องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ
Bangkok Mass Transit Authority

ฉบับสมบูรณ์

โครงการศึกษาแนวทางการจัดหารถโดยสาร ระบบไฟฟ้า จำนวน 200 คัน

รายงานรายละเอียดผลการศึกษาโครงการ
(Results of Study Project Report)

มีนาคม 2559

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 รายงานสรุปฉบับผู้บริหาร 1-1
1.1 หลักการและเหตุผล 1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 1-1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน 1-2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน 1-2
1.5 ผลการศึกษาโดยสรุปในโครงการ 1-3
1.5.1 สถานภาพของเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้า 1-3
1.5.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าในประเทศไทย 1-4
1.5.3 โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า 1-6
1.5.4 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ของโครงการ 1-7

บทที่ 2 บทนำ 2-1
2.1 หลักการและเหตุผล 2-1
2.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 2-2
2.3 คณะที่ปรึกษา 2-2
2.4 แนวทางการศึกษาและแผนการดำเนินงาน 2-2
2.5 องค์ประกอบรายงาน 2-3

บทที่ 3 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างรถโดยสารไฟฟ้ากับรถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซ NGV และรถไฮบริด 3-1
3.1 ผลการศึกษาที่ผ่านมา 3-1
3.1.1 ผลการศึกษาในประเทศไทย 3-1
3.1.2 ผลการศึกษาต่างประเทศ 3-4
3.2 เปรียบเทียบรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าไฮบริด 3-9

บทที่ 4 ข้อมูลเบื้องต้นของการเดินรถตามเส้นทางที่กำหนด 4-1

บทที่ 5 รถเมล์ไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน และ การเก็บพลังงาน 5-1
5.1 พื้นฐานของรถยนต์ 5-1
5.2 มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถเมล์ไฟฟ้า 5-4
5.2.1 มอเตอร์อซิงโครนัส (Asynchronous Motor) 5-6
5.2.2 มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous motor) 5-12
5.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์อซิงโครนัส และซิงโครนัส สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับรถไฟฟ้า 5-15
5.3 ระบบส่งกำลัง 5-16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 Traction Battery 5-21
5.4.1 แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ 5-22
5.4.2 แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ 5-26
5.4.3 แบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอื่นๆ 5-35
5.5 สถานีประจุไฟฟ้า (Charging Station) 5-37
5.5.1 เทคโนโลยีการชาร์จ 5-37
5.6 ตัวอย่างรถเมล์ไฟฟ้าจากบริษัทต่างๆ 5-73
5.6.1 บริษัท Green Power Motor Company Inc. 5-73
5.6.2 บริษัท Changsha BYD Coach Company, Ltd. 5-74
5.6.3 สถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี 5-74
5.6.4 บริษัท San Joaquin RTD 5-75
5.6.5 บริษัท Mercedes-Benz Citaro 5-76
5.6.6 บริษัท Smith Electric Vehicles 5-77
5.6.7 บริษัท Thunder Sky Energy Group 5-77
5.6.8 บริษัท Zonda Bus 5-78
5.6.9 บริษัท Solaris Urbinos 5-78
5.6.10 บริษัท Proterra 5-79
5.7 แผนการบำรุงรักษา 5-79

บทที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารไฟฟ้า 6-1
6.1 แนวคิดสำหรับรูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าและรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่ 6-2
6.1.1 ระยะทางการเดินรถเฉลี่ยต่อคันต่อวัน 6-2
6.1.2 การเปรียบเทียบข้อกำหนดต่างๆของรถโดยสารไฟฟ้ายี่ห้อชั้นนำของโลก 6-5
6.1.3 รูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้า 6-9
6.1.4 รูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่ 6-9
6.2 รูปแบบโครงสร้างอาคารสำหรับติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 6-10
6.3 การออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้า 6-12
6.3.1 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 6-12
6.3.2 การประมาณโหลดเพื่อเลือกขนาดหม้อแปลง 6-16
6.3.3 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 6-16
6.3.4 การคำนวณหาขนาดอุปกรณ์ป้องกันและสายไฟ 6-18
6.3.5 การประมาณราคาระบบไฟฟ้า 6-20
6.3.6 การประมาณราคาค่าก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน 6-24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.3.7 การประมาณราคารวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 6-24
6.3.8 อัตราค่าไฟฟ้า 6-24
6.3.9 การศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 6-26
6.3.10 แนวการศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 6-27
6.3.11 แผนงานการดำเนินงาน 6-28

บทที่ 7 การประเมินและรูปแบบการประเมินในโครงการ 7-1

7.1 การประเมินโครงการ 7-1
7.1.1 การวิเคราะห์ต้นทุนต่ำสุด (Cost-minimization analysis: CMA) 7-3
7.1.2 การวิเคราะห์ต้นทุน-ประสิทธิผล (Cost-Effectiveness analysis: CEA) 7-3
7.1.3 การวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์ (Cost-Benefit analysis: CBA) 7-4
7.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนอรรถประโยชน์ (Cost-utility Analysis: CUA) 7-4
7.2 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ 7-5
7.2.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกโครงการ 7-6
7.3 การประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการ 7-7
7.4 การประเมินต้นทุนทางการเงิน 7-9
7.5 ด้านผลตอบแทนทางการเงิน 7-13
7.6 สมมติฐาน 7-13
7.7 การประเมินต้นทุนการเดินรถโดยสารและผลตอบแทน 7-15
7.8 ผลการประเมินโครงการ 7-17
7.8.1 การวิเคราะห์ด้านต้นทุนและผลตอบแทน 7-17
7.8.2 การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ 7-27
7.8.3 ผลการวิเคราะห์ทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ของโครงการ 7-30
7.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว 7-33
7.10 สรุปผลการประเมินโครงการและข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย 7-34

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 ทางเลือกที่ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินในการจัดซื้อรถโดยสาร 1-8
รูปที่ 3-1 รูปแบบระบบขับเคลื่อนและส่งกำลังสำหรับรถไฟฟ้าไฮบริด (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน 3-9
รูปที่ 4-1 แผ่นป้ายประจำรถที่ใช้ในการทดสอบ 4-1
รูปที่ 4-2 อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกระยะทางและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถโดยสาย 4-2
รูปที่ 4-3 เส้นทางเดินรถของรถโดยสารประจำทางสาย 4 หมายเลข 4-4018 4-2
รูปที่ 4-4 เส้นทางเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035 4-3
รูปที่ 4-5 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018)
วันพฤหัสบดีที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 4-5
รูปที่ 4-6 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) (4-4018)
วันศุกร์ที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559 4-5
รูปที่ 4-7 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018)
วันเสาร์ที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559 4-6
รูปที่ 4-8 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018)
วันอาทิตย์ที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559 4-6
รูปที่ 4-9 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018)
วันจันทร์ที่ 29 กุมภาพันธ์ 2559 4-7
รูปที่ 4-10 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอังคารที่ 1 มีนาคม 2559 4-7
รูปที่ 4-11 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพุธที่ 2 มีนาคม 2559 4-8
รูปที่ 4-12 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพฤหัสที่ 3 มีนาคม 2559 4-8
รูปที่ 4-13 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันศุกร์ที่ 4 มีนาคม 2559 4-9
รูปที่ 4-14 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันเสาร์ที่ 5 มีนาคม 2559 4-9
รูปที่ 4-15 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอาทิตย์ที่ 6 มีนาคม 2559 4-10
รูปที่ 4-16 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันจันทร์ที่ 7 มีนาคม 2559 4-10
รูปที่ 4-17 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอังคารที่ 8 มีนาคม 2559 4-11
รูปที่ 4-18 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพุธที่ 9 มีนาคม 2559 4-11
รูปที่ 4-19 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพฤหัสที่ 10 มีนาคม 2559 4-12
รูปที่ 4-20 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันพฤหัสบดีที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 4-12
รูปที่ 4-21 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันศุกร์ที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559 4-13
รูปที่ 4-22 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันเสาร์ที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559 4-13
รูปที่ 4-23 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันอาทิตย์ที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559 4-14

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4-24 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันจันทร์ที่ 29 กุมภาพันธ์ 2559 4-14
รูปที่ 4-25 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอังคารที่ 1 มีนาคม 2559 4-15
รูปที่ 4-26 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพุธที่ 2 มีนาคม 2559 4-15
รูปที่ 4-27 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพฤหัสที่ 3 มีนาคม 2559 4-16
รูปที่ 4-28 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันศุกร์ที่ 4 มีนาคม 2559 4-16
รูปที่ 4-29 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันเสาร์ที่ 5 มีนาคม 2559 4-17
รูปที่ 4-30 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอาทิตย์ที่ 6 มีนาคม 2559 4-17
รูปที่ 4-31 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันจันทร์ที่ 7 มีนาคม 2559 4-18
รูปที่ 4-32 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอังคารที่ 8 มีนาคม 2559 4-18
รูปที่ 4-33 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพุธ 9 มีนาคม 2559 4-19
รูปที่ 4-34 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพฤหัสที่ 10 มีนาคม 2559 4-19
รูปที่ 5-1 ไดอะแกรมแรงกระทำบนรถยนต์ 5-2
รูปที่ 5-2 ตัวอย่างคาบเวลาในการขับเคลื่อนรถ (บน) ในเมือง (ล่าง) ทางหลวง[1] 5-3
รูปที่ 5-3 กราฟคุณลักษณะแรง-ความเร็วของรถ ที่ใช้เครื่องยนต์[1] 5-4
รูปที่ 5-4 กราฟคุณลักษณะแรง-ความเร็วของรถ ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง[1] 5-5
รูปที่ 5-5 แผนภูมิการจำแนกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเป็นมอเตอร์ในรถไฟฟ้า 5-6
รูปที่ 5-6 ภาคตัดขวางของโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 5-7
รูปที่ 5-7 โรเตอร์ประเภทต่างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (a) โรเตอร์ขดลวด (b) โรเตอร์กระรอก 5-7
รูปที่ 5-8 (a) โรเตอร์ชนิดแท่งตัวนำทำจากทองแดง (b) โรเตอร์ชนิดแท่งตัวนำทำจากอลูมิเนียม[2] 5-8
รูปที่ 5-9 กราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะแรงบิด-สลิป ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แท่งตัวนำโรเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และ ทองแดงภายใต้เงื่อนไข (a) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์เหมือนกัน (b) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์ชนิดทองแดงถูกออกแบบใหม่เป็นชนิด 2 ชั้น 5-9
รูปที่ 5-10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แท่งตัวนำโรเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และทองแดงภายใต้เงื่อนไข (a) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์เหมือนกัน (b) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์ชนิดทองแดงถูกออกแบบใหม่เป็นชนิด 2 ชั้น[6] 5-10
รูปที่ 5-11 รูปทรงของร่องสล็อตโรเตอร์ (a) ร่องสล็อตลึก (b) ชนิด 2 ชั้น[6] 5-11
รูปที่ 5-12 แผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงาน 5-11
รูปที่ 5-13 ภาคตัดขวางของโครงสร้างของ (a) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และ (b) มอเตอร์รีลัคแตนซ์แปรเปลี่ยน[2] 5-12

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-14 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (a) แม่เหล็กบนผิวโรเตอร์ (b) แม่เหล็กฝังในโรเตอร์[7] 5-13

รูปที่ 5-15 แผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (a) แม่เหล็กบนผิวโรเตอร์ (b) แม่เหล็กฝังในโรเตอร์[7] 5-13

รูปที่ 5-16 ตัวอย่างแผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรชนิดแม่เหล็กฝังในโรเตอร์ 5-14

รูปที่ 5-17 รูปแบบต่างๆของระบบส่งกำลังในรถเมล์ไฟฟ้า 5-16

รูปที่ 5-18 ตัวอย่าง in-wheel มอเตอร์ 5-17

รูปที่ 5-19 แผนภูมิแสดงสมรรถนะของรถเมล์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งกำลังรูปแบบ a ภายใต้ช่วงเวลาการขับเคลื่อนชนิดต่างๆในรูปแบบของ (a) กำลังทางกล และ (b) แรงบิด[9] 5-17

รูปที่ 5-20 แผนภูมิแสดงสมรรถนะของรถเมล์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งกำลังรูปแบบ a ที่ระดับความชันต่างๆ[9] 5-18

รูปที่ 5-21 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของพลังงานสูญเสียในรถไฟฟ้ารูปแบบ a[9] 5-18

รูปที่ 5-22 แผนภูมิการใช้พลังงานสูญเสียของรถเมล์ในระบบส่งกำลังแบบต่างๆ[9] 5-19

รูปที่ 5-23 แผนภูมิการใช้พลังงานของรูปแบบการส่งกำลังต่างๆเปรียบเทียบกับรูปแบบ a[9] 5-19

รูปที่ 5-24 แผนภูมิพลังงานจากการเบรคของรูปแบบการส่งกำลังต่างๆเปรียบเทียบกับรูปแบบ a[9] 5-20

รูปที่ 5-25 แผนภูมิประสิทธิภาพของรถเมล์ไฟฟ้าที่มีระบบส่งกำลังรูปแบบต่างๆ[9] 5-20

รูปที่ 5-26 แผนภูมิแสดงประเภทของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ ที่มีใช้งานในปัจจุบัน 5-22

รูปที่ 5-27 โครงสร้างและตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี 5-23

รูปที่ 5-28 โครงสร้างและตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ 5-23

รูปที่ 5-29 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดซิลเวอร์ออกไซด์ 5-24

รูปที่ 5-30 โครงสร้างแบตเตอรีเมอร์คิวริกออกไซด์ 5-25

รูปที่ 5-31 โครงสร้างแบตเตอรี่ตะกั่วอากาศ 5-25

รูปที่ 5-32 แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะต่างๆ (a) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ใหม่ (b) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ที่เริ่มมีการสะสมของซัลเฟต (c) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ 5-26

รูปที่ 5-33 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด 5-26

รูปที่ 5-34 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต 5-30

รูปที่ 5-35 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์ 5-30

รูปที่ 5-36 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมชนิดไอออนโคบอลต์ออกไซด์ 5-31

รูปที่ 5-37 โครงสร้างของลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์ 5-31

รูปที่ 5-38 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์ 5-32

รูปที่ 5-39 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ 5-33

รูปที่ 5-40 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ 5-33

รูปที่ 5-41 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไททาเนต 5-34

รูปที่ 5-42 โครงสร้างภายในของแบตเตอรีชนิดลิเธียมโพลิเมอร์ 5-35

รูปที่ 5-43 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียม 5-36

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-44 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-เมทอล-ไฮไดรด์ 5-36
รูปที่ 5-45 โครงสร้างระบบการชาร์จรถบัสพลังงานไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ 5-37
รูปที่ 5-46 การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้รถพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ 5-37
รูปที่ 5-47 ตัวอย่างหัวชาร์จและเครื่องชาร์จในระบบ AC Charging Spot 5-39
รูปที่ 5-48 รายละเอียดและภาพเครื่องชาร์จของบริษัท BYD 5-40
รูปที่ 5-49 มาตรฐานหัวชาร์จแบบธรรมดาในระบบ DC Charging 5-41
รูปที่ 5-50 หัวชาร์จตามมาตรฐานต่าง ๆ 5-41
รูปที่ 5-51 ตัวอย่างเครื่องชาร์จและหัวชาร์จตามมาตรฐานต่าง ๆ 5-42
รูปที่ 5-52 ตัวอย่างเครื่องชาร์จของบริษัท Siemens 5-42
รูปที่ 5-53 ตัวอย่างเครื่องชาร์จของบริษัท E-station 5-43
รูปที่ 5-54 ตัวอย่างเครื่องชาร์จและรายละเอียดพิกัดเครื่องชาร์จของบริษัท Heliox 5-44
รูปที่ 5-55 ตัวอย่างเครื่องชาร์จที่ใช้หัวชาร์จแบบ Pantograph 5-44
รูปที่ 5-56 หัวชาร์จแบบ Pantograph 5-45
รูปที่ 5-57 การใช้งานหัวชาร์จแบบ Pantograph แบบ Existing Interfaces กับรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-45
รูปที่ 5-58 การใช้งานหัวชาร์จแบบ Pantograph แบบ Inverted Interfaces กับรถบัสพลังงานไฟฟ้า.....5-46
รูปที่ 5-59 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station 5-46
รูปที่ 5-60 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station บน E-BUS แบบรางเดี่ยว 5-47
รูปที่ 5-61 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station บน E-BUS แบบรางคู่ 5-48
รูปที่ 5-62 ตัวอย่างพิกัดสถานีชาร์จแบบ Pantograph ที่มีการใช้งานจริง 5-48
รูปที่ 5-63 ฟังก์ชันการใช้งานสถานีชาร์จแบบ Pantograph 5-49
รูปที่ 5-64 สถานีชาร์จ Off-board top-down pantograph ของบริษัท Siemens 5-49
รูปที่ 5-65 สถานีชาร์จ On-board bottom-up pantograph ของบริษัท Siemens 5-50
รูปที่ 5-66 รายละเอียดและภาพเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Heliox 5-51
รูปที่ 5-67 โมเดลเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Heliox 5-51
รูปที่ 5-68 โมเดลและพิกัดเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Opbrid 5-53
รูปที่ 5-69 โมเดลการใช้งานเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Opbrid 5-53
รูปที่ 5-70 รายละเอียดและพิกัดเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Schunk 5-54
รูปที่ 5-71 การใช้งานเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Schunk 5-55
รูปที่ 5-72 โมเดลสถานีชาร์จแบบ Pantograph 5-56
รูปที่ 5-73 โมเดลการชาร์จด้วยระบบ wireless ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-57
รูปที่ 5-74 ตัวอย่างการใช้งานระบบการชาร์จด้วยระบบ wireless 5-57
รูปที่ 5-75 ขั้นตอนการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-58
รูปที่ 5-76 ระบบภายในของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-59
รูปที่ 5-77 โครงสร้างการใช้พลังงานภายในรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-59
รูปที่ 5-78 โครงสร้างฐานของแบตเตอรี่ในสภาวะที่มีแบตเตอรี่และไม่มีแบตเตอรี่ 5-60

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5-79 โครงสร้างของรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ทางหลังคา 5-60
รูปที่ 5-80 เส้นทางในการทดสอบระบบปรับอากาศภายในรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-62
รูปที่ 5-81 ผลการทดสอบระบบ HVAC 5-63
รูปที่ 5-82 เส้นทางการวิ่งในประเทศเกาหลีใต้ เมืองโปฮาง 5-63
รูปที่ 5-83 ผลการทดสอบ SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-64
รูปที่ 5-84 ผลการจำลอง SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-65
รูปที่ 5-85 ผลการจำลอง SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้าเทียบกับการทดลอง 5-65
รูปที่ 5-86 การวางแผนจัดตั้งสถานีอัดประจุและสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ในประเทศจีน 5-66
รูปที่ 5-87 โหลดการทำงานของการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 5-66
รูปที่ 5-88 V2G Model of Battery Swapping Station 5-67
รูปที่ 5-89 บริษัทที่สนับสนุนเทคโนโลยีการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ในประเทศจีน 5-67
รูปที่ 5-90 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบใต้พื้นรถ 5-68
รูปที่ 5-91 ตัวเชื่อมต่อพิเศษสำหรับการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 5-68
รูปที่ 5-92 ลักษณะการทำงานของการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 5-68
รูปที่ 5-93 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ XJ Group 5-69
รูปที่ 5-94 รถบัสต้นแบบและสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ XJ Group 5-69
รูปที่ 5-95 ตัวเชื่อมต่อแบตเตอรี่และเครื่องสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของบริษัท XJ Group 5-70
รูปที่ 5-96 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ DB 5-70
รูปที่ 5-97 ตัวอย่างรถบัสพลังงานไฟฟ้าและสถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ DB 5-71
รูปที่ 5-98 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ HEPSTD 5-71
รูปที่ 5-99 สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ HEPSTD 5-72
รูปที่ 5-100 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ Better Place 5-72
รูปที่ 5-101 สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ Better Place 5-73
รูปที่ 5-102 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Green Power Motor Company Inc. 5-73
รูปที่ 5-103 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Changsha BYD Coach Company, Ltd. 5-74
รูปที่ 5-104 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัทสถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี 5-75
รูปที่ 5-105 โครงสร้างของรถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัทสถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี 5-75
รูปที่ 5-106 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของ บริษัท San Joaquin 5-76
รูปที่ 5-107 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Mercedes-Benz Citaro 5-76
รูปที่ 5-108 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Smith Electric Vehicles 5-77
รูปที่ 5-109 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของ บริษัท Thunder Sky Energy Group 5-77
รูปที่ 5-110 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Zonda Bus 5-78
รูปที่ 5-111 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Solaris Urbinos 5-78
รูปที่ 5-112 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Proterra 5-79
รูปที่ 6-1 เส้นทาง (วงกลม) รามคำแหง – ถนนรัชดาภิเษก สาย 137 ระยะทาง 26 กิโลเมตร 6-2

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6-2 เส้นทาง อู่คลองเตย – เดอะมอลล์ท่าพระ สาย 205 ระยะทาง 16.5 กิโลเมตร 6-3
รูปที่ 6-3 เส้นทาง ท่าเรือคลองเตย – ท่าน้ำภาษีเจริญสาย 4 ระยะทาง 15.5 กิโลเมตร 6-3
รูปที่ 6-4 เส้นทาง ราชมงคลวิทยาเขตศาลายา – อนุสาวรีย์ชัย สาย 515 ระยะทาง 28 กิโลเมตร 6-4
รูปที่ 6-5 เส้นทาง หมอชิต 2 – สุรวงศ์ สาย 16 ระยะทาง 25 กิโลเมตร 6-4
รูปที่ 6-6 เส้นทาง หมอชิต 2 – หัวลำโพง สาย 49 ระยะทาง 20.5 กิโลเมตร 6-5
รูปที่ 6-7 แผนภาพสรุปข้อดีและข้อด้อยสำหรับคุณสมบัติแต่ละด้านของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ 6-9
รูปที่ 6-8 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้าซ้าย) 6-10
รูปที่ 6-9 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้าขวา) 6-11
รูปที่ 6-10 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหลังขวา) 6-11
รูปที่ 6-11 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหลังซ้าย) 6-11
รูปที่ 6-12 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้า) 6-12
รูปที่ 6-13 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV ผ่านตู้ RMU และฝังสายเคเบิลใต้ 6-13
รูปที่ 6-14 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV จากตู้ RMU ขึ้น RISER POLE
และเชื่อมเข้ากับหม้อแปลงกำลัง (ด้านข้าง) 6-14
รูปที่ 6-15 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV จากตู้ RMU ขึ้น RISER POLE
และเชื่อมเข้ากับหม้อแปลงกำลัง (ด้านหน้า) 6-15
รูปที่ 6-16 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 6-17
รูปที่ 7-1 ทางเลือกที่ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินในการจัดซื้อรถโดยสาร 7-8
รูปที่ 7-2 สมมติฐานราคาของเชื้อเพลิง NGV และค่าไฟฟ้าในอนาคต 7-14
รูปที่ 7-3 ตัวอย่างต้นทุนการจัดหารถโดยสารของโครงการ
กรณีการจัดซื้อรถโดยสาร NGV (บน)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า (กลาง)
กรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้า (ล่าง) 7-23
รูปที่ 7-4 ตัวอย่างต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของโครงการ 7-24
รูปที่ 7-5 ตัวอย่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสด กรณีการจัดซื้อรถโดยสาร NGV (บน)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าและสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (กลางซ้าย)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า โดยไม่สร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (กลางขวา)
กรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้าและสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (ล่างซ้าย)
และกรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้า โดยไม่สร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (ล่างขวา) 7-31

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7-6 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงราคารถโดยสาร.......................... 7-33
รูปที่ 7-7 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงราคาไฟฟ้า 7-33
รูปที่ 7-8 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการเช่ารถจากบริษัทเอกชนที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเช่ารถ ... 7-34
รูปที่ 7-9 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการเช่ารถจากบริษัทเอกชนที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าไฟฟ้า.... 7-34

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 ขั้นตอนและแผนงานในการดำเนินงานในโครงการฯ 1-2
ตารางที่ 1-2 การศึกษาต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (Total Cost of Ownership, TCO) ของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าขนาด 12 เมตรเป็นเวลา 20 ปี โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.. 1-4
ตารางที่ 1-3 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คันเป็นระยะเวลา 20 ปี 1-5
ตารางที่ 1-4 สรุปราคาประมาณรวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน 1-7
ตารางที่ 1-5 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี 1-9
ตารางที่ 1-6 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า 1-10
ตารางที่ 1-7 การวิเคราะห์ NPV B/C Ratio และ IRR ที่อัตราคิดลด 6.85% 1-11
ตารางที่ 3-1 การศึกษาต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (Total Cost of Ownership, TCO) ของรถโดยสารไฟฟ้าขนาด 12 เมตร 3-1
ตารางที่ 3-2 มาตรการทางภาษี 3-2
ตารางที่ 3-3 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คัน 3-3
ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างคุณลักษณะของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกา 3-6
ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างคุณลักษณะของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีใช้งานในประเทศจีนตามเมืองต่างๆ 3-7
ตารางที่ 4-1 สายรถและเส้นทางเดินรถโดยสารประจำทาง 4-1
ตารางที่ 4-2 ข้อมูลการเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 4 หมายเลข 4-4018 ในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 - 10 มีนาคม 2559 4-3
ตารางที่ 4-3 ข้อมูลการเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035 ในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 - 10 มีนาคม 2559 4-4
ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิด PMSM และ BLDC 5-12
ตารางที่ 5-2 การเปรียบเทียบมอเตอร์อซิงโครนัส และมอเตอร์ซิงโครนัส 5-15
ตารางที่ 5-3 ตัวอย่างบริษัทที่ผลิตเครื่องชาร์จรถบัสพลังงานไฟฟ้า และพิกัดกำลังของเครื่องชาร์จ 5-38
ตารางที่ 5-4 มาตรฐานหัวชาร์จในระบบ AC Charging Spot 5-39
ตารางที่ 5-5 คุณสมบัติเครื่องชาร์จของบริษัท E-station 5-43
ตารางที่ 5-6 คุณสมบัติของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-61
ตารางที่ 5-7 คุณสมบัติของต้นกำลังของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-61
ตารางที่ 5-8 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ 5-62
ตารางที่ 5-9 ผลการทดสอบ SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า 5-64
ตารางที่ 6-1 รายละเอียดเส้นทางการเดินรถโดยสารไฟฟ้าและระยะทางเฉลี่ย/คัน/วัน 6-2
ตารางที่ 6-2 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Zhongtong 6-6

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 6-3 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ BYD 6-6
ตารางที่ 6-4 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ SIEMENS 6-7
ตารางที่ 6-5 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Proterra 6-7
ตารางที่ 6-6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้า 4 ยี่ห้อ 6-8
ตารางที่ 6-7 สรุปราคาประมาณของหมวดงาน Main Incoming & HV Routing 6-21
ตารางที่ 6-8 สรุปราคาประมาณของหมวดงานแผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB) 6-22
ตารางที่ 6-9 สรุปราคาประมาณของหมวดงานสายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟ 6-23
ตารางที่ 6-10 สรุปราคาประมาณรวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน 6-24
ตารางที่ 6-11 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD) 6-25
ตารางที่ 6-12 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU) 6-25
ตารางที่ 6-13 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ 6-28
ตารางที่ 7-1 ราคารถโดยสารปรับอากาศขนาดใหญ่ (12 เมตร) ในประเทศไทย 7-10
ตารางที่ 7-2 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ขสมก. (ข้อมูล ณ วันที่ 1 เดือนตุลาคม พ.ศ.2554 ถึงวันที่ 30 เดือนกันยายน พ.ศ.2558) 7-10
ตารางที่ 7-3 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้ไฟฟ้า 7-11
ตารางที่ 7-4 ค่าซ่อมบำรุง 7-11
ตารางที่ 7-5 รายได้ตำแหน่งพนักงานขับรถ 7-12
ตารางที่ 7-6 อัตรากำลังคนประจำสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 7-12
ตารางที่ 7-7 รายได้ต่อคัน 7-13
ตารางที่ 7-8 สมมติฐานในการประเมิน 7-13
ตารางที่ 7-9 ต้นทุนคงที่ 7-17
ตารางที่ 7-10 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การจัดซื้อรถโดยสาร NGV 7-18
ตารางที่ 7-11 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า ณ ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย 7-19
ตารางที่ 7-12 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 7-20
ตารางที่ 7-13 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า ณ ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย 7-21
ตารางที่ 7-14 ประมาณการรายได้จากการเดินรถโดยสารของโครงการ 7-22
ตารางที่ 7-15 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี 7-25
ตารางที่ 7-16 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า 7-26
ตารางที่ 7-17 ผลการวิเคราะห์การลดการนำเข้าพลังงานและการปล่อย CO_2 ของรถโดยสาร 1 คัน 7-27
ตารางที่ 7-18 คาดการณ์ผลตอบแทนรถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี 7-28

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 7-19 คาดการณ์ผลตอบแทนรถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า 7-29
ตารางที่ 7-20 การวิเคราะห์ NPV B/C Ratio และ IRR 7-32

บทที่ 1
รายงานสรุปฉบับผู้บริหาร

- หลักการและเหตุผล
- วัตถุประสงค์ของโครงการ
- ขอบเขตการดำเนินงาน
- ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน
- ผลการศึกษาโดยสรุปในโครงการ

1.1 หลักการและเหตุผล

กระทรวงคมนาคมมีมติพิจารณาปรับปรุงเงื่อนไขการสั่งซื้อรถโดยสารขององค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) จากการใช้พลังงานก๊าซ NGV เป็นรถไฟฟ้าที่ผลิตในประเทศไทยดังนั้น ขสมก. ซึ่งมีพันธกิจให้ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการได้ สะดวก รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย จึงได้มีโครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยประจำทางของ ขสมก. เพื่อศึกษาความคุ้มค่ารูปแบบการลงทุน และการบริหารจัดการในขั้นตอนการดำเนินการในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการนำรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามาใช้เป็นรถประจำทางของ ขสมก.

1.2.2 เพื่อเสนอแนวทางในการจัดหาและแผนการจัดการรถโดยสารประจำทางที่ใช้พลังงานไฟฟ้ากับ ขสมก.

1.2.3 เพื่อจัดทำรายละเอียดข้อเสนอโครงการฯ เสนอกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาให้ความเห็นชอบการนำรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยสารประจำทางของ ขสมก.

1.2.4 เพื่อจัดทำรายการร่างข้อกำหนดขอบเขตงานจัดซื้อ (Term of reference : TOR)

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยสารประจำทางของ ขสมก. โดยจะศึกษาต้นทุนในการเดินรถโดยสารประจำทางของ ขสมก. ในปัจจุบัน ทั้งต้นทุนทางตรง (Direct cost) และ ต้นทุนทางอ้อม (Indirect Cost) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์ในกรณีที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินรถ เสนอรูปแบบการลงทุนที่เหมาะสมในการใช้รถโดยสารประจำทางไฟฟ้าและเสนอแผนการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกเพิ่มเติม สถานีประจุไฟฟ้า ตลอดจนเสนอแผนการซ่อมบำรุงรักษารถโดยสารประจำทางไฟฟ้า ในขั้นตอนสุดท้ายจัดทำร่างข้อกำหนดขอบเขตงาน (Term of Reference : TOR) และร่างเอกสารประกวดราคาในการจัดซื้อรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า พร้อมทั้งจัดทำราคากลางรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าและเป็นที่ปรึกษาให้กับ ขสมก. ตลอดกระบวนการจัดซื้อ/จัดจ้าง

1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนและแผนการดำเนินงานแสดงตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ขั้นตอนและแผนงานในการดำเนินงานในโครงการฯ

ส่วนงาน	รายละเอียด	การดำเนินโครงการ (วันที่)			
		30	60	90	120
งานส่วนที่ 1: งานศึกษาและวิเคราะห์ผลการศึกษา					
1)	**การศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์**				
1.1)	การศึกษาต้นทุนในการเดินรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า				
1.2)	การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์/การเงิน				
1.3)	การเสนอแนะรูปแบบการลงทุน				
2)	**เสนอแนวทางแผนการจัดรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่ ขสมก.**				
2.1)	ประเมินจำนวนรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า				
2.2)	เสนอแผนการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกเพิ่มเติม				
2.3)	เสนอแผนการซ่อมบำรุงรักษา				
2.4)	ข้อกำหนดการยกเว้นอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิต				
3)	**การจัดทำรายละเอียดผลการศึกษา เสนอหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง**				
3.1)	รายละเอียดผลการศึกษา เสนอหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง				
3.2)	ชี้แจงหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง				
ส่วนงานที่ 2 การจัดทำรายการข้อกำหนดขอบเขตงานจัดหารถโดยสารประจำทางไฟฟ้า					
2.1	รายการข้อกำหนดขอบเขตงาน (Term of Reference : TOR)				
2.2	เป็นที่ปรึกษาให้กับ ขสมก. ตลอดกระบวนการจัดซื้อ/จัดจ้าง				
ส่วนงานที่ 3 การส่งมอบงาน					
3.1	รายงานรายละเอียดการศึกษาโครงการฯ				
3.2	รายงานรายละเอียดข้อกำหนดขอบเขตงาน (TOR)				

1.5 ผลการศึกษาโดยสรุปในโครงการ

1.5.1 สถานภาพของเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้า

- **ระบบรถยนต์ไฟฟ้า**

เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้งานในประเทศไทยมี 2 ประเภทได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดคือการใช้งานร่วมกันระหว่างน้ำมันและไฟฟ้า อีกประเภทคือรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่อย่างเดียวเท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมในการนำรถไฟฟ้าดังกล่าวมาใช้กับการเดินรถของ ขสมก. ที่มีระยะทางเดินรถต่อวัน ประมาณ 250 กม. ระยะเวลาวิ่งประมาณ 18 ชม.และใช้ความเร็วไม่เกิน 80 กม./ชม เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพของรถไฟฟ้า ที่สามารถวิ่งได้ 250 กม. และมีระบบประจุไฟฟ้า ประมาณ 5 - 6 ชม. พบว่า การนำรถไฟฟ้าแบบแบตเตอร์รี่เหมาะสมกับการเดินรถของ ขสมก. มากกว่าแบบไฮบริด

- **มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถเมล์ไฟฟ้า**

คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในรถไฟฟ้านั้นควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่าความหนาแน่นของแรงบิดและกำลังสูง
2. มีย่านแรงบิดความเร็วรอบกว้าง
3. มีประสิทธิภาพสูงตลอดย่านแรงบิดความเร็วรอบ
4. มีความคงทนและความน่าเชื่อถือ
5. ต้นทุนในการผลิต และ ค่าบำรุงรักษาต่ำ

ในทางปฏิบัติ มอเตอร์ที่ได้ถูกเลือกใช้ในอุตสาหกรรมรถไฟฟ้ามี 2 ประเภท ได้แก่ (1) มอเตอร์เหนี่ยวนำ และ (2) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

- **ระบบส่งกำลัง**

ระบบส่งกำลังสำหรับรถโดยสารประจำทางไฟฟ้านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ (1) มอเตอร์ขับเคลื่อนโดยตรง และ (2) มอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านเกียร์

- **แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า**

แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ (1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรด และ (2) แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (รวมถึงแบตเตอรี่ลิเธียมพอลิเมอร์) โดยแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าความเร็วต่ำเป็นส่วนใหญ่ ส่วนแบตเตอรี่ประเภทลิเธียมไอออนนั้นมีข้อดีที่สำคัญคือค่าความจุพลังงานจำเพาะสูง ทำให้น้ำหนักแบตเตอรี่เบา แต่มีข้อเสียที่ต้นทุนยังสูงและยังอาจมีปัญหาเรื่องการระเบิดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการรั่วของสารละลายอิเลคโตรไลท์

- **ระบบการประจุไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า**

ระบบการประจุไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าที่มีใช้กันทั่วไปในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ (1) การประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (2) การประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง

นอกจากการประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำแล้ว ยังมีอีกรูปแบบของการให้บริการประจุไฟฟ้า คือ วิธีการถอดเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) ซึ่งต้องอาศัยหุ่นยนต์หรือระบบอัตโนมัติ (Automation) ถอดแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วออกมาเพื่อรอการประจุไฟทีหลังและใส่แบตเตอรี่ชุดใหม่เข้าไปแทน ซึ่งเป็นข้อดีของวิธีการถอดเปลี่ยนแบตเตอรี่คือใช้เวลารวดเร็วในการประจุไฟฟ้าให้เต็ม แต่ตัวระบบที่ใช้ในการถอดเปลี่ยนแบตเตอรี่จะมีระบบทางกล (Mechanic) ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่สูง

ระบบต่างๆ ในแต่ละส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบเสียเปรียบกัน ซึ่งต้องพิจารณาความเหมาะสมร่วมกับลักษณะการเดินรถของ ขสมก. ด้วย

1.5.2 การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้งานรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าในประเทศไทย

จากผลการศึกษาในประเทศไทยจาก (1) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) และ (2) สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม กระทรวงคมนาคม

การศึกษาของ สวทช. เมื่อพิจารณาต้นทุนตลอดระยะเวลาการถือครองของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าระหว่า รถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลล์, NGV และไฟฟ้า พบว่าเมื่อทำการประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า ในช่วง Off-peak และภาครัฐยกเว้นอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในช่วงแรกจะทำให้ต้นทุนของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าอยู่ที่ 15.19 บาท/กม. ซึ่งต่ำกว่ารถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซลซึ่งมีต้นทุนอยู่ที่ 20.64 บาท/กม. และ รถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติซึ่งมีต้นทุนอยู่ที่ 16.29 บาท/กม. รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 การศึกษาต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (Total Cost of Ownership, TCO) ของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าขนาด 12 เมตรเป็นเวลา 20 ปี โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ประเภทรถ	ต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (บาท/กม.)	หมายเหตุ
รถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล	20.64	ณ ราคาน้ำมันดีเซล 25.99 บาท/ลิตร
รถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ	16.29	ณ ราคาก๊าซธรรมชาติราคา 13 บาท/ลิตร
	18.24	ณ ราคาที่ไม่มีการสนับสนุนจาก ปตท. 16 บาท/กก.
รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า		
หากประจุไฟฟ้าในช่วง off-peak (ราคาค่าไฟหน่วยละ 2.21 บาท)	15.19	กรณีที่ไม่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง
	16.71	กรณีที่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในปัจจุบัน
หากประจุไฟฟ้าในช่วง peak (ราคาค่าไฟหน่วยละ 3.82 บาท)	16.99	กรณีที่ไม่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง
	18.51	กรณีที่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในปัจจุบัน

จากตารางที่ 1-2 กรณีที่ดีที่สุดเพื่อให้รถโดยสารประจำทางไฟฟ้าสามารถแข่งขันกับรถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติได้ จะต้องประจุไฟฟ้าในช่วง Off-peak และภาครัฐควรยกเว้นอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในช่วงแรก ซึ่งรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าที่จะเข้าร่วมในโครงการจะต้องสามารถวิ่งได้ระยะทางอย่างน้อย 250 กม./วัน และแบตเตอรี่ที่ใช้จะต้องเป็นประเภทลิเทียมไอออน และให้ ขสมก. ทำการประจุไฟฟ้าในช่วง Off-peak เท่านั้น (เวลา 22.00 – 9.00 น วันจันทร์ – ศุกร์ และ 0.00 – 24.00 น. วันเสาร์ – อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์ ไม่รวมวันพืชมงคลและวันหยุดชดเชย)

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิงสำหรับรถโดยสารองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำนวน 2,694 คัน ระหว่างน้ำ มันดีเซล ก๊าซ NGV และไฟฟ้า สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงรถโดยสารประจำทางเป็นเวลา 20 ปี พบว่า มูลค่าการประหยัดของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าแบบนำเข้ายกเว้นภาษีมีมูลค่าการประหยัดสูงสุด และรองลงมาคือมูลค่าการประหยัดของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าแบบ

ประกอบในประเทศ และ มูลค่าการประหยัดของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าแบบนำเข้ารวมภาษี มีมูลค่าการประหยัดต่ำสุด

การศึกษาของสำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคมโดยพิจารณาความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิงสำหรับรถโดยสารองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำนวน 2,694 คัน เพื่อศึกษาความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิง ต้นทุนของเชื้อเพลิง และเปรียบเทียบความคุ้มค่า และแนวโน้มของราคาพลังงานในอนาคต ระหว่างน้ำ มันดีเซล ก๊าซ NGV และไฟฟ้า สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงรถโดยสารประจำทาง ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1-3 (ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คัน)

ตารางที่ 1-3 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คันเป็นระยะเวลา 20 ปี

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนและค่าใช้จ่ายดำเนินการของรถโดยสาร ขสมก. ต่อคัน ตลอดระยะเวลาดำเนินการ 20 ปี (ล้านบาท)				
	ดีเซล	NGV	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า		
			แบบนำเข้าชิ้นส่วนและอุปกรณ์มาประกอบในประเทศ (CKD) ยกเว้นภาษี	แบบนำเข้า ชิ้นส่วน และ อุปกรณ์มาประกอบในประเทศ (CKD) รวมภาษี	แบบนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU) ยกเว้นภาษี
1. ต้นทุนคงที่					
• ต้นทุนตัวรถโดยสารธรรมดา	4.500	3.800	9.300	11.300	14.300
• ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ (1) (2)	5.200	4.500	10.000	12.000	15.000
• ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า(3)	-	-	0.240	0.240	0.240
ต้นทุนคงที่รวม	**4.769**	**4.069**	**9.809**	**11.809**	**14.809**
2. ต้นทุนแปรผัน					
• ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา(4)	6.020	6.020	6.020	6.020	6.020
• ค่าใช้จ่ายบำรุงใหญ่เครื่องยนต์(5)	0.930	0.930	-	-	-
• ค่าใช้จ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่(6)	-	-	1.500	1.500	1.500
• ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง	22.146	16.754	5.291	5.291	5.291
ต้นทุนแปรผันรวม	**30.133**	**24.238**	**13.032**	**13.032**	**13.032**
ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรรวม	**34.902**	**28.307**	**22.841**	**24.841**	**27.841**
3. ความคุ้มค่าในการนำระบบไฟฟ้ามาใช้					
• มูลค่าการประหยัดเทียบกับดีเซล	**-**	**-**	**12.061**	**10.061**	**7.061**
• มูลค่าการประหยัดเทียบกับ NGV	**-**	**-**	**5.466**	**3.466**	**0.466**

หมายเหตุ :

(1) ต้นทุนระบบปรับอากาศของรถโดยสาร ขสมก. ประมาณราคา 7 แสนบาท ต่อคัน

(2) ราคาต้นทุนรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า เป็นราคาที่รวม VAT แล้ว

(3) สถานีประจุไฟฟ้า 0.3 ล้านบาท ต่อสถานี ประมาณความต้องการร้อยละ 80 ของจำนวนรถโดยสารพลังงานไฟฟ้าที่วิ่งบริการ

(4) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาของรถโดยสาร ขสมก. รถโดยสารธรรมดา 762 บาท ต่อคัน ต่อวัน

(5) ค่าบำรุงรักษาเครื่องยนต์ 3.1 แสนบาท ต่อคัน ต่อ 5 ปี

(6) ค่าใช้จ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ 1.5 ล้านบาท ต่อคัน ต่อ 10 ปี

จากตารางที่ 1-3 พบว่า มูลค่าการประหยัดของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าแบบนำเข้ายกเว้นภาษีมีมูลค่าการประหยัดสูงสุด โดยเมื่อเทียบกับรถโดยสารดีเซล รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 32,491.383 ล้านบาท (มีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 6 เป็นเงิน 1,507.977 ล้านบาท) และเมื่อเทียบกับรถโดยสารเอ็นจีวี รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 14,725.852 ล้านบาท (มีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 14 เป็นเงิน 1,527.785 ล้านบาท)

1.5.3 โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า

โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าได้แก่ (1) สถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (2) ระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- การประมาณราคาค่าก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน

การประมาณราคาค่าก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน จะใช้รูปแบบโครงสร้างอาคารสำหรับติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 6.2 โดยใน 1 อู่จะประกอบด้วยอาคารจอดรถรูปแบบเดียวกัน 2 อาคาร พื้นที่ในแต่ละอาคารจะมีขนาด 130x20 = 2,600 m^2 รวมพื้นที่ 2 อาคารจะมีค่าเท่ากับ 2x2,600 = 5,200 m^2 การก่อสร้างอาคารในลักษณะโกดังโรงงานจะมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 10,000 บาทต่อตารางเมตร ซึ่งรวมแล้วเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด 10,000 x 5,200 = 52,000,000 บาท (ห้าสิบสองล้านบาท)

- การประมาณราคารวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

การประมาณราคารวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1-4 โดยมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 67,053,800 บาท (หกสิบเจ็ดล้านห้าหมื่นสามพันแปดร้อยบาท) และคิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด 268,215,200 บาท (สองร้อยหกสิบแปดล้านสองแสนหนึ่งหมื่นห้าพันสองบาท)

ตารางที่ 1-4 สรุปราคาประมาณรวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน

ลำดับที่	รายการ	ค่าวัสดุ	ค่าแรงงาน	รวมค่าวัสดุ
		จำนวนเงิน	จำนวนเงิน	และแรงงาน
1	งานระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ จำนวน 2 หลัง			
1.1	หมวดงาน Main Incoming & HV Routing	5,069,000.00	370,400.00	5,439,400.00
1.2	แผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB)	2,860,200.00	280,200.00	3,140,400.00
1.3	สายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟฟ้า	5,622,400.00	851,600.00	6,474,000.00
2	งานก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับจอดรถ 25 คัน 2 หลัง			52,000,000.00
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด				**67,053,800.00**

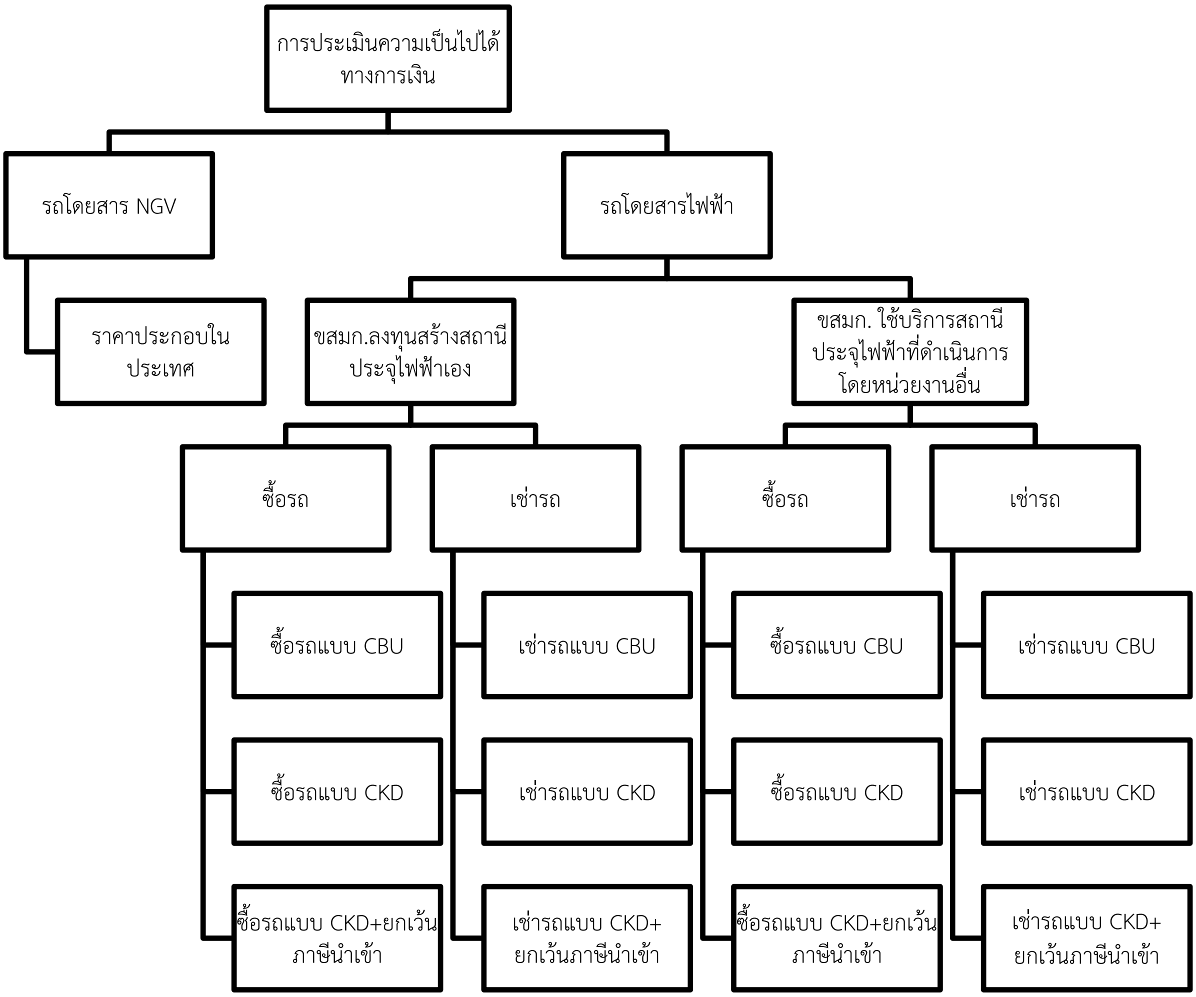
1.5.4 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินของโครงการ แบ่งออกเป็นสองส่วนได้แก่ การลงทุนในส่วนของตัวรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าและส่วนของสถานีประจุไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ลักษณะการลงทุนด้านสถานีประจุไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 กรณี คือ
   (1) ขสมก.ลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง
   (2) ขสมก. ใช้บริการสถานีประจุไฟฟ้าที่ดำเนินการโดยหน่วยงานอื่น เช่น กฟภ. หรือ กฟน.
2) ลักษณะการซื้อรถโดยสาร แยกย่อยตามวิธีการจัดหารถ 6 กรณี ได้แก่
   (1) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU)
   (2) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD)
   (3) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD) โดยได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้า
   (4) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU)
   (5) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD)
   (6) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD) โดยได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้า

การประเมินต้นทุนรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ารวมทั้งหมด 12 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 1-1 โดยในการศึกษานี้กำหนดให้โครงการมีกรอบระยะเวลา 20 ปี ในการประเมินต้นทุนทั้งหมด ข้อมูลที่ได้จะเปรียบเทียบกับต้นทุนของการใช้รถโดยสารด้วยเชื้อเพลิง NGV ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1-5 และ ตารางที่ 1-6 หามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) อัตราผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C ratio) และ

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ในตารางที่ 1-8 ซึ่งรายละเอียดการวิเคราะห์แสดงในรายงานบทที่ 7



รูปที่ 1-1 ทางเลือกที่ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินในการจัดซื้อรถโดยสาร

