดยสารที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ รวมถึงการเก็บข้อมูลการเดินทางที่ได้จาก GPS ของรถโดยสารแต่ละคันทั้งหมด 1596 รอบ ที่ครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลายจากการให้บริการจริงเพื่อนำไปทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยแบบจำลอง VSP ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีความแม่นยำและสะดวกในการใช้งาน แล้วจึงนำข้อมูลอัตราการใช้พลังงานไปใช้ในการออกแบบขนาดแบตเตอรี่ในรถโดยสารที่มีการใช้งานควบคู่กับการชาร์จที่รวดเร็ว เพื่อให้มีพลังงานเพียงพอต่อการให้บริการตลอดวัน โดยคำนึงถึงน้ำหนักรวมของแบตเตอรี่ที่ส่งผลต่ออัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วย

ผลการศึกษาพบว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีต้นทุนการเป็นเจ้าของต่ำที่สุดภายใต้การให้บริการในปัจจุบัน ซึ่งต่ำกว่ารถโดยสารสันดาปภายในและไฮบริดอยู่ 17% และ 6% ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นผลการศึกษาด้านต้นทุนการเป็นเจ้าของในงานวิจัยนี้ยังแตกต่างกับในงานวิจัยอื่นด้วย เนื่องจากพารามิเตอร์ระยะทางการวิ่งของรถโดยสารและระยะเวลาการให้บริการรถโดยสาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการเป็นเจ้าของมากที่สุด 2 อันดับแรก มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ในเฉพาะกรณีรถโดยสารที่ใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ การเพิ่มจำนวนสถานีชาร์จระหว่างเส้นทางการเดินทาง สามารถลดขนาดแบตเตอรี่ให้เล็กลงได้ นำไปสู่การลดต้นทุนการเป็นเจ้าของได้มากถึง 23%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ให้บริการรถโดยสารได้ เช่น การควบคุมระยะเวลาทางการวิ่งของรถโดยสารที่ควบคุมต้นทุนการเป็นเจ้าของให้คงที่ หรือเพิ่มระยะเวลาที่ให้บริการรถโดยสารเพื่อลดต้นทุนการเป็นเจ้าของลง ซึ่งผู้ให้บริการรถโดยสารในนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ภาคเอกชน และภาครัฐ สำหรับภาคเอกชนนั้นจะทำหน้าที่บริหาร การเดินทางด้วยตนเองทั้งหมด และจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆให้เป็นไปตามที่ประเมินไว้ใน การคำนวณต้นทุนการเป็นเจ้าของ แต่ในความเป็นจริงแล้วการควบคุมนั้นเป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ต้นทุน การเป็นเจ้าของสูงขึ้นกว่าเดิมและส่งผลให้การลงทุนในระยะยาวนั้นขาดทุนได้

สำหรับภาครัฐอาจลงทุนด้วยตัวเองทั้งหมดเช่นเดียวกับภาคเอกชน ซึ่งมีโอกาสประสบปัญหา เช่นเดียวกับภาคเอกชนได้ หรืออีกแนวทางหนึ่งก็คือ ตัวภาครัฐนั้นควรจัดทำสัญญาว่าจ้างขึ้นมา ภายใต้อำนาจกำกับเกี่ยวกับคุณภาพและการบริการที่กำหนดขึ้น แต่ไม่ควรกำหนดในเชิงของคุณสมบัติ ของตัวรถโดยสาร ที่ไม่ได้คำนึงถึงความน่าเชื่อถือของตัวรถโดยสารว่าจะให้บริการได้ตลอดช่วงอายุการ ใช้งานหรือไม่ แต่ควรข้อกำหนดในเชิงของคุณภาพของการให้บริการ ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่มีลักษณะ เปิดกว้างแก่ผู้มาลงทุนแต่ยังคงไว้ด้วยคุณภาพการให้บริการ ถือเป็นการทำงานหาความสามารถของ ภาคเอกชนและนำไปสู่โอกาสการลงทุนอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ล้ำสมัยในที่สุด

อย่างไรก็ตามภาพรวมของเทคโนโลยีรถโดยสารไฟฟ้านั้น จะไม่สามารถก้าวเดินไปข้างหน้าได้ ถ้าหากผู้ใช้งานยังคงมีข้อกังวลในการใช้การชาร์จที่รวดเร็วอยู่ ถึงแม้ว่าทางฝ่ายผู้ผลิตจะรับรอง คุณภาพและความปลอดภัยในการใช้งานก็ตาม ดังนั้นจึงควรเปิดใจยอมรับเทคโนโลยีเหล่านี้และ นำมาใช้งานจริง เพื่อเป็นการตอบโจทย์ของการใช้งานรถโดยสารไฟฟ้าในแง่ของการลงทุนและ สิ่งแวดล้อมที่ดีกว่าการใช้งานรถโดยสารสันดาปภายใน

