

การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานและการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว
สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าขนส่งระยะสั้นภายในเมือง

นายธิดิภัทร์ ธิตะจारी



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)

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

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design of Energy storage with Fast Charging system for Urban Electric Feeder buses

Mr. Thitipat Thitacharee



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

การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานและการประจุไฟฟ้า
อย่างรวดเร็วสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าขนส่งระยะสั้นภายใน
เมือง

โดย

นายธิตินันท์ ธิตะจारी

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อังคิรี ศรีภคการ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นกสิทธ์ นุ่มวงษ์)

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

ชิตติภัทร์ ชิตะจารี : การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานและการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าขนส่งระยะสั้นภายในเมือง (Design of Energy storage with Fast Charging system for Urban Electric Feeder buses) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ. ดร. อังคิรี ศรีภคการ, 92 หน้า.

การพัฒนาระบบขนส่งมวลชนมีความสำคัญในการแก้ไขปัญหาการจราจรในเมือง งานวิจัยนี้มุ่งที่การพัฒนาระบบรถโดยสารขนส่งระยะสั้น เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของระบบขนส่งสายย่อย (Feeder) ภายในเมือง รถโดยสารไฟฟ้าเป็นการพัฒนาที่ได้รับความนิยมอย่างมาก แต่ด้วยปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางจากสภาพการจราจรที่ติดขัดทำให้เกิดความไม่มั่นใจในการนำมาใช้ งานวิจัยนี้พัฒนาแนวทางการออกแบบระบบรถโดยสารอันประกอบด้วยวิธีการกำหนดขนาดแบตเตอรี่ และการวางแผนชาร์จประจุไฟฟ้าสำหรับเป็น งานวิจัยนำวิธีการทำนายการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP มาใช้ ซึ่งให้ค่าการใช้พลังงานได้ด้วยข้อมูลจาก GPS และสามารถจัดการกับข้อมูลจำนวนมากได้ง่าย งานวิจัยได้นำระบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมาเป็นกรณีศึกษา โดยนำข้อมูลการวิ่งให้บริการจริง 1596 รอบมาใช้ทำให้ได้ผลลัพธ์ครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลาย การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วถูกนำมาใช้ในการวางแผนชาร์จประจุไฟฟ้าได้โดยไม่กระทบกับตารางการให้บริการ และใช้ลดขนาดแบตเตอรี่ลงได้ แผนการชาร์จประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันได้ถูกออกแบบขึ้นและเปรียบเทียบกับรถโดยสารไม่มีการชาร์จประจุไฟฟ้า การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ทำให้แบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงได้มากกว่า 65-80% และราคาค่าแบตเตอรี่ลดลงมากกว่า 40,000\$ ต่อคัน แต่เมื่อนำไปคำนวณค่าต้นทุนการเป็นเจ้าของ (TCO) พบว่าลดไปได้เพียงราว 2% เท่านั้น แต่ถึงกระนั้นวิธีการเผื่อขนาดแบตเตอรี่ทำให้ TCO เพิ่มขึ้น 7.4% จึงสรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเป็นแนวทางที่มีความคุ้มค่ามากกว่าถึง 10% การออกแบบระบบรถโดยสารถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเส้นทางอื่นและได้ผลลัพธ์ออกมาในแนวทางเดิม นอกจากนี้งานวิจัยยังพบว่าการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต (LTO) แทนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LFP) ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถลดค่า TCO ได้มากขึ้น 10-15%

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5870169021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRIC BUS / FAST CHARGING / PUBLIC TRANSPORT / FEEDER BUS

THITIPAT THITACHAREE: Design of Energy storage with Fast Charging system for Urban Electric Feeder buses. ADVISOR: ASST. PROF. ANGKEE SRIPAKAGORN, Ph.D., 92 pp.

Public transport is the best way to solve traffic problem in the city. This research focuses on the development of feeder buses in the city. Electric bus is a very interesting way but range anxiety and traffic jam cause fear of using electric bus. This research aims to provide the guideline to determine the size of the battery and to design charging plan for electric bus. This research led the way with VSP model to predict energy consumption. This method can predict the energy consumption from GPS data and can easily handle large amounts of data. Shuttle buses of Chulalongkorn University were used as a case study. The 1596 of driving data were used to predict energy consumption statistical analyzed to cover different traffic conditions. Fast charging can be applied without having an effect on the bus schedule and reduce the size of batteries. Different fast-charging plans were designed. From the result, fast-charging can make a battery 65-80% smaller and reduced battery cost more than \$40,000 per bus, but after applied to calculate the total cost of ownership (TCO) found that the TCO has dropped only about 2%. The oversizing bus increase 7.4% of TCO, though. The bus system design was applied to the other route and the result came out in the same way. However, the research found that Lithium titanate (LTO) is more cost effective than Lithium iron phosphate (LFP) which is currently used. The result showed that TCO is reduced 10-15% significantly.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.อังคีร์ ศรีภคากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดให้แก่ผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์อยู่เสมอ ผู้วิจัยรู้สึกประทับใจในความเป็นอาจารย์ที่ดีเยี่ยม จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัตต์ รัตนสุขมาวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ ดร.ชินะ เพ็ญชาติ ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัยในการปรับปรุงงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท พลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม จำกัด และผู้ที่เกี่ยวข้อง สำหรับการสนับสนุนรถโดยสารที่ใช้เก็บข้อมูล รวมถึงข้อมูล คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นายชิวรา นิลประพันธ์ และนายศรวัสย์ ตรีนก ที่เป็นกัลยาณมิตรคอยให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจ รวมทั้งช่วยเหลือผู้วิจัยในหลายๆด้าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจ และสนับสนุนผู้วิจัยอยู่ตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความปรารถนาดีของทุกท่านเป็นอย่างสูง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ในโอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| ที่มาและความสำคัญของโครงการ | 1 |
| จุดประสงค์ของโครงการ | 4 |
| ขอบเขตของโครงการ..... | 4 |
| ระเบียบวิธีวิจัย | 6 |
| ตารางเวลาการดำเนินงาน | 7 |
| ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 8 |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม..... | 9 |
| 2.1 การแก้ปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางของรถไฟฟ้า | 9 |
| 2.1.1 การออกแบบพัฒนาระบบแบตเตอรี่ | 9 |
| 2.1.2 การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส (Opportunity charging)..... | 9 |
| 2.1.3 เทคนิคการสลับแบตเตอรี่ | 10 |
| 2.1.4 การใช้ range extender | 10 |
| 2.1.5 การนำทางที่แม่นยำ (Navigator) | 10 |
| 2.1.6 การทำนายระยะทางการเดินทาง..... | 10 |
| 2.2 การทำนายการใช้พลังงานของรถ..... | 12 |

| | |
|---|----|
| 2.3 การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส (Opportunity charging)..... | 14 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน..... | 20 |
| 3.1 การหาค่าอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า..... | 21 |
| 3.1.1 การใช้พลังงานในส่วนของการขับเคลื่อน..... | 21 |
| 3.1.2 การใช้พลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศ..... | 27 |
| 3.1.3 การทำนายอัตราการใช้พลังงานที่ครอบคลุมสภาพการจราจร..... | 27 |
| 3.2 การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้า..... | 31 |
| 3.2.1 การออกแบบระบบรถโดยสาร ให้ได้ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด..... | 34 |
| 3.2.2 ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (Time headway)..... | 36 |
| 3.2.3 จำนวนที่ชาร์จ และแถวคอย..... | 39 |
| 3.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการออกแบบระบบแบตเตอรี่..... | 40 |
| 3.3.1 ขนาดแบตเตอรี่..... | 40 |
| ก. ราคาแบตเตอรี่..... | 40 |
| ข. น้ำหนักแบตเตอรี่..... | 40 |
| ค. การจัดวางแบตเตอรี่บนรถโดยสาร..... | 41 |
| ง. อายุการใช้งานแบตเตอรี่..... | 41 |
| 3.3.2 ต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวม (Total cost of ownership : TCO)..... | 42 |
| บทที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ..... | 45 |
| 4.1 กรณีศึกษา : การวางแผนระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... | 45 |
| 4.2 กรณีศึกษา : การวางแผนระบบรถโดยสารไฟฟ้าแท่นรถสองแถว สาย 1256..... | 50 |
| 4.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตและการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว..... | 57 |
| 4.4 อภิปรายผลการวิจัย..... | 59 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... | 63 |

| | |
|--|----|
| รายการอ้างอิง | 65 |
| ภาคผนวก..... | 71 |
| ภาคผนวก ก ขั้นตอนวิธีการใช้แบบจำลอง..... | 71 |
| ภาคผนวก ข พื้นที่จัดวางแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | 75 |
| ภาคผนวก ค คุณสมบัติแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถโดยสารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย | 76 |
| ภาคผนวก ง ผลลัพธ์จากการวางแผนระบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..... | 78 |
| ภาคผนวก จ ผลลัพธ์จากการวางแผนระบบรถโดยสารสาย 1256 | 83 |
| ภาคผนวก ฉ การหา S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า..... | 88 |
| ภาคผนวก ช คุณสมบัติแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต..... | 89 |
| ภาคผนวก ฌ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ..... | 90 |
| ภาคผนวก ญ การกระจายสภาพการจราจรในระหว่างวัน | 91 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 92 |

สารบัญตาราง

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 1 คุณสมบัติของรถโดยสารประจำทางภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาย 1..... | 5 |
| ตารางที่ 2 รถโดยสารไฟฟ้าในประเทศจีน [56] | 18 |
| ตารางที่ 3 การแบ่ง VSP mode | 22 |
| ตารางที่ 4 การสอบทวนผลการทำนายการใช้พลังงาน..... | 26 |
| ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติของเวลาในการวิ่งและอัตราการใช้พลังงาน | 37 |
| ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนของกรณีการชาร์จเร็วและการชาร์จช้า | 38 |
| ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ..... | 49 |
| ตารางที่ 8 เปรียบเทียบราคาและอายุการใช้งานของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ | 50 |
| ตารางที่ 9 เปรียบเทียบรูปแบบการให้บริการระบบรถโดยสารไฟฟ้า สาย 1256 | 52 |
| ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 | 56 |
| ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของรถโดยสารสาย 1256 ในกรณีมีระบบปรับอากาศ..... | 57 |
| ตารางที่ 12 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ LFP และ LTO | 58 |
| ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่า TCO เมื่อใช้แบตเตอรี่ LFP และ LTO..... | 59 |
| ตารางที่ 14 เปรียบเทียบ TCO ที่ลดลงในงานวิจัยนี้ และในงานวิจัยอื่นๆ..... | 61 |
| ตารางที่ 15 อัตราค่าไฟฟ้า TOU | 61 |
| ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่า TCO เมื่อคิดค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ และอัตรา TOU | 62 |

สารบัญภาพ

| | |
|---|----|
| รูปที่ 1 จำนวนรถส่วนบุคคลเมื่อเปรียบเทียบกับรถประจำทาง ที่จำนวนคนเดินทางเท่ากัน[3] | 1 |
| รูปที่ 2 การขนส่งเส้นทางหลัก (Main trunk) และเส้นทางย่อย (Feeder) | 2 |
| รูปที่ 3 การประหยัดพลังงานของรถไฟฟ้า [7] | 2 |
| รูปที่ 4 รถโดยสารประจำทางขนาด 8 เมตร | 4 |
| รูปที่ 5 เส้นทางรถโดยสาร สาย 1 | 5 |
| รูปที่ 6 ขั้นตอนการนำแบบจำลอง VSP มาประยุกต์ใช้..... | 13 |
| รูปที่ 7 TOSA bus ในประเทศสวีเดน [49]..... | 15 |
| รูปที่ 8 Opbrid busbaar ในประเทศสวีเดน [50]..... | 15 |
| รูปที่ 9 Proterra ในประเทศสหรัฐอเมริกา [51]..... | 15 |
| รูปที่ 10 Volvo electric bus ในประเทศเยอรมนี [52] | 16 |
| รูปที่ 11 IPT charger ของบริษัท Conductix Wampfler [53] | 16 |
| รูปที่ 12 ระบบรถโดยไฟฟ้าชาร์จไร้สาย ของ Bombardier Primove [54] | 17 |
| รูปที่ 13 ภาพรวมแสดงขั้นตอนการออกแบบระบบรถโดยสาร..... | 20 |
| รูปที่ 14 ภาพรวมขั้นตอนการทำงานการใช้พลังงาน | 21 |
| รูปที่ 15 ตัวอย่างความเร็ว แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้..... | 23 |
| รูปที่ 16 อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล | 24 |
| รูปที่ 17 ตำแหน่งการติดตั้ง ก. ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล และ ข. ตัวรับสัญญาณ GPS | 24 |
| รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างโหมดของ VSP และกำลังที่ใช้ | 25 |
| รูปที่ 19 การกระจายของโหมดของ VSP จากตัวอย่างการเดินทางรถโดยสาร 1 รอบ | 25 |
| รูปที่ 20 ข้อมูลอัตราการใช้พลังงานส่วนขับเคลื่อนของรถโดยสารเฉลี่ยแต่ละรอบ | 28 |
| รูปที่ 21 การกระจายของข้อมูลความเร็วในการจราจร | 28 |
| รูปที่ 22 การกระจายของข้อมูลอัตราการใช้พลังงานในส่วนขับเคลื่อน | 29 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 23 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อวัน..... | 30 |
| รูปที่ 24 โปรแกรมสำหรับการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า..... | 33 |
| รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ระหว่างวันของแบตเตอรี่รถยนต์โดยสารไฟฟ้า..... | 34 |
| รูปที่ 26 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ระหว่างวัน ในกรณีขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด | 35 |
| รูปที่ 27 การจัดเก็บแบตเตอรี่ในตัวรถโดยสาร | 41 |
| รูปที่ 28 ต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวมของรถโดยสารไฟฟ้า [63]..... | 42 |
| รูปที่ 29 รถโดยสารสองแถวให้บริการเชื่อมกับ สถานีรถไฟฟ้า BTS สะพานตากสิน | 43 |
| รูปที่ 30 เส้นทางเดินรถสองแถว สาย 1256..... | 44 |
| รูปที่ 31 บริเวณสถานีปลายทาง | 44 |
| รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 1 | 46 |
| รูปที่ 33 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2..... | 47 |
| รูปที่ 34 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3..... | 47 |
| รูปที่ 35 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4..... | 48 |
| รูปที่ 36 ผู้โดยสารเต็มความจุของรถสองแถวในช่วงเร่งด่วน | 51 |
| รูปที่ 37 การเปลี่ยนการให้บริการจากรถสองแถวเป็นรถโดยสารไฟฟ้า..... | 51 |
| รูปที่ 38 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1 | 53 |
| รูปที่ 39 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2 | 53 |
| รูปที่ 40 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3 | 54 |
| รูปที่ 41 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4 | 55 |
| รูปที่ 42 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 5 | 55 |
| รูปที่ 43 เปรียบเทียบค่าการลงทุนต่อกิโลเมตรของรถโดยสารจากงานวิจัยของ Lajunen [55]. | 60 |
| รูปที่ 44 การใส่ข้อมูลการใช้พลังงาน | 71 |
| รูปที่ 45 การใส่ข้อมูลการชาร์จประจุไฟฟ้า..... | 72 |
| รูปที่ 46 การใส่ข้อมูลคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า..... | 72 |

รูปที่ 47 การใส่ข้อมูลอื่นๆ.....73

รูปที่ 48 การใช้โปรแกรมส่วน Calculation.....73

รูปที่ 49 การแสดงผลพีธที่ได้จากการออกแบบ74



บทที่ 1 บทนำ

ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ด้วยปัญหาการจราจรในเมืองที่เพิ่มมากขึ้นในทุกวันนี้ แนวทางในการแก้ไข คือ ต้องมีการพัฒนาการขนส่งมวลชน การเปลี่ยนวิธีการเดินทางมาใช้ระบบขนส่งมวลชนแทนการใช้รถส่วนบุคคลจะสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า 85% และยังช่วยแก้ไขปัญหาการจราจรหนาแน่นบนท้องถนน [1, 2] รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณการใช้พื้นที่บนถนนของรถส่วนบุคคลเมื่อเปรียบเทียบกับการเดินทางด้วยรถโดยสารประจำทาง โดยรถโดยสารประจำทาง 1 คันสามารถจุผู้โดยสารได้มากกว่ารถส่วนบุคคลกว่า 10 คัน



รูปที่ 1 จำนวนรถส่วนบุคคลเมื่อเปรียบเทียบกับรถประจำทาง ที่จำนวนคนเดินทางเท่ากัน[3]

ในกรุงเทพมหานครการพัฒนาการขนส่งมวลชนกำลังเป็นที่สนใจและให้ความสำคัญ ดังเช่นโครงการของรัฐบาลในการสร้างรถไฟฟ้าสายต่างๆ ทั้งส่วนต่อขยาย และรถไฟฟ้าสายใหม่เพื่อครอบคลุมพื้นที่ต่างๆในกรุงเทพมหานคร แต่อย่างไรก็ตามในระบบการขนส่งมวลชนทั้งหมดนอกจากจะประกอบไปด้วยส่วนเส้นทางหลัก (Main trunk) เช่น รถไฟฟ้าต่างๆอย่าง BTS หรือ MRT แล้ว ยังประกอบไปด้วยส่วนเส้นทางย่อย ซึ่งต้องการการขนส่งที่เรียกว่า Feeder ยกตัวอย่างเช่น รถโดยสารประจำทาง รถจักรยานยนต์รับจ้าง หรือรถแท็กซี่ เป็นต้น ดังรูปที่ 2 ซึ่งในกรุงเทพมหานครการขนส่งในเส้นทางย่อยๆยังขาดการพัฒนา และขาดประสิทธิภาพในการให้บริการ สร้างความลำบากในการสัญจรภายในเมือง ทำให้คนจำนวนมากไม่นิยมการเดินทางด้วยการขนส่งมวลชน



เส้นทางหลัก

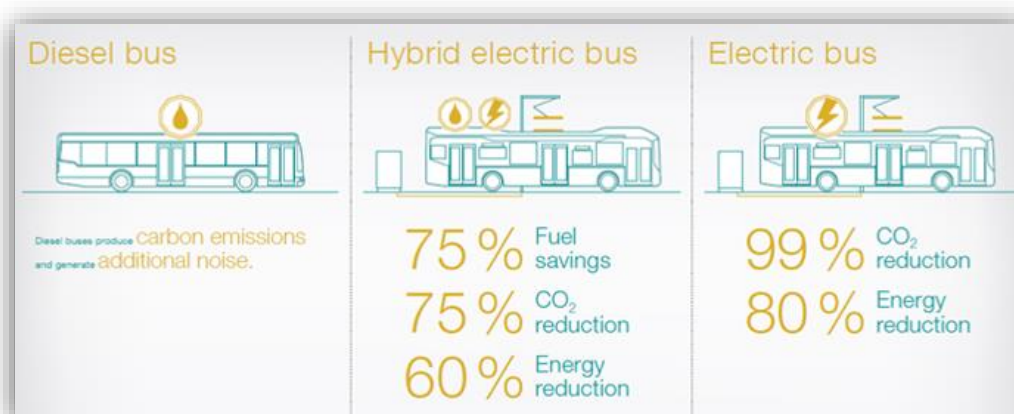


เส้นทางย่อย

รูปที่ 2 การขนส่งเส้นทางหลัก (Main trunk) และเส้นทางย่อย (Feeder)

สำหรับการพัฒนาการขนส่งมวลชนในเมือง ในส่วนของการขนส่งสายย่อย ควรสนับสนุนให้มีระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพ คือ รถโดยสารขนส่งระยะสั้น (Feeder bus) รถโดยสารขนส่งระยะสั้นจะคอยรับส่งผู้โดยสารซึ่งเดินทางมาด้วยการขนส่งเส้นทางหลักเพื่อเดินทางต่อไปยังที่หมายปลายทาง ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาจากการจราจรต่างๆ ทั้งยังมีประสิทธิภาพด้านการขนส่ง ด้านการประหยัดพลังงาน และด้านการรักษาสีสิ่งแวดล้อม ที่ดีกว่า feeder ชนิดอื่นๆ [4-6]

การคมนาคมในปัจจุบัน น้ำมันถูกใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งในแต่ละวันจะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมหาศาลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง สร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นพลังงานทางเลือกซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ ประโยชน์ของการใช้รถไฟฟ้า คือ ลดการปล่อยก๊าซ CO₂ ซึ่งเป็นต้นเหตุของมลภาวะทางอากาศ และยิ่งไปกว่านั้นการใช้รถไฟฟ้าสามารถประหยัดพลังงานที่ใช้ได้ถึง 80% ดังรูปที่ 3 [7] ทำให้ทั่วโลกเริ่มมีการเปลี่ยนมาใช้รถไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย เพื่อนำไปสู่การแก้ไขปัญหาพลังงาน และสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 3 การประหยัดพลังงานของรถไฟฟ้า [7]

สำหรับรถโดยสารประจำทางซึ่งเป็นยานยนต์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับยานยนต์น้ำมันเชื้อเพลิงแล้ว มีปัญหาเรื่องปริมาณพลังงานไม่เพียงพอสำหรับใช้งาน ซึ่งทำให้เกิดความกังวลว่ารถโดยสารจะไม่สามารถเดินทางไปถึงจุดหมายที่กำหนด เรียกว่า ความกังวลเรื่องระยะทาง (range anxiety) และยิ่งไปกว่านั้นการให้บริการรถโดยสารภายในเมืองซึ่งมีสภาพการจราจรที่ติดขัด ความกังวลของบริษัทผู้ให้บริการรถโดยสารจึงยิ่งทวีคูณ การทำนายระยะทางการเดินทางที่ครอบคลุมผลของสภาพการจราจรจึงมีความจำเป็น การทำนายที่ถูกต้องแม่นยำจะทำให้สามารถวางแผนการจัดการแก้ไขปัญหาระบบรถโดยสารได้อย่างเหมาะสมต่อไป

ในการแก้ไขปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางของรถไฟฟ้า ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆมีการพัฒนาไปมาก เทคโนโลยีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในรถโดยสารหลายประเทศ การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วนอกจากจะช่วยแก้ปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางแล้ว ยังทำให้ขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้น้อยลง ซึ่งช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ และประหยัดพลังงานได้ [8] ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ผู้ประกอบการรถโดยสารขาดความเข้าใจเกี่ยวกับการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างเหมาะสม และเกิดคำถามต่างๆมากมายทั้งการออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน และการชาร์จประจุไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ที่ใช้ต้องมีขนาดเท่าไร การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วต้องมีกำลังไฟฟ้ามากเท่าไร หรือต้องชาร์จกี่นาที เป็นต้น

เช่นเดียวกับรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นระบบรถโดยสารขนส่งระยะสั้นที่กำลังพัฒนาระบบรถโดยสารทั้งหมดให้เป็นระบบรถโดยสารไฟฟ้า ผู้ให้บริการจำเป็นต้องมีการวางแผนและการตัดสินใจในการออกแบบการจัดการระบบพลังงาน โดยขั้นตอนแรกที่สำคัญ คือ ต้องมีการหาค่าพลังงานที่ใช้ของรถโดยสารที่น่าเชื่อถือ และสามารถครอบคลุมกับผลของสภาพการจราจรที่ติดขัดได้

จุดประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการคำนวณหาค่าพลังงานที่รถโดยสารต้องใช้ เพื่อใช้วางแผนการวิ่งของรถโดยสารให้ได้ตามที่ต้องการ โดยครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลาย
- เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเทคโนโลยีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมาใช้ในระบบรถโดยสาร ทำให้สามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ของรถโดยสาร ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานและค่าใช้จ่ายได้
- เพื่อออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยระบบแบตเตอรี่ และระบบที่ชาร์จประจุไฟฟ้า โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการออกแบบ ได้แก่ ค่าใช้จ่าย น้ำหนักรวมแบตเตอรี่ การใช้พื้นที่ของแบตเตอรี่ อัตราการใช้พลังงาน และช่วงห่างเวลาการปล่อยรถโดยสาร

ขอบเขตของโครงการ

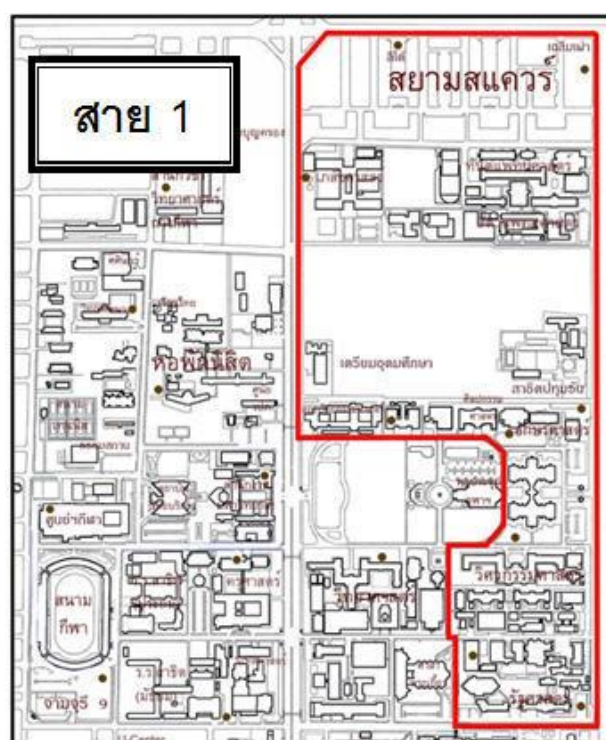
ศึกษาวิธีการคำนวณค่าพลังงานที่รถโดยสารประจำทางใช้งานจากรถโดยสารประจำทางภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาย 1 ซึ่งเป็นรถโดยสารขนส่งระยะสั้น (Feeder bus) มีขนาด 8 เมตร ดังรูปที่ 4 มีคุณสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 1 [9] และมีเส้นทางการเดินรถดังรูปที่ 5 เส้นทางการเดินรถมีระยะทางทั้งหมด 4 กิโลเมตร โดยรถโดยสารจะวิ่งให้บริการ 20 รอบต่อวัน รวมระยะทางทั้งหมด 80 กิโลเมตรต่อวัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 รถโดยสารประจำทางขนาด 8 เมตร

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| ความจุผู้โดยสาร (จำนวนที่นั่ง) | 50(22) |
| ระยะฐานล้อ | 3.8 m |
| น้ำหนักของตัวรถ | 7,000 kg. |
| กว้าง/ ยาว/ สูง | 2.35 m/ 8.2 m/ 2.85 m |
| ความเร็วสูงสุด | 80 km/hr. |
| ระบบปรับอากาศ | 50,000 BTU |

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของรถโดยสารประจำทางภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาย 1



รูปที่ 5 เส้นทางการเดินรถโดยสาร สาย 1

วิธีการที่ศึกษานี้สามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าพลังงานที่รถโดยสารใช้ได้ โดยใช้ข้อมูลความเร็วของรถโดยสาร ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เราทราบค่าพลังงานทั้งหมดที่รถโดยสารต้องใช้ เพื่อนำไปกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ ให้เพียงพอต่อการใช้งาน โดยชนิดของแบตเตอรี่ที่รถโดยสารใช้ คือ แบตเตอรี่ลิเทียม

ระเบียบวิธีวิจัย

สร้างแบบจำลองคำนวณการใช้พลังงาน

งานวิจัยจะสร้างแบบจำลอง Vehicle specific power (VSP) ของรถโดยสารภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการเก็บข้อมูลจากรถโดยสาร ทำการวัดค่าความเร็ว แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งวิ่งให้บริการจริง เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลอง VSP จากนั้นจะทำการสอบทวนผลด้วยการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ทำนายได้ กับค่าที่วัดจากรถโดยสาร

ทำนายพลังงานที่ใช้ในการเดินรถ

ทำนายการใช้พลังงานของรถ โดยใช้นำเข้าข้อมูลความเร็วของรถโดยสาร ซึ่งเก็บค่าตำแหน่งของรถโดยสารที่วิ่งให้บริการจริงจากอุปกรณ์ GPS แล้วมาผ่านการประมวลผลด้วยแบบจำลอง VSP ทำให้สามารถทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าได้ โดยใช้การเก็บข้อมูลจำนวนมากมาทำนายการใช้พลังงาน การแสดงค่าอัตราการใช้พลังงานจะอยู่ในรูปแบบที่มีการกระจายของข้อมูล มีการแจกแจงความถี่ เพื่อให้ทราบถึงผลลัพธ์ที่มีความหลากหลาย

การวางแผนการนำเทคโนโลยีชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมาใช้

ทำการออกแบบตารางเวลาการชาร์จรถโดยสาร โดยกำหนดเงื่อนไขการชาร์จประจุไฟฟ้าต่างๆ ได้แก่ จำนวนครั้งการชาร์จในแต่ละวัน กำลังและเวลาการชาร์จ เพื่อคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ที่สามารถนำมาใช้ได้เมื่อมีการชาร์จด้วยแผนการที่ต่างกัน และออกแบบการใช้งานแบตเตอรี่ในหลายๆทางเลือกเพื่อเปรียบเทียบหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมในด้านต่างๆ ได้แก่ ค่าใช้จ่าย น้ำหนักรวมแบตเตอรี่ การใช้พื้นที่ของแบตเตอรี่ อัตราการใช้พลังงาน ช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางเวลาการดำเนินงาน

| กิจกรรม | ปี 2558 | | | | | ปี 2559 | | | | | | |
|--|---------|------|------|------|------|---------|------|-------|-------|------|-------|------|
| | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | มิ.ย. | ก.ค. |
| 1. การเตรียมการ | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 รวบรวมข้อมูลต่างๆ | — | | | | | | | | | | | |
| 1.2 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | — | — | — | — | — | | — | — | | | | |
| 1.3 การติดต่อหน่วยงานเพื่อสืบค้นข้อมูล | | | — | — | — | | — | — | | | | |
| 1.4 สร้างแบบจำลองการคำนวณ | | | — | — | — | | | | | | | |
| 1.5 ทดสอบและแก้ไขแบบจำลอง | | | | — | — | | | | | | | |
| 2. การเก็บข้อมูล | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 เก็บข้อมูลการเดินทาง | | | | — | — | | | | | | | |
| 3. การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูล | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 ประมวลผลข้อมูล | | | | | — | | | — | — | | | |
| 3.2 วิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล | | | | | | — | | — | — | | | |
| 4. การเผยแพร่ผลงาน | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 เตรียมข้อมูลเพื่อเผยแพร่ | | | | — | — | | | | | | | |
| 4.2 เขียนผลงานเพื่อเผยแพร่ | | | | | | — | | | | | | |
| 4.3 นำเสนองานวิจัย | | | | | | | | — | — | | | |
| 5. การเขียนรายงาน | | | | | | | | | | | | |
| 5.1 เขียนงานวิจัย | | | | | | | — | — | — | — | — | — |
| 5.2 จัดพิมพ์งานวิจัย | | | | | | | | | | | | — |

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยได้สร้างแบบจำลอง VSP สำหรับทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสาร โดยใช้ข้อมูลความเร็วของรถโดยสารที่วิ่งในสภาพการจราจรจริง ซึ่งเก็บข้อมูลได้ง่ายด้วย GPS และนำมาทำนายผลลัพธ์ ทำให้ได้ค่าพลังงานที่รถโดยสารใช้ที่แม่นยำ และครอบคลุมความหลากหลายของสภาพการจราจร โดยวิธีการนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงได้ง่าย เพียงสร้างแบบจำลองในการทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสาร แล้วสามารถนำข้อมูลความเร็วซึ่งเก็บมาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ แล้วนำเข้าสู่แบบจำลอง ก็จะสามารถทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสารได้ โดยวิธีการนี้จะประโยชน์ต่อผู้ให้บริการรถโดยสาร ซึ่งสนใจนำรถไฟฟ้ามารับบริการ สามารถทราบถึงปริมาณพลังงานที่รถต้องใช้ เพื่อออกแบบระบบพลังงานของรถโดยสารในแต่ละเส้นทางต่างๆได้ นอกจากนี้วิธีการนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าอื่นๆได้

การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วถูกนำมาใช้กับรถโดยสารเพื่อให้รถโดยสารสามารถวิ่งได้ระยะทางที่มากขึ้น แก้ไขปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางของรถโดยสาร ด้วยขนาดแบตเตอรี่ที่เล็กกว่า ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้ โดยงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาในการนำการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมาใช้กับรถโดยสารระยะสั้นภายในเมือง และทำให้เทคโนโลยีเหล่านี้ได้รับความสนใจ สนับสนุนการสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า เพื่อรถโดยสารไฟฟ้าโดยรวมทั้งสำหรับรถโดยสารประจำทางให้แพร่หลายในประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ การชาร์จไฟฟ้าตามโอกาสจะทำให้เกิดความหลากหลายในการประยุกต์แผนการชาร์จ แทนที่จะคำนึงถึงระยะทางสูงสุดที่รถโดยสารสามารถวิ่งได้ การออกแบบระบบรถโดยสารควรคำนึงถึงการออกแบบระหว่างเวลาและกำลังการชาร์จประจุไฟฟ้า และขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการให้บริการ เพื่อให้ได้ระบบที่มีคุณภาพ และมีความคุ้มค่าในการให้บริการมากที่สุด คาดว่าผลลัพธ์จากงานวิจัยจะเป็นแนวทางในการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ผู้ที่สนใจระบบรถโดยสารไฟฟ้า