ตารางที่ 1-5 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี (ล้านบาท)						
	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	ต้นทุนราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย					
		กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ต้นทุนคงที่	**709.80**	**3,268.22**	**2,668.22**	**2,268.22**	**268.22**	**268.22**	**268.22**
1.1) ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ	709.80	3,000.00	2,400.00	2,000.00	0.00	0.00	0.00
1.2) ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	268.22	268.22	268.22	268.22	268.22	268.22
2. ต้นทุนแปรผัน	**8,219.62**	**7,318.45**	**7,318.45**	**7,318.45**	**15,135.23**	**13,679.82**	**12,709.55**
2.1) ค่าเชื้อเพลิง	4,113.71	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44
2.2) ค่าบำรุงรักษา	2,127.95	1,383.17	1,383.17	1,383.17	0.00	0.00	0.00
2.3) ค่าซ่อมบำรุงใหญ่เครื่องยนต์/ค่าแบตเตอรี่	0.00	960.00	960.00	960.00	0.00	0.00	0.00
2.4) ค่าภาษีรถประจำปี	5.80	5.80	5.80	5.80	0.00	0.00	0.00
2.5) เงินเดือน พขร. และ พกง.	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76
2.6) ค่าเช่ารถ	0.00	0.00	0.00	0.00	10,165.75	8,710.34	7,740.07
2.7) ค่าเช่า GPS และ E-ticket	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40
รวม 2.1)-2.7)	8,219.62	6,598.56	6,598.56	6,598.56	14,415.34	12,959.94	11,989.67
2.8) ค่า O&M สถานีประจุไฟฟ้า	0.00	402.32	402.32	402.32	402.32	402.32	402.32
2.9) เงินเดือนพนักงานสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	317.56	317.56	317.56	317.56	317.56	317.56
รวม 2.8)-2.9)	0.00	719.88	719.88	719.88	719.88	719.88	719.88
ต้นทุนรวม (1+2)	**8,929.42**	**10,586.66**	**9,986.66**	**9,586.66**	**15,403.44**	**13,948.03**	**12,977.76**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน
CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

ตารางที่ 1-6 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน (ล้านบาท)						
	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	ต้นทุนราคาไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย					
		กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ต้นทุนคงที่	**709.80**	**3,000.00**	**2,400.00**	**2,000.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**
1.1) ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ	709.80	3,000.00	2,400.00	2,000.00	0.00	0.00	0.00
1.2) ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2. ต้นทุนแปรผัน	**8,219.62**	**8,614.75**	**8,614.75**	**8,614.75**	**16,431.53**	**14,976.12**	**14,005.85**
2.1) ค่าเชื้อเพลิง	4,113.71	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62
2.2) ค่าบำรุงรักษา	2,127.95	1,383.17	1,383.17	1,383.17	0.00	0.00	0.00
2.3) ค่าซ่อมบำรุงใหญ่เครื่องยนต์/ค่าแบตเตอรี่	0.00	960.00	960.00	960.00	0.00	0.00	0.00
2.4) ค่าภาษีรถประจำปี	5.80	5.80	5.80	5.80	0.00	0.00	0.00
2.5) เงินเดือน พขร. และ พกง.	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76
2.6) ค่าเช่ารถ	0.00	0.00	0.00	0.00	10,165.75	8,710.34	7,740.07
2.7) ค่าเช่า GPS และ E-ticket	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40
รวม 2.1)-2.7)	8,219.62	8,614.75	8,614.75	8,614.75	16,431.53	14,976.12	14,005.85
2.8) ค่า O&M สถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.9) เงินเดือนพนักงานสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
รวม 2.8)-2.9)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ต้นทุนรวม (1+2)	**8,929.42**	**11,614.75**	**11,014.75**	**10,614.75**	**16,431.53**	**14,976.12**	**14,005.85**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน

CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

ตารางที่ 1-7 การวิเคราะห์ NPV B/C Ratio และ IRR ที่อัตราคิดลด 6.85%

		การซื้อรถโดยสาร NGV	กรณีสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่*					
			การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า			การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า		
			CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า
Discount Rate		6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%
Financial Analysis	NPV (ล้านบาท)	1,284	-700	-100	300	-2,409	-1,576	-1,020
	B/C Ratio	1.26	0.90	0.98	1.05	0.72	0.80	0.86
	IRR	22.47%	4.25%	6.42%	8.34%	N/A	-10.26%	-4.60%
Economic Analysis	NPV (ล้านบาท)		1,587	2,187	2,587	-122	711	1,267
	B/C Ratio		1.23	1.35	1.44	0.99	1.09	1.18
	IRR		12.28%	15.71%	18.89%	5.67%	14.38%	21.28%
			กรณีใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า**					
			การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า			การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า		
			CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า
Discount Rate			6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%
Financial Analysis	NPV (ล้านบาท)		-1,091	-491	-91	-2,801	-1,967	-1,412
	B/C Ratio		0.85	0.93	0.99	0.69	0.76	0.81
	IRR		2.20%	4.36%	6.31%	N/A	N/A	N/A
Economic Analysis	NPV (ล้านบาท)		1,196	1,796	2,196	-514	320	875
	B/C Ratio		1.16	1.27	1.35	0.94	1.04	1.12
	IRR		11.43%	15.14%	18.71%	0.15%	11.69%	21.98%

หมายเหตุ: *ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย

**ราคาไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย

CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน

CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนโครงการจัดหารถโดยสารไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้รถโดยสาร NGV ในการให้บริการของ ขสมก. จำนวนทั้งหมด 200 คัน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 12 กรณี คือการจัดซื้อรถแยกเป็น 4 กรณี ได้แก่ การจัดซื้อรถโดยสารเองแบบนำเข้าทั้งคัน (CBU) นำเข้าชิ้นส่วนรถมาประกอบในประเทศ (CKD) นำเข้าชิ้นส่วนรถมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีชิ้นส่วน และการเช่าจากบริษัทเอกชน รวมทั้งการจัดหาไฟฟ้าแยกเป็น 2 กรณีคือจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองและซื้อไฟฟ้าจากสถานีประจุไฟฟ้าจากหน่วยงานอื่น

ผลการวิเคราะห์ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) พบว่ากรณีเช่ารถมีค่า NVP ติดลบ ค่า B/C Ratio ต่ำกว่า 1.0 และค่า IRR น้อยกว่า Discount Rate (6.85% ต่อปี) ซึ่งหมายถึงผลประกอบการของโครงการโดยการเช่ารถขาดทุนตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ 20 ปี อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีดังกล่าวข้างต้นของกรณีการจัดซื้อรถ พบว่า กรณีการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและใช้บริการสถานีอัดประจุไฟฟ้าของผู้ให้บริการไฟฟ้าเป็นกรณีที่เหมาะสมในการลงทุนด้านการเงินที่สุด แต่ยังด้อยกว่ากรณีรถโดยสาร NGV (EV = 300 ล้านบาท < NGV = 1,284 ล้านบาท) อัตราผลตอบแทนภายในของรถโดยสารไฟฟ้าแย่กว่ารถโดยสาร NGV (EV = 8.34% < NGV = 22.47%) และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ของรถโดยสารไฟฟ้ามีค่า 1.05 ต่ำกว่าของรถโดยสาร NGV ที่ 1.26

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าหากคิดเฉพาะผลด้านการเงินโครงการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าให้ผลตอบแทนน้อยกว่าการใช้รถโดยสาร NGV และในบางกรณีเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุนมากนักเนื่องจากค่าดัชนีต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น ในกรณีเช่ารถจากบริษัทเอกชน อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงด้านพลังงานเขามาเกี่ยวข้อง ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าโครงการรถโดยสารไฟฟ้าสามารถช่วยลดการนำเข้าพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมของประเทศได้ ซึ่งมูลค่าเหล่านี้ส่งผลให้โครงการรถโดยสารไฟฟ้ามีความเหมาะสมในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น โดยกรณีการจัดซื้อรถไฟฟ้าเองจากการนำเข้าชิ้นส่วนที่ได้รับการยกเว้นด้านภาษีมาประกอบในประเทศและดำเนินการก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองจะให้ผลตอบแทนสูงที่สุด

ดังนั้นจากการศึกษานี้ ลักษณะของโครงการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าที่ควรลงทุน คือ ขสมก. ควรจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าโดยการนำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศซึ่งต้องได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วนต่างๆ ด้วย และพร้อมลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้า โดยเมื่อสมมติให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.13 บาทต่อหน่วยจะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 300 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 8.34% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.05 หรือเมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 2,587 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 18.89% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.44

ถึงแม้ว่าการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าไม่ได้ให้ผลตอบแทนทางด้านการเงินดีกว่าการใช้รถโดยสาร NGV ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่เมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วแสดงให้เห็นว่าการใช้รถโดยสารไฟฟ้าให้ผลตอบแทนที่ดีกว่า ดังนั้นในการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าควรจะต้องมีการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานจากภาครัฐหรือเงินกองทุนที่เกี่ยวข้องกับด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการลดภาษีการนำเข้าชิ้นส่วนยานยนต์ที่สำคัญเพื่อนำมาประกอบในประเทศ

การส่งเสริมให้มีการผลิตรถโดยสารไฟฟ้าภายในประเทศนอกจากจะเป็นทางเลือกที่จะทำให้ต้นทุนของรถโดยสารลดลงกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศแล้ว ยังเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้กับกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ภายในประเทศอีกด้วย ดังนั้น ทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องทั้งกระทรวงอุตสาหกรรม

กระทรวงคมนาคม กระทรวงพลังงาน และกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ควรจะต้องร่วมกันวางยุทธศาสตร์ในการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยให้ยั่งยืนในระยะยาว

ในการส่งเสริมให้เกิดการลงทุนพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศนั้น ในระยะเริ่มต้นภาครัฐจะต้องมีนโยบายและมาตรการส่งเสริมการลงทุนให้กับชิ้นส่วนเทคโนโลยีที่สำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ แบตเตอรี่ และระบบควบคุม เป็นต้น โดยมาตรการส่งเสริมดังกล่าวต้องกำหนดให้มีกลไกการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการของคนไทยเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางด้านเทคโนโลยีภายในประเทศในระยะยาว

บทที่ 2
บทนำ

- หลักการและเหตุผล
- วัตถุประสงค์ของโครงการ
- คณะที่ปรึกษา
- แนวทางการศึกษาและแผนการดำเนินงาน
- องค์ประกอบรายงาน

2.1 หลักการและเหตุผล

เนื่องจากองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) มีหน้าที่หลักตามพันธกิจเพื่อให้ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการได้ สะดวก รวดเร็ว ประหยัด และปลอดภัย ซึ่งรถโดยสารประจำทางที่ให้บริการอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เกิน 60 % เป็นรถที่มีอายุการใช้งานเกินกว่า 20 ปี ส่งผลให้รถโดยสารประจำทางมีสภาพที่ชำรุดทรุดโทรมและรถเสียจำนวนมาก ทำให้มีจำนวนรถโดยสารไม่เพียงพอ ขสมก. จึงมีแนวทางในการจัดหารถโดยสารประจำทางเพิ่มเติม เพื่อทดแทนรถโดยสารเก่าที่ใช้พลังงานดีเซล ซึ่งรัฐมนตรีว่าการกระทรวงคมนาคม (รวค.) ได้มอบหมายให้ศึกษาความเหมาะสมของการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่มีความเป็นไปได้สำหรับรถโดยสารประจำทางในส่วนที่เหลือให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งผลจากการศึกษาที่ได้นำเสนอต่อ คณะกรรมการพัฒนาระบบนวัตกรรมของประเทศ (คพน.) โดยมติที่ประชุม ครั้งที่ 3/2558 เมื่อวันที่ 7 สิงหาคม 2558 ได้มอบหมายให้กระทรวงคมนาคมพิจารณาปรับปรุงเงื่อนไขการสั่งซื้อรถของ ขสมก. จากการใช้พลังงานก๊าซ NGV เป็นรถไฟฟ้าที่ผลิตในประเทศไทย ดังนั้นทาง ขสมก. จึงได้มีโครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยประจำทางของ ขสมก. เพื่อศึกษาความคุ้มค่า รูปแบบการลงทุน และการบริหารจัดการในขั้นตอนการดำเนินการในอนาคต รายงานฉบับนี้เสนอผลการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาทดแทนการใช้งานรถโดยสารประจำทางแบบปัจจุบัน ความคุ้มค่า รูปแบบการลงทุน และการบริหารจัดการในขั้นตอนการดำเนินการในอนาคต

2.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

2.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาใช้เป็นรถประจำทางของ ขสมก.

2.2.2 เพื่อเสนอแนวทางในการจัดหาและแผนการจัดการรถโดยสารประจำทางที่ใช้พลังงานไฟฟ้ากับ ขสมก.

2.2.3 เพื่อจัดทำรายละเอียดข้อเสนอโครงการฯ เสนอกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อพิจารณาให้ความเห็นชอบการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยสารประจำทางของ ขสมก.

2.2.4 เพื่อจัดทำรายการร่างข้อกำหนดขอบเขตงานจัดซื้อ (Term of Reference : TOR)

2.3 คณะที่ปรึกษา

รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย	ผู้จัดการโครงการ
ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์	รองผู้จัดการโครงการ
รศ.ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมเครื่องกล
ผศ.ดร.คมสันต์ หงส์สมบัติ	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมไฟฟ้า
ดร.จักรพงศ์ พงศ์ธไนศวรรย์	ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมขนส่ง - จราจร
ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม	ผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงาน
นายศักดิ์สิทธิ์ วัฒนาเดช	ผู้เชี่ยวชาญด้านการเงิน
นางสาวอรทัย ชัยศิลบุญ	ผู้เชี่ยวชาญด้านเศรษฐศาสตร์
นายพีรวัส หวังสถิตสถาพร	ผู้เชี่ยวชาญด้านการลงทุน
นายโกสินทร์ บุญเรืองขาว	ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการองค์กร
ดร.พรชัย วิสุทธิสักดิ์	ผู้เชี่ยวชาญด้านศุลกากร

2.4 แนวทางการศึกษาและแผนการดำเนินงาน

แผนการศึกษาจำนวน 4 เดือน มีรายละเอียดแผนการดำเนินงาน ตามขอบเขตงาน ดังนี้

ส่วนงาน	รายละเอียด	การดำเนินโครงการ (เดือนที่)			
		1	2	3	4
ส่วนที่ 1					
1)	**การศึกษาความเป็นไปได้ด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์**				
1.1)	การศึกษาต้นทุนในการเดินรถโดยสารไฟฟ้า				
1.2)	การวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์/การเงิน				
1.3)	การเสนอแนะรูปแบบการลงทุน				
2)	**เสนอแนวทางแผนการจัดรถโดยสารไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่ ขสมก.**				
2.1)	ประเมินจำนวนรถโดยสารไฟฟ้า				
2.2)	เสนอแผนการก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกเพิ่มเติม				
2.3)	เสนอแผนการซ่อมบำรุงรักษา				
2.4)	ข้อกำหนดการยกเว้นอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิต				

ส่วนงาน	รายละเอียด	การดำเนินโครงการ (เดือนที่)			
		1	2	3	4
3)	**การจัดทำรายละเอียดผลการศึกษา เสนอหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง**				
3.1)	รายละเอียดผลการศึกษา เสนอหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง				
3.2)	ชี้แจงหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง				
ส่วนที่ 2	**การจัดทำรายการข้อกำหนดขอบเขตงานจัดหารถโดยสารไฟฟ้า**				
2.1	รายการข้อกำหนดขอบเขตงาน (Term of Reference : TOR)				
2.2	ที่ปรึกษาให้กับ ขสมก. ตลอดกระบวนการจัดซื้อ/จัดจ้าง				
ส่วนที่ 3	**การส่งมอบงาน**				
3.1	รายงานรายละเอียดการศึกษาโครงการ				
3.2	รายงานรายละเอียดข้อกำหนดขอบเขตงาน (TOR)				

2.5 องค์ประกอบรายงาน

ตามข้อกำหนดของรายการข้อกำหนดขอบเขตงานจ้างที่ปรึกษาเพื่อดำเนินการโครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสม ในการนำรถโดยสารไฟฟ้ามาใช้เป็นรถโดยประจำทางของ ขสมก. สามารถแสดงเป็นรายละเอียดส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 รายงานสรุปฉบับผู้บริหาร
- บทที่ 2 บทนำ
- บทที่ 3 เปรียบเทียบการทำงานระหว่างรถโดยสารไฟฟ้ากับรถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซ NGV และรถไฮบริด
- บทที่ 4 ข้อมูลเบื้องต้นของการเดินรถตามเส้นทางที่กำหนด
- บทที่ 5 รถเมล์ไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน และ การเก็บพลังงาน
- บทที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารไฟฟ้า
- บทที่ 7 การประเมินและรูปแบบการประเมินในโครงการ

บทที่ 3
เปรียบเทียบการทำงานระหว่างรถโดยสารไฟฟ้ากับรถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงจากก๊าซ NGV และรถไฮบริด

- ผลการศึกษาที่ผ่านมา
- เปรียบเทียบรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าไฮบริด

3.1 ผลการศึกษาที่ผ่านมา

3.1.1 ผลการศึกษาในประเทศไทย

3.1.1.1 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

จากการศึกษาต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (Total Cost of Ownership, TCO) ของรถโดยสารไฟฟ้าขนาด 12 เมตร โดยเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล และก๊าซธรรมชาติ ในด้านต้นทุนคงที่ ต้นทุนแปรผัน และต้นทุนในการบำรุงรักษาสำหรับการใช้งานรถโดยสารเป็นระยะทาง 250 กม./วัน ตลอดระยะเวลา 20 ปี พบว่า

ตารางที่ 3-1 การศึกษาต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (Total Cost of Ownership, TCO) ของรถโดยสารไฟฟ้าขนาด 12 เมตร

ประเภทรถ	ต้นทุนตลอดระยะเวลาถือครอง (บาท/กม.)	หมายเหตุ
รถโดยสารที่ใช้เชื้อเพลิงดีเซล	20.64	ณ ราคาน้ำมันดีเซล 25.99 บาท/ลิตร
รถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ	16.29 18.24	ณ ราคาก๊าซธรรมชาติราคา 13 บาท/ลิตร ณ ราคาที่ไม่มีการสนับสนุนจาก ปตท. 16 บาท/กก.
รถโดยสารไฟฟ้า		
หากประจุไฟฟ้าในช่วง off-peak (ราคาค่าไฟหน่วยละ 2.21 บาท)	15.19 16.71	กรณีที่ไม่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง กรณีที่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในปัจจุบัน
หากประจุไฟฟ้าในช่วง peak (ราคาค่าไฟหน่วยละ 3.82 บาท)	16.99 18.51	กรณีที่ไม่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้อง กรณีที่คิดอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในปัจจุบัน

สรุป กรณีที่ดีที่สุดเพื่อให้รถโดยสารไฟฟ้าสามารถแข่งขันกับรถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติได้ จะต้องประจุไฟฟ้าในช่วง Off-peak และภาครัฐควรยกเว้นอัตราศุลกากรขาเข้าและสรรพสามิตสำหรับชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องในช่วงแรก

- ซึ่งรถโดยสารไฟฟ้าที่จะเข้าร่วมในโครงการจะต้องสามารถวิ่งได้ระยะทางอย่างน้อย 250 กม./วัน และแบตเตอรี่ที่ใช้จะต้องเป็นประเภทลิเทียมไอออน และให้ ขสมก. ทำการประจุไฟฟ้าในช่วง Off-peak เท่านั้น (เวลา 22.00 – 9.00 น วันจันทร์ – ศุกร์ และ 0.00 – 24.00 น. วันเสาร์ – อาทิตย์และวันหยุดนักขัตฤกษ์ ไม่รวมวันพืชมงคลและวันหยุดชดเชย)
- มาตรการสนับสนุน
  - มาตรการทางภาษี เพื่อให้เกิดการแข่งขันโดยผู้ประกอบการไทยได้อย่างรวดเร็ว จะต้องมีมาตรการทางภาษีเร่งด่วน ดังนี้

ตารางที่ 3-2 มาตรการทางภาษี

ชิ้นส่วน	อัตราภาษีปัจจุบัน (ร้อยละ)		ข้อเสนออัตราภาษีศุลกากรและสรรพสามิต (ถ้ามี)	
	ศุลกากรขาเข้า	ศุลกากรขาออก	ร้อยละ	ระยะเวลาสนับสนุน(ปี)
แชสซีส์ที่มีมอเตอร์ และ/หรือ แบตเตอรี่ พร้อมส่วนประกอบหรืออุปกรณ์ประกอบติดตั้งไว้แล้ว เฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	30	ไม่มี	0	5
ส่วนประกอบหรืออุปกรณ์ประกอบเพื่อนำเข้ามาเพื่อประกอบหรือผลิตแชสซีส์ที่มีมอเตอร์และ/หรือแบตเตอรี่ติดตั้ง (CKD) เฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	ไม่มี	ไม่มี	0	5
มอเตอร์เฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	10	ไม่มี	0	5
แบตเตอรี่เฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	10	10	0	5
คานหน้าเฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	30	ไม่มี	0	5
เพลาหลังเฉพาะใช้กับรถโดยสารไฟฟ้า	30	ไม่มี	0	5

จากตารางที่ 3-2 จะพบว่าไม่สามารถละเว้นภาษีศุลกากรขาเข้าได้ ยกเว้นแต่จะทำการได้ในกรณีที่ 2 คือ นำเข้าส่วนประกอบและอุปกรณ์ประกอบสำคัญเข้ามาเป็นชุดสำเร็จและทำการประกอบในประเทศจะไม่เสียภาษีศุลกากรขาเข้า ซึ่งเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการสนับสนุนการใช้รถโดยสารไฟฟ้าในประเทศ และทำให้ต้นทุนของตัวรถมีค่าต่ำลง

- มาตรการส่งเสริมการลงทุน

ในปัจจุบันการผลิตรถโดยสารไฟฟ้ายังไม่เข้าหลักเกณฑ์การส่งเสริมการลงทุนตามประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุนที่ 2/2557 เรื่อง นโยบายและหลักเกณฑ์การส่งเสริมการลงทุน ลง วันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ.2557 และประกาศคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน 5/2557 ลงวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ.2557 เรื่อง มาตรการเพิ่มขีดความสามารถของผู้ประกอบกรวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ทั้งนี้เสนอให้คณะกรรมการลงทุนพิจารณาเพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมการผลิตรถโดยสารไฟฟ้าของผู้ประกอบการไทย

3.1.1.2 สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม กระทรวงคมนาคม

การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิงสำหรับรถโดยสารองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำนวน 2,694 คัน เพื่อศึกษาความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิง ต้นทุนของเชื้อเพลิง และเปรียบเทียบความคุ้มค่า และแนวโน้มของราคาพลังงานในอนาคต ระหว่างน้ำ มันดีเซล ก๊าซ NGV และไฟฟ้าสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงรถโดยสารประจำทาง โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3-3 (ต้นทุนค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซลและก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คัน)

ตารางที่ 3-3 ต้นทุน ค่าใช้จ่าย และความคุ้มค่าในการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และก๊าซ NGV ส่วนที่เหลือ จำนวน 2,694 คัน

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนและค่าใช้จ่ายดำเนินการของรถโดยสาร ขสมก. ต่อคัน ตลอดระยะเวลาดำเนินการ 20 ปี (ล้านบาท)				
	ดีเซล	NGV	รถโดยสารไฟฟ้า		
			แบบนำเข้าชินส่วนและอุปกรณ์มาประกอบในประเทศ (CKD) ยกเว้นภาษี	แบบนำเข้าชินส่วนและอุปกรณ์มาประกอบในประเทศ (CKD) รวมภาษี	แบบนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU) ยกเว้นภาษี
1. ต้นทุนคงที่					
• ต้นทุนตัวรถโดยสารธรรมดา	4.500	3.800	9.300	11.300	14.300
• ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ(1) (2)	5.200	4.500	10.000	14.000	15.000
• ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า(3)	-	-	0.240	0.240	0.240
ต้นทุนคงที่รวม	**4.769**	**4.069**	**9.809**	**11.809**	**14.809**
2. ต้นทุนแปรผัน					
• ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา(4)	6.020	6.020	6.020	6.020	6.020
• ค่าใช้จ่ายบำรุงใหญ่เครื่องยนต์(5)	0.930	0.930	-	-	-
• ค่าใช้จ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่(6)	-	-	1.500	1.500	1.500
• ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง	22.146	16.754	5.291	5.291	5.291
ต้นทุนแปรผันรวม	**30.133**	**24.238**	**13.032**	**13.032**	**13.032**
ต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปรรวม	**34.902**	**28.307**	**22.841**	**24.841**	**27.841**
3. ความคุ้มค่าในการนำระบบไฟฟ้ามาใช้					
• มูลค่าการประหยัดเทียบกับดีเซล	-	-	**12.061**	**10.061**	**7.061**
• มูลค่าการประหยัดเทียบกับ NGV	-	-	**5.466**	**3.466**	**0.466**

หมายเหตุ :

(1) ต้นทุนระบบปรับอากาศของรถโดยสาร ขสมก. ประมาณราคา 7 แสนบาท ต่อคัน

(2) ราคาต้นทุนรถโดยสารไฟฟ้า เป็นราคาที่รวม VAT แล้ว

(3) สถานีประจุไฟฟ้า 0.3 ล้านบาท ต่อสถานี ประมาณความต้องการร้อยละ 80 ของจำนวนรถโดยสารพลังงานไฟฟ้าที่วิ่งบริการ

(4) ค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาของรถโดยสาร ขสมก. รถโดยสารธรรมดา 762 บาท ต่อคัน ต่อวัน

(5) ค่าบำรุงรักษาเครื่องยนต์ 3.1 แสนบาท ต่อคัน ต่อ 5 ปี

(6) ค่าใช้จ่ายเปลี่ยนแบตเตอรี่ 1.5 ล้านบาท ต่อคัน ต่อ 10 ปี

จากผลการศึกษา โดยการนำรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับรถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซล และ ก๊าซ NGV สำหรับรถโดยสาร ขสมก. ทั้งหมด จำนวน 2,694 คัน ตลอดระยะเวลาดำเนินการ 20 ปี พบว่า

- มูลค่าการประหยัดของรถโดยสารไฟฟ้าแบบนำเข้ายกเว้นภาษีมีมูลค่าการประหยัดสูงสุด โดยเมื่อเทียบกับรถโดยสารดีเซล จะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 6 เป็นเงิน 1,507.977 ล้านบาท รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 32,491.383 ล้านบาท และเมื่อเทียบกับรถโดยสารเอ็นจีวี จะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 14 เป็นเงิน 1,527.785 ล้านบาทรวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 14,725.852 ล้านบาท
- รองลงมาเป็นมูลค่าการประหยัดของ รถโดยสารไฟฟ้าแบบประกอบในประเทศโดยเมื่อเทียบกับรถโดยสารดีเซล จะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 8 เป็นเงิน 1,312.174 ล้านบาท รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 27,103.383 ล้านบาท และเมื่อเทียบกับรถโดยสารเอ็นจีวีจะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 16 เป็นเงิน 816.183 ล้านบาท รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 9,337.852 ล้านบาท
- มูลค่าการประหยัดของรถโดยสารไฟฟ้าแบบนำเข้ารวมภาษี มีมูลค่าการประหยัดต่ำสุด โดยเมื่อเทียบกับรถโดยสารดีเซล จะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 13 เป็นเงิน 1,637.528 ล้านบาท รวมมูลค่าการประหยัดจนถึงปีที่ 20 เป็นเงิน 19,021.383 ล้านบาท และเมื่อเทียบกับรถโดยสารเอ็นจีวี จะมีมูลค่าการประหยัดเป็นบวกในปีที่ 20 เป็นเงิน 1,255.825 ล้านบาท

3.1.2 ผลการศึกษาต่างประเทศ

3.1.2.1 สหภาพยุโรป

ในสหภาพยุโรปมีโครงเพื่อพัฒนาระบบรถโดยสารเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในเมืองต่างๆหลายโครงการ อาทิเช่น European Bus System of the Future (ค.ศ.2008-2013) โครงการ The intelligent, Innovative Integrated Bus System (ค.ศ.2012-2015) โครงการ ZeEUS –Zero Emision bUs System (ค.ศ.2013-2016) ซึ่งโครงการดังกล่าวมุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสารไฟฟ้าและระบบการจัดการเดินรถอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่ง Corazza M. และคณะ ทำการศึกษาและประเมินโครงการต่างๆข้างต้นและสรุปข้อเสนอแนะเชิงนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการสนับสนุนรถโดยสารไฟฟ้าในทวีปยุโรป ดังนี้

- สร้างความตระหนักในด้านการจัดการพลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนรถใหม่หรือปรับตารางเดินรถ
- รวมการขนส่งสาธารณะในแผนการจัดการพลังงานท้องถิ่น
- ให้ทุนอุดหนุนอย่างต่อเนื่อง
- ให้การอุดหนุนนวัตกรรมเพื่อการสนับสนุนวิธีการจัดการพลังงานในภาคขนส่ง
- บังคับใช้ข้อกำหนดและมาตรฐานต่างๆ เพื่อสนับสนุนวิธีการจัดการพลังงานในภาคขนส่ง

ตัวอย่างการใช้รถไฟฟ้าในเมืองเวียนนา ภาครัฐให้ความสำคัญต่อการจัดการมลพิษในเขตเมืองเก่าและส่งเสริมการขนส่งสีเขียว จึงได้มีการจัดหารถไฟฟ้าขนาดเล็ก (Minibus) โดยให้บริษัท Wiener Linien ซึ่งเป็นบริษัทเดินรถที่เมืองเวียนนาเป็นเจ้าของจัดหารถโดยสารไฟฟ้าขนาดเล็ก ในเบื้องต้นบริษัท Wiener Linien ได้จัดหาบริษัทผู้ผลิตรถโดยสารไฟฟ้าเพื่อทดลองวิ่งจำนวน 4 บริษัท และภายหลังจากการสาธิตมี 2 บริษัทไม่ผ่านการทดสอบเนื่องจากขนาดที่ใหญ่เกินไปหรืออัตราสิ้นเปลืองไม่ผ่านข้อกำหนดเบื้องต้น ทั้งนี้ในการชาร์จ

ไฟฟ้าในเมืองเวียนนาจะใช้ Pantograph ที่ติดตั้งอยู่ที่รถ แตะกับสายส่งไฟฟ้าสำหรับรถรางในเมือง ในการทดลองวิ่งเมืองเวียนนาได้กำหนดเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

- ขนาดความกว้าง ยาว และสูงที่เหมาะสมกับสภาพถนนของเมือง
- มี 2 ประตู เป็นแบบพื้นต่ำ (Low Floor) และบรรทุกผู้โดยสารอย่างน้อย 30 คน
- ชาร์จไฟผ่านสายส่งไฟฟ้าเหนือศีรษะ และอาจจะมีช่องเสียบบนตัวรถเพิ่มเติม
- เวลาในการชาร์จสูงสุด 15 นาที
- ระยะทางการวิ่งขั้นต่ำ 150 กิโลเมตร
- รถโดยสารจะต้องไม่ถูกนำออกมาจากการให้บริการเพื่อซ่อมแซมก่อน 30,000 กิโลเมตรแรก

ทั้งนี้เมืองเวียนนาแบ่งสัดส่วนการประเมินดังนี้

- ราคา (รวมราคาของการเปลี่ยนแบตเตอรี่และการให้บริการ) ร้อยละ 45
- เทคโนโลยี (เช่น ขนาดมิติ จำนวนที่นั่ง ประเภทของประตู) ร้อยละ25
- ความเชื่อมั่น (เช่น เวลาในการชาร์จ จำนวนรอบการชาร์จ) ร้อยละ 10

จากผลการเดินรถเบื้องต้นพบว่าระยะเวลาในการชาร์จจริงคือ 5-8 นาที ดังนั้นในอนาคตจะมีการกำหนดให้ระยะเวลาในการชาร์จไม่เกิน 5 นาที และนอกจากนี้จะมีการให้ทดลองวิ่งรถโดยสารความยาว 12 เมตรเพิ่มเติมด้วย

3.1.2.2 ประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเทศสหรัฐอเมริกามีการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าในรัฐต่างๆ ได้แก่ California, Colorado, Florida, Georgia และ Virginia เป็นต้น โดยตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีการใช้จริงในประเทศสหรัฐอเมริกา

ในปี พ.ศ. 2533 มลรัฐแคลิฟอร์เนียได้กำหนดกลยุทธ์ให้ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปลดปล่อยมลพิษจากภาคขนส่งโดยสนับสนุนให้มีการใช้ยานยนต์ที่ปลดปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (Zero-emission Vehicles, ZEV) ซึ่งโครงการ ZEV ดังกล่าว คณะกรรมการทรัพยากรอากาศแห่งแคลิฟอร์เนีย (California Air Resources, Board ARB) ได้ปรับข้อกำหนดการเดินรถโดยสารในเดือนมกราคม พ.ศ.2543 โดยมีการสาธิตรถโดยสารที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษ ซึ่งนำไปสู่ความต้องการสั่งซื้อที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 15 และยังกระตุ้นให้อุตสาหกรรมเกิดความตื่นตัวในการพัฒนาเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้มลรัฐแคลิฟอร์เนียได้ตั้งเป้าในการใช้รถโดยสารไฟฟ้าดังนี้

- ปี พ.ศ. 2558 สังคมมีความพร้อมในการใช้รถโดยสารไฟฟ้าแบบเสียบปลั๊กและใช้ไฮโดรเจน รวมไปถึงโครงสร้างพื้นฐาน
- ปี พ.ศ. 2563 มลรัฐแคลิฟอร์เนียจะจ้องมีความพร้อมในด้านโครงสร้างพื้นฐานในการชาร์จไฟฟ้าเพื่อสนับสนุนยานยนต์ที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษ 1 ล้านคัน และมีการใช้ยานยนต์ที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษสาธารณะและใช้ในการขนส่งอย่างแพร่หลาย
- ปี พ.ศ. 2568 มีการใช้ยานยนต์ที่ไม่ปลดปล่อยมลพิษมากกว่า 1.5 ล้านคันและตลาดกำลังขยายตัว

ตารางที่ 3-4 ตัวอย่างคุณลักษณะของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกา

Manufacturer	Model	Type	Battery Type	Battery Capacity (kWh)	Electric Rage (Miles)	Charging Time	Charging Specifications	Seating Capacity (Seats/max)
Astonbus*	E-City 12.0	Electric	Iron Phosphate Lithium	360	approx. 310	6 to 8 hours	400V/100A	30/41
	E-City 10.0	Electric	Not specified	230	approx. 310	6 to 8 hours	400V/100A	30/41
	City DD.0	Electric	Not specified	330	Not specified	Not specified	Not specified	72 (double decker bus)
DesignLine	Eco Smart1	Electric	Not specified	Not specified	Not specified	Not specified	Not specified	42
Ebus	Ebus 22	Electric	Nickel Cadmium Liquid Cooled	Not specified	Not specified	30 minutes with fast charger	90 kW fast charger (cost: $58,000)	22/32
	Seris Hybrid	Electric Rage Extended	Nickel Cadmium Liquid Cooled	Not specified	Not specified	Overnight with standard changer	25kW standard Changer, 90 kW fast charger (cost: $58,000)	22
Fisher Coachworks	GTB-40ex	Electric	Sodium Nickel chloride, evaluating lithium Ion, Lithium phosphate and titanium Oxide for future use	210	120	Not specified	Not specified	44/80
Fisher Coachworks	GTB-40ex	Electric Rage Extended	Sodium Nickel chloride, evaluating lithium Ion, Lithium phosphate and titanium Oxide for future use	70	300+	Not specified	Not specified	44/80
Pioneer Bus	eBus-40	Electric	Lithium Iron	Not specified	125	6 hours standard; less than 30 minutes with rapid charger	Not specified	33/80
Proterra	Ecoride BE35	Electric	Proprietary TerraVolt Energy Storage System	55	24-30	FastFill charging station 6 to 10 minutes	440v, 1200A (500KW)	38/72
Sinautec	Ultracap Bus	Electric	5.9 kWh ultracapacitors		3.5-6	30 seconds at bus stops;5 to 10 minutes at terminal stops	Not specified	41

* Astonbus also E-City bus models 8.1 and 11.0, but specifications for these buses were not available

3.1.2.3 ประเทศจีน

รัฐบาลจีนให้ความสนใจในการสนับสนุนเชื่อเพลิงทางเลือก (Alternative Vehicle Fuel ,AVF) และยานยนต์ที่ใช้พลังงานทางเลือก (Alternative Vehicle Fuel ,AVF) ซึ่งรวมไฟถึงรถโดยสาร ทั้งนี้รัฐบาลได้กำหนดมาตรการต่างๆ ในการสนับสนุนให้เกิดการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องรวมไปถึงการสร้างตลาดในปี พ.ศ.2552 ได้มีการประกาศโครงการสาธิตยานยนต์ไฟฟ้า "Ten Cities, Thousand Vehicles" กำหนดให้เมืองที่เข้าร่วมมียานยนต์ไฟฟ้าเมืองละ 1,000 คัน โดยในปี พ.ศ.2554 มีเมืองที่เข้าร่วมทั้งหมด 25 เมือง และมียอดสะสมของยานยนต์ไฟฟ้า (ไม่นับรวมรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า) ถึงปี พ.ศ.2555 ทั้งหมด 27,660 คัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นรถแท็กซี่ไฟฟ้าและรถโดยสารไฟฟ้าขนาดใหญ่

ตารางที่ 3-5 ตัวอย่างคุณลักษณะของรถโดยสารไฟฟ้าที่มีใช้งานในประเทศจีนตามเมืองต่างๆ

- **ปักกิ่ง**

Model Name	OEM	Vehicle Type	L/W/H (mm)	Battery Capacity	Driving Range	Remark
BJ6123C6B4D	Beijing foton	EV	11850 mm 2540 mm 3330 mm	115 kWh	150 Km	Battery from Beiad Xianxing Battery Co. Ltd
BK6122EV	Beijing Jinghua Bus Co.LTD	EV	11850 mm 2540 mm 3300 mm	N/A	100 Km	Jinghua Bus is not a mature OEM, it is only categorized in China as modification plant.
BK6120EV	Beijing Jinghua Bus Co.LTD	EV	11580 mm 2490 mm 3200 mm	N/A	100 Km	Jinghua Bus is not a mature OEM, it is only categorized in China as modification plant.

- **เมืองเซี่ยงไฮ้**

Model Name	OEM	Vehicle Type	L/W/H (mm)	Battery Capacity	Driving Range	Remark
SWB6121EV1	Sunwin Bus	EV	11,980 2,550 3,160	300 kWh	>150 KM	Jointly developed with SAIC
HFF6120G03EV	AnKai Bus	EV	12,000 2,550 3,100	500 kWh	200 KM	Shanghai Leibo New Energy Co. LTD provided powertrain solutions
HFF6127K46EV	Ankai Bus	EV (Battery+ Super capacitance)	12,000 2,500 3,550	500 kWh	150 KM	Shanghai Leibo New Energy Co. LTD provided powertrain solutions
SXC6120GD	Shanghai Wanxiang Bus	EV (Battery+ Super capacitance)	11,940 2,490 3,060	500 kWh	300 KM	Jointly developed with SAiC

- **เมืองเซินเจิ้น**

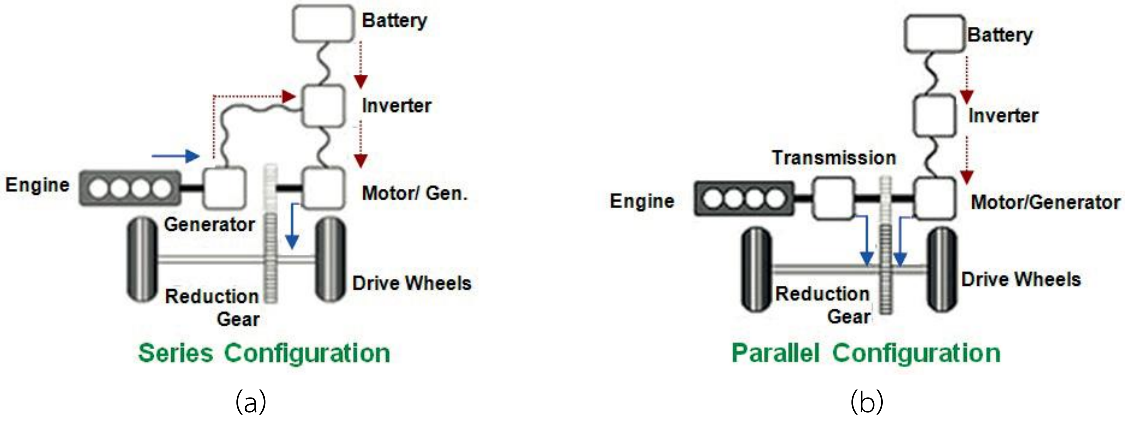
Model Name	OEM	Vehicle Type	L/W/H (mm)	Battery Capacity	Driving Range	Remark
WuzhoulongFDG6113EVG	Shenzhen Wuzhoulong	EV	11490 2480 2910	N/A	300 KM	Wuzhoulong is a Shenzhen local bus maker,also producing hybrid bus
BYDK9CK6120HGEV	Shebzhen BYD	EV	12000 2550 3300	324 kWh	250 Km	Made in Changsha plant. Also equipped solar battery on the roof of the bus

3.2 เปรียบเทียบรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าไฮบริด

รถไฟฟ้าไฮบริดมีความแตกต่างจากรถไฟฟ้าในส่วนที่รถไฟฟ้าไฮบริดนั้นเป็นการผสมผสานการทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน และมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับเป็นต้นกำลังให้แก่รถเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยรูปแบบของรถไฟฟ้าไฮบริดนั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก โดยจำแนกตามรูปแบบการขับเคลื่อนดังนี้

1. รถไฮบริดแบบอนุกรม
2. รถไฮบริดแบบขนาน

โดยรูปแบบการขับเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3-1 รูปแบบระบบขับเคลื่อนและส่งกำลังสำหรับรถไฟฟ้าไฮบริด (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน

รถไฮบริดชนิดแรกซึ่งเป็นรถไฮบริดแบบอนุกรมนั้นจะเป็นประเภทที่ประเทศไทยมีใช้อยู่นานแล้วโดยจะเป็นการใช้ในการขนส่งประเภทรางและหัวรถจักรที่ใช้อยู่ในการรถไฟแห่งประเทศไทยนั่นเอง โดยหลักการของรถไฮบริดประเภทนี้คือ มีเครื่องยนต์สันดาปภายในทำหน้าที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกป้อนให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนรถ และส่วนหนึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่ ด้วยเหตุนี้ มอเตอร์ที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนรถไฟฟ้าไฮบริดจะต้องมีพิกัดกำลังเทียบเท่ากับพิกัดกำลังของเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ในส่วนของรถไฮบริดแบบขนานนั้น เครื่องยนต์และมอเตอร์จะทำงานผสมผสานกัน โดยขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิตในการออกแบบให้ช่วงการทำงานช่วงใดควรจะใช้กำลังจากมอเตอร์หรือเครื่องยนต์ ระบบนี้จะเป็นระบบที่ถูกใช้ในรถยนต์ขนาดเล็กและมีการพัฒนาเป็นแบบผสมร่วมกับรถไฮบริดแบบอนุกรมเพื่อให้ได้สมรรถนะและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารถไฟฟ้าไฮบริดแล้วจะพบว่า มีข้อดีและข้อเสียดังพอสรุปได้ดังนี้

ข้อดี

- ประหยัดน้ำมันเนื่องจากเครื่องยนต์ไม่จำเป็นต้องทำงานหนักและมีการช่วยขับเคลื่อนจากมอเตอร์ในกรณีของรถไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน
- แบตเตอรี่มีน้ำหนักเบา กรณีรถไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน เนื่องจากมอเตอร์ไม่ได้รับผิดชอบต่อการขับเคลื่อนรถตลอดเวลา
- พลังงานที่ได้จากการเบรคสามารถนำมาชาร์จแบตเตอรี่ได้เช่นเดียวกับรถไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่

ข้อเสีย

- ระบบขับเคลื่อนมีความซับซ้อนกว่ารถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์และรถไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เนื่องจากระบบส่งกำลังต้องถูกออกแบบให้เกิดการประสานกันระหว่างเครื่องยนต์
- เกิดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายใน ถึงแม้ว่าจะน้อยกว่ากรณีของรถยนต์ปกติ แต่เนื่องจากมีเครื่องยนต์ จึงทำให้รถไฮบริดยังส่งมลพิษสู่อากาศอยู่
- การซ่อมบำรุงต้องคำนึงถึงระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์และมอเตอร์ทำให้ค่าบำรุงรักษาสูงกว่ารถที่ใช้เครื่องยนต์ธรรมดาและรถยนต์ไฟฟ้า

จากคุณสมบัติและข้อสรุปข้างต้นจะพบว่าการใช้รถไฮบริดนั้นไม่ถือว่าเป็นพลังงานสะอาด 100% เนื่องจากมีการปล่อยมลพิษสู่อากาศจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งทำให้การใช้รถไฟฟ้าไฮบริดไม่สอดคล้องกับความต้องการของรัฐบาลที่ต้องการเทคโนโลยีสะอาดไม่มีการปล่อยมลพิษออกสู่อากาศ

บทที่ 4
ข้อมูลเบื้องต้นของการเดินรถตามเส้นทางที่กำหนด

เนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลการบันทึกลักษณะการเดินรถโดยสารประจำทางตามเส้นทางที่กำหนดซึ่งแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 สายรถและเส้นทางเดินรถโดยสารประจำทาง

สายรถ	เส้นทาง
137	(วงกลม) รามคำแหง – ถนนรัชดาภิเษก
205	อู่คลองเตย – เดอะมอลล์ท่าพระ
4	ท่าเรือคลองเตย – ท่าน้ำภาษีเจริญ
515	ราชมงคลวิทยาเขตศาลายา – อนุสาวรีย์ชัยฯ
16	หมอชิต 2 – สุรวงศ์
49	หมอชิต 2 – หัวลำโพง

วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อให้ทราบถึงระยะทางและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถโดยสารที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันตลอดจนปริมาณเชื้อเพลิงที่ต้องการ เพื่อใช้ในการประเมินขนาดของต้นกำลังและระบบขับเคลื่อนของรถโดยสายไฟฟ้า รถโดยสารประจำทางที่ใช้ในการทดสอบในเบื้องต้นได้แก่ สาย 4 หมายเลข 4-4018 และ สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035 แสดงหมายเลขรถดังรูปที่ 4-1

ก) สาย 4 หมายเลข 4-4018
(อู่คลองเตย-เดอะมอลล์ท่าพระ)

ข) สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035
(ท่าเรือคลองเตย-ท่าน้ำภาษีเจริญ)

รูปที่ 4-1 แผ่นป้ายประจำรถที่ใช้ในการทดสอบ

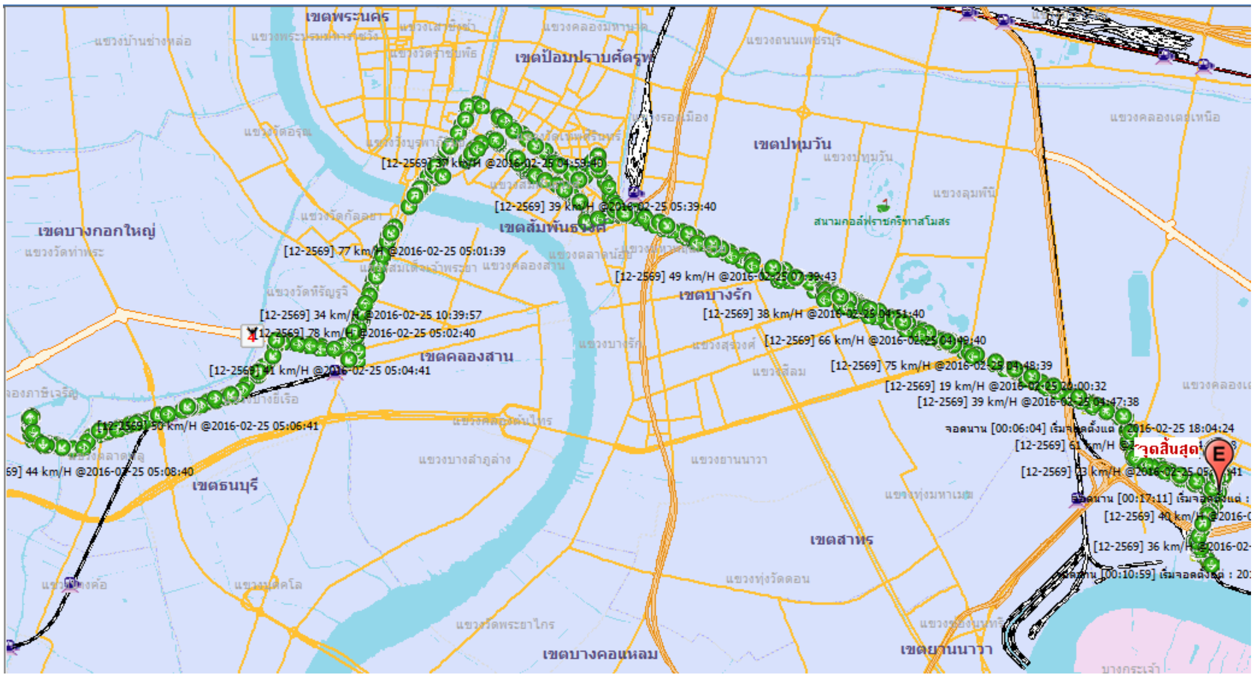
อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกระยะทางและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถโดยสายได้แก่ : GPS FORTH รุ่น ADTRAX : FTS 3G แสดงดังรูปที่ 4-2 ร่วมกับข้อมูลการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงจากสถานีเติมน้ำมัน

รูปที่ 4-2 อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกระยะทางและลักษณะการเคลื่อนที่ของรถโดยสาย

ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์บันทึกระยะทางและลักษณะการเดินรถได้แก่

1. เส้นทางเดินรถซึ่งแสดงดังรูปที่ 4-3 และ 4-4
2. ระยะทางรวมของการเดินรถตลอดทั้งวัน (3:00:00 - 23:59:59 นาฬิกา)
3. ความเร็วสูงสุดของการเดินรถ
4. ช่วงเวลาเดินทางมากที่สุด
    4.1 ระยะเวลารวมของช่วงเวลาที่เดินทางนานที่สุด
    4.2 ระยะทางรวมของช่วงเวลาที่เดินทางนานที่สุด

ตารางที่ 4-2 และ 4-3 แสดงข้อมูลรวมในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 - 10 มีนาคม 2559 ของรถโดยสารปรำจำทาง สาย 4 หมายเลข 4-4018 และ สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035 และปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงตามลำดับ



รูปที่ 4-3 เส้นทางเดินรถของรถโดยสารประจำทางสาย 4 หมายเลข 4-4018

รูปที่ 4-4 เส้นทางเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลการเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 4 หมายเลข 4-4018 ในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 - 10 มีนาคม 2559