รายการอ้างอิง

1. Al-mulali, U., *Factors affecting CO2 emission in the Middle East: A panel data analysis*. Energy, 2012. 44(1): p. 564-569.
2. Ceylan, H., et al., *Transport energy modeling with meta-heuristic harmony search algorithm, an application to Turkey*. Energy Policy, 2008. 36(7): p. 2527-2535.
3. Ratanavaraha, V. and S. Jomnonkwao, *Trends in Thailand CO2 emissions in the transportation sector and Policy Mitigation*. Transport Policy, 2015. 41: p. 136-146.
4. Vuchic, V.R., *Urban public transportation systems*. University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, USA, 2002.
5. จำนวนรถจดทะเบียน (สะสม) ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2532-2558. 2558, กลุ่มสถิติการขนส่ง กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก.
6. Jaiswal, A.A. and A. Sharma, *Optimization of Public Transport Demand: A Case Study of Bhopal*. Population, 2012. 2(7): p. 1-15.
7. Tangphaisankun, A., F. Nakamura, and T. Okamura, *Influences of Paratransit as A Feeder of Mass Transit System in Developing Countries Based on Commuter Satisfaction*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2010. 8: p. 1341-1356.
8. Tangphaisankun, A., et al. *A study in integrating paratransit as a feeder system into urban transportation and its effects on mode choice behavior: a study in Bangkok, Thailand*. in *Proceedings of 12th WCTR Conference*. 2010.
9. Phun, V.K. and T. Yai, *State of the art of paratransit literatures in Asian developing countries*. Proceedings of the 13 th Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2015: p. 11-14.
10. สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, วิศวกรรมขนส่ง. 2551, ภาควิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

11. ธนบัตร บัวแก้ว. *TCO : Total Cost of Ownership – ต้นทุนการเป็นเจ้าของ*. 2558 [cited 22 มีนาคม 2559]; Available from: <http://www.fkmicro.com/?p=154#sthash.GkROiDuZ.dpbs>.
12. การคำนวณต้นทุนโดยรวมในการเป็นเจ้าของ (*Total Cost of Ownership*) สำหรับอุปกรณ์ตรวจจับโลหะของคุณ. [cited 22 มีนาคม 2559]; Available from: http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/know_how/SLMD_ROW_TC_O.html.
13. *Total cost of ownership (TCO) ต้นทุนการเป็นเจ้าของ*. 2552 [cited 22 มีนาคม 2559]; Available from: <http://gkengitm.blogspot.com/2009/12/total-cost-of-ownership-tco.html>.
14. Goedecke, M., S. Therdthianwong, and S.H. Gheewala, *Life cycle cost analysis of alternative vehicles and fuels in Thailand*. *Energy Policy*, 2007. 35(6): p. 3236-3246.
15. Kerdlap, P. and S.H. Gheewala, *Electric Motorcycles in Thailand: A Life Cycle Perspective*. *Journal of Industrial Ecology*, 2016.
16. Lin, C., et al., *Life-cycle private costs of hybrid electric vehicles in the current Chinese market*. *Energy Policy*, 2013. 55: p. 501-510.
17. Wu, G., A. Inderbitzin, and C. Bening, *Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments*. *Energy Policy*, 2015. 80: p. 196-214.
18. Nurhadi, L., S. Borén, and H. Ny, *Advancing from Efficiency to Sustainability in Swedish Medium-sized Cities: An Approach for Recommending Powertrains and Energy Carriers for Public Bus Transport Systems*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014. 111: p. 1218-1225.
19. Nurhadi, L., S. Borén, and H. Ny, *A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities*. *Transportation Research Procedia*, 2014. 3: p. 818-827.
20. Boer, J.d., *Urban buses: alternative powertrains for Europe*. 2012: FCH JU premises.

21. จิรุตม์ ศรีรัตนบัลล์, ประมวลสารระชุดริชา “การบริหารจัดการเพื่อการพัฒนาโรงพยาบาล 58703” หน่วยที่ 5 การจัดการงบประมาณ. 2545, สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช: นนทบุรี. p. 337 -379.
22. Raha, S. *Tornado Diagram: Resolving Conflict and Confusion with Objectivity and Evidence*. 2011 [cited 15 May 2016].
23. Ong, H.C., et al., *Life cycle cost and sensitivity analysis of palm biodiesel production*. *Fuel*, 2012. 98: p. 131-139.
24. MacGillivray, A., et al., *Innovation and cost reduction for marine renewable energy: A learning investment sensitivity analysis*. *Technological Forecasting and Social Change*, 2014. 87: p. 108-124.
25. Huggins, R.A., *Energy Storage*. Second Edition ed. *Fundamentals, Materials and Applications*. 2010: Springer International Publishing Switzerland. 540.
26. Lawson, B. *Battery and Energy Technologies: Lead Acid Battery*. 2005 [cited 2016 24 January]; Available from: <http://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>.
27. Korsesthakarn, K., *Implementation of energy storage system with fleet management on electric shuttle buses*, in *Dept. Mech. Eng. 2013*, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand.
28. Naish, D.C., et al., *Outlook of Energy Storage Technologies Brussel*, P.D.E.a.S. Policy, Editor. 2008.
29. Mir, L., et al. *A supercapacitor based light rail vehicle: system design and operations modes*. in *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*. 2009.
30. Lu, R., et al., *Super-Capacitor Stacks Management System With Dynamic Equalization Techniques*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007. 43(1): p. 254-258.
31. Leslie, E., et al., *Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results*. 2016, National Renewable Energy Laboratory.
32. นิสัย เพื่องเวโรจน์สกุล, โครงการการพัฒนาาระบบจัดการแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าแบบลูกผสม. 2009, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ: บัณฑิตวิทยาลัย วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน.