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม

2.1 การแก้ปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางของรถไฟฟ้า

ปัญหาของรถไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับรถใช้น้ำมันแล้ว จะพบว่ารถไฟฟ้ามีปริมาณความจุของพลังงานที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดความกังวลเรื่องระยะทาง (range anxiety) ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการและเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อขจัดความกังวลนี้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ การออกแบบพัฒนาระบบแบตเตอรี่ การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส เทคนิคการสลับแบตเตอรี่ การใช้ range extender การนำทางที่แม่นยำ และการทำนายระยะทางการเดินทาง

2.1.1 การออกแบบพัฒนาระบบแบตเตอรี่

การออกแบบพัฒนาระบบแบตเตอรี่เป็นการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวกับระบบต่างๆ แบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด [10-17] เช่น การใช้งานแบตเตอรี่อย่างเหมาะสม ช่วงการใช้งานของความจุไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ กำลังการใช้งานของแบตเตอรี่ อุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ในการใช้งานแบตเตอรี่ยังต้องมีระบบที่สำคัญ นั่นคือ ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System หรือ BMS) ซึ่งควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ให้ทำงานประสานกัน ทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพสูง และยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย งานวิจัยที่กล่าวถึงในด้านนี้ส่วนมากจะเป็นงานวิจัยที่ลงรายละเอียดในระดับส่วนประกอบ โดยในงานวิจัยนี้จะได้ศึกษาละเอียดถึงการพัฒนาระบบแบตเตอรี่ แต่จะนำองค์ความรู้ในการใช้งานแบตเตอรี่เหล่านี้มาอ้างอิง ซึ่งจากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญว่าในรถโดยสารไฟฟ้าจะต้องมีระบบ BMS และระบบรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่

2.1.2 การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส (Opportunity charging)

การเพิ่มโอกาสการชาร์จประจุไฟฟ้าทำได้โดยการสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า โดยมีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วที่สถานีต่างๆ วิธีนี้เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมในการพัฒนา [11, 18-24] ข้อดีของการใช้สถานีประจุไฟฟ้าคือทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดเล็กลง แต่จะมีข้อเสียคือ ต้องมีการสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า และเสียเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้า

2.1.3 เทคนิคการสลับแบตเตอรี่

เทคนิคการสลับแบตเตอรี่ โดยหลักการจะมีความคล้ายคลึงกับการสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า แต่ใช้การเตรียมแบตเตอรี่ที่ถูกชาร์จประจุไฟฟ้าไว้พร้อมแล้ว เพื่อเปลี่ยนกับแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานอยู่ในรถ [25, 26] ข้อดีของการสลับแบตเตอรี่ เมื่อเปรียบเทียบกับสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า คือไม่ต้องเสียเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันการชาร์จประจุไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้สามารถชาร์จได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ความนิยมของวิธีการสลับแบตเตอรี่จึงลดน้อยลง

2.1.4 การใช้ range extender

การใช้ range extender เป็นการใช้พลังงานเสริมจากแหล่งพลังงานอื่น เช่น เครื่องยนต์ซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (เบนซิน ดีเซล) หรือแก๊สเชื้อเพลิงต่างๆ (LPG NGV) มาเสริมเป็นแหล่งพลังงานของรถ [27-30] การใช้ range extender เป็นแนวทางแก้ไขปัญหาคือเมื่อไม่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวในการทำงานได้ เป็นการผสมผสานข้อดี-ข้อเสียของรถใช้ไฟฟ้า และรถใช้น้ำมัน โดยข้อดีคือทำให้ได้ระยะทางการเดินทางที่ไกลขึ้น แต่ต้องแลกมาด้วยข้อเสียของการสิ้นเปลืองน้ำมัน และการปล่อยไอเสีย

2.1.5 การนำทางที่แม่นยำ (Navigator)

การนำทางที่แม่นยำ ซึ่งประกอบระบบ GPS และระบบแผนที่ที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ถนน ทำให้ผู้ใช้งานทราบถึงตำแหน่งปัจจุบันของรถ และกำหนดตำแหน่งจุดหมายที่จะไป ระบบจะสามารถคำนวณเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดเพื่อนำไปสู่จุดหมายปลายทางได้ ระบบการนำทางสามารถทำให้การเดินทางมีประสิทธิภาพดี ลดเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และหลีกเลี่ยงปัญหาจากการจราจรต่างๆ ทำให้ลดโอกาสที่พลังงานจากแบตเตอรี่จะไม่เพียงพอในการให้บริการได้ [31, 32]

2.1.6 การทำนายระยะทางการเดินทาง

การทำนายระยะทางการเดินทาง ทำให้สามารถวางแผนการเดินทางได้อย่างเหมาะสม ป้องกันปัญหาพลังงานไม่เพียงพอ ในการจะทำนายระยะทางการเดินทาง สามารถทำได้หลายแนวทางโดยส่วนมากจะทำการทำนายอัตราการใช้พลังงานของโดยสาร เพื่อมาทำนายระยะทางการเดินทาง [33-37] เช่น ทำการทดสอบด้วยการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamic model) หรือ การทดสอบด้วยแบบจำลอง VSP นอกจากนี้ระยะทางการเดินทางสามารถหาได้จากวิธีการทดสอบจากการวิ่งจริงของรถโดยสาร [38] แต่วิธีการทดสอบจริงจำเป็นต้องมีการวิ่งทดสอบจำนวนมาก วิธีการ

เหล่านี้ทำให้สามารถทำนายการใช้พลังงานของรถ และระยะทางที่รถสามารถวิ่งได้ การทำนายระยะการเดินทางรถจำเป็นมากในการวางแผนระบบรถโดยสารสาธารณะ

งานวิจัยเหล่านี้ทั้งหมดพยายามที่จะลดความกังวลเรื่องระยะทางให้แก่ผู้ใช้รถไฟฟ้า แต่ถึงอย่างนั้น ก็ยังคงมีคำถามในเรื่องของสภาพการจราจร การจราจรที่ติดขัดทำให้ผู้ประกอบการรถโดยสารเกิดความคลางแคลงใจ และทำให้เกิดคำถามว่าหากการเดินทางของรถโดยสารพบกับสภาพการจราจรที่ติดขัด รถไฟฟ้าจะยังคงให้บริการได้ตามที่ต้องการหรือไม่

ในการนำงานวิจัยต่างๆเหล่านี้นำมาประยุกต์ใช้กับการจัดการระบบรถโดยสารเพื่อเอาชนะความกังวลเรื่องระยะทาง จะแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ งานวิจัยที่เพิ่มระยะการเดินทางเพื่อเอาชนะความกังวล และงานวิจัยที่เป็นการวางแผนเพื่อเอาชนะความกังวล

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การออกแบบพัฒนาระบบแบตเตอรี่ การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส เทคนิคการสลับแบตเตอรี่ และการใช้ range extender จะอยู่ในประเภทแรก โดยจะมุ่งประเด็นไปที่การพัฒนาเพิ่มระยะทางการให้บริการให้มีระยะไกลที่สุด หรือการเพิ่มปริมาณพลังงานที่รถจะใช้ได้ให้มากขึ้น ก็จะทำให้รถโดยสารสามารถให้บริการในสภาพการจราจรติดขัดได้มากขึ้น ทำให้ช่วยแก้ปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางได้ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือก 2.1.2 การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาสมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มระยะทางการเดินทาง และลดขนาดของแบตเตอรี่ ให้แก่ระบบรถโดยสารที่ทำการออกแบบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำทางที่แม่นยำ และการทำนายระยะการเดินทาง จะเป็นงานวิจัยประเภทที่สอง โดยงานวิจัยจะทำให้สามารถวางแผนอย่างรอบคอบ เพื่อเอาชนะความกังวลเรื่องระยะทางได้ การนำทางที่แม่นยำจะใช้ในกรณีเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่ติดขัดได้ แต่กับรถโดยสารที่มีเส้นทางประจำที่แน่นอน การนำทางไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากนัก เพราะรถโดยสารจะมีเส้นทางที่แน่นอนบังคับไว้อยู่แล้ว แต่เนื่องจากการทำนายระยะทางในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้มีการกล่าวถึงสภาพการจราจรอย่างชัดเจนมากนัก ทำให้จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เพิ่มเติมในส่วนนี้

2.2 การทำนายการใช้พลังงานของรถ

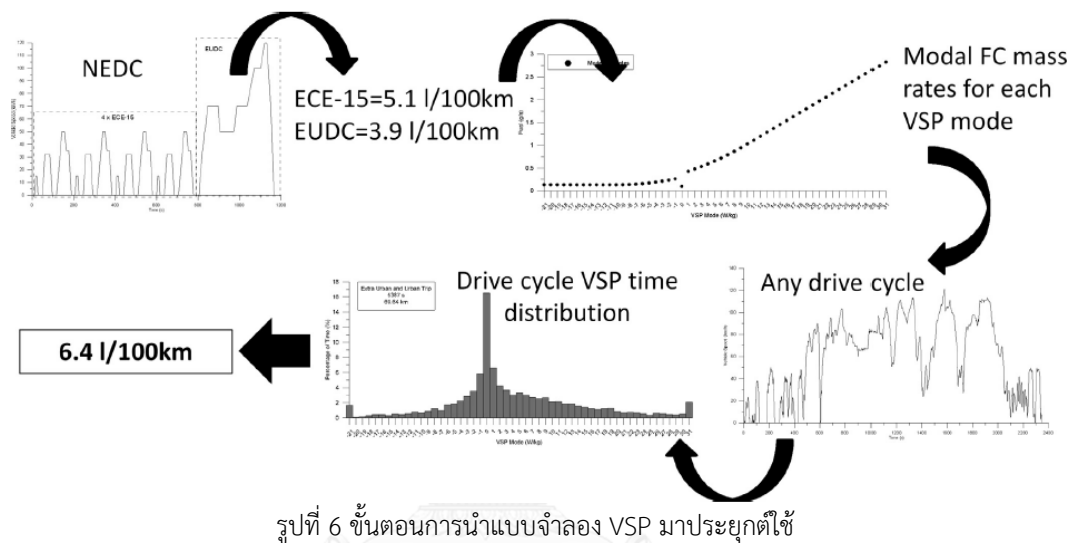
จากความสำคัญของการทำนายระยะทางของรถไฟฟ้า ระยะทางของรถไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากอัตราการใช้พลังงาน การหาค่าการใช้พลังงานของรถโดยสารจึงมีความสำคัญอย่างมาก การหาค่าอัตราการใช้พลังงานจะทำให้ทราบถึงพลังงานทั้งหมดที่รถโดยสารต้องการในการให้บริการ นอกจากนี้ยังจำเป็นต่อการกำหนดตัวแปรต่างๆในการออกแบบระบบพลังงานของรถไฟฟ้าหรือเพื่อกำหนดคุณสมบัติแบตเตอรี่ที่นำมาใช้นั่นเอง การหาค่าการใช้พลังงานมีหลายวิธีการ เช่น วิธีการวัดโดยตรงจากแบตเตอรี่ วิธีการสร้างแบบจำลองต่างๆ ซึ่งแบบจำลองนี้ก็มีแยกย่อยไปในอีกหลายรูปแบบ โดยการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถโดยสารจะเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการวิเคราะห์หาค่าการใช้พลังงานของรถ [33-37]

งานวิจัยของ P. SinHuber et al (2012) [34] ได้ใช้การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ในการทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าที่ให้บริการกับเส้นทางในประเทศเยอรมนี เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่รถโดยสารที่วิ่งในเส้นทางดังกล่าว โดยแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการใช้พลังงานได้แม่นยำคลาดเคลื่อน $\pm 6\%$ แต่อย่างไรก็ตาม การวิ่งบนสภาพการจราจรต่างๆเป็นตัวแปรสำคัญทำให้ค่าการใช้พลังงาน ของรถโดยสารแตกต่างกัน ในการแสดงค่าการใช้พลังงานของรถโดยทั่วไป มักจะแสดงค่าที่วิเคราะห์จากการวิ่งของรถโดยสารบนถนนใดๆทั่วไป เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้การวิ่งของรถโดยสารไม่ได้กล่าวถึงสภาพการจราจรแออัด และความหลากหลายของสภาพการจราจร ทำให้ยังมีความไม่มั่นใจว่าค่าการใช้พลังงานที่ได้แสดงผลครอบคลุมสภาพการจราจรที่ติดขัดแล้วหรือไม่ และยังมีคำถามว่าหากใช้การวิธีนี้กับรถโดยสารที่วิ่งในสภาพการจราจรที่ติดขัดจะสามารถวิ่งได้ตามที่ต้องการหรือไม่

งานวิจัยส่วนมากที่พบจะเป็นการวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถโดยสารโดยไม่ได้ใช้ข้อมูลจากการวิ่งจริง แต่งานวิจัยของ Abousleiman (2016) [37] มีการใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์กับรถโดยสารไฟฟ้าซึ่งครอบคลุมผลของสภาพตัวแปรต่างๆ รวมถึงสภาพการจราจรจริง โดยแบบจำลองทางพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้สามารถทำนายการใช้พลังงานได้แม่นยำคลาดเคลื่อน $\pm 1.3\%$ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ในการคำนวณเส้นทางที่ประหยัดพลังงานที่สุดให้แก่รถไฟฟ้า ทำให้ประหยัดได้มากกว่า 9.3% กับเส้นทางที่เลือกโดย Google map แต่แบบจำลองพลศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความซับซ้อนอยู่มาก

จากความกังวลในเรื่องของสภาพการจราจรที่แตกต่างดังกล่าว งานวิจัย G.O. Duarte et al (2015) [39] จึงมีแนวคิด คือใช้วิธีการคำนวณด้วยค่ากำลังเฉพาะของรถโดยสาร (Vehicle specific power หรือ VSP) แบบจำลอง VSP อาจจะเรียกได้ว่าเป็นรูปแบบหนึ่งของแบบจำลองทางพลศาสตร์ โดยมีค่า VSP เป็นตัวแปรที่ใช้จำแนกค่าการใช้พลังงานของรถ ด้วยค่า VSPซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม [w/kg] งานวิจัยนี้นำวิธีคำนวณด้วยแบบจำลอง VSP มาใช้ในการเชื่อมช่องว่างระหว่างการ

ทดสอบและการทำงานในสภาพการจราจรจริง โดยงานวิจัยจะมีขั้นตอนดังรูปที่ 6 โดยจะเริ่มต้นจากการศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำข้อมูลที่มาสสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโหมด VSP และ กำลังของรถ ต่อมานำข้อมูลการวิ่งใดๆที่ต้องการหาค่าการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่การกระจายของ VSP จากนั้นนำไปจับคู่กับความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นก่อนหน้า ทำให้ทราบถึงกำลังที่รถโดยสารใช้ และคำนวณเป็นอัตราการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของแต่ละชุดข้อมูลได้



วิธีการคำนวณด้วยแบบจำลอง VSP เป็นวิธีการที่มีความน่าสนใจ งานวิจัยส่วนมากจะนำแบบจำลอง VSP ไปใช้ในการประมาณอัตราการใช้น้ำมันของรถยนต์เบนซิน และ ดีเซล หรืออัตราการปล่อยก๊าซจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ [40-42] โดยจากงานวิจัยนี้ ผู้จัดทำคิดว่าการนำแบบจำลอง VSP มาใช้คำนวณอัตราการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า โดยใช้แบบจำลอง VSP ก็สามารทำได้เช่นกัน โดยวิธีนี้ทำให้การทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า สามารถทำได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น ในการให้บริการในเส้นทางต่างๆ ซึ่งมีสภาพการจราจรแตกต่างกันไป เนื่องจากสภาพการจราจรที่หลากหลายดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเสนอรูปแบบการแสดงค่าอัตราการใช้พลังงานในรูปแบบที่มีการกระจายของข้อมูล มีการแจกแจงความถี่ เพื่อให้ทราบถึงผลลัพธ์ที่ครอบคลุมความหลากหลายได้

2.3 การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาส (Opportunity charging)

การแก้ไขปัญหาความกังวลด้านระยะทางโดยมุ่งประเด็นไปที่การใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มปริมาณพลังงานสำหรับใช้งานให้มากพอเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมมากนักเพราะรถโดยสารจะยังมีราคาสูงขึ้น การแก้ไขปัญหาดังกล่าวของระบบรถโดยสารไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ คือ การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาสให้แก่รถโดยสาร [43] การชาร์จประจุไฟฟ้าตามโอกาสเป็นการเพิ่มการชาร์จประจุไฟฟ้าระหว่างการใช้งานระหว่างวันซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้าดังที่ได้เกริ่นในหัวข้อ 2.1.2

ในการสร้างสถานีประจุไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายและข้อจำกัดต่างๆจึงต้องมีการจัดการและวางแผนระบบรถโดยสารไฟฟ้า โดยสิ่งที่สำคัญ คือ การหาจุดที่เหมาะสมระหว่างขนาดของแบตเตอรี่ และโอกาสการชาร์จประจุไฟฟ้า ผู้ประกอบการจะสามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายค่าแบตเตอรี่ลง รวมทั้งยังทำให้ประหยัดพลังงานได้ [44, 45] และเพิ่มพื้นที่ของห้องโดยสารได้อีกด้วย

การชาร์จตามโอกาสซึ่งจะใช้เวลาในช่วงรถหยุด (layover time) ในช่วงที่รถจอดรอรับส่งผู้โดยสาร เวลาที่รถหยุดที่สถานีต้นทาง-ปลายทาง หรือเวลาที่รถจอดที่อู่ ซึ่งอาจจะมีเวลานับ 5-10 นาทีแต่สามารถเพิ่มปริมาณพลังงานได้มากทั้งนี้ด้วยการนำการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมาใช้ในการชาร์จตามโอกาสนี้ถูกใช้ในการให้บริการจริงแล้ว โดยจะสร้างสถานีชาร์จประจุไฟฟ้าไว้ตามจุดต่างๆ ซึ่งสถานีชาร์จเหล่านี้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ [46-48]

ตัวอย่างของระบบรถโดยสารที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็ว คือโครงการ Trolleybus Optimisation Système Alimentation (TOSA) [49] ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ดังรูปที่ 7 รถโดยสารมีการพัฒนาโดยบริษัท ABB ระบบนี้เป็นการชาร์จด้วยระยะเวลา 15 วินาที ในขณะที่รถโดยสารจอดรับ-ส่งผู้โดยสารที่สถานี ด้วยอัตราการจ่ายไฟฟ้า 400 kW โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนต อีกตัวอย่างของระบบคือ Opbrid Busbaar [50] ของประเทศสวีเดน โดยบริษัท Opbrid ดังรูปที่ 8 เป็นการชาร์จแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว ใช้เวลา 5 - 10 นาที ระบบจ่ายประจุดังกล่าวเป็นหัวจ่ายประจุแบบสัมผัส กำลังสูงสุด 650 kW การชาร์จอย่างรวดเร็วทำให้เพิ่มระยะเวลาให้บริการได้มากขึ้น และสามารถลดขนาดแบตเตอรี่จากเดิมใช้ขนาด 300 - 400 kWh ให้เหลือ 50 - 100 kWh ได้โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนต นอกจากนี้ยังมี Proterra fastfil ดังรูปที่ 9 ใช้การชาร์จประจุไฟฟ้ากำลัง 500kW ด้วยเวลาน้อยกว่า 5 นาที [51] และรูปที่ 10 Volvo E bus ใช้การชาร์จประจุไฟฟ้ากำลัง 300kW ใช้เวลาประมาณ 6-8 นาที [52] การชาร์จที่กล่าวข้างต้นทั้งหมดเป็นการชาร์จประจุไฟฟ้าโดยใช้การนำไฟฟ้า หรือ Conductive charging



รูปที่ 7 TOSA bus ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ [49]



รูปที่ 8 Opbrid busbaar ในประเทศสวีเดน [50]



รูปที่ 9 Proterra ในประเทศสหรัฐอเมริกา [51]

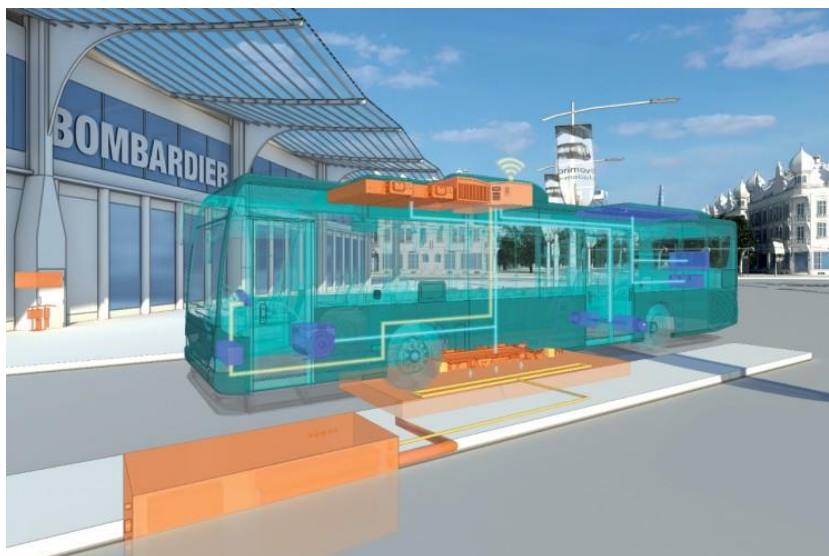


รูปที่ 10 Volvo electric bus ในประเทศเยอรมนี [52]

ในปัจจุบันมีการชาร์จประจุไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง คือ การชาร์จประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive charging) หรือการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless charging) การเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าชาร์จเข้าไปในแบตเตอรี่โดยใช้หลักการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าให้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปทำให้ไม่ต้องมีการสัมผัสกันโดยตรงของตัวนำไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ระบบ IPT charger กำลัง 120 kW ของบริษัท Conductix Wampfler ดังรูปที่ 11 [53] ที่มีการฝังที่ชาร์จประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำไว้ใต้พื้นเพื่อทำการชาร์จประจุไฟฟ้า และระบบ Bombardier PRIMOVE ให้บริการในประเทศเยอรมนี มีการชาร์จด้วยไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอัตราการชาร์จ 200 kW ดังรูปที่ 12 [54] ถึงแม้ว่าการชาร์จด้วยไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสะดวกและไม่ต้องมีการสัมผัส แต่ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น มีกำลังการชาร์จต่ำกว่า มีความร้อนสูญเสีย และต้นทุนการผลิตสูงกว่า และที่สำคัญคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งต้องได้รับการควบคุมไม่ให้เกิดอันตรายต่อสิ่งรอบข้างด้วย จากการศึกษาคาดว่า การชาร์จประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับรถโดยสาร แต่หากจะนำมาใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาอีกมาก



รูปที่ 11 IPT charger ของบริษัท Conductix Wampfler [53]



รูปที่ 12 ระบบรถโดยไฟฟ้าชาร์จไร้สาย ของ Bombardier Primove [54]

ประโยชน์ด้านการประหยัดพลังงานของการใช้การประจุไฟฟ้าตามโอกาสได้ถูกนำเสนอโดยงานวิจัยของ Zicheng Bi et al. [19] ทำการศึกษาประโยชน์ของการชาร์จตามโอกาสโดยการชาร์จไร้สายกำลังไฟฟ้า 60 kW ในกรณีศึกษาของระบบรถโดยสารไฟฟ้าใน Michigan โดยผลลัพธ์สามารถประหยัดพลังงานได้ 5.4-7.0% เนื่องจากขนาดแบตเตอรี่จะลดลง 27-44% เมื่อเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จระหว่างวัน งานวิจัยมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประเมินวัฏจักรชีวิตและนำเสนอแนวทางการพัฒนาเพื่อให้รถโดยสารที่มีระบบการชาร์จไร้สายโดยวิเคราะห์จากความอ่อนไหวของตัวแปรต่างๆ และสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการชาร์จประจุไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ประหยัดพลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้

การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้ระบบรถประจำทางไฟฟ้าเกิดความเป็นไปได้ในการนำรถไฟฟ้ามาใช้ ตัวอย่างงานวิจัยที่เมือง Muenster ประเทศเยอรมนี [22] นำเทคโนโลยีการชาร์จอย่างรวดเร็วมาใช้ในการวางแผนเปลี่ยนการให้บริการจากรถโดยสารใช้น้ำมันมาเป็นใช้ไฟฟ้า โดยได้วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาขนาดของแบตเตอรี่สำหรับนำไปใช้ในรถโดยสารทั้งหมดทุกเส้นทางภายในระบบ โดยคำนวณอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสาร และอัตราการชาร์จประจุไฟฟ้าเพื่อเพิ่มพลังงานที่สถานีปลายทางของรถโดยสาร ทำให้ได้ขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งการปรับเปลี่ยนจากรถโดยสารน้ำมันเป็นรถโดยสารไฟฟ้านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายและไม่ส่งผลกระทบต่อการให้บริการ เนื่องจากไม่ได้มีการเปลี่ยนตารางเวลาการให้บริการรถโดยสาร

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ G. De Filippo et al. [24] และงานวิจัยของ A. Kunith et al. [20] ซึ่งทำการออกแบบและวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า โดยกำหนดขนาดแบตเตอรี่ และกำลังการชาร์จประจุไฟฟ้า แล้วจึงทำแบบจำลองสถานการณ์เพื่อคำนวณหาเวลาการชาร์จ และจำนวนสถานี

ชาร์จที่เหมาะสม งานวิจัยของ G. De Filippo สรุปว่าจากกรณีศึกษาโดยสาร 22 คัน สามารถใช้ที่ชาร์จ 1 หรือ 2 อันร่วมกันได้ และงานวิจัยของ A. Kunith สามารถกำหนดจำนวนสถานีชาร์จที่เหมาะสม ทำให้ค่าก่อสร้างสถานีชาร์จถูกมากที่สุดได้

งานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวถึง แสดงให้เห็นถึงการนำเทคโนโลยีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วไปใช้ ซึ่งประโยชน์ของระบบการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบและกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง [55] การกำหนดตัวแปรในระบบแบตเตอรี่ เช่น ขนาดแบตเตอรี่ และตัวแปรในระบบการชาร์จประจุไฟฟ้า เช่น กำลังการชาร์จ เวลาการชาร์จ จะทำให้ได้ผลลัพธ์แตกต่างกัน ค่าเงินลงทุนของระบบรถโดยสารจะขึ้นอยู่กับตัวแปรเหล่านี้ซึ่งต่างกันไปในแต่ละทางเลือก งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากทางเลือกต่างๆในการออกแบบระบบพลังงานของรถโดยสาร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบรถโดยสารที่ไม่มี การชาร์จให้เห็นเท่าไรนัก

นอกจากนี้งานวิจัยรถโดยสารไฟฟ้าต่างๆ ที่กล่าวมาเป็นงานวิจัยที่ทำในต่างประเทศ โดยในแต่ละเมืองที่มีการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาให้บริการ ก็จะมีการใช้เทคโนโลยีของระบบรถโดยสารไฟฟ้าในรูปแบบที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างในประเทศจีน ในแต่ละเมืองจะมีการใช้รถไฟฟ้าที่แตกต่างกันทั้งรูปแบบการใช้พลังงานของรถโดยสาร ชนิดของแบตเตอรี่ และแผนการการชาร์จประจุไฟฟ้างดในตารางที่ 2 [56] โดยกรุงเทพมหานครซึ่งมีความแตกต่างที่สำคัญคือสภาพการจราจรที่ติดขัด ทำให้ต้องมีการตัดสินใจเลือกเทคโนโลยี และรูปแบบการให้บริการที่เหมาะสม กับการนำไปใช้งานในเส้นทางต่างๆ ในกรุงเทพมหานคร

และจากที่การศึกษาโดยสารในต่างประเทศที่กล่าวมานี้ พบว่ารถโดยสารที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจะใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมโททานेट (LTO) เป็นส่วนมาก ซึ่งการใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทยเท่าไรนัก งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้เพื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LFP) ซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยนำมาใช้มากกว่า

| City | Chongqing | Chongqing | Beijing | Shanghai | Shenzhen | Qingdao |
|---------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Number of vehicle | 31 | 1304 | 640 | 70 | 2000 | 250 |
| Bus type | Pure electric | Plug-in hybrid | Trolley bus | Pure electric | Pure electric | Pure electric |
| Battery type | Lithium-ion | Lithium-ion | Lithium iron Phosphate | Super capacitor | Lithium iron Phosphate | Lithium iron Phosphate |
| Charging technology | Fast charging (10 min.) | Fast charging (5 min.) | In motion charging | Fast charging on station (30 sec.) | Slow charging (6-8 hours) | Battery swapping (10 min.) |

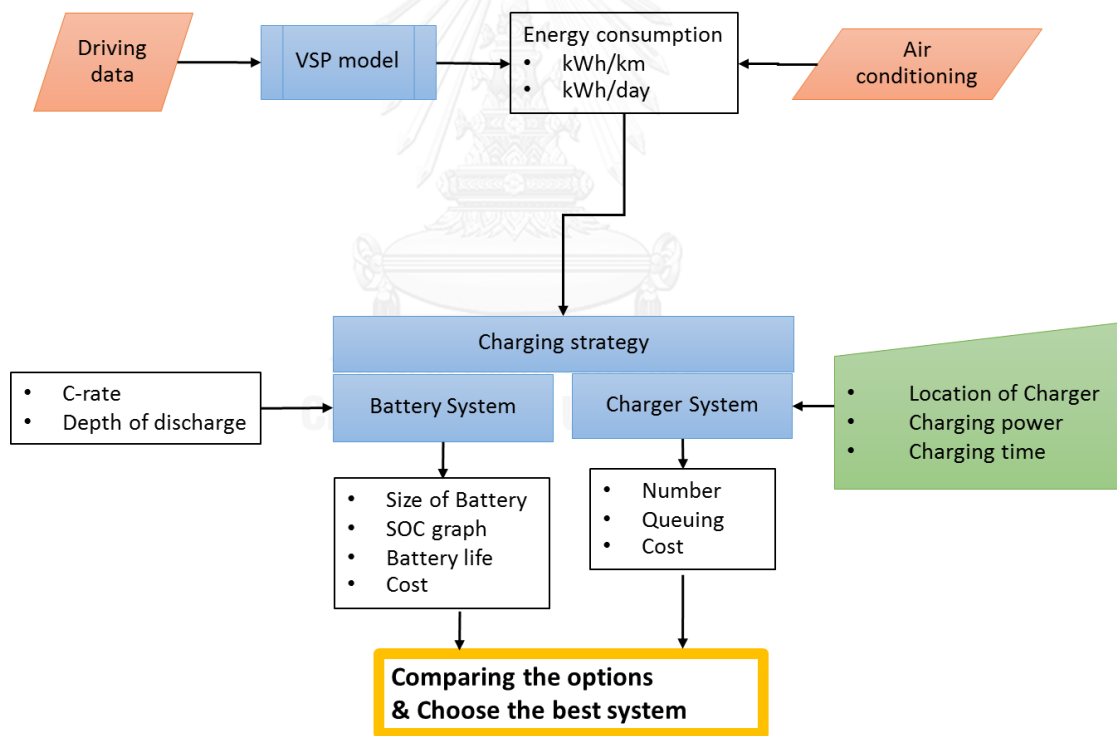
ตารางที่ 2 รถโดยสารไฟฟ้าในประเทศจีน [56]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ได้แนวทางในงานวิจัยนี้ว่าจะพัฒนาวิธีการในการหา
ค่าพลังงานที่ใช้ของรถโดยสาร โดยคำนึงถึงสภาพการจราจรที่เกิดขึ้น มีวิธีการที่สามารถนำไป
ประยุกต์ใช้งานได้ง่าย และครอบคลุมสภาพการจราจร เพื่อจัดความกังวลเรื่องระยะทางการเดินทาง
งานวิจัยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยทำเป็นกรณีศึกษาจากรถโดยสารประจำทางภายในจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัยเป็นต้นแบบในการวิจัย จากนั้นจึงวิเคราะห์หาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้
ให้บริการ โดยมีการวางแผนเพิ่มโอกาสในการชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่แบตเตอรี่ ด้วยเทคโนโลยีการ
ชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้ลดลงอีกด้วย งานวิจัยจะสร้าง
แบบจำลองให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลลัพธ์ในการออกแบบระบบรถโดยสาร ทำให้การออกแบบ
ระบบสามารถทำได้ง่าย และสะดวก สามารถเห็นความแตกต่างของผลลัพธ์จากการวางแผนการ
ออกแบบระบบในลักษณะต่างๆกัน และเลือกผลการออกแบบที่ดีที่สุดมาใช้งานได้



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้พัฒนาวิธีการออกแบบระบบและการจัดการพลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า โดยมีภาพรวมขั้นตอนการออกแบบระบบรถโดยสารดังรูปที่ 13 ขั้นตอนจะเริ่มจากการทำนายการใช้พลังงานด้วยการใช้แบบจำลอง VSP ผลลัพธ์การใช้พลังงานจะถูกนำไปวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ตำแหน่งของที่ชาร์จ กำลังการชาร์จ และเวลาการชาร์จ (กล่องสีเขียวในรูปที่ 13) เมื่อผ่านขั้นตอนการวางแผนการชาร์จ ผลลัพธ์ก็คือขนาดแบตเตอรี่ และลักษณะการใช้งานในแต่ละวันในรูปแบบกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ SOC ในแต่ละวัน ขั้นตอนสุดท้ายผลลัพธ์จากการออกแบบจะถูกเปรียบเทียบในด้านต่างๆ ได้แก่ ค่าใช้จ่าย น้ำหนักรวมแบตเตอรี่ การใช้พื้นที่ของแบตเตอรี่ อัตราการใช้พลังงาน ช่วงห่างเวลาการปล่อยรถโดยสาร เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถตัดสินใจเลือกทางเลือกต่างๆ ที่ได้จาก การออกแบบได้โดยง่าย