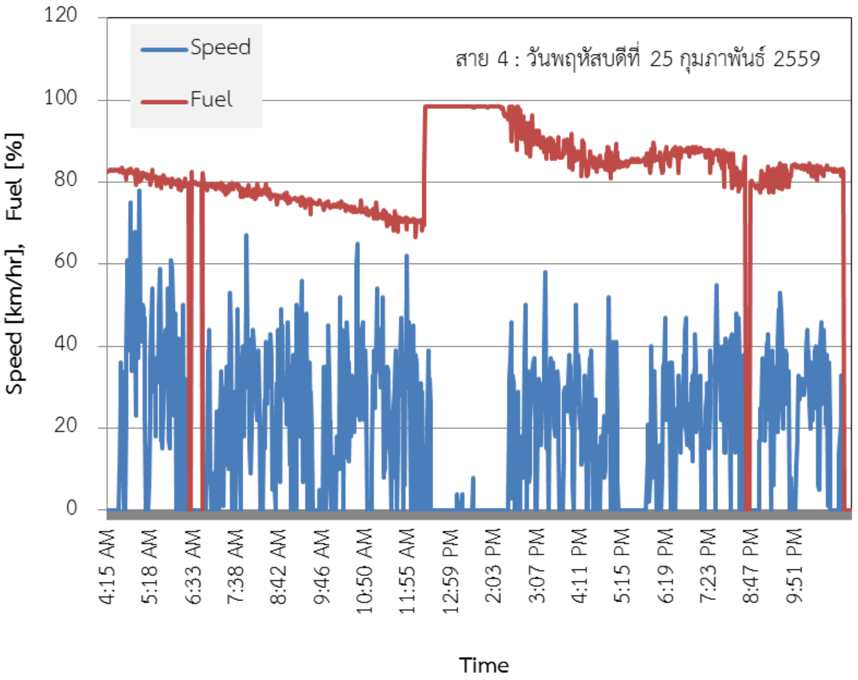
	รถประจำทางสาย 4 [4-4018]				
				ช่วงเวลาเดินทางมากที่สุด	
วันที่	ระยะทางรวมตลอดวัน [km]	ความเร็วสูงสุด [km/h]	ปริมาณเชื้อเพลิง [L]	ระยะเวลา [h]	ระยะทาง [km]
25 กุมภาพันธ์ 2559	180	78	140	13:28	150
26 กุมภาพันธ์ 2559	178	66	140	14:25	148
27 กุมภาพันธ์ 2559	168	76	95	6:32	138
28 กุมภาพันธ์ 2559	115	72	125	2:40	31
29 กุมภาพันธ์ 2559	196	66	145	16:23	166
1 มีนาคม 2559	197	77	145	15:50	167
2 มีนาคม 2559	176	85	110	15:31	146
3 มีนาคม 2559	148	74	165	16:00	148
4 มีนาคม 2559	88	67	60	4:00	30
5 มีนาคม 2559	196	68	140	7:46	107
6 มีนาคม 2559	197	78	150	15:45	167
7 มีนาคม 2559	150	71	135	7:31	89
8 มีนาคม 2559	197	78	135	17:05	167
9 มีนาคม 2559	176	67	120	9:58	146
10 มีนาคม 2559	200	69	170	17:32	177

ตารางที่ 4-3 ข้อมูลการเดินรถของรถโดยสารประจำทาง สาย 205 (4-4035) หมายเลข 4-4035 ในช่วงวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 - 10 มีนาคม 2559

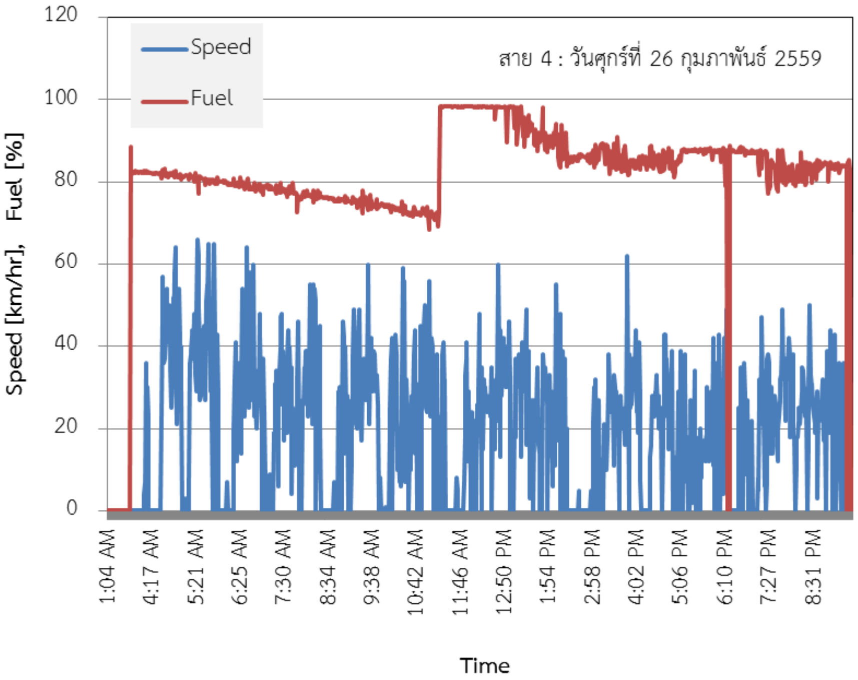
	รถประจำทางสาย 205 (4-4035) [4-4035]				
				ช่วงเวลาเดินทางมากที่สุด	
วันที่	ระยะทางรวมตลอดวัน [km]	ความเร็วสูงสุด [km/h]	ปริมาณเชื้อเพลิง [L]	ระยะเวลา [h]	ระยะทาง [km]
25 กุมภาพันธ์ 2559	293	82	155	5:41	160
26 กุมภาพันธ์ 2559	289	79	160	4:47	227
27 กุมภาพันธ์ 2559	323	78	170	5:51	258
28 กุมภาพันธ์ 2559	195	77	145	9:50	195
29 กุมภาพันธ์ 2559	291	77	155	7:58	291
1 มีนาคม 2559	292	83	165	7:22	128
2 มีนาคม 2559	317	90	155	17:58	284
3 มีนาคม 2559	291	80	155	9:29	160
4 มีนาคม 2559	289	78	90	8:42	289
5 มีนาคม 2559	307	82	0	9:01	160
6 มีนาคม 2559	163	77	120	10:13	163
7 มีนาคม 2559	289	78	155	4:43	225
8 มีนาคม 2559	308	79	160	7:08	160
9 มีนาคม 2559	293	79	165	7:17	260
10 มีนาคม 2559	293	86	170	8:47	160

จากข้อมูลในตารางที่ 4-2 และ 4-3 พบว่ารถโดยสารประจำทาง สาย 4 หมายเลข 4-4018 มีระยะทางเฉลี่ยของการเดินรถตลอดทั้งวันมีระยะทางเท่ากับ 175 km อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.32 km/L ในส่วนรถโดยสารประจำทาง สาย 205 หมายเลข 4-4035 มีระยะทางเฉลี่ยของการเดินรถตลอดทั้งวันมีระยะทางเท่ากับ 288 km อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 2 km/L

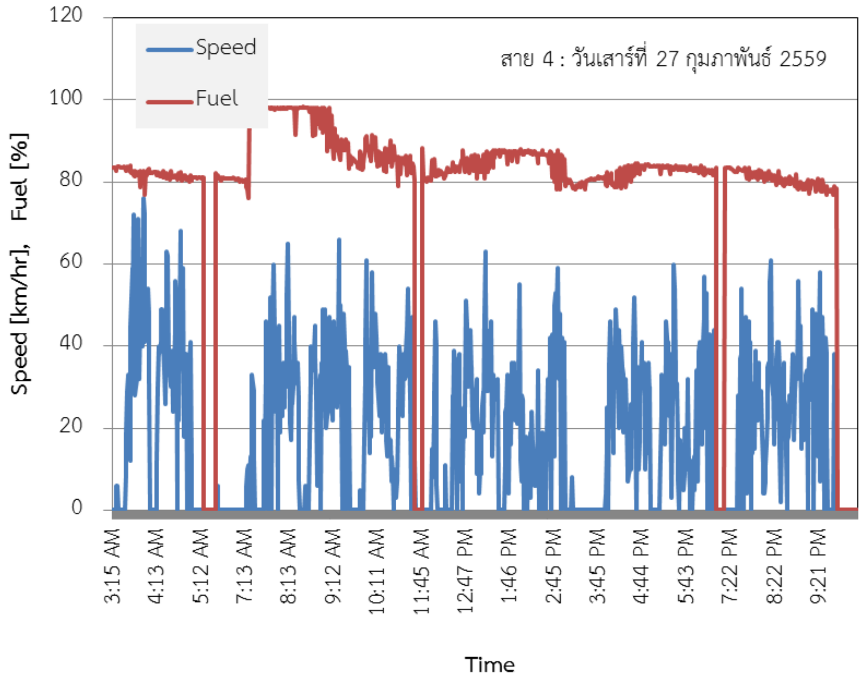
รูปที่ 4-5 ถึง 4-19 แสดงรายละเอียดของการเดินรถโดยสารประจำทางสาย 4 (4-4018) และ รูปที่ 4-20 ถึง 4-35 แสดงรายละเอียดของการเดินรถโดยสารประจำทางสาย 205 (4-4035) (4-4035) ในแต่ละวันตั้งแต่วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559 ถึงวันที่ 10 มีนาคม 2559



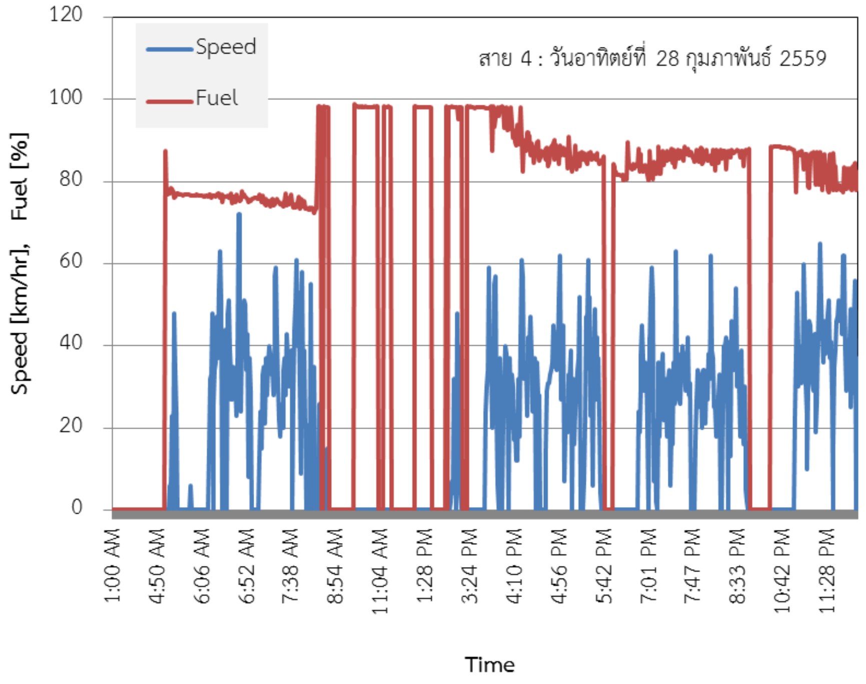
รูปที่ 4-5 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018)
วันพฤหัสบดีที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559



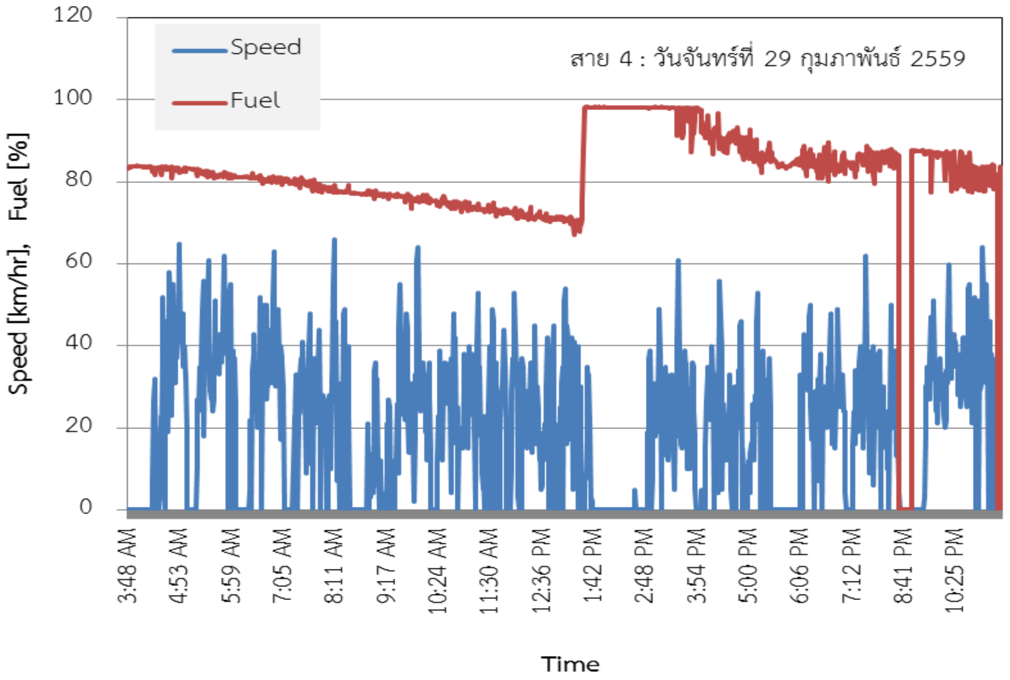
รูปที่ 4-6 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) (4-4018)
วันศุกร์ที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559



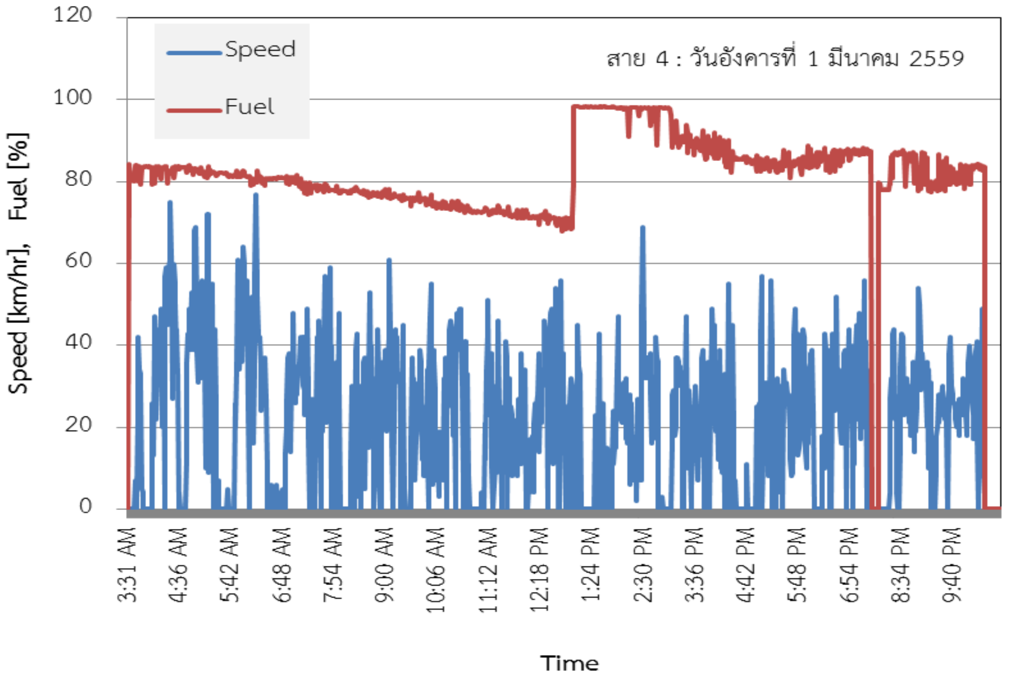
รูปที่ 4-7 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันเสาร์ที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559



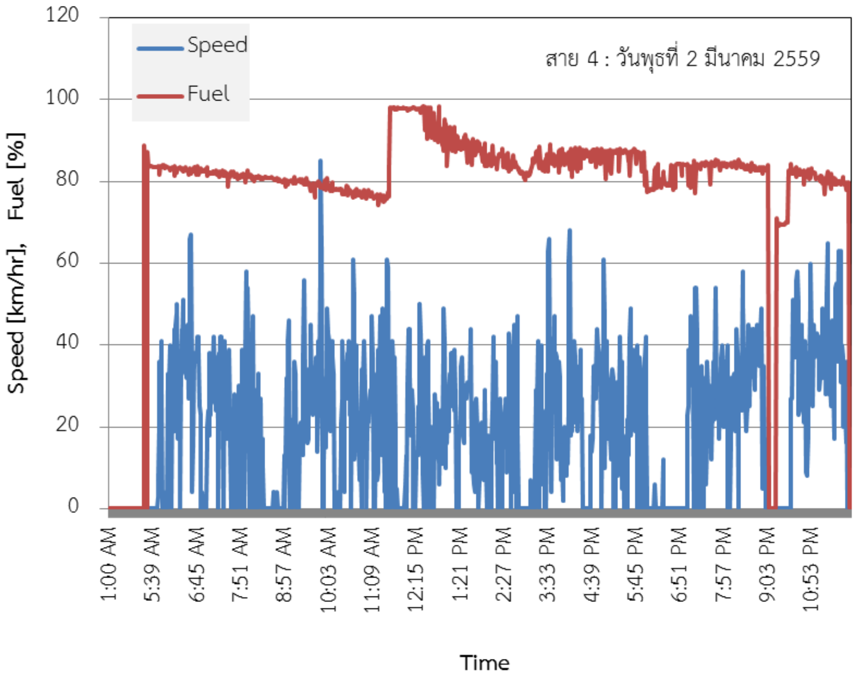
รูปที่ 4-8 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอาทิตย์ที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559



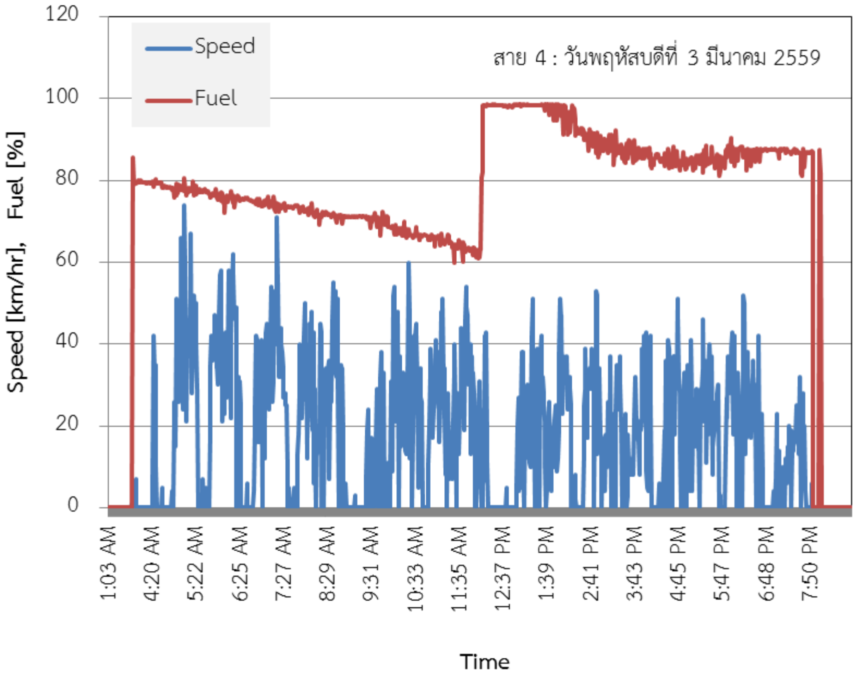
รูปที่ 4-9 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันจันทร์ที่ 29 กุมภาพันธ์ 2559



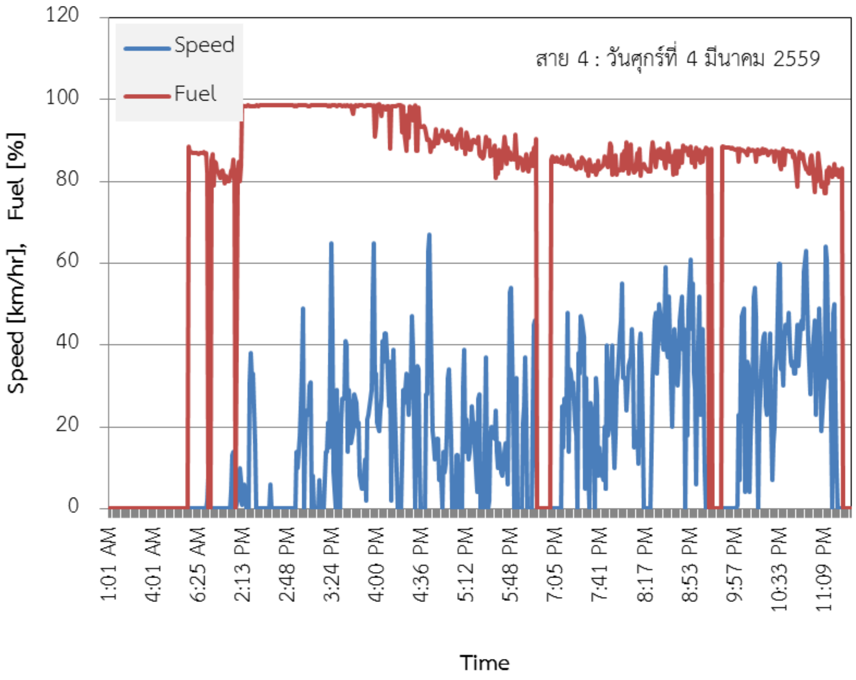
รูปที่ 4-10 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอังคารที่ 1 มีนาคม 2559



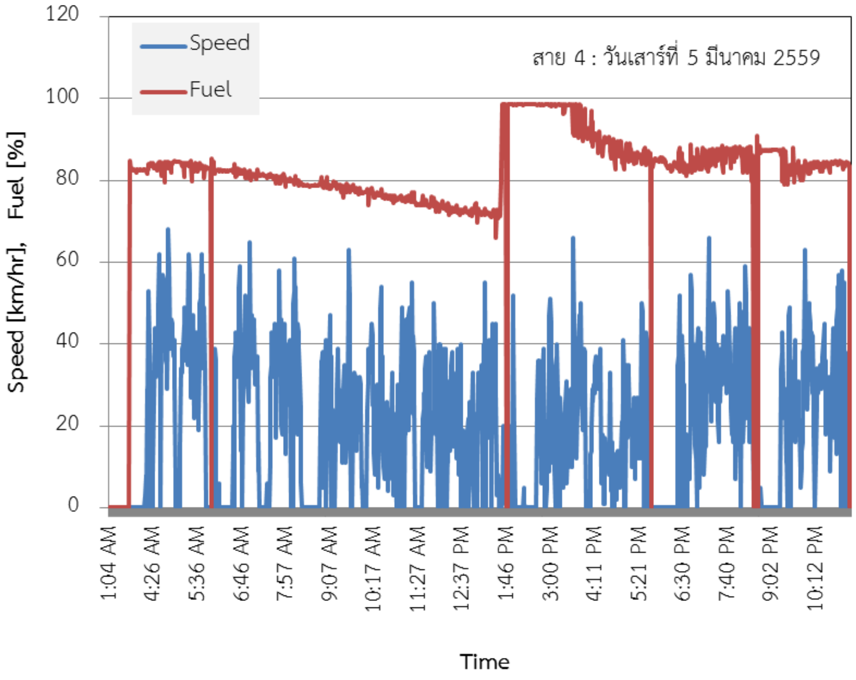
รูปที่ 4-11 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพุธที่ 2 มีนาคม 2559



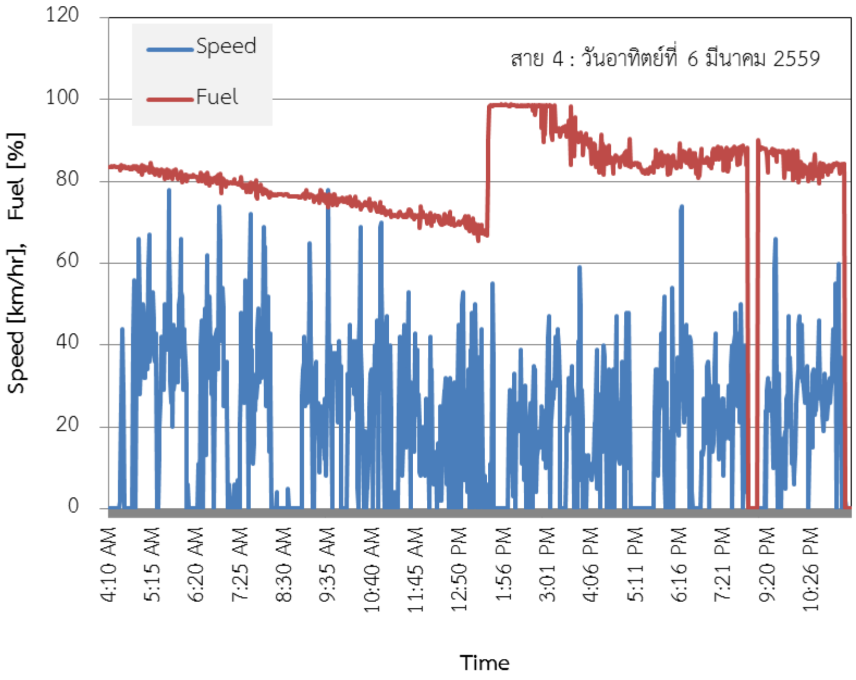
รูปที่ 4-12 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพฤหัสที่ 3 มีนาคม 2559



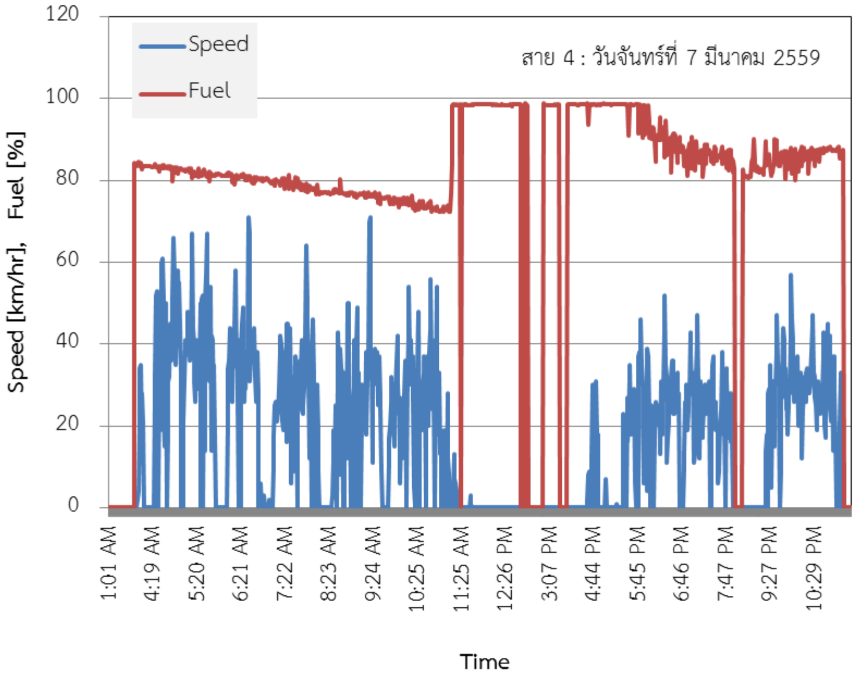
รูปที่ 4-13 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันศุกร์ที่ 4 มีนาคม 2559



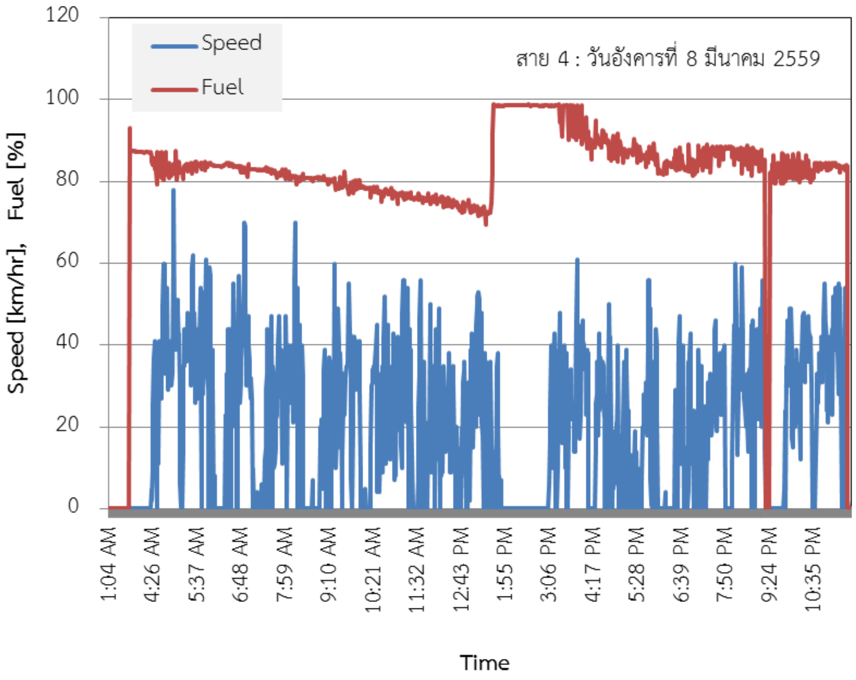
รูปที่ 4-14 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันเสาร์ที่ 5 มีนาคม 2559



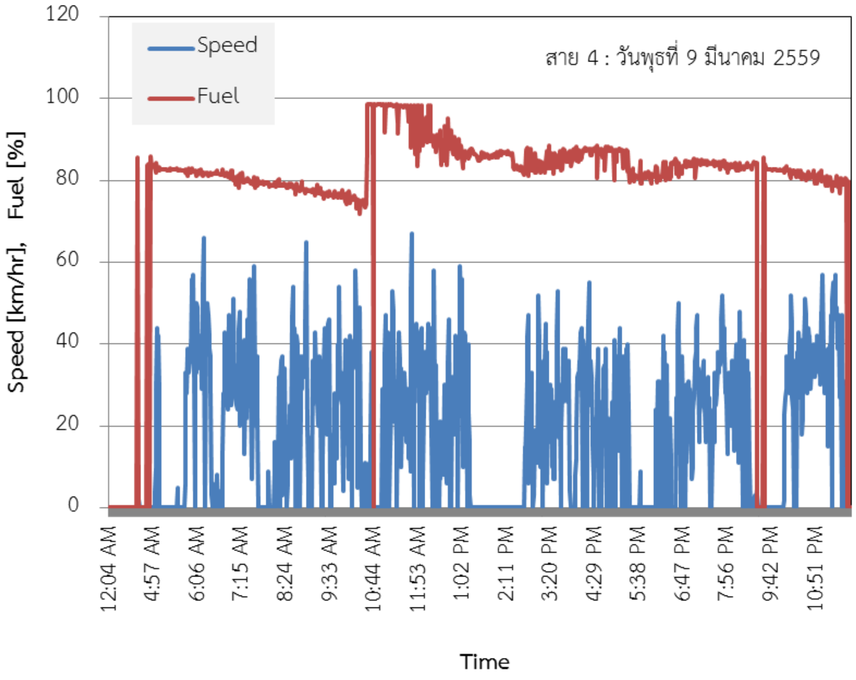
รูปที่ 4-15 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอาทิตย์ที่ 6 มีนาคม 2559



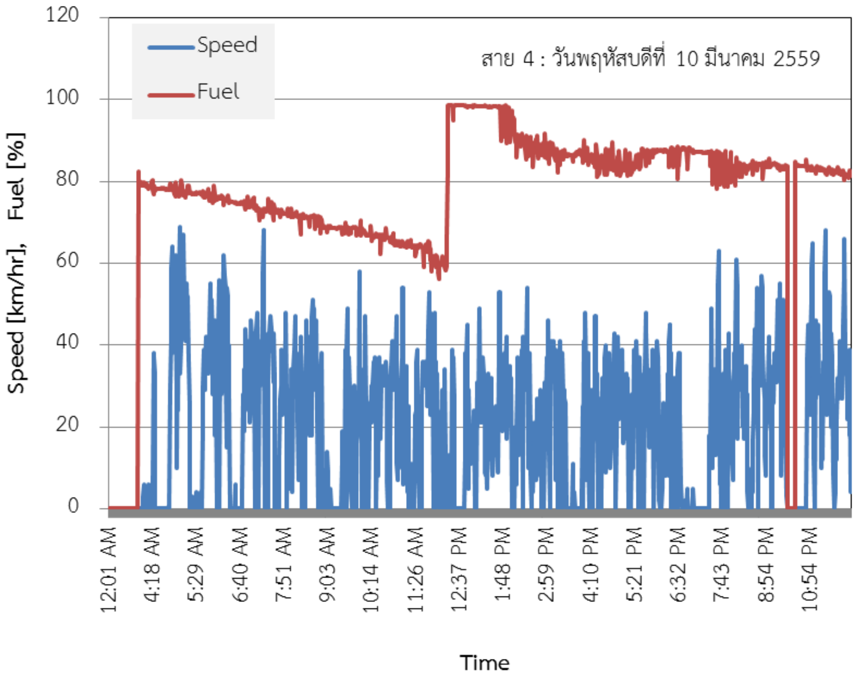
รูปที่ 4-16 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันจันทร์ที่ 7 มีนาคม 2559



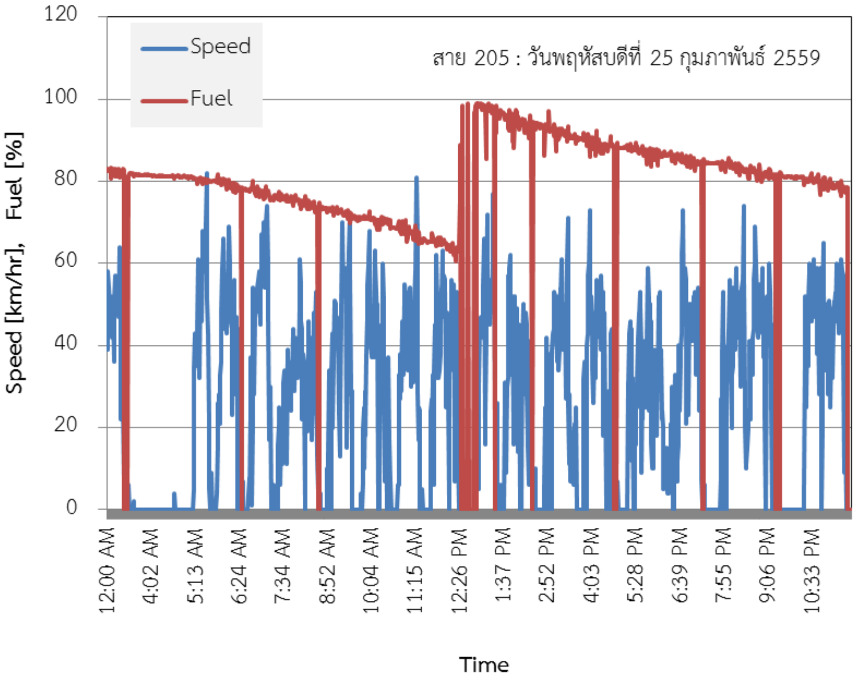
รูปที่ 4-17 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันอังคารที่ 8 มีนาคม 2559



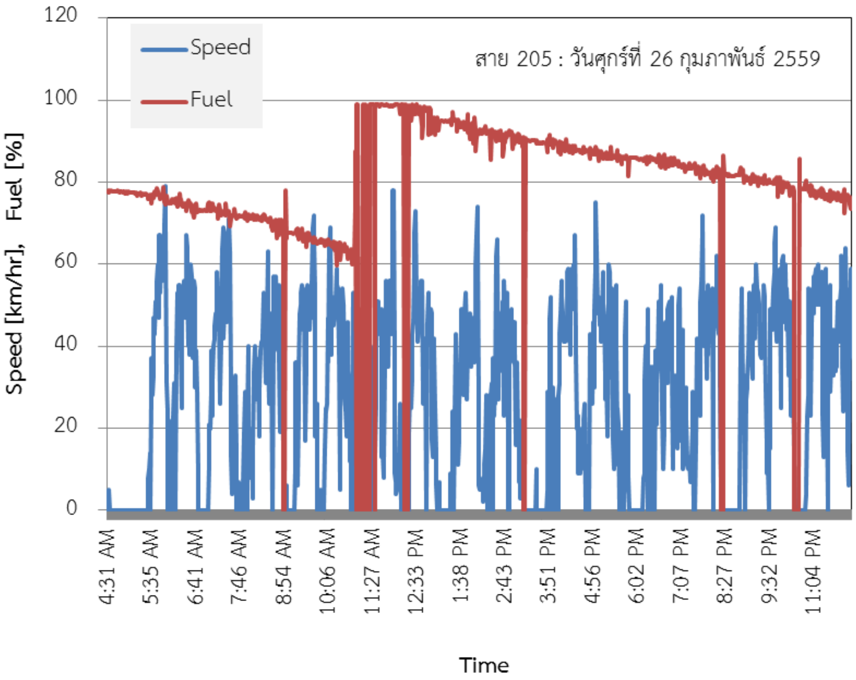
รูปที่ 4-18 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพุธที่ 9 มีนาคม 2559



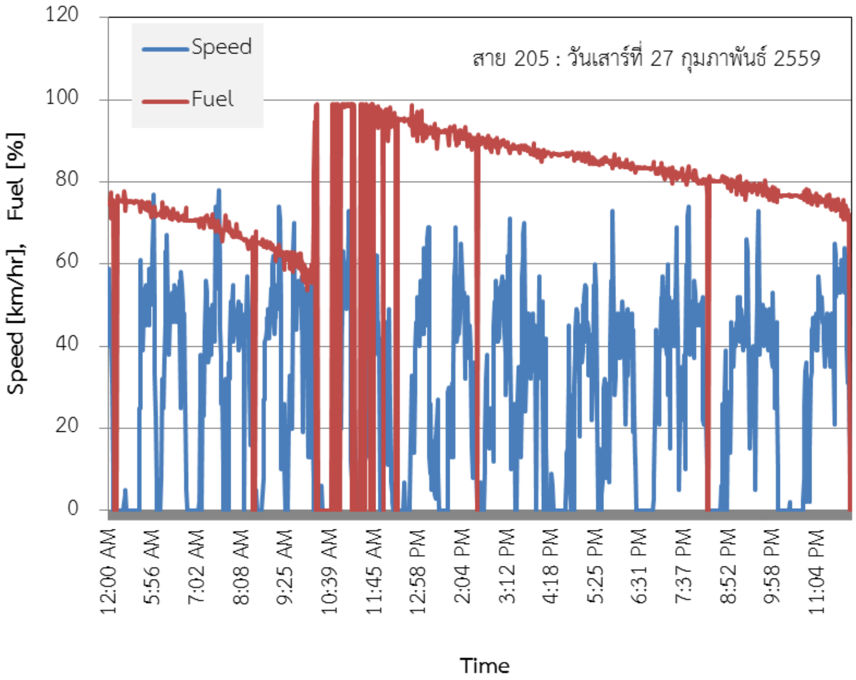
รูปที่ 4-19 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 4 (4-4018) วันพฤหัสที่ 10 มีนาคม 2559



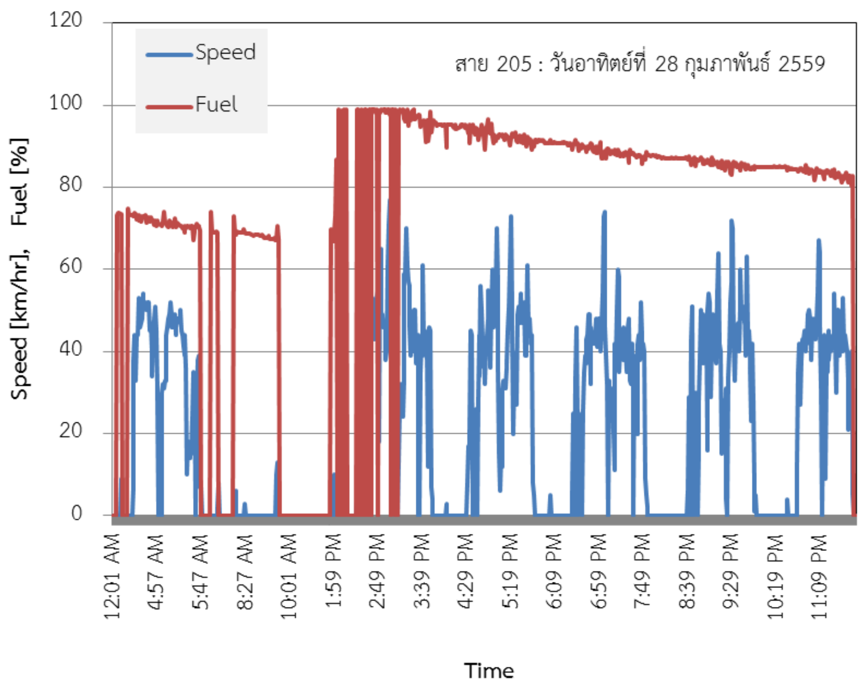
รูปที่ 4-20 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันพฤหัสบดีที่ 25 กุมภาพันธ์ 2559



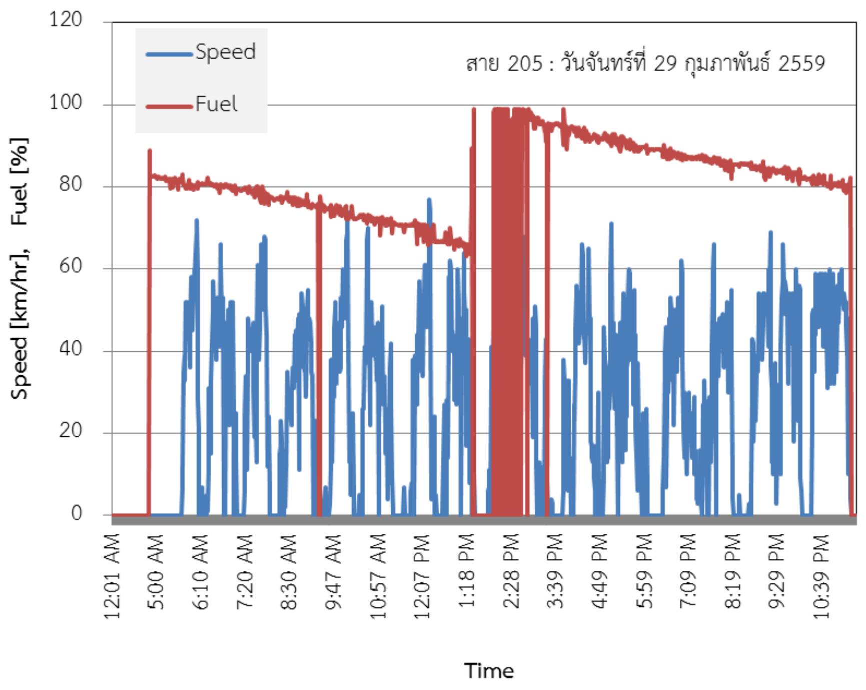
รูปที่ 4-21 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันศุกร์ที่ 26 กุมภาพันธ์ 2559



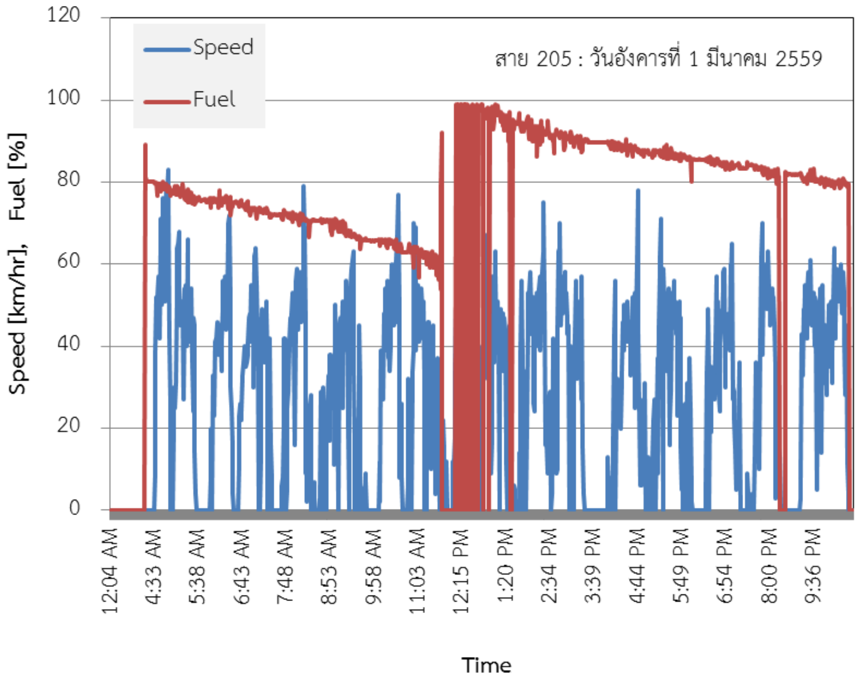
รูปที่ 4-22 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันเสาร์ที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559



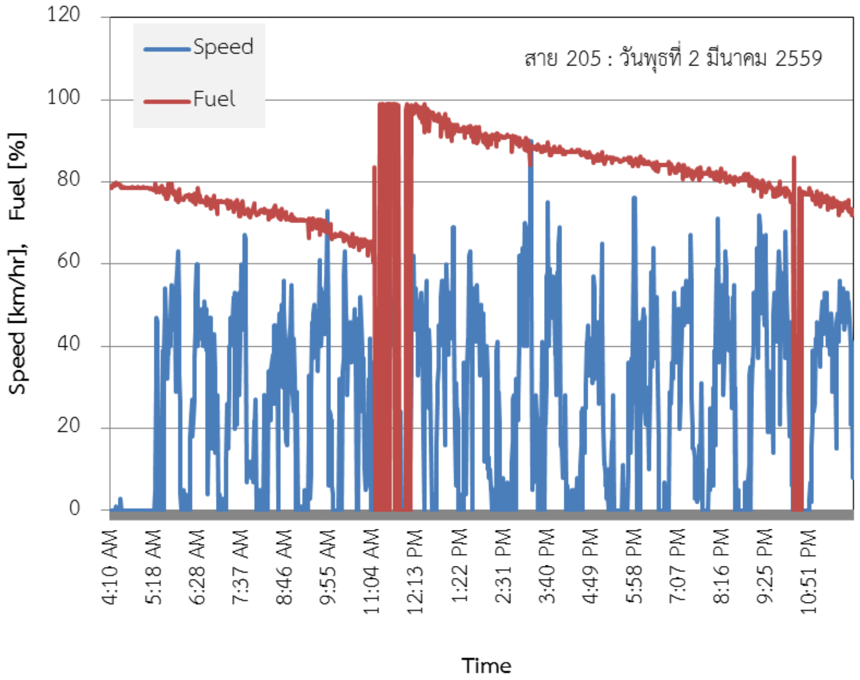
รูปที่ 4-23 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันอาทิตย์ที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559



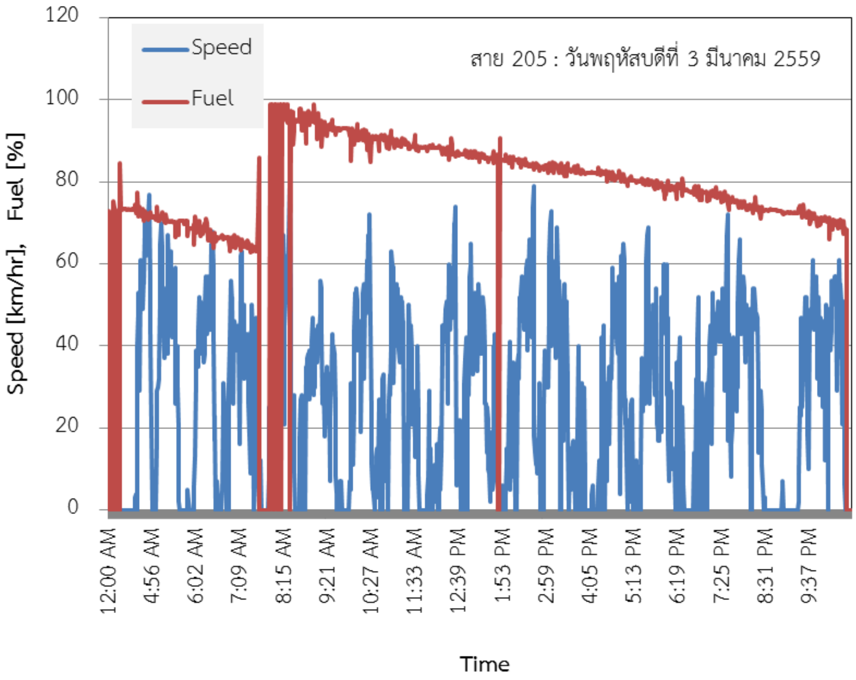
รูปที่ 4-24 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035)
วันจันทร์ที่ 29 กุมภาพันธ์ 2559



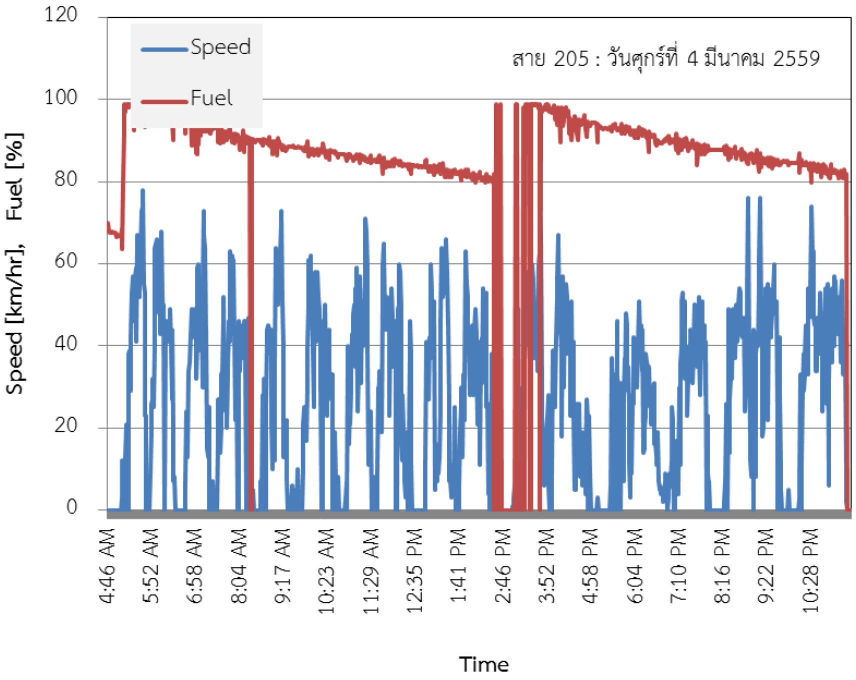
รูปที่ 4-25 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอังคารที่ 1 มีนาคม 2559