33. ทิพย์วัลย์ พิศาลปิติ, ชัชพล โมทเนียชาติ, และฉันทพร ประสารศิริมัย. โครงการการพัฒนาชุดแบตเตอรี่ขนาดย่อส่วนที่เหมาะสมกับรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2013, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: โครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล.
34. สิริอร ปิตานูวัตร. *The application of VSP fuel consumption model on Hybrid and conventional vehicles in Bangkok traffic conditions.* in *The 35th world automotive congress FISITA 2014.* 2014. Maastricht, Netherlands.
35. Frey, H.C., et al., *Comparing real-world fuel consumption for diesel- and hydrogen-fueled transit buses and implication for emissions.* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007. 12(4): p. 281-291.
36. Yu, Q., T. Li, and H. Li, *Improving urban bus emission and fuel consumption modeling by incorporating passenger load factor for real world driving.* Applied Energy, 2016. 161: p. 101-111.
37. Zhang, S., et al., *Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing.* Applied Energy, 2014. 113: p. 1645-1655.
38. Rogge, M., S. Wollny, and D. Sauer, *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements.* Energies, 2015. 8(5): p. 4587.
39. Bi, Z., et al., *Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system.* Applied Energy, 2015. 146: p. 11-19.
40. *Deep cycle battery EB series,* Yuasa Battery (Thirdland) Public Company Limited, Editor. 2555.
41. CALB. *CALB English brochure.* 2014 [cited 2016 15 February]; Available from: <http://en.calb.cn/download/>.
42. Maxwell Technologies. *Ultracapacitor Overview.* 2016 [cited 2016 3 March]; Available from: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/k2-series>.
43. ราคาน้ำมันวันนี้. 2559: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน
44. Guo, J., et al., *Comparison of real-world fuel economy and emissions from parallel hybrid and conventional diesel buses fitted with selective catalytic reduction systems.* Applied Energy, 2015. 159: p. 433-441.

45. *City Bus*. 2016 [cited 2016 1 July]; Available from: <http://www.made-in-china.com/>.
46. *New city buses*. 2016 [cited 2016 1 July]; Available from: <http://autoline.info/>.
47. Channegowda, J., V.K. Pathipati, and S.S. Williamson. *Comprehensive review and comparison of DC fast charging converter topologies: Improving electric vehicle plug-to-wheels efficiency*. in 2015 *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. 2015.
48. Rahman, I., et al., *Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. 58: p. 1039-1047.
49. Miller, J.F., *Analysis of Current and Projected Battery Manufacturing Costs for Electric, Hybrid, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. *World Electric Vehicle*, 2010. 4: p. 347-350.
50. Murray, D.B. and J.G. Hayes, *Cycle Testing of Supercapacitors for Long-Life Robust Applications*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015. 30(5): p. 2505-2516.
51. Andrew, B. and Z. Hengbing, *Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles*. 2015, Institute of Transportation Studies.
52. Jens, G., *State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods*, in *Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment*. 2012, Chalmers University of Technology. p. 150.
53. Greg, A., E. Jake, and A.-H. Said, *A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications*. 2012: AllCell Technologies LLC.
54. Battery University. *Lead Acid Battery*. [cited 2016 18 June]; Available from: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries.
55. ณรงค์ ป้อมหลักทอง และคณะ, *โครงการมาตรฐานด้านความปลอดภัยของรถในระบบรถโดยสารประจำทาง : การกำหนดมาตรฐานการบังคับใช้และการตรวจสอบ*. 2555, สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย.
56. ยศพงษ์ ลออนวล, *การพัฒนารถโดยสารไฟฟ้าในประเทศไทย, งานประชุมระดมสมอง "วิจัยรถเมล์ไฟฟ้า"*. 2558: สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ.

57. Robledillo, G. *Expatisan Cost of Living Index*. 2015 [cited 2016 14 March]; Available from: <https://www.expatisan.com/cost-of-living>.
58. Miles, J. and S. Potter, *Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project*. Research in Transportation Economics, 2014. 48: p. 357-363.
59. Rajat, R., C. Steven I., and D. Janice R., *Estimation of Bus Dwell Times with Automatic Passenger Counter Information*. Transportation Research Record, 2003. 1841: p. 120-127.
60. Xu, L., et al., *Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost*. Applied Energy, 2013. 103: p. 477-487.
61. De Filippo, G., V. Marano, and R. Sioshansi, *Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University*. Applied Energy, 2014. 113: p. 1686-1691.
62. นัธฐพร โนสูงเนิน และอดุลย์วัฒน์ เศษสุวรรณ, การศึกษาโครงสร้างต้นทุนการเดินทางโดยสารประจำทางภายในจังหวัดขอนแก่น: กรณีศึกษารถโดยสารประจำทางสาย 8, 9, 10 และ 16. 2552: ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
63. สิริอร ปิตานูวัตร, การประเมินอัตราการใช้พลังงานของรถยนต์ไฮบริดและรถยนต์สันดาปภายในภายใต้การใช้งานจริงบริเวณกรุงเทพมหานคร. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
64. Wang, H. and W. Zhang, *Application of Wavelet Transform in Vehicle Speed Signal Denoising in International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2009, Institute of Electrical & Electronics Engineering (IEEE).
65. Bao, W., *Vehicle Dynamic Testing Data Processing Using Wavelet Analysis*, in *International Conference on Control, Automation and Systems Engineering*. 2009, Institute of Electrical & Electronics Engineering (IEEE).
66. Misiti, M., et al., *Wavelet Toolbox For Use with MATLAB*. 1996, The MathWorks, Inc. p. 626.