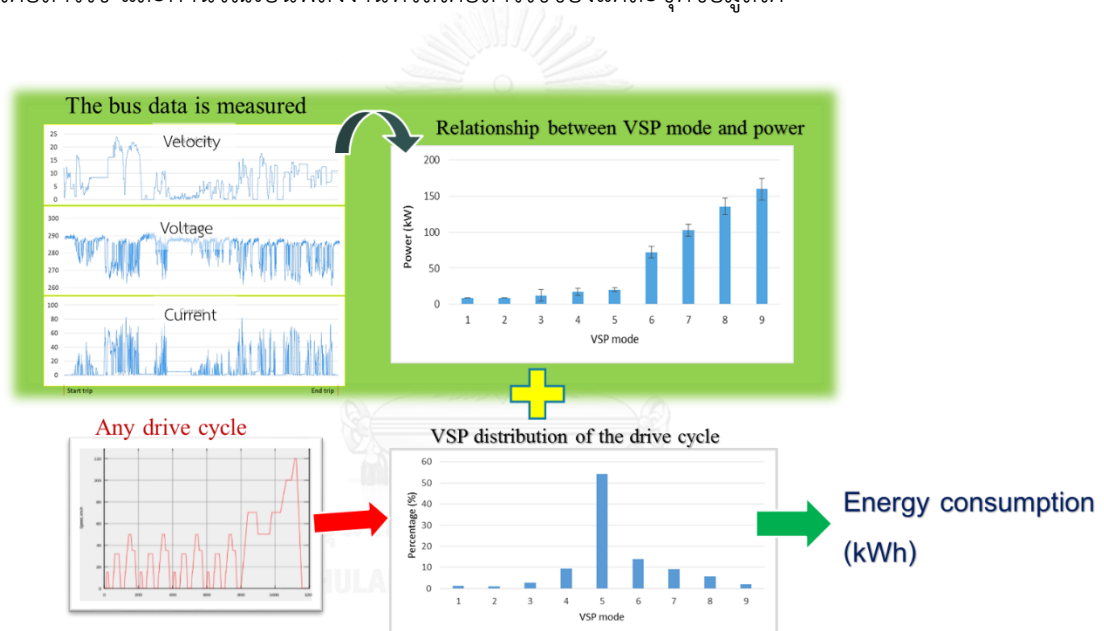


รูปที่ 13 ภาพรวมแสดงขั้นตอนการออกแบบระบบรถโดยสาร

3.1 การหาค่าอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า

3.1.1 การใช้พลังงานในส่วนของการขับเคลื่อน

วิธีการหาการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP จากรูปที่ 6 ในหัวข้อ 2.2 ถูกนำมาประยุกต์กับรถโดยสารสายไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ โดยมีภาพรวมแสดงดังรูปที่ 14 ขั้นตอนแรกจะเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลจากการวิ่งรถโดยสารไฟฟ้า จากนั้นนำข้อมูลที่เก็บมาได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า อัตราเร็วของรถ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง VSP mode และ กำลังของรถซึ่งจะอธิบายต่อไป ในขั้นตอนต่อไปจะนำข้อมูลการวิ่งใดๆที่ต้องการหาค่าการใช้พลังงานมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่การกระจายของ VSP จากนั้นนำไปจับคู่กับความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นก่อนหน้า ทำให้ทราบถึงกำลังที่รถโดยสารใช้ และคำนวณเป็นพลังงานที่รถโดยสารใช้ของแต่ละชุดข้อมูลได้



รูปที่ 14 ภาพรวมขั้นตอนการทำนายการใช้พลังงาน

ค่ากำลังเฉพาะของรถ หรือ Vehicle specific power (VSP) คือ ตัวแปรที่ใช้จำแนกค่าต่างๆ เช่น กำลังของรถ หรือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยค่า VSP ณ ระยะเวลาหนึ่ง โดยในที่นี้จะจำแนกค่ากำลังที่รถใช้ โดยทั่วไป VSP จะมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ต่อตัน [kW/t] VSP จะแปรผันตามความเร็วและความเร่งของรถ โดยมีรูปแบบสมการดังสมการที่ 1 [57-59]

$$VSP = ((1 + \varepsilon)a + gf + g \sin \alpha)v + \frac{1}{2} \frac{\rho CA}{m} v^3 \quad (1)$$

โดย v คือ ความเร็วของรถ (m/s)

a คือ ความเร่งของรถ (m/s²)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s²)

ε คือ ค่าตัวแปรจากส่วนประกอบที่ใช้ในส่งกำลังการขับเคลื่อนต่างๆ (ล้อ เกียร์ เพลา)

α คือ ความชันของถนน

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน (m/s²)

ρa คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³)

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (1/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (m²)

โดยค่าตัวแปรในการทดสอบครั้งนี้เป็นการทดสอบเส้นทางระยะสั้นในตัวเมือง ความชันของถนนจะสมมติว่าเท่ากับ 0 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนเท่ากับ 0.0135 โดยคิดจากรถโดยสาร 8 เมตรทั่วไป ค่าตัวแปรจากปัจจัยส่วนประกอบเท่ากับ 0.1 และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.6 ซึ่งคิดจากความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 30 °C และพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากับ 6.7 m² (กว้าง 2.35 m. สูง 2.85 m.) จะได้สมการใหม่เป็นดังสมการที่ 2

$$VSP = (1.1a + 0.132)v + 0.000334v^3 \quad (2)$$

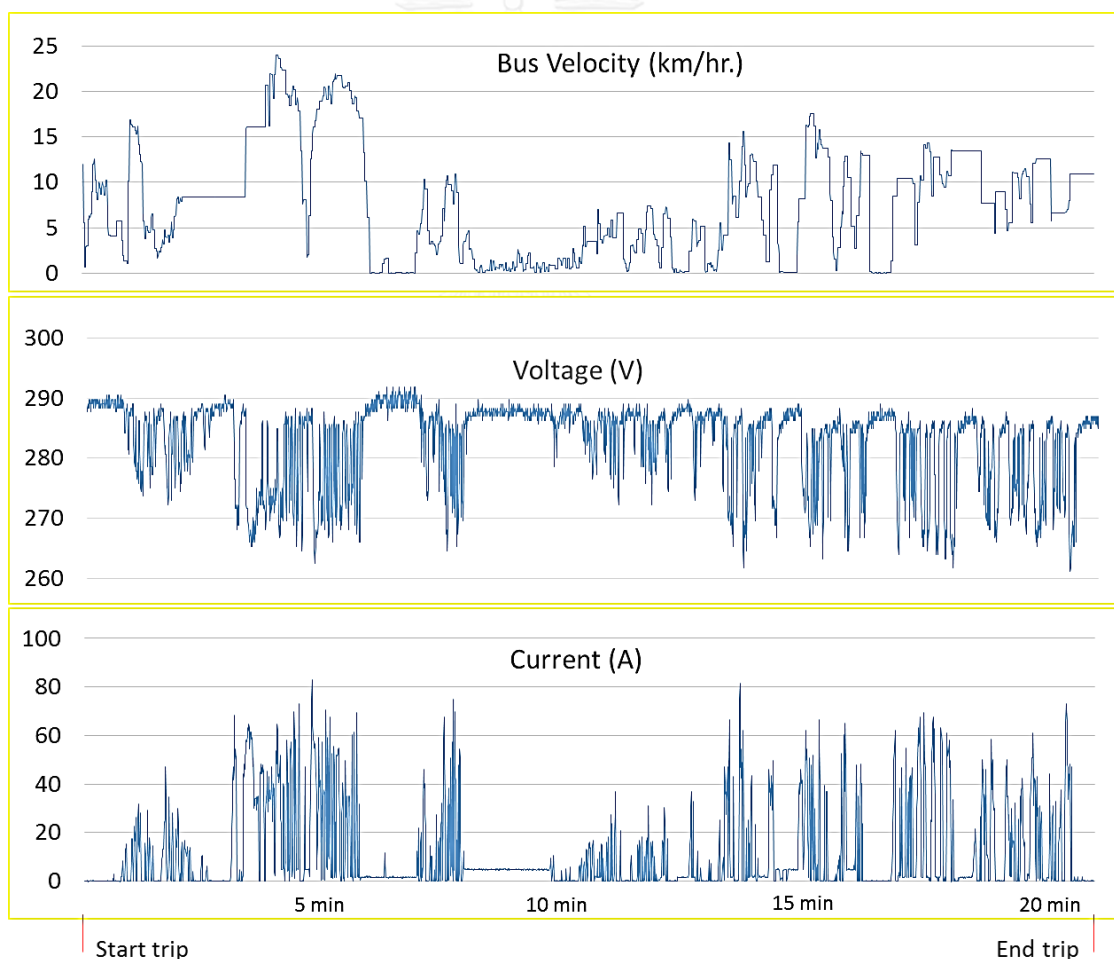
เพื่อประโยชน์ในการคำนวณ VSP จะถูกแบ่งเป็นหลายๆโหมด ซึ่งในการศึกษานี้ VSP แบ่งออกเป็น 9 โหมด ดังตารางที่ 3

| MODE | VSP |
|------|-------------------|
| 1 | VSP < -1.5 |
| 2 | -1.5 < VSP < -1.0 |
| 3 | -1.0 < VSP < -0.5 |
| 4 | -0.5 < VSP < 0 |
| 5 | 0 < VSP < 0.5 |

| MODE | VSP |
|------|---------------|
| 6 | 0.5 < VSP < 1 |
| 7 | 1 < VSP < 1.5 |
| 8 | 1.5 < VSP < 2 |
| 9 | 2 < VSP |

ตารางที่ 3 การแบ่ง VSP mode

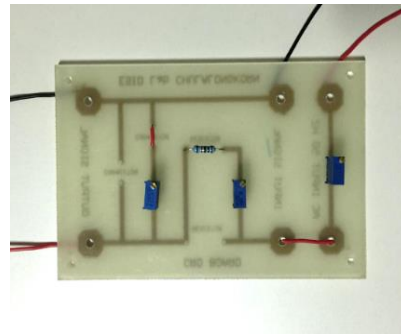
รถโดยสารไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ จะมีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 2 ชุด ซึ่งทำงานแยกกัน แบตเตอรี่ชุดหนึ่งทำงานในส่วนของระบบการขับเคลื่อน อีกชุดหนึ่งทำงานในส่วนของระบบปรับอากาศ ค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจะถูกวัดจากแบตเตอรี่ในขณะที่รถโดยสารกำลังวิ่งให้บริการ พร้อมทั้งทำการวัดค่าตำแหน่งของรถโดยสาร ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 15 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล ได้แก่ Hall Effect sensor ใช้อ่านค่ากระแสไฟฟ้า, Voltage divider circuit ใช้ลดค่าแรงดันไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ เพื่อให้อยู่ในระดับที่วัดค่าได้ง่าย, Ublox NEO 6M GPS ใช้อ่านค่าตำแหน่งและความเร็วของรถโดยสาร และ Arduino UNO R3 ใช้บันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอัตราเร็ว ดังรูปที่ 16 โดยมีตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บนรถโดยสารที่ใช้ทำการทดสอบดังรูปที่ 17 จากนั้นจึงนำข้อมูลกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้มาสร้างเป็นกราฟกำลังในแต่ละช่วงเวลา แล้วข้อมูลนั้นจะนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง กำลัง และโหมดของ VSP



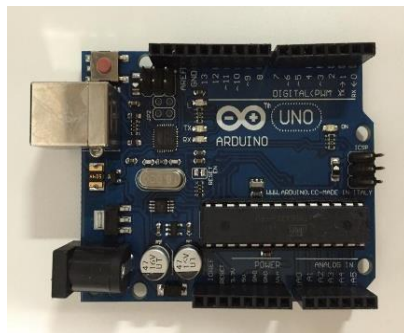
รูปที่ 15 ตัวอย่างความเร็ว แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้



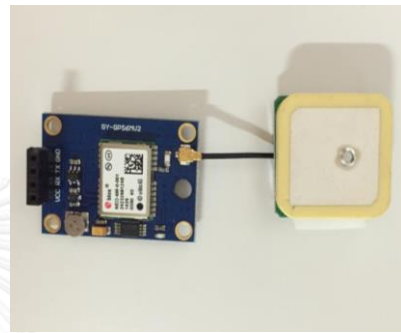
ก.



ข.



ค.



ง.

รูปที่ 16 อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล

ก. Hall Effect Sensor

ข. Voltage Divider Circuit

ค. Arduino UNO R3

ง. Ublox NEO 6M GPS



ก.

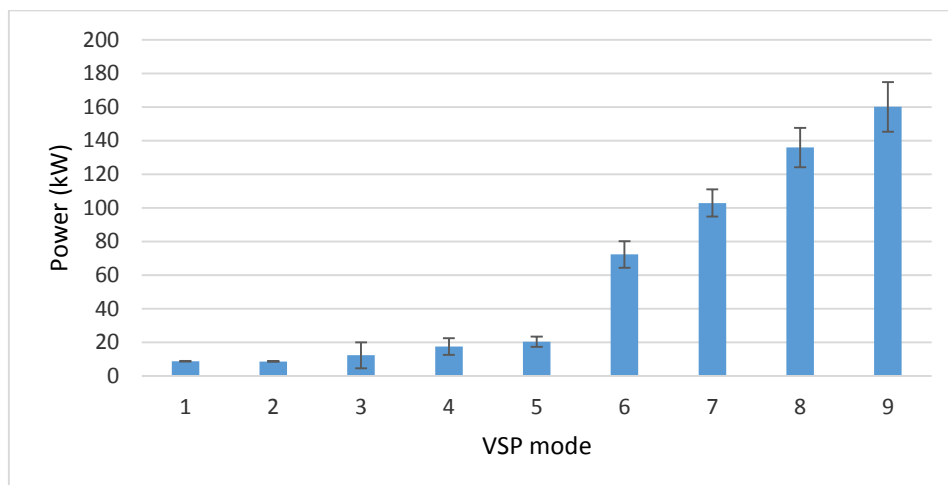


ข.

รูปที่ 17 ตำแหน่งการติดตั้ง ก. ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล และ ข. ตัวรับสัญญาณ GPS

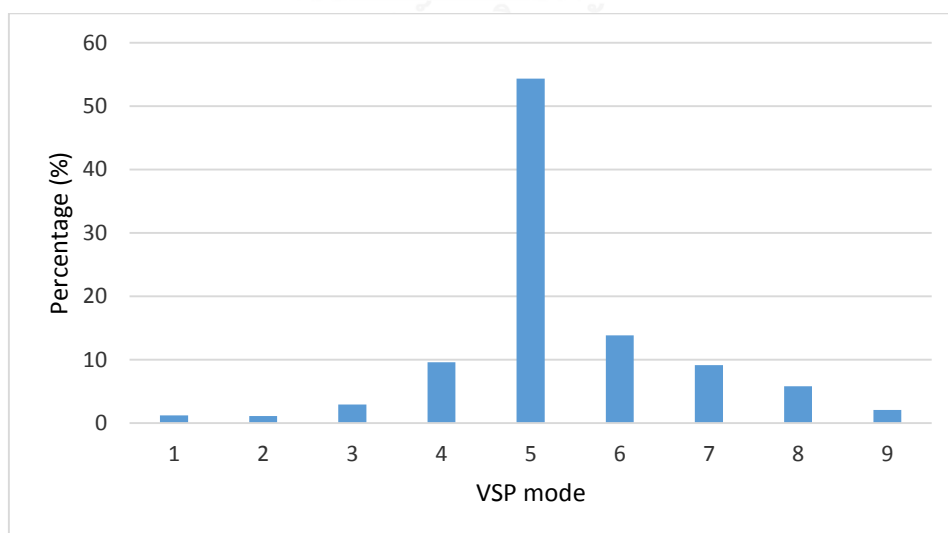
จากการเก็บข้อมูลการวิ่งให้บริการจริงของรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 7 รอบ ระยะทางรอบละ 4 กิโลเมตร ข้อมูลความเร็วและความเร่งจะนำมาใช้คำนวณตั้งสมการของ VSP และจับคู่กับกำลังที่คำนวณจากค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า นำมาสร้างรูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหมดของ VSP และกำลังของรถ กราฟนี้จะแสดงถึงกำลังของรถเมื่อขับเคลื่อนด้วยความเร็วและความเร่งใน VSP โหมดต่างๆ โดยความเร็วและความเร่งของรถแต่ละขณะเวลาจะทำให้คำนวณได้ค่า VSP ไปตก

อยู่ใน VSP โหมดในแต่ละช่อง และในแต่ละขณะเวลานั้นจะถูกเก็บค่ากำลังของรถไว้ แล้วจะถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าช่วงความเชื่อมั่น 95% ของกำลังที่รถโดยสารใช้ ขณะที่รถอยู่ในแต่ละโหมด VSP ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างโหมดของ VSP และกำลังที่ใช้

รูปที่ 19 แสดงการกระจายของแต่ละโหมดของ VSP ในการให้บริการรถโดยสาร จากตัวอย่างการเดินรถรอบหนึ่ง จะสังเกตได้ว่า VSP ส่วนใหญ่จะอยู่ที่โหมดที่ 5 ซึ่งเป็นโหมดที่แสดงว่ารถขับเคลื่อนด้วยความเร็ว และความเร่งที่ต่ำ ซึ่งสมเหตุสมผลกับการให้บริการจริงของรถโดยสาร



รูปที่ 19 การกระจายของโหมดของ VSP จากตัวอย่างการเดินรถโดยสาร 1 รอบ

ความสัมพันธ์จากรูปที่ 18 และรูปที่ 19 นี้ จะสามารถนำไปทำนายการใช้พลังงานดังสมการที่ 3

$$E = \frac{T \times \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n D_i W_i}{VKT} \quad (3)$$

โดย E คือ อัตราการใช้พลังงาน [kWh/km]

T คือ เวลาที่ใช้ในการเดินทางต่อรอบ [h]

D_i คือ เพอร์เซ็นต์การกระจายของ VSP

W_i คือ กำลังของรถ [kW]

i คือ โหมดของ VSP

VKT คือ ระยะทางต่อรอบ [km]

หลังจากการทำนายการใช้พลังงาน ด้วยสมการที่ 3 จะทำให้ได้ผลลัพธ์เป็นอัตราการใช้พลังงาน ซึ่งจากการนำผลลัพธ์ที่ได้มาทำการสอบทวนการทำนายการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าที่วิ่งให้บริการจริงทั้งหมด 7 รอบ โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายนี้ กับผลที่ได้จากการคำนวณอัตราการใช้พลังงานจากการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโดยตรงจากรถโดยสารพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายอัตราการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการวัด ไม่เกิน $\pm 5\%$ ดังตารางที่ 4 ซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

| No. | ค่าจากข้อมูลจริง (kWh/km) | ค่าจากการทำนาย (kWh/km.) | ความผิดพลาด (%) |
|-----|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 0.405 | 0.399 | 1.3 |
| 2 | 0.577 | 0.552 | 4.4 |
| 3 | 0.612 | 0.609 | 0.5 |
| 4 | 0.659 | 0.654 | 0.7 |
| 5 | 0.688 | 0.691 | 0.4 |
| 6 | 0.678 | 0.678 | 0.06 |
| 7 | 0.675 | 0.695 | 2.9 |

ตารางที่ 4 การสอบทวนผลการทำนายการใช้พลังงาน

3.1.2 การใช้พลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศ

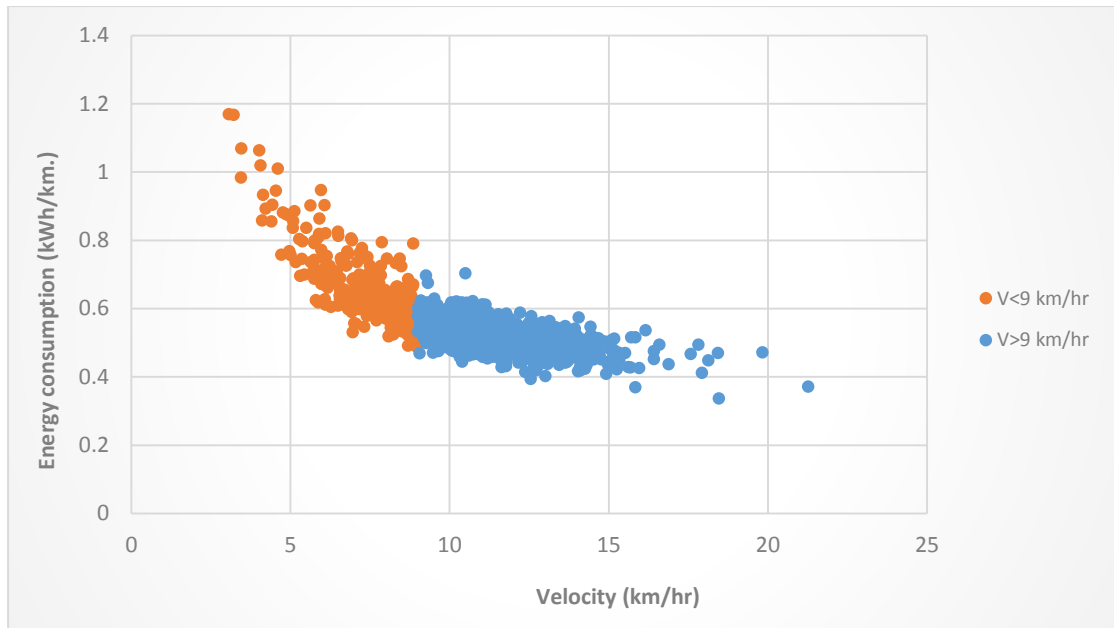
การใช้พลังงานในระบบปรับอากาศภายในห้องโดยสารมีปริมาณมากส่งผลต่อการใช้พลังงานรวมของรถโดยสารอย่างละเอียดไม่ได้ อัตราการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศประเมินได้จากการวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า จากการคำนวณอัตราการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศ ผลลัพธ์การอัตราใช้พลังงานโดยเฉลี่ย คือ 5 kWh ต่อ 1 ชั่วโมง ซึ่งหากนำไปคำนวณเป็นการใช้พลังงานของรถโดยสารต่อรอบจะขึ้นอยู่กับตัวแปรเวลาที่ใช้ในการวิ่งต่อรอบ

3.1.3 การทำนายอัตราการใช้พลังงานที่ครอบคลุมสภาพการจราจร

จากปัญหาที่กล่าวถึงในบทนำ ปัญหาสภาพการจราจรที่ติดขัดเป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้ผู้ใช้บริการรถโดยสารเกิดความกังวลเรื่องระยะทางเพิ่มมากขึ้น การคำนวณการใช้พลังงานแบบเดิมๆ จะทำให้ได้ค่าอัตราการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าที่แสดงออกมาเป็นค่าคงที่ค่าเดียวซึ่งไม่ถูกต้องเท่าไรนัก เนื่องจากแต่ละเส้นทางที่นำไปวิ่งก็จะมีสภาพการจราจรที่ต่างกันซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้ไม่แน่นอน ทำให้ข้อมูลที่ใช้นั้นผิดพลาดและไม่ครอบคลุมผลของสภาพการจราจร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำการวิเคราะห์ทางสถิติ มาระบุอัตราการใช้พลังงานซึ่งสามารถครอบคลุมถึงผลการจราจรที่หลากหลายได้

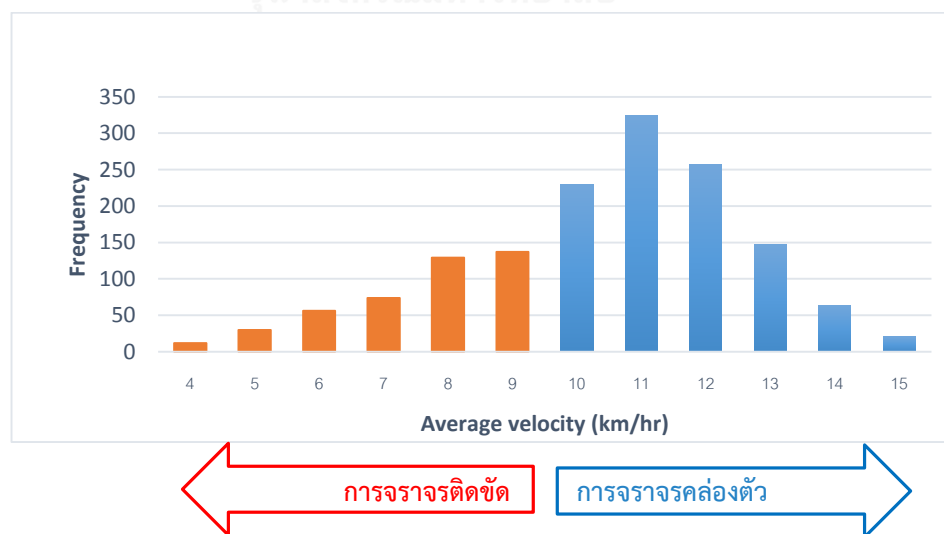
เนื่องจากวิธีทางสถิติจะต้องมีข้อมูลจำนวนมาก วิธีการทำนายการใช้พลังงานโดยใช้แบบจำลอง VSP จึงมีความได้เปรียบ การทำนายจะใช้ข้อมูลนำเข้าเป็นข้อมูลความเร็วและความเร่งซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้ง่ายโดยใช้อุปกรณ์ GPS บนที่กจากรถโดยสารที่ให้บริการในทุกๆวัน แล้วนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า VSP และกำลังของรถทำให้สามารถทำนายการใช้พลังงานของรถได้

จากการเก็บข้อมูล GPS การวิ่งของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1) ซึ่งให้บริการจริง เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2558 ช่วงเวลาทำการ 7.00น. ถึง 18.00น. ในทุกวันจันทร์ถึงศุกร์ ได้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 1596 รอบ ข้อมูลที่ได้จะถูกมาคำนวณอัตราการใช้พลังงาน (kWh/km.) ด้วยแบบจำลอง VSP ผลลัพธ์ทั้งหมดได้จัดรูปที่ 20 โดยแต่ละจุดแทนข้อมูลในแต่ละรอบ จากการศึกษาจะพบว่าการจราจรที่ติดขัดจะมีแนวโน้มที่จะใช้พลังงานสูงกว่าการจราจรคล่องตัว และจากการสังเกตกราฟข้อมูลพบว่าความชันจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วงตามความเร็วเฉลี่ย จึงทำการนิยามให้ว่รอบที่มีความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่า 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นช่วงการจราจรติดขัด และรอบที่มีความเร็วเฉลี่ยมากกว่า 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเป็นช่วงการจราจรคล่องตัว การแบ่งข้อมูลเป็น 2 ช่วงนี้ ทำให้การคำนวณการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าในแต่ละวันแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากจะสังเกตได้ว่าช่วงการจราจรติดขัด ก็พบว่าต้องใช้พลังงานมากขึ้น และชาร์จประจุไฟฟ้ามากขึ้น

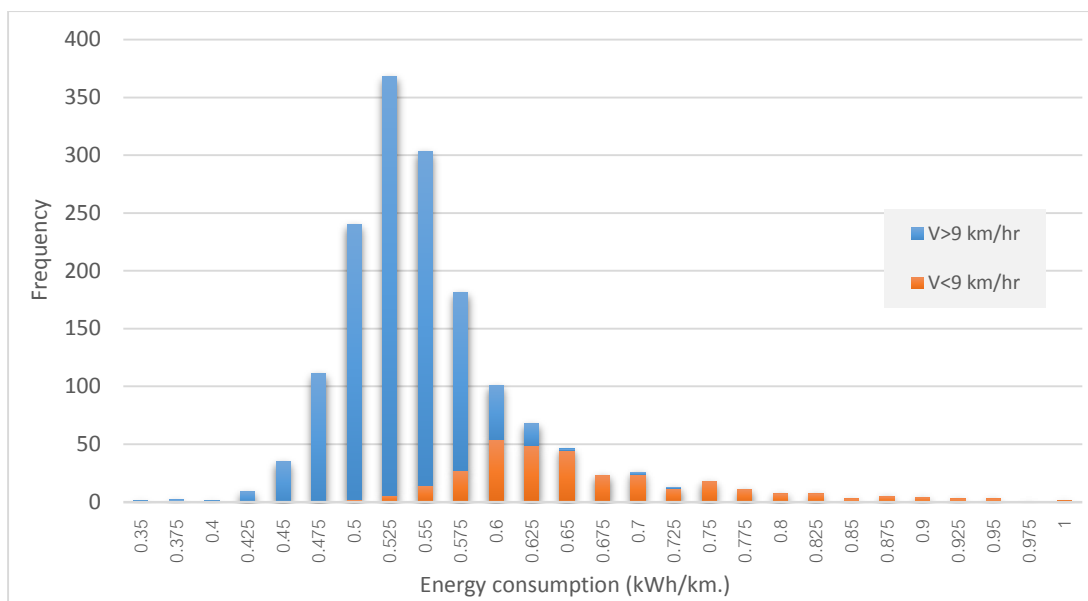


รูปที่ 20 ข้อมูลอัตราการใช้พลังงานส่วนขับเคลื่อนของรถโดยสารเฉลี่ยแต่ละรอบ

การกระจายของข้อมูลความเร็วแสดงดังรูปที่ 21 แสดงการกระจายตัวของสภาพการจราจร จากข้อมูล 1596 รอบเป็นรอบที่มีการจราจรติดขัด (สีส้ม) 324 รอบ และรอบที่มีการจราจรคล่องตัว (สีน้ำเงิน) 1272 รอบ คิดเป็นอัตราส่วน 1:4 ซึ่งสอดคล้องกับการสังเกตการให้บริการจริง โดยพบว่าใน 1 วันของการให้บริการรถโดยสารมีการให้บริการ 20 รอบต่อวัน จะพบว่ามีรอบที่อยู่ในช่วงการจราจรติดขัดประมาณ 4 รอบ และอยู่ในช่วงการจราจรคล่องตัว 16 รอบ เป็นอัตราส่วน 1:4 เช่นกัน



รูปที่ 21 การกระจายของข้อมูลความเร็วในการจราจร



รูปที่ 22 การกระจายของข้อมูลอัตราการใช้พลังงานในส่วนขับเคลื่อน

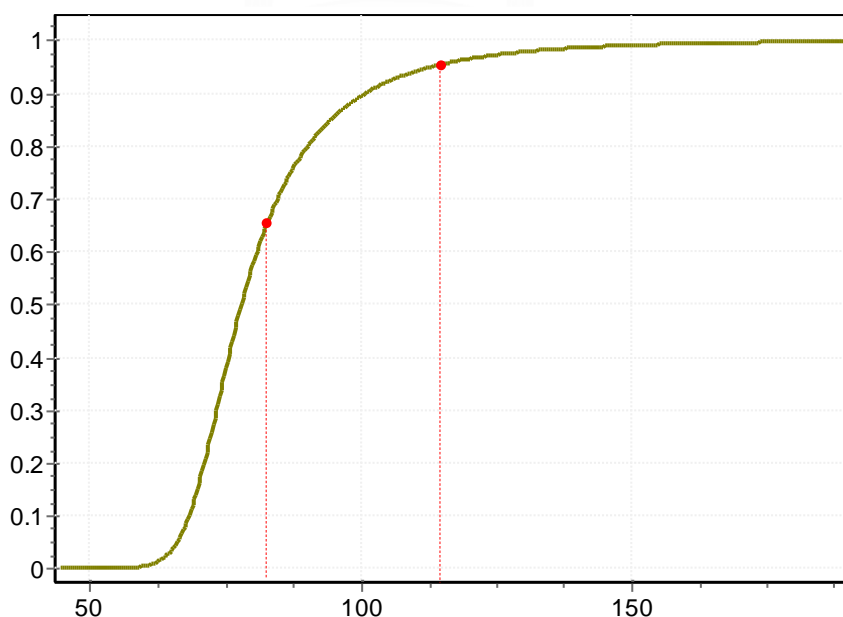
ด้วยจำนวนข้อมูลที่มีมากทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ ดังรูปที่ 22 แสดงการกระจายของข้อมูลอัตราการใช้พลังงานในส่วนขับเคลื่อน โดยส่วนที่เป็นการจราจรติดขัด (สีส้ม) จะมีแนวโน้มอัตราการใช้พลังงานที่สูงกว่าส่วนที่เป็นการจราจรคล่องตัว (สีน้ำเงิน) การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ย และการกระจายของข้อมูลได้ โดยเมื่อนำมาวิเคราะห์แยกจะได้ว่า ในช่วงการจราจรติดขัดจะมี ค่า mean 0.66 และ S.D. 0.107 ส่วนในช่วงการจราจรคล่องตัวจะมีค่า mean 0.52 และ S.D. 0.038 สรุปได้ว่าช่วงที่มีการจราจรติดขัดจะมีอัตราการใช้พลังงานที่สูงกว่า และมีการกระจายของข้อมูลที่สูงกว่า

การกระจายตัวของข้อมูลนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนของอัตราการใช้พลังงาน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของความกังวลเรื่องระยะทาง (Range anxiety) ของรถโดยสารไฟฟ้า เนื่องจากความไม่แน่นอนดังกล่าวเหตุการณ์ที่แบตเตอรี่ไม่เพียงพอกับการให้บริการมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นได้ และจะยิ่งเป็นปัญหาเมื่อเกิดกับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ เพราะเมื่อพลังงานของรถโดยสารหมดจะไม่สามารถให้บริการต่อได้ การมีสถานีชาร์จประจุไฟฟ้าจะทำให้ลดความกังวลในจุดนี้ได้