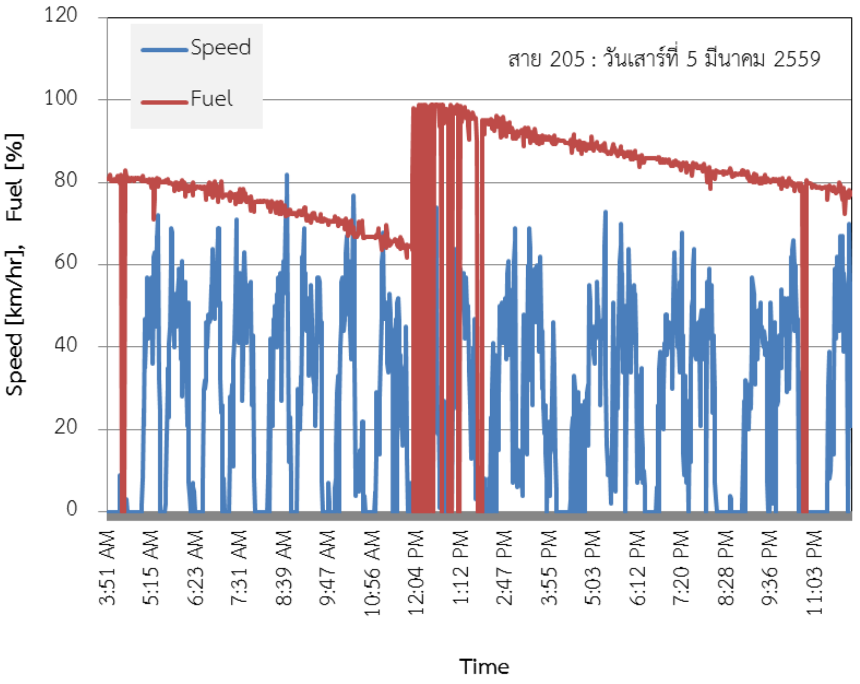
รูปที่ 4-26 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพุธที่ 2 มีนาคม 2559



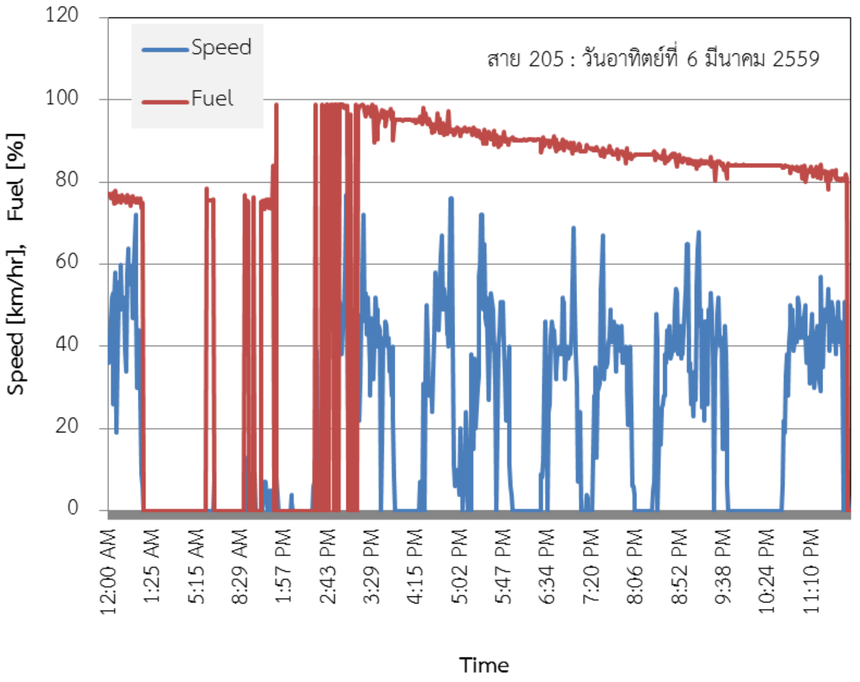
รูปที่ 4-27 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพฤหัสที่ 3 มีนาคม 2559



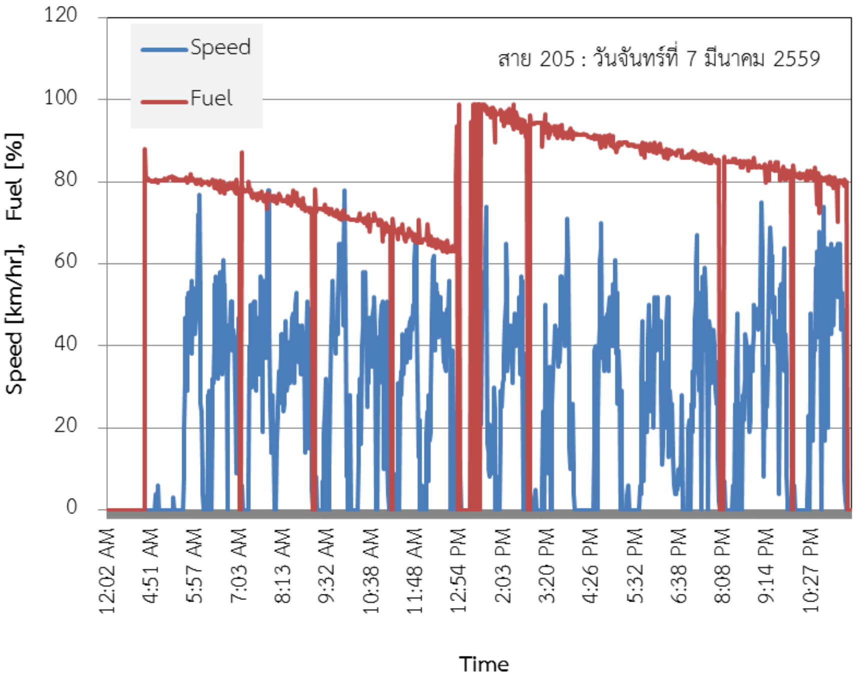
รูปที่ 4-28 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันศุกร์ที่ 4 มีนาคม 2559



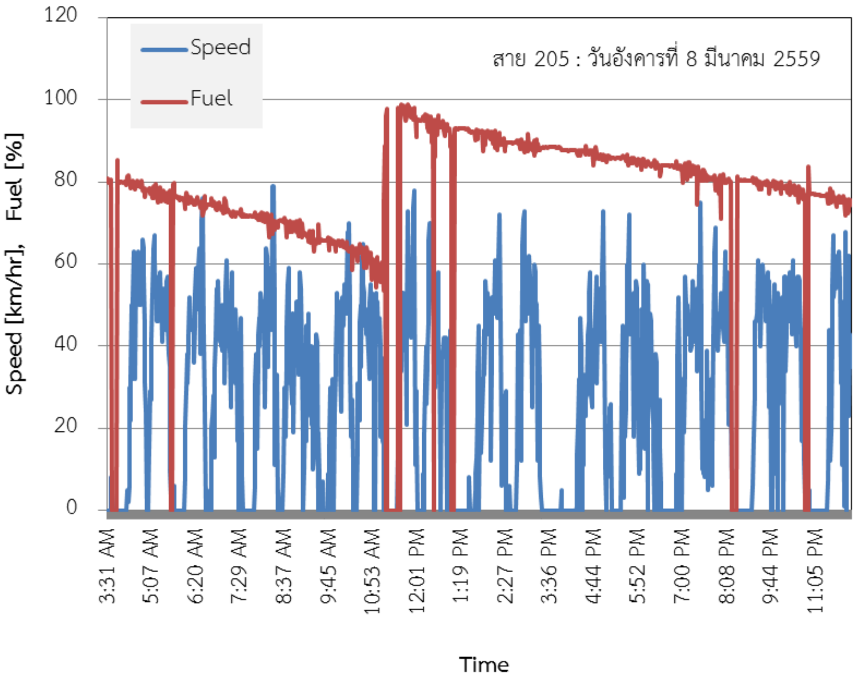
รูปที่ 4-29 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันเสาร์ที่ 5 มีนาคม 2559



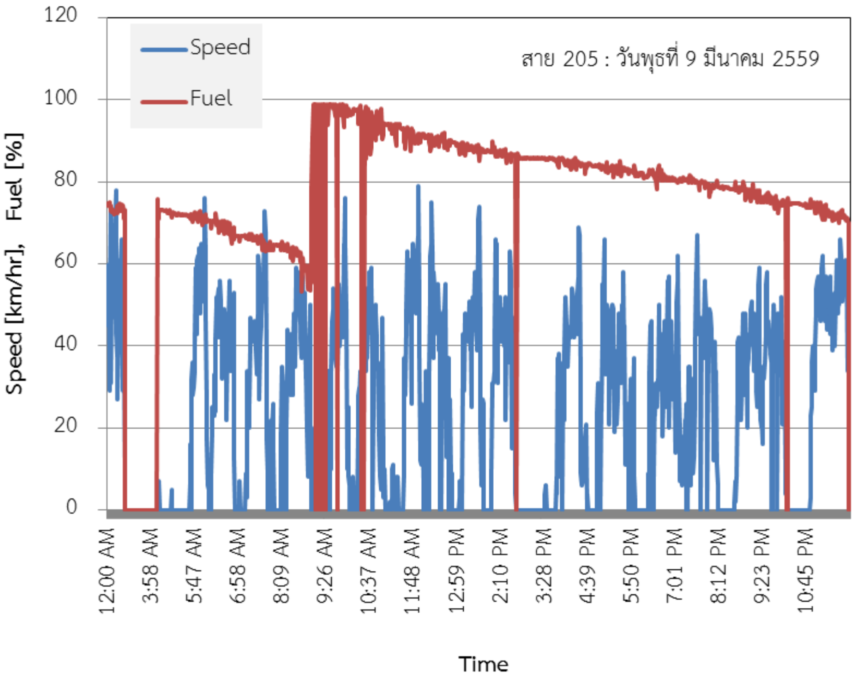
รูปที่ 4-30 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอาทิตย์ที่ 6 มีนาคม 2559



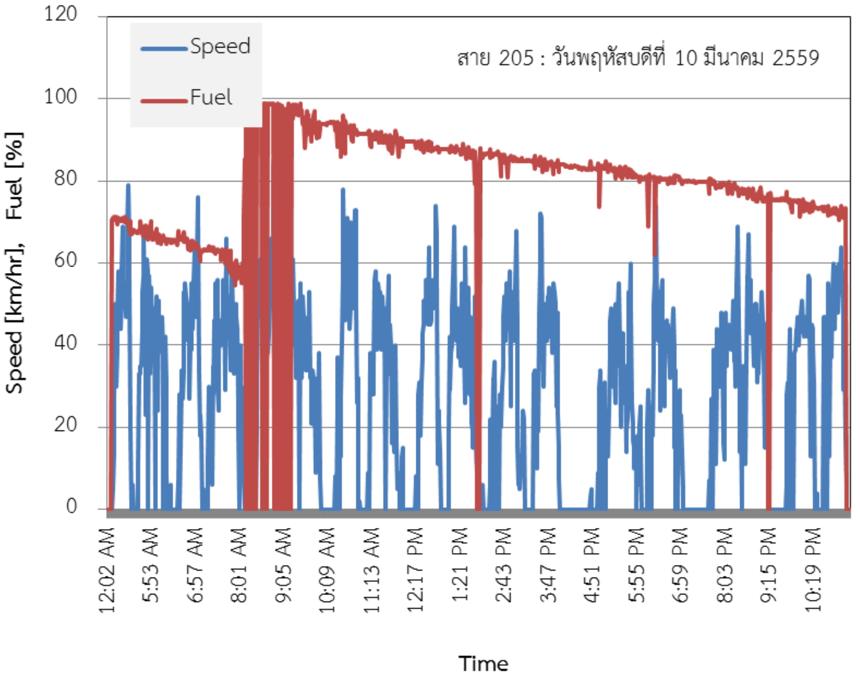
รูปที่ 4-31 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันจันทร์ที่ 7 มีนาคม 2559



รูปที่ 4-32 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันอังคารที่ 8 มีนาคม 2559



รูปที่ 4-33 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพุธ 9 มีนาคม 2559



รูปที่ 4-34 ความเร็วและระดับเชื้อเพลิงของการเดินรถสาย 205 (4-4035) วันพฤหัสที่ 10 มีนาคม 2559

จากข้อมูลความเร็วรถ-เวลา ตั้งแต่รูปที่ 4-5 ถึงรูปที่ 4-35 พบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 0 จนถึงความเร็วสูงสุดในแต่ละรอบของการเร่งความเร็วบ่อยมากแสดงให้เห็นถึงความไม่ต่อเนื่องในการเดินรถ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีการหยุด และเร่งความเร็ว อยู่บ่อย นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความเร็วสูงสุดเฉลี่ยจะพบว่า มีค่าต่ำกว่า 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งบ่งบอกว่ารถเมล์นั้นไม่ได้วิ่งด้วยความเร็วสูงมากนัก ซึ่งเป็นไปด้วยปัจจัยทางกฎหมายจราจรที่จำกัดความเร็วของรถในเมือง และ สภาพการจราจรในเมืองที่มีการติดขัด ทำให้รถไม่สามารถทำความเร็วได้

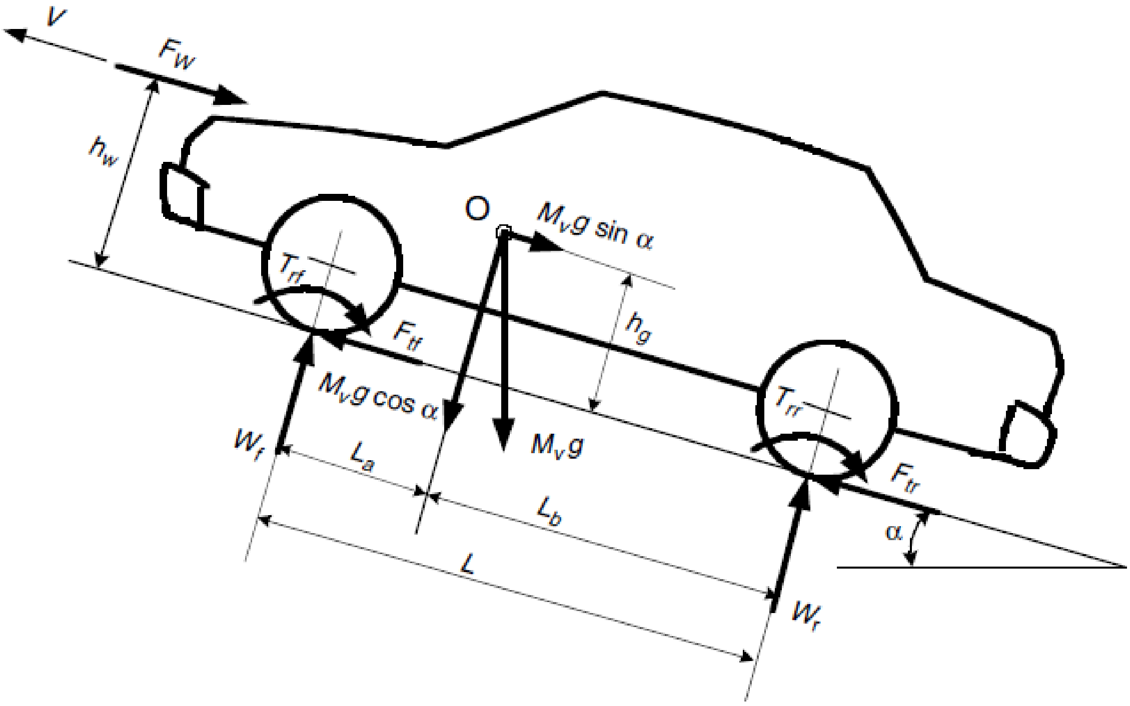
บทที่ 5
รถเมล์ไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน และ การเก็บพลังงาน

- พื้นฐานของรถยนต์
- มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถเมล์ไฟฟ้า
- ระบบส่งกำลัง
- Traction Battery
- สถานีประจุไฟฟ้า (Charging Station)
- ตัวอย่างรถเมล์ไฟฟ้าจากบริษัทต่างๆ

ระบบขับเคลื่อนที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้จะครอบคลุมถึง ประเภทของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน ชนิดของระบบส่งกำลัง ประเภทของแบตเตอรี่และการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับรถเมล์ไฟฟ้า และการประจุแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถเมล์ไฟฟ้าซึ่งหัวข้อดังกล่าวจะถูกจำแนกออกเป็นหัวข้อย่อยดังจะได้กล่าวต่อไป

5.1 พื้นฐานของรถยนต์

ในการพิจารณารถไฟฟ้านั้นจะอาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกับรถที่ใช้เครื่องยนต์ในการขับเคลื่อนโดยพิจารณาจากรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 5-1



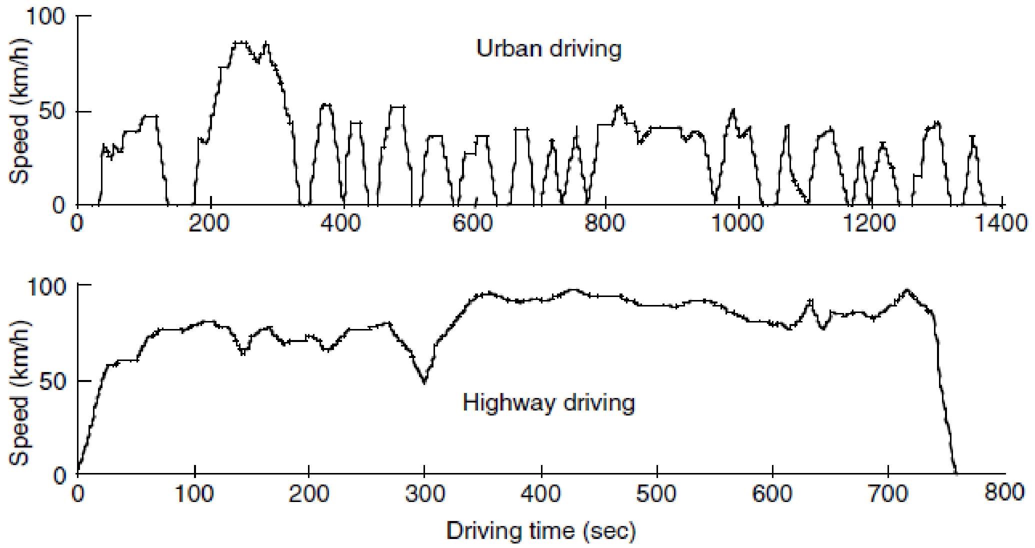
รูปที่ 5-1 ไดอะแกรมแรงกระทำบนรถยนต์[1]

จากรูปที่ 5.1-1 จะพบว่าในการพิจารณาแรงกระทำต่อตัวรถนั้นจะทำการพิจารณารวมไปถึงกรณีที่รถเคลื่อนที่ขึ้นบนถนนทีมีความชันเพื่อการคำนวณกำลังและแรงบิดที่เหมาะสมกับการออกแบบรถยนต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน จากรูปจะพบว่า ในการขับเคลื่อนรถยนต์นั้นจะต้องเอาชนะแรงต้านที่กระทำต่อรถดังสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. แรงเสียดทานที่ล้อ T_{rf} (ล้อหน้า) T_{rr} (ล้อหลัง)
2. แรงต้านอากาศ F_w
3. แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก $F_g = mg\sin\alpha$, α = มุมความชันของถนน

ในกรณีของรถไฟฟ้านั้น ค่าแรงต่างๆจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกพิกัดของมอเตอร์และแบตเตอรี่เพื่อรองรับการใช้งานอย่างเหมาะสมภายใต้สภาพถนนที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ต้องนำมาใช้ในการพิจารณาคือ คาบเวลาในการขับเคลื่อน (driving cycle) ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นกับสภาพการจราจรในแต่ละท้องที่ ปัจจัยข้อนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่รถไฟฟ้าดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นรถโดยสารสาธารณะ โดยตัวอย่างของคาบเวลาในการขับเคลื่อนได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5-2

[1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay and Ali Emadi "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design," CRC PRESS, 2005

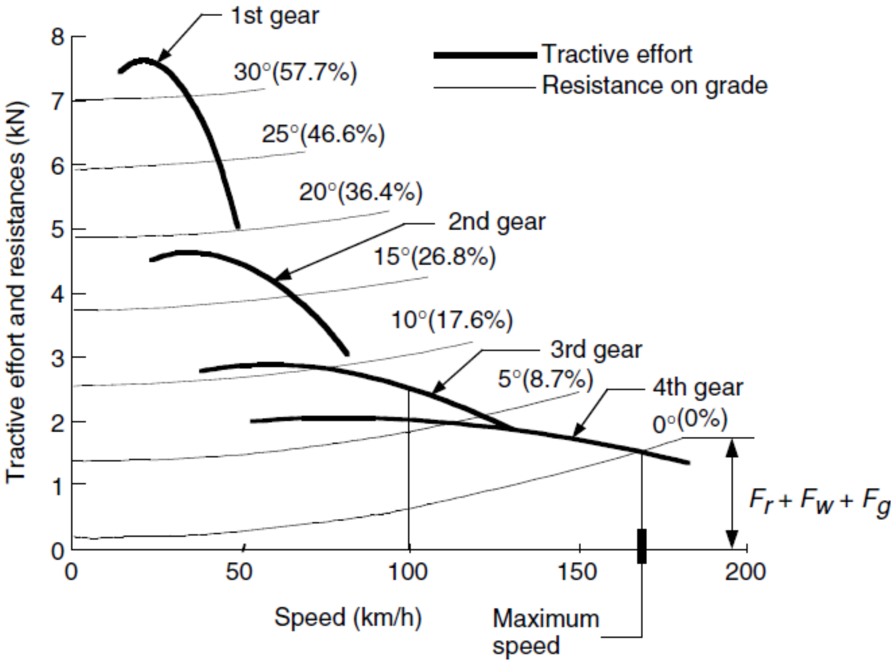


รูปที่ 5-2 ตัวอย่างคาบเวลาในการขับเคลื่อนรถ (บน) ในเมือง (ล่าง) ทางหลวง[1]

จากรูปที่ 5-2 จะพบว่าในกรณีที่เป็นการขับเคลื่อนในเมืองนั้นจะมีการหยุดรถอยู่บ่อยๆ เนื่องด้วยปัจจัยต่างๆ ได้แก่ สภาพการจราจรติดขัด สัญญาณไฟจราจร จุดข้ามถนน เป็นต้น นอกจากนี้ในกรณีของรถเมล์นั้นจะมีปัจจัยการหยุดรถตามป้ายหยุดรถเพิ่มเข้ามาด้วย แต่ในกรณีที่รถขับเคลื่อนบนทางหลวงนั้น จะเป็นการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องส่งผลให้ผลที่ได้ในรูปที่ 5-2 (ล่าง) นั้นเป็นเส้นต่อเนื่อง ความแตกต่างดังกล่าวมีผลอย่างยิ่งต่อการออกแบบ ระบบขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ สำหรับรถเมล์ไฟฟ้าเพื่อที่จะได้รถเมล์ไฟฟ้าที่มีสมรรถนะไม่ด้อยไปกว่ารถเมล์ที่อาศัยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ด้วยเหตุนี้ เนื้อหาในบทนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาระบบขับเคลื่อนสำหรับรถเมล์ไฟฟ้า อันประกอบด้วย มอเตอร์ และระบบส่งกำลัง รวมถึงแบตเตอรี่สำหรับการเก็บสะสมพลังงานและการประจุแบตเตอรี่ เพื่อเป็นปัจจัยในการพิจารณาเลือกรถเมล์ไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยมีเนื้อหาดังแสดงในหัวข้อถัดไป

5.2 มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับรถเมล์ไฟฟ้า

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถเมล์ไฟฟ้านั้นจะใช้หลักการเดียวกับรถไฟฟ้าชนิดอื่นๆ โดยอาศัยพื้นฐานของรถยนต์หรือรถเมล์ที่ใช้เครื่องยนต์ในการเป็นต้นกำลังสำหรับการขับเคลื่อนรถ ซึ่งโดยปกติแล้วในการขับเคลื่อนรถได้นั้นจะต้องอาศัยเกียร์ซึ่งเป็นระบบส่งกำลังซึ่งสามารถปรับระดับของอัตราทดให้มีค่าต่างๆ เพื่อการปรับความเร็วของรถ โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5-3

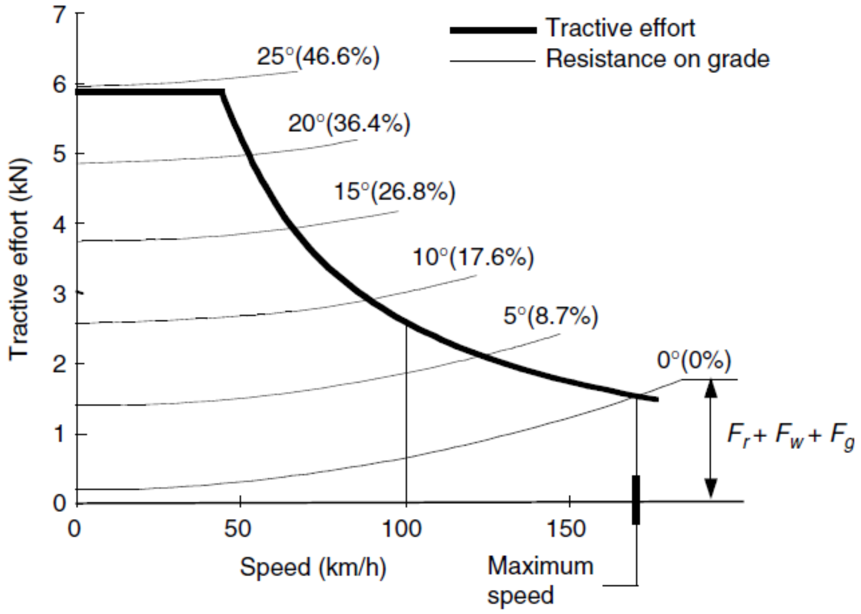


รูปที่ 5-3 กราฟคุณลักษณะแรง-ความเร็วของรถ ที่ใช้เครื่องยนต์[1]

จากรูปจะพบว่าค่า tractive effort ของรถนั้นจะมีค่าเฉพาะอยู่ค่าหนึ่ง ซึ่งไม่สามารถครอบคลุมความเร็วของรถได้ทุกย่านความเร็ว ส่งผลให้ในการปรับความเร็วของรถนั้นจะต้องอาศัยชุดเกียร์สำหรับการปรับความเร็วโดยคุณลักษณะของค่า tractive effort จะเปลี่ยนไปตามอัตราทดของเกียร์

ในทางตรงกันข้าม ในกรณีของรถไฟฟ้านั้นจะแตกต่างออกไปเนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์นั้นจะมีคุณสมบัติในการขับเคลื่อนที่ความเร็วสูง กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือย่านกำลังคงที่ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากคุณลักษณะแรงบิดความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้านั้นจะพบว่า ย่านการทำงานจะมี 2 ย่านได้แก่ ย่านแรงบิดคงที่ และย่านกำลังคงที่

การทำงานในย่านแรงบิดคงที่นั้นจะเทียบเท่ากับการทำงานที่เกียร์ 1 ของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ ซึ่งการทำงานในย่านนี้ต้องการแรงบิดในการออกตัวของรถ และเมื่อต้องการความเร็วสูงขึ้น จะเป็นการทำงานในย่านกำลังคงที่ โดยความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างรถไฟฟ้า และรถที่ใช้เครื่องยนต์คือ ความราบรื่นในการเพิ่มความเร็วของรถ โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟคุณลักษณะแรง-ความเร็วของรถ ดังแสดงในรูปที่ 5-4



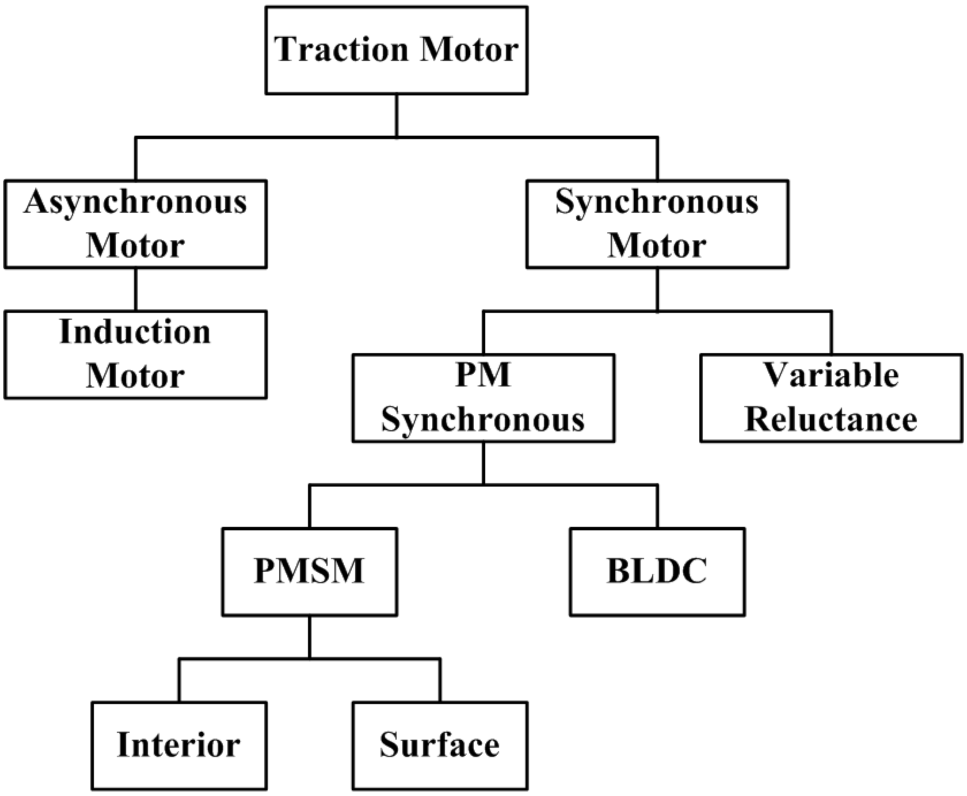
รูปที่ 5-4 กราฟคุณลักษณะแรง-ความเร็วของรถ ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง[1]

ในการปรับความเร็วของรถเพื่อให้รถวิ่งที่ความเร็วสูงนั้น จะอยู่ในย่านกำลังคงที่ โดยการทำงานในย่านนี้จำเป็นจะต้องอาศัยการลดค่าฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศของมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วฐาน (base speed) ของมอเตอร์ได้ ซึ่งการทำงานในย่านนี้ ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์จะลดลงแต่จะมีกำลังไฟฟ้าคงที่ โดยที่แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าคงที่

คุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้ในรถไฟฟ้านั้นควรจะมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีค่าความหนาแน่นของแรงบิดและกำลังสูง
2. มีย่านแรงบิดความเร็วรอบกว้าง
3. มีประสิทธิภาพสูงตลอดย่านแรงบิดความเร็วรอบ
4. มีความคงทนและความน่าเชื่อถือ
5. ต้นทุนในการผลิต และ ค่าบำรุงรักษาต่ำ

ในทางปฏิบัติ มอเตอร์ที่ได้ถูกเลือกใช้ในอุตสาหกรรมรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกับมอเตอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือ 1. มอเตอร์อซิงโครนัส และ 2 มอเตอร์ซิงโครนัส โดยมีแผนภูมิการจำแนกมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 5-5

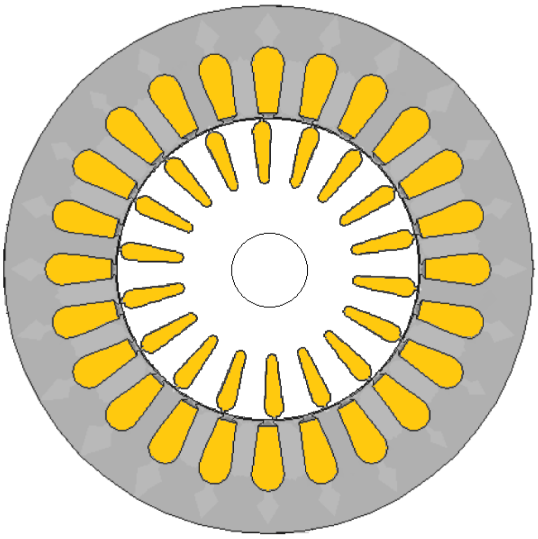


รูปที่ 5-5 แผนภูมิการจำแนกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเป็นมอเตอร์ในรถไฟฟ้า

5.2.1 มอเตอร์อซิงโครนัส (Asynchronous Motor)

มอเตอร์ชนิดนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดมีแปรงถ่าน และมอเตอร์เหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตาม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่ได้กล่าวถึงในหัวข้อนี้เนื่องจากปัญหาในการบำรุงรักษาแปรงถ่านและคอมมิวเตอร์ และความยุ่งยากในการผลิต และราคา รวมถึงการพัฒนาของเทคโนโลยีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับได้รับการพัฒนาจนมีสมรรถนะเทียบเท่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนั้น ส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดมีแปรงถ่านไม่ได้ถูกเลือกมาใช้สำหรับรถไฟฟ้าในปัจจุบันมากนัก

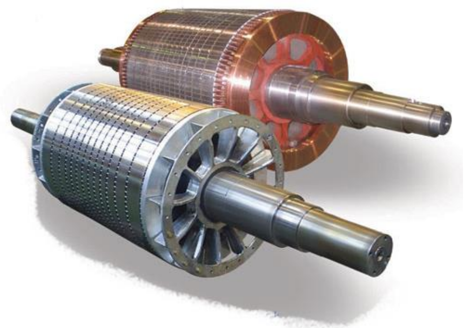
ในส่วนของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือมีขดลวดที่สเตเตอร์สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กและรับไฟจากแหล่งจ่าย โดยมีลักษณะการพันขดลวดแบบกระจาย ในขณะที่โรเตอร์นั้นจะเป็นแผ่นลามิเนทประกบกัน และมีแท่งตัวนำซึ่งถูกลัดวงจรเพื่อให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดแรงบิดที่โรเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดที่โรเตอร์ โดยมีภาคตัดขวางของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5-6



รูปที่ 5-6 ภาคตัดขวางของโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ[2]

มอเตอร์ประเภทนี้สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทโรเตอร์ขดลวด และประเภทโรเตอร์กระรอก อย่างไรก็ตาม ชนิดที่ใช้ในรถไฟฟ้านั้นจะเป็นประเภทโรเตอร์กรงกระรอกโดยมีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5-7b

(a)



(b)

รูปที่ 5-7 โรเตอร์ประเภทต่างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ (a) โรเตอร์ขดลวด (b) โรเตอร์กระรอก[3]

มอเตอร์ชนิดนี้จะอาศัยการกระตุ้นทางเดียวคือผ่านทางสเตเตอร์ เนื่องจากวงจรโรเตอร์ถูกลัดวงจรด้วยเหตุนี้ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสู่มอเตอร์จึงแบ่งออกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงสำหรับการสร้างแรงบิดและเปลี่ยนรูปเป็นกำลังทางกล และกำลังไฟฟ้าเสมือนสำหรับการสร้างสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์ต้องมีพิกัดสูงกว่าพิกัดกำลังทางกลของมอเตอร์เล็กน้อย อย่างไรก็ตามในการทำงานในย่านความเร็วรอบสูง หรือย่านความกำลังคงที่นั้นสามารถทำได้ง่ายโดยอาศัยการลดกระแสที่ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กให้มีค่าต่ำลง โดยการควบคุมที่ทำให้การควบคุมฟลักซ์เป็นไปได้ง่ายคือการควบคุมเวกเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีสมรรถนะเทียบเท่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแปรงถ่านชนิดกระตุ้นแยกนั่นเอง นอกจากนี้

[2] Sab Safi, “Alternative Motor Technologies for Traction Drives of Hybrid and Electric Vehicles,”

[3] GE Power Conversion, “Motors Medium / High Voltage and High Speed 190 to 100,000 kW 250 to 134,000 HP,”

เทคโนโลยีในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าประเภทนี้ได้รับการพัฒนาจนกระทั่งจนถึงจุดอิ่มตัว และได้ถูกประยุกต์ใช้เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมส่งผลให้มอเตอร์ประเภทนี้เป็นตัวเลือกหนึ่งสำหรับเป็นต้นกำลังของรถไฟฟ้า

นอกจากนี้การเลือกวัสดุของโครงสร้างโรเตอร์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง กล่าวคือ การผลิตโรเตอร์นั้นสามารถจำแนกออกตามเนื้อสารของแท่งตัวนำโดยมี 2 ประเภท คือ ทองแดง และอลูมิเนียม โดยในอุตสาหกรรม รถไฟฟ้านั้นโรเตอร์ชนิดทองแดงได้รับการพัฒนามากขึ้นและมีการนำมาใช้จริงในรถไฟฟ้าโดยบริษัท TESLA MOTOR[4] โดยลักษณะของโรเตอร์ชนิดทองแดงและอลูมิเนียมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5-8

(a)

(b)

รูปที่ 5-8 (a) โรเตอร์ชนิดแท่งตัวนำทำจากทองแดง[5] (b) โรเตอร์ชนิดแท่งตัวนำทำจากอลูมิเนียม[2]

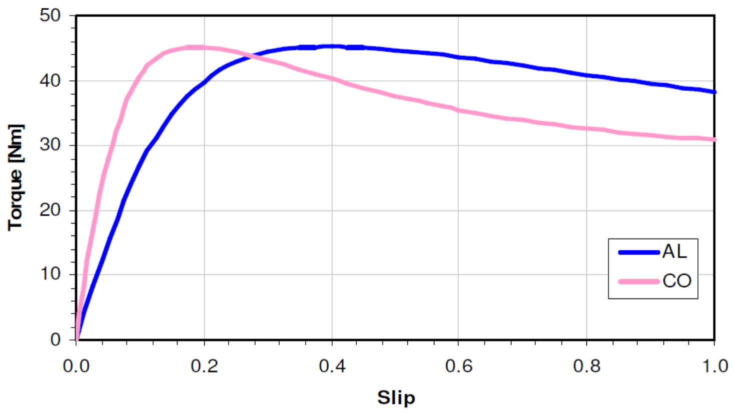
ในกรณีทีแท่งตัวนำทำจากทองแดงนั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์มีค่าสูงกว่ามอเตอร์ที่โรเตอร์ทำจากอลูมิเนียม เนื่องด้วยความต้านทานที่ต่ำกว่าส่งผลให้ค่าความสูญเสียในโรเตอร์มีค่าลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขนาดมอเตอร์มีขนาดเล็กลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่โรเตอร์ทำจากอลูมิเนียมที่พิกัดกำลังเดียวกัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคุณลักษณะแรงบิด-สลิป ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ทำจากทองแดงและอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 5-8a จะพบว่า ณ ค่าสลิปในย่านใช้งานของมอเตอร์นั้น ความชันของกราฟแรงบิดของมอเตอร์ที่โรเตอร์ทำจากทองแดงจะมีความชันมากกว่ากราฟแรงบิดของมอเตอร์ที่โรเตอร์ทำ

[4] https://www.teslamotors.com/

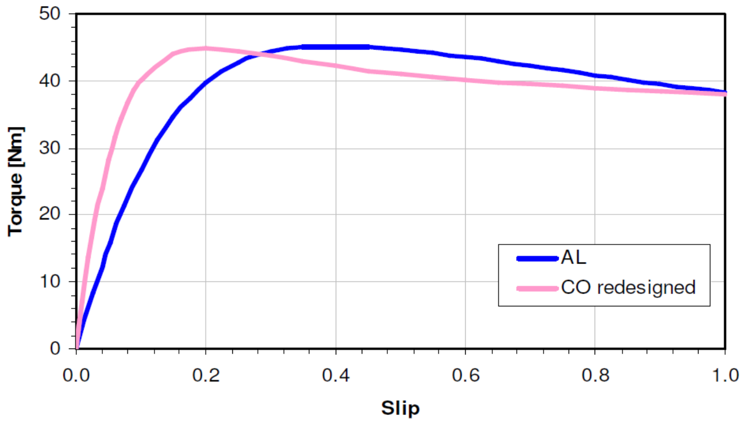
[5] http://www.metall-breuckmann.de/

จากอลูมิเนียม และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของมอเตอร์จะพบว่า มอเตอร์ที่โรเตอร์ทำจากทองแดงนั้นจะมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงกว่าอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 5-9a

อย่างไรก็ตาม ผลของความต้านทานโรเตอร์ที่ลดลงส่งผลให้แรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์มีค่าต่ำลงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5-9a จะพบว่า ที่ค่าสลิปเท่ากับ 1 (ความเร็วรอบเท่ากับ 0) แรงบิดของมอเตอร์ชนิดโรเตอร์ทำจากทองแดงมีค่าต่ำกว่าแรงบิดของมอเตอร์ชนิดโรเตอร์ทำจากอลูมิเนียมประมาณ 20% แต่ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบรูปทรงของร่องสล็อตของโรเตอร์ใหม่ โดยการออกนำรูปแบบร่องสล็อตชนิด 2 ชั้นมาใช้กับโรเตอร์ที่ทำจากทองแดงดังแสดงในรูปที่ 5-8b ซึ่งผลที่ได้พบว่าแรงบิดขณะสตาร์ทมีค่าเทียบเท่ากับมอเตอร์ที่โรเตอร์ทำจากอลูมิเนียมแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าแรงบิดในย่านใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 5-9b



(a)

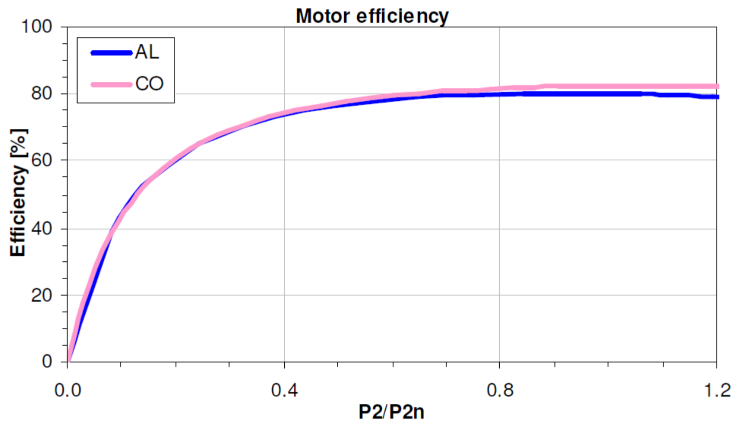


(b)

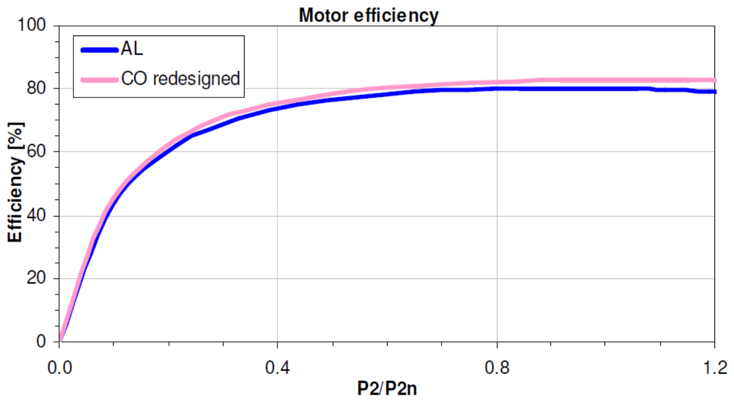
รูปที่ 5-9 กราฟเปรียบเทียบคุณลักษณะแรงบิด-สลิป ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แท่งตัวนำโรเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และ ทองแดงภายใต้เงื่อนไข (a) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์เหมือนกัน (b) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์ชนิดทองแดงถูกออกแบบใหม่เป็นชนิด 2 ชั้น[6]

[6] T. Tudorache, L. Melcescu and V. Petre, “High Efficiency Squirrel Cage Induction Machines,”

นอกจากนี้การใช้ร่องสล็อต 2 ชั้นไม่ทำให้ประสิทธิภาพตกลงไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5-10b

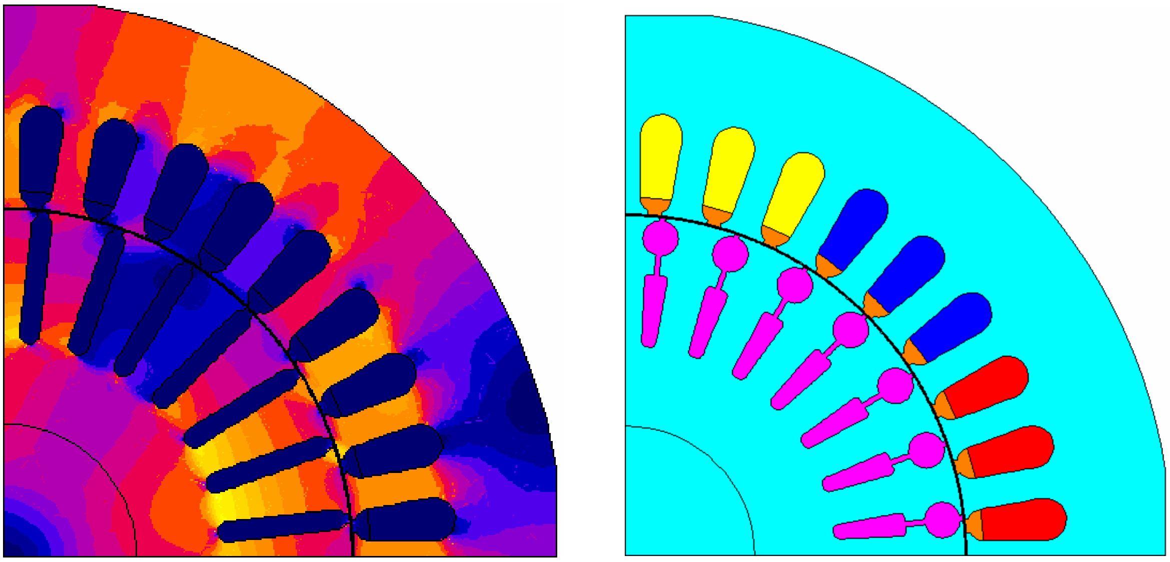


(a)



(b)

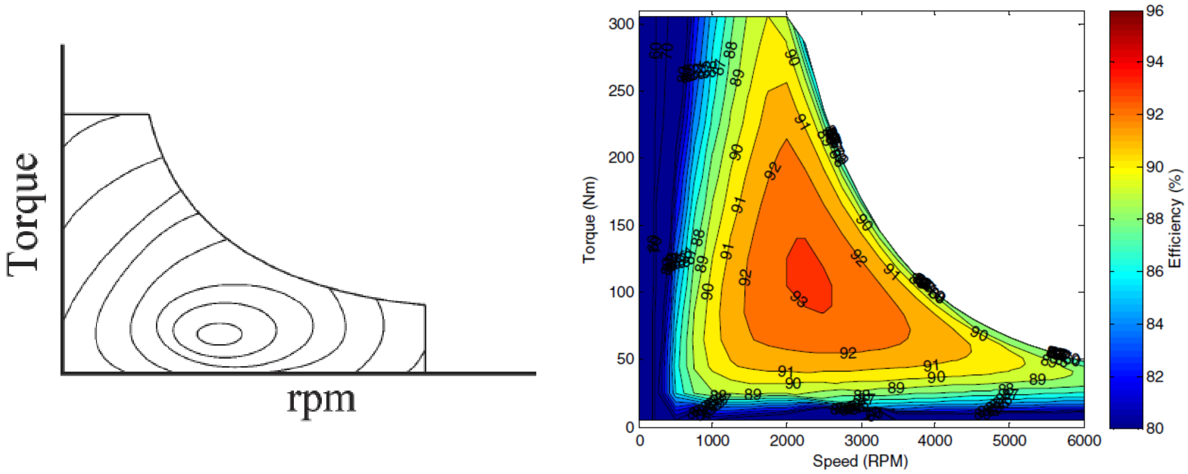
รูปที่ 5-10 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่แท่งตัวนำโรเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และ ทองแดงภายใต้เงื่อนไข (a) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์เหมือนกัน (b) รูปทรงของร่องสล็อตที่โรเตอร์ชนิดทองแดงถูกออกแบบใหม่เป็นชนิด 2 ชั้น[6]



(a) (b)

รูปที่ 5-11 รูปทรงของร่องสล็อตโรเตอร์ (a) ร่องสล็อตลึก (b) ชนิด 2 ชั้น[6]

เมื่อพิจารณากราฟคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้การควบคุมในย่านแรงบิดคงที่ และย่านกำลังคงที่จะพบว่า ประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยรวมนั้นจะมีค่าสูงเมื่อทำงานที่ความเร็วรอบไม่สูงนัก และย่านที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีช่วงที่แคบดังแสดงในรูปที่ 5-12a



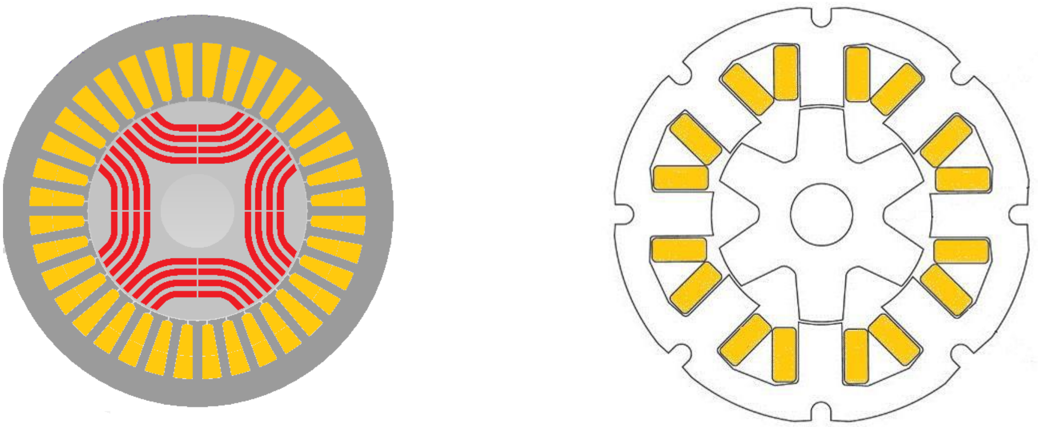
(a) (b)

รูปที่ 5-12 แผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงาน[7]

[7] Juan de Santiago, Hans Bernhoff, Boel Ekergård, Sandra Eriksson, Senad Ferhatovic, Rafael Waters, and Mats Leijon, "Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 61, No. 2, February 2012, pp.475-484.