ภาคผนวก

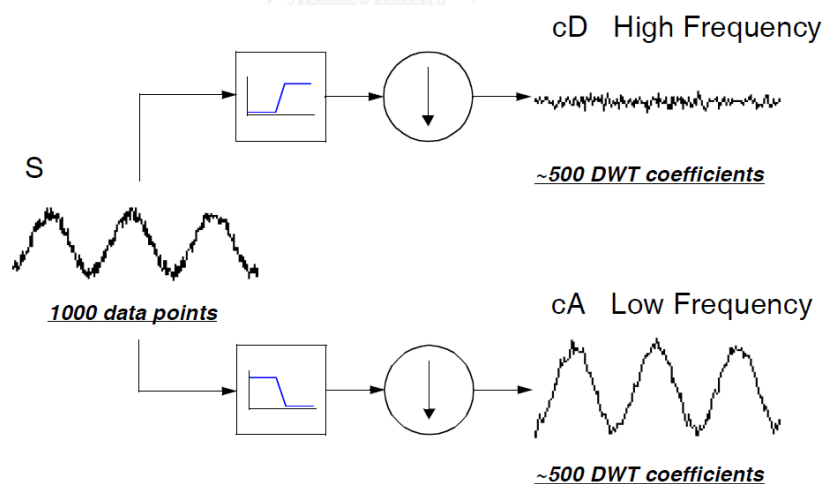
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลความเร็ว

ในการเก็บข้อมูลนั้นโดยทั่วไปแล้วมักจะมีสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งเกิดขึ้นกับทุกอุปกรณ์ และเมื่อข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนผ่านการคำนวณต่อไป จะพบว่าสัญญาณรบกวนนั้นจะปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้น ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลจึงสามารถช่วยทำให้ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการปรับปรุงคุณภาพข้อมูลนั้นสามารถทำได้ด้วยการใช้ Wavelet transform [63]

นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2552 งานวิจัยของ Wang และ Zhang [64] และในปี พ.ศ. 2556 งานวิจัยของ Bao [65] ยังได้ใช้วิธี Wavelet transform ในการปรับปรุงข้อมูลความเร็วของรถยนต์ เช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงปรับปรุงข้อมูลความเร็วรถยนต์ด้วยการใช้ Wavelet transform เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

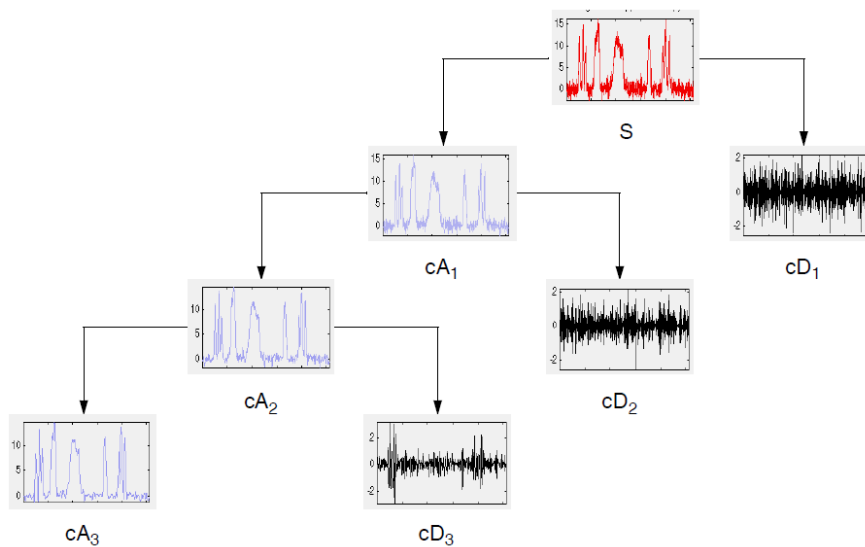
หลักการของ Wavelet transform เป็นการแยกข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลที่มีความถี่สูง และข้อมูลที่มีความถี่ต่ำ โดยใช้วิธี Highpass และ Lowpass filter ดังแสดงในรูปที่ ก1 โดย S คือ สัญญาณขาเข้า A คือ สัญญาณขาออกส่วนที่เป็นความถี่ต่ำ และ D คือ สัญญาณขาออกส่วนที่เป็นความถี่สูง



รูปที่ ก1 หลักการกรองข้อมูลด้วยวิธี Wavelet transform [66]