นอกจากนี้สำหรับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ ซึ่งจะเกิดความกังวลในการให้บริการในช่วงท้ายๆของวันที่พลังงานของแบตเตอรี่ใกล้หมด วิธีดั้งเดิมในการแก้ไขคือการเพิ่มขนาดของแบตเตอรี่ เพื่อให้การบริการมีความน่าเชื่อถือสูงสุด หรือเรียกว่าการเผื่อขนาดแบตเตอรี่ (oversizing) ขนาดแบตเตอรี่จะถูกเผื่อให้มากเพียงพอกับกรณีที่เลวร้ายที่สุด (the worst case) แต่อุปสรรคที่เกิดขึ้นคือ ไม่สามารถนิยามได้โดยง่ายว่ากรณีใดเป็นกรณีที่เลวร้ายที่สุด เนื่องจากมีความไม่แน่นอนของการใช้พลังงาน ทำให้การเก็บข้อมูลทางสถิติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

การใช้ข้อมูลเพียงไม่กี่รอบของการให้บริการมาทำนายอัตราการใช้พลังงาน จะทำให้ผลที่ได้ไม่ครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลายในแต่ละวัน วิธีการทำนายการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP ทำให้งานวิจัยสามารถทำนายอัตราการใช้พลังงานของข้อมูลกว่า 1596 รอบได้ โดยใช้เพียงการเก็บข้อมูลด้วยอุปกรณ์ GPS ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำนายการใช้พลังงานด้วยวิธีอื่นอย่างเช่น การทำนายการใช้พลังงานด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์อาจจะต้องใช้เวลานานกว่ามาก ในการทำนายการใช้พลังงานของข้อมูลของการให้บริการจำนวนมาก

จากการคำนวณการใช้พลังงานทั้งในส่วนขับเคลื่อนและในส่วนระบบปรับอากาศ ทำให้ทราบถึงค่าปริมาณพลังงานทั้งหมดที่รถโดยสารใช้ โดยจากการเก็บข้อมูลทางสถิติ 1596 รอบ จะได้ค่าการใช้พลังงานแต่ละรอบ นำไปคิดเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยต่อรอบ เท่ากับ 4.126 kWh/รอบ และมีค่า S.D. 0.89 kWh/รอบ จากนั้นนำไปคำนวณเป็นพลังงานเฉลี่ยแต่ละวัน โดยการคูณจำนวนรอบ 20 รอบต่อวัน จะได้ว่าพลังงานที่ใช้ต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 82.5 kWh/วัน และมีค่า S.D. เท่ากับ 17.4 kWh/วัน ด้วยข้อมูลจำนวนมากงานวิจัยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยมีรายละเอียดวิธีการในภาคผนวก ฅ จากการวิเคราะห์จะสามารถสร้างเป็นกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม หรือ CDF (Cumulative Distribution Function) ดังรูปที่ 23 ซึ่ง CDF จะแสดงถึงค่าความเป็นไปได้ที่ตัวเลขที่หยิบขึ้นมาจะมีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับตัวเลขที่กำหนด ซึ่งในกรณีนี้ถ้ากำหนดค่าพลังงานที่ใช้ต่อวันตามค่าเฉลี่ย (82.5 kWh) จะได้ความเป็นไปได้ 65% ที่ค่าพลังงานที่ใช้ต่อวันจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ 82.5 kWh จากกราฟถ้าต้องการให้ได้ความเป็นไปได้ 95% ที่จะมีพลังงานเพียงพอในการให้บริการจะต้องมีพลังงานมากกว่า 113.3 kWh



รูปที่ 23 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสมของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ต่อวัน

3.2 การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้า

ขั้นตอนในการออกแบบระบบรถโดยสาร หลังจากที่เราทราบพลังงานที่ต้องการในการทำงานของรถโดยสารแล้ว จะมากำหนดขนาดแบตเตอรี่ด้วยการจำลองการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ในแต่ละวัน เพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่างๆ คือ ระยะทาง เวลาการเดินทาง อัตราการใช้พลังงาน ความจุแบตเตอรี่ และการชาร์จประจุไฟฟ้า โดยด้านการชาร์จประจุไฟฟ้าจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ ตำแหน่งของสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า เวลาการชาร์จ และกำลังการชาร์จ

ระยะทาง และเวลาการเดินทาง จะส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการใช้พลังงาน โดยพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับระยะทาง และพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศขึ้นอยู่กับเวลาการเดินทาง

ความจุแบตเตอรี่จากคำแนะนำโดยทั่วไปที่สามารถนำมาใช้ได้ [60] คือ แบตเตอรี่ลิเทียมไม่ควรใช้งานในช่วงความจุต่ำกว่า 20%SOC (Depth of discharge 80%) เพราะแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่จะตกลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้ลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และการชาร์จแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วจะสามารถชาร์จประจุได้สูงสุดถึงค่าความจุ 80% ดังนั้นช่วงความจุการใช้งานจะอยู่ที่ 20-80%SOC สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดที่ควรคำนึงถึงในการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสม กับระดับกระแสในการทำงาน (C-rate) แบตเตอรี่ที่ขนาดเล็กเกินไปไม่ควรนำมาใช้ เพราะ C-rate ในการใช้งานจะสูงเกินค่าการคายประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ ซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถศึกษาได้จากคู่มือของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ จากในกรณีการใช้งานของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ จะดึงกระแสสูงสุดไม่เกิน 100 Amp. ซึ่งจากคุณสมบัติตามคู่มือจะได้ว่าแบตเตอรี่ LFP สามารถคายประจุไฟฟ้าได้สูงสุดในอัตรา 2C จากค่าการดึงกระแสสูงสุดจะได้ว่าแบตเตอรี่ขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ได้ คือ 50Ah หรือคิดเป็น 15.4 kWh เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้า 307 V

การวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าสามารถทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น การสถานีชาร์จให้ถี่ยิ่งขึ้น การเพิ่มกำลังการชาร์จ หรือเพิ่มเวลาการชาร์จให้มากขึ้น โดยในกรณีนี้จะมีสถานีชาร์จที่สถานีปลายทางเท่านั้น (ไม่มีการชาร์จระหว่างเส้นทาง) การเพิ่มกำลังการชาร์จขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของแบตเตอรี่ ซึ่งจะอยู่ที่ 1-2C สำหรับแบตเตอรี่ LFP และ 6C สำหรับแบตเตอรี่ LTO ส่วนเวลาการชาร์จนั้นจะขึ้นอยู่กับช่วงห่างเวลาปล่อยรถซึ่งจะส่งผลกับคุณภาพการให้บริการ โดยจะอธิบายในหัวข้อถัดๆไป ความยืดหยุ่นของแผนการชาร์จประจุทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนได้อย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงการจราจรราบบลิ้น รถโดยสารจะใช้เวลาดำเนินการน้อยกว่าปกติทำให้มีเวลาจอดชาร์จประจุไฟฟ้ามากขึ้น หรือในช่วงพักกลางวันจะมีเวลาหยุดพักเพื่อจอดชาร์จประจุไฟฟ้าได้ก็จะทำให้แบตเตอรี่สามารถลดขนาดลงได้ เป็นต้น

ด้วยความหลากหลายในการออกแบบขนาดแบตเตอรี่ งานวิจัยจึงได้สร้างโปรแกรมเพื่อวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า ทำให้ง่ายต่อการใส่ข้อมูล input ต่างๆ และวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้ในการออกแบบการวางแผนดังกล่าวได้ง่ายดังรูปที่ 24 โดยคู่มือวิธีการใช้โปรแกรมที่ได้ออกแบบขึ้นอยู่ในภาคผนวก ก แนวคิดของโปรแกรมนี้นี้คือจะจำลองสถานการณ์การใช้พลังงานและการชาร์จประจุไฟฟ้าให้กับระบบแบตเตอรี่ในแต่ละวัน ทำให้สามารถทราบได้ว่าต้องใช้ขนาดแบตเตอรี่เท่าไรถึงจะเพียงพอต่อการใช้งาน โดยผู้ใช้งานจะสามารถกำหนด input ต่างๆ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 หมวดหลักๆ ได้แก่ หมวดการใช้พลังงาน หมวดการชาร์จประจุไฟฟ้า หมวดแบตเตอรี่ และสถานี

หมวดการใช้พลังงาน ไว้สำหรับใส่ข้อมูลการใช้พลังงานในการให้บริการต่างๆ ตัวแปรที่ต้องกำหนด ได้แก่ พลังงานขับเคลื่อน พลังงานปรับอากาศ ระยะทางต่อรอบ และเวลาต่อรอบ (ในช่องสีเทา) เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

หมวดการชาร์จประจุไฟฟ้า ไว้สำหรับใส่ข้อมูลการชาร์จประจุไฟฟ้า โดยสามารถเลือกได้ว่า จะกำหนดเป็นอัตราการชาร์จ ด้วยการกำหนด C-rate หรือ การกำหนดกำลังการชาร์จ และใส่ข้อมูลเวลาการชาร์จที่กำหนด (ช่องสีเทา)

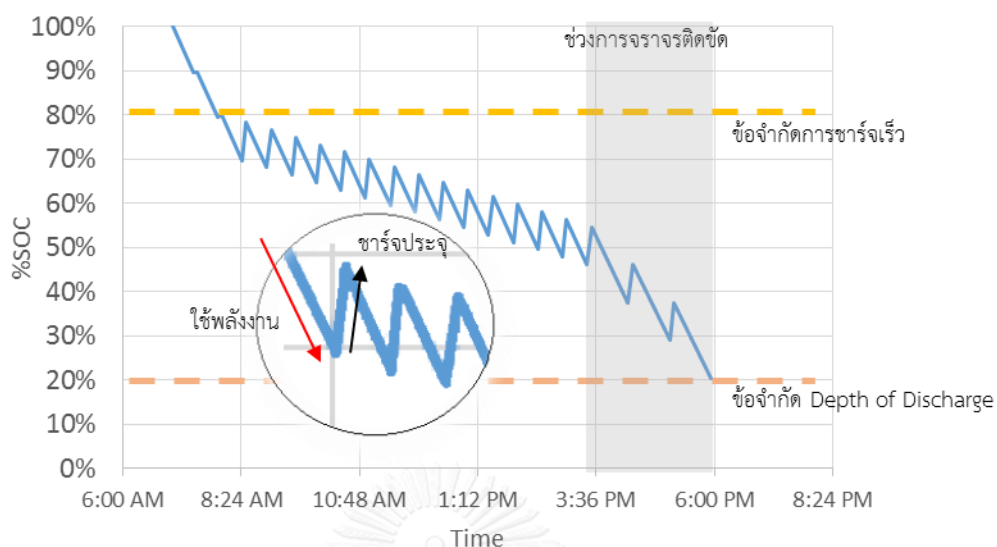
หมวดแบตเตอรี่และสถานีชาร์จ เป็นการระบุคุณสมบัติต่างๆของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ ได้แก่ Nominal Voltage, Pack Voltage, Charging Voltage, ราคาแบตเตอรี่, การใช้พื้นที่ของแบตเตอรี่ และความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถศึกษาได้จากคู่มือแบตเตอรี่จากผู้ผลิต และใน ส่วนสถานีชาร์จ ประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพการชาร์จ ราคาสถานีชาร์จ และจำนวนสถานีชาร์จเป็นตัวแปรที่ต้องกำหนด (ช่องสีเทา)

หลังจากกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องเสร็จ ผู้ใช้จะต้องมากำหนดลำดับการใช้พลังงาน และการชาร์จประจุไฟฟ้าในแต่ละวัน โดยระบุเป็นลำดับขั้นไล่มาจากริมให้บริการจนถึงปิดให้บริการ (เข้าถึงเย็น) การระบุเป็นลำดับขั้นแบบนี้ทำให้การวางแผนแม่นยำมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงเย็น ที่การจราจรติดขัดก็จะสามารถกำหนดให้การใช้พลังงานในช่วงนี้ให้มากกว่าปกติ เพื่อให้สามารถวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้ารองรับสถานการณ์นี้ได้ เป็นต้น เมื่อกำหนดทุกอย่างเสร็จสิ้นแล้วผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงในช่องตารางผลลัพธ์ โดยแบ่งผลลัพธ์เป็นกรณีไม่มีการชาร์จ และกรณีที่ใช้งานแบตเตอรี่ ตามที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ต่างๆ ได้แก่ ขนาดแบตเตอรี่ ราคาแบตเตอรี่ ปริมาตรแบตเตอรี่ น้ำหนักแบตเตอรี่ และราคาสถานีชาร์จ ดังรูปที่ 24

| การใช้พลังงาน | | การชาร์จประจุไฟฟ้า | |
|---|-----------|---------------------------------------|-----------|
| a1 | | b1 | |
| พลังงานขับเคลื่อน (Wh/รอบ) | 2067 | C-rate | 1 |
| พลังงานแอร์ (Wh/ชั่วโมง) | 5000 | เวลาการชาร์จ(นาที/รอบ) | 5 |
| ระยะทางต่อรอบ (km.) | 4 | | |
| เวลาต่อรอบ (นาที/รอบ) | 21 | | |
| พลังงานขับเคลื่อน (Wh/km.) | 516.75 | กำลังการชาร์จ(kW) | 41.840391 |
| พลังงานแอร์ (Wh/รอบ) | 1750 | กระแสการชาร์จ (Amp) | 119.54397 |
| พลังงานที่ใช้ต่อรอบ (Wh/รอบ) | 3817 | พลังงานที่ได้จากการชาร์จ (Wh) | 3138.0293 |
| พลังงานที่ใช้ต่อรอบ (Wh/km.) | 954.25 | | |
| แบตเตอรี่ และสถานีชาร์จ | | ผลลัพธ์ | |
| Battery Specification | | No Charge Bus | |
| Nominal Voltage | 3.2 | ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 103.71 |
| Pack Voltage | 307 | ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 337.8176 |
| Charging Voltage | 350 | ราคาแบตเตอรี่(\$) | 31113 |
| Number of cell in series | 96 | ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.624334 |
| ราคาแบตเตอรี่ (\$/kWh) | 300 | น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 1101.919 |
| พื้นที่ของแบตเตอรี่ (m ³ /kWh) | 0.00602 | | |
| ความหนาแน่นพลังงาน (Wh/kg) | 94.117647 | Plan | |
| age factor | 1 | ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 36.7 |
| other factor | 1 | ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 119.544 |
| DOD | 0.8 | ราคาแบตเตอรี่(\$) | 11010 |
| life cycle (cycle) | 3000 | ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.220934 |
| | | น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 389.9375 |
| Charging station | | ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 8400 |
| Charging efficiency | 0.9 | | |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$/kW) | 200 | | |
| จำนวนสถานีชาร์จ | 1 | | |
| กำลังการชาร์จสูงสุด(kW) | 42 | | |

รูปที่ 24 โปรแกรมสำหรับการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า

นอกจากนี้ โปรแกรมยังจะแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ State of Charge (SOC) ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซ็นต์พลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 25 โดยแกนตั้ง คือ SOC และแกนนอน คือ ช่วงเวลาใน 1 วัน เริ่มต้นที่เวลาเช้าของวันเส้นกราฟจะเริ่มต้นที่ SOC100% แล้วจะเริ่มลดลงเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ในการนำรถโดยสารไปวิ่ง 1 รอบโดยเส้นกราฟ SOC จะลดลงตามอัตราการใช้พลังงานต่อรอบ ต่อจากนั้นเมื่อชาร์จประจุไฟฟ้า 1 ครั้ง เส้นกราฟ SOC ก็จะเพิ่มขึ้นตามอัตราการชาร์จประจุไฟฟ้าที่กำหนด โดยการจำลองสถานการณ์นี้จะทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของ SOC ในระหว่างวัน



รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ระหว่างวันของแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า

การปรับตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องจะส่งผลต่อรูปแบบการใช้งานแบตเตอรี่ และลักษณะการให้บริการที่แตกต่างกันไป ซึ่งในความเป็นจริงการออกแบบสามารถมีทางเลือกจำนวนมาก และทางเลือกที่แตกต่างกันทำให้ได้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันไปในด้านต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ระบบรถโดยสารมีเวลาชาร์จประจุไฟฟ้ามาก ทำให้ไม่จำเป็นต้องชาร์จด้วยกำลังสูง ก็ทำให้สามารถประหยัดในส่วน of ราคาที่ชาร์จ และใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กได้ เพื่อแสดงผลของทางเลือกที่หลากหลายดังกล่าว ผลลัพธ์ที่ได้จากการการออกแบบจะถูกเปรียบเทียบ เพื่อเลือกผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการให้บริการ โดยผลลัพธ์ที่ได้เหล่านี้จะทำให้ผู้ประกอบการเห็นภาพรวมของการให้บริการที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้โดยสาร และสามารถตัดสินใจเลือกการรูปแบบต่างๆของการออกแบบได้ตามที่ต้องการได้อย่างสะดวกและง่ายดายมากยิ่งขึ้น

3.2.1 การออกแบบระบบรถโดยสาร ให้ได้ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด

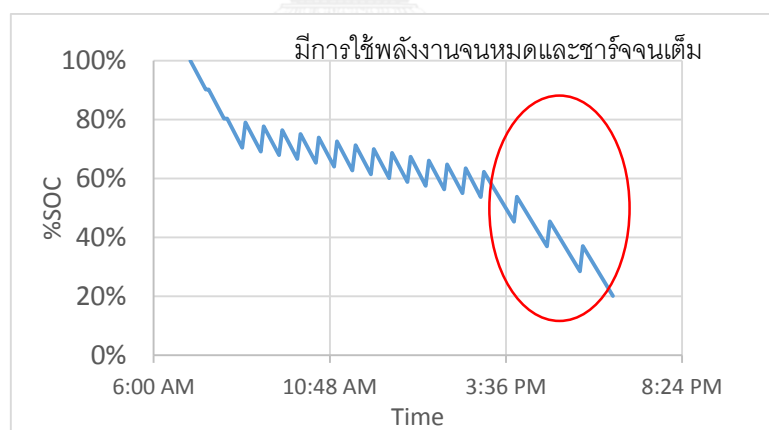
การออกแบบระบบรถโดยสารให้ได้ผลลัพธ์ “ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด” คือ จะมีลักษณะ “การชาร์จประจุไฟฟ้าที่ได้พลังงานเท่ากับการใช้พลังงาน” และมีการใช้พลังงานจนหมดแล้วชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็ม จะได้ลักษณะกราฟ SOC ดังรูปที่ 26 โดยในแต่ละช่วงเวลาหากมีการใช้พลังงานไม่เท่ากัน ก็ต้องมีการชาร์จประจุไฟฟ้าให้ได้พลังงานเพียงพอในกรณีที่ใช้พลังงานมากด้วย ในการออกแบบให้ได้ผลลัพธ์ดังกล่าวจะพบว่าจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว ซึ่งจะมีข้อจำกัด ดังต่อไปนี้

(1) กำลังการชาร์จ มีข้อจำกัดขึ้นอยู่กับแบตเตอรี่แต่ละแบบที่ผู้ผลิตกำหนด ซึ่งจะอยู่ที่ 1-2C สำหรับแบตเตอรี่ LFP และ 6C สำหรับแบตเตอรี่ LTO

(2) เวลาการชาร์จ มีข้อจำกัดคือเวลาการชาร์จที่มากขึ้นทำให้ช่วงทางการปล่อยรถมากขึ้น ซึ่งทำให้คุณภาพการให้บริการแยกลง

วิธีการในการออกแบบระบบรถโดยสารให้ได้ “ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด” ชั้นแรก คือพยายามนำเวลาจอดรถที่สถานี (layover time) เปลี่ยนเป็นเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า เพื่อไม่ให้เกิดการจอดรถเสียเวลาเปล่า เพราะฉะนั้นการออกแบบจึงนำเวลาจอดรถที่สถานีปลายทาง มาชาร์จประจุไฟฟ้า โดยทำการตั้งสถานีชาร์จขึ้น ในการออกแบบระบบรถโดยสาร ผู้ให้บริการต้องกำหนดเวลาการจอดรถที่สถานี เพื่อควบคุมช่วงทางการปล่อยรถให้บริการมีคุณภาพ (เป็นการกำหนดข้อจำกัด

(2) หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณกำลังการชาร์จซึ่งทำให้ได้เป็น “การชาร์จประจุไฟฟ้าที่ได้พลังงานได้เท่ากับการใช้พลังงาน” จากเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าที่กำหนดขึ้นก่อนหน้า ซึ่งต้องมาตรวจสอบอีกที่ว่ากำลังการชาร์จที่คำนวณได้นี้ เกินกว่าข้อจำกัดข้อ (1) หรือไม่ ซึ่งถ้าเกินก็จะชาร์จประจุไฟฟ้าได้แค่กำลังการชาร์จที่จำกัด ทำให้ไม่ได้ “ขนาดแบตเตอรี่ที่เล็กที่สุด” แต่จะได้ “ขนาดแบตเตอรี่ที่เล็กที่สุดเท่าที่ทำได้” ซึ่งแบตเตอรี่ที่ขนาดเล็กที่สุดที่ออกแบบขึ้นนี้จะทำให้ได้แบตเตอรี่ที่มีราคาถูกสำหรับการนำไปใช้งาน



รูปที่ 26 การเปลี่ยนแปลงของ SOC ระหว่างวัน ในกรณีขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด

3.2.2 ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (Time headway)

ในการออกแบบตารางการเดินรถโดยสารต่างๆ มีเป้าหมายเพื่อให้การให้บริการมีคุณภาพ ในการวิเคราะห์คุณภาพของการให้บริการ เวลาการรอของผู้โดยสารเป็นตัวแปรสำคัญที่สามารถใช้แสดงถึงคุณภาพของการให้บริการได้ เมื่อมีการปล่อยให้ผู้โดยสารรอนานเกินไปก็ทำให้คุณภาพการให้บริการต่ำลง โดยเวลาการรอของผู้โดยสารจะขึ้นอยู่กับ ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (time headway) ซึ่งการกำหนดค่านี้ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้โดยสารว่าต้องการให้การให้บริการรถโดยสารมีช่วงห่างการปล่อยรถเท่าไร ถึงจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสาร โดยค่าเฉลี่ยช่วงห่างเวลาปล่อยรถสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$\text{ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (นาที/คัน)} = \frac{\text{เวลาที่รถโดยสารใช้ในการวนกลับมาที่จุดเดิม (นาที)}}{\text{จำนวนรถโดยสารที่ให้บริการ (คัน)}} \quad (4)$$

โดยเวลาที่รถโดยสารใช้ในการวนกลับมาที่จุดเดิม จะเท่ากับเวลาที่รถโดยสารวิ่ง (Traveling time) บวกกับเวลาที่รถจอดที่สถานี (layover time) ซึ่งจากการให้บริการรถโดยสารโดยใช้น้ำมันหรือรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ layover time จะเป็นเวลาที่รถจอดรอรับผู้โดยสาร แต่ข้อดีของการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว คือ สามารถเปลี่ยนเวลาที่รถจอดนี้เป็นเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้าได้ ทำให้ได้สมการใหม่ดังสมการที่ 5 โดยจากสำรวจพบว่าโดยทั่วไป รถโดยสารจะมีเวลาจอดรอรับผู้โดยสารที่สถานีปลายทางโดยประมาณอย่างน้อย 5 นาที

$$\text{ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (นาที/คัน)} = \frac{\text{เวลาที่รถโดยสารวิ่ง (นาที)} + \text{เวลาชาร์จประจุไฟฟ้า (นาที)}}{\text{จำนวนรถโดยสารที่ให้บริการ (คัน)}} \quad (5)$$

โดยในกรณีรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สาย 1) ในช่วงการจราจรติดขัด จะมีเวลาที่รถโดยสารวิ่งประมาณ 34 นาที และการชาร์จประจุไฟฟ้าใช้เวลา 5 นาที ในระหว่างจอดรอผู้โดยสาร จำนวนรถโดยสารทั้งหมด 8 คัน จะได้ช่วงห่างเวลาปล่อยรถเฉลี่ย 5 นาที/คัน

นอกจากช่วงห่างของเวลาปล่อยรถที่จะต้องมีการควบคุมแล้ว ความเที่ยงตรง (reliability) ก็ส่งผลต่อคุณภาพของการให้บริการเช่นกัน โดยเมื่อกำหนดช่วงห่างเวลาปล่อยรถออกมาแล้ว การให้บริการจะมีความเที่ยงตรงสูง ก็ต่อเมื่อสามารถให้บริการได้ดังที่กำหนดไว้อย่างคงที่ ซึ่งส่งผลให้การบริการมีคุณภาพสูง

ความเที่ยงตรงของการให้บริการจะลดลง เนื่องจากความไม่แน่นอนในช่วงห่างเวลาปล่อยรถ ซึ่งเกิดจาก 2 ส่วน ความไม่แน่นอนของเวลาที่รถโดยสารใช้วิ่ง และความไม่แน่นอนของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า ในส่วนความไม่แน่นอนของเวลาที่รถโดยสารใช้วิ่ง มักจะเกิดจากสภาพการจราจรที่

ติดขัดทำให้เวลาการวิ่งไม่แน่นอน การจราจรติดขัดมากหรือน้อยในแต่ละรอบทำให้เวลาที่รถโดยสารใช้ในการวิ่งมีค่ากระจายต่างกันไป โดยจากการศึกษาในหัวข้อ 3.1.3 พบว่า การจราจรติดขัดจะมีค่าการกระจายที่สูงกว่าการจราจรที่ไม่ติดขัด

สำหรับอีกส่วนหนึ่ง คือ ความไม่แน่นอนของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า เกิดจากความไม่แน่นอนของการใช้พลังงานในแต่ละรอบ การใช้พลังงานจะมีค่ามากกว่าปกติ ทำให้ต้องใช้เวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้ามากขึ้นกว่าเดิม จึงเกิดค่าในส่วนนี้ขึ้น อุปสรรคเนื่องจากความไม่แน่นอนของการใช้พลังงานสามารถแก้ไขได้ด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว โดยในกรณีที่เกิดเหตุการณ์การจราจรติดขัด ผู้ให้บริการจะสามารถเพิ่มเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำให้แบตเตอรี่มีพลังงานมากเพียงพอในการให้บริการรถโดยสารรอบต่อไปได้ และเนื่องจากการที่สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าด้วยอัตราที่สูงกว่าอัตราการใช้พลังงาน ทำให้เวลาที่ใช้ในการชาร์จน้อยกว่าเวลาที่เกิดจากการจราจรติดขัด ขึ้นอยู่กับอัตราการชาร์จและอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารในแต่ละระบบ

โดยจากข้อมูลการใช้พลังงานและการวางแผนการชาร์จของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในช่วงที่การจราจรติดขัด มีค่าทางสถิติดังตารางที่ 5

| | เวลาในการวิ่ง (นาที) | อัตราการใช้พลังงานต่อรอบ (kWh/trip) |
|------|----------------------|-------------------------------------|
| Mean | 33.81 | 6.46 |
| SD | 7.94 | 1.28 |
| Max | 78.17 | 13.51 |

ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติของเวลาในการวิ่งและอัตราการใช้พลังงาน

ยกตัวอย่างในการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วที่มีกำลังการชาร์จ 50 kW จะได้พลังงานประมาณ 0.75 kWh ต่อนาที เมื่อเกิดการจราจรติดขัดรถโดยสารจะต้องชาร์จประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อทดแทนการใช้พลังงานที่มากกว่าปกติ โดยเมื่อเกิดเหตุการณ์การจราจรติดขัดมากที่สุดซึ่งใช้เวลาในการวิ่งถึง 78 นาที มากกว่าค่าเฉลี่ยไป 44 นาที ทำให้ใช้พลังงานมากกว่าปกติไป 7 kWh ทำให้ต้องเพิ่มเวลาการชาร์จเป็น 15 นาทีจากปกติที่ชาร์จ 5 นาที และจากการเก็บข้อมูลทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงาน และอัตราการชาร์จแล้ว จะได้ว่า ความว่า รถติดมากกว่าเดิมประมาณ 4.69 นาที จะต้องใช้เวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าเพิ่ม 1 นาที

ความไม่แน่นอนของช่วงห่างเวลาปล่อยรถ จะอธิบายได้ด้วยค่า S.D. ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่า S.D. ของเวลาการวิ่ง และ S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า โดยใช้สมการที่ 5 ค่า S.D. ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถจะนำมาใช้ประเมินตามเกณฑ์มาตรฐาน

ความเที่ยงตรงของระบบรถโดยสารซึ่งจะแสดงถึงคุณภาพการให้บริการได้ (TCQSM 2nd Eds, 2003) [61] โดยดูจากเปอร์เซ็นต์จากค่า Mean ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถดังต่อไปนี้

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| ▪ A (ดีมากที่สุด) 0-20% | ▪ D (ปานกลาง) 40-52% |
| ▪ B (ดีมาก) 22-30% | ▪ E (แย่มาก) 52-74% |
| ▪ C (ดี) 31-39% | ▪ F (แย่มาก) > 75% |

จากกรณีการชาร์จประจุไฟฟ้ากำลังการชาร์จ 50 kW นำมาคำนวณ S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า ด้วยวิธีการในภาคผนวก ฉ จะได้ว่ารถโดยสารจะมีค่า S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าที่ 1.69 นาที และจะได้ว่า S.D. ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ มีค่าเป็น 1.20 นาที คิดเป็น 24% ของค่า Mean ช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ และได้เกณฑ์ B (ดีมาก) ในการประเมิน

ถ้าเป็นกรณีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างช้า กำลังการชาร์จ 8 kW จากการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานและอัตราการชาร์จพลังงานจะได้ว่า รถติดมากกว่าเดิม 0.75 นาที จะต้องชาร์จประจุไฟฟ้าเพิ่ม 1 นาที เมื่อนำมาคำนวณต่อจะได้ค่า S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าที่ 10.59 นาที และได้ S.D. ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ มีค่าเป็น 2.31 นาที ผลลัพธ์ค่า S.D. ถูกนำมาเปรียบเทียบกับกรณีการชาร์จเร็ว ดังตารางที่ 6 สังเกตได้ว่าค่า S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างช้าจะมากกว่า ค่า S.D. ของการชาร์จประจุอย่างรวดเร็วถึง 6 เท่า ซึ่งทำให้ค่า S.D. ของช่วงห่างเวลาปล่อยรถเพิ่มสูงขึ้นเป็น 2 เท่า ค่า S.D. ดังกล่าวจะมีค่าสูงเป็น 46% ของค่า Mean ช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ และได้เกณฑ์ D (ปานกลาง) ในการประเมิน ซึ่งทำให้คุณภาพของการให้บริการต่ำลง

| | การชาร์จเร็ว 50 kW | การชาร์จช้า 8 kW |
|---------------------------------|--------------------|------------------|
| S.D. เวลาการเดินทาง (นาที) | 7.94 | |
| S.D. เวลาการชาร์จ (นาที) | 1.69 | 10.59 |
| S.D. ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ (นาที) | 1.20 | 2.31 |

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนของกรณีการชาร์จเร็วและการชาร์จช้า

จากการคำนวณค่าช่วงห่างเวลาปล่อยรถดังกล่าว ทำให้ผู้ประกอบการสามารถใช้เป็นตัวกำหนดเพื่อควบคุมคุณภาพของการให้บริการได้ โดยผู้ประกอบการอาจกำหนดว่าค่า Mean ของช่วงห่างเวลาปล่อยรถเป็น 5 นาที และ S.D. ของช่วงห่างเวลาปล่อยรถไม่เกิน 30% ของค่า Mean เพื่อให้ประเมินได้ เกณฑ์ B ซึ่งจะเท่ากับ 1.5 นาที หลังจากนั้นก็มาทำการออกแบบเวลาการเดินทางโดยสารในระบบให้ได้อยู่ในช่วงตามที่ต้องการ

3.2.3 จำนวนที่ชาร์จ และแถวคอย

ในการพิจารณาจำนวนที่ชาร์จในตำแหน่งที่ติดตั้ง จะพิจารณาจากอัตราการเข้ามาของรถโดยสารและอัตราการให้บริการสถานีชาร์จ โดยวิเคราะห์จากทฤษฎีแถวคอย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ

(1) อัตราการเข้ามาเท่ากับอัตราการให้บริการ เช่น รถโดยสารเข้ามาในแถวคอยทุก ๆ 10 นาที และเวลาในการชาร์จของรถโดยสารแต่ละคันเท่ากับ 10 นาที เช่นกัน ในลักษณะนี้ สถานีชาร์จจะถูกใช้ประโยชน์ต่อเนื่องกันและไม่มีแถวคอยเกิดขึ้น

(2) อัตราการเข้ามามากกว่าอัตราการให้บริการ เช่น รถโดยสารเข้ามาในแถวคอยทุก ๆ 10 นาที (6 คัน: ชั่วโมง) แต่เวลาในการชาร์จของรถโดยสารเป็น 12 นาทีต่อ 1 คน (5 คัน: ชั่วโมง) ในลักษณะนี้ จะมีแถวคอยเกิดขึ้น เนื่องจากมีรถโดยสารที่ไม่ได้รับการชาร์จ

(3) อัตราการเข้ามาน้อยกว่าอัตราการให้บริการ เช่น รถโดยสารเข้ามาในแถวคอยทุกๆ 10 นาที (6 คันต่อชั่วโมง) แต่เวลาในการชาร์จของรถโดยสารเป็น 7.5 นาทีต่อ 1 คน (8 คัน: ชั่วโมง) ในลักษณะนี้สถานีชาร์จจะถูกใช้ประโยชน์เพียงแค่ $6/8 * 100 = 75\%$ และไม่มีแถวคอยเกิดขึ้น