5.2.2 มอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous motor)

มอเตอร์ซิงโครนัสเป็นอีกตัวเลือกหนึ่ง สำหรับรถไฟฟ้า และได้รับความนิยมอย่างมากในรถไฟฟ้าไฮบริด มอเตอร์ประเภทนี้สามารถจำแนกออกได้เป็นหลายประเภท แต่ที่ได้รับความสนใจสำหรับเป็นต้นกำลังสำหรบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้านั้นจะมีเพียง 2 ประเภท คือ 1. มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และ 2. มอเตอร์รีลัคแตนซ์แปรเปลี่ยน ในประเภทที่ 2 นั้นมีข้อดีคือ ราคาถูกโครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วรอบสูง แต่ข้อเสียคือ แรงบิดมีความกระเพื่อมสูงส่งผลให้เกิดเสียงรบกวนมาก และมีประสิทธิภาพเทียบเคียงมอเตอร์เหนี่ยวนำเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วจะเหมาะกับการประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะ ในขณะที่ประเภทแรกนั้นจะมีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งเป็นชนิดที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยภาคตัดขวางของมอเตอร์ทั้ง 2 ประเภทนั้นจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 5-13



(a) (b)

รูปที่ 5-13 ภาคตัดขวางของโครงสร้างของ (a) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร และ (b) มอเตอร์รีลัคแตนซ์แปรเปลี่ยน[2]

ในเชิงพาณิชย์นั้นมอเตอร์ที่ได้รับการนำมาใช้อย่างมากคือมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยมอเตอร์ประเภทนี้สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทย่อยได้แก่ PMSM และ BLDC มอเตอร์ทั้ง 2 ประเภทนี้มีโครงสร้างร่วมกัน หากแต่มีความแตกต่างในการควบคุมและรูปคลื่นสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับ นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดปลีกย่อยดังได้แสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบมอเตอร์ซิงโครนัสชนิด PMSM และ BLDC

PMSM	BLDC
รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นไซนูซอยด์	รูปคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู
มีแรงบิดกระเพื่อมต่ำ	แรงบิดกระเพื่อมสูง
ฮาร์มอนิกส์ต่ำ	ฮาร์มอนิกส์ลำดับต่ำปรากฎอยู่
ความสูญเสียในแกนเหล็กต่ำ	มีความสูญเสียในแกนเหล็กสูงกว่า PMSM เนื่องจากฮาร์มอนิกส์
มีความสูญเสียในการสวิตช์สูง	ค่าความสูญเสียในการสวิตช์ต่ำ
การควบคุมมีความซับซ้อน	การควบคุมค่อนข้างง่าย

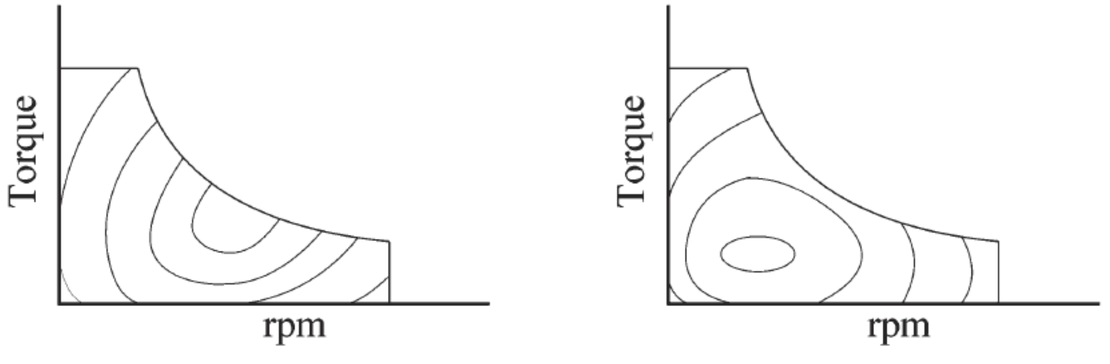
โครงสร้างของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรจะมีสเตเตอร์ที่มีลักษณะเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือมีร่องสล็อตและมีการพันแบบกระจายตัว หรือบางกรณีขดลวดจะมีการพันแบบอัดแน่น แต่ว่าที่โรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าสำหรับมอเตอร์ประเภทนี้เป็นกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กแม่เหล็กถาวรที่ติดอยู่กับโรเตอร์ นอกจากนี้ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้คือ มีค่ากำลังต่อมวล และกำลังต่อปริมาตร สูงกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น จึงถูกเลือกใช้ในรถไฮบริด เนื่องจากขนาดที่เล็กเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่พิกัดกำลังเดียวกัน

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร แบ่งออกได้ 2 ประเภทโดยแบ่งตามการติดตั้งแม่เหล็กบนโรเตอร์ คือ 1. ประเภทติดตั้งแม่เหล็กถาวรบนผิวโรเตอร์ และ 2 ประเภทติดตั้งแม่เหล็กถาวรฝังในโรเตอร์ โดยตัวอย่างรูปแบบของภาคตัดขวางของมอเตอร์ทั้งสองประเภทนั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5-13

(a) (b)

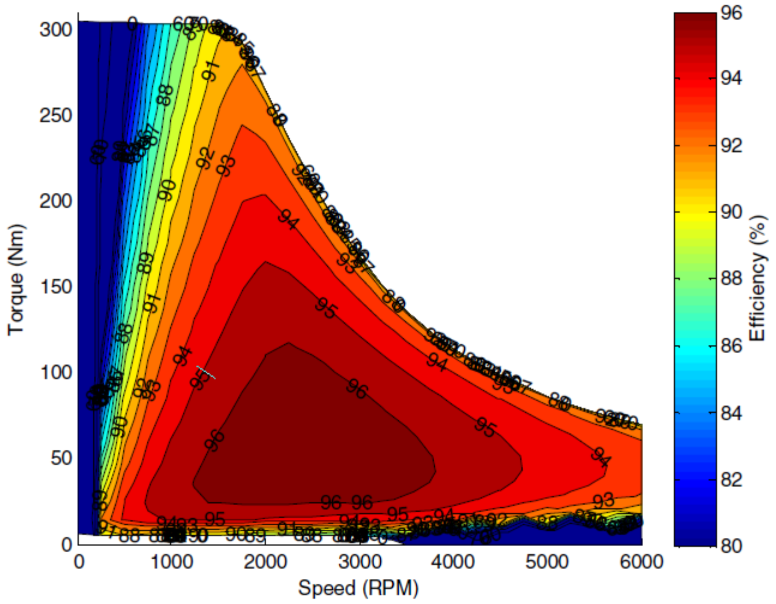
รูปที่ 5-14 ไดอะแกรมภาคตัดขวางของโรเตอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (a) แม่เหล็กบนผิวโรเตอร์ (b) แม่เหล็กฝังในโรเตอร์[7]

จากไดอะแกรมในรูปที่ 5-14 มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กติดบนผิวโรเตอร์นั้นจะต้องอาศัยฉนวนในการรัดไม่ให้แม่เหล็กหลุดออกจากผิวโรเตอร์เนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะส่งผลเสียต่อการระบายความร้อนของโรเตอร์ ในขณะที่ปัญหาดังกล่าวจะไม่เกิดกับชนิดแม่เหล็กฝังในโรเตอร์ มอเตอร์ทั้ง 2 แบบนั้นจะมีแผนภูมิของประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 5-15



(a) (b)

รูปที่ 5-15 แผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (a) แม่เหล็กบนผิวโรเตอร์ (b) แม่เหล็กฝังในโรเตอร์[7]



รูปที่ 5-16 ตัวอย่างแผนภูมิประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในตลอดย่านการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรชนิดแม่เหล็กฝังในโรเตอร์[8]

เมื่อพิจารณา**ข้อดี**ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถจำแนกได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากไม่มีขดลวดหรือแท่งตัวนำที่โรเตอร์
- ขนาดที่เล็กเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่นที่พิกัดกำลังเดียวกัน
- การควบคุมที่ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PMSM กับ BLDC แล้ว BLDC จะมีการควบคุมที่ง่ายกว่าโดยมีความง่ายคล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- การระบายความร้อนที่ง่ายเนื่องจากไม่มีกระแสไหลในวงจรโรเตอร์ส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์ไม่สูงเกินไปจนทำให้ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์เสียหาย

อย่างไรก็ตามข้อมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรยังมี**ข้อเสีย**ดังต่อไปนี้

- ราคาที่สูง เนื่องจากสารแม่เหล็กมีราคาแพงมากและขึ้นอยู่กับผู้ผลิต
- ขอบเขตการทำงานในย่านกำลังคงที่มีค่าจำกัดและต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น เนื่องจาก ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่ ด้วยเหตุนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยการกระตุ้นผ่านวงจรสเตเตอร์เพื่อทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศลดลงจึงจะทำงานในย่านกำลังคงที่ได้มากขึ้นซึ่งทำให้ต้องการพิกัดกระแสของคอนเวอร์เตอร์สูงขึ้นเช่นเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพียงแต่ความต้องการนั้นอยู่ในคนละย่านความเร็ว
- ปัญหาเรื่องความปลอดภัยอันเนื่องมากจากมอเตอร์ประเภทนี้ได้รับการกระตุ้นตลอดเวลาด้วยแม่เหล็กถาวร ดังนั้น หากเกิดการความผิดพร่อง (Fault) ชนิดเปิดวงจรโดยที่รถวิ่งด้วยความเร็ว

---

[8] James Goss, Mircea Popescu, Dave Staton, “A Comparison of an Interior Permanent Magnet and Copper Rotor Induction Motor in a Hybrid Electric Vehicle Application,” Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, pp. 220-225

สูงและเพลาของมอเตอร์ยังหมุนด้วยความเร็วสูงด้วยนั้น จะเกิดแรงดันที่ขั้วในระดับที่สูงมากซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้โดยสาร

- การเกิด Demagnetization อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ หากระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ทำงานผิดพลาดจะทำให้มอเตอร์ได้รับความเสียหาย
- ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์เกิดปัญหาลัดวงจร จะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่สเตอร์อันเนื่องมาจากโรเตอร์หมุนตัดขดลวดสเตเตอร์ตลอดเวลา ซึ่งกระแสดังกล่าวส่งผลให้โรเตอร์เกิดแรงต้านการหมุนของโรเตอร์ทำให้โรเตอร์เกิดการล็อค ภายใต้สภาวะนี้ส่งผลให้เกิดอันตรายตามมายกตัวอย่างเช่น กรณีรถขับเคลื่อนล้อหลัง แล้วล้อหลังเกิดการล็อคตัว แต่ล้อหน้ายังคงหมุนอยู่ จะทำให้รถเกิดการเสียการควบคุม

5.2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์อซิงโครนัส และซิงโครนัส สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับรถไฟฟ้า

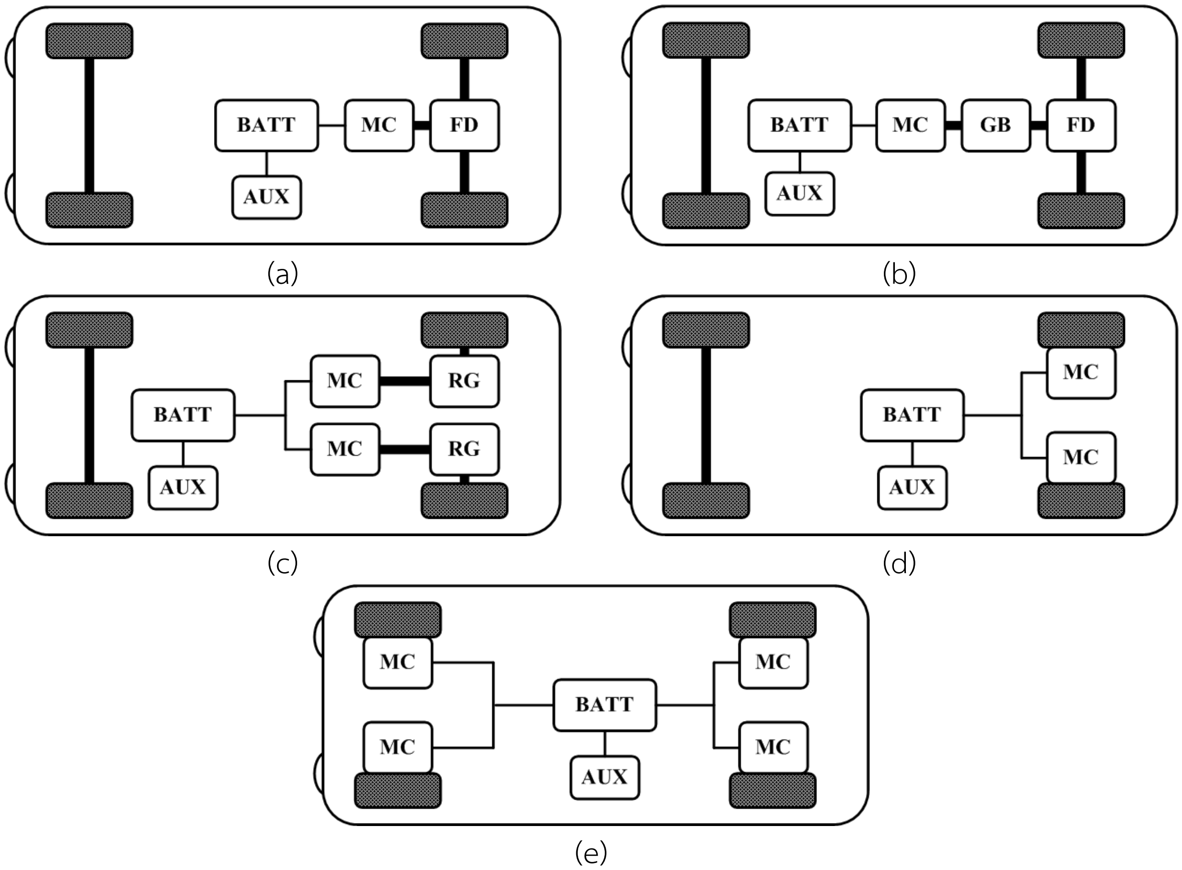
จากหัวข้อที่ 5.2 จะพบว่า มอเตอร์ทั้ง 2 ประเภทนั้น มีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน แต่ซึ่งเมื่อทำการสรุปเปรียบเทียบจะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 การเปรียบเทียบมอเตอร์อซิงโครนัส และมอเตอร์ซิงโครนัส

ประเด็น	Asynchronous	Synchronous Motor
ราคา	ต่ำ	สูง (ขึ้นกับราคาของแม่เหล็กถาวร)
การผลิต	ง่าย	ปานกลาง
ประสิทธิภาพ	ปานกลาง- สูง (ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวนำในโรเตอร์)	สูง (เนื่องจากไม่มีความสูญเสียในตัวนำที่โรเตอร์)
เทคโนโลยีการควบคุม	เทคโนโลยีในการควบคุมได้รับการพัฒนามานานถึงระดับอิ่มตัว	เทคโนโลยียังมีการพัฒนา แต่อยู่ในระดับใกล้เคียงมอเตอร์อซิงโครนัส
ปัญหาเนื่องจากอุณหภูมิ	ส่งผลเสียโดยตรงต่อขดลวดและประสิทธิภาพ	ส่งผลเสียโดยตรงต่อขดลวดและประสิทธิภาพรวมถึงสภาพความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร
ความปลอดภัยจากปัญหาที่อินเวอร์เตอร์	ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์มีปัญหา มอเตอร์จะไม่ได้รับการกระตุ้นเนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้ต้องอาศัยการกระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กจากแหล่งจ่ายภายนอกเท่านั้น	ในกรณีที่อินเวอร์เตอร์มีปัญหา และมอเตอร์ยังหมุนด้วยความเร็วสูงจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และหากเกิดกรณีลัดวงจรที่ขั้วจะทำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้เกิดแรงบิดทำให้มอเตอร์เกิดการล็อคโรเตอร์

5.3 ระบบส่งกำลัง

ระบบส่งกำลังสำหรับรถเมล์ไฟฟ้านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ 1 มอเตอร์ขับเคลื่อนโดยตรง และ 2 มอเตอร์ขับเคลื่อนผ่านเกียร์ โดยตัวอย่างรูปแบบการส่งกำลังของรถเมล์ไฟฟ้าที่มีผู้วิจัยและพัฒนามีรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5-17



รูปที่ 5-17 รูปแบบต่างๆของระบบส่งกำลังในรถเมล์ไฟฟ้า[9]

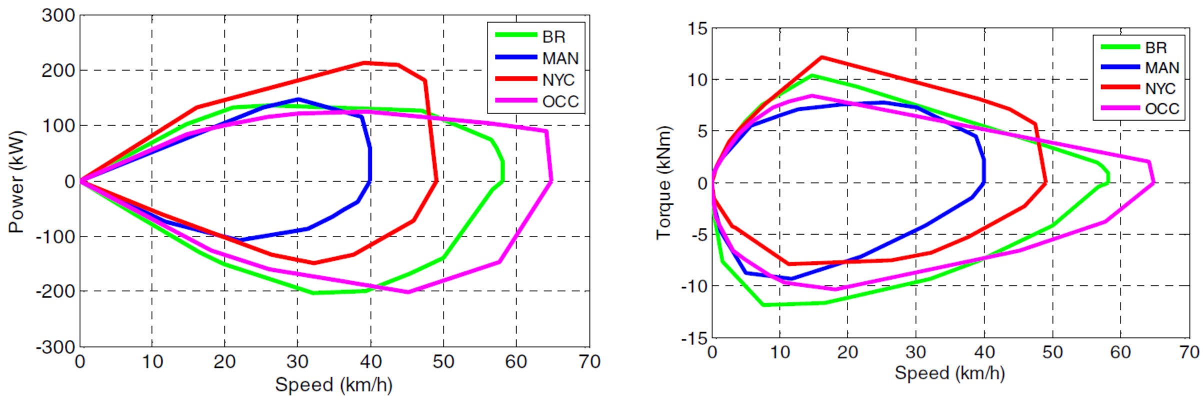
(a) Single traction motor and a final drive
(b) Single traction motor, two-speed gearbox and a final drive
(c) Two separate traction motors with reduction gears
(d) Two separate in-wheel traction motors on rear wheels
(e) Four separate in-wheel traction motors

ในส่วนของรูปแบบ e นั้นจะเป็นชนิดที่มอเตอร์อยู่ที่ล้อแต่ละล้อโดยรถต้นแบบที่มีใช้งานจริงจะเป็นของ Proterra โดยลักษณะระบบส่งกำลังดังกล่าวมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 5-18

[9] Antti Lajunen, “Comparison of Different Powertrain Configurations for Electric City Bus,” Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2014 IEEE 27-30 Oct. 2014 pp.1 – 5

รูปที่ 5-18 ตัวอย่าง in-wheel มอเตอร์[10]

จากงานวิจัย [9] ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการทำงานภายคาบเวลาในการขับเคลื่อนแตกต่างกันเพื่อศึกษาสมรรถนะของรถเมล์ไฟฟ้าในรูปของกำลังทางกล และ แรงบิด โดยมีรูปแบบของการช่วงเวลาการขับเคลื่อน 4 แบบได้แก่ 1. BR=Braunschweig 2. MAN=Manhattan 3. NYC=New York Bus และ 4. OCC=Orange County Cycle) ดังแสดงในรูปที่ 5-19

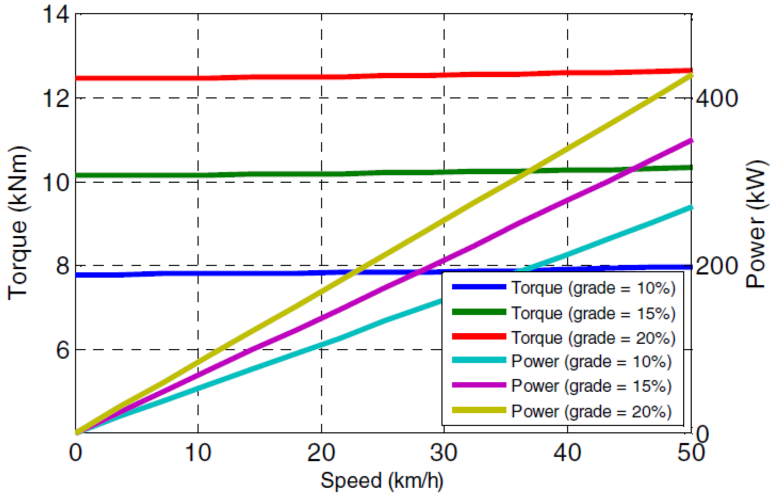


(a) (b)

รูปที่ 5-19 แผนภูมิแสดงสมรรถนะของรถเมล์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งกำลังรูปแบบ a ภายใต้ช่วงเวลาการขับเคลื่อนชนิดต่างๆในรูปแบบของ (a) กำลังทางกล และ (b) แรงบิด[9]

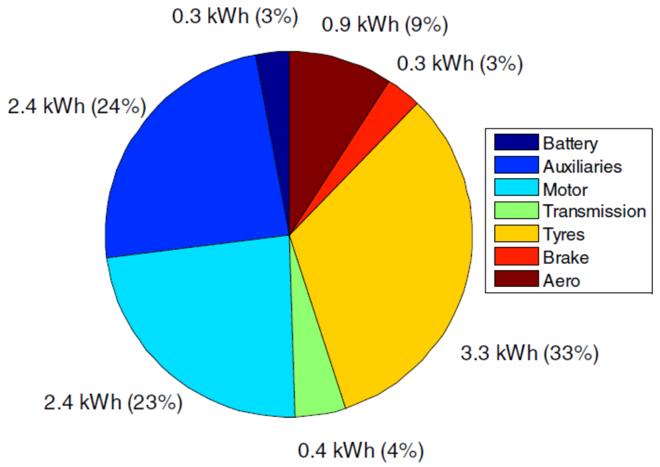
[10] http://www.proteanelectric.com/

จากรูปที่ 5-19a จะพบว่าที่ความเร็วรอบสูงขึ้น ความต้องการกำลังทางกลจะมีค่าแปรผันตามความเร็วของรถ ในขณะที่แรงบิดของมอเตอร์นั้นจะแปรผกผันกับความเร็วของรถ และเมื่อพิจารณารูปที่ 5-20 จะพบว่าที่ความชันต่างๆ แรงบิดที่ต้องการจะมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่กำลังมีค่าเพิ่มตามความเร็วของรถ



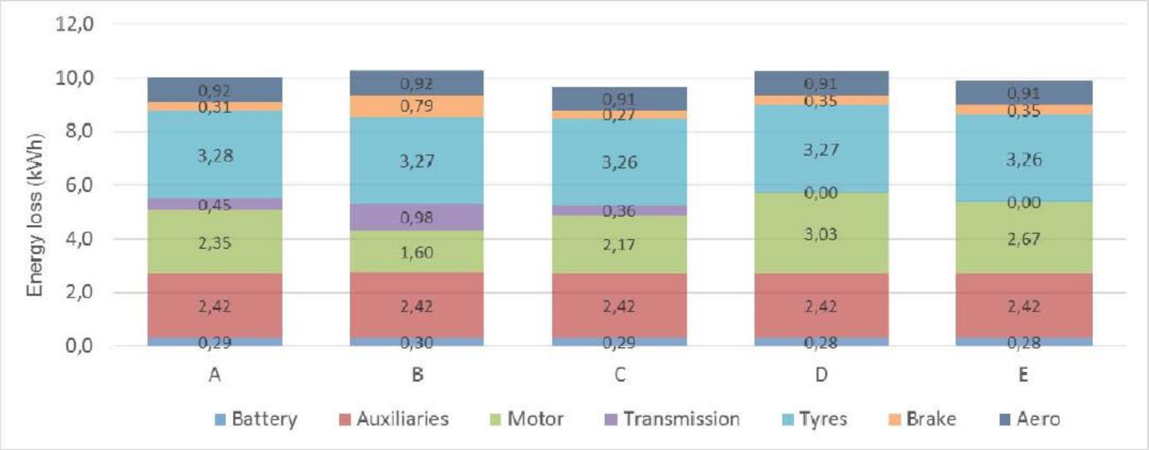
รูปที่ 5-20 แผนภูมิแสดงสมรรถนะของรถเมล์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งกำลังรูปแบบ a ที่ระดับความชันต่างๆ[9]

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบการพลังงานสูญในระบบส่งกำลังกับพลังงานสูญเสียในในระบบอื่นๆ ภายในรถเมล์ไฟฟ้า 1 คัน พบว่าความสูญเสียในระบบส่งกำลังนั้นมีเพียง 4% ของพลังงานสูญเสียทั้งหมด ในขณะที่พลังงานสูญเสียส่วนใหญ่ถูกใช้ไปกับการเอาชนะความเสียดทานที่ล้อ อุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ และ ความสูญเสียในมอเตอร์ โดยมีแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 5-21



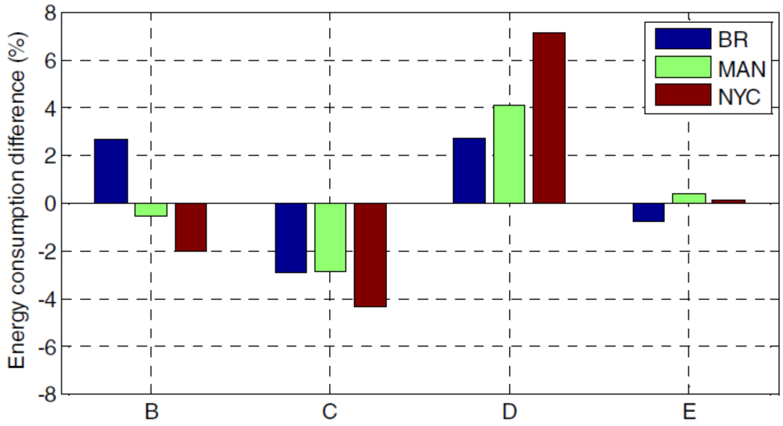
รูปที่ 5-21 แผนภูมิแสดงการกระจายตัวของพลังงานสูญเสียในรถไฟฟ้ารูปแบบ a[9]

เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาพลังงานสูญเสียของรถเมล์ไฟฟ้าในรูปแบบอื่นมาทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่ามีรูปแบบสอดคล้องกับรูปที่ 5-22 ดังแสดงในรูปที่ 5-23 อย่างไรก็ตามจะพบว่ารูปแบบ d และ e จะไม่มีความสูญเสียในระบบส่งกำลังเนื่องจากเป็นระบบขับตรง กล่าวคือ มอเตอร์เชื่อมต่ออยู่กับล้อโดยตรง ไม่มีเกียร์ทด



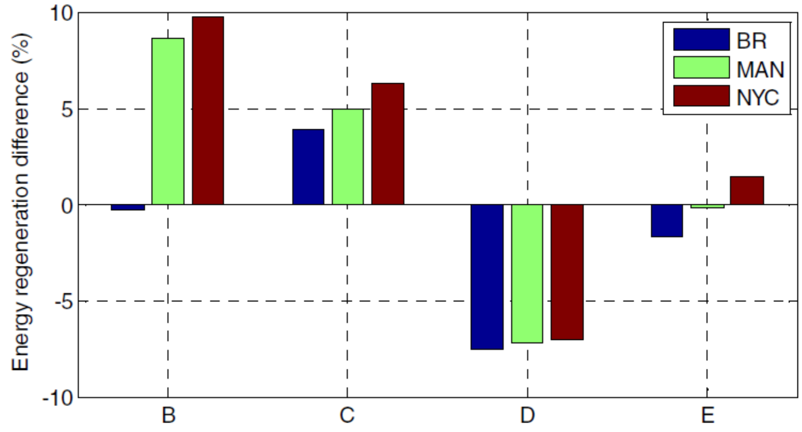
รูปที่ 5-22 แผนภูมิการใช้พลังงานสูญเสียของรถเมล์ในระบบส่งกำลังแบบต่างๆ[9]

จากรูปที่ 5-23 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานรูปแบบของระบบส่งกำลังในรูปแบบ b c d และ e โดยทำการเปรียบเทียบกับระบบส่งกำลังรูปแบบ a พบว่า รูปแบบ c มีการใช้พลังงานต่ำที่ สุด ในขณะที่รูปแบบ e มีการใช้พลังงานเทียบเท่ารูปแบบ a แต่เมื่อพิจารณารูปแบบ b พบว่า มีการใช้พลังงานสูงกว่าในบางพื้นที่ ในขณะที่บางพื้นที่ใช้พลังงานต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ซึ่งในกรณีที่มีการใช้พลังงานต่ำกว่านั้นจะเป็นเส้นทางที่มีการใช้ความเร็วต่ำ



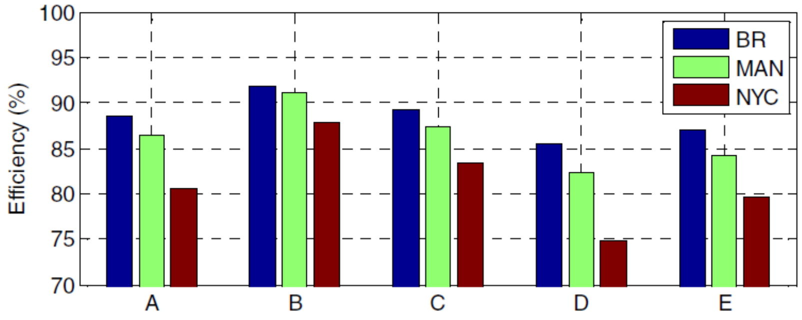
รูปที่ 5-23 แผนภูมิการใช้พลังงานของรูปแบบการส่งกำลังต่างๆเปรียบเทียบกับรูปแบบ a[9]

และเมื่อพิจารณาพลังงานที่ได้จากการเบรคก็จะสอดคล้องกับพลังงานที่ใช้ไปดังแสดงในรูปที่ 5-24



รูปที่ 5-24 แผนภูมิพลังงานจากการเบรคของรูปแบบการส่งกำลังต่างๆเปรียบเทียบกับรูปแบบ a[9]

ส่วนสำคัญที่เป็นปัจจัยในการเลือกระบบขับเคลื่อนคือประสิทธิภาพ ซึ่งจากรูปที่ 5-25 พบว่ารูปแบบ b คือชนิดที่มีเกียร์ 2 ระดับ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในทุกๆช่วงการขับเคลื่อน ในขณะที่ รูปแบบ d มีประสิทธิภาพต่ำสุด



รูปที่ 5-25 แผนภูมิประสิทธิภาพของรถเมล์ไฟฟ้าที่มีระบบส่งกำลังรูปแบบต่างๆ[9]

นอกจากนี้จะพบว่า ระบบที่มีการใช้มอเตอร์เพียง 1 เครื่องนั้นจะต้องใช้มอเตอร์ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลังสูง ซึ่งในกรณีดังกล่าว ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่พิกัดกำลังสูงนั้นจะมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์ที่มีพิกัดกำลังต่ำ

นอกจากนี้ การใช้มอเตอร์เพียง 1 เครื่องยังมีข้อดีคือ ตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์นั้นจะอยู่สูง จากระดับของดุมล้อ ทำให้การป้องกันน้ำในกรณีที่มีน้ำท่วมนั้นทำได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากการประยุกต์ใช้ในกรุงเทพมหานครจะพบปัญหาน้ำท่วมในกรณีทีมีฝนตกหนักซึ่งอาจจะส่งผลให้การใช้งานระบบขับเคลื่อนประเภทนี้มีปัญหา และส่งผลกระทบต่อการเดินรถได้ นอกจากนี้การซ่อมบำรุงยังต้องอาศัยการซ่อมบำรุงเฉพาะ

5.4 Traction Battery

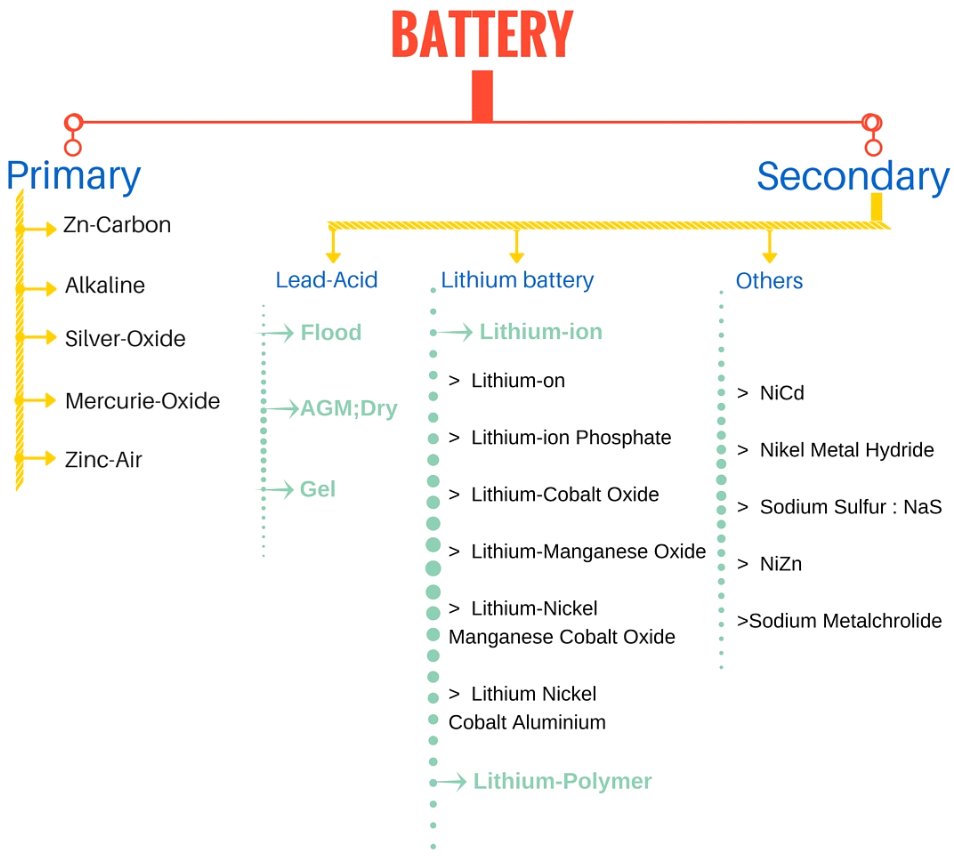
แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้ใช้งาน เนื่องมาจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลายสามารถเลือกใช้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการนอกจากนี้แบตเตอรี่ยังเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานได้สะดวกอีกด้วย ในปัจจุบันแบตเตอรี่ก็ยังมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและยังเป็นที่ต้องการของตลาด โดยหลักการของแบตเตอรี่จะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมี เมื่อนำไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดที่ใช้งาน โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วนำไปใช้งาน

ในปัจจุบันแบตเตอรี่มีหลายชนิดหลายขนาดและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้แบตเตอรี่ต้องเลือกให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน และจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติของแบตเตอรี่ในแต่ละชนิด แบตเตอรี่ที่ดีจะต้องออกแบบให้มีขนาดเล็ก มีอายุการใช้งานยาวนาน ความทนทานในการใช้งานตรงกับความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วผู้ผลิตสามารถผลิตได้ แต่ราคาของแบตเตอรี่จะแพงตามไปด้วย จึงไม่เหมาะสมกับผู้ใช้ทั่วไป การแยกประเภทแบตเตอรี่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทได้ดังนี้

1. แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ครั้งเดียว เมื่อจ่ายไฟหมดแล้วไม่สามารถนำมาอัดประจุกลับเข้าไปใช้งานใหม่ได้เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมด พลังงานไฟฟ้าก็จะหมด แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ใช้ไฟน้อยหรือในที่ๆห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์เป็นต้น

2. แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้หลังจากจ่ายไฟหมดแล้ว เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการอัดประจุกลับเข้าไปใหม่ทำให้สามารถใช้งานได้นาน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนโพลิเมอร์ เป็นต้น

จากรายละเอียดของแบตเตอรี่ข้างต้นเมื่อนำมาแสดงเป็นแผนภูมิของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ จะได้รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 5-26



รูปที่ 5-26 แผนภูมิแสดงประเภทของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ ที่มีใช้งานในปัจจุบัน

5.4.1 แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ

แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary Battery) มีคุณสมบัติในการให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าชนิดกระแสตรงที่ได้จากกระบวนการเคมี ไฟฟ้าเมื่อใช้งานจนไฟหมดต้องทิ้งไป ไม่สามารถนำไปประจุไฟกลับให้เต็มใหม่ได้ แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ใช้ไฟน้อยหรือในที่ที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ แบตเตอรี่ประเภทนี้สามารถจำแนกออกได้เป็นประเภทย่อยๆได้ดังแสดงในหัวข้อต่างๆดังนี้

5.4.1.1 แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี (Carbon-zinc battery)

แบตเตอรี่ปฐมภูมิชนิดคาร์บอนสังกะสีมีโครงสร้างภายในคือ ขั้วบวกใช้คาร์บอน และหุ้มด้วยแอมโมเนียมคลอไรด์จากนั้นเคลือบด้านนอกด้วยสังกะสีซึ่งเป็นขั้วลบ เมื่อมีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นจะให้อิเล็กตรอนออกมาและเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง แต่ถ้าปฏิกิริยาเคมีดังกล่าวเกิดการย้อนกลับก็จะทำให้เราสามารถอัดประจุเข้าไปในแบตเตอรี่ใหม่ได้หรือที่เรียกว่า การรีชาร์จแต่แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสีในประเภทนี้เป็นถ่านไฟฉายรุ่นแรกที่ไม่สามารถอัดประจุกลับเข้าไปได้คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีราคาต่ำ แต่ทำงานที่อุณหภูมิต่ำได้ไม่ดี ความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่ต่ำ และประสิทธิภาพต่ำถ้าใช้งานที่กระแสไฟฟ้าสูง

(a) (b)

รูปที่ 5-27 โครงสร้างและตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี

5.4.1.2 แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ (Alkaline battery)

แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์มีใช้ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2501 ซึ่งเมื่อแรกเริ่มนั้นเป็นที่นิยมกันมากเพราะสามารถให้พลังงานได้มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่า แต่ในระยะหลังเริ่มมีการตระหนักถึงปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องมาจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ มีสารปรอทเป็นส่วนประกอบ เมื่อแบตเตอรี่ชนิดนี้นิยมใช้กันมากจึงทำให้เกิดปัญหาขยะมีพิษเพิ่มมากขึ้นทั่วโลกดังนั้นผู้ผลิตจึงได้พยายามที่จะพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ให้ไม่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมในช่วงปลายปี พ.ศ.2523 ได้มีผู้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์แบบที่มีสารปรอทต่ำลงและในปี พ.ศ.2533 ก็ได้มีแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์แบบปลอดสารปรอทเกิดขึ้นนั้นคือ แบตเตอรี่อัลคาไลน์ดูราเซล และแบตเตอรี่อัลคาไลน์ เอ็นเนอร์ไจเซอร์ ข้อเสียที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์คือจะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างมากในสภาพอากาศที่หนาวเย็น

ในปี พ.ศ.2536 ได้มีการคิดค้นแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ที่สามารถอัดประจุไฟเข้าไปได้โดยสามารถให้แรงดันไฟฟ้าที่ 1.5 โวลต์เท่ากับแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์แบบปฐมภูมิ แต่เมื่อมีการอัดประจุใหม่เรื่อยๆ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่จะลดลงตามจำนวนการอัดประจุในแต่ละครั้งถึงแม้จะมีการดูแลรักษาและอัดประจุอย่างดีก็ตามเมื่ออัดประจุไปประมาณสิบครั้งประสิทธิภาพจะลดลงเหลือประมาณ 60%

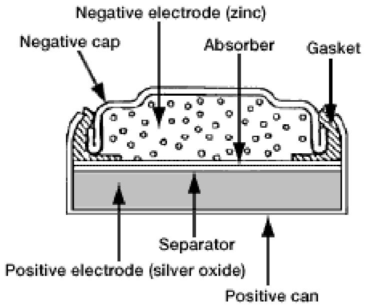
(a) (b)

รูปที่ 5-28 โครงสร้างและตัวอย่างของแบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์

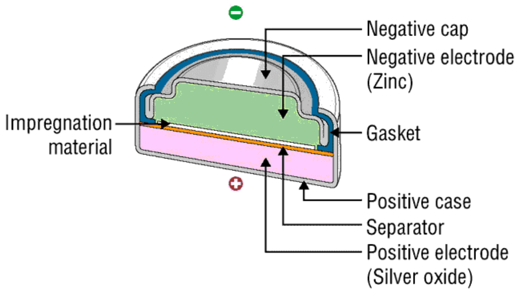
5.4.1.3 แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ (Silver Oxide battery)

แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ (Silver Oxide) หรืออาจจะเรียกว่าแบตเตอรี่ซิลเวอร์-ซิงค์ (silver-zinc battery) ก็ได้ เป็นแบตเตอรี่อีกชนิดที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดด่าง แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงเวลาไล่เลี่ยกับ แบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์ แบตเตอรี่ชนิดนี้ให้แรงดันไฟฟ้า 1.6 โวลต์สูงกว่า แบตเตอรี่ เมอร์คิวริกออกไซด์เล็กน้อย แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์ มีส่วนประกอบคล้ายกับแบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์ คือใช้สังกะสีเป็นแอโนด กับใช้ซิลเวอร์ออกไซด์เป็นแคโทด และสามารถเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ชนิดคือ สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังผลิตออกมาในลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็ก เหมือนแบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์ด้วย

แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์มีจุดเด่นเหมือน แบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์ คือ สามารถจ่ายกระแสไฟคงที่ได้อย่างต่อเนื่องเกือบตลอดอายุการใช้งาน จึงใช้ทดแทนแบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์ได้ อีกทั้งไม่มีส่วนผสมของสารประกอบโลหะหนัก แต่ข้อด้อยคือ แบตเตอรี่ซิลเวอร์ออกไซด์มีราคาแพง และมีอายุการใช้งานสั้นกว่าแบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์



(a)



(b)

รูปที่ 5-29 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดซิลเวอร์ออกไซด์

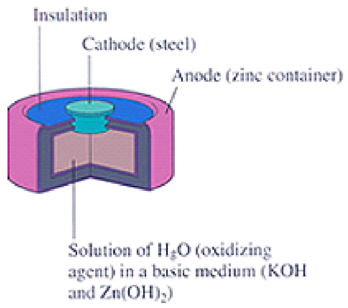
5.4.1.4 แบตเตอรี่เมอคิวริกออกไซด์ (Mercuric Oxide battery)

ถ่านเมอคิวริกออกไซด์ (Mercuric Oxide) เป็นแบตเตอรี่หรือเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีประสิทธิภาพ การจ่ายไฟฟ้าในอัตราคงที่ สูง โดยทั่วไปถ่านชนิดนี้มีขนาดเล็ก สามารถให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 1.35 โวลต์ ซึ่งเหมาะสำหรับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้อย่าง นาฬิกาข้อมือ เครื่องคิดเลข เกมส์กด ฯลฯ ถ่านเมอร์คิวริกออกไซด์ถูกประดิษฐ์ขึ้นในปี ค.ศ. 1950 โดย แซมมวล รูเบน (Samuel Ruben) นักประดิษฐ์อิสระ ถ่านเมอร์คิวริกออกไซด์สามารถใช้สารเมอร์คิวริกออกไซด์ ผสมสารแมงกานีสไดออกไซด์ หรือใช้เฉพาะสารเมอร์คิวริกออกไซด์เป็นแคโทดอย่างเดียวก็ได้ สำหรับแอโนดจะใช้สังกะสีในรูปโลหะผงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้มากขึ้น

ในส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็สามารถเลือก ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ได้ 2 ชนิดด้วยกันคือ สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) หรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความแตกต่างของการเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ทั้งสองชนิดคือ ถ่านที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จ่ายกระแสไฟได้น้อย แต่ให้แรงดันไฟฟ้า คงที่ได้ดี ซึ่งเหมาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างเครื่องคิดเลข เครื่องช่วยฟัง (hearing aids) นาฬิกาข้อมือแบบเข็ม

ส่วนถ่านที่ใช้สารละลายโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะ สามารถจ่ายกระแสไฟได้มากกว่า จึงเหมาะกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการกระแสไฟมากกว่า เช่น กล้องถ่ายรูปดิจิตอลที่มีไฟแฟลช หรือนาฬิกาดิจิตอลที่มีไฟเรืองแสง

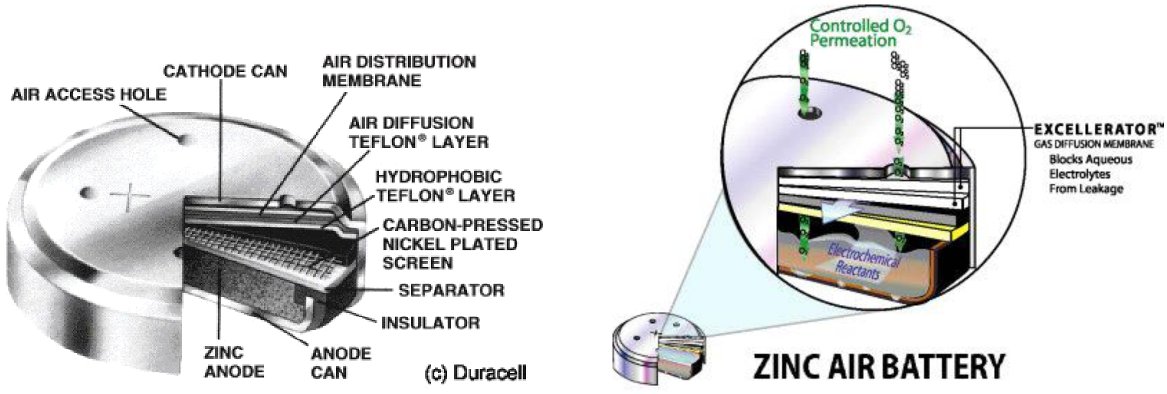
แบตเตอรี่เมอร์คิวริกออกไซด์มีจุดเด่นคือ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าในอัตราคงที่เกือบตลอดอายุการใช้งาน และมีอายุการเก็บรักษานานเป็นปี แต่มีจุดด้อยคือ ราคาแพง และการใช้สารประกอบโลหะปรอทในแบตเตอรี่ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกห้ามจำหน่ายในหลายประเทศ



รูปที่ 5-30 โครงสร้างแบตเตอรีเมอร์คิวริกออกไซด์

5.4.1.5 แบตเตอรี่แบบสังกะสี-อากาศ (Zinc Air Cell)

เป็นเซลล์กระดุมที่มีรูให้อากาศเข้าที่ด้านล่าง ซึ่งจะใช้ออกซิเจนในการออกซิไดซ์ผงสังกะสีผสมอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลท์ซึ่งเป็นขั้วลบ

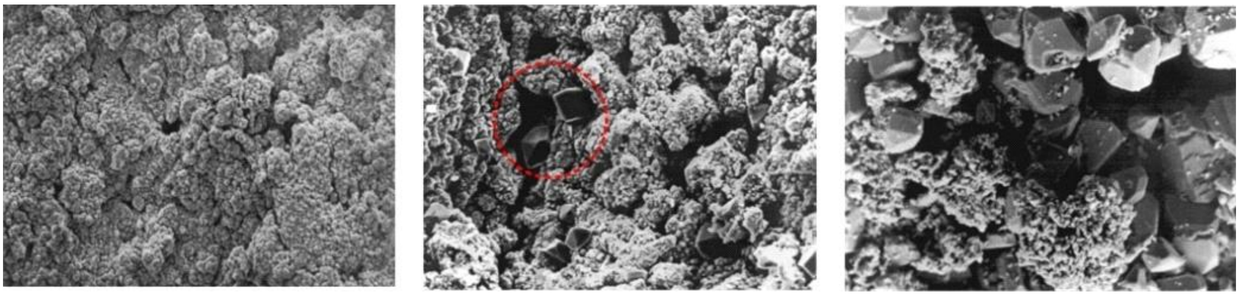


รูปที่ 5-31 โครงสร้างแบตเตอรี่ตะกั่วอากาศ

5.4.2 แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ

5.4.2.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุได้ที่เก่าที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ด้วยกันประดิษฐ์ขึ้นมาโดยแกสตันพลองด์ (Gaston Plante) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสตั้งแต่ปี พ.ศ. 2402 เป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุได้ชนิดแรกที่ทำออกมาเพื่อการค้าและในปัจจุบันยังมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยมักจะทำเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูง นิยมใช้กับรถยนต์และยานพาหนะต่างๆ ระบบสำรองไฟฟ้า(UPS) และระบบไฟแสงสว่างฉุกเฉิน (Emergency Light) สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดจะอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก 8 องศาเซลเซียส จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลงครึ่งหนึ่ง เช่น แบตเตอรี่แบบ VRLA(Valve-Regulated Lead-Acid)จะมีอายุถึง 10 ปี ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสแต่จะลดลงเหลือ 5 ปี ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียสนอกจากนี้อุณหภูมิที่ต่ำจะทำให้แบตเตอรี่เก็บประจุได้น้อยลง ความจุของแบตเตอรี่จะลดลง 50% เมื่ออุณหภูมิต่ำลง 12 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมตอนเช้ารถยนต์ถึงสตาร์ทติดยาก การคายประจุโดยตัวมันเอง (Self-discharge) น้อยมาก ถ้าเป็นแบตเตอรี่แบบเปียกอัตราการคายประจุประมาณ 40% ต่อปี ส่วนแบตเตอรี่แบบแห้งจะมีอัตราการคายประจุน้อยกว่าแบบเปียกโดยเฉพาะแบตเตอรี่ AGM รุ่นใหม่ๆบางชนิด อัตราการคายประจุด้วยตัวมันเองจะไม่เกิน 2% ต่อเดือน



(a) (b) (c)

รูปที่ 5-32 แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะต่างๆ (a) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ใหม่ (b) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ที่เริ่มมีการสะสมของซัลเฟต (c) แผ่นธาตุของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพ

รูปที่ 5-33 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดมีทั้งแบบเปียกและแบบแห้งซึ่งลักษณะการแบ่งประเภทนี้เป็นการแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของแบตเตอรี่และแบ่งได้เป็น 3 แบบดังนี้

(1) แบตเตอรี่ชนิดต้องเติมน้ำกลั่นตลอดเวลา (Conventional Battery)

แบตเตอรี่ประเภทนี้เป็นแบตเตอรี่ที่อัตราการสูญเสียไอน้ำกรดค่อนข้างมาก ตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากแผ่นธาตุทำจาก ตะกั่วพลวง (Lead Antimony) ทั้งแผ่นธาตุบวก และ แผ่นธาตุลบ ซึ่งแผ่นธาตุที่ทำจากตะกั่วพลวง จะมีคุณสมบัติดังนี้

- มีความทนทานต่อความร้อนสูง
- มีความทนทานต่อน้ำกรดสูง
- มีความทนทานต่อการประจุไฟฟ้าสูง (ความต้านทานภายในสูง)

แต่ก็มีจุดอ่อนในประเด็นต่างๆดังนี้

- มีการคายประจุไฟฟ้าเองรวดเร็ว (Self Discharge เร็วมาก) ทำให้การขนส่ง และการเก็บรักษาได้ยาก
- ทำให้การอัดประจุไฟฟ้าช้า เนื่องจากมีความต้านทานภายในสูง ทำให้กระแสไหลเข้าได้ช้า)
- เกิดความร้อนจากการชาร์จมาก ทำให้มีการสูญเสียน้ำกรดค่อนข้างเร็ว
- แบตเตอรี่เกิดการโอเวอร์ชาร์จได้ง่าย

(2) แบตเตอรี่ชนิดบำรุงรักษาน้อย

แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีการพัฒนาเพื่อแก้ไข ปัญหาหลักของแบตเตอรี่ชนิดแรก โดยการเปลี่ยนชนิดของ แผ่นธาตุบวก เป็น ตะกั่วแคลเซียม (Lead Calcium) แต่แผ่นธาตุลบ ยังคงเป็น ตะกั่วพลวง (Lead Antimony) ซึ่งเป็นผลทำให้แบตเตอรี่มีอัตราการสูญเสียไอน้ำกรดระหว่างการใช้งาน ลดลง ทำให้ได้แบตเตอรี่ที่มีคุณสมบัติ

- แบตเตอรี่มีการคายประจุไฟฟ้าเองน้อยลงมาก
- แบตเตอรี่มีการสูญเสียไอน้ำกรดน้อยลง
- แบตเตอรี่เกิดการโอเวอร์ชาร์จน้อยลง
- แบตเตอรี่มีการประจุไฟฟ้าได้เร็วขึ้น