การกรองข้อมูลด้วยวิธี Wavelet transform จะแยกข้อมูลออกมาเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนความถี่ต่ำ (A) และส่วนความถี่สูง (D) ดังรูปที่ ก2 ข้อมูลส่วนความถี่สูงจะเป็นข้อมูลที่บันทึกรายละเอียดของสัญญาณรบกวนเอาไว้ ซึ่งสามารถกรองหรือลดทอนผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณความถี่สูงด้วยการเลือกคูณค่า cD (Coefficient of detailed part) เข้ากับตัวสัญญาณ ซึ่งโดย

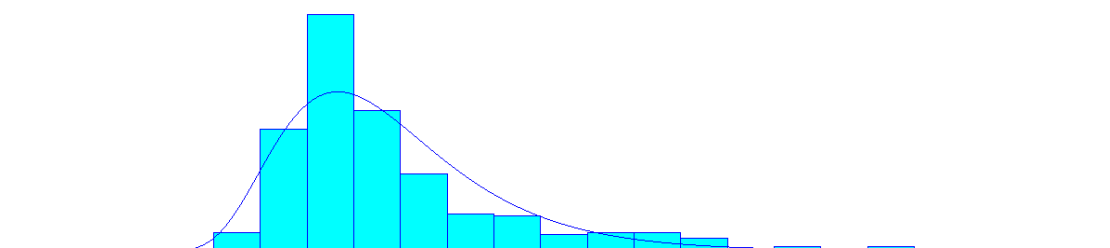
ส่วนมากมักใช้ค่า cD เป็นศูนย์ หรือกรองสัญญาณรบกวนออกทั้งหมด สำหรับข้อมูลความถี่ต่ำ จะเป็นข้อมูลที่ถูแยกสัญญาณรบกวนออกไป ซึ่งเป็นส่วนที่จะนำไปใช้งาน โดยส่วนมากมักปรับค่า cA (Coefficient of approximated part) ให้มีค่าใกล้เคียง 1 หรือใช้ข้อมูลในส่วนความถี่ต่ำนี้ทั้งหมด หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลส่วนดังกล่าวมาทำการแยกส่วนในชั้น (Layer) ต่อไปและทำเช่นนี้จนกว่าจะได้สัญญาณที่ต้องการ



รูปที่ ก2 แผนผังการประมวลผลสัญญาณด้วยวิธี Wavelet transform [66]

ภาคผนวก ข การแจกแจงความน่าจะเป็นของข้อมูล

ข้อมูลการเดินทางจากการให้บริการจริงที่ได้จาก GPS ในรถโดยสารแต่ละคัน จะถูกนำไปทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้า และแสดงผลการทำนายในรูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงาน เพื่อเป็นการพิจารณาถึงอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารที่ครอบคลุมถึงการแปรผันของสภาพการจราจรตลอดทั้งวัน อีกทั้งยังคำนวณค่าทางสถิติต่างๆ ดังนี้



รูปที่ ข1 การแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าคันที่ 1

Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.16194, 0.1749)

Expression: $0.66 + \text{LOGN}(0.532, 0.208)$

Square Error: 0.016780

Chi Square Test

Number of intervals = 9

Degrees of freedom = 6

Test Statistic = 55.3

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

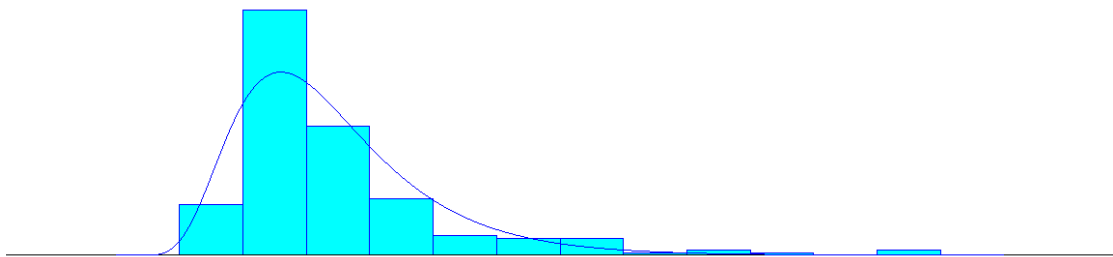
Number of Data Points = 362

Min Data Value = 0.814

Max Data Value = 2.27

Sample Mean = 1.2

Sample Std Dev = 0.235



รูปที่ ข2 การแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าคันที่ 2

Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.21349, 0.19540)

Expression: $0.72 + \text{LOGN}(0.538, 0.238)$

Square Error: 0.022572

Chi Square Test

Number of intervals = 6

Degrees of freedom = 3

Test Statistic = 24.3

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

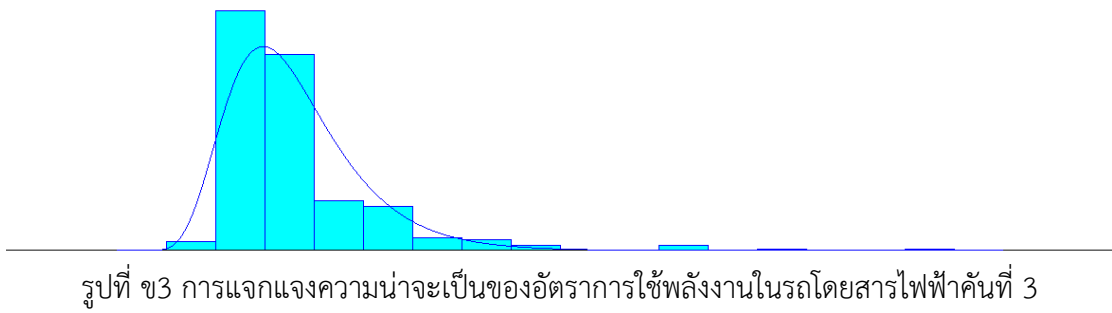
Number of Data Points = 196

Min Data Value = 0.913

Max Data Value = 2.75

Sample Mean = 1.26

Sample Std Dev = 0.295



Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.17706, 0.19146)