เพื่อให้การคำนวณไม่ซับซ้อน จำนวนที่ชาร์จที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อให้มีที่ชาร์จเพียงพอ โดยไม่เกิดแถวคอยในการให้บริการชาร์จประจุไฟฟ้า (ลักษณะที่ 1 หรือ 3) แต่หากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือมีระบบที่ซับซ้อน เช่น มีรถโดยสารหลายสายมาใช้ที่ชาร์จร่วมกัน อาจทำให้เกิดแถวคอยในการชาร์จซึ่งจะต้องวิเคราะห์หาจำนวนที่ชาร์จที่เหมาะสมต่อไป โดยจำนวนที่ชาร์จ และเวลาในแถวคอยต่างๆ สามารถคำนวณโดยใช้ simulation อย่างเช่น โปรแกรม Arena เป็นต้น

3.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการออกแบบระบบแบตเตอรี่

จากการกำหนดขนาดแบตเตอรี่ และวางแผนการชาร์จจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน โดยการตัดสินใจเลือกที่จะออกแบบระบบรถโดยสารอย่างไร ต้องทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ ได้แก่ ขนาดแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลต่อราคาแบตเตอรี่ น้ำหนักแบตเตอรี่ การจัดวางแบตเตอรี่ อายุการใช้งาน และค่าต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวม (TCO) เพื่อเลือกแผนการที่ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดกับการระบบรถโดยสารไฟฟ้า และสามารถให้บริการได้ตามที่ต้องการ

3.3.1 ขนาดแบตเตอรี่

จากผลลัพธ์ขนาดแบตเตอรี่ที่ได้ ทำให้สามารถนำไปคำนวณราคาแบตเตอรี่ น้ำหนักแบตเตอรี่ การจัดวางแบตเตอรี่บนรถโดยสาร รวมถึงอายุการใช้งานแบตเตอรี่ ซึ่งใช้เป็นข้อเปรียบเทียบในการตัดสินใจเลือกแบตเตอรี่สำหรับนำมาใช้บนรถโดยสารต่อไป

ก. ราคาแบตเตอรี่

ขนาดของแบตเตอรี่ที่เล็กลง ทำให้ค่าใช้จ่ายของแบตเตอรี่ถูกลง โดยปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ราคา \$600 ต่อ kWh [62] แต่ยังคงต้องมีค่าใช้จ่ายในส่วน of สถานีชาร์จประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมา โดยขึ้นอยู่กับกำลังที่ชาร์จ โดยจากการสอบถามจากบริษัท ที่ชาร์จมีอัตราราคาเท่ากับ \$200 ต่อ kW ซึ่งที่ชาร์จกำลัง 50kW จะได้ราคาประมาณ \$10,000

สำหรับการคำนวณในการลงทุนควรคำนึงถึงค่าต่างๆให้ครอบคลุม ขนาดแบตเตอรี่ที่เล็กกว่าทำให้ในแต่ละวัน life cycle ถูกใช้ไปมากกว่า ซึ่งเมื่อคิดเป็นราคาต่อปี แล้วราคาแบตเตอรี่ต่อปีอาจมีค่าใกล้เคียงกัน ในการตัดสินใจลงทุนจึงควรมีการคิดวิเคราะห์จากค่าต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวม (Total cost of ownership หรือ TCO) ซึ่งมีการคำนวณที่ละเอียด ครอบคลุม และเป็นที่ยอมรับในการวิเคราะห์การลงทุน

ข. น้ำหนักแบตเตอรี่

ผลจากการลดขนาดแบตเตอรี่ ทำให้น้ำหนักรวมของรถโดยสารลดลง โดยน้ำหนักที่ลดลงจะส่งผลให้ประหยัดการใช้พลังงานของรถโดยสารได้ จากงานที่เคยศึกษา [44] ความสัมพันธ์ของมวลและอัตราการใช้พลังงานในรถโดยสารแสดงดังสมการ 6

$$Y = 0.04897 * X + 116.41 \quad (6)$$

Y คือ อัตราการใช้พลังงาน [Wh/km], X คือ มวลรวม [kg]

ค. การจัดวางแบตเตอรี่บนรถโดยสาร

ปริมาตรของแบตเตอรี่มีความสำคัญในการพิจารณาในการออกแบบของรถโดยสาร เนื่องจากภายในรถโดยสารมีพื้นที่จำกัดในการจัดเก็บแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 27 ขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่เกินไปจะทำให้การจัดวางแบตเตอรี่ทำได้ยาก การออกแบบระบบโดยใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะทำให้สามารถจัดเก็บแบตเตอรี่ได้ง่ายขึ้น โดยสำหรับพื้นที่เก็บแบตเตอรี่ของรถโดยสารภายใน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยโดยรวมจะมีปริมาตรประมาณ 1.17 m^3 โดยมีช่องเก็บแบตเตอรี่ 4 จุด ขนาดความกว้าง \times ความยาว \times ความสูง คูณในภาคผนวก ข โดยขนาดช่องเก็บแบตเตอรี่ที่มีจะสามารถจุแบตเตอรี่ได้ความจุประมาณ 190 kWh เนื่องจากในกรณีนี้ช่องเก็บแบตเตอรี่ของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มีขนาดใหญ่ทำให้ช่องเก็บแบตเตอรี่มีความเพียงพอ แต่สำหรับในกรณีอื่นๆ เช่น รถโดยสารไฟฟ้ารุ่นอื่นๆที่อาจจะมีการออกแบบช่องเก็บแบตเตอรี่ที่เล็กกว่าเพื่อเพิ่มพื้นที่ห้องโดยสารให้กว้างขึ้น หรือเส้นทางที่วิ่งมีระยะทางไกล จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ จึงต้องคำนึงถึงในเรื่องนี้ด้วย



รูปที่ 27 การจัดเก็บแบตเตอรี่ในตัวรถโดยสาร

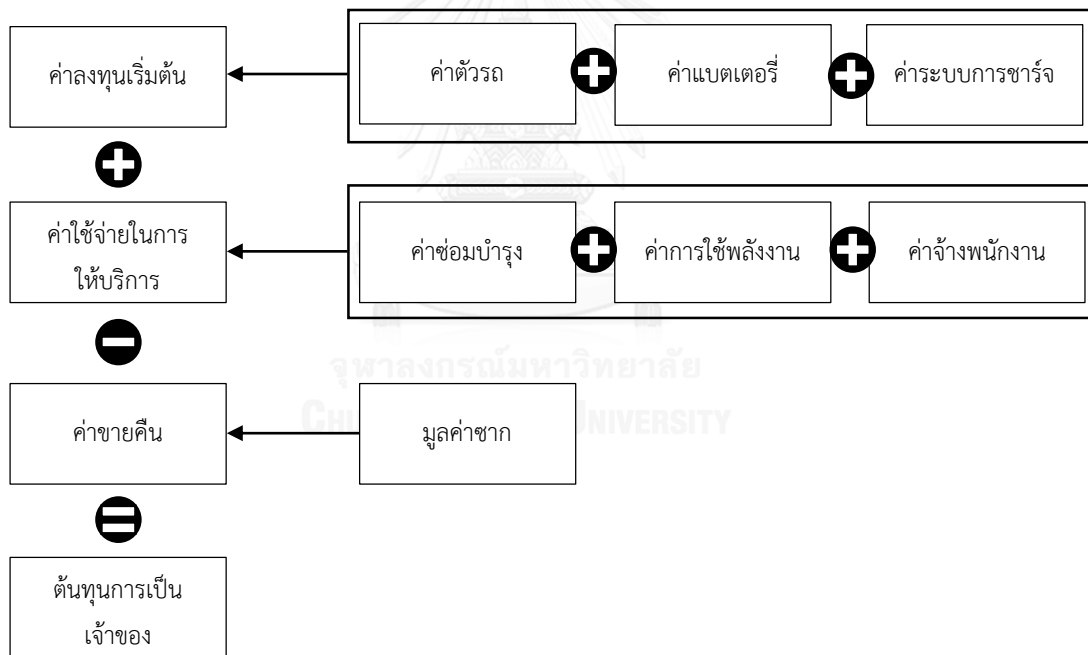
ง. อายุการใช้งานแบตเตอรี่

อายุการใช้งานแบตเตอรี่ คำนวณจากจำนวน Cycle ที่ใช้แต่ละวัน และ Cycle life ของแบตเตอรี่ ซึ่งค่า Cycle life นั้นหมายถึง จำนวนรอบการชาร์จและใช้งานที่สมบูรณ์ ที่แบตเตอรี่จะใช้ได้ก่อนที่ความจุพลังงานจะลดลงต่ำกว่า 80% ของความจุพลังงานของแบตเตอรี่ตั้งต้น ดังนั้นถ้าแบตเตอรี่ใช้งานจนเหลือ 60% แล้วชาร์จประจุเพิ่มจะไม่เรียกว่าจำนวนรอบที่สมบูรณ์ คิดเป็น 0.4

cycle เท่านั้น โดย 1 cycle ที่สมบูรณ์คือ การใช้งานจาก 100% ไป 0% โดยจำนวน Cycle life นั้นจะถูกระบุมาโดยผู้ผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่ LFP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมี Cycle life ทั้งหมด 3,000 รอบ และแบตเตอรี่ LTO ที่ใช้จะมี Cycle life 9,000 รอบ

3.3.2 ต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวม (Total cost of ownership : TCO)

ต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวม (Total Cost of Ownership: TCO) หมายถึง ต้นทุนทั้งทางตรงและทางอ้อมที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดอายุของการเป็นเจ้าของ โดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงวิธีการคำนวณ TCO ของรถโดยสารไฟฟ้า จากงานวิทยานิพนธ์ของนายวชิรา นิลประพันธ์ [63] โดยการคิด TCO ของรถโดยสารไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย ค่าลงทุนเริ่มต้น ค่าใช้จ่ายในการให้บริการ และค่าขายคืน ดังรูปที่ 28 โดยค่า TCO นี้จะใช้ในการตัดสินใจของผู้ให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าว่าการลงทุนน่าสนใจหรือไม่



รูปที่ 28 ต้นทุนการเป็นเจ้าของโดยรวมของรถโดยสารไฟฟ้า [63]

3.4 การนำวิธีการออกแบบระบบรถโดยสารมาประยุกต์ใช้

จากในหัวข้อ 3.2 การกำหนดขนาดแบตเตอรี่ และวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับรถโดยสารในเส้นทางอื่นๆได้ โดยที่สามารถนำไปใช้ในการเปลี่ยนจากรถโดยสารใช้น้ำมันมาเป็นรถโดยสารใช้ไฟฟ้าได้ง่าย และไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของบริการ การทดสอบการประยุกต์ใช้แบบจำลองจะเลือกเส้นทางของรถโดยสารที่ให้บริการจริงอยู่ในกรุงเทพมหานคร เพื่อวางแผนปรับเปลี่ยนระบบรถโดยสารใช้น้ำมันที่มีอยู่เดิม เป็นรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งระบบรถโดยสารที่เลือกมาใช้จะเป็นรถโดยสารสายย่อย (Feeder)

รถโดยสารสายย่อย (Feeder) คือ รถโดยสารที่ให้บริการในรูปแบบเส้นทางที่เชื่อมต่อกับเส้นทางสายหลัก โดยมีลักษณะทั่วไปดังต่อไปนี้

1. ให้บริการในระยะสั้น ระยะทางต่อรอบไม่เกิน 20 กิโลเมตร
2. ความเร็วเฉลี่ย จะไม่สูงมาก ไม่เกิน 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3. รูปแบบการวิ่งเป็นแบบ Stop & Go หรือ วิ่งและจอดเป็นช่วงๆ ซึ่งเป็นลักษณะการวิ่งของรถโดยสารเพื่อจอดรับผู้โดยสารตามจุดจอดรับผู้โดยสารต่างๆ

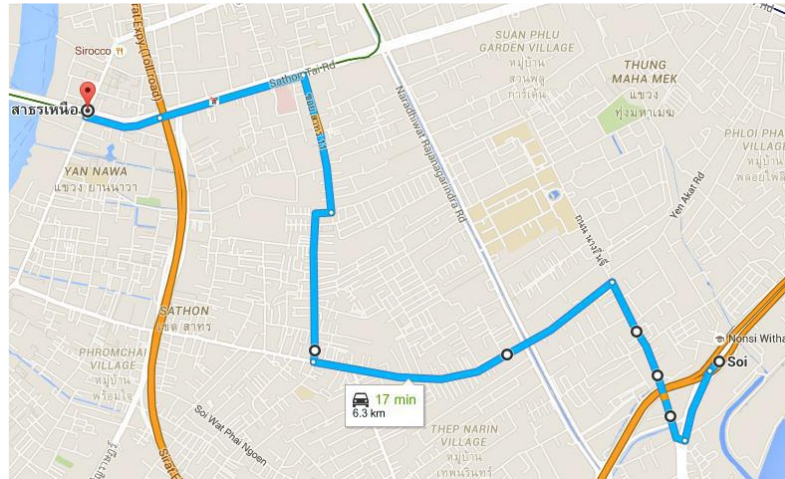
จากลักษณะที่กำหนด จึงได้เลือกระบบรถโดยสารขนาดเล็ก สาย 1256 สะพานเฉลิมพันธ์ – วัดช่องลม โดยระบบรถโดยสารดังกล่าวให้บริการในรูปแบบเส้นทางสายย่อย ซึ่งต่อเนื่องจากเส้นทางสายหลัก คือ รถไฟฟ้า BTS สถานีสะพานตากสิน ดังรูปที่ 29



เวลาถ่ายภาพ: ก.ย. 2011 © 2016 Google

รูปที่ 29 รถโดยสารสองแถวให้บริการเชื่อมกับ สถานีรถไฟฟ้า BTS สะพานตากสิน

ระบบรถโดยสารสาย 1256 วิ่งให้บริการระยะทางรวมไป-กลับ 14.8 กิโลเมตรต่อรอบ
เส้นทางการเดินรถสองแถว สาย 1256 ดังรูปที่ 30 โดยรถสองแถวมีการจอดรับส่งผู้โดยสารระหว่าง
ทางซึ่งมีสถานที่สำคัญ เช่น โรงเรียน ตลาด ชุมชน เป็นเหมือนจุดจอดตามสถานีต่างๆ



รูปที่ 30 เส้นทางการเดินรถสองแถว สาย 1256

จากการสำรวจสถานีปลายทางคือสะพานเฉลิมพันธ์ และวัดช่องลม จะมีอยู่บริเวณใกล้เคียง
ทั้งสองสถานีปลายทางนี้ เมื่อสำรวจดูก็พบว่ามีบริเวณที่สามารถติดตั้งสถานีชาร์จประจุไฟฟ้าได้ใน
บริเวณสถานีปลายทางทั้งสอง ดังรูปที่ 31 จากการสำรวจ จะสรุปได้ว่ารถโดยสารสายนี้มีความ
เป็นไปได้ในการนำรถโดยสารไฟฟ้าไปใช้วิ่งแทนรถสองแถวที่ใช้วิ่งอยู่ในปัจจุบัน งานวิจัยจึงได้ทดลอง
ออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้าสำหรับวิ่งให้บริการในเส้นทางนี้ในอนาคต



สะพานเฉลิมพันธ์



วัดช่องลม

รูปที่ 31 บริเวณสถานีปลายทาง

บทที่ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ

การออกแบบระบบแบตเตอรี่ของรถโดยสารจะเปรียบเทียบระหว่างระบบรถโดยสารที่มีการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าในแบบต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้มาจากการจำลองการใช้พลังงานของรถโดยสารในแต่ละวัน เพื่อเลือกผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าในเส้นทางต่างๆ

4.1 กรณีศึกษา : การวางแผนระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

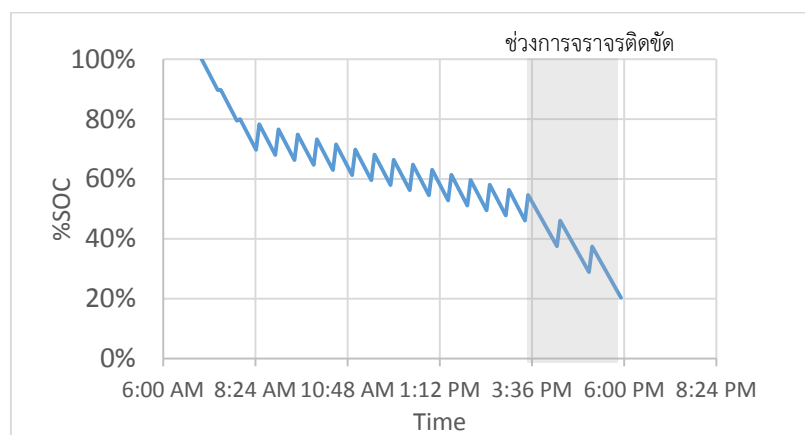
งานวิจัยได้ออกแบบระบบแบตเตอรี่ และการชาร์จประจุไฟฟ้าของรถโดยสารไฟฟ้าที่วิ่งภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาย 1 ซึ่งมีรถโดยสารทั้งหมด 8 คัน วิ่งให้บริการวันละ 20 รอบ รวมเป็นระยะทางการวิ่ง 80 กิโลเมตรต่อวัน รถโดยสารใช้พลังงานทั้งหมด 82.5 kWh ต่อวัน โดยมีการให้บริการระบบปรับอากาศตลอดทั้งวัน การวางแผนจะมีการคำนึงถึงสภาพการจราจรติดขัดในช่วงตอนเย็น โดยจะแบ่งการใช้พลังงานตามสภาพการจราจร ในช่วงเช้าตั้งแต่ประมาณ 7.00 น. – 15.00 น. จะเป็นช่วงที่การจราจรไม่ติดขัด การวิ่ง 16 รอบในช่วงนี้จะถูกกำหนดให้ใช้พลังงาน 3.8 kWh/รอบ ส่วน 4 รอบที่เหลือช่วงเย็น ตั้งแต่ประมาณ 15.00 น. เป็นต้นไป จะมีการจราจรติดขัด ถูกกำหนดการใช้พลังงานเป็น 5.4 kWh/รอบ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงการจราจรดังกล่าว (ภาคผนวก ญ)

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นตัวอย่างในการออกแบบทั้งหมด 4 แผนการซึ่งเกิดจากการปรับกำลังการชาร์จ และเวลาการชาร์จที่แตกต่างกัน โดยเวลาการชาร์จที่กำหนดจะไม่ส่งผลกระทบต่อตารางการเดินรถ ขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้จะเป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่ให้บริการได้เพียงพอของแต่ละแผนการชาร์จ ผลลัพธ์ของรถโดยสารในกรณีไม่มีการชาร์จระหว่างวัน จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแผนการออกแบบต่างๆ เพื่อเลือกระบบรถโดยสารที่ดีสำหรับนำไปใช้งาน

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ทางสถิติ การใช้ค่าเฉลี่ยในการใช้พลังงานสำหรับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ จะมีความเป็นไปได้เพียง 65% ที่จะมียังพลังงานเพียงพอ ดังที่อธิบายในหัวข้อ 3.1.3 งานวิจัยจึงออกแบบระบบในกรณีที่ใช้การเผื่อขนาดแบตเตอรี่ (oversizing) มาเป็นกรณีเปรียบเทียบอีกกรณีหนึ่ง โดยจะใช้ค่าความเป็นไปได้ 95% ที่จะมียังพลังงานเพียงพอในการให้บริการมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะต้องมีพลังงานมากถึง 113.3 kWh ต่อวัน

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แผนที่ 1

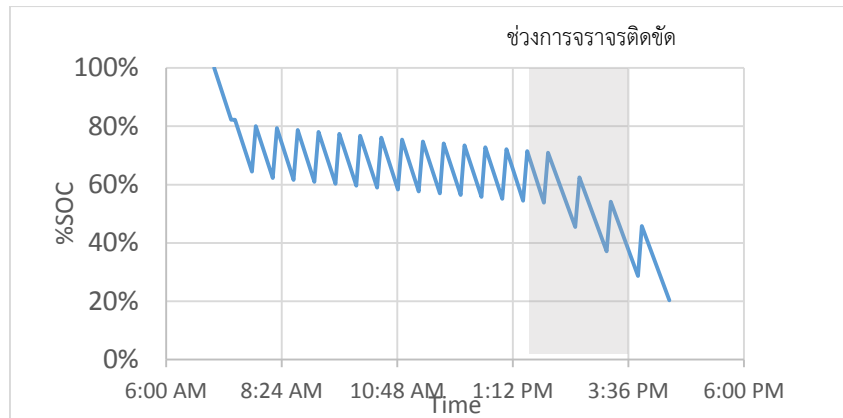
แผนการชาร์จที่ 1 จะชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง โดยการชาร์จประจุไฟฟ้าจะใช้กำลังการชาร์จ 1 C เนื่องจากเป็นข้อจำกัดแบตเตอรี่ LFP ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และจะใช้เวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า 5 นาทีที่สถานีปลายทางเนื่องจากในระบบการให้บริการในปัจจุบันรถโดยสารมีการจอดรอผู้โดยสารที่บริเวณสถานีปลายทางเป็นเวลา 5 นาที ทำให้ตารางเวลาการเดินทางโดยสารเดิมไม่เปลี่ยนแปลง จากการออกแบบตามข้อกำหนด ทำให้ได้กราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 32 จากการกำหนดการจราจรติดขัดในช่วงเย็น ทำให้กราฟจะมีลักษณะชันมากกว่า



รูปที่ 32 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 1

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2

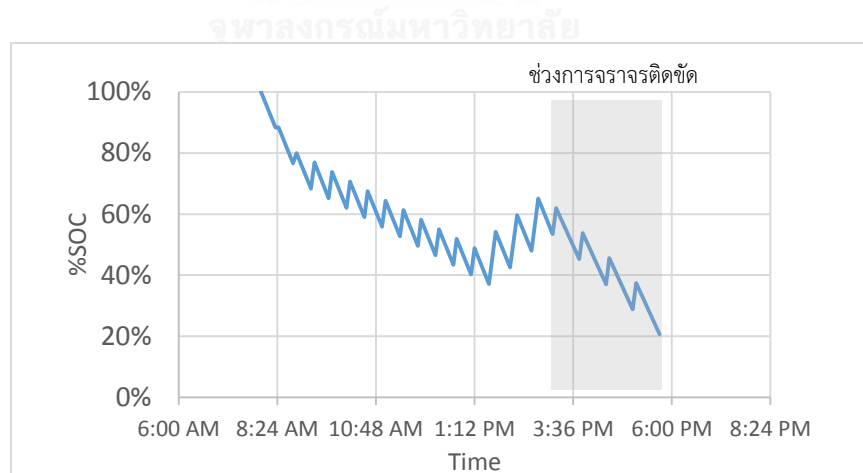
แผนการชาร์จที่ 2 จะชาร์จประจุไฟฟ้า 2C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง โดยมีกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 33 การชาร์จประจุไฟฟ้าถูกประยุกต์จากแผนการที่ 1 โดยทำการเปลี่ยนยี่ห้อของแบตเตอรี่โดยอ้างอิงมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัย H. Ding [8] ซึ่งจะมีข้อจำกัดการชาร์จประจุไฟฟ้าสูงสุดที่ 2C แผนการที่ 2 จึงปรับอัตราการชาร์จมาเป็น 2 C โดยใช้เวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าเท่าเดิม การเพิ่มอัตราการชาร์จทำให้สามารถลดขนาดแบตเตอรี่ลงได้ แต่ค่าสถานีชาร์จจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังการชาร์จที่สูงขึ้น โดยจากกราฟจะเห็นว่าลักษณะของกราฟเข้าใกล้กับแผนการชาร์จที่ทำให้ได้ "ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุด" มากยิ่งขึ้น (ดังที่อธิบายในหัวข้อ 3.2.1)



รูปที่ 33 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3

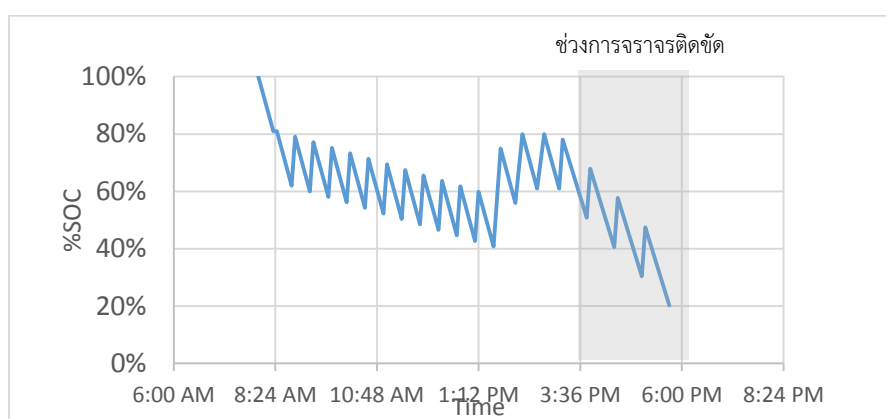
แผนการชาร์จที่ 3 จะชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง และชาร์จ 1 C เป็นเวลา 10 นาทีในช่วงบ่าย โดยมีกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 34 แผนการชาร์จแบบที่ 3 เป็นการปรับเพิ่มเวลาการชาร์จเป็น 10 นาทีในช่วงบ่าย โดยจากการสำรวจการให้บริการพบว่าในช่วงบ่ายจะมีการจราจรที่ราบลิ้นมาก รถใช้เวลาในการวิ่งต่อรอบน้อยกว่า ทำให้มีเวลาในการจอดชาร์จประจุไฟฟ้ามากกว่าในช่วงอื่นๆ จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าช่วงบ่ายที่เพิ่มเวลาการชาร์จเป็น 10 นาที จะทำให้ SOC ของแบตเตอรี่มีการเพิ่มสะสมขึ้น เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการชาร์จสูงกว่าการใช้งาน ทำให้สามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ลงได้



รูปที่ 34 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4

ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง และชาร์จ 2 C เป็นเวลา 10 นาทีในช่วงบ่าย โดยมีกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 35 แผนการชาร์จแบบที่ 4 ทำการประยุกต์โดยนำแนวคิดจากแผนการที่ 2 และ 3 รวมกัน โดยเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่ที่รองรับการชาร์จสูงสุด 2C ตามแผนการที่ 2 และมีการชาร์จประจุไฟฟ้า 10 นาทีในช่วงบ่ายตามแผนการที่ 3 ทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดเล็กลงไปอีก



รูปที่ 35 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4

จากแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า ของระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สาย 1 ทั้ง 4 แผนการ ผลลัพธ์ที่น่าสนใจถูกนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 7 (ผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง) จากผลลัพธ์จะแสดงให้เห็นว่า จากกรณีที่รถโดยสารไม่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าจะต้องใช้แบตเตอรี่ขนาด 104 kWh การวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าสามารถลดขนาดแบตเตอรี่ลงได้กว่า 65-80% ซึ่งทำให้ประหยัดราคาค่าแบตเตอรี่ลงได้มากกว่า 40,000\$ (จากกรณีอัตราราคาแบตเตอรี่ 600\$ ต่อ kWh) และการลดน้ำหนักแบตเตอรี่ยังช่วยให้ประหยัดพลังงานขับเคลื่อนได้ประมาณ 7-8% นอกจากนี้การแก้ปัญหาความกังวลเรื่องระยะทางด้วยการเผื่อขนาดแบตเตอรี่ จะทำให้แบตเตอรี่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมถึง 36% ซึ่งทำให้เพิ่มราคาค่าแบตเตอรี่กว่า 22,000\$

| | No charge | Plan 1 | Plan 2 | Plan 3 | Plan 4 | Oversize |
|---------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|----------|
| ขนาดแบตเตอรี่ (kWh) | 104 | 36.7 | 21.5 | 32.7 | 20.1 | 141.6 |
| % ที่แตกต่าง | | -64.6 % | -79.3 % | -68.5 % | -80.7 % | +36.2 % |
| การใช้พลังงาน | | -6.8 % | -8.3 % | -7.2 % | -8.4 % | +3.4 % |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 40.71 | 40.12 | 39.98 | 40.05 | 39.91 | 43.71 |
| % ที่แตกต่าง | | -1.5 % | -1.8 % | -1.6 % | -2.0 % | +7.4% |

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในกรุงเทพฯ

ค่า TCO ถูกนำมาเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 7 เพื่อใช้เปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุน โดยทั่วไปผลของการลดขนาดแบตเตอรี่ถูกคาดว่าจะทำให้ค่า TCO ที่ได้ต่ำกว่าเดิม แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า TCO ของรถโดยสารที่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วกับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.71 บาทต่อกิโลเมตร พบว่าแต่ละแผนการชาร์จ มีค่า TCO ลดลง 1.5% 1.8% 1.6% และ 2.0% ตามลำดับ จากผลการออกแบบสรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมีผลทำให้ขนาดแบตเตอรี่ลดลงได้มากกว่า 65-80% แต่ TCO ลดลงได้เพียงเล็กน้อยเพียงแค่ 2% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพื่อขนาดแบตเตอรี่ จะพบว่าวิธีการเพื่อขนาดแบตเตอรี่ทำให้ TCO เพิ่มขึ้นถึง 7.4% จึงสรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเป็นแนวทางที่มีความคุ้มค่ามากกว่าการเพื่อขนาดแบตเตอรี่ถึง 10%

การเลือกผลลัพธ์การออกแบบโดยเลือกจากแผนการชาร์จที่นำลงทุนมากที่สุดจะดูจากค่า TCO ซึ่งพบว่าแต่ละแผนมี TCO ใกล้เคียงกันโดยมีค่า TCO เท่ากับ 40 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งเรียกได้ว่าค่า TCO ของแต่ละแผนการชาร์จไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากในแง่การลงทุนที่ทำการเปรียบเทียบ TCO เพื่อตัดสินใจแล้ว เมื่อทำการวิเคราะห์ต้นทุนตัวแปรอื่นๆ ที่จะนำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกแผนการชาร์จที่ดีที่สุด ได้แก่ ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ เนื่องจากการออกแบบใช้เวลาในการจอดรอผู้โดยสารมาเป็นเวลาการชาร์จจึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการเดินทาง เพราะฉะนั้นช่วงห่างเวลาปล่อยรถของทุกแผนการจึงไม่มีความแตกต่างกัน น้ำหนักของแบตเตอรี่ก็ไม่มีผลกระทบต่อตัดสินใจ เนื่องจากผลจากประหยัดพลังงานขับเคลื่อนก็ไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน การจัดวางแบตเตอรี่บนรถก็ไม่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจได้ เพราะปริมาตรของแบตเตอรี่มีแต่จะเล็กลงและไม่มีทางเกินพื้นที่จัดเก็บของรถโดยสารทำให้ไม่มีผลกระทบอะไร อายุการใช้งานก็ไม่มีผลกระทบต่อให้บริการเช่นกัน สรุปรวมแล้วเนื่องจาก

ไม่มีตัวแปรผลลัพธ์ที่สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจในการเลือกแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าที่ดีที่สุดได้ แล้ว รถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจึงสามารถทำการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วด้วยแผนการแผนใดก็ได้โดยไม่มี ความแตกต่างกัน แต่ถึงกระนั้นการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าวิธีการเพื่อขนาดแบตเตอรี่

ความเชื่อโดยทั่วไปจะคิดว่าระบบรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จซึ่งแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ ทำให้ราคาสูงไม่เหมาะกับการลงทุน จึงใช้การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเพื่อลดขนาดของแบตเตอรี่ แต่จากการศึกษาในรถโดยสารระยะสั้นในงานวิจัยนี้ไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากการพิจารณาการลงทุนจะคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อปี หรือในการลงทุนระบบรถโดยสารจะคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อกิโลเมตร เพราะฉะนั้นตัวแปรที่จะมา มีผลกระทบต่อค่าแบตเตอรี่คือ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานคิดเป็น Cycle โดยแสดงจากตัวอย่างจากแผนการชาร์จต่างๆของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์ ดังตารางที่ 8 จากผลลัพธ์ที่ได้ถึงแม้ว่าราคาของแบตเตอรี่จะมีค่าแตกต่างกันอย่างมาก แต่ด้วยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ต่างกัน แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กถึงแม้ว่าจะมีราคาที่ถูกกว่า แต่ก็มีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า เมื่อแบตเตอรี่หมดอายุการใช้งานก็ต้องจัดซื้อแบตเตอรี่ชุดใหม่ ทำให้ผลในเชิงการลงทุนไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้การชาร์จประจุไฟฟ้าที่กำลังไฟสูงขึ้น ทำให้ราคาสถานีชาร์จเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย

| | No charge | Plan 1 | Plan 2 | Plan 3 | Plan 4 |
|--------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 62,226 | 22,020 | 12,900 | 19,620 | 12,036 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 0 | 8,400 | 10,000 | 7,600 | 9,200 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 12.5 | 4.4 | 2.6 | 3.9 | 2.4 |

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบราคาและอายุการใช้งานของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ

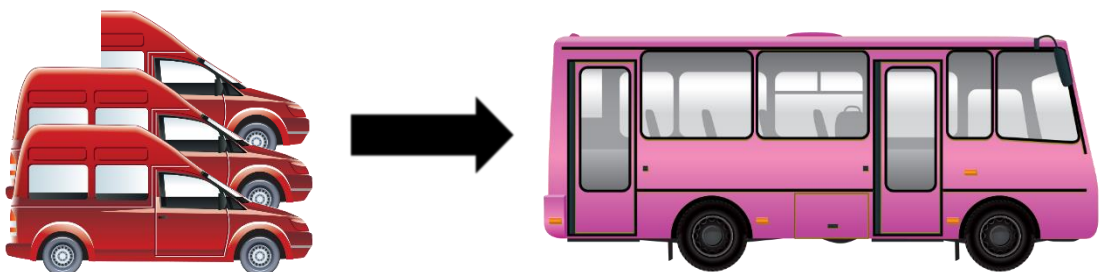
4.2 กรณีศึกษา : การวางแผนระบบรถโดยสารไฟฟ้าแทนรถสองแถว สาย 1256

ในการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า และระบบแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อให้สามารถให้บริการได้เพียงพอตามที่ต้องการ เริ่มต้นด้วยการเก็บตัวอย่างข้อมูลการวิ่งของรถสองแถวด้วย GPS โดยเก็บข้อมูลเวลาการวิ่ง ตำแหน่ง และความเร็ว เมื่อทำการเก็บตัวอย่างข้อมูลการวิ่งได้แล้ว นำมาคำนวณต่อด้วยแบบจำลอง VSP ของรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อทำการคำนวณอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสาร โดยมองว่ารถโดยสารไฟฟ้าจะมาวิ่งให้บริการแทนรถสองแถวในเส้นทางนี้

เนื่องจากความจุผู้โดยสารของรถสองแถว และรถโดยสารไฟฟ้านั้นมีจำนวนไม่เท่ากัน ในการเปลี่ยนการให้บริการจากรถสองแถว มาเป็นรถโดยสารไฟฟ้าขนาด 8 เมตร จึงควรมีการวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของจำนวนผู้โดยสาร โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ จะได้ว่าเนื่องจากรถสองแถวมีความจุผู้โดยสารได้น้อยกว่ารถโดยสารไฟฟ้าประมาณ 2.5 เท่า (รถสองแถวจุได้ 18 คน รถโดยสารไฟฟ้าจุได้ 45 คน) จากการสำรวจรถสองแถว สาย 1256 ในช่วงเร่งด่วน จะมีผู้โดยสารจำนวนมาก (1 ชั่วโมง 350 คน) ซึ่งเต็มความจุของรถ ดังรูปที่ 36 และจะมีช่วงห่างเวลาปล่อยรถ ประมาณ 2 นาที โดยถือว่าค่อนข้างถี่มาก เมื่อทำการเปลี่ยนเป็นระบบรถโดยสารไฟฟ้า โดยมองว่ารถสองแถว 2.5 คัน เท่ากับรถโดยสารไฟฟ้า 1 คัน ดังรูปที่ 37 ซึ่งจะทำให้ช่วงห่างเวลาปล่อยรถ มากขึ้น 2.5 เท่า จาก 2 นาที เป็น 5 นาที แต่ถึงอย่างนั้นก็ยังเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจำนวนรถโดยสารไฟฟ้าที่ทำให้ได้ช่วงห่างเวลาปล่อยรถดังกล่าว คือ 20 คัน จากเดิมที่เป็นรถสองแถว 50 คัน



รูปที่ 36 ผู้โดยสารเต็มความจุของรถสองแถวในช่วงเร่งด่วน



รูปที่ 37 การเปลี่ยนการให้บริการจากรถสองแถวเป็นรถโดยสารไฟฟ้า

การออกแบบระบบแบตเตอรี่ และการชาร์จประจุไฟฟ้าของรถโดยสารไฟฟ้า ที่จะนำไปวิ่งแทนรถสองแถว สาย 1256 มีรถโดยสารทั้งหมด 20 คัน วิ่งให้บริการไปกลับวันละ 10 รอบ รวมเป็นระยะทางการวิ่ง 148 กิโลเมตรต่อวัน และใช้พลังงานทั้งหมดประมาณ 78 kWh ต่อวัน (ไม่มีการให้บริการระบบปรับอากาศ) โดยการชาร์จประจุไฟฟ้าจะใช้เวลา 5 นาทีที่สถานีต้นทาง และสถานีปลายทางเป็นหลัก ตัวอย่างในการออกแบบทั้งหมด 5 แผนการได้ถูกออกแบบขึ้น เพื่อเป็นทางเลือกในการออกแบบ และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับในกรณีไม่มีการชาร์จระหว่างวัน

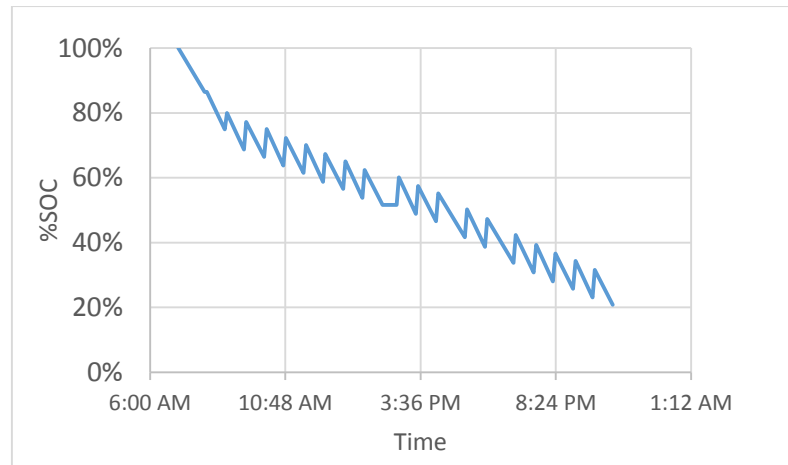
จากแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า ของระบบรถโดยสารไฟฟ้าที่นำไปวิ่งแทนรถสองแถว สาย 1256 ทั้ง 5 แผนการ โดยจะมีข้อแตกต่างในส่วนต่างๆ ตามรูปแบบการให้บริการ โดยทำการเปรียบเทียบแผนการทั้งหมดดังตารางที่ 9

| แผนการแบบที่ | กำลังการชาร์จ | เวลาการชาร์จ (นาที) | หมายเหตุ |
|--------------|---------------|---------------------|--|
| 1 | 1 C | 5 | - |
| 2 | 1 C | 5 | ชาร์จจนเต็ม ในช่วงพักกลางวัน (30 นาที) |
| 3 | 2 C | 5 | - |
| 4 | 2 C | 5 | ชาร์จจนเต็ม ในช่วงพักกลางวัน (15 นาที) |
| 5 | 1 C | 5 | ชาร์จสถานีปลายทางฝั่งเดียว |

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบรูปแบบการให้บริการระบบรถโดยสารไฟฟ้า สาย 1256

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1

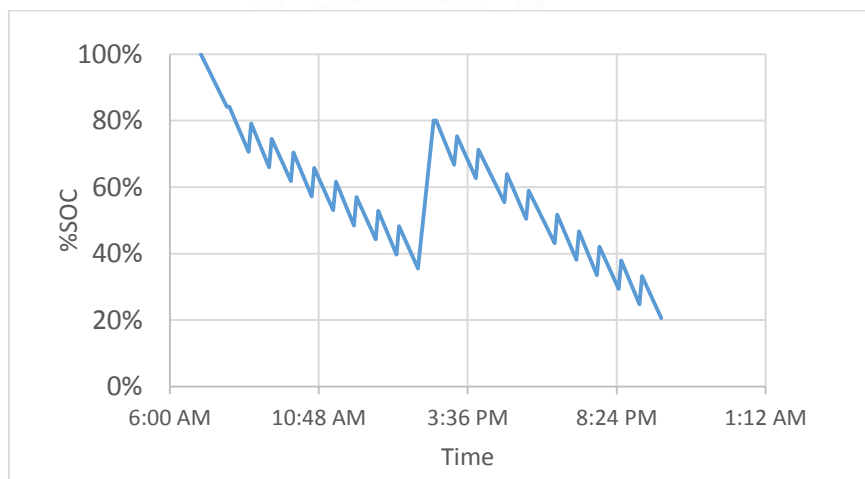
ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง โดยมีกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 38 โดยแผนการชาร์จนี้ทำการประยุกต์มาจากแผนการที่ 1 ของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการชาร์จ 5 นาทีระหว่างจอดรอรับผู้โดยสาร ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อตารางการเดินรถโดยสาร และชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C ตามคู่มือของแบตเตอรี่ที่ใช้



รูปที่ 38 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2

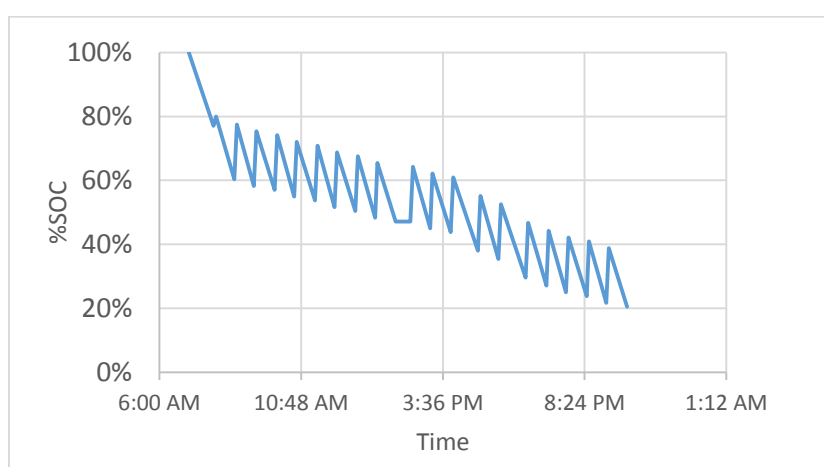
ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง และมีการชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C 30 นาที ในช่วงพักกลางวัน จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 39 โดยแนวคิดของแผนการที่ 2 มาจากการสำรวจพบว่าช่วงบ่ายจะมีเวลาการพักผ่อนอาหารกลางวัน จึงใช้เวลาจอดพักส่วนนี้มาทำการชาร์จประจุไฟฟ้าทำให้สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็มได้ (ที่ SOC 80%) โดยที่ใช้เวลาชาร์จประจุไฟฟ้า 30 นาที กราฟที่ได้จึงมีลักษณะพุ่งสูงขึ้นในช่วงพักกลางวัน ซึ่งการเพิ่มโอกาสการชาร์จให้มากขึ้นทำให้สามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ลงได้



รูปที่ 39 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3

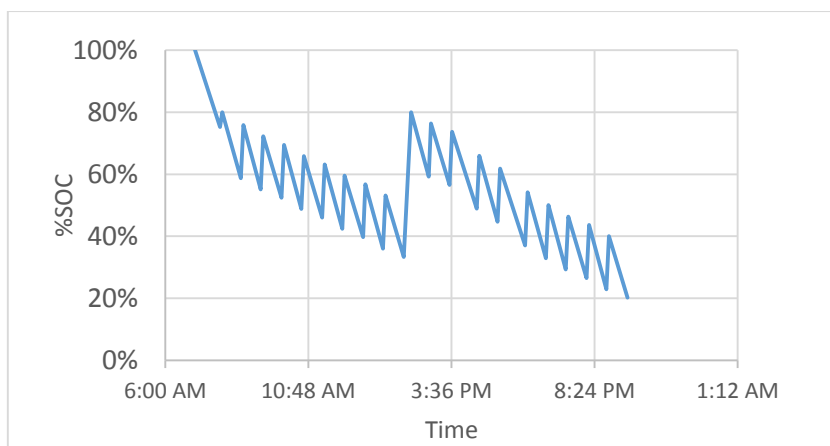
ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง จะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ดังรูปที่ 40 แผนการชาร์จนี้จะทำการประยุกต์มาจากแผนการที่ 1 โดยทำการเปลี่ยนยี่ห้อของแบตเตอรี่ที่อ้างอิงมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัย H. Ding [8] ซึ่งจะมีข้อจำกัดการชาร์จประจุไฟฟ้าสูงสุดที่ 2C แผนการนี้ จึงปรับอัตราการชาร์จมาเป็น 2 C โดยใช้เวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าเท่าเดิม การเพิ่มกำลังการชาร์จให้สูงขึ้น ทำให้ลักษณะของกราฟเข้าใกล้แผนการชาร์จที่ทำให้ได้ขนาดแบตเตอรี่เล็กที่สุดมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 40 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4

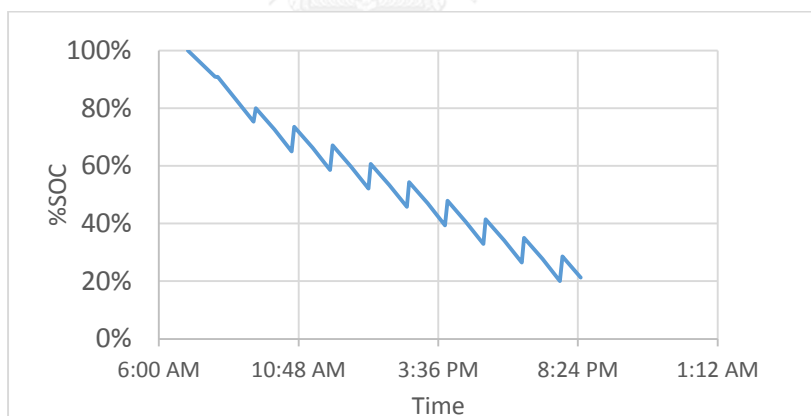
ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทางและสถานีปลายทาง และมีการชาร์จ 2 C 15 นาที ในช่วงพักกลางวัน โดยกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ได้เป็นดังรูปที่ 41 โดยแผนการชาร์จนี้ทำการประยุกต์โดยนำแนวคิดจากแผนการที่ 2 และ 3 รวมกัน โดยเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นแบตเตอรี่ที่รองรับการชาร์จสูงสุด 2C ทำให้เพิ่มอัตราการชาร์จให้สูงขึ้น และมีการชาร์จประจุไฟฟ้าจนเต็มในช่วงพักทานอาหารกลางวัน ทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีขนาดเล็กลงไปอีก



รูปที่ 41 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้า สาย 1256 แบบที่ 5

ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทางฝั่งเดียว (เฉพาะสถานีวัดช่องลม) โดยกราฟการเปลี่ยนแปลงของ SOC ได้เป็นดังรูปที่ 42 โดยแผนการที่ 5 จะเป็นแผนที่ประยุกต์มาจากแผนที่ 1 แต่มีการชาร์จที่สถานีปลายทางฝั่งเดียว แผนการชาร์จนี้ใช้สำหรับในกรณีที่สถานีชาร์จไม่สามารถติดตั้งได้ที่สถานีต้นทาง



รูปที่ 42 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 5

จากกรณีศึกษาการโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในหัวข้อ 4.1 ได้ผลลัพธ์ค่า TCO ไม่แตกต่างกันในแต่ละแผนการชาร์จ กรณีศึกษาของรถโดยสารสาย 1256 ที่มีการให้บริการคล้ายคลึงกันจึงมีความน่าสนใจว่าจะได้ผลลัพธ์ในแนวทางเดียวกันหรือไม่ ผลลัพธ์จากการออกแบบในแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าแบบต่างๆของรถโดยสารสาย 1256 จึงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 10 (ผลลัพธ์ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก จ) จากการเปรียบเทียบพบว่ารถโดยสารที่มีการชาร์จประจุ

ไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทั้ง 5 แผนการ เมื่อเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ จะมีค่า TCO ลดลงประมาณ 2% ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำให้สามารถสรุปได้เช่นเดียวกันว่า การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมีผลทำให้ TCO ลดลงได้น้อยมาก ถึงแม้ว่าจะทำการปรับเปลี่ยนแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าเพื่อขนาดแบตเตอรี่ลดลงตั้งแต่ 47.3% จนถึง 81% เมื่อสังเกตค่า TCO จะพบว่า แต่ละแผนมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 21.3-21.4 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งเรียกได้ว่าค่า TCO ของแต่ละแผนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงช่วยยืนยันข้อสรุปที่ว่า ในการออกแบบแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารระยะสั้น ค่า TCO ไม่สามารถใช้เลือกแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าที่ดีที่สุดได้ เนื่องจาก TCO เท่ากัน เพราะฉะนั้นจะทำให้สรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับรถโดยสารระยะสั้นไม่มีความแตกต่างกันในแง่การลงทุน

| | No charge | Plan 1 | Plan 2 | Plan 3 | Plan 4 | Plan 5 |
|---------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ขนาดแบตเตอรี่ (kWh) | 97.6 | 34 | 29 | 20 | 18.5 | 50.1 |
| % ที่แตกต่าง | | -65.1 % | -70.3 % | -79.5 % | -81.0 % | -47.3 % |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.77 | 21.40 | 21.35 | 21.32 | 21.30 | 21.40 |
| % ที่แตกต่าง | | -1.7 % | -1.9 % | -2.0 % | -2.2 % | -1.7 % |
| การใช้พลังงาน | | -6.1 % | -6.6 % | -7.5 % | -7.6 % | -6.0 % |

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบผลลัพธ์การออกแบบระบบรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256

งานวิจัยได้ทำการออกแบบรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 ในกรณีที่มีการให้บริการระบบปรับอากาศ โดยงานวิจัยได้ออกแบบระบบรถโดยสารนี้เพื่อเป็นกรณีที่รถโดยสารได้บรรทุกแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ที่สุดเต็มช่องเก็บแบตเตอรี่ โดยจะได้ว่าในกรณีที่ไม่มีมีการชาร์จประจุไฟฟ้าระหว่างวันจะต้องใช้แบตเตอรี่ขนาด 180.6 kWh ขนาดแบตเตอรี่ที่ได้นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่รถโดยสารรุ่นนี้บรรทุกได้ (ประมาณ 190 kWh) เมื่อนำมาคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 11 สำหรับเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในกรณีที่ชาร์จประจุไฟฟ้าตามแผนที่ 4 ซึ่งสามารถลดขนาดแบตเตอรี่ได้มากที่สุด จะได้แบตเตอรี่ขนาด 34.5 kWh พบว่าขนาดแบตเตอรี่ลดลง 81% และทำให้ค่า TCO ลดลงได้สูงสุด 3.1%

จากผลลัพธ์ของงานวิจัย จะได้ว่าสำหรับรถโดยสารไฟฟ้ารุ่นนี้จะสามารถให้บริการได้ในระยะการวิ่งไม่เกิน 150 กิโลเมตรต่อวันโดยไม่จำเป็นต้องมีการชาร์จ ซึ่งเมื่อนำการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมาใช้จะช่วยลดค่า TCO ได้สูงสุดเพียงแค่ประมาณ 3.1% เท่านั้น ถึงแม้ว่าการชาร์จประจุ

ไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจะไม่ช่วยในด้านการลงทุนได้เท่าไรนัก แต่ค่า TCO ก็ยังต่ำกว่าเล็กน้อยและช่วยลดความกังวลเรื่องระยะทางของรถไฟฟ้า ในกรณีที่แบตเตอรี่หมดก็สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าแล้วกลับมาให้บริการต่อได้

| | No charging | Plan 4 (มีระบบปรับอากาศ) |
|---------------|---------------|--------------------------|
| ขนาดแบตเตอรี่ | 180.6 kWh | 34.5 kWh |
| ลดลง% | | 81% |
| TCO | 27.42 บาท/กม. | 26.51 บาท/กม. |
| ลดลง% | | 3.1% |

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของรถโดยสารสาย 1256 ในกรณีมีระบบปรับอากาศ

4.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตและการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว

จากการศึกษาพบว่า ในปัจจุบันนอกจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron phosphate : LFP) ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้อยู่เดิมนั้น จะมีแบตเตอรี่ลิเทียมอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ คือ แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต (Lithium titanate oxide : LTO) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน [55, 64] (คุณสมบัติแบตเตอรี่ LTO ในภาคผนวก ข) โดยเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ทั้ง 2 ชนิดนี้ จะได้ดังตารางที่ 12 แบตเตอรี่ LFP จะถูกเรียกว่าเป็น High energy battery เนื่องจากความสามารถในการเก็บพลังงานที่เยอะกว่า โดยมีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่า (น้ำหนักเบา กว่า และใช้พื้นที่จัดเก็บน้อยกว่าประมาณ 1.5 เท่า) และแบตเตอรี่ LTO จะถูกเรียกว่าเป็น High power battery เนื่องจากความสามารถในการคายประจุ และชาร์จประจุที่สูงกว่า โดยคายประจุได้สูงสุด 15C และยังสามารถชาร์จประจุได้สูงถึง 6C นอกจากนี้ยังมี Cycle life ที่เยอะกว่ามาก แต่เนื่องจาก แบตเตอรี่ LFP มีความจุพลังงานที่สูงกว่าและมีราคาถูกกว่าจึงได้รับความนิยมในการใช้กับรถโดยสารไฟฟ้าที่ไม่มีการชาร์จอย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องการพลังงานจำนวนมากในการวิ่งแต่ละวัน

| | LFP | LTO |
|------------------------------|-------------|------------|
| | High energy | High power |
| Energy density (Wh/kg) | 100 | 60 |
| Volume (m ³ /kWh) | 0.006 | 0.009 |
| Cycle life | 3,000 | 9,000 |
| Discharge rate | 2C | 15C |
| Charging rate | 1-2C | 6C |
| Cost (\$/kWh) | 600 | 900 |

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแบตเตอรี่ LFP และ LTO

แบตเตอรี่ LTO ไม่เหมาะกับการนำมาใช้กับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จ เพราะมีความจุพลังงานน้อย ราคาแพง และเมื่อคิดอายุการใช้งานตาม Cycle life แล้วนั้น แบตเตอรี่ LTO จะได้ประมาณ 30 ปี ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแบตเตอรี่จะมีการเสื่อมอายุตามปี (Calendar life) ไปก่อนจะใช้จนครบ Cycle life การเสื่อมอายุตามปีทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่สูงสุดประมาณ 10 ปี เพราะฉะนั้นแบตเตอรี่ LTO จะมีอายุการใช้งานเท่ากับแบตเตอรี่ LFP หากไม่ได้ชาร์จอย่างรวดเร็ว ทำให้สรุปได้ว่าการใช้รถโดยสารไฟฟ้าที่ไม่มีการชาร์จอย่างรวดเร็ว ควรใช้แบตเตอรี่ LFP

แต่จากการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้รถโดยสารไม่จำเป็นต้องมีความจุพลังงานสูง แบตเตอรี่ LTO ซึ่งมีความสามารถในการชาร์จประจุไฟฟ้าได้มากกว่าจึงมีความเหมาะสมกับเทคโนโลยีนี้ งานวิจัยจึงได้นำเอาแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วที่ออกแบบขึ้นมา จากที่ใช้แบตเตอรี่ LFP เปลี่ยนเป็นใช้แบตเตอรี่ LTO โดยใช้แผนการชาร์จเร็วเหมือนกันและใช้ขนาดแบตเตอรี่เท่ากัน จากนั้นมาเปรียบเทียบค่า TCO ในการลงทุนดังตารางที่ 13 ผลลัพธ์ที่ได้คือรถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ LTO สามารถลดค่า TCO ได้ประมาณ 10-15% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วกับแบตเตอรี่ LFP พบว่าถึงแม้ว่าการใช้แบตเตอรี่ LTO จะมีราคาแพงกว่า แต่จะลดค่า TCO ได้มากกว่าเนื่องจากมี Cycle life ที่มากกว่า งานวิจัยจึงสรุปได้ว่า แบตเตอรี่ LTO มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ร่วมกับการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วในรถโดยสารไฟฟ้าอย่างมากดังแสดงจากผลลัพธ์ค่า TCO ในตารางที่ 13

| | รถโดยสารภายในจุฬาฯ | รถโดยสารสาย 1256 (ไม่มีระบบปรับอากาศ) | รถโดยสารสาย 1256 (มีระบบปรับอากาศ) |
|------------------------|--------------------|--|---------------------------------------|
| TCO (No charge, LFP) | 40.71 บาท/กม. | 21.77 บาท/กม. | 27.42 บาท/กม. |
| TCO (Fast charge, LFP) | 39.91 บาท/กม. | 21.30 บาท/กม. | 26.51 บาท/กม. |
| ลดลง% | 2.0% | 2.2% | 3.1% |
| TCO (Fast charge, LTO) | 36.38 บาท/กม. | 19.50 บาท/กม. | 23.24 บาท/กม. |
| ลดลง% | 10.6% | 10.4% | 15.2% |

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบค่า TCO เมื่อใช้แบตเตอรี่ LFP และ LTO

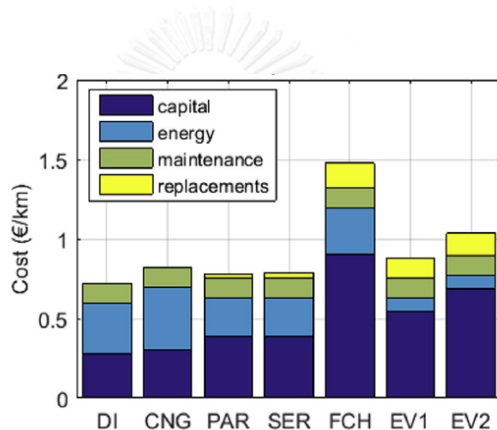
4.4 อภิปรายผลการวิจัย

1) เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจากรถโดยสารระยะสั้น ซึ่งในกรณีศึกษาโดยสารวิ่งระยะทางต่อรอบ 4 และ 14.8 กิโลเมตร เป็นระยะทางรวมเพียง 80 และ 148 กิโลเมตรต่อวัน ทำให้หากเป็นรถไฟฟ้าแล้วสามารถออกแบบให้ใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่และไม่ต้องการชาร์จประจุไฟฟ้า แต่หากจะนำไปใช้ระยะทางการเดินทางที่ไกลขึ้นการชาร์จประจุไฟฟ้าจะเริ่มมีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากรถโดยสารจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการให้บริการ และด้วยข้อจำกัดในการบรรทุกแบตเตอรี่ จะทำให้ขนาดของแบตเตอรี่ถูกจำกัด ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์จากพื้นที่การเก็บแบตเตอรี่ของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเก็บแบตเตอรี่ได้สูงสุดประมาณ 190 kWh รถโดยสารไฟฟ้ามีอัตราการใช้พลังงานอยู่ที่ประมาณ 1.0 kWh/km (หากไม่มีระบบปรับอากาศจะใช้ 0.6 kWh/km.) จะทำให้ได้ระยะทางการวิ่งสูงสุดประมาณ 150 กิโลเมตร (หากไม่มีระบบปรับอากาศวิ่งได้ 250 กิโลเมตร) ซึ่งถ้ารถโดยสารไฟฟ้าต้องวิ่งเกินกว่าระยะทางดังกล่าวจะทำให้เกิดปัญหาอย่างแน่นอน ทำให้ต้องมีวิธีการอื่นๆมาปรับปรุงระบบแบตเตอรี่ดังรายการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1

2) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณ TCO เพราะฉะนั้นข้อสังเกตที่สำคัญ คือ การประเมินอายุการใช้งานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการประเมินจากข้อมูลที่ได้จากคู่มือจากผู้ผลิต ซึ่งตรงจุดนี้จะเป็นความกังวลของผู้ประเมินการลงทุนว่าจะทราบได้อย่างไรว่าจะสามารถวิ่งได้จริงๆ ถ้าอายุการใช้งานไม่ถึงดังคู่มือ ต้นทุนก็จะสูงขึ้นมา เพราะต้องซ่อมหรือจัดซื้อใหม่ ก็จะไม่คุ้มค่าตามที่ประเมินไว้ตอนแรก ดังนั้นในทางวิศวกรรมจึงควรมีการทดสอบเพื่อรับรองผล (test and validation) เพื่อให้ยืนยันได้ว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นค่าที่ถูกต้อง นอกจากนี้อายุการใช้งาน

ยังขึ้นอยู่กับ การดูแลรักษาแบตเตอรี่อีกด้วย จึงควรมีการใช้งานและดูแลรักษาอย่างถูกต้อง เช่น การมีระบบ BMS และระบบรักษาอุณหภูมิแบตเตอรี่ที่ดี และมีการตรวจสอบสภาพและแบตเตอรี่อยู่เสมอ

3) การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น จากการศึกษาของงานวิจัยของ Lajunen (2016) [55] ทำการคำนวณค่าการลงทุนจากรถโดยสารซึ่งใช้แหล่งกักเก็บพลังงานชนิดต่างๆในฟินแลนด์ สรุปได้ว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็วจะมีค่าการลงทุนถูกกว่ารถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จอย่างรวดเร็วประมาณ 16% ดังรูปที่ 43 โดย EV1 คือ รถโดยสารที่มีการชาร์จประจุอย่างรวดเร็ว (Opportunity charging) ใช้แบตเตอรี่ LTO ความจุพลังงาน 62.6 kWh และ EV2 คือ รถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จประจุอย่างรวดเร็ว (Overnight charging) ใช้แบตเตอรี่ LFP ความจุพลังงาน 333.6 kWh โดยการชาร์จอย่างรวดเร็วจะลดขนาดแบตเตอรี่ลงประมาณ 80% เหมือนในงานวิจัยนี้



รูปที่ 43 เปรียบเทียบค่าการลงทุนต่อกิโลเมตรของรถโดยสารจากงานวิจัยของ Lajunen [55]

นอกจากนี้ยังมีอีกงานวิจัยหนึ่งของ Pihlatie (2014) [23] ซึ่งเปรียบเทียบผลลัพธ์ TCO ระหว่างรถโดยสารที่มีการชาร์จประจุอย่างรวดเร็วใช้แบตเตอรี่ LTO ความจุพลังงาน 60 kWh กับรถโดยสารที่ไม่มีการชาร์จประจุอย่างรวดเร็วใช้แบตเตอรี่ LFP ความจุพลังงาน 280 kWh โดยเมื่อนำงานวิจัยทั้ง 2 มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้พบว่ารถโดยสารไฟฟ้าในงานวิจัยของ Lajunen และ Pihlatie เป็นรถโดยสารขนาด 12 เมตร และวิ่งทั้งหมด 800,000 กิโลเมตรใน 12 ปี ซึ่งรถโดยสารภายใต้พิจารณาในงานวิจัยนี้จะขนาด 8 เมตร และวิ่งทั้งหมด 300,000 กิโลเมตรใน 12 ปี ดังนั้นเพื่อทำการเปรียบเทียบข้อสรุปในประโยชน์ของการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วต่อค่า TCO โดยใช้วิธีการออกแบบจากการศึกษานี้ งานวิจัยจึงทำการปรับข้อมูลให้เท่ากันด้วยการปรับระยะทางการวิ่งของรถโดยสาร จาก 80 กม./วัน เป็น 220 กม./วัน ทำให้ระยะการวิ่งทั้งหมดกลายเป็น 800,000 กิโลเมตรใน 12 ปี และปรับขนาดของแบตเตอรี่และปรับอัตราการใช้พลังงานให้สูงขึ้นให้สัมพันธ์กัน ผลลัพธ์จะได้ดังตารางที่ 14 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ จะพบว่าเมื่อปรับข้อมูลแล้ว การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจะส่งผลให้ค่า TCO ลดลงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยสรุปได้ว่ารถโดยสารไฟฟ้าเมื่อมีการวิ่งระยะ

ทางไกลขึ้นจะทำให้การชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วมีผลลดค่า TCO ได้มากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากผลลัพธ์จะใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆมากยิ่งขึ้น แต่ผลลัพธ์นี้ยังมีความแตกต่างกัน เนื่องจากยังมีตัวแปรอื่นๆที่แตกต่างกันมากมาย

| | รถโดยสารภายในจุฬา | รถโดยสารภายในจุฬา (ปรับเพิ่มระยะทาง) | งานวิจัยของ Lajunen | งานวิจัยของ Pihlatie |
|----------------------------------|-------------------|---|------------------------|-------------------------|
| แบตเตอรี่ LFP (ไม่มีการชาร์จ) | 104 kWh | 277 kWh | 333.6 kWh | 280 kWh |
| แบตเตอรี่ LTO (ชาร์จเร็ว) | 20 kWh | 53.3 kWh | 62.6 kWh | 60 kWh |
| ขนาดลดลง | 84 kWh (-81%) | 233.7 kWh (-81%) | 271 kWh (-81%) | 220 kWh (-79%) |
| TCO ลดลง% | 10.6% | 19% | 15.9% | 24.3% |

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบ TCO ที่ลดลงในงานวิจัยนี้ และในงานวิจัยอื่นๆ

4.) อัตราค่าไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการคิดค่า TCO ซึ่งในการคิดอัตราค่าไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ จะใช้เป็นอัตราคงที่ 3 บาทต่อหน่วย ซึ่งจากการที่รัฐบาลไทยได้ประกาศอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นอัตราตามช่วงเวลาการใช้ (Time of Use Rate : TOU) ทำให้ค่า TCO ของระบบรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละรูปแบบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยอัตรา TOU คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่คิดตามช่วงเวลาของการใช้ ซึ่งค่าไฟฟ้าจะมีราคาสูงในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามก (Peak) ช่วงกลางวัน และค่าไฟฟ้าจะราคาต่ำกว่าในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย (Off Peak) ช่วงกลางคืน โดยมีอัตรา TOU สำหรับกิจการขนาดกลาง [65] และอัตรา TOU สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า [66] ดังตารางที่ 15

| | Peak | Off Peak |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| อัตรา TOU สำหรับกิจการขนาดกลาง | 3.9 บาท/หน่วย | 2.3 บาท/หน่วย |
| อัตรา TOU สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า | 6.0 บาท/หน่วย | 2.6 บาท/หน่วย |