(3) แบตเตอรี่ชนิดไม่ต้องการบำรุงรักษา (Maintenance Free Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานของรถยนต์ และพฤติกรรมของผู้ใช้ที่ไม่มีเวลาในการ ดูแลรักษารถยนต์ (หลาย ๆ ท่าน ไม่เคยเปิดฝากระโปรงรถยนต์ หรือ ไม่รู้แม้แต่วิธีการเติมน้ำกลั่น หรือ รถบางคันเจ้าของรถยนต์ยังไม่รู้ว่าแบตเตอรี่ติดตั้งไว้จุดใดในรถยนต์ ก็มี) โดยแผ่นธาตุทั้งแผ่นธาตุบวก และ แผ่นธาตุลบ จะเป็นชนิด ตะกั่วแคลเซียม (Lead Calcium) หรือตะกั่วเงิน (Lead Silver) สำหรับ แบตเตอรี่ชนิด Maintenance Free นั้นยังจำแนกได้ตามประเภทได้ดังนี้

a. Flood (ชนิดน้ำ)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ เป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมอย่างมากที่จะใช้ในประเทศ เขตร้อนเนื่องจากน้ำกรดยังคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ จึงทำให้ทนต่อความร้อนสูง ได้ดี และก็แบ่งประเภทได้อีก คือ

- ชนิดฝาเปิดได้ (Non-Seal Lead Acid Battery) ประเภทนี้แบตเตอรี่ยังคงมีการรั่วไหลของน้ำกรดออกมาได้เล็กน้อย และมีอัตราการสูญเสียน้ำกรดขึ้นอยู่กับระบบฝาปิด แต่ก็มีความทนทานต่อความร้อนสูง
- ชนิดฝาปิดสนิท (Seal Lead Acid Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ปิดสนิททั้งหมด เพื่อต้องการป้องกันการรั่วไหลของน้ำกรด อีกทั้งต้องการรักษาน้ำกรดไว้ภายในแบตเตอรี่ให้ได้นานที่สุด ทำให้ป้องกันรถยนต์จากการกัดกร่อนของน้ำกรด ได้ดีมาก ซึ่งการผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้ จะต้องควบคุมคุณภาพของแผ่นธาตุ โดยใช้เทคนิคการผลิตแผ่นธาตุแบบการรีดอัด ความหนา แน่นสูง (Expansion Grid Technology) และคุณภาพของตะกั่วจะต้องเป็นตะกั่วบริสุทธิ์ เท่านั้น จึงจะทำให้แบตเตอรี่มีความคงทนสูง

b. ชนิดเจล (Gel)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ น้ำกรดภายในแบตเตอรี่ถูกเปลี่ยนสภาพให้เป็น เจล (เพื่อลดปัญหาการรั่วไหลของน้ำกรดออกจากแบตเตอรี่ แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของการใช้งาน ที่ไม่อาจเทียบได้กับแบตเตอรี่ชนิดน้ำกรด จึงทำให้ไม่มีการใช้แบตเตอรี่ชนิดเจล ในรถยนต์

c. ชนิดแห้ง (Absorbent Glass Matt ; AGM Technology)

แบตเตอรี่ประเภทนี้ ได้รับการ พัฒนาต่อมาจากชนิดเจล ซึ่งทำให้ได้แบตเตอรี่ ที่มีคุณภาพสูงและให้พลังไฟฟ้ามากกว่า แบตเตอรี่ปกติมาก (High CCA) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ แผ่นใยแก้วเป็นวัสดุพิเศษทำหน้าที่ เป็นฉนวนกันระหว่างแผ่นธาตุบวก และ แผ่นธาตุลบและแผ่นใยแก้วนี้ ก็ทำหน้าที่ในการดูดซับน้ำกรดทั้งหมดเอาไว้ภายในแบตเตอรี่ ทำให้ไม่มีการรั่วไหลของน้ำกรดออกจากแบตเตอรี่ แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีข้อจำกัดในการใช้งานเช่นเดียวกับชนิดเจล คือ อุณหภูมิในการทำงาน สูงสุด ไม่เกิน 55 องศาเซลเซียส หากใช้งานในที่ที่อุณหภูมิสูง เกินกำหนดต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะมีผลทำให้อายุแบตเตอรี่สั้นกว่าที่ควรจะเป็นได้

5.4.2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเธียม

แบตเตอรี่ลิเธียมเป็นแบตเตอรี่ที่มีการประดิษฐ์ขึ้นมาในปี ค.ศ.1970 โดยเริ่มมาจากการผลิตเซลล์ปฐมภูมิ(Primary Cell) ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดเซลล์ปฐมภูมิคือแบตเตอรี่ชนิดใช้แล้วทิ้ง โดยเหตุผลหลักที่ใช้ลิเธียมเป็นองค์ประกอบหลักเนื่องมาจากลิเธียม เป็นโลหะที่เบาที่สุดที่สามารถให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงที่สุดโดยเมื่อเทียบความหนาแน่นของพลังงานแล้วถือว่ามีความหนาแน่นของพลังงานสูงในน้ำหนักที่เท่ากัน โดยเริ่มแรกโลหะชนิดลิเธียมมีข้อจำกัดในการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่เนื่องจากโลหะลิเธียมมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีเป็นอย่างมากซึ่งทำให้มีอันตรายในการใช้สูง

ภายหลังจึงได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมให้อยู่ในรูปของลิเธียมไอออนแทนโลหะชนิดลิเธียม ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น ภายหลังในปี ค.ศ.1991 บริษัท Sony จึงเป็นผู้ที่นำแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนออกสู่ตลาดเป็นเจ้าแรก โดยแบตเตอรี่ในเซลล์ของลิเธียมไอออนมีค่าความหนาแน่นทางพลังงานสูงกว่าเซลล์ขนิดนิเกิลแคดเมียม ถึง 2-3 เท่า จึงทำให้ปัจจุบันนี้แบตเตอรี่ในเซลล์ในแพคแบตเตอรี่จึงใช้เพียงแค่เซลล์เดียวก็สามารถให้พลังงานกับมือถือได้อย่างเพียงพอและไม่มีปัญหาเรื่องความจำของแบตเตอรี่ จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องล้างแบตเตอรี่ (การใช้แบตเตอรี่ให้หมด) อย่างที่ต้องทำในแบตเตอรี่รุ่นก่อน ๆ

โดยข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมมีข้อจำกัดคือ มีความไวต่อปฏิกิริยาสูง จึงต้องให้มีการจำกัดการใช้งานอยู่ในช่วงแรงดัน, อุณหภูมิ, และกระแส ที่เหมาะสม ดังนั้นภายในแพคแบตเตอรี่จึงต้องมีวงจรจำกัดแรงดันสูงสุดและต่ำสุด วงจรป้องกันกระแสเกิน และวงจรวัดอุณหภูมิขณะใช้งานอยู่ไม่ให้เกินขีดความสามารถ

ของแบตเตอรี่ ซึ่งด้วยปัจจัยที่กล่าวมานี้ทำให้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมมีราคาที่สูง ทำให้มีข้อจำกัดในด้านเศรษฐศาสตร์ว่าคุ้มค่าต่อการลงทุนใช้หรือไม่

อีกหนึ่งประเด็นที่น่าสนใจก็คือ อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเธียม ซึ่งปกติแล้วผู้ผลิตเซลล์แบตเตอรี่มักไม่พูดถึงเรื่องการใช้งานเลย ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Secondary Cell) จะสูญเสียความจุไปตามเวลาหลังจากกระบวนการผลิตอยู่แล้วดังนั้นไม่ว่าจะใช้งานอย่างต่อเนื่องหรือไม่ก็ตามก็จะใช้งานไม่ได้หลังจากผ่านไป 2-3 ปี ดังนั้นถ้าต้องการเก็บรักษาแบตเตอรี่ไว้เป็นเวลานานจึงต้องรักษาแบตเตอรี่ไว้ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมซึ่งจะกล่าวต่อไปภายหลัง

แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ประเภทแรกคือแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-ion Battery) ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นสารออกไซด์ผสมกับลิเธียม และประเภทที่สองคือแบตเตอรี่โพลิเมอร์ซึ่งมีรายละเอียดแบ่งตามประเภทดังนี้

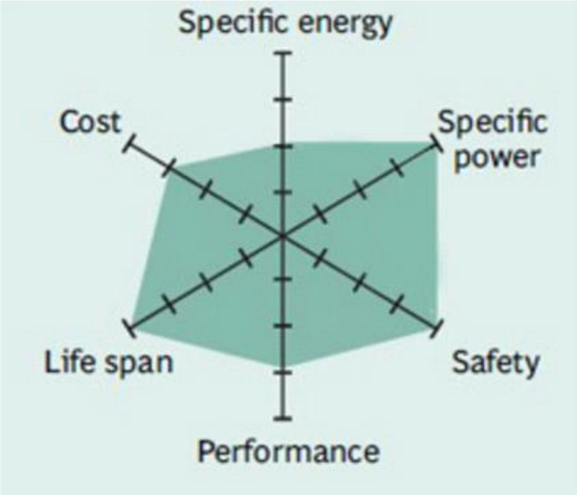
(1) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน (Lithium-ion)

แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีความมั่นใจได้ว่ามีความปลอดภัยต่อการนำไปใช้งานสูง ดังเช่นที่เห็นในการใช้งานในปัจจุบันเช่น โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวงจรป้องกันต่าง ๆ (Protection Circuits) เพื่อที่จะจำกัดแรงดัน จำกัดกระแส ขณะทำการอัดและคายประจุไฟฟ้า รวมไปถึงวงจรที่ใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิว่ามีช่วงการใช้งานอุณหภูมิที่เหมาะสมหรือไม่โดยข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ค่าดูแลรักษาต่ำ ไม่มีผลกระทบจากความจำของแบตเตอรี่ และมีผลจากการคายประจุของตัวเอง (Self-Discharge) ต่ำโดยแบตเตอรี่ชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นการใช้งานกับพวกอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น สามารถแบ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ได้เป็นชนิดย่อย ๆ ดังนี้

(2) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต (Lithium-ion Phosphate)

แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต (Lithium-ion Phosphate : LiFePO4) เป็นแบตเตอรี่ตระกูลลิเธียมไอออนถูกคิดค้นขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2534 มีข้อดีที่โดดเด่นคือด้านความปลอดภัยเนื่องจากมีความเสถียรกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนธรรมดา นอกจากนี้ยังมีความทนทานเนื่องจากมีวงจรอายุสูงถึง 2000 รอบทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนาน แต่ข้อเสียที่ชัดเจนคือมีความจุต่ำกว่าแบตเตอรรี่ลิเธียมไอออนธรรมดาถึง 40% ดังนั้นที่แบตเตอรี่ขนาดเท่ากันแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟตจะมีความจุที่ต่ำกว่า จึงทำให้แบตเตอรี่ขนิดนี้ไม่นิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้พกพา นอกจากนี้คือแบตเตอรี่ชนิดนี้มีแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนธรรมดา ซึ่งถ้านำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะต้องออกแบบวงจรอัดกระจุใหม่ จึงเป็นอีกเหตุผลที่ไม่นิยมใช้ในอุปกรณ์ประเภทพกพา แต่จะได้รับความนิยมในงานด้านอื่น ๆ เช่น รถยนต์ไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้า และอุปกรณ์ทางวิศวกรรมเป็นต้น

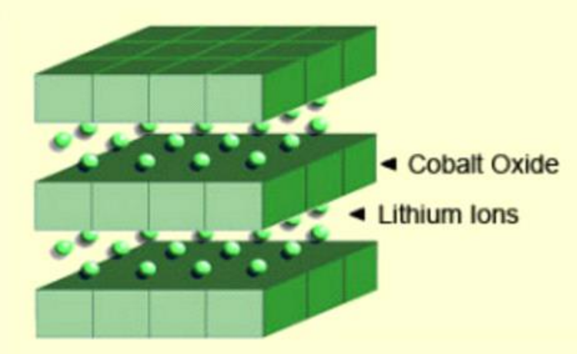
กราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่



รูปที่ 5-34 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนฟอสเฟต

(3) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide)

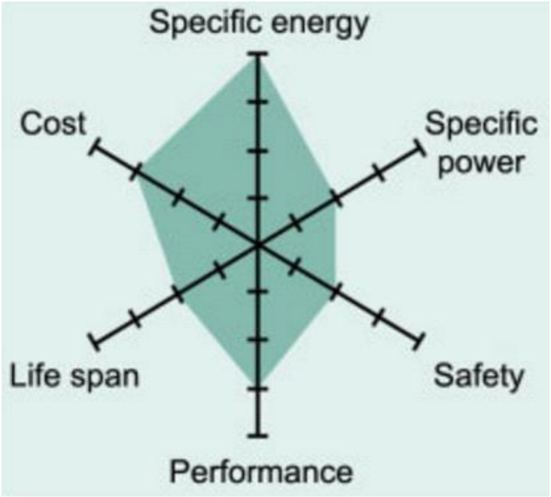
แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide: $LiCoO_2$) เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูงนิยมนำมาใช้ในพวกโทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค, กล้องดิจิตอล โดยภายในแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยโคบอลต์ออกไซด์ในฝั่งแคโทด (Cathode) และแกรไฟต์คาร์บอน (Graphite Carbon) ในฝั่งแอโนด (Anode) แต่ข้อจำกัดของการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีช่วงอายุการใช้งานค่อนข้างสั้น มีช่วงการใช้งานอุณหภูมิค่อนข้างแคบ ทนอุณหภูมิสูงไม่ได้ และจำกัดประเภทของโหลดการใช้งาน



รูปที่ 5-35 โครงสร้างของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโคบอลต์ออกไซด์

นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไม่สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงได้ ดังนั้นการบังคับอัดประจุเพื่อให้แบตเตอรี่เต็มในเวลารวดเร็วนั้นจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงเกินและความเครียดไปตามมา ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวแบตเตอรี่ได้ดังนั้นการใช้งานแบตเตอรี่นี้ควรจะใช้งานในการอัดประจุที่ปลอดภัย (1C)

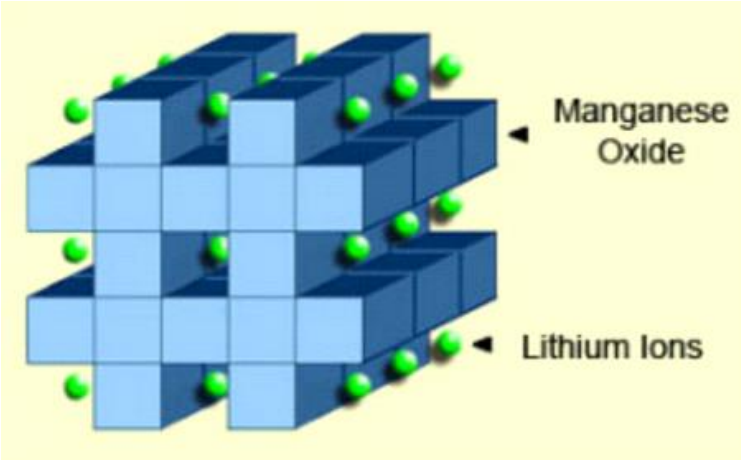
กราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่



รูปที่ 5-36 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมชนิดไอออนโคบอลต์ออกไซด์

(4) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide)

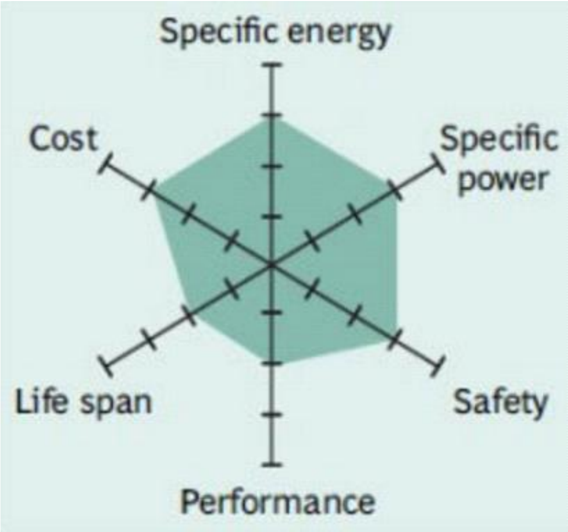
แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิดแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide : $LiMn_2O_4$) มีการศึกษาและนำออกมาสู่ตลาดในปี ค.ศ. 1983 โดยใช้แมงกานีสออกไซด์ด้านแคโทด โดยได้มีการพัฒนามาเรื่อย ๆ ทำให้มีความต้านทายภายในที่ต่ำ มีความสามารถในการทนความร้อนได้สูง และมีการพัฒนาเกี่ยวกับความปลอดภัยอยู่เสมอ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่มีรอบการใช้งานค่อนข้างต่ำส่งผลให้มีอายุการใช้งานต่ำไปด้วย



รูปที่ 5-37 โครงสร้างของลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์

เนื่องด้วยแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีความต้านทานภายในต่ำจึงทำให้ตัวแบตเตอรี่มีคุณสมบัติที่สามารถอัดประจุแบตเตอรี่ได้เร็ว และสามารถคายประจุแบตเตอรี่ที่กระแสสูงได้ โดยแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์นั้นนิยมใช้ในอุปกรณ์ด้านพลังงาน, อุปกรณ์ทางการแพทย์, และอุปกรณ์จำพวกยานพาหนะ เป็นต้น

โดยในด้านของความสามารถในการจุนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จะมีความจุที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมโคบอลต์ กราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

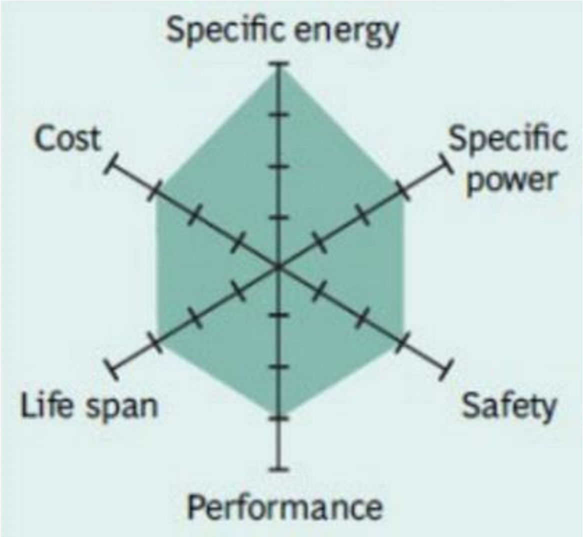


รูปที่ 5-38 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแมงกานีสออกไซด์

(5) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide)

แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide : $LiNiMnCoO_2$ or NMC) เกิดเนื่องมาจากผู้พัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้เล็งเห็นว่าการนำ นิกกิลแมงกานีสโคบอลต์มาใช้ในด้านแคโทดของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนนั้น มีความคล้ายคลึงกับการใช้ลิเทียมคู่กับแมงกานีส โดยจุดเด่นของแบตเตอรี่ชนิดนี้อยู่ที่ ความเป็นเกลือจากแมงกานีส โดยรู้กันดีอยู่แล้วว่านิกเกิลให้พลังงานที่สูงแต่มีความเสถียรต่ำแมงกานีสที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยปรับปรุงในด้านของโครงสร้าง ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่ที่ได้มีความต้านทานภายในที่ต่ำทำให้ทำงานได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้แบตเตอรี่มีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงยิ่งขึ้น แต่ข้อเสียที่ตามมาก็คือจะทำให้ความหนาแน่นของพลังงานต่ำลงนั่นเอง

สำหรับการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้นิยมใช้งานในพวก จักรยานพลังงานไฟฟ้า, รถไฟฟ้า และยานพาหนะต่าง ๆ โดยด้านแคโทดจะมีส่วนผสม ของแมงกานีสและโคบอลต์ รูปกราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

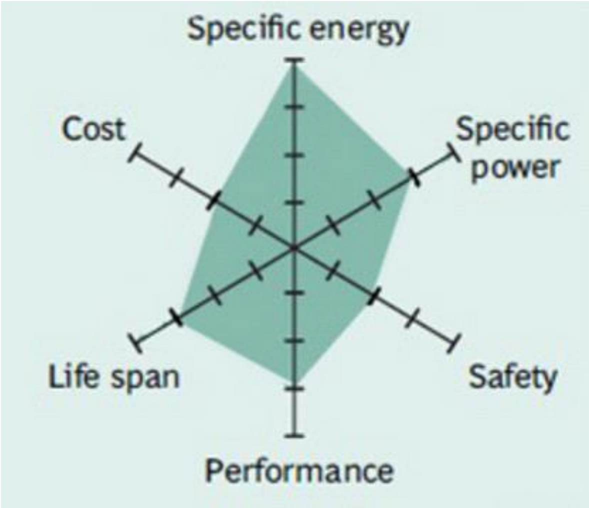


รูปที่ 5-39 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์

(6) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมนิกเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum)

โดยแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมนิกเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide : $LiNiCoAlO_2$) มีการคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคล้ายกับแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide : LiNiMnCoO2 or NMC) ได้แก่มีคุณสมบัติทางด้านพลังงานสูง มีอายุการใช้งานสูง โดยได้มีการนำไปใช้ในรถ po9N ไฟฟ้าของบริษัท Tesla ซึ่งคุณสมบัติเด่นของแบตเตอรี่ประเภทนี้คือ มีความปลอดภัยสูงและราคาต่ำกว่าประเภทอื่น

รูปกราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่

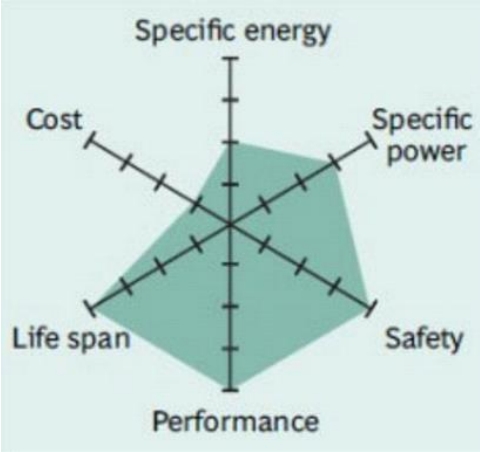


รูปที่ 5-40 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมนิเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์

(7) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไททาเนต (Lithium Titanate)

สำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไททาเนต (Lithium Titanate : $Li_4Ti_5O_{12}$) มีการคิดค้นขึ้นมาในปี ค.ศ.1980 ซึ่งนำมาใช้แทนแกรไฟต์ในด้านแอโนด ซึ่งคุณสมบัติเด่นของมันคือสามารถอัดและคายประจุได้เร็วขึ้นที่กระแสสูงถึง 10C ซึ่งถือว่าสูงกว่าลิเธียมไอออนธรรมดามาก และยังมีความปลอดภัยสูง ในการคายประจุนั้นมีกระบวนการที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีราคาค่อนข้างสูงซึ่งอาจทำให้ไม่คุ้มค่ากับการลงทุน และมีความหนาแน่นของพลังงานค่อนข้างต่ำ

รูปกราฟด้านล่างจะแสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่าง ค่าใช้จ่าย, อายุการใช้งาน, ความหนาแน่นของพลังงาน รวมไปถึงความปลอดภัยเพื่อใช้ในการพิจารณาว่าเหมาะสมแก่การลงทุนและการใช้งานหรือไม่



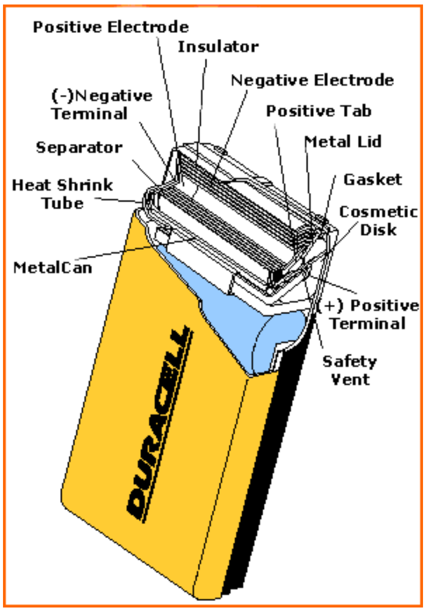
รูปที่ 5-41 ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไททาเนต

(8) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโพลิเมอร์ (Lithium-ionPolymer)

แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนโพลิเมอร์ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ.1970 โดยมีสองแบบคือแบบแข็งและแบบแห้งคล้ายฟิล์มพลาสติก โดยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนชนิดโพลิเมอร์ มีความโดดเด่นในเรื่องของความบางและเบา นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคงอายุการใช้งานที่ดี มีความปลอดภัยสูง แต่ข้อเสียก็คือมีราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน และมีความหนาแน่นทางพลังงานที่ต่ำกว่า

แบตเตอรี่แบบลิเธียมโพลิเมอร์ (Li-Polymer) มีความต้านทานไฟฟ้าในตัวเองสูง จึงไม่สามารถจ่ายกระแสไฟได้มาก จึงมีการเพิ่มเจลเข้าไปภายใน (ภาษาปัจจุบันเราเรียกว่า ไฮบริด หรือลูกผสมนั่นเอง) เพื่อเพิ่มความนำไฟฟ้าทำให้กลายเป็นแบตเตอรี่แบบลิเธียมไอออนโพลิเมอร์ (Li-Ion-Polymer) แต่ด้วยเหตุผลทางการค้า ทำให้ผู้ผลิตบางรายยังเรียกว่าเป็นแบตเตอรี่แบบลิเธียมโพลิเมอร์ (Li-Polymer) นอกจากคุณสมบัติที่คล้ายกับแบตเตอรี่แบบลิเธียมโพลิเมอร์ที่สามารถสร้างให้มีรูปร่างบางมากๆ ได้แล้ว คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีไปกว่าแบตเตอรี่แบบลิเธียมไอออน (Li-ion) ก็ยังไม่เป็นที่ชัดเจนมากนัก

นอกจากนั้นยังอาจจะมีความจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่แบบลิเธียมไอออน (Li-ion) อยู่เล็กน้อย แต่ด้วยความที่มีรูปร่างที่ยืดหยุ่น มีความสามารถในการป้องกันการประจุไฟเกิน โอกาสรั่วไหลของสารละลายอิเล็กโตรไลท์ต่ำ และการต้องการวงจรป้องกันที่น้อยกว่า ก็เป็นเหตุผลที่ผู้ผลิตอาจจะเลือกใช้แบตเตอรี่แบบลิเธียมไอออนโพลิเมอร์ได้



รูปที่ 5-42 โครงสร้างภายในของแบตเตอรีชนิดลิเธียมโพลิเมอร์

5.4.3 แบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอื่นๆ

5.4.3.1 แบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-แคดเมียม (Nickel-cadmium)

แบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-แคดเมียมเป็นแบตเตอรี่ที่มีการอัดประจุที่ง่ายและรวดเร็ว มีจำนวนไซเคิล (cycle) ในการอัดประจุและการคายประจุสูง สามารถอัดประจุและคายประจุได้มากกว่า 1,000 ครั้ง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำ มีความแข็งแรงทนทาน เก็บรักษาง่ายเคลื่อนย้ายสะดวก มีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี หลังจากการอัดประจุครั้งแรก นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูกอีกด้วย

ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำ (Lower energy density)มีผลของ Memory effect ซึ่งหมายถึงการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ได้เพียงบางส่วนไม่สามารถอัดประจุได้เต็มที่ ซึ่งเกิดจากการอัดประจุแบตเตอรี่ในขณะที่แบตเตอรี่เดิมยังไม่หมดดีทำให้การอัดประจุครั้งต่อไปจะใช้เวลาสั้นลง เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเก็บความจำในการอัดประจุที่สั้นที่สุดเอาไว้และทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดน้อยลงแบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-แคดเมียม มีผลของการคายอัดประจุด้วยตัวเองสูง (Highself-discharge) จำเป็นต้องมีการอัดประจุหลังจากการเก็บรักษา

นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังเป็นแบตเตอรี่ที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เนื่องจากมีส่วนประกอบของสารแคดเมียมซึ่งเป็นสารโลหะหนักที่ใช้มากเป็นพิษต่อร่างกายโดยทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ เกิดอาการระคายเคือง และอักเสบของระบบทางเดินแบตเตอรี่ชนิดนี้ส่วนใหญ่ใช้งานกับวิทยุสองทาง เครื่องมือทางเภสัชกร และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

รูปที่ 5-43 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียม

5.4.3.2 แบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-เมทอล-ไฮไดรด์ (Nickel-metal-hydride)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ชนิด นิคเกิล-แคดเมียม แต่มีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า การเก็บรักษาง่ายและเคลื่อนย้ายสะดวก นอกจากนี้วัตถุที่ใช้ไม่มีสารพิษ ดังนั้นจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

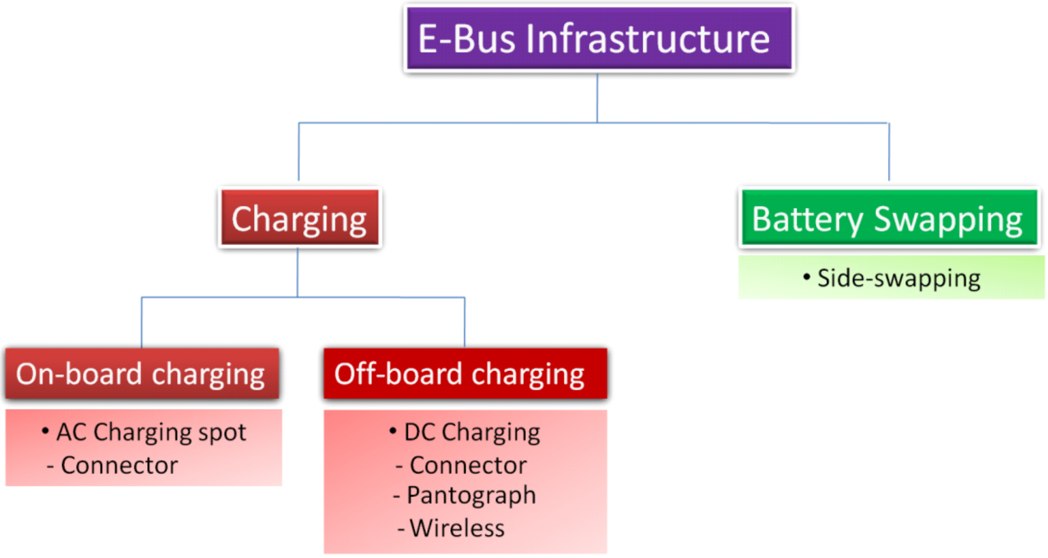
ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีอายุการใช้งานที่จำกัด เมื่อเริ่มใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเสื่อมลงหลังจากอัดประจุและคายอัดประจุ200-300 ไซเคิล (cycle) เก็บรักษาได้ไม่นานใช้งานได้ประมาณ 3 ปี การเก็บแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่ำจะช่วยยืดเวลาการเก็บรักษาได้ มีกระแสไฟฟ้าคายประจุจำกัด การจ่ายกระแสไฟฟ้ามากเกินไปจะมีผลให้การใช้งานลดลง มีผลของการคายประจุด้วยตนเอง (Self- discharge) สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดนิคเกิล-แคดเมียมประมาณ 50% นอกจากนี้การทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะเสื่อมลงหากเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งการใช้งานส่วนใหญ่จะใช้งานกับโทรศัพท์มือถือและคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค เป็นต้น

รูปที่ 5-44 แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-เมทอล-ไฮไดรด์

5.5 สถานีประจุไฟฟ้า (Charging Station)

5.5.1 เทคโนโลยีการชาร์จ

นอกเหนือจากอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้เป็นองค์ประกอบของรถบัสพลังงานไฟฟ้า การวิ่งของรถบัสพลังงานไฟฟ้าและการจ่ายพลังงานให้รถบัสพลังงานไฟฟ้าก็เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงอย่างมาก โดยเฉพาะสำหรับรถที่วิ่งระยะทางไกล ๆ ยิ่งต้องคำนึงถึงแหล่งจ่ายพลังงานหรือพลังงานสำรองให้กับรถบัสพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถบัสพลังงานไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่าง ๆ สามารถแสดงดงได้ดังรูปที่ 5-45



รูปที่ 5-45 โครงสร้างระบบการชาร์จรถบัสพลังงานไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ

รูปที่ 5-46 การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้รถพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ

สำหรับการผลิตเครื่องชาร์จเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถบัสพลังงานไฟฟ้านั้น ได้มีบริษัทต่าง ๆ หลายบริษัทผลิตเครื่องชาร์จออกมาขายในท้องตลาดเป็นจำนวนมาก จากการสำรวจตัวอย่างบริษัทที่ผลิตเครื่องชาร์จสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-3 แต่โดยส่วนมากบริษัทที่ผลิตรถบัสพลังงานไฟฟ้าจะผลิตเครื่องชาร์จซึ่งติดมาพร้อมกับตัวรถด้วยด้วย

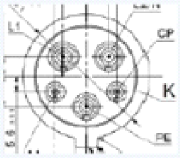
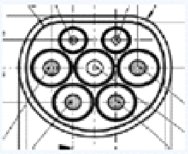
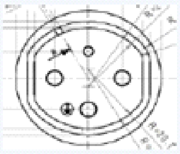
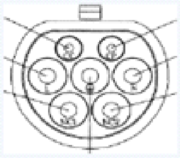
ตารางที่ 5-3 ตัวอย่างบริษัทที่ผลิตเครื่องชาร์จรถบัสพลังงานไฟฟ้า และพิกัดกำลังของเครื่องชาร์จ

บริษัท	พิกัดของเครื่องชาร์จ
SEIMENS	- Off-board top-down pantograph 150 300 450 kW - On-board bottom-up pantograph 60 120 kW - Charging via connector 30-120 kW
PINTSCH BAMAG	- EVA950 100-500 kW
E-station	- DC Fast Charging System 50 kW
BYD	- EVA080KG3806/01 80 kW 60Hz - EVA080KG3805/01 80 kW 50Hz
Jinan E-Shine Electronics Co., Ltd.	- ESFP (1800W) Waterproof battery charger with PFC - ESF (2400W) Waterproof Battery charger - ES-K (2300W) Battery charger - ES-D (1500W) Battery charger - ESF (1800W) Waterproof Battery charger - ESFP (2400W) Waterproof battery charger with PFC
Heliox	- Fast DC charger 700V CCS 30-120 kW - DC ultra fast charge CCS/MODE 4 120-500 kW
Opbrid	- ALL-IN-ONE OPPORTUNITY CHARGING STATION 120 240 360 kW - ALL-IN-ONE OPPORTUNITY CHARGING STATION WITH BATTERY BUFFER 120 240 300 kW
ABB	- Fast charger for electric buses 150 300 450 kW
EDDA-Bus	- Fast charging station 250 kW
Schunk	- Schunk Smart Fast Charging 750 kW - Schunk Smart Fast Charging – “Inverted System” 750 kW
Hybricons	- Ultra Fast Charging 10-700 kW / 300-1000 kW
Aerovironment	- Fast Charging Station 30 50 60 125 250 kW
Blink	- DC Fast charger 30-60 kW
EATON	- Eaton’s Pow-R-Station DC Quick Charger 50 kW MAX
SCHAEFER	- 300kW ultra fast charge station for electrical busses - Outdoor Ultra-fast Bus Charging Station 120 kW - Battery boosted ultra fast-charging system up to 3 MW
Ekoenergetyka	- quickPointTM CITY CHARGER (CC) 200 kW – 1 MW - quickPointTM DEPOT CHARGER (DC) 20 40 80 kW

5.5.1.1 AC Charging Spot

การชาร์จในระบบ AC ของเครื่องชาร์จรถบัสพลังงานไฟฟ้านั้น ระบบการชาร์จนั้นจะเป็นการนำระบบไฟฟ้าเฟสเดียวหรือระบบไฟฟ้าสามเฟสต่อเข้ากับหัวชาร์จและเสียบเข้ากับเต้ารับของตัวรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยตรง โดยมาตรฐานของหัวชาร์จนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 มาตรฐานใหญ่ ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5-4

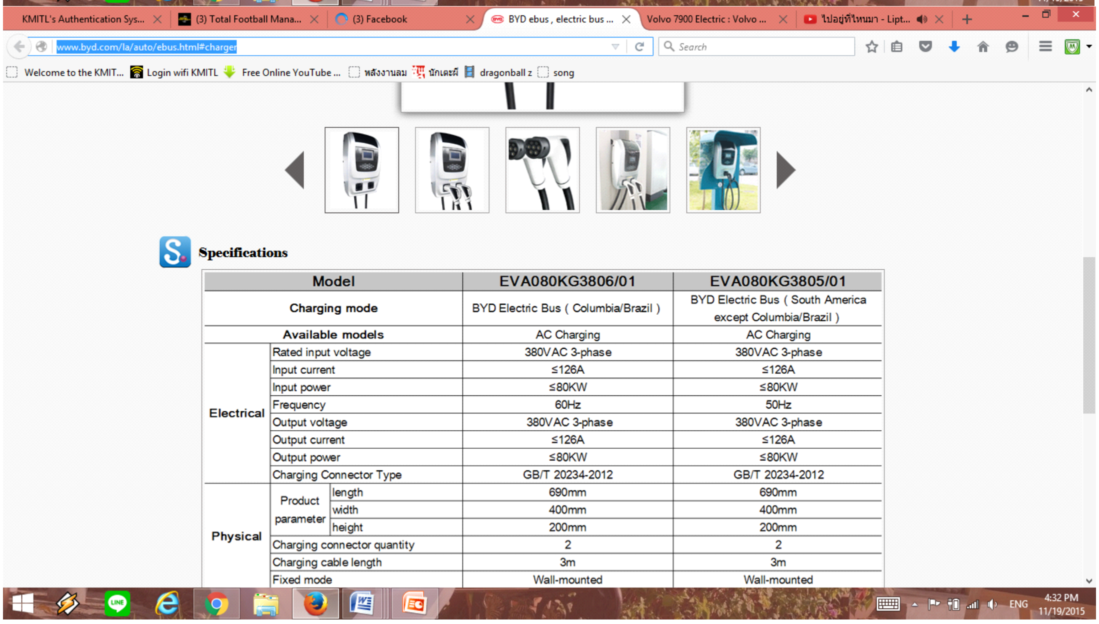
ตารางที่ 5-4 มาตรฐานหัวชาร์จในระบบ AC Charging Spot

	IEC 62196-2:2010			GB 20234.2-2011
	Type1-U.S	Type 2-Germany	Type 3-Italy	China
Phase	Single phase	Single/Three phase	Single phase	Single phase (Three phase reserved)
Current	32A(80A U.S)	70A/63A	16A,32A/32A	16A,32A
Voltage	250V	480V	250V,250V/500V	250V/400V
Pin & interlock	5-pin, mechanical lock	7-pin, electronic lock	4-pin, 5-pin	7-pin, mechanical lock (optional electronic lock)
Control pilot pin	Two short pins	One short pin, one long pin		Two short pins
Male & female pin		Plug: male Vehicle connector: female		Plug: male Vehicle connector: male
Dimensions				

รูปที่ 5-47 ตัวอย่างหัวชาร์จและเครื่องชาร์จในระบบ AC Charging Spot

ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตเครื่องชาร์จในระบบ AC Charging Spot

1.บริษัท BYD โดยเครื่องชาร์จของบริษัท BYD จะมีขนาด 80 kW รับไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 380 V โดยความถี่มีทั้งรุ่นที่เป็น 50 Hz และ 60 Hz



Model			EVA080KG3806/01	EVA080KG3805/01
Charging mode			BYD Electric Bus (Columbia/Brazil)	BYD Electric Bus (South America except Columbia/Brazil)
Available models			AC Charging	AC Charging
Electrical	Rated input voltage		380VAC 3-phase	380VAC 3-phase
	Input current		≤126A	≤126A
	Input power		≤80KW	≤80KW
	Frequency		60Hz	50Hz
	Output voltage		380VAC 3-phase	380VAC 3-phase
	Output current		≤126A	≤126A
	Output power		≤80KW	≤80KW
	Charging Connector Type		GB/T 20234-2012	GB/T 20234-2012
Physical	Product parameter	length	690mm	690mm
		width	400mm	400mm
		height	200mm	200mm
	Charging connector quantity		2	2
	Charging cable length		3m	3m
	Fixed mode		Wall-mounted	Wall-mounted

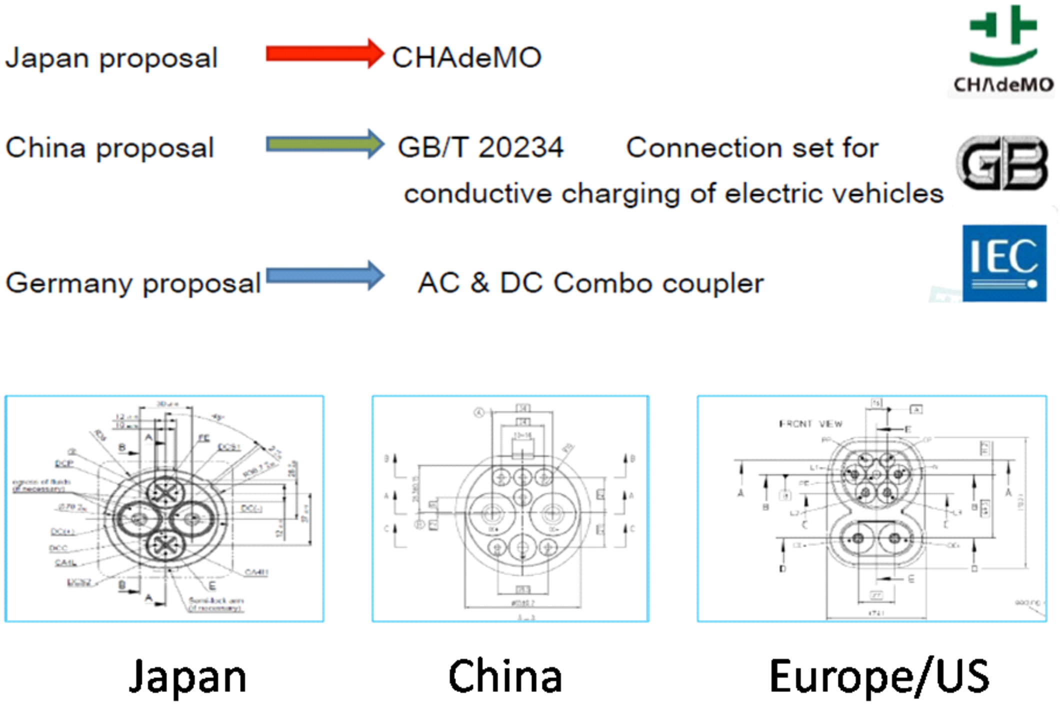
รูปที่ 5-48 รายละเอียดและภาพเครื่องชาร์จของบริษัท BYD

5.5.1.2 DC Fast Charging

การชาร์จในระบบ DC Fast Charging จะเป็นการชาร์จแบบรวดเร็ว โดยการชาร์จนั้นจะมีอยู่หลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการชาร์จด้วยหัวชาร์จแบบธรรมดา (Connector) การชาร์จโดยใช้หัวชาร์จแบบ Pantograph และการชาร์จในระบบ Wireless

(1) การชาร์จด้วยหัวชาร์จธรรมดา (Connector)

การชาร์จในระบบนี้เป็นการชาร์จด้วยหัวชาร์จแบบระบบไฟฟ้ากระแสตรง สามารถแบ่งมาตรฐานออกเป็น 3 มาตรฐานใหญ่ ๆ คือ มาตรฐานของญี่ปุ่น จีน และยุโรป-อเมริกา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-49 โดยกำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 30 kW ถึง 120 kW



รูปที่ 5-49 มาตรฐานหัวชาร์จแบบธรรมดาในระบบ DC Charging

IEC DC Charging Systems

	System A	System B	System C	
	CHAdeMO (Japan)	GB/T (PRC)	COMBO1 (US)	COMBO2 (DE)
Connector				
Vehicle Inlet				
Communication Protocol	CAN		PLC	

รูปที่ 5-50 หัวชาร์จตามมาตรฐานต่าง ๆ

รูปที่ 5-51 ตัวอย่างเครื่องชาร์จและหัวชาร์จตามมาตรฐานต่าง ๆ

ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตเครื่องชาร์จระบบ DC Fast Charging แบบหัวชาร์จธรรมดา

1. บริษัท Siemens

เครื่องชาร์จของ Siemens เป็นระบบการชาร์จแบบ DC มีหลายระดับตั้งแต่ 30 kW ถึง 120 kW เมื่อระบบของเครื่องชาร์จเชื่อมต่อกับกับรถบัสก็จะเริ่มทำการชาร์จอย่างอัตโนมัติ ระบบการชาร์จแบบรวดเร็วจะผลิตกำลังไฟฟ้าขาออกอย่างมากเพื่อเป็นการรับประกันว่าจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ข้อดี

- การเลือกตำแหน่งติดตั้งสามารถทำได้หลากหลาย
- มีกำลังไฟฟ้าขาออกหลายระดับ ตั้งแต่ 30 ถึง 120 kW
- มีการใช่งานแล้วที่สนามบินยุโรป

รูปที่ 5-52 ตัวอย่างเครื่องชาร์จของบริษัท Siemens

2. บริษัท E-station

E-station ได้เปิดตัวสถานีชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถบัสพลังงานไฟฟ้า Optare คือ ผู้ผลิตที่นำเข้าแบตเตอรี่แบบฟลูไซน์ในอังกฤษ อีบัสได้เล็งเป้าไปที่การขนส่งสาธารณะและเพราะว่ามีการใช่งานที่มากขึ้น ทำให้พวกเขาจะทำการสนับสนุนทางด้านความสะอาดและการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อขนส่งสาธารณะในอนาคตนี้ อีบัสช่วยลดระดับมลพิษโดยรวมลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองที่มีการจราจรที่หนาแน่นซึ่งมลพิษทางอากาศก็จะส่งผลโดยตรงต่อปัญหาสุขภาพด้วย

รถบัสพลังงานไฟฟ้า Optare ได้ติดตั้งเทคโนโลยีการชาร์จแบบรวดเร็วไว้ รถบัสพลังงานไฟฟ้า Optare ใช้ Circontrol CHAdeMO ที่เป็นสถานีชาร์จไฟฟ้ากระแสตรงแบบรวดเร็วโดยสามารถชาร์จได้ที่ 80 kWh ถึงจะเต็มความจุของแบตเตอรี่ ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการชาร์จแบบปกติที่จะใช่เวลาตั้งแต่ 6 ถึง 8 ชั่วโมง การใช้การชาร์จแบตเตอรี่ระหว่างวันและข้ามคืนจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ระยะทางของรถบัสจะกลายเป็น 300 km

ด้วยการชาร์จแบบรวดเร็วจะทำให้รถบัสสามารถชาร์จระหว่างช่วงพักกลางวันหรือช่วงพักรถตามตารางได้อย่างง่ายดาย ค่าใช้จ่ายในการทำงานของอีบัสต่ำมากเมื่อเทียบกับการใช่งานรถแบบดีเซล ชาร์จเต็มที่ 80 kWh จะมีค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 20 ล้านดอลล่าร์สหรัฐ ที่อัตราสูงสุด ซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ฟรียิ่งกว่านั้นยังลดเวลาดูแลและค่าใช่จ่ายที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะลงตลอดอายุการใช่งานของมันอีกด้วย การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของ ระบบขนสนที่ศูนย์กลาง Perth แสดงให้เห็นว่าช่วยประหยัดไปได้ถึง 6 ล้านดอลล่าร์สหรัฐ ถ้า CAT fleet ถูกเปลี่ยนเป็นอีบัสก็จะช่วยประหยัดค่าในการจัดซื้อ ค่าการปฏิบัติงาน ค่า R&M และค่าเครื่องชาร์จ ประโยชน์อื่นๆของการเปลี่ยนจาก CAT fleet เป็นรถบัสพลังงานไฟฟ้าประกอบไปด้วย

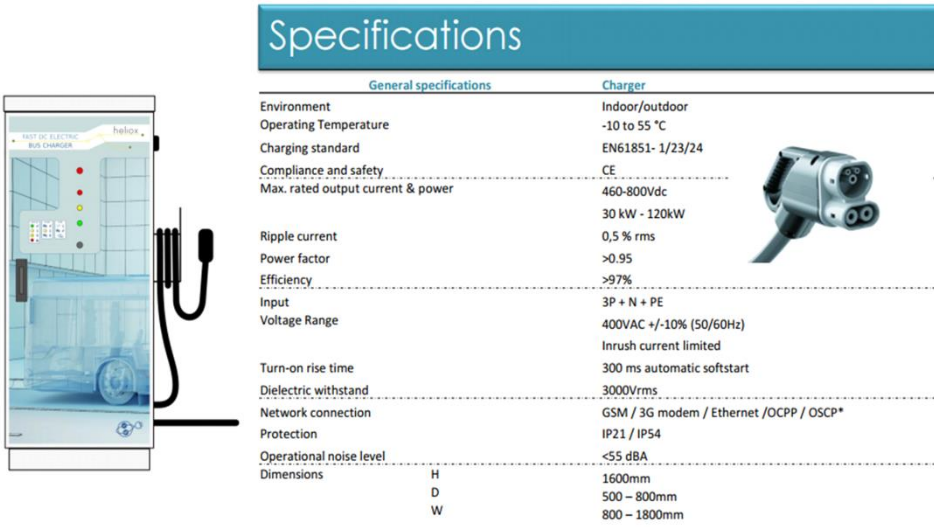
ตารางที่ 5-5 คุณสมบัติเครื่องชาร์จของบริษัท E-station

INPUT	AC
Input voltage	400 VAC 3P+N
Nominal input power	55 KVA
Input frequency	50/60 Hz
OUTPUT	DC
Maximum rated output current	120 A
Maximum rated output power	50 kW
Maximum output DC voltage	500 VDC

รูปที่ 5-53 ตัวอย่างเครื่องชาร์จของบริษัท E-station

3. บริษัท Heliox

บริษัท Heliox ได้ผลิตเครื่องชาร์จ CCS/MODE4 ที่สามารถปรับขนาดของกำลังได้ตั้งแต่ 30kW ถึง 2.5 MW Helix สำหรับในระบบ Fast DC Charger เชื่อมต่อกับ CCS-plug เครื่องชาร์จเชื่อมต่อกับแหล่งจ่าย 400 Vac และจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ระหว่าง 30 kW ถึง 120 kW

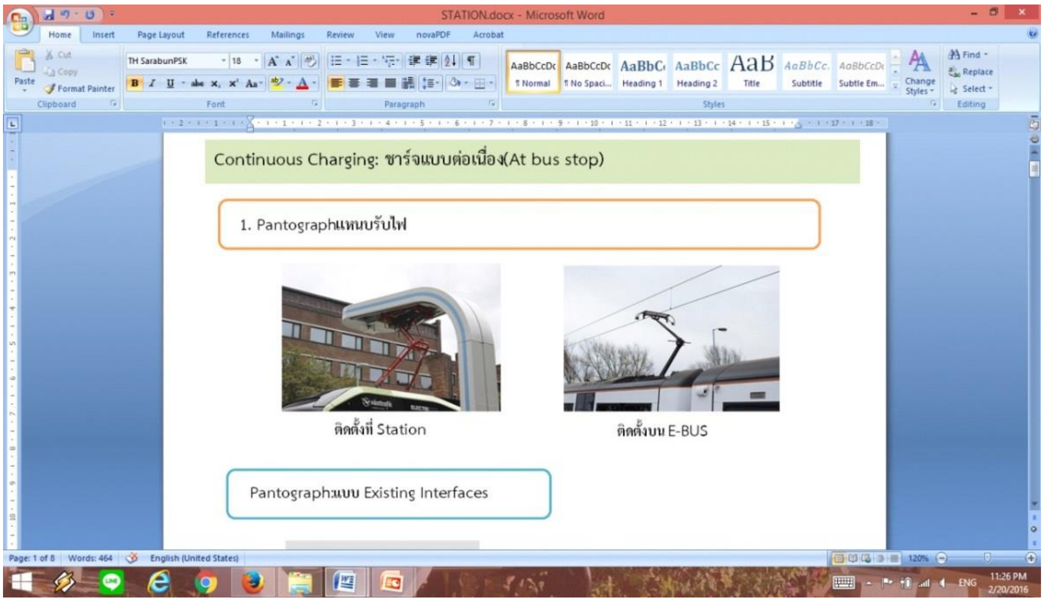

Specifications

General specifications		Charger
Environment		Indoor/outdoor
Operating Temperature		-10 to 55 °C
Charging standard		EN61851- 1/23/24
Compliance and safety		CE
Max. rated output current & power		460-800Vdc
		30 kW - 120kW
Ripple current		0,5 % rms
Power factor		>0.95
Efficiency		>97%
Input		3P + N + PE
Voltage Range		400VAC +/-10% (50/60Hz)
		Inrush current limited
Turn-on rise time		300 ms automatic softstart
Dielectric withstand		3000Vrms
Network connection		GSM / 3G modem / Ethernet /OCPP / OSCP*
Protection		IP21 / IP54
Operational noise level		<55 dBA
Dimensions	H	1600mm
	D	500 – 800mm
	W	800 – 1800mm