Expression: $0.61 + \text{LOGN}(0.602, 0.222)$

Square Error: 0.026600

Chi Square Test

Number of intervals = 6

Degrees of freedom = 3

Test Statistic = 47.8

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

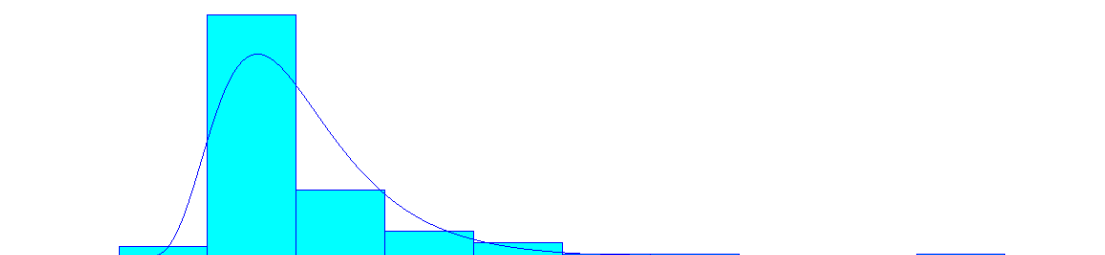
Number of Data Points = 324

Min Data Value = 0.865

Max Data Value = 3.38

Sample Mean = 1.22

Sample Std Dev = 0.291



รูปที่ ข4 การแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าคันที่ 4

Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.19052, 0.19997)

Expression: $0.71 + \text{LOGN}(0.519, 0.232)$

Square Error: 0.043553

Chi Square Test

Number of intervals = 3

Degrees of freedom = 0

Test Statistic = 7.72

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

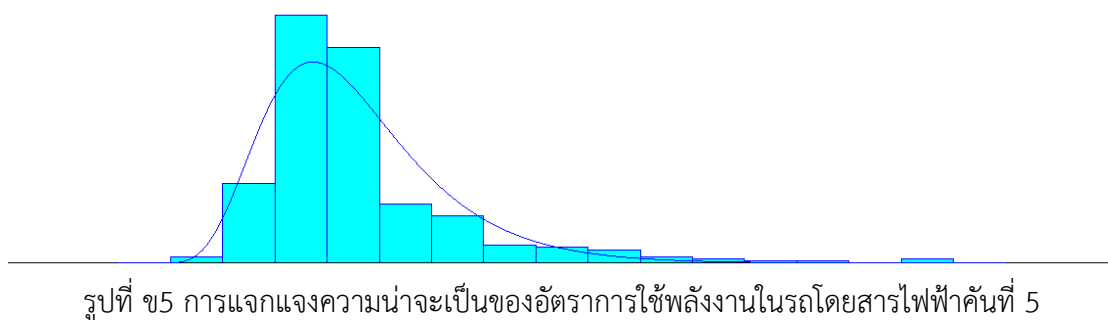
Number of Data Points = 100

Min Data Value = 0.927

Max Data Value = 3.03

Sample Mean = 1.24

Sample Std Dev = 0.308



Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.12613, 0.17534)

Expression: $0.62 + \text{LOGN}(0.53, 0.198)$

Square Error: 0.017144

Chi Square Test

Number of intervals = 7

Degrees of freedom = 4

Test Statistic = 40.1

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

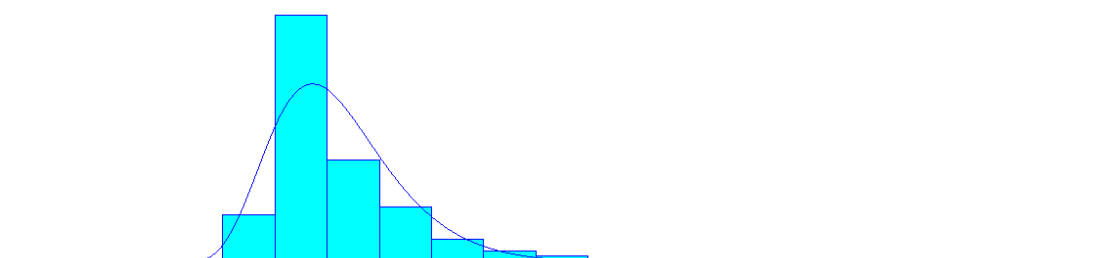
Number of Data Points = 319

Min Data Value = 0.79

Max Data Value = 2.44

Sample Mean = 1.15

Sample Std Dev = 0.236



รูปที่ ข6 การแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าคันที่ 6

Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.16611, 0.19075)