ตารางที่ 15 อัตราค่าไฟฟ้า TOU

ผลลัพธ์ค่า TCO แสดงดังตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าสำหรับอัตรา TOU ของกิจการขนาดกลาง และอัตรา TOU ของรถไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อรถโดยสารที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็วทำให้ TCO สูงขึ้น 2.5% และ 8.1% ตามลำดับ ส่วนผลกระทบต่อระบบที่ไม่มีมีการชาร์จจะทำให้ TCO ลดลง 2% และ 1.2% ตามลำดับ สรุปได้ว่าอัตรา TOU จะทำให้ระบบที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็วมีค่า TCO แ่ลง แต่ทำให้ระบบที่ไม่มีมีการชาร์จมีค่า TCO ดีขึ้น

| | รถโดยสารภายในจุฬาฯ (ไม่มีชาร์จ, LFP) | รถโดยสารภายในจุฬาฯ (ชาร์จเร็ว, LFP) | รถโดยสารภายในจุฬาฯ (ชาร์จเร็ว, LTO) |
|--------------------------|---|--|--|
| อัตราปกติ | 40.71 (กรณีฐาน) | 39.91 (-2%) | 36.38 (-10.6%) |
| อัตรา TOU กิจการขนาดกลาง | 39.89 (-2%) | 40.92 (+0.5%) | 37.40 (-8.1%) |
| อัตรา TOU รถไฟฟ้า | 40.24 (-1.2%) | 43.27 (+6.3%) | 39.71 (-2.5%) |

| | รถโดยสาร สาย 1256 (ไม่มีชาร์จ, LFP) | รถโดยสาร สาย1256 (ชาร์จเร็ว, LFP) | รถโดยสาร สาย1256 (ชาร์จเร็ว, LTO) |
|--------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|
| อัตราปกติ | 21.77 (กรณีฐาน) | 21.30 (-2.2%) | 19.50 (-10.4%) |
| อัตรา TOU กิจการขนาดกลาง | 21.31 (-2%) | 21.84 (+0.3%) | 20.05 (-7.9%) |
| อัตรา TOU รถไฟฟ้า | 21.51 (-1.2%) | 23.10 (+6.1%) | 21.28 (-2.3%) |

ตารางที่ 16 เปรียบเทียบค่า TCO เมื่อคิดค่าไฟฟ้าในอัตราปกติ และอัตรา TOU



บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้นำเสนอวิธีการในการออกแบบระบบแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้น เริ่มต้นด้วยการหาค่าอัตราการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า ด้วยวิธีการทำนายการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP โดยจากการสอบสวนได้ผลลัพธ์อัตราการใช้พลังงานที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 5% งานวิจัยต้องการข้อมูลจำนวนมากเพื่อผลลัพธ์ที่ได้ครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลายในการให้บริการจริง และสามารถนำข้อมูลที่ได้นำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการจราจรที่ติดขัดและอัตราการใช้พลังงานได้ งานวิจัยจึงได้นำข้อมูลแสดงการวิ่งให้บริการจริงของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์ จำนวน 1596 รอบ มาใช้เพื่อทำนายการใช้พลังงาน ข้อมูลจำนวนมากสามารถนำมาทำนายการใช้พลังงานด้วยแบบจำลอง VSP ซึ่งสามารถทำได้ง่ายโดยใช้ข้อมูลจาก GPS ด้วยข้อมูลกว่า 1596 รอบ ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งจะได้ว่าค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานเท่ากับ 82.5 kWh ต่อวัน และเมื่อแสดงในรูปแบบความเป็นไปได้ 95% ที่จะมีพลังงานเพียงพอในการให้บริการ จะต้องมีพลังงานมากกว่า 113.3 kWh ต่อวัน ซึ่งผลที่ได้สามารถครอบคลุมสภาพการจราจรที่หลากหลาย และได้ค่าการใช้พลังงานที่แม่นยำลดความกังวลเรื่องระยะทางของรถไฟฟ้า และสามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบรถโดยสารอย่างเหมาะสมต่อไป

หลังจากทราบอัตราการใช้พลังงานของรถแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการออกแบบระบบแบตเตอรี่ แต่จากปัญหาเรื่องความกังวลเรื่องระยะทางของรถโดยสารไฟฟ้า งานวิจัยจึงได้นำเทคโนโลยีการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเพื่อนำมาใช้เพิ่มพลังงานให้แก่รถโดยสารไฟฟ้า และสามารถลดความกังวลเรื่องระยะทางของรถโดยสารไฟฟ้าได้ โดยงานวิจัยใช้ความยืดหยุ่นของการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า ทำให้สามารถออกแบบระบบแบตเตอรี่ และวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าให้เข้ากับตารางการเดินรถโดยสารที่มีอยู่เดิม และไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการ ทำให้การเปลี่ยนการให้บริการระบบรถโดยสารเดิมเป็นระบบรถโดยสารไฟฟ้าทำได้โดยง่าย งานวิจัยได้อธิบายถึงข้อจำกัดต่างๆในการใช้งานแบตเตอรี่ และการชาร์จประจุไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ งานวิจัยได้ออกแบบโปรแกรมเพื่อให้ง่ายต่อการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า และการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

เมื่อทำการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าในแบบต่างๆ จะได้ผลลัพธ์มาเพื่อทำการเปรียบเทียบและเลือกแผนการที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยผลลัพธ์ที่นำมาเปรียบเทียบจะประกอบไปด้วยขนาดแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลต่อราคาแบตเตอรี่ น้ำหนักแบตเตอรี่ และการจัดวางแบตเตอรี่ ช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ และจำนวนสถานีชาร์จ โดยจากการออกแบบแผนการชาร์จที่เหมาะสมกับรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะได้ว่าจากแผนการชาร์จที่แตกต่างกัน 4 แบบทำให้

สามารถลดขนาดแบตเตอรี่จากกรณีที่ไม่มีการชาร์จประจุไฟฟ้า ขนาดแบตเตอรี่ที่ทำการวางแผนการชาร์จประจุไฟฟ้าสามารถลดลงได้กว่า 65-80% ซึ่งทำให้ประหยัดราคาค่าแบตเตอรี่ลงได้มากกว่า 40,000\$ ต่อรถโดยสาร 1 คัน และการลดน้ำหนักแบตเตอรี่ยังช่วยให้ประหยัดพลังงานขับเคลื่อนได้ประมาณ 7-8% ผลของการลดขนาดของแบตเตอรี่คาดว่าจะทำให้ลดค่า TCO ลง แต่เมื่อนำไปคำนวณกลับพบว่าแต่ละแผนการชาร์จ ค่า TCO ลดลงได้เพียงเล็กน้อยเพียงแค่ประมาณ 2% เท่านั้น ซึ่งเรียกได้ว่าค่า TCO ของแต่ละแผนการชาร์จไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถึงกระนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเพื่อขนาดแบตเตอรี่ จะพบว่าวิธีการเพื่อขนาดแบตเตอรี่ทำให้ TCO เพิ่มขึ้นถึง 7.4% จึงสรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเป็นแนวทางที่มีความคุ้มค่ามากกว่าถึง 10%

การวางแผนออกแบบระบบรถโดยสารนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเส้นทางอื่นซึ่งให้บริการจริงได้ โดยงานวิจัยนี้ได้ไปสำรวจระบบรถสองแถว สาย 1256 สะพานเฉลิมพันธ์ - วัดช่องลม ซึ่งให้บริการอยู่จริงในปัจจุบัน โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการออกแบบระบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำให้สามารถวางแผนการนำรถโดยสารไฟฟ้าไปวิ่งแทนรถสองแถวที่มีอยู่เดิมได้ โดยงานวิจัยได้ออกแบบตัวอย่างแผนการชาร์จแบบต่างๆ 5 แผนการ พบว่าผลที่ได้ออกมาในแนวทางเดียวกับเช่นเดียวกับระบบรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คือ ทุกแผนการชาร์จทำให้สามารถลดขนาดแบตเตอรี่ จากกรณีที่ไม่มีการชาร์จประจุไฟฟ้าลดลงได้กว่า 47-81% ค่า TCO จะลดลงประมาณ 2% และค่า TCO ก็ใกล้เคียงในทุกแผนการชาร์จประจุไฟฟ้า ทำให้สรุปได้ว่าการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสำหรับรถโดยสารระยะสั้น สามารถลดขนาดของแบตเตอรี่ลงได้ แต่ไม่มีความแตกต่างกันในแง่การลงทุน

แต่จากการศึกษาจะพบว่าด้วยการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว การใช้แบตเตอรี่ LTO จะมีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับรถโดยสารไฟฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่ LFP ที่ใช้ในปัจจุบันเพราะมี Cycle life ที่มากกว่า โดยผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ารถโดยสารไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ LTO ร่วมกับการชาร์จประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วสามารถลดค่า TCO ได้มากขึ้นเป็น 10-15% นอกจากนี้ยังมีการคำนึงถึงการคิดค่าไฟฟ้าในอัตรา TOU ซึ่งจะทำให้ระบบรถโดยสารที่มีการชาร์จอย่างรวดเร็วมีค่า TCO แ่ลง แต่ทำให้ระบบที่ไม่มีการชาร์จมีค่า TCO ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

1. *Solutions for Urban Transport*. [cited 2014 1 Nov]; Available from: <http://www.adb.org/news/infographics/solutions-urban-transport>.
2. Mikhail, C., et al., *Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals*. Environmental Research Letters, 2013. 8(1): p. 015041.
3. Man, T. *Car vs Public Transportation – The Great Student Dilemma*. 2011 [cited 2015 10/10]; Available from: <https://myuniversitymoney.com/car-vs-public-transportation-the-great-student-dilemma/>.
4. Andréasson, I., *Personal Rapid Transit as Feeder-Distributor to Rail*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012. 2275: p. 88-93.
5. Hu, Y., Q. Zhang, and W. Wang, *A Model Layout Region Optimization for Feeder Buses of Rail Transit*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012. 43: p. 773-780.
6. Salonen, M. and T. Toivonen, *Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport*. Journal of Transport Geography, 2013. 31: p. 143-153.
7. *Volvo Buses and ABB in electro mobility cooperation*. [cited 2014 OCT]; Available from: http://www.volvogroup.com/group/global/en-gb/_layouts/CWP.Internet.VolvoCom/NewsItem.aspx?News.ItemId=147818.
8. Ding, H., Z. Hu, and Y. Song, *Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station*. Applied Energy, 2015. 157: p. 630-639.
9. *E4E bus Specification*. Available from: <http://www.e4ethai.com/product.htm>.
10. Rothgang, S., et al., *Battery Design for Successful Electrification in Public Transport*. Energies, 2015. 8(7): p. 6715.
11. Anseán, D., et al., *Fast charging technique for high power lithium iron phosphate batteries: A cycle life analysis*. Journal of Power Sources, 2013. 239: p. 9-15.

12. Baronti, F., et al. *Implementation of the fast charging concept for electric local public transport: The case-study of a minibus*. in 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2015.
13. Rezvanizani, S.M., et al., *Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility*. Journal of Power Sources, 2014. 256: p. 110-124.
14. Schuster, E., et al., *Thermal behavior and electrochemical heat generation in a commercial 40 Ah lithium ion pouch cell*. Journal of Power Sources, 2015. 286: p. 580-589.
15. Putra, N., B. Ariantara, and R.A. Pamungkas, *Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application*. Applied Thermal Engineering, 2016. 99: p. 784-789.
16. Yang, X.-H., S.-C. Tan, and J. Liu, *Thermal management of Li-ion battery with liquid metal*. Energy Conversion and Management, 2016. 117: p. 577-585.
17. Zhao, R., et al., *A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system*. Journal of Power Sources, 2015. 299: p. 557-577.
18. Baronti, F., et al. *Implementation of the fast charging concept for electric local public transport: The case-study of a minibus*. in Industrial Informatics (INDIN), 2015 IEEE 13th International Conference on. 2015.
19. 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.
20. Alexander Kunith, D.G., Roman Mendeleevitch, *Planning and optimization of a fast-charging infrastructure for electric urban bus systems*, in International Conference on Traffic and Transport Engineering. 2014: Belgrade, Serbia.
21. Zhang, T., et al., *Charging Scheduling of Electric Vehicles With Local Renewable Energy Under Uncertain Electric Vehicle Arrival and Grid Power Price*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014. 63(6): p. 2600-2612.
22. 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.
23. Pihlatie, M., et al. *Fully electric city buses - The viable option*. in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International*. 2014.
 24. 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.
 25. Chao, Z. and C. Xiaohong, *Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging: Model and Case Study*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013. 96: p. 2725-2736.
 26. Sarker, M.R., et al. *Electric vehicle battery swapping station: Business case and optimization model*. in *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*. 2013.
 27. Rogge, M., S. Rothgang, and D.U. Sauer. *Operating Strategies for a Range Extender Used in Battery Electric Vehicles*. in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2013 IEEE*. 2013.
 28. Imai, K., et al., *Theoretical Performance of EV Range Extender Compared with Plugin Hybrid*. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 2008. 6(2): p. 1181-1184.
 29. Koji, I., et al. *EV range extender: Better mileage than plug-in hybrid?* in *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2008.
 30. Ribau, J., et al., *Analysis of four-stroke, Wankel, and microturbine based range extenders for electric vehicles*. *Energy Conversion and Management*, 2012. 58: p. 120-133.
 31. Georgy, J., A. Noureldin, and C. Goodall, *Vehicle navigator using a mixture particle filter for inertial sensors/odometer/map data/GPS integration*. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012. 58(2): p. 544-552.
 32. Skog, I. and P. Handel, *In-Car Positioning and Navigation Technologies; A Survey*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009. 10(1): p. 4-21.
 33. Chaiyamanon, C., *DYNAMIC MODELING OF ELECTRIC VEHICLE FOR PREDICTING ENERGY CONSUMPTION*. 2013, Chulalongkorn University.

34. Sinhuber, P., W. Rohlf, and D.U. Sauer. *Study on power and energy demand for sizing the energy storage systems for electrified local public transport buses*. in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2012 IEEE*. 2012.
35. Tremblay, O., L.A. Dessaint, and A.I. Dekkiche. *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles*. in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2007.
36. Denis, N., et al. *Range prediction for a three-wheel plug-in hybrid electric vehicle*. in *2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2012.
37. Abousleiman, R. and O. Rawashdeh, *Electric vehicle modelling and energy-efficient routing using particle swarm optimisation*. *IET Intelligent Transport Systems*, 2016. 10(2): p. 65-72.
38. Thomas, W. *Electric buses at Stanford*. in *California Higher Education Sustainability Conference (CHESC)*. 2015
39. Duarte, G.O., et al., *Establishing bonds between vehicle certification data and real-world vehicle fuel consumption – A Vehicle Specific Power approach*. *Energy Conversion and Management*, 2015. 92: p. 251-265.
40. Zhai, H., H. Christopher Frey, and N.M. Rouphail, *Development of a modal emissions model for a hybrid electric vehicle*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011. 16(6): p. 444-450.
41. Duarte, G.O., et al., *Effect of battery state of charge on fuel use and pollutant emissions of a full hybrid electric light duty vehicle*. *Journal of Power Sources*, 2014. 246: p. 377-386.
42. Jimenez, J., *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TII*. *DAS remote sensing*, 1999.
43. Cells, F. and H.J. Undertaking, *Urban buses: Alternative powertrains for Europe*. 2012, Fact-based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen fuel cell, trolley and battery electric powertrains.
44. Kanticha K., a.A.S., *Improvement of Electric Shuttle Bus Operation using Discrete Event Simulation and Supercapacitor Hybrid*, in *ESIT*. 2014: Thailand.

45. *Opbrid BUsbaar demonstrates ultra-fast charging at 625 Amps; pathway to 2-3 minutes bus charging.* [cited 2014 Nov.]; Available from: <http://www.greencarcongress.com/2014/04/20140415-opbird.html>
46. Communications, A., *Large-capacity, flash-charging, battery-powered pilot bus takes to the street.* ABB Communications.
47. Industrietechnik, S.B.-u. *Current collectors for electric busses.* [cited 2014 Nov]; Available from: <http://www.schunk-sbi.com/en/sbi/ElektrobusStromabnehmer/schunk01.c.78265.en>.
48. Opbrid. *Opbrid Busbaar Curbside Opportunity Charging Stations.* [cited 2014 Nov.]; Available from: <http://opbrid.info/curbside>.
49. TOSA2013. [cited 2014 OCT]; Available from: <http://www.tosa2013.com/>.
50. *Opbrid.* [cited 2014 Oct.]; Available from: <http://opbrid.info/>.
51. *Proterra.* [cited 2015 Nov.]; Available from: <http://www.proterra.com/advantages/overview>.
52. *ABB launches automated fast charging system for electric buses at Busworld 2015.* [cited 2014 Nov.]; Available from: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/79839e570a6765ddc1257edf00521b75.aspx>
53. *10 years of electric buses with IPT® Charge.* 2012 [cited 2014 Nov.]; Available from: <http://www.conductix.com/en/news/2012-05-31/10-years-electric-buses-iptr-charge>.
54. *Bombardier primove to provide wireless charging and battery technology to Berlin.* 2015 March 18, 2015; Available from: <http://www.bombardier.com/en/sustainability/sustainability-news/details.bombardier-transportation20150318ebusberlinabsommerfaehrtuelini.bombardiercom.sustainability.html>.
55. Lajunen, A. and T. Lipman, *Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses.* Energy, 2016. 106: p. 329-342.
56. Vogel, S. *One goal, two approaches: Electric Buses in China and Germany.* 2015 [cited 2015 September 8]; Available from:

<http://sustainabletransport.org/one-goal-two-approaches-electric-buses-in-china-and-germany/>.

57. Board, T.R. and N.R. Council, *Modeling Mobile-Source Emissions*. 2000, Washington, DC: The National Academies Press. 258.
58. Board, T.R. and N.R. Council, *Evaluating Vehicle Emissions Inspection and Maintenance Programs*. 2001, Washington, DC: The National Academies Press. 260.
59. Zhai, H., H.C. Frey, and N.M. Rouphail, *A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses*. *Environmental Science & Technology*, 2008. 42(21): p. 7985-7991.
60. Vetter, J., et al., *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, 2005. 147(1–2): p. 269-281.
61. Figliozzi, M.A., et al., *A Study of headway maintenance for bus routes: Causes and effects of “bus bunching” in extensive and congested service areas*. 2012.
62. Orcutt, M. *The Tesla Model 3 May Depend on This Battery Breakthrough*. 2016; Available from: <https://www.technologyreview.com/s/601178/the-tesla-model-3-may-depend-on-this-battery-breakthrough/>.
63. นิลประพันธ์, น., การวิเคราะห์ความอ่อนไหวในต้นทุนการเป็นเจ้าของสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าระยะสั้นที่มีชนิดของแหล่งเก็บพลังงานที่แตกต่างกัน, in *ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล*. 2015, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
64. Bedell, R., *A Practical, 70-90% Electric Bus without Overhead Wires*. EVS24, Stavanger, Norway, 2009.
65. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. อัตราค่าไฟฟ้า. 2011; Available from: <https://www.pea.co.th/wiki/Documents/Rate2011.pdf>.
66. เปลี่ยนทิศ, ล. รถยนต์ไฟฟ้าไทยแจ้งเกิด ลดภาษีนำเข้าเหลือ 0%. 2016 [cited 2016; Available from: <http://www.thairath.co.th/content/669751>.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ขั้นตอนวิธีการใช้แบบจำลอง

1. เริ่มต้นที่ sheet1 ใส่ข้อมูล input ต่างๆในช่องสีเทา ■ โดยในหน้าจอใส่ข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- การใช้พลังงาน

ส่วนของการใช้พลังงานเป็นดังรูปที่ 44 จะสามารถใส่ค่าการใช้พลังงานที่แตกต่างกันได้ 4 รูปแบบ a1, a2, a3, a4 โดยข้อมูลที่ต้องใส่ประกอบไปด้วย พลังงานขับเคลื่อน (Wh/รอบ) พลังงานแอร์ (Wh/ชั่วโมง) ระยะทางต่อรอบ (km.) และเวลาต่อรอบ (นาที/รอบ) จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณพลังงานขับเคลื่อน (Wh/km.) พลังงานแอร์ (Wh/รอบ) แล้วรวมเป็นพลังงานที่ใช้ต่อรอบ (Wh/รอบ) และ (Wh/km.) แสดงในช่องสีแดง ■ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

การใช้พลังงาน

| a1 | |
|------------------------------|--------|
| พลังงานขับเคลื่อน (Wh/รอบ) | 2067 |
| พลังงานแอร์ (Wh/ชั่วโมง) | 5000 |
| ระยะทางต่อรอบ (km.) | 4 |
| เวลาต่อรอบ (นาที/รอบ) | 21 |
| พลังงานขับเคลื่อน (Wh/km.) | 516.75 |
| พลังงานแอร์ (Wh/รอบ) | 1750 |
| พลังงานที่ใช้ต่อรอบ (Wh/รอบ) | 3817 |
| พลังงานที่ใช้ต่อรอบ (Wh/km.) | 954.25 |

รูปที่ 44 การใส่ข้อมูลการใช้พลังงาน

- การชาร์จพลังงาน

ส่วนของการชาร์จพลังงานจะสามารถใส่ค่าการชาร์จพลังงานดังรูปที่ 45 โดยเลือกจาก C-rate การชาร์จ หรือ กำลังการชาร์จ (kW) ได้ โดยกดเลือกที่กรอบสีแดง โดยสามารถใส่ค่าการใช้พลังงานที่แตกต่างกันได้ 3 รูปแบบ b1, b2, b3 ข้อมูลที่ต้องใส่ประกอบไปด้วย C-rate หรือ กำลังการชาร์จ(kw) และเวลาการชาร์จ (นาที/รอบ) จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณกำลังการชาร์จ (kW) หรือ C-rate กระแสการชาร์จ (Amp) และพลังงานที่ได้การชาร์จ (Wh) แสดงในช่องสีเหลือง ■ เพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

| การชาร์จประจุไฟฟ้า | |
|-------------------------------|-----------|
| b1 | |
| C-rate | 1 |
| เวลาการชาร์จ(นาที/รอบ) | 5 |
| กำลังการชาร์จ(kW) | 41.840391 |
| กระแสการชาร์จ (Amp) | 119.54397 |
| พลังงานที่ได้จากการชาร์จ (Wh) | 3138.0293 |

รูปที่ 45 การใส่ข้อมูลการชาร์จประจุไฟฟ้า

- คุณลักษณะของแบตเตอรี่ (Battery Specification) และสถานีชาร์จ

ส่วนของคุณลักษณะของแบตเตอรี่ ต้องทำการศึกษาจากแบตเตอรี่ที่จะนำมาใช้ว่ามีคุณลักษณะอย่างไรบ้าง แล้วจึงทำการใส่ข้อมูล Nominal Voltage, Pack Voltage, Charging Voltage แล้วโปรแกรมจะแสดงจำนวนของเซลล์แบตเตอรี่ที่ต้องใช้ และใส่ข้อมูลราคาแบตเตอรี่ (\$/kWh) พื้นที่ของแบตเตอรี่ (m^3/kWh) และความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ (Wh/kg.) และในส่วนของสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า ต้องทำการใส่ข้อมูล ประสิทธิภาพการชาร์จ กำลังการชาร์จสูงสุด และราคาสถานีชาร์จ ดังรูปที่ 46

| แบตเตอรี่ และสถานีชาร์จ | |
|-----------------------------------|-----------|
| Battery Specification | |
| Nominal Voltage | 3.2 |
| Pack Voltage | 307 |
| Charging Voltage | 350 |
| Number of cell in series | 96 |
| ราคาแบตเตอรี่ (\$/kWh) | 300 |
| พื้นที่ของแบตเตอรี่ (m^3/kWh) | 0.00602 |
| ความหนาแน่นพลังงาน (Wh/kg) | 94.117647 |
| Charging station | |
| Charging efficiency | 0.9 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$/kW) | 200 |
| จำนวนสถานีชาร์จ | 1 |
| กำลังการชาร์จสูงสุด(kW) | 42 |

รูปที่ 46 การใส่ข้อมูลคุณลักษณะของแบตเตอรี่ และสถานีชาร์จประจุไฟฟ้า

- อื่นๆ

ข้อมูลอื่นๆ ได้แก่ ตัวแปร Safety factor และตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการเพื่อเพื่อขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ให้เหมาะสม รวมถึง Depth of discharge (DOD) ที่ใช้ และกำหนดเวลาเริ่มให้บริการ ดังรูปที่ 47

| | |
|--------------|---------|
| age factor | 1 |
| other factor | 1 |
| DOD | 0.8 |
| เวลาเริ่ม | 7:00 AM |

รูปที่ 47 การใส่ข้อมูลอื่นๆ

2. ใน sheet4 กำหนดการใช้พลังงาน และการชาร์จพลังงานเรียงตามลำดับที่รถโดยสารใช้งานในแต่ละวัน โดยใส่ลงในตารางหลัก A สำหรับการใส่พลังงานให้ใส่ a1, a2, a3 หรือ a4 และสำหรับการชาร์จพลังงานให้ใส่ b1, b2 หรือ b3 ตามที่ได้กำหนดไว้ก่อนหน้า

3. กลับมาที่ sheet1 เพื่อดูผลการคำนวณ ทำการปรับค่าในส่วนของ calculation ดังรูปที่ 48 ในช่องสีเทาให้มากกว่าและใกล้เคียงช่องสีเขียวในบรรทัดถัดไปให้มากที่สุด โดยในช่องสีเขียวจะแสดงขนาดแบตเตอรี่ที่น้อยที่สุดที่สามารถให้พลังงานได้เพียงพอ แต่เนื่องจากการคำนวณต้องมีการทำซ้ำค่าในช่องสีเขียวจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ผู้ใช้จึงต้องพยายามปรับเพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยบรรทัดล่างสุดจะช่วยเป็นแนวทางในการปรับขนาดให้ใกล้เคียงขึ้น

| Calculation | |
|--------------------|-----------|
| ขนาดแบตเตอรี่ (Wh) | 36700 |
| ขนาดแบตเตอรี่ (Wh) | 36638.75 |
| | 36669.375 |

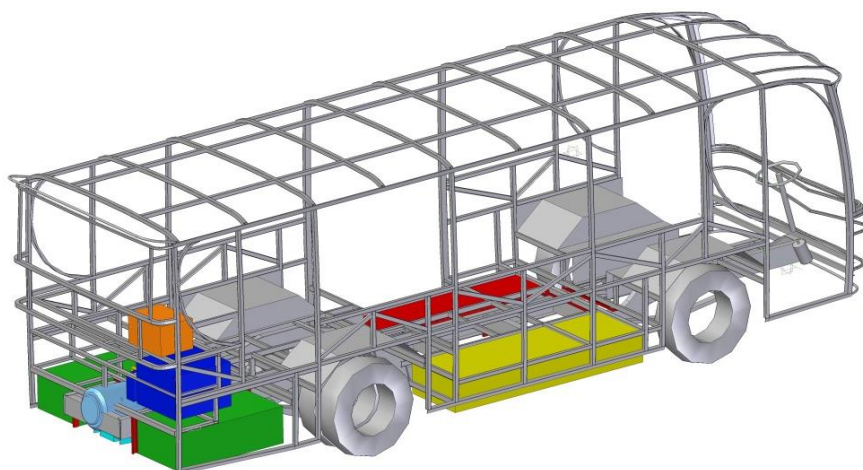
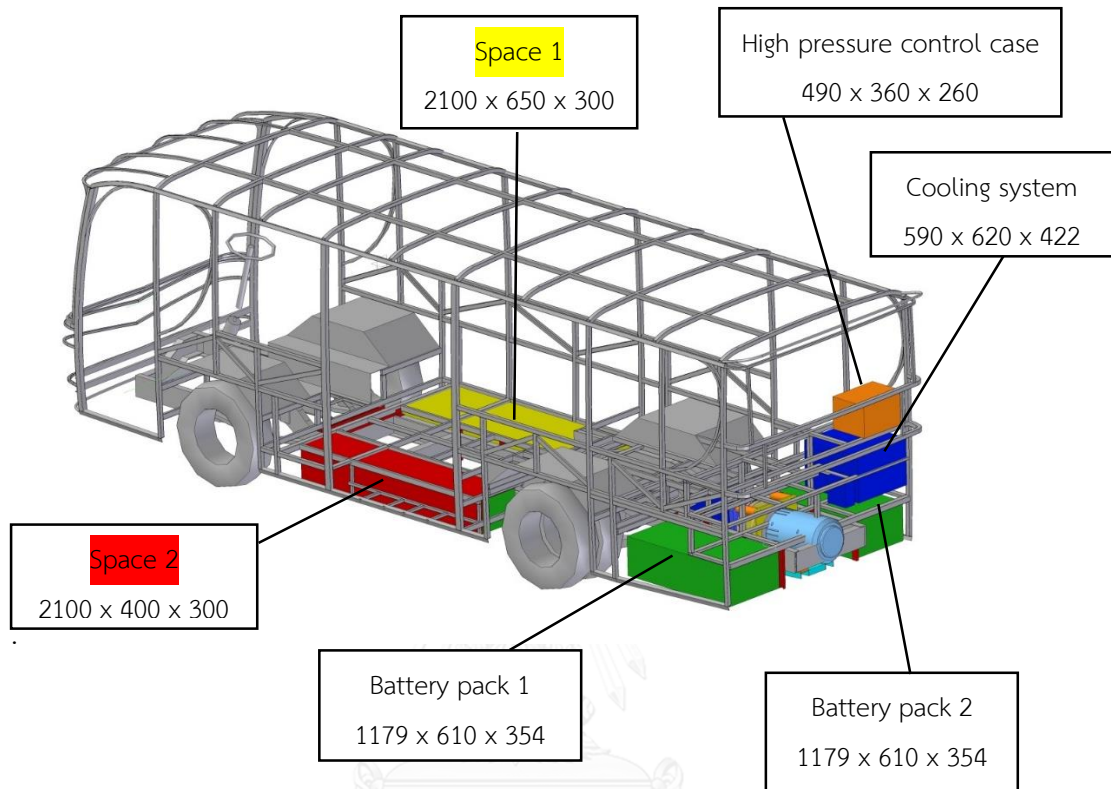
รูปที่ 48 การใช้โปรแกรมส่วน Calculation

4. ผลลัพธ์ที่ได้แสดงจะดังรูปที่ 49 ซึ่งจะทำการคำนวณผลลัพธ์ทั้งหมดของระบบแบตเตอรี่ทั้งในกรณีที่มีการชาร์จในแบบที่กำหนด และในกรณีที่ไม่มีการชาร์จ โดยผลลัพธ์ทั้งหมดได้แก่ ขนาดแบตเตอรี่ ราคาแบตเตอรี่ ปริมาตรของแบตเตอรี่ น้ำหนักแบตเตอรี่ และราคาสถานีชาร์จ ระยะทางต่อวัน พลังงานที่ใช้ต่อวัน พลังงานที่ชาร์จต่อวัน และเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างสองกรณีดังกล่าวในช่องประหยัด

| ผลลัพธ์ | | |
|---------------------------------------|----------|--------|
| No Charge Bus | | |
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 103.71 | |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 337.8176 | |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 31113 | |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.624334 | |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 1101.919 | |
| Plan | | |
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 36.7 | |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 119.544 | |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 11010 | |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.220934 | |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 389.9375 | |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 8400 | |
| ระยะทางต่อวัน (km.) | 80 | |
| พลังงานที่ใช้ต่อวัน (kWh) | 82.968 | |
| พลังงานที่ชาร์จต่อวัน (kWh) | 53.657 | |
| ประหยัด | | |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 20103 | 64.61% |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.4034 | 64.61% |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 711.9813 | 64.61% |
| พลังงานขับเคลื่อน(Wh/km) | 34.86572 | 6.75% |

รูปที่ 49 การแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบ

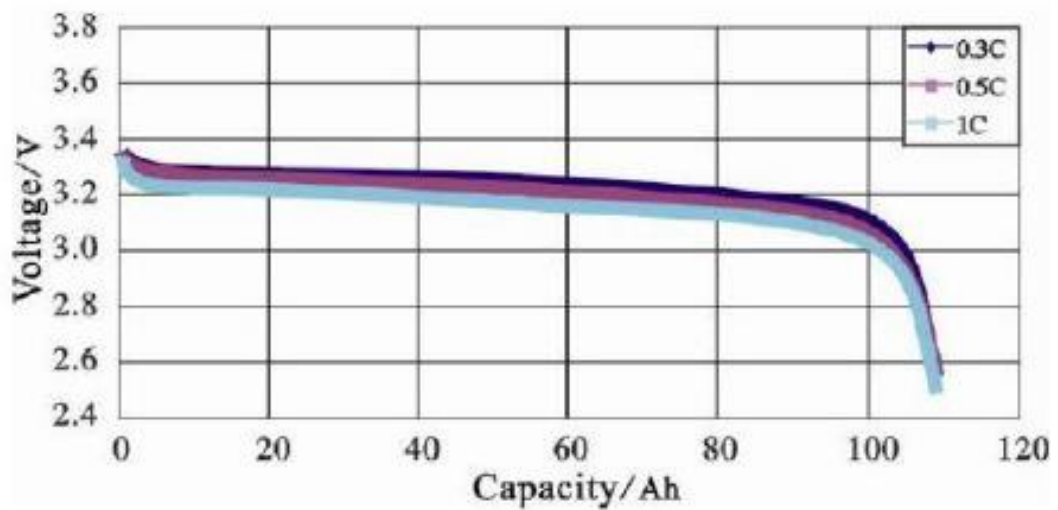
ภาคผนวก ข พื้นที่จัดวางแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค คุณสมบัติแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถโดยสารจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



discharging curve :



| No | Item | | Parameter Specification |
|----|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1 | Nominal Capacity | | 100Ah@ 0.3C Discharging |
| 2 | Minimum Capacity | | 100Ah@ 0.3C Discharging |
| 3 | Nominal Voltage | | 3.2 V |
| 4 | Internal Resistance | | $\leq 0.9m\Omega$ |
| 5 | Charging(CC-CV) | Maximum Charging Current | 1C |
| | | Charging Upper Limit Voltage | 3.65V |
| 6 | Discharging | Maximum Discharging Current | 2C |
| | | Discharging Cut-off Voltage | 2.5V |
| 7 | Charging Time | Standard Charging | 4h |
| | | Quick-acting Charging | 1h |
| 8 | Recommended SOC Usage Window | SOC ; 10%~90% | |
| 9 | Operation Thermal Ambient | Charging | 0°C ~ 45°C |
| | | Discharging | -20°C ~ 55°C |
| 10 | Storage Thermal Ambient | Short-term (within 1 month) | -20°C ~ 45°C |
| | | Long term (within 1 year) | -20°C ~ 20°C |
| 11 | Storage Humidity | | < 70 % |
| 12 | Battery Weight | | Around 3.4kg |
| 13 | Shell Material | | Plastic |