รูปที่ 5-54 ตัวอย่างเครื่องชาร์จและรายละเอียดพิกัดเครื่องชาร์จของบริษัท Heliox

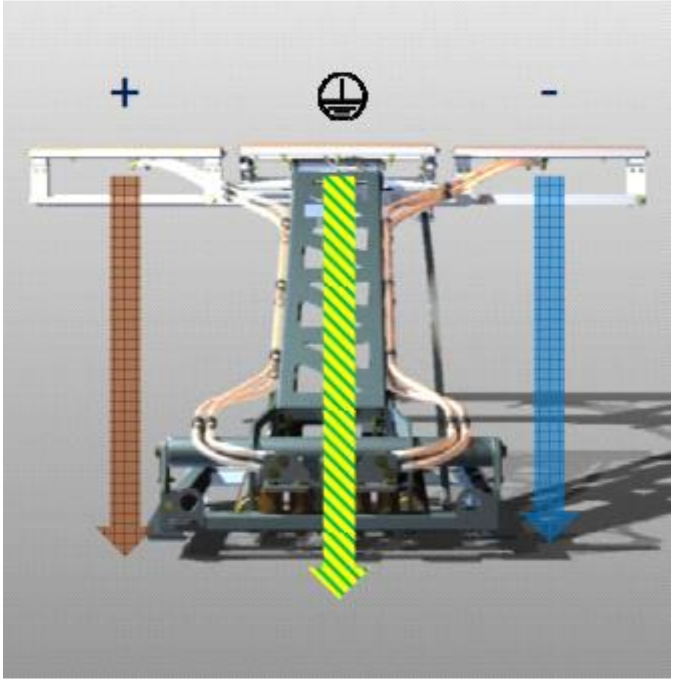
(2) การชาร์จด้วยหัวชาร์จแบบ Pantograph

การชาร์จด้วยหัวชาร์จแบบ Pantograph จะมีด้วยกัน 2 วิธี ซึ่งแบ่งตามรูปแบบการติดตั้งของหัวชาร์จ คือ ติดตั้งที่สถานีชาร์จ และการติดตั้งบนรถบัสพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 5-55 ตัวอย่างเครื่องชาร์จที่ใช้หัวชาร์จแบบ Pantograph

- Pantograph: แบบ Existing Interfaces จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงและมีการแยกระหว่าง ขั้วบวก ขั้วลบ และสายดิน



รูปที่ 5-56 หัวชาร์จแบบ Pantograph

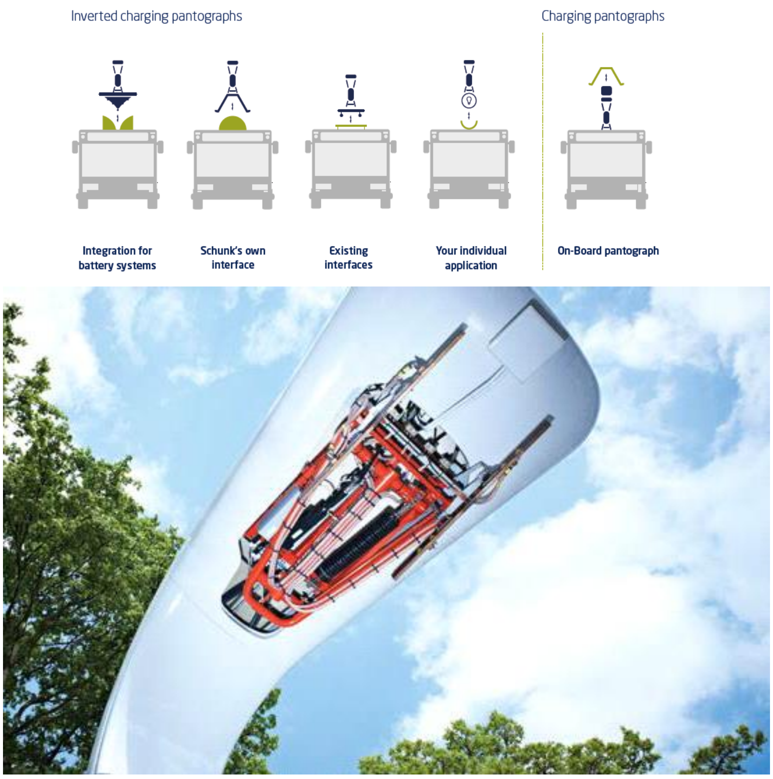
รูปที่ 5-57 การใช้งานหัวชาร์จแบบ Pantograph แบบ Existing Interfaces กับรถบัสพลังงานไฟฟ้า

- Pantograph: แบบ Inverted Interfaces ถูกพัฒนาโดย บริษัท Schunk แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะเนื่องจากยากต่อการเชื่อมต่อ

รูปที่ 5-58 การใช้งานหัวชาร์จแบบ Pantograph แบบ Inverted Interfaces กับรถบัสพลังงานไฟฟ้า

1. การติดตั้ง Pantograph ที่ Station

Pantograph มีหัวชาร์จหลายแบบ แต่ที่ได้รับความนิยม และใช้มากที่สุดคือ แบบหัวราง Existing Interfaces เพราะได้รับการออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ไม่ต้องการความแม่นยำในหาตำแหน่งการชาร์จมากนัก

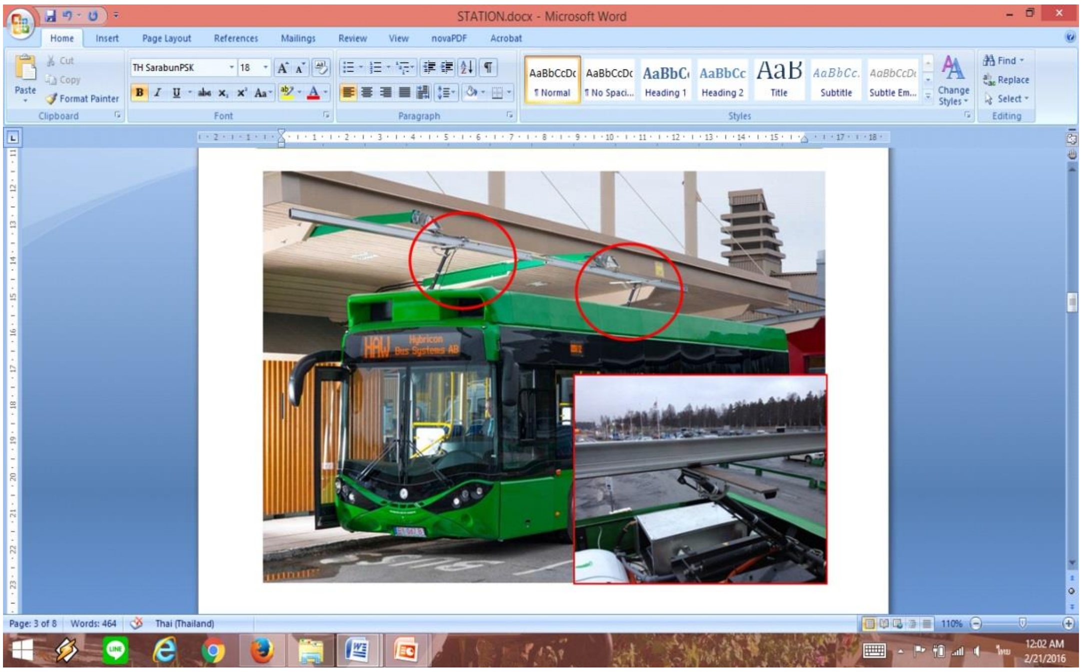


รูปที่ 5-59 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station

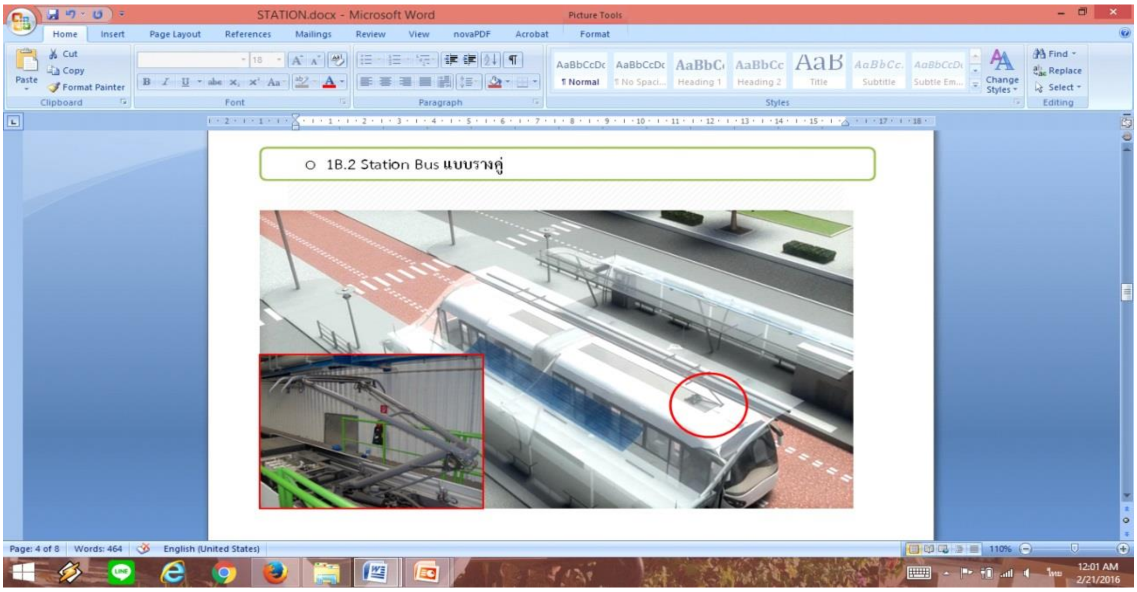
รูปที่ 5-59 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station (ต่อ)

2. การติดตั้ง Pantograph บน E-BUS

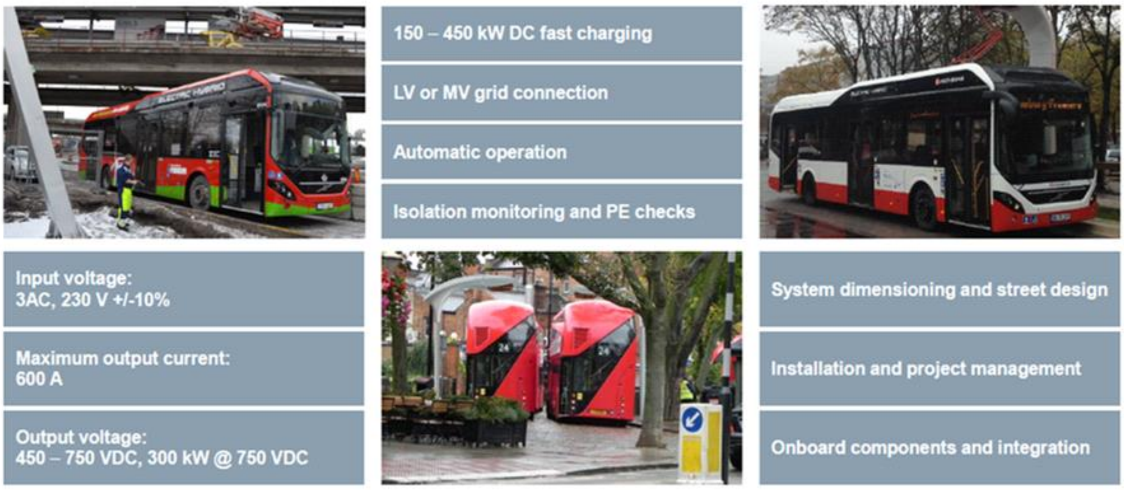
แบบติดตั้งบน E-BUS ถูกออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อระหว่าง ตัวรถกับสถานีและเร็วกว่าแบบ ติดตั้งบนสถานี โดยการติดตั้งแบบนี้มีทั้งแบบรางเดี่ยวและรางคู่ ซึ่งมีข้อเสียคือ น้ำหนักของตัวรถที่เพิ่มขึ้นรถใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ใช้พื้นที่บนสถานีมากกว่าแบบ Pantograph ที่ติดตั้งบนสถานี แต่สามารถเสริมเป็นที่บังแดดได้



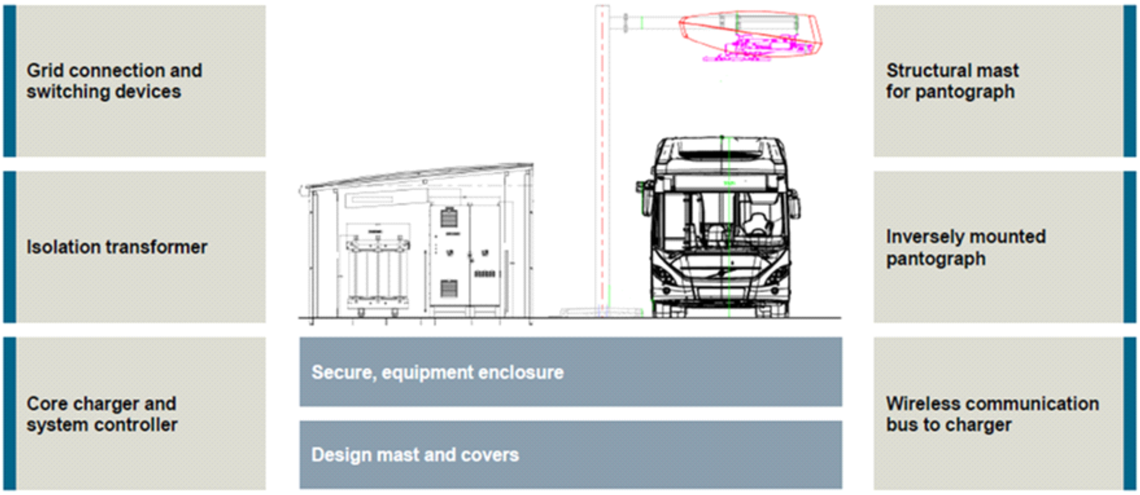
รูปที่ 5-60 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station บน E-BUS แบบรางเดี่ยว



รูปที่ 5-61 การติดตั้ง Pantograph ที่ Station บน E-BUS แบบรางคู่



รูปที่ 5-62 ตัวอย่างพิกัดสถานีชาร์จแบบ Pantograph ที่มีการใช้งานจริง



รูปที่ 5-63 ฟังก์ชันการใช้งานสถานีชาร์จแบบ Pantograph

ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตเครื่องชาร์จระบบ DC Fast Charging แบบหัวชาร์จ Pantograph

1. Siemens

บริษัท Siemens เป็นบริษัทหนึ่งที่มีการผลิตสถานีชาร์จแบบหัวชาร์จ Pantograph ซึ่งมีทั้งแบบการติดตั้ง Pantograph ที่สถานี และการติดตั้ง Pantograph บน E-BUS โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

- Off-borad top-down pantograph

Top-down pantograph คือ ระบบการชาร์จแบบรวดเร็วที่สามารถติดตั้งไว้ที่บนเสาหรือบนหลังคาของป้ายรอรถบัส วิธีการชาร์จแบบ off-board สามารถชาร์จได้กับรถบัสหลายประเภทและตามความต้องการของกริดที่แตกต่างกันได้ แนวคิดของ Pantograph มีเพื่อชาร์จแบตเตอรี่อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นรถบัสจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะเดินทางไปจนถึงสถานีชาร์ตถัดไป อีบัสขับเคลื่อนได้ด้วยการชาร์จไฟฟ้าที่สถานีชาร์จที่มีจำนวนน้อยกว่า Pantograph ที่อยู่ตามเส้นทาง

ข้อดี

- สามารถติดต่อสื่อสารแบบไร้สายผ่านทาง Wi-Fi IEE 802.11a ตามมาตรฐาน ISO 15118
- Pantograph แบบ 4 ขั้ว และควบคุมด้วย PE/isolation
- มีระบบเชื่อมต่อและชาร์จเองแบบอัตโนมัติ
- ขนาดเครื่องชาร์จ 150, 300 และ 450 kW

รูปที่ 5-64 สถานีชาร์จ Off-board top-down pantograph ของบริษัท Siemens

- **On-board bottom-up pantograph**

Bottom-up pantograph ของเราสามารถเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบพลังงานได้อย่างยืดหยุ่นและรับพลังงานตามที่มันต้องการ ยกตัวอย่างเช่น รถรางที่มีระบบสายเหนือหัวและใช้วิธี On-board อุปกรณ์ชาร์จทั้งหมดถูกติดตั้งไว้บนรถบัส รวมถึง Pantograph 2 ขั้ว สำหรับต่อกับสายเหนือหัว และจะทำให้การปล่อยก๊าซเรือนกระจกกลายเป็นศูนย์

ข้อดี

- ราคาคุ้มค่า
- รับไฟฟ้ากระแสตรงจากสายเหนือหัวที่ 750 V
- ขนาดเครื่องชาร์จ 60 และ 120 kW

รูปที่ 5-65 สถานีชาร์จ On-board bottom-up pantograph ของบริษัท Siemens

2. บริษัท PINTSCH BAMAG

PINTSCH BAMAG ได้นำเสนอ ระบบการชาร์จไฟฟ้าแบบรวดเร็วสำหรับรถอีบัสเพื่อไว้สำหรับการขนส่งสาธารณะ เพราะว่าจุดเริ่มต้นของเราอยู่ในรางรถไฟ เครื่องของเราจึงมีลักษณะดังต่อไปนี้

ความปลอดภัย

- สวิตซ์ที่มีความปลอดภัยและป้องกันการเข้าถึง
- ลูปความปลอดภัยที่เชื่อมต่อระหว่างเครื่องชาร์จกับแบตเตอรี่
- เครื่องตัดการเชื่อมต่อที่มีคุณภาพสูง
- สามารถตรวจสอบยานพาหนะได้ด้วยตัวคาบคุมกลาง
- ใช่งานฮาร์ดแวร์สำหรับการตรวจสอบได้โดยไม่ต้องใช้ซอฟแวร์

การหามาใช้งานง่าย

- ใช้อุปกรณ์จากส่วนประกอบของรางรถไฟ
- ใช้อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยช่วงของอุณหภูมิที่กว้าง
- ลดอัตราการล้มเหลวด้วยการคูลลิ่งที่ดี
- ปรับขนาดเพื่อให้ทำงานได้ที่ความถี่นาฬิกาที่สูง

ประสิทธิภาพสูง

ความสูญเสียจะถูกกระจายออกไป เนื่องจากการใช้งานพัดลมจะเป็นไปได้ยากในพื้นที่อยู่อาศัย ความสูญเสียที่มากนำไปสู่ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานที่สูง ดังนั้น PINTSCH BAMAG ได้ทำโฟกัสไปที่การพัฒนาเรื่องของประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ซึ่งจะสามารถช่วยคุณประหยัดเงินจำนวนมหาศาลได้เมื่อเทียบกับวิธีอื่น

การแสดงผลที่สูง

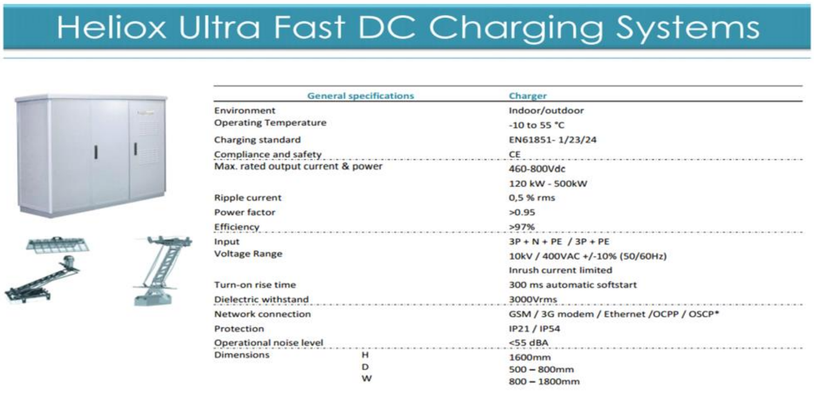
เพราะว่าข้อจำกัดของพลังงานในแบตเตอรี่และข้อจำกัดของพื้นที่ รถอีบัสจึงอยู่กับความถี่ของการจอดรถหยุดเพื่อชาร์จแบตเตอรี่เพื่อที่จะลดเวลาในการชาร์จให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ขนาดความจุของโหลดจึงเป็นเรื่องจำเป็น ดังนั้น PINTSCH BAMAG จึงจัดให้ระบบมีการส่งได้มากถึง 500 kW และกำลังขาออกที่มากกว่านั้นก็ยังสามารถเป็นไปได้อีกด้วย

การชาร์จที่แรงดันสูงสำหรับรถอีบัส

แบตเตอรี่ขนาดใหญ่สำหรับยานพาหนะขนาดใหญ่มีความจำเป็นที่จะใช้ระดับแรงดันที่สูงที่สามารถหาได้จากผลิตภัณฑ์ของเราที่มีแรงดันมากถึง 1000 V หรือมากกว่านั้นถ้าเป็นไปได้

3. บริษัท Heliox

Fast DC Charger ของ Heliox ถูกออกแบบมาเพื่อชาร์จอย่างรวดเร็วสำหรับยานขนส่งสาธารณะโดยใช้แรงดัน 700V และการเชื่อมต่อแบบ Pantograph/CCS/MODE4 ลดแหล่งกักเก็บพลังงานแต่ก็เพียงพอสำหรับการใช้การในรถไฟฟ้าได้อย่างดีที่สุดทำให้สามารถเพิ่มจำนวนผู้โดยสาร ในขณะที่ลดน้ำหนักและลดค่าใช้จ่ายในการลงทุน ปลอดภัยและได้มาตรฐานด้วยระบบ CCS/MODE4 ที่สามารถปรับขนาดของกำลังได้ตั้งแต่ 120kW ถึง 2.5 MW Helix Fast DC Charger เชื่อมต่อกับ CCS-plug/pantograph ผ่านระบบสื่อสาร MODE4 ด้วยมาตรฐานเหล่านี้จึงมั่นใจว่าจะเข้ากันได้กับผู้ผลิตยานพาหนะ



General specifications		Charger
Environment		Indoor/outdoor
Operating Temperature		-10 to 55 °C
Charging standard		EN61851- 1/23/24
Compliance and safety		CE
Max. rated output current & power		460-800Vdc 120 kW - 500kW
Ripple current		0,5 % rms
Power factor		>0.95
Efficiency		>97%
Input		3P + N + PE / 3P + PE
Voltage Range		10kV / 400VAC +/-10% (50/60Hz) Inrush current limited
Turn-on rise time		300 ms automatic softstart
Dielectric withstand		3000Vrms
Network connection		GSM / 3G modem / Ethernet /OCPP / OSCP*
Protection		IP21 / IP54
Operational noise level		<55 dBA
Dimensions	H	1600mm
	D	500 – 800mm
	W	800 – 1800mm

รูปที่ 5-66 รายละเอียดและภาพเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Heliox

รูปที่ 5-67 โมเดลเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Heliox

4. บริษัท Opbrid

Opbrid Busbaar All-in-One Opportunity Charger ได้ทำการรวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นสำหรับการชาร์จไว้ในเสาแนวตั้ง อีกทั้งยังมีขนาดที่เล็กกว่า 0.5 ตารางเมตร ทำให้การวางแผนและการติดตั้งมีความง่าย และมีพื้นที่ว่างมากพอสำหรับคนเดินเท้าและนั่งปั่นจักรยาน

มีการออกแบบให้เหมาะสมสำหรับทุกตัวเมือง และประหยัดค่าใช้จ่ายอันเนื่องมาจากการก้าวหน้าทางวงการอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการออกแบบให้ได้ตามมาตรฐาน การใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงและบริการที่ดีทำให้ไม่เกิดปัญหาในการดำเนินการ

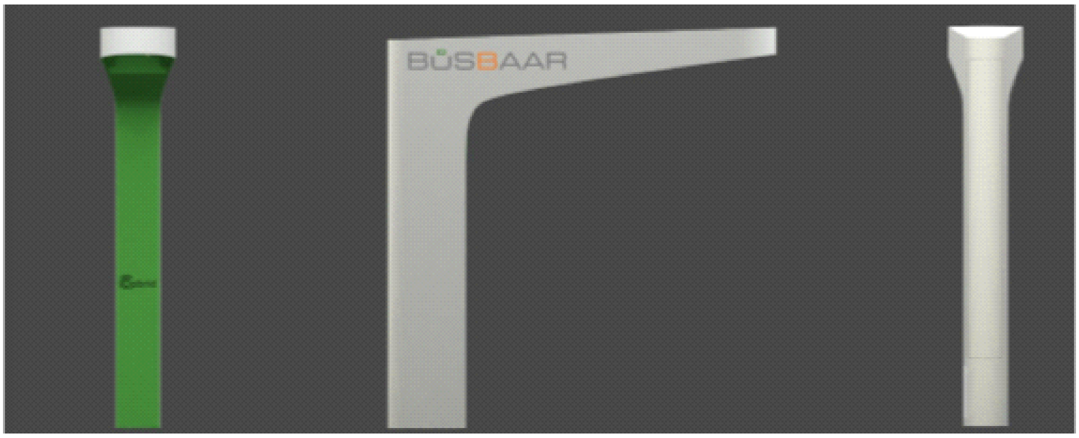
ข้อดี

- มีผลกระทบน้อยต่อทางปั่นจักรยานและทางเท้าเนื่องจากมีขนาดที่เล็ก
- มีค่าการดำเนินการที่น้อยเพราะต้นทุนในการเป็นเจ้าของที่ต่ำและมีอายุการใช้งานที่นาน
- มีรูปลักษณ์ภายนอกที่สวยงามและมีเสียงรบกวนต่ำ
- มีความเสี่ยงต่ำเพราะใช้ระบบการเชื่อมต่อแบบ Volvo Compatible Cost Effective
- มีความซับซ้อนทางโครงสร้างน้อยเพราะเจาะหลุมแค่นิดเดียว
- มีความพร้อมในการใช้งานสูงเพราะใช้อุปกรณ์คุณภาพสูง
- กระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย
- แข็งแรงและทนทานต่อพวกอันธพาล
- พื้นผิวดีเยี่ยมเหมาะสำหรับการติดป้ายโฆษณา

ยกตัวอย่างเช่น: ถนนสายหนึ่งใน Goteborg ประเทศสวีเดน มีรถบัสผ่าน 3 คันต่อชั่วโมง เส้นทางเดินรถนี้มีระยะทาง 15 กิโลเมตร เพราะฉะนั้นรถบัสต้องการพลังงาน 20kWh เพื่อใช้ในวิ่งตลอดสาย ถ้ามี charger พิกัด 300kW จะใช้เวลาในการชาร์จรถบัส 20kWh เป็นเวลา 4 นาที แต่ว่ามีรถบัสผ่านทั้งหมด 3 คันต่อชั่วโมง ดังนั้นปริมาณพลังงานที่ต้องการในหนึ่งชั่วโมงคือ 60kWh ถ้าไม่ใช้ battery buffer จะทำให้ grid demand เป็น 300kW เป็นเวลา 12 นาทีต่อชั่วโมง เปรียบเทียบกับ Opbrid Busbaar with Battery Buffer จะต้องการดึงกำลังเพียง 60 kW อย่างต่อเนื่อง ทำให้ลดการสูญเสียค่าใช้จ่ายใน peak demand หรือประมาณ 12500 ยูโรต่อปี (อัตราค่าไฟของ Goteborg Energi ปี 2015)

SPECIFICATIONS

DESCRIPTION	DETAILS
Charger Duty Cycle	Continuous
Charging Interface	Volvo Compatible
Output Voltage	400 to 750VDC
Output Power to vehicle	120, 240 or 360kW
Input Voltage	380 or 400VAC 3 Phase



รูปที่ 5-68 โมเดลและพิกัดเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Opbrid

รูปที่ 5-69 โมเดลการใช้งานเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Opbrid

5. บริษัท Schunk

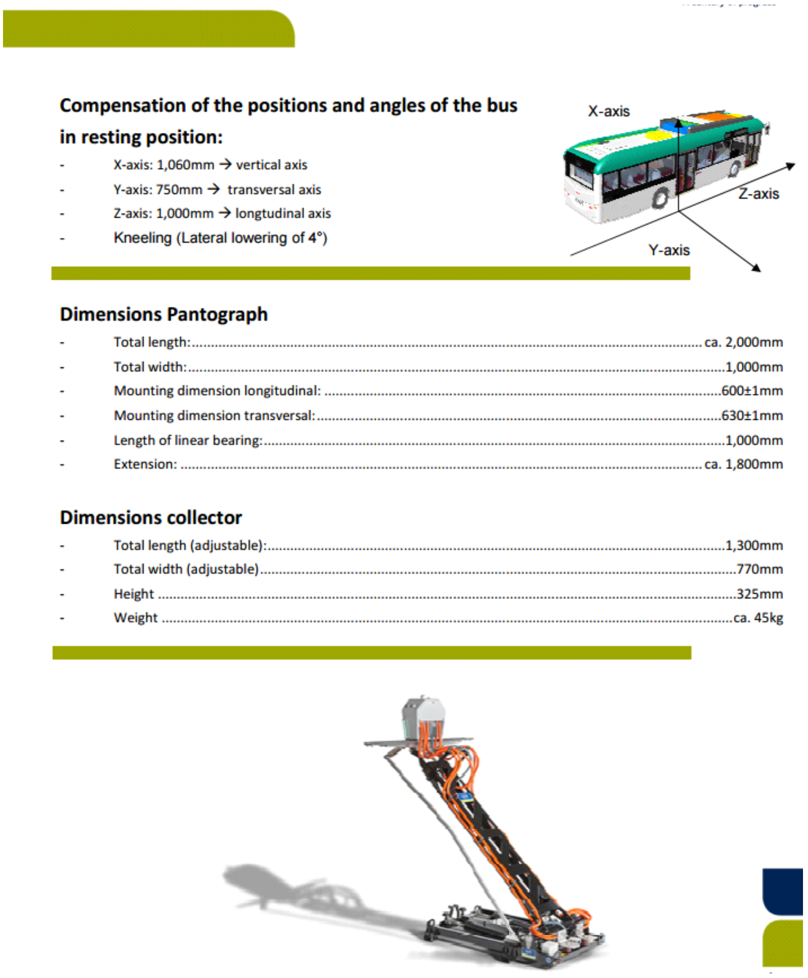
Schunk Smart Fast Charging การชาร์จอย่างรวดเร็วแบบอัจฉริยะถูกออกแบบเป็นแขนเดียวที่ประกอบไปด้วยหัวสัมผัสหุ้มฉนวน 4 โพล แบบ Pantograph

หัวสัมผัสมีความคล่องตัวสูงติดอยู่กับแบริ่งทำให้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งและองศาของตัวรถบัส

หน้าสัมผัส (ขั้วบวก ขั้วลบ PE และ Control Pilot) ถูกกั้นด้วยฉนวนจากกันและกันและได้ติดตั้งหน้าสัมผัสในสถานีการชาร์จ ทำให้กระแสมาสารถไหลผ่านจากสถานีการชาร์จถึงแหล่งกักเก็บพลังงานในตัวรถบัสได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที อีกทั้งยังมี Control Pilot ที่ทำหน้ารับประกันความปลอดภัยของกระแสไฟฟ้าตลอดทั้งกระบวนการชาร์จ

Pantograph ยกขึ้นโดยใช้แรงสปริงและลงโดยใช้ electric lowering unit ที่ถูกติดตั้งบนโครงรถ

การออกแบบแบบนี้มีความกะทัดรัดเป็นอย่างมากและมีน้ำหนักที่เบาซึ่งง่ายต่อการจัดวางระบบการชาร์จทั้งหมดด้วยรอบการชาร์จที่สั้น



Compensation of the positions and angles of the bus in resting position:

- X-axis: 1,060mm → vertical axis
- Y-axis: 750mm → transversal axis
- Z-axis: 1,000mm → longtudinal axis
- Kneeling (Lateral lowering of 4°)

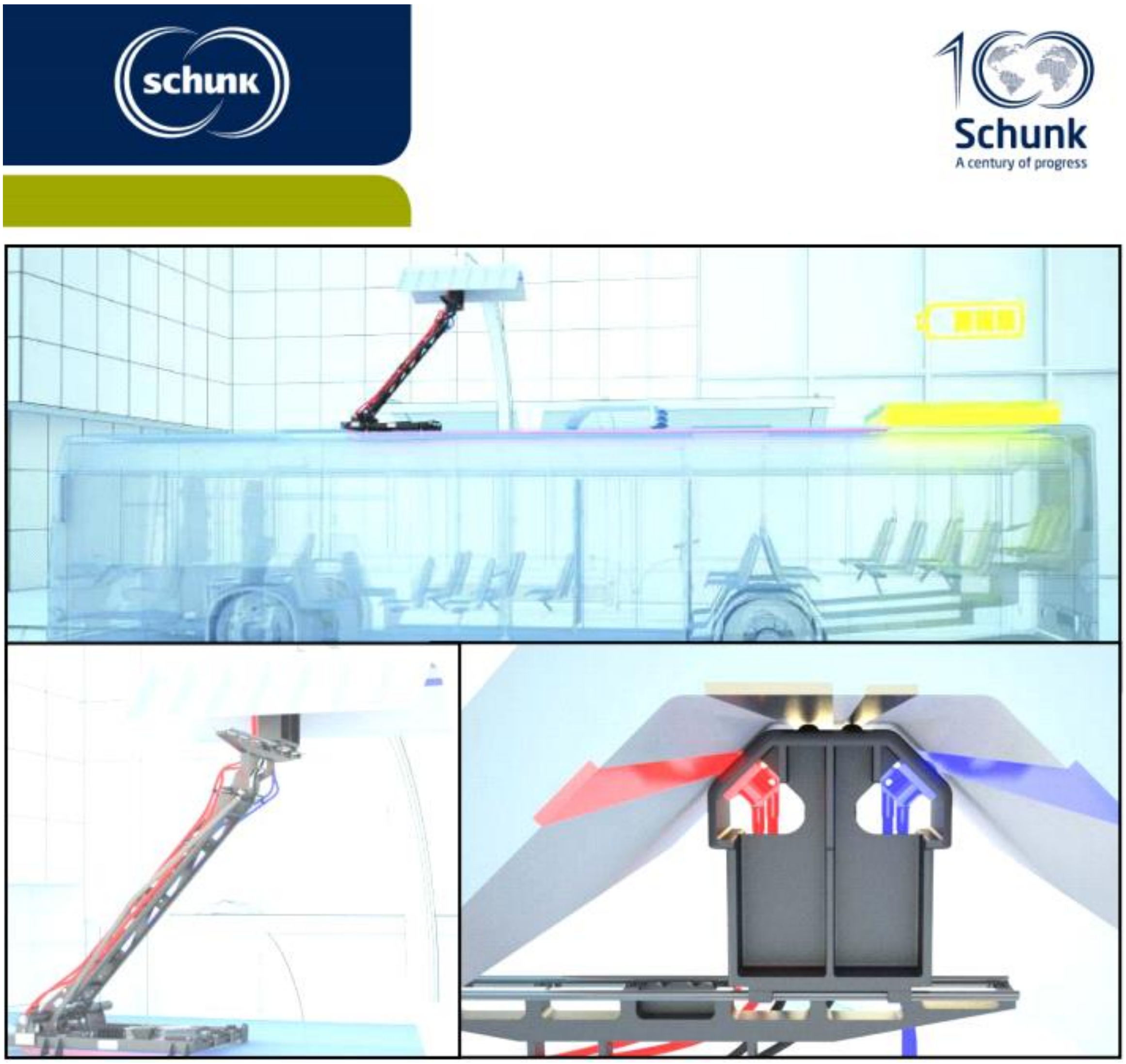
Dimensions Pantograph

- Total length: ca. 2,000mm
- Total width: 1,000mm
- Mounting dimension longitudinal: 600±1mm
- Mounting dimension transversal: 630±1mm
- Length of linear bearing: 1,000mm
- Extension: ca. 1,800mm

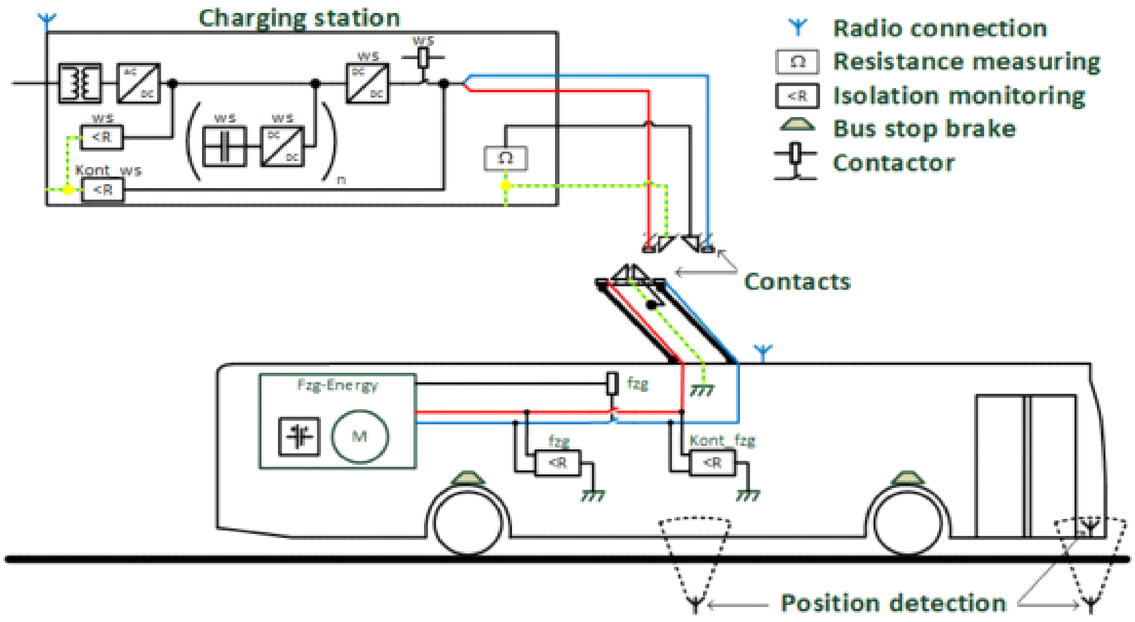
Dimensions collector

- Total length (adjustable): 1,300mm
- Total width (adjustable) 770mm
- Height 325mm
- Weight ca. 45kg

รูปที่ 5-70 รายละเอียดและพิกัดเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Schunk



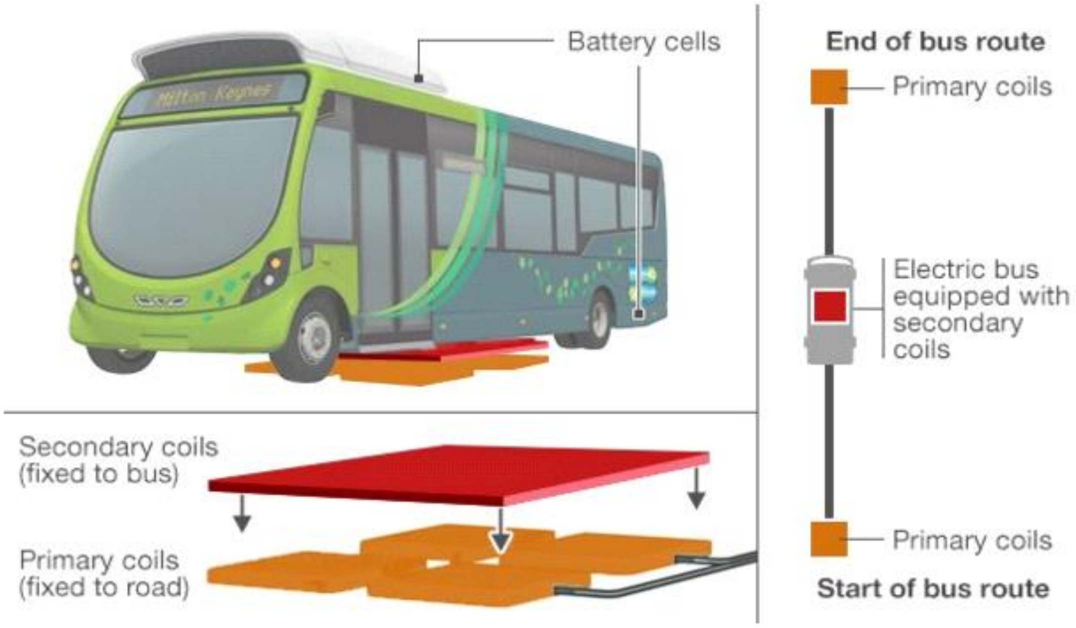
รูปที่ 5-71 การใช้งานเครื่องชาร์จแบบ Pantograph ของบริษัท Schunk



รูปที่ 5-72 โมเดลสถานีชาร์จแบบ Pantograph

(3) การชาร์จด้วยระบบ Wireless

สำหรับตัวอย่างการศึกษาและการใช้งานรถบัสพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีการชาร์จด้วยระบบ Wireless ได้มีการศึกษาและนำมาใช้งานจริงที่เมือง Milton Keynes ซึ่งเป็นเมืองทางตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศอังกฤษ โดยรถบัสพลังงานไฟฟ้าจะชาร์จพลังงานไฟฟ้าที่สถานีเริ่มต้นในช่วงเวลากลางคืนจนเต็ม หลังจากนั้นเมื่อมีการรับส่งผู้โดยสาร รถบัสพลังงานไฟฟ้าจะมีการชาร์จพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบ wireless ขณะที่จอดอยู่ที่ป้ายผู้โดยสาร โดยการชาร์จ 1 ครั้งขณะที่จอดอยู่ที่ป้ายรับส่งผู้โดยสารจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที สำหรับเทคนิคการชาร์จนั้นจะใช้เทคนิค inductive charging ซึ่งมีการสร้างสนามแม่เหล็กเบนแผ่นโลหะที่พื้นถนน หลังจากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำกับแผ่นโลหะที่ติดอยู่ที่ตัวรถบัสพลังงานไฟฟ้า เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและนำพลังงานที่ได้ไปชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 5-73 โมเดลการชาร์จด้วยระบบ wireless ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

รูปที่ 5-74 ตัวอย่างการใช้งานระบบการชาร์จด้วยระบบ wireless

(4) Battery Swapping

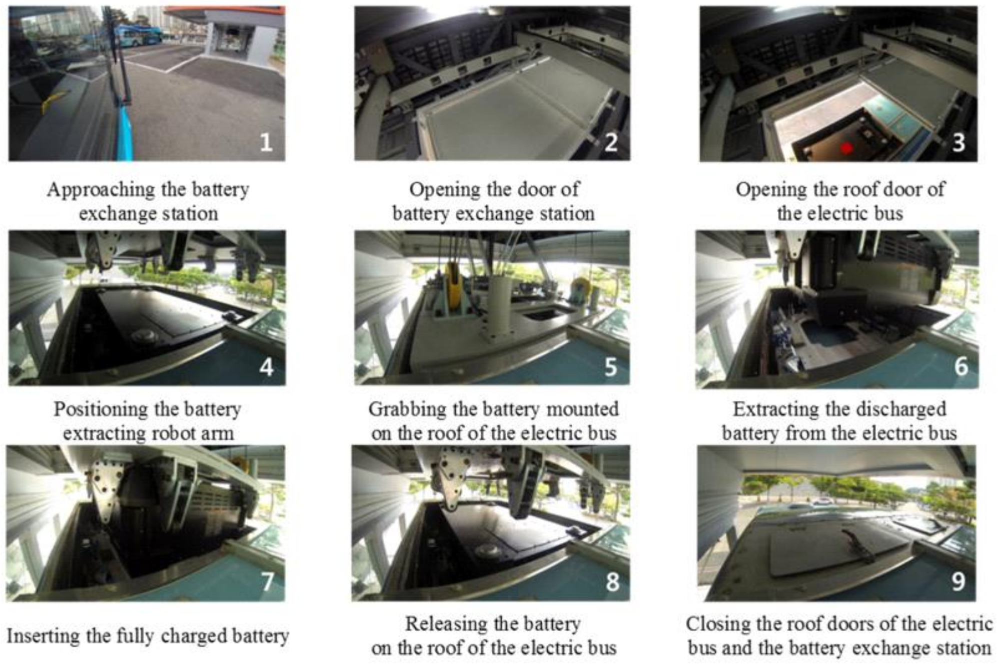
คุณลักษณะของรถบัสไฟฟ้าที่เหมาะสมในเมืองคือรถบัสที่มีระบบการสลับเปลี่ยนกันภายในเมืองทำให้ง่ายต่อการออกแบบเส้นทางเดินรถและตารางเวลาการเดินรถ โดยคุณสมบัติทั่วไปที่เป็นระบบดังกล่าวมีข้อกำหนดสองข้อคือรถต้องวิ่งไปตามเส้นทางและเวลาที่กำหนด และข้อสองคือรถบัสต้องวิ่งอย่างต่อเนื่องนั้นคือรถบัสจะไม่หยุดและพักที่สถานีเป็นเวลานานนั้นเป็นเหตุให้รถบัสพลังงานไฟฟ้าต้องหาทางที่จะชาร์จพลังงานเข้าแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการเสียเวลาที่สถานีชาร์จดังนั้นวิธีการที่เรียกว่าการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสพลังงานไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นโดยส่วนประกอบของระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสพลังงานไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลักสามส่วนคือสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รถบัสพลังงานไฟฟ้า (a battery swapping station , BSS) รถบัสพลังงานไฟฟ้าที่มีระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swappable Smart Electric Bus , BSSEB) และระบบควบคุมของรถบัสพลังงานไฟฟ้าหรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Smart Bus Information Service ,SBIS)

หุ่นยนต์สับเปลี่ยนแบตเตอรี่และสถานีอัดประจุถูกสร้างขึ้นตลอดเส้นทางการวิ่งของรถบัสพลังงานไฟฟ้าด้วยออกแบบให้เหมาะสมกัน เมื่อพลังงานในแบตเตอรี่ได้ถูกใช้จนหมดในการวิ่ง รถบัสพลังงานไฟฟ้าจะวิ่งเข้าสู่สถานีการสับเปลี่ยนเพื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีพลังงานเต็มมาใช้แทน ส่วนแบตเตอรี่ที่ถูกใช้จนหมดจะเข้าสู่กระบวนการอัดประจุแบตเตอรี่โดยมีการวางระบบเพื่อป้องสภาวะโหลดเกินของระบบไฟฟ้าด้วย

<u>ตัวอย่างการศึกษาเทคนิค Battery Swapping ในประเทศเกาหลีใต้ (Public Transportation Solution with an Electric Bus Integrated with a Roof-Top Mounted Battery Exchange System in Korea)</u>

ในงานวิจัยที่ประเทศเกาหลีใต้โดยเส้นทางรถบัสพลังงานไฟฟ้าที่กรุงโซล โดยรอบเส้นทางวิ่งโดยเฉลี่ยเป็นระยะทาง 35.4 กิโลเมตร โดยสร้างสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ทุกๆ 20 กิโลเมตรโดยมีการออกแบบแบตเตอรี่ให้เข้ากับระยะทางการวิ่งและระบบฟ้าโดยมีเงื่อนไขของฤดูกาลมาเกี่ยวข้อง

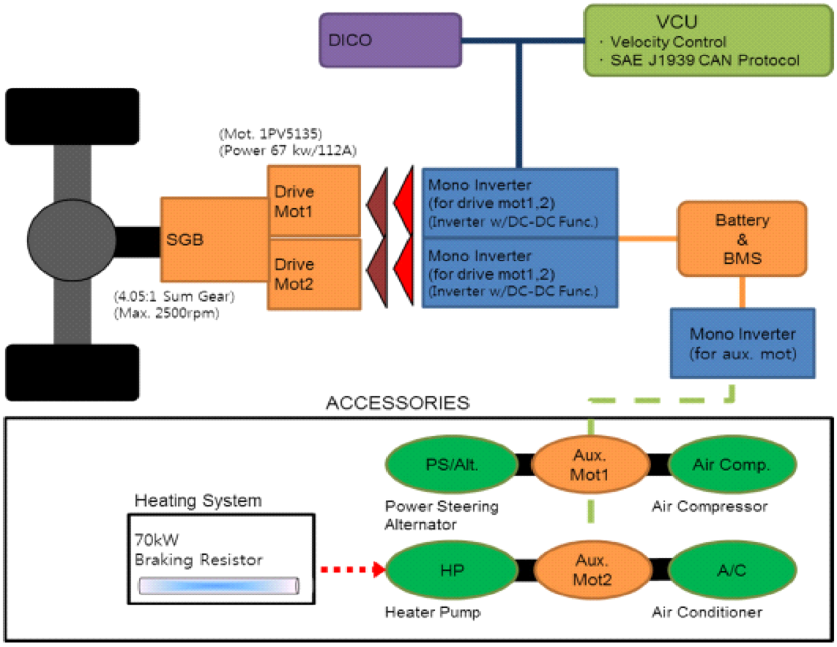
จากรูปที่ 5-75 เป็นภาพแสดงขั้นตอนการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระยะเวลา 60 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่พอเหมาะสำหรับผู้โดยสารในการขึ้นลงรถบัส



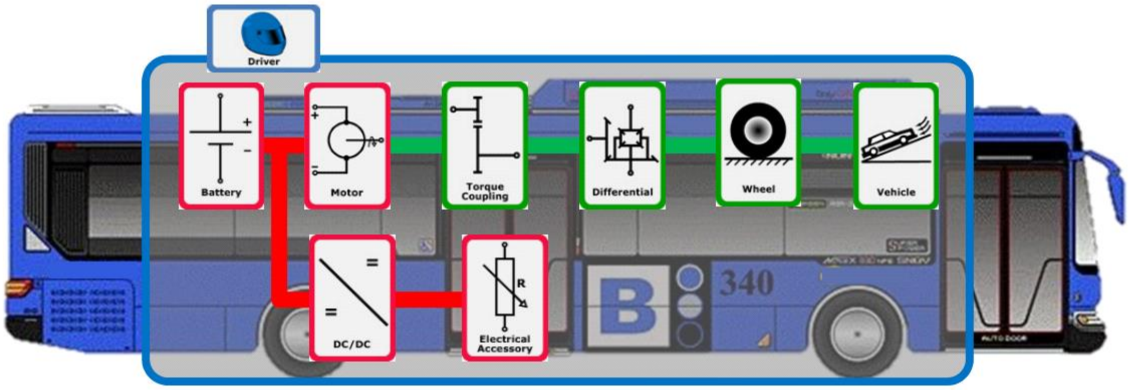
รูปที่ 5-75 ขั้นตอนการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