Expression: $0.43 + \text{LOGN}(0.772, 0.23)$

Square Error: 0.034147

Chi Square Test

Number of intervals = 5

Degrees of freedom = 2

Test Statistic = 35.9

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

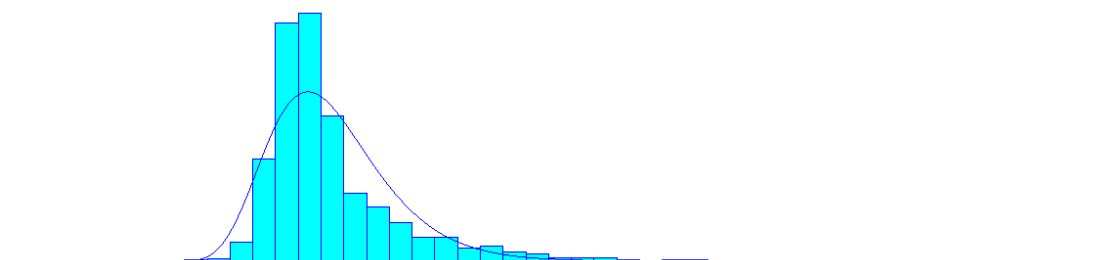
Number of Data Points = 295

Min Data Value = 0.69

Max Data Value = 3.28

Sample Mean = 1.2

Sample Std Dev = 0.269



รูปที่ ข7 การแจกแจงความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าทั้งหมด 6 คัน

Distribution Summary

Distribution: Lognormal (0.16674, 0.18734)

Expression: $0.42 + \text{LOGN}(0.781, 0.221)$

Square Error: 0.018790

Chi Square Test

Number of intervals = 14

Degrees of freedom = 11

Test Statistic = 353

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

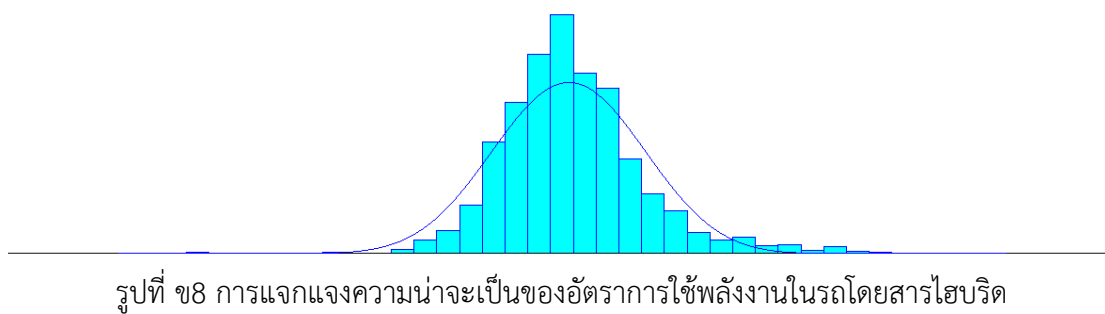
Number of Data Points = 1596

Min Data Value = 0.69

Max Data Value = 3.38

Sample Mean = 1.2

Sample Std Dev = 0.268



Distribution Summary

Distribution: Beta (13.823, 15.415, 174.56, 1268.1)

Expression: $87 + 1.18e+003 * \text{BETA}(18.2, 17.7)$

Square Error: 0.005557

Chi Square Test

Number of intervals = 17

Degrees of freedom = 14

Test Statistic = 217

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

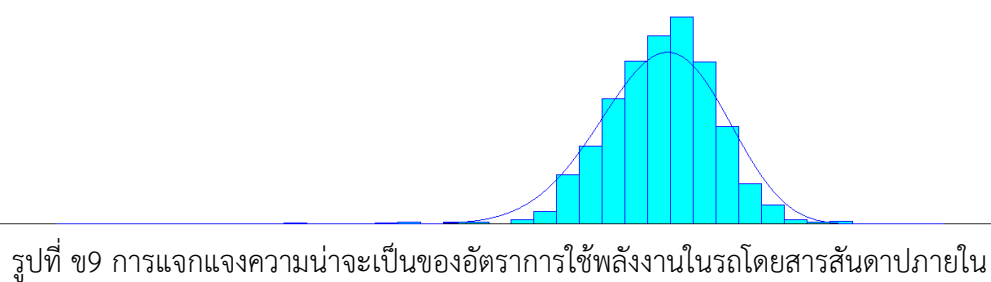
Number of Data Points = 1596

Min Data Value = 87.9

Max Data Value = 1.27e+003

Sample Mean = 691

Sample Std Dev = 100



Distribution Summary

Distribution: Beta (1.1174e+5, 16.724, -5066.2, 5.7079)