ภาคผนวก ง ผลลัพธ์จากการวางแผนระบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| No Charging Bus | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 104 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 338 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 62226 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.624 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 1102 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 12.5 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 40.71 |

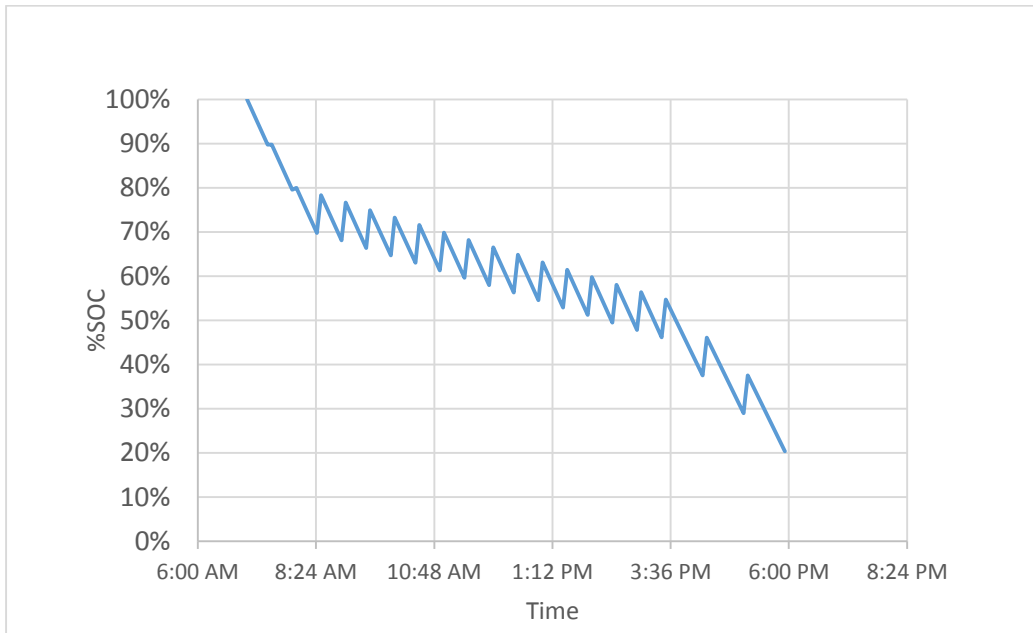
ผลการออกแบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์ ในกรณีไม่มีการชาร์จระหว่างวัน

| Oversizing Bus | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 141.6 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 461 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 84975 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.853 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 1505 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 12.5 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 43.71 |

ผลการออกแบบรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์ ในกรณีไม่มีการชาร์จระหว่างวัน

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แผนที่ 1

แผนการชาร์จจะทำการชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง



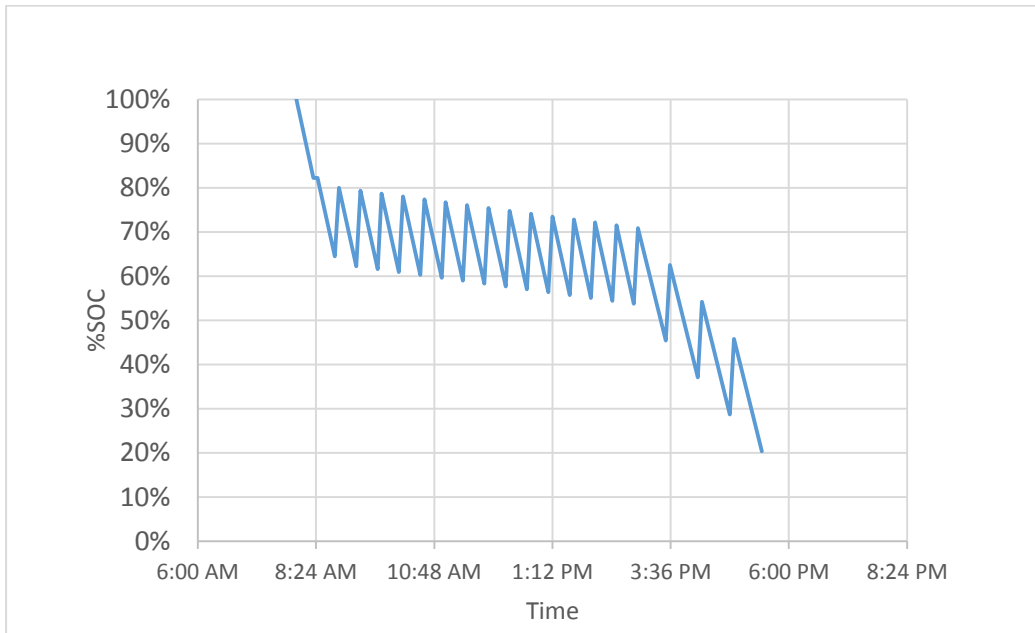
รูปที่ ง.1 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 1

| Plan 1 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 36.7 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 120 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 22020 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.221 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 390 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 4.4 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 8400 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 40.12 |

ตารางที่ ง.1 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 1

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2

แผนการชาร์จจะทำการชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง



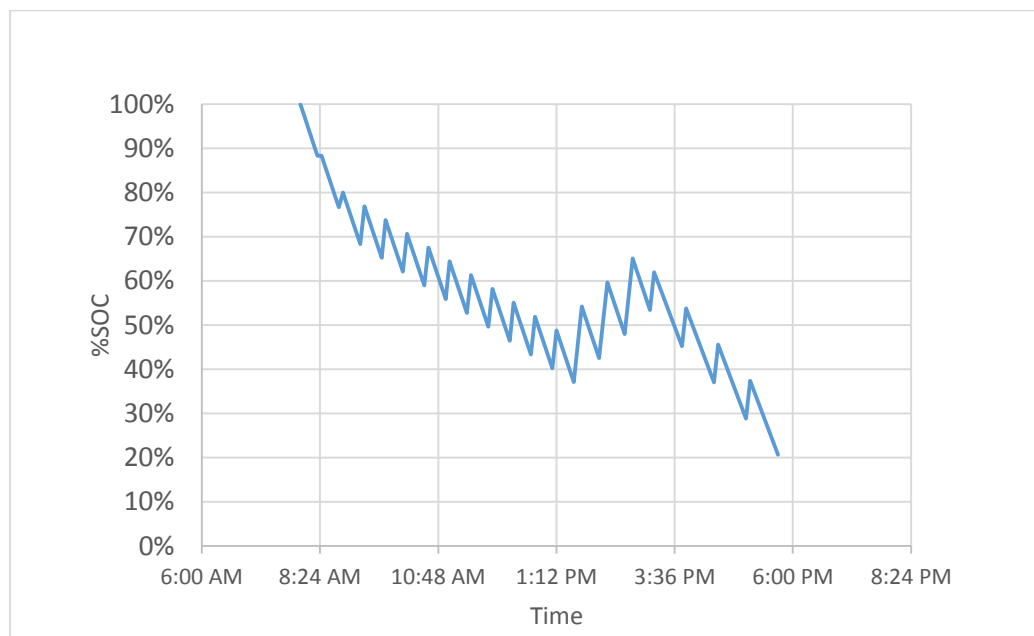
รูปที่ ง.2 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2

| Plan 2 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 21.5 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 70 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 12900 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.129 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 228 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 2.6 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 10000 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 39.98 |

ตารางที่ ง.2 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 2

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3

ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง และชาร์จ 1 C เป็นเวลา 10 นาทีในช่วงบ่าย



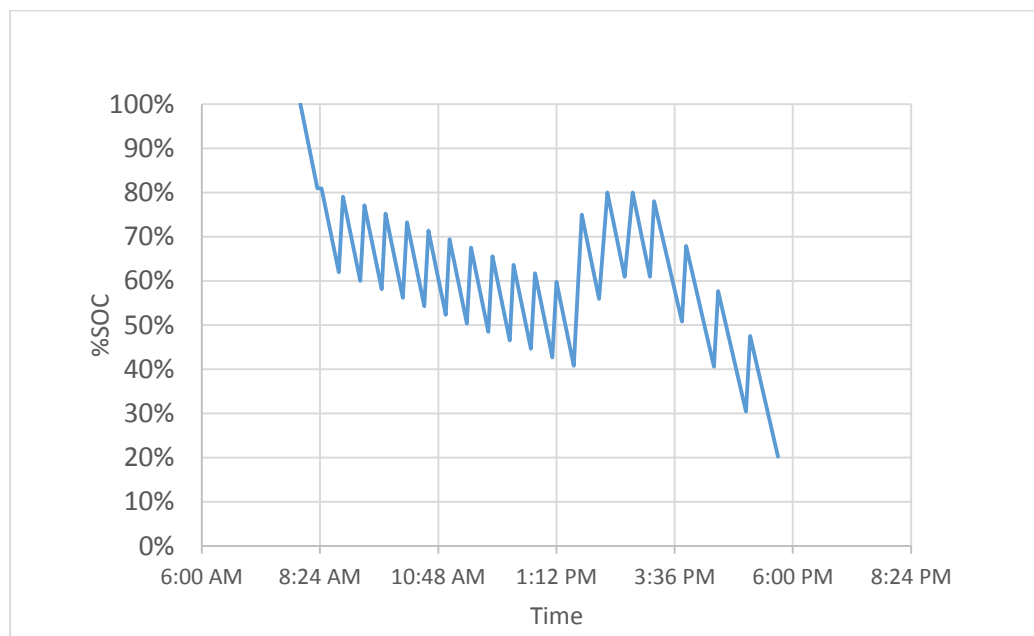
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3

| Plan 3 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 32.7 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 107 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 19620 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.197 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 347 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 3.9 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 7600 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 40.05 |

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 3

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4

ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทาง และชาร์จ 2 C เป็นเวลา 10 นาทีในช่วงบ่าย



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4

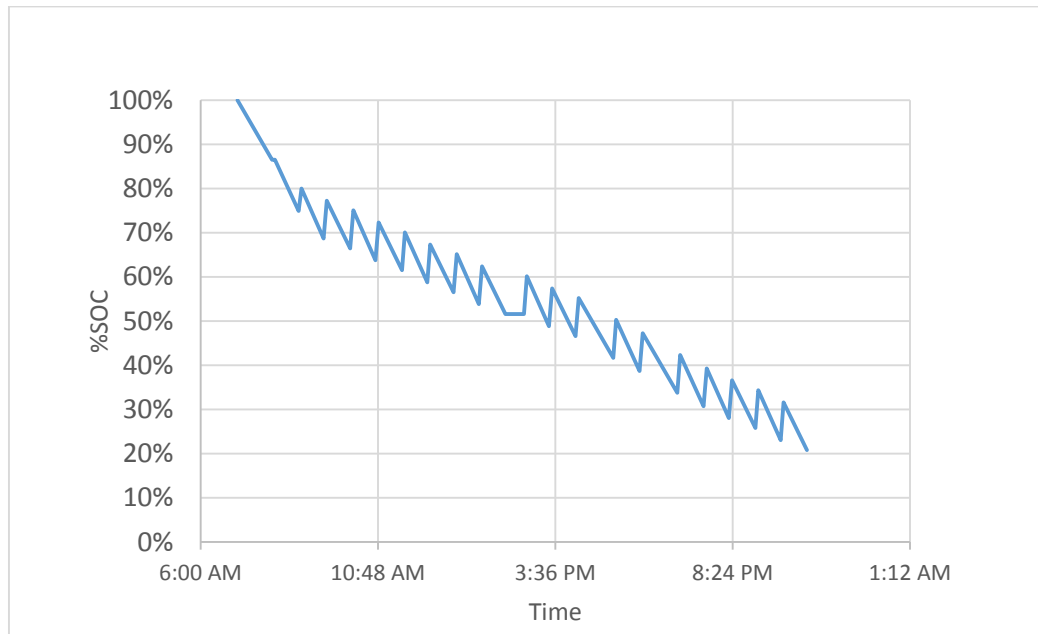
| Plan 4 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 20.1 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 65 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 12036 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.120 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 213 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 2.4 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 9200 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 39.91 |

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าภายในจุฬาฯ แบบที่ 4

ภาคผนวก จ ผลลัพธ์จากการวางแผนระบบรถโดยสารสาย 1256

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1

ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง



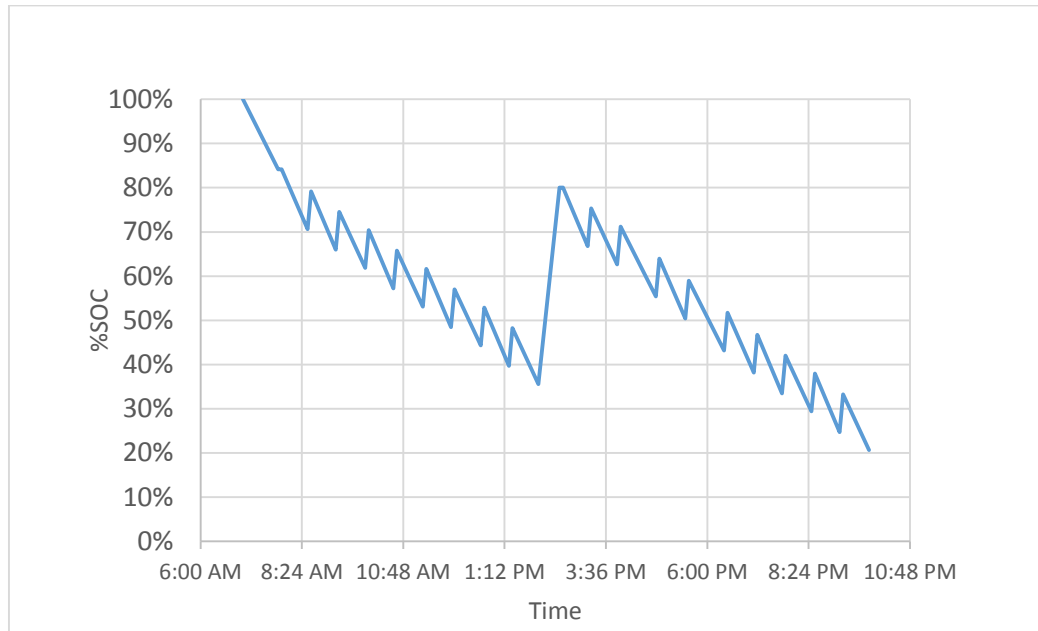
รูปที่ จ.1 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1

| Plan 1 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 34 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 110 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 20400 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.205 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 361 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 4.4 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 7800 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.40 |

ตารางที่ จ.2 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 1

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2

ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง และมีการชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C 30 นาที ในช่วงพักกลางวัน



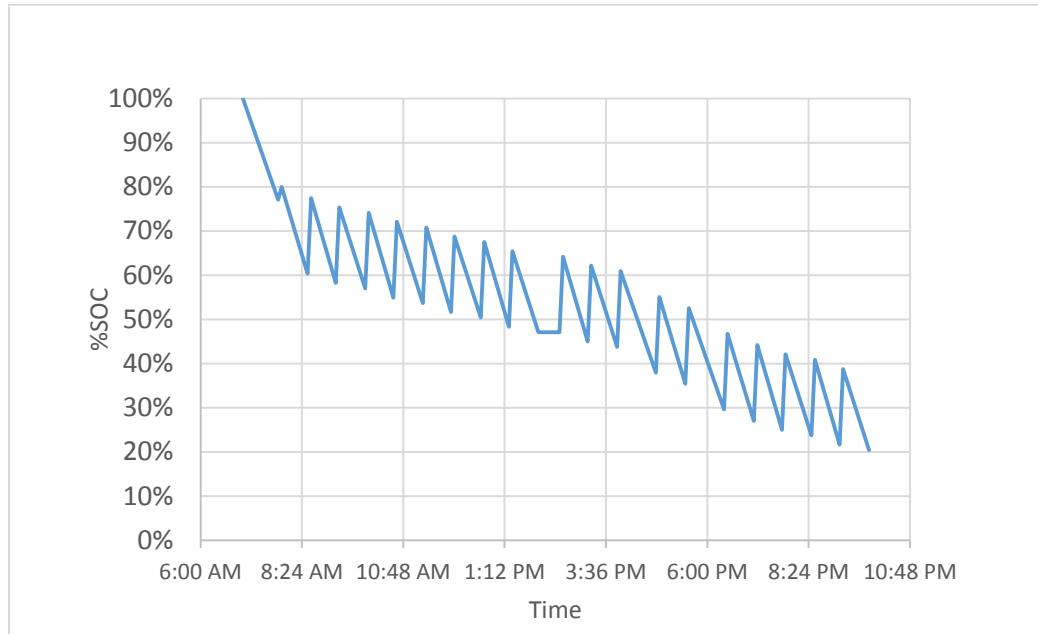
รูปที่ จ.2 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2

| Plan 2 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 29 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 95 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 17400 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.175 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 308 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 3.7 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 6800 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.35 |

ตารางที่ จ.2 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 2

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3

ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทาง และสถานีปลายทาง



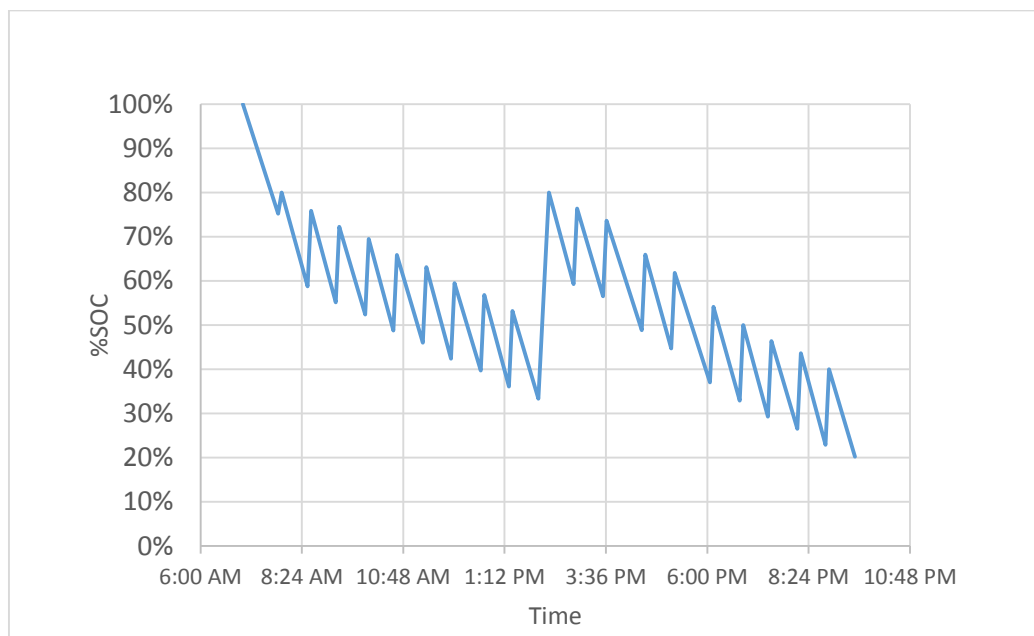
รูปที่ จ.3 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3

| Plan 3 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 20 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 65 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 12000 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.120 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 212.5 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 2.6 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 9200 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.32 |

ตารางที่ จ.3 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 3

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4

ชาร์จประจุไฟฟ้า 2 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีต้นทางและสถานีปลายทาง และมีการชาร์จ 2 C 15 นาที ในช่วงพักกลางวัน



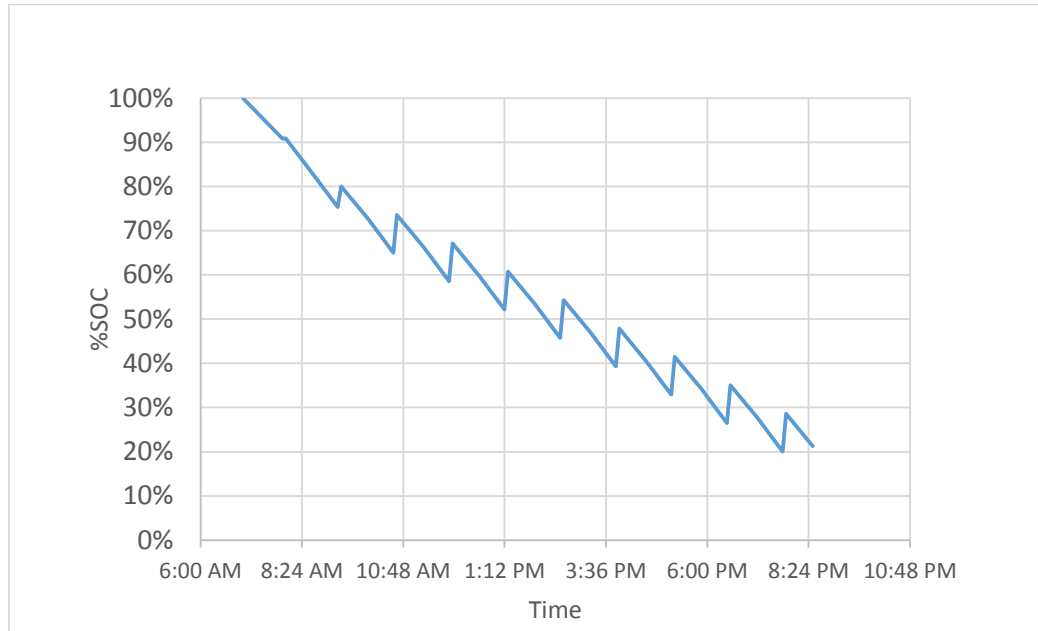
รูปที่ จ.4 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4

| Plan 4 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 18.5 |
| ขนาดแบตเตอรี่(Ah) | 60 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 11100 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.111 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 196.6 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 2.4 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 8600 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.30 |

ตารางที่ จ.4 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 4

แผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้า สาย 1256 แบบที่ 5

ชาร์จประจุไฟฟ้า 1 C เป็นเวลา 5 นาที ทุกครั้งที่เข้าสถานีปลายทางฝั่งเดียว (เฉพาะสถานีวัดช่องลม)



รูปที่ จ.5 การเปลี่ยนแปลง SOC ของแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 5

| Plan 5 | |
|---------------------------------------|-------|
| ขนาดแบตเตอรี่(kWh) | 50.1 |
| ขนาดแบตเตอรี่ (Ah) | 163 |
| ราคาแบตเตอรี่(\$) | 30060 |
| ปริมาตรของแบตเตอรี่ (m ³) | 0.30 |
| น้ำหนักแบตเตอรี่ (kg) | 532 |
| อายุการใช้งาน(ปี) | 6.6 |
| ราคาสถานีชาร์จ(\$) | 11600 |
| TCO (บาท/กิโลเมตร) | 21.40 |

ตารางที่ จ.5 ผลลัพธ์การออกแบบตามแผนการชาร์จรถโดยสารไฟฟ้าสาย 1256 แบบที่ 5

ภาคผนวก ฉ การหา S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า

จากบทที่ 3.2.2 ในงานวิจัยนี้ ค่า S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าจะส่งผลถึง S.D. ของช่วงห่างเวลาการปล่อยรถ ซึ่งแสดงถึงความเที่ยงตรง (reliability) ของระบบรถโดยสาร โดยค่า S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้านี้จะประมาณจากความสัมพันธ์ของอัตราการชาร์จ และอัตราการใช้พลังงาน โดยเริ่มต้นจากหาอัตราการใช้พลังงานต่อนาที ซึ่งในส่วนนี้จะได้สัมพันธ์กันโดยตรงจึงต้องใช้อาศัยความสัมพันธ์จากการเก็บข้อมูลทางสถิติ โดยในกรณีของรถโดยสารภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จะได้ว่า อัตราการใช้พลังงาน คือ 0.16 kWh/นาที จากนั้นนำมาหาอัตราส่วนอัตราการใช้พลังงานต่ออัตราการชาร์จตั้งสมการที่ 7 โดยในกรณีกำลังการชาร์จ 50 kW จะได้อัตราการใช้พลังงาน 0.75 kWh/นาที ทำให้ได้อัตราส่วนนี้ เท่ากับ 4.69 ซึ่งหมายความว่า รถติดมากกว่าเดิม 4.69 นาที จะต้องใช้เวลาการชาร์จประจุไฟฟ้าเพิ่ม 1 นาที

$$\text{อัตราส่วนเวลาชาร์จต่อเวลารถติด} = \frac{\text{อัตราการชาร์จต่อนาที}}{\text{อัตราการใช้พลังงานต่อนาที}} \quad (7)$$

จากนั้นอัตราส่วนดังกล่าวนำมาคำนวณ S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า จาก S.D. ของเวลาในการวิ่ง ตั้งสมการที่ 8 ซึ่งในกรณีนี้ S.D. ของเวลาในการวิ่งเท่ากับ 7.94 นาที จึงนำค่า 7.94หารด้วยอัตราส่วน 4.69 จะได้เป็น S.D. ของเวลาการชาร์จประจุไฟฟ้า เท่ากับ 1.69 นาที

$$S.D. \text{ ของเวลาการชาร์จ} = \frac{S.D. \text{ ของเวลาการวิ่ง}}{\text{อัตราส่วนเวลาชาร์จต่อเวลารถติด}} \quad (8)$$

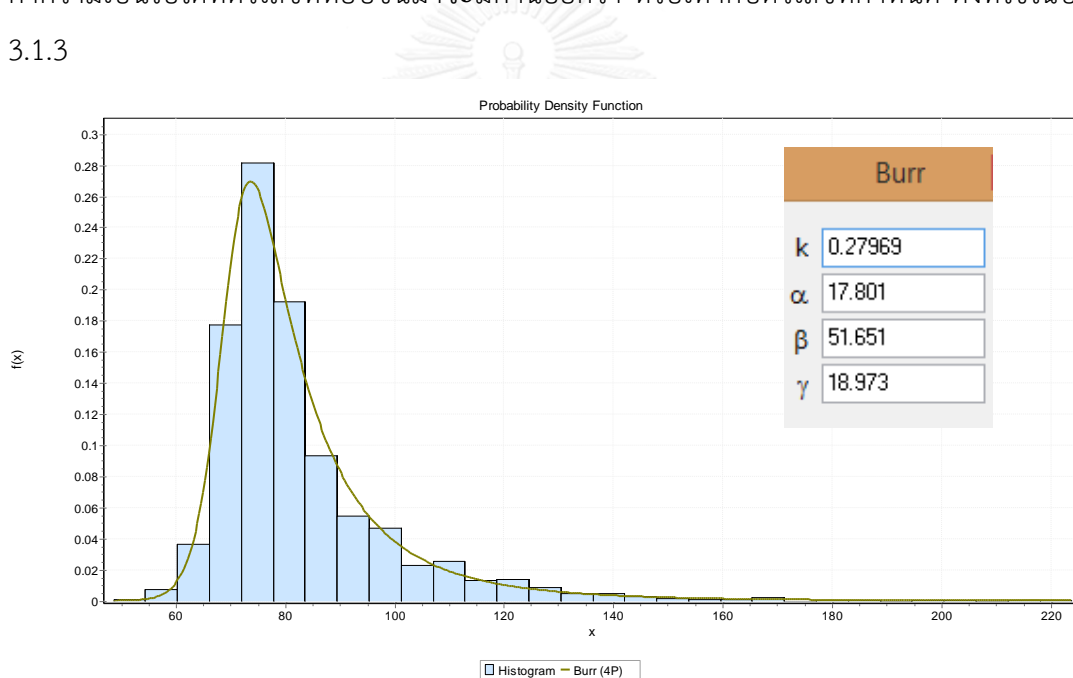
ภาคผนวก ข คุณสมบัติแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต



| Model name | LY-LTO-40AH |
|---|---|
| Nominal voltage (V) | 2.40 V |
| Nominal capacity (Ah) | 40 Ah |
| Minimal capacity (Ah) | 36.00 Ah |
| Max voltage per cell (V) | 2.80 V |
| Balancing voltage per cell (V) | 2.75 V |
| Discharge voltage (V) | 1.85V |
| Minimal voltage per cell (V) | 1.50 V |
| Operating voltage (V) | 1.85 V to 2.75 V |
| Optimal discharge current (Amp) | < 40 A (1C) |
| Maximal discharge current (Amp) | < 600 A (15C) |
| Max peak discharge current (Amp) | < 800 A (20C, < 10 seconds) |
| Optimal charge current (Amp) | < 40 A (1C) |
| Maximal charge current (Amp) | < 240 A (6C) |
| Internal resistance (mOhm) | < 1 mOhm |
| Cycle life (80% DOD at 20°C, at 0.5C charge) | > 10 000 cycles at 3C discharge > 20 000 cycles at 1C discharge > 50 000 cycles at 0.5C discharge |
| Self discharge rate (% per month) | < 3% |
| Operating temperature (charging) | -15°C to +45 °C |
| Operating temperature (discharging) | -25 °C to +55 °C |
| Temperature / Capacity | 25 °C = 100% 0 °C > 80% -10 °C > 70% -20 °C > 60% |
| Dimensions - width x length x thick (mm) | 235 x 135 x 29 mm |
| Weight (tolerance +/- 10g) | > 1880 g |

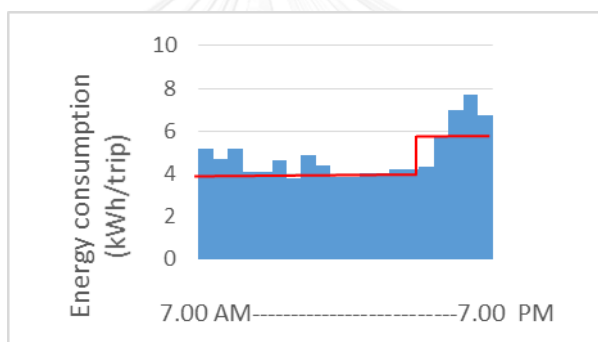
ภาคผนวก ฅ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยได้นำข้อมูล 1596 รอบมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยจากข้อมูลพลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบ มาคูณด้วย 20 รอบเพื่อเป็นอัตราการใช้พลังงานต่อวัน จากนั้นจึงมาสร้างกราฟการกระจายด้วยข้อมูลดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม Easyfit ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ว่าข้อมูลที่กำหนดให้มีลักษณะการกระจายเป็นแบบใด โดยโปรแกรมจะมีการตรวจสอบลักษณะการกระจาย ด้วยวิธีการ 3 วิธี ได้แก่ 1. Kolmogorov-Smirnov 2. Anderson-Darling 3. Chi-Squared ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะได้ว่า ข้อมูลที่ได้มีลักษณะการกระจายแบบ Burr การกระจายแบบ Burr ถูกเรียกว่าเป็นลักษณะทั่วไปของการกระจายแบบ log-logistic หลังจากนั้นโปรแกรมจะสามารถสร้างเป็นกราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม หรือ CDF (Cumulative Distribution Function) ซึ่งใช้อธิบายค่าความเป็นไปได้ที่ตัวเลขที่หยิบขึ้นมาจะมีค่าน้อยกว่า หรือเท่ากับตัวเลขที่กำหนด ดังที่ใช้ในบทที่ 3.1.3



ภาคผนวก ญ การกระจายสภาพการจราจรในระหว่างวัน

ในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ มีการเก็บข้อมูลเพื่อใช้อธิบายสภาพการจราจร โดยการแบ่งข้อมูลเป็นช่วงการจราจรติดขัด และการจราจรไม่ติดขัด ด้วยความเร็วเฉลี่ย (แบ่งที่ความเร็วเฉลี่ย 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) จึงทำการสมมุติว่าสภาพการจราจรในช่วงเช้าตั้งแต่ 7.00 น.-15.00 น. 16 รอบ เป็นช่วงการจราจรไม่ติดขัด ส่วนในช่วงเย็นประมาณ 15.00 น. เป็นต้นไป จะเป็นช่วงการจราจรติดขัด ค่าพลังงานที่ใช้จะถูกเฉลี่ยจากข้อมูลที่อยู่ในแต่ละสภาพการจราจรนั้น เพื่อเป็นตัวแทนของค่าการใช้พลังงาน สำหรับนำมาใช้ในการออกแบบ ดังรูป ญ โดยเส้นสีแดง คือ ตัวแทนค่าพลังงานที่ใช้ในการคำนวณ ส่วนเส้นสีฟ้า คือ ตัวอย่างค่าพลังงานที่ใช้งานจริงใน 1 วัน งานวิจัยได้แนะนำแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อไปว่าหากสามารถมีตัวแทนค่าพลังงานที่ใช้ที่แตกต่างกันในระหว่างวันได้อย่างแม่นยำ เช่น แบ่งข้อมูลเป็นช่วงที่ถี่ขึ้น (การจราจรติดขัดมาก ปานกลาง น้อย) ก็จะทำให้ค่าที่ใช้ในการวางแผนมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้



รูป ญ ตัวอย่างการกระจายสภาพการจราจรในระหว่างวัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรชัย ธิตะจारी เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2558