Expression: $3.04 + 2.78 * \text{BETA}(31.2, 14.2)$

Square Error: 0.003607

Chi Square Test

Number of intervals = 14

Degrees of freedom = 11

Test Statistic = 97.3

Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

Number of Data Points = 1596

Min Data Value = 3.28

Max Data Value = 5.58

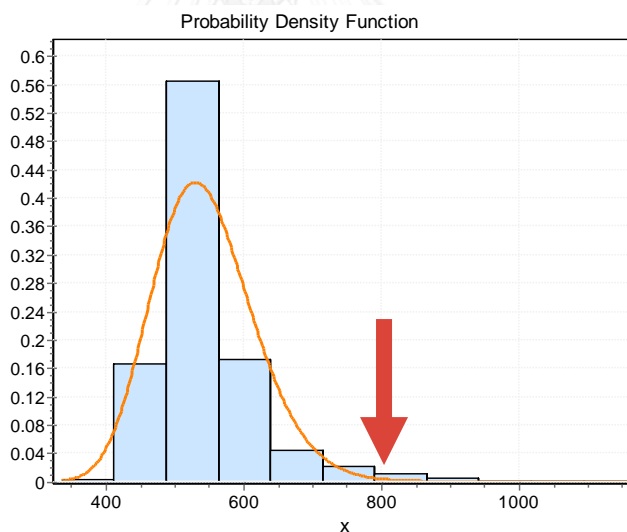
Sample Mean = 4.95

Sample Std Dev = 0.189

ภาคผนวก ค การประมาณอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้า

การใช้จำนวนข้อมูลการเดินทางจำนวนน้อยซึ่งไม่ครอบคลุมการแปรผันของสภาพการจราจร ในการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสาร งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการประมาณอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารไฟฟ้าที่เป็นค่าเฉลี่ยจากการแปรผันของสภาพการจราจร ด้วยการกระจายตัวแบบล็อกปกติเข้ามาช่วย โดยเก็บข้อมูลรูปแบบอัตราเร็วของรถโดยสารในช่วงเวลาเร่งด่วนที่ส่งผลให้รถโดยสารมีอัตราการใช้พลังงานมากกว่าปกติ ในที่นี้เมื่อไม่คิดถึงการใช้พลังงานในส่วนจากระบบปรับอากาศแล้ว จะได้อัตราการใช้พลังงานที่เท่ากับ 809 Wh/km

เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารในรูปที่ 3.10 โดยไม่คิดถึงการใช้พลังงานในส่วนจากระบบปรับอากาศ จะได้การกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานจะเป็นดังรูปที่ ค1 โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลที่เป็นการแจกแจงแบบล็อกปกติ และพบว่าอัตราการใช้พลังงานที่เท่ากับ 809 Wh/km นี้เองมีค่าความน่าจะเป็นอยู่เท่ากับ 0.01 ดังนั้นจึงกำหนดว่ารอบที่มีอัตราการใช้พลังงานมากที่สุดจะมีค่าความน่าจะเป็นอยู่เท่ากับ 0.01 เสมอ



รูปที่ ค1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสาร

นอกจากนี้จากการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยแบบจำลอง VSP ของรถโดยสารแต่ละคันมีค่าทางสถิติดังแสดงในตารางที่ ค1 พบว่ารถโดยสารแต่ละคันมีค่าทางสถิติที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ การกระจายตัวของอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารแต่ละคันที่เป็นผลมาจากสภาพการจราจรภายในเมืองนั้นมีการกระจายตัวที่เป็นการแจกแจงแบบล็อกปกติเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าการกระจายตัวในเส้นทางการเดินทางโดยสารระยะสั้นเส้นทางอื่นในเขตเมือง จะมีการ

กระจายตัวในลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีดังกล่าวด้วย โดยจะมีค่าเฉลี่ยของความเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบล็อกเท่ากับ 0.1334

ตารางที่ ค1 ค่าทางสถิติของการทำนายอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารด้วยแบบจำลอง VSP

| คันที่ | ค่าเฉลี่ยแบบล็อก | ความเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบล็อก |
|--------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 6.310 | 0.1277 |
| 2 | 6.316 | 0.1483 |
| 3 | 6.289 | 0.1290 |
| 4 | 6.311 | 0.1362 |
| 5 | 6.255 | 0.1177 |
| 6 | 6.295 | 0.1415 |

สำหรับการหาอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยจากการจราจรตลอดทั้งวัน ในขั้นแรกเริ่มจากการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในรถโดยสารที่มีอัตราการใช้พลังงานที่มากที่สุด และนำมากำหนดว่าอัตราการใช้พลังงานนี้จะมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.01 ของการแจกแจงแบบล็อกปกติที่มีการกระจายตัวของข้อมูลด้วยความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1334 และนำไปสร้างการกระจายตัวของข้อมูลชุดใหม่ที่มีการแจกแจงแบบล็อกปกติเช่นเดียวกัน ซึ่งหาค่าเฉลี่ยของการแจกแจงแบบล็อกปกติได้เท่ากับ 542 Wh/km แล้วจึงนำมาใช้เป็นอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยจากการจราจรตลอดทั้งวัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชिरา นิลประพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 เมษายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2558 และมีผลงานทางวิชาการที่เผยแพร่ ได้แก่

Nilrapunt, W. and Sripakagorn, A., "Sensitivity Analysis of the Total Cost of Ownership for Electric Feeder Bus Using Various Types of Energy Storage," SAE Technical Paper 2016-01-1721, 2016, doi:10.4271/2016-01-1721.