System Integration of Electric Bus with a Battery Exchange System

รถบัสพลังงานไฟฟ้าได้ถูกออกแบบให้มีระบบต่างๆของการคมนาคม และออกแบบเครื่องมือสำหรับสมดุลของพลังงานภายในรถโดยใช้ต้นแบบที่ถูกพัฒนามาจากArgonne National Lab (ANL) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้ในการออกแบบขนาดของเครื่อง ขนาดของแบตเตอรี่และอุปกรณ์อื่นๆ เช่นระบบปรับอากาศ เป็นต้น ในรูปที่ 32 แสดงระบบทางสถาปัตยกรรมรวมถึงระบบมอเตอร์โดยใช้ระบบ Gear box และใช้มอเตอร์สองตัวเพื่อช่วยในเรื่องการทำงานของอุปกรณ์เสริมต่างๆ และมี Braking resistor 70 กิโลวัตต์ ใช้สำหรับเครื่องทำความร้อนของรถบัสพลังงานไฟฟ้าในช่วงฤดูหนาว



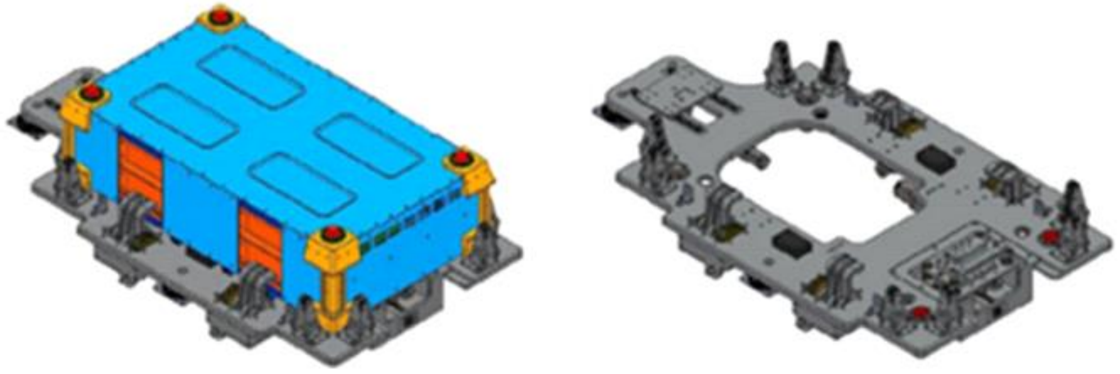
รูปที่ 5-76 ระบบภายในของรถบัสพลังงานไฟฟ้า



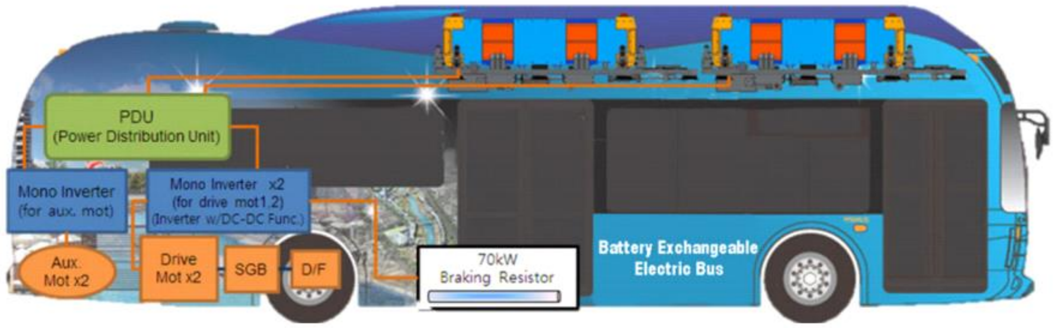
รูปที่ 5-77 โครงสร้างการใช้พลังงานภายในรถบัสพลังงานไฟฟ้า

ในรูปที่ 5-77 แสดงระบบของพลังงานภายในตัวรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยพัฒนาให้มีประสิทธิภาพรวมถึงระยะทางการวิ่งของรถ การใช้พลังงาน ความเร็วและความเร่งและระบบอื่นๆ โดยมีพื้นฐานมาจาก Manhattan bus cycle ซึ่งใช้โมเดลนี้ในการวิจัย

โดยลักษณะของแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่บนหลังคาแสดงดังรูปที่ 5-78 และโครงสร้างของรถบัสแสดงดังรูปที่ 5-79 ซึ่งใช้ระบบประตูบนหลังคารถบัสแบบเลื่อนเพื่อให้ง่ายต่อการเปิดเพื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยออกแบบให้ป้องกันสภาพภูมิอากาศทั้งฝนตกหรือหิมะเพื่อป้องกันแบตเตอรี่ด้วยนั้นเอง



รูปที่ 5-78 โครงสร้างฐานของแบตเตอรี่ในสภาวะที่มีแบตเตอรี่และไม่มีแบตเตอรี่



รูปที่ 5-79 โครงสร้างของรถบัสพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ทางหลังคา

จากรูปที่ 5-79 มีรายละเอียดของโครงสร้างดังนี้

1. มอเตอร์ 120 กิโลวัตต์สองตัวถูกติดตั้งเชื่อมต่อกับ Gear box แบบขนาน โดยเป็นการใช้แรงบิดร่วมกันจากสองมอเตอร์
2. มอเตอร์ 20 กิโลวัตต์สองตัวได้ถูกติดตั้งแบบขนาน มีหน้าที่ในการทำงานของระบบต่างๆๆภายในรถบัสเช่นระบบปรับอากาศ ระบบเบรกเป็นต้น
3. ระบบควบคุมมอเตอร์ (Driver Controllers) ถูกใช้เพื่อควบคุมอินเวอเตอร์สำหรับมอเตอร์ทั้งสี่ตัว
4. ระบบควบคุมสำหรับพาหนะ Vehicle Control Unit (VCU) สำหรับระบบการสื่อสารของ CAN
5. ลิเทียม-โพลิเมอร์แบตเตอรี่ใช้ในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยมีความจุ 48.62 กิโลวัตต์ชั่วโมงโดยติดตั้งใต้หลังคาของรถและมีแบตเตอรี่ลูกที่สองสำหรับสำรอง
6. ระบบควบคุมในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และแบตเตอรี่สำรอง

7. มีระบบการอัดประจุ (Slow charge) สำหรับเวลาอัดประจุในสถานี โดยมีตัวเชื่อมต่อ Connector ทำหน้าที่ในการอัดประจุ

8. อุปกรณ์เสริมต่างๆ ใช้ในการตรวจสอบ State of charge รวมถึง อุณหภูมิ การจ่ายพลังงาน ตัวตรวจจับความเร็ว เพื่อตรวจสอบความผิดพลาดเมื่อเกิดขึ้น

Electric Bus

รถบัสพลังงานไฟฟ้าได้ถูกออกแบบขึ้นมาจากรถบัสดั้งเดิมโดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 5-5 และมีคุณสมบัติของกำลังของมอเตอร์ที่ใช้ดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 คุณสมบัติของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

Dimensions		11,055 × 2485 × 3490 mm			
Number of passengers		50			
Tires		Front	11R22.5–16PR(S)		
		Rear	11R22.5–16PR(D)		
Suspension type		Front/Rear axle	Rigid axle suspension (dependent type suspension)		
Curb weight	Front axle	4490 kg	Gross weight	Front axle	5880 kg
	Rear axle	7060 kg		Rear axle	8855 kg
	Total	11,550 kg		Total	14,735 kg

ตารางที่ 5-7 คุณสมบัติของต้นกำลังของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

Drive Motor	**Type**	**AC Induction**
	Rated Voltage	650 V
	Continuous Power	67 kW
	Peak Power	120 kW
	Max. Torque	430 Nm (300 A)
	Max. Speed	10,000 rpm
Auxiliary Motor	Type	AC Induction
	Rated Voltage	450~650 V
	Continuous Power	16 kW
	Peak Power	20 kW
	Max. Torque	120 Nm (90 A)
	Max. Speed	5000 rpm
Inverter	Operating Voltage	300~750 V
	Rated Current	250 A
	Max. Current	350 A (10 s)

Battery Pack

แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ (162 เซลล์อนุกรม และ 4 ส่วนที่ขนานกัน) ถูกใช้โดยมีระดับแรงดันที่ 607.5 V 80 Ah และมีความจุของของพลังงาน 48.62 kWh โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 5-7

ตารางที่ 5-8 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

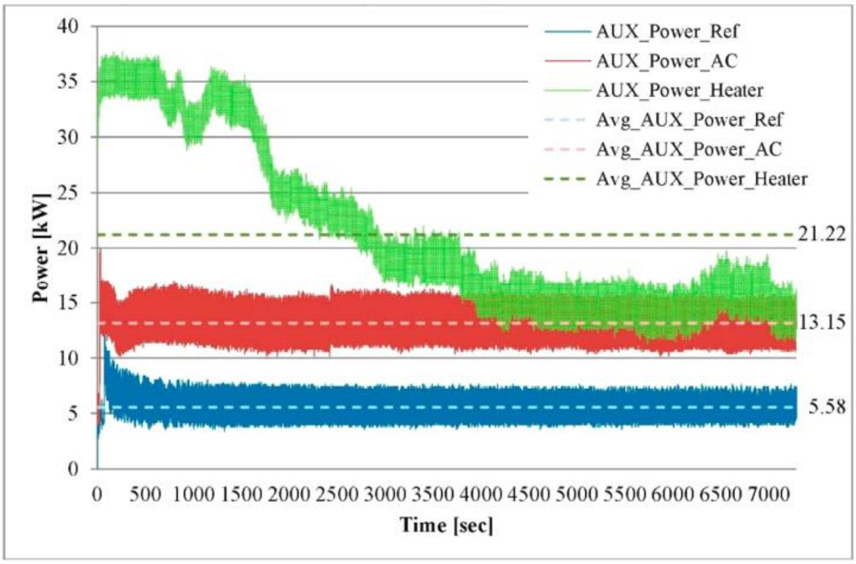
Type	Li-Polymer
Connection Type	162S4P
Nominal Voltage	607.5 V
Capacity	48.62 kWh
Max. Discharging Current	400 A
Cont. Discharging Current	160 A
Max. Charging Current	160 A
Operating Temperature	−20–60 °C

ผลการทดสอบ

รถบัสได้ถูกทดสอบระบบพลังงานภายในรถบัวพลังงานไฟฟ้า (HVAC) โดยใช้เส้นทางดังรูปที่ 5-80

รูปที่ 5-80 เส้นทางในการทดสอบระบบปรับอากาศภายในรถบัสพลังงานไฟฟ้า

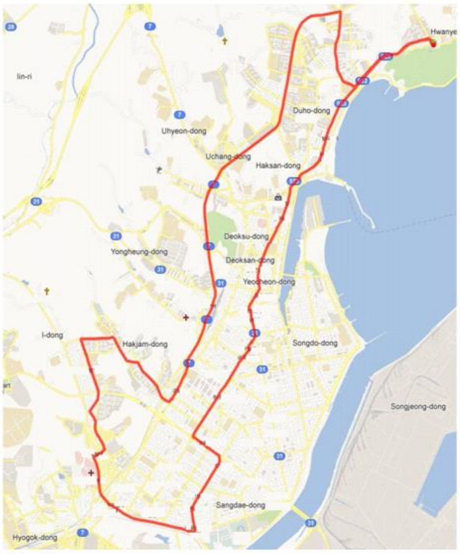
โดยการทดสอบได้ผลดังรูปที่ 5-81 โดยแบ่งเป็นเส้นสีเขียวคือไม่มีระบบ HVAC และเส้นสีแดงทดสอบที่ 30 องศาเซลเซียส และเส้นสีฟ้าทดสอบที่องศาเซลเซียส การทำงานของ Heater โดยมีอุณหภูมิภายนอก 18 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5-81 ผลการทดสอบระบบ HVAC

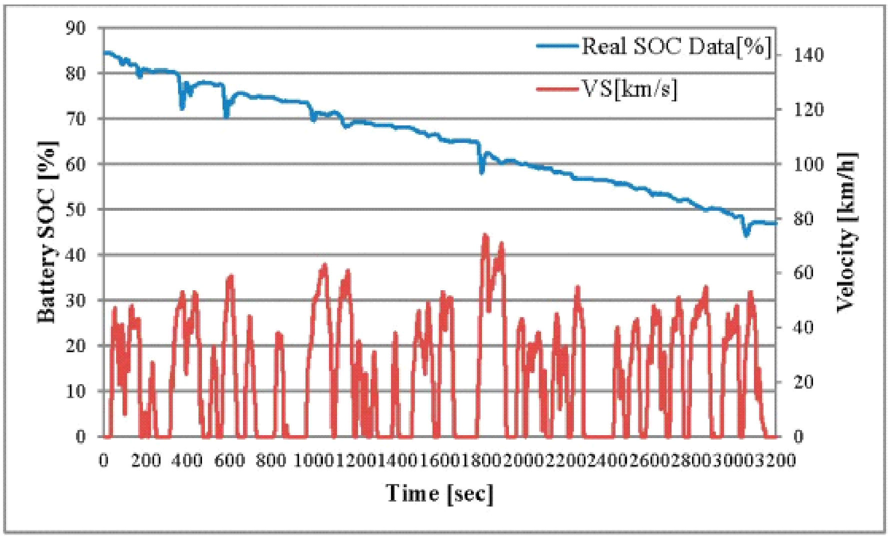
Validation of Energy Consumption by Electric Bus

รถบัสพลังงานไฟฟ้าได้ถูกเลือกเส้นทางการวิ่งในประเทศเกาหลีใต้ เมืองโปฮาง ดังรูปที่ 5-82



รูปที่ 5-82 เส้นทางการวิ่งในประเทศเกาหลีใต้ เมืองโปฮาง

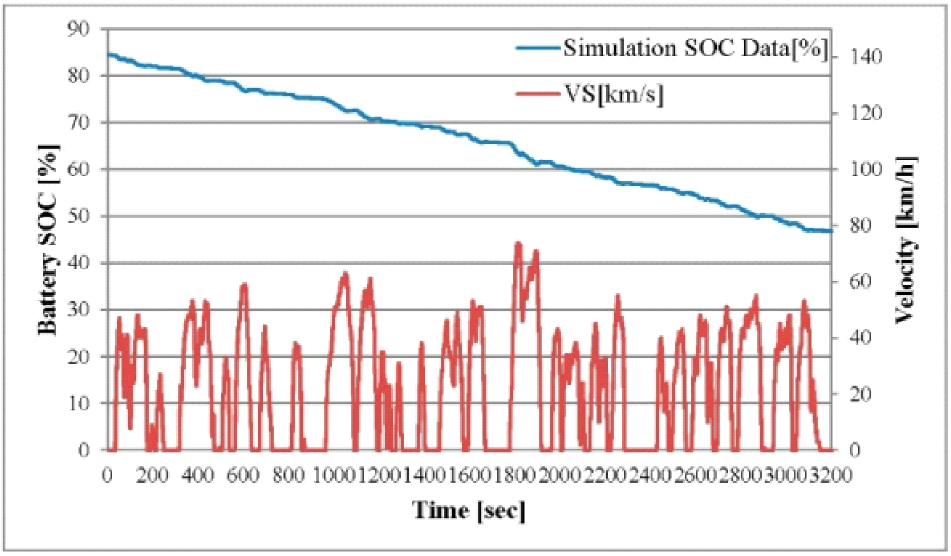
มีผลการใช้พลังงานและการใช้จริงดังนี้โดยมีการวัด State of Charge ในช่วงการวิ่งของรถบัสพลังงานไฟฟ้าดังนี้



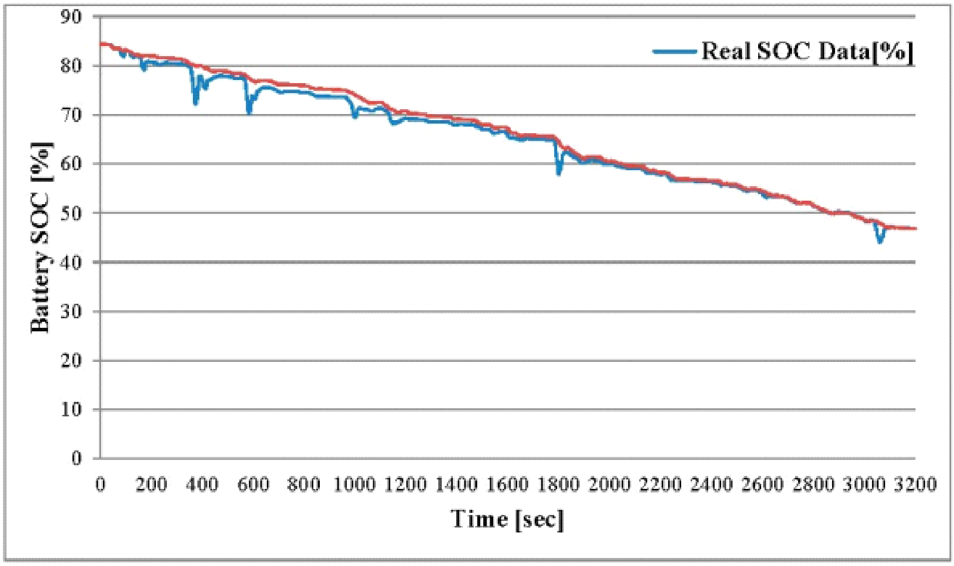
รูปที่ 5-83 ผลการทดสอบ SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

ตารางที่ 5-9 ผลการทดสอบ SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า

Name	Unit	Pohang Bus Route
Process Name	–	Run Pohang Cycle
Cycle Name	–	Pohang Cycle
Cycle Distance	m	19,538.94
Electric Energy Consumption	J/m	4011.89
Initial SOC	%	84.40
Final SOC	%	44.10
Delta SOC	%	−40.30



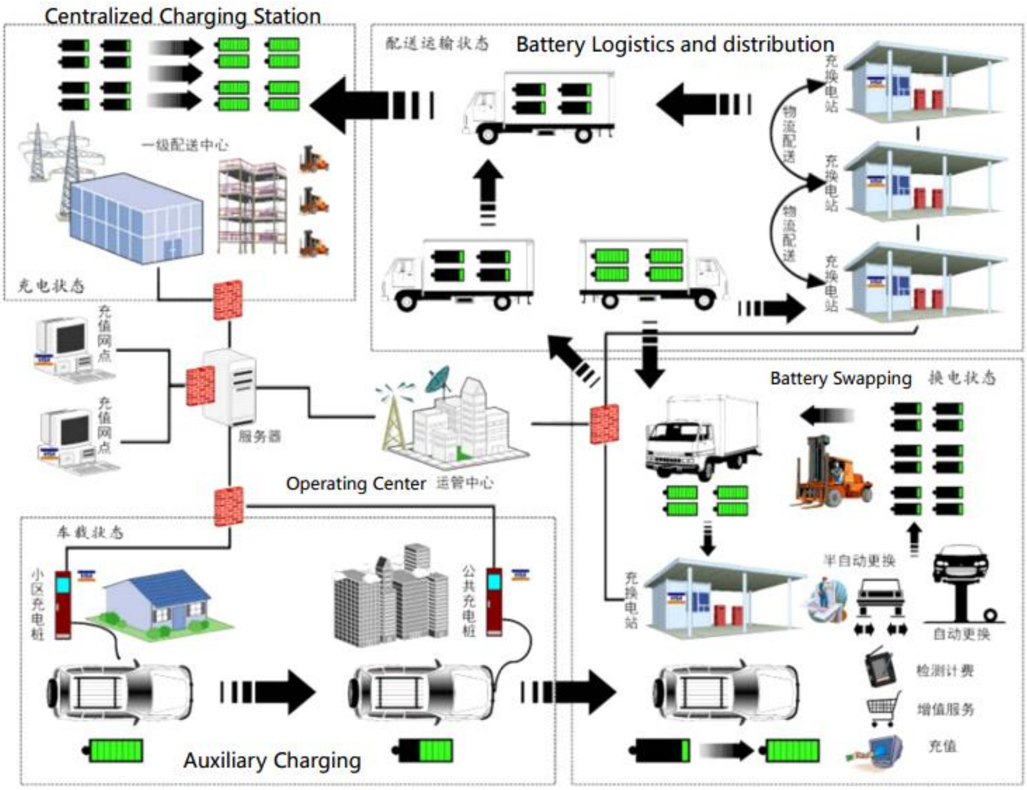
รูปที่ 5-84 ผลการจำลอง SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 5-85 ผลการจำลอง SOC ของรถบัสพลังงานไฟฟ้าเทียบกับการทดลอง

<u>ตัวอย่างการศึกษาเทคนิค Battery Swapping ในประเทศจีน (Progress in Battery Swapping Technology and Demonstration in China)</u>

รูปที่ 5-86 การวางแผนจัดตั้งสถานีอัดประจุและสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ในประเทศจีน



รูปที่ 5-87 โหลดการทำงานของการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

รูปที่ 5-88 V2G Model of Battery Swapping Station

Company	Logo	Belongs to	Battery Swapping Tech. Provide	Cooperator
Key Power Tech.	KeyPower 科易动力	Independent	For Passenger Vehicle	KIA, NISSAN 东风日产
XJ Group	许继集团	Belongs to State Grid	For Bus	
DB Tech.	电巴	Independent	For Commercial Vehicle	
HEPSTD	HEPSTD	Belongs to State Grid	For Passenger Vehicle	Haima 海马汽车, 众泰汽车 ZOTYE AUTO
Better Place	better place	Independent	For Passenger Vehicle	中国南方电网, RENAULT, 北京汽车

รูปที่ 5-89 บริษัทที่สนับสนุนเทคโนโลยีการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ในประเทศจีน

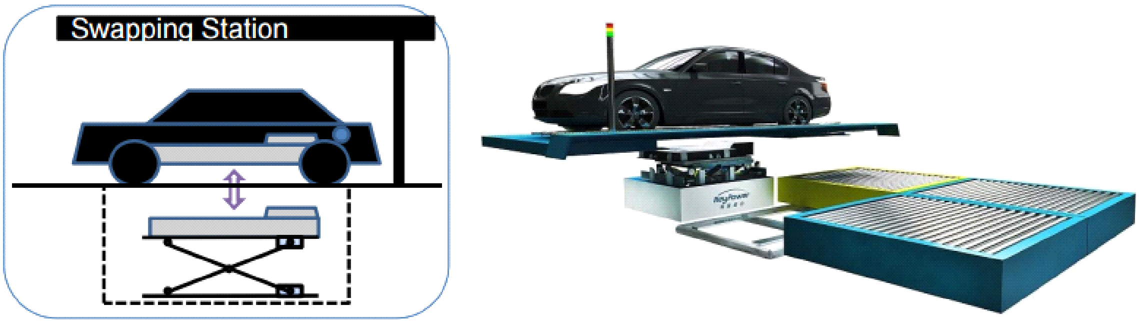
ในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่มีเป้าหมายดังนี้

1.สับเปลี่ยนแบตเตอรี่ภายใน 2 นาที

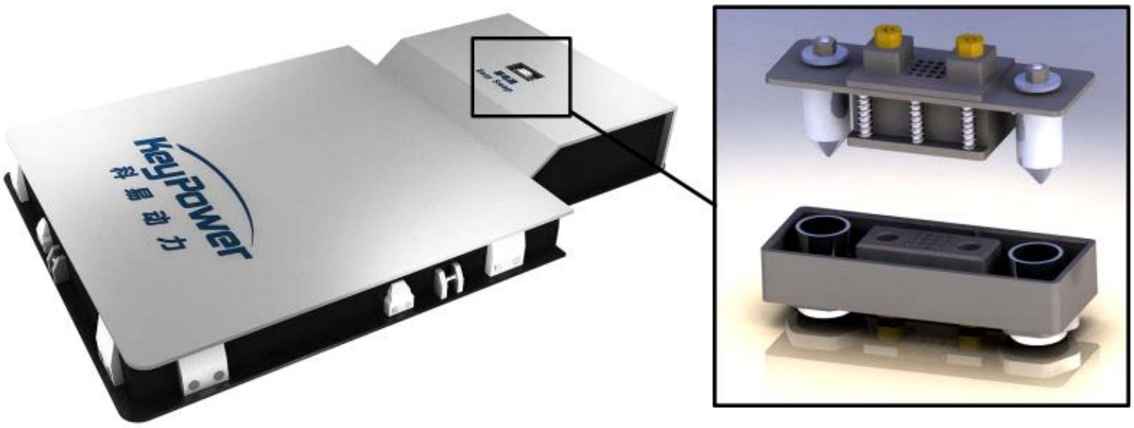
2.สับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ใต้พื้นของรถ

3.การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สามารถปรับได้กับทุกชนิดของรถพลังงานไฟฟ้า

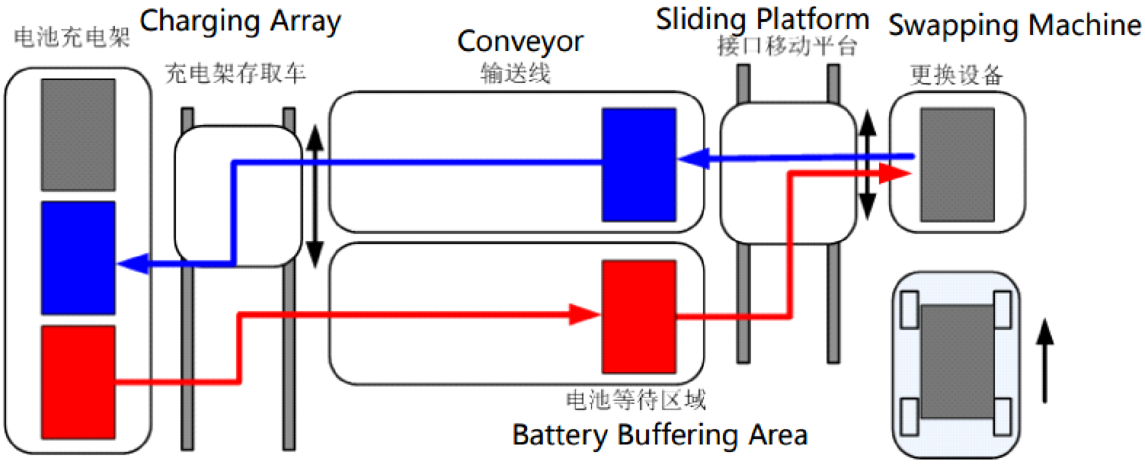
4.แบตเตอรี่ต้องถูกออกแบบได้มาตรฐาน และปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของรถ



รูปที่ 5-90 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบใต้พื้นรถ



รูปที่ 5-91 ตัวเชื่อมต่อพิเศษสำหรับการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่



รูปที่ 5-92 ลักษณะการทำงานของการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

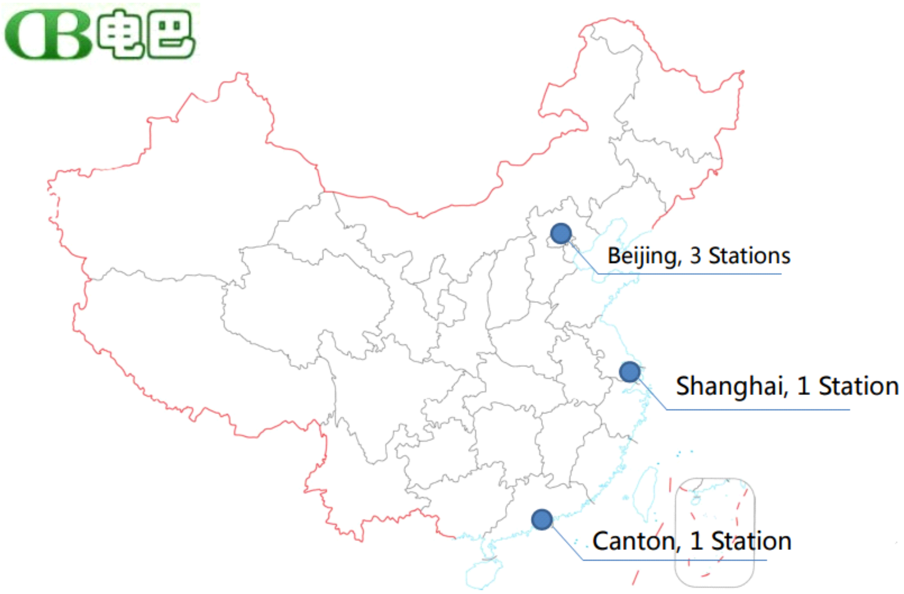
รูปที่ 5-93 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ XJ Group

รูปที่ 5-94 รถบัสต้นแบบและสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ XJ Group

Connector for Swapping

Battery Swapping Machine

รูปที่ 5-95 ตัวเชื่อมต่อแบตเตอรี่และเครื่องสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของบริษัท XJ Group

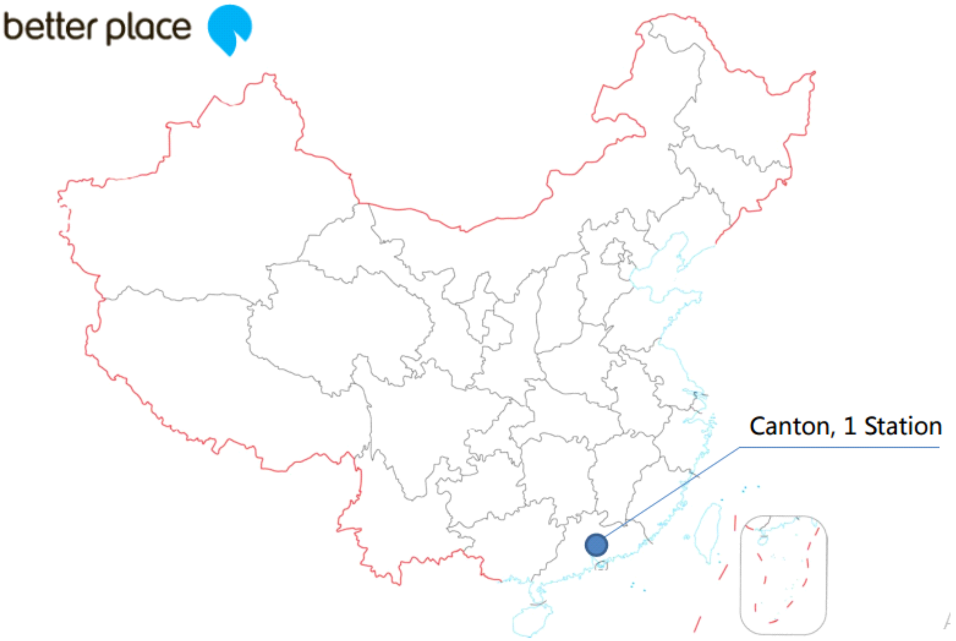


รูปที่ 5-96 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ DB

รูปที่ 5-97 ตัวอย่างรถบัสพลังงานไฟฟ้าและสถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ DB

รูปที่ 5-98 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ HEPSTD

รูปที่ 5-99 สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ HEPSTD



รูปที่ 5-100 สถานที่ตั้งของสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ Better Place

รูปที่ 5-101 สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของ Better Place

5.6 ตัวอย่างรถเมล์ไฟฟ้าจากบริษัทต่างๆ

5.6.1 บริษัท Green Power Motor Company Inc.

บริษัท Green Power Motor Company Inc. พัฒนารถพลังงานไฟฟ้าเพื่อการค้า ในปี 2014 บริษัทเปิดตัวรถบัสขนส่งรุ่น EV 350 ซึ่งใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ผสานกับเทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่ และเพลาน้ำหนักเบา โดยรถแบบโหลดต่ำ โดยรถบัสมีการออกแบบ และใช้ระบบจัดการกับแบตเตอรี่แบบจัดการเอง และเป็นเจ้าของระบบ Flex Power สำหรับระบบขับเคลื่อน โดยมีข้อมูลจำเพาะของผลิตภัณฑ์ดังนี้

รูปที่ 5-102 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Green Power Motor Company Inc.

5.6.2 บริษัท Changsha BYD Coach Company, Ltd.

รถบัสไฟฟ้า BYD หรือ BYD E-BUS หรือเรียกว่า K9 ในประเทศจีนเป็นรถบัสไฟฟ้าที่ผลิตโดยผู้ผลิตรถยนต์จีน BYD สามารถขับได้ระยะไกลถึง 250 กิโลเมตร (155 ไมล์) ต่อการชาร์จเพียงครั้งเดียวภายใต้สภาพถนนในเมือง มันถูกวิ่งทดสอบทั้งในประเทศจีนและในอีกหลายๆประเทศ และในหลายทวีป เช่น อินเดีย, ญี่ปุ่น , ฮ่องกง, สหรัฐอเมริกา, โคลัมเบีย, ชิลี, สเปน, เนเธอร์แลนด์และเดนมาร์ก ในปี 2011 และ 2012 รถบัสไฟฟ้า BYD มียอดการสั่งซื้อจากหลายๆ ประเทศทั่วโลกประมาณ 1200 คัน โดยมีรายละเอียดอย่างเป็นทางการดังนี้

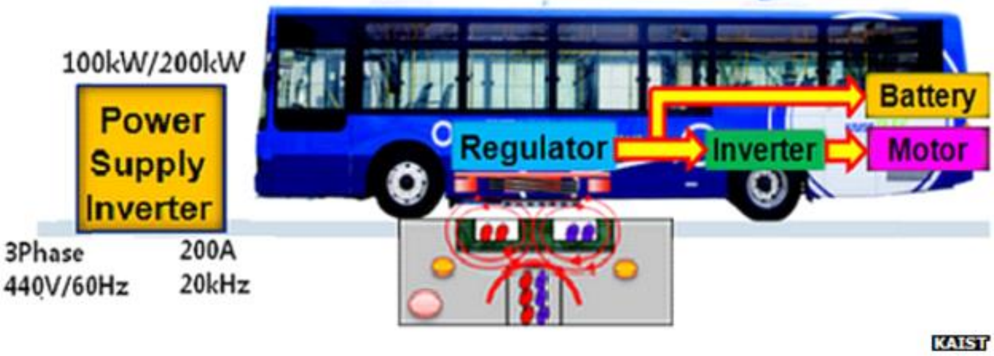
รูปที่ 5-103 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Changsha BYD Coach Company, Ltd.

5.6.3 สถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี

ในประเทศเกาหลีใต้ได้มีการเปิดถนนที่รถไฟฟ้าสามารถชาร์จไฟได้เมื่อขับผ่าน ผู้พัฒนาโปรเจคกล่าวว่าระยะทาง 12 กิโลเมตร (7.5 ไมล์) เป็นเส้นทางแรกของโลกที่สามารถชาร์จไฟให้แบตเตอรี่รถได้โดยไม่จำเป็นต้องหยุดเพื่อชาร์จไฟ ซึ่งรวมไปถึงสามารถใช้ขนาดแบตเตอรี่ขนาดลดลงอีกด้วย

รถไฟฟ้า OLEV จะวิ่งเส้นทางภายในเมืองระหว่างสถานีรถไฟ Gumi และในอำเภอดง รวมเป็น 24 กม. รถบัสจะได้รับ 20 เฮิร์ทซ์และ 100 กิโลวัตต์ (136 แรงม้า) ไฟฟ้าที่ 85% ของความสามารถในการส่งถ่ายสูงสุด ในขณะที่รักษาช่องว่างอากาศ 17 ซม. ระหว่างช่วงล่างของลำรถและพื้นผิวถนน

รูปที่ 5-104 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัทสถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี



รูปที่ 5-105 โครงสร้างของรถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัทสถาบันชั้นสูงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเกาหลี

5.6.4 บริษัท San Joaquin RTD

ในเดือนมิถุนายน 2012, San Joaquin ในความร่วมมือกับ Proterra Inc ได้รับรางวัล California Energy Commission (CEC) เป็นทุนจำนวน 2.56 ล้านดอลล่าร์ต่อโครงการสาธิตรถบัสไฟฟ้ามูลค่ากว่า 4 ล้านดอลล่าร์ โครงการสาธิตนี้จะแนะนำรถเมล์ไฟฟ้าคันแรก ในการให้บริการ RTD จะเป็นหน่วยงานการขนส่งที่สองในรัฐแคลิฟอร์เนียและสี่ในประเทศในการดำเนินการใช้รถบัสไฟฟ้าเหล่านี้และเป็นการริเริ่มใช้กลยุทธ์โดยการลดการใช้พลังงานของเสียและมลพิษในขณะที่การส่งเสริมนวัตกรรมผู้ขายและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกาโดย Proterra โดยรถบัสไฟฟ้ามีคุณสมบัติดังนี้

- การผลิตไม่มีการปล่อยมลพิษ
- เสียงที่เบามากจนเกือบไม่มีเสียง
- มีประสิทธิภาพและประหยัดมากกว่ารถโดยสารไฮบริด 5 เท่า
- ชาร์จอย่างเต็มที่ในเวลาน้อยกว่า 10 นาที
- แล่นได้มากกว่า 30 ไมล์ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง

รูปที่ 5-106 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของ บริษัท San Joaquin

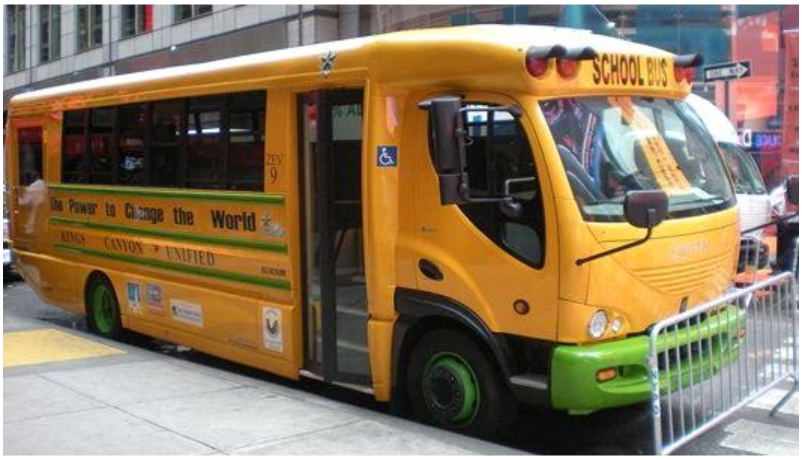
5.6.5 บริษัท Mercedes-Benz Citaro

บริษัท Mercedes-Benz Citaroได้เปิดทำการสาธิต รถไฮบริด ในรุ่น Citaro G BlueTec ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการใช้งานแบตเตอร์รี่ชนิดลิเธียมไอออนที่มีขนาดมากที่สุดในโลก โดยขนาดของแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนนี้มีน้ำหนักถึง 771 ปอนด์โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถึง 180 กิโลวัตต์

รูปที่ 5-107 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Mercedes-Benz Citaro

5.6.6 บริษัท Smith Electric Vehicles

ในปี ค.ศ.2012 บริษัท Smith Electric Vehiclesได้เปิดตัวรถบัสพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นรถรับส่งนักเรียนสีเหลืองสามารถบรรจุผู้โดยสารได้ 42 คน โดยเป็นรถบัสที่ไม่มีการปล่อยมลภาวะเลย มีชื่อรุ่นว่า Newton eTrans โดยทางผู้บริหารของบริษัทได้กล่าวว่าโดยปกติแล้วรถบัสส่งนักเรียนในประเทศสหรัฐอเมริกาต้องใช้เงินมูลค่าถึง 3.2 พันล้านบาทเพื่อจ่ายเป็นค่าเชื้อเพลิง โดยรถรุ่นนี้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 30-50 % โดยทางบริษัทไม่ได้มีการเปิดเผยออกมาว่าใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาดเท่าไหร่ต่อรถบัสหนึ่งคัน



รูปที่ 5-108 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Smith Electric Vehicles

5.6.7 บริษัท Thunder Sky Energy Group

โดยบริษัท Thunder Sky Energy Group ตั้งอยู่ที่ เมืองเซินเจิ้น ประเทศจีนโดยทางบริษัทได้สร้างรถบัสพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด 4 รุ่น สามารถจุคนได้ตั้งแต่ 10-43 คน ตามรุ่น สามารถวิ่งได้ตั้งแต่ 80-100 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยแต่ละรุ่นนั้นจะขึ้นกับลักษณะการใช้งานเช่น การวิ่งในเมือง หรือวิ่งตามทางด่วน ก็จะแยกความเร็วไปตามการใช้งานด้วย โดยทางบริษัทกล่าวว่า แบตเตอรี่สามรถอัดประจุให้เต็มได้ภายในเวลา 1 ชั่วโมง และสามารถเปลี่ยนตัวแบตเตอรี่ได้โดยใช้เวลา 5 นาทีเท่านั้น โดยนอกจากการใช้งานในประเทศจีนแล้วยังมีการผลิตใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาและฟินแลนด์ด้วย

รูปที่ 5-109 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของ บริษัท Thunder Sky Energy Group

5.6.8 บริษัท Zonda Bus

สำหรับบริษัท Zonda Bus นั้นมีจุดเด่นที่เป็นบริษัทแรกที่มีการพัฒนารถบัสไฟฟ้าที่มีความยาวถึง18 เมตร โดยมีการนำมาใช้งานกับระบบรถสาธารณะปักกิ่ง โดยมีนโยบายของบริษัทคือออกรถตั้งแต่ตอนเช้าแล้วค่อยกลับมาอัดประจุในตอนค่ำสามารถทำการขนส่งได้ทั้งวันโดยไม่ต้องเสียเวลาในการแวะอัดประจุระหว่างวัน ทำให้ไม่มีความจำเป็นจะต้องลงทุนกับสถานีอัดประจุระหว่างทาง โดยเหมาะกับการใช้งานในเมืองที่ค่อนข้างเย็น โดยมีอากาศใช้งานอยู่ที่ -20 ถึง 40 องศาเซลเซียส โดยตอนนี้รถบัสชนิดนี้ได้ส่งออกไปยัง ประเทศสเปน และอเมริกาเหนือ

รูปที่ 5-110 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Zonda Bus

5.6.9 บริษัท Solaris Urbinos

บริษัท Solaris Urbinos ปัจจุบันนั้นมีการใช้งานทั้งหมด 500เมือง 28 ประเทศ เช่น ปักกิ่ง, โรม, ปารีส, ดูไบ โดยทางบริษัทกล่าวเพียงว่าจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่อัตโนมัติซึ่งไม่มีการปล่อยมลภาวะออกมา และปล่อยมลภาวะทางเสียงที่ต่ำ

รูปที่ 5-111 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Solaris Urbinos

5.6.10 บริษัท Proterra

บริษัท Proterra อยู่ที่ South Carolina ทางบริษัทกล่าวว่า สำหรับเทคโนโลยีของทางบริษัทนั้นประโยชน์สูงสุดคือเพื่อกำจัดรสบัสที่ใช้พลังงานดีเซลและทำให้เกิดมลภาวะออกไปจากท้องถนนโดยจะทำความร่วมมือกับทางรัฐบาลเพื่อจัดทางสำหรับรสบัสทำให้ประชาชนสามารถประหยัดเวลาในการเดินทางมากขึ้น โดยทางบริษัทสามารถจัดสถานีอัดประจุระหว่างทางซึ่งกินเวลาเพียง 10 นาทีเท่านั้น เพื่อใช้ในระยะครึ่งหนึ่งของสายรถบัส

รูปที่ 5-112 รถบัสพลังงานไฟฟ้าของบริษัท Proterra

5.7 แผนการบำรุงรักษา

ในส่วนของแผนการบำรุงรักษานั้นจะขึ้นอยู่กับการได้มาซึ่งตัวรถ ซึ่งการได้มาซึ่งตัวรถสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. เช่าจากบริษัทเอกชน
2. ซื้อรถทั้งคัน
3. ทำการซื้ออะไหล่และประกอบในประเทศ

จากวิธีการข้างต้น พบว่า การเช่าจากบริษัทเอกชน ทาง ขสมก. ไม่จำเป็นที่จะต้องเสียค่าบำรุงรักษา เนื่องจากเอกชนผู้ให้เช่าเป็นผู้รับผิดชอบในการบำรุงรักษาเอง แต่ในกรณีที่ 2 และ 3 นั้น จะต้องมีการออกแผนบำรุงรักษา โดยแผนการบำรุงรักษานั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 วิธี

1. ขสมก. เป็นผู้รับผิดชอบในการบำรุงรักษาเอง
2. ทำการว่าจ้างบริษัทเอกชนในการบำรุงรักษารถ

ในกรณีที่ 2 ซึ่งเป็นการว่าจ้างบริษัทเอกชนในการบำรุงรักษารถนั้น สามารถใช้แผนการบำรุงรักษาเดิมที่ทาง ขสมก. ได้ถือปฏิบัติมากับรถโดยสารที่ใช้เครื่องยนต์ โดยการจ้างเหมากับบริษัทเอกชน แต่อาจแบ่งแผนการบำรุงรักษาออกเป็นระยะเวลาได้แก่

- แผนการบำรุงรักษาระยะสั้น 5 ปี
- แผนการบำรุงรักษาระยะกลาง 10 ปี และ

แผนการบำรุงรักษาระยะยาว 20 ปี

บทที่ 6
โครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารไฟฟ้า

- แนวคิดสำหรับรูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าและรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่
- รูปแบบโครงสร้างอาคารสำหรับติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่
- การออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้า

สถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้า มีการใช้กระแสไฟฟ้าปริมาณมากๆ จึงต้องพิจารณาความเหมาะสมในการจ่ายไฟฟ้าให้แก่โครงการว่าควรเป็นลักษณะใด ในการออกแบบทางด้านระบบไฟฟ้านั้นจะต้องมีการดำเนินการอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งเป็นขั้นตอน 3 ขั้นตอน คือ

1) การออกแบบขั้นหลักการ (Conceptual Design)
2) การออกแบบขั้นต้น (Preliminary Design)
3) การออกแบบขั้นละเอียด (Detailed Design)

เนื้อหาในบทนี้ในตอนแรกจะสรุปรายละเอียดของรูปแบบการให้บริการ รูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่ จากหลักการดังกล่าว เนื้อหาต่อมาจะเป็นการสรุปรายละเอียดการออกแบบขั้นหลักการและการออกแบบขั้นต้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการประเมินราคาโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าที่จะดำเนินการติดตั้งในอู่รถ 4 แห่ง ได้แก่

- อู่พระราม 9 (เขต 4) เส้นทางเดินรถสาย 137 จำนวน 50 คัน
- อู่คลองเตย (เขต 4) เส้นทางเดินรถสาย 205 และสาย 4 สายละ 25 คัน รวมทั้งหมด 50 คัน
- อู่บรมราชชนนี (เขต 6) เส้นทางเดินรถสาย 515 จำนวน 50 คัน
- อู่กำแพงเพชร (เขต 8) เส้นทางเดินรถสาย 16 และสาย 49 สายละ 25 คัน รวมทั้งหมด 50 คัน

เนื้อหาในตอนท้ายจะเป็นแนวทางในการศึกษาผลกระทบของการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ขนาดใหญ่เข้ากับระบบไฟฟ้า เพื่อเป็นการยืนยันว่าการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าจะไม่สร้างผลกระทบให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าข้างเคียงของการไฟฟ้า

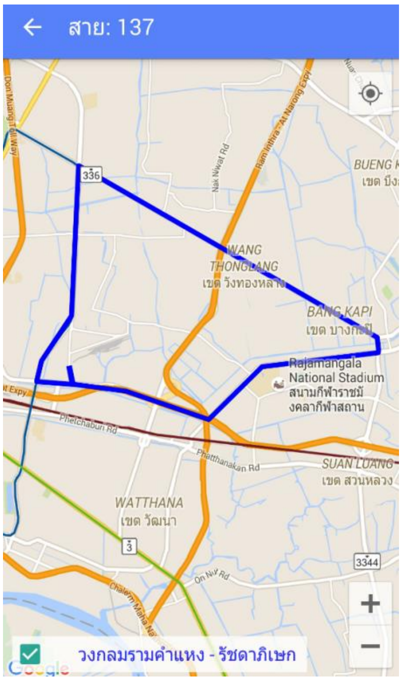
6.1 แนวคิดสำหรับรูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้าและรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่

6.1.1 ระยะทางการเดินรถเฉลี่ยต่อคันต่อวัน

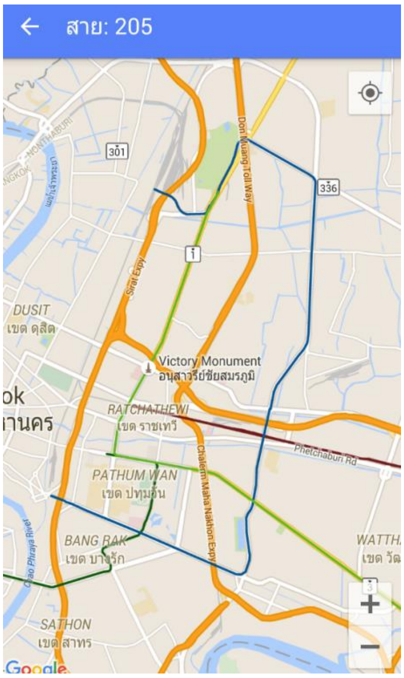
ระยะทางการเดินรถของรถโดยสารไฟฟ้าโดยปกติทั่วไปจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-250 กิโลเมตรต่อวัน โดยจะต้องรองรับความผันผวนของระยะเวลาการเดินรถอันเนื่องจากการจราจรที่แออัด และมีรูปแบบเส้นทางการทดสอบที่หลากหลาย ตารางที่ 6-1 แสดงรายละเอียดเส้นทางการเดินรถโดยสารไฟฟ้าและระยะทางเฉลี่ย/คัน/วัน โดยรายละเอียดแผนที่ของเส้นทางการเดินรถของรถโดยสารแต่ละสายแสดงไว้ในรูปที่ 6-1 ถึงรูปที่ 6-6

ตารางที่ 6-1 รายละเอียดเส้นทางการเดินรถโดยสารไฟฟ้าและระยะทางเฉลี่ย/คัน/วัน

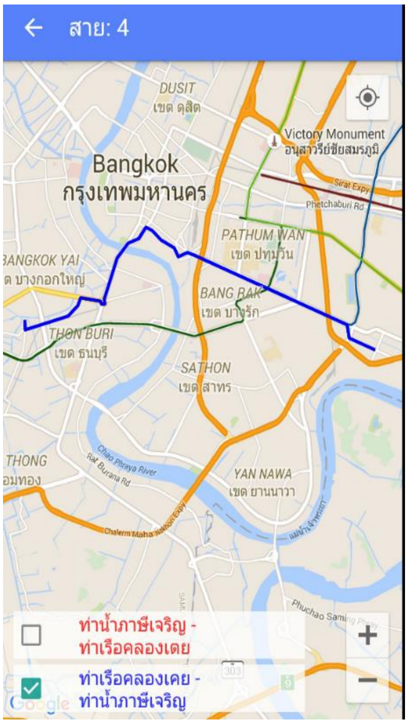
สาย	เส้นทาง	ระยะทาง (กิโลเมตร)	เที่ยววิ่ง/คัน/วัน	กม./คัน/วัน
137	(วงกลม) รามคำแหง – ถนนรัชดาภิเษก	26	8	208
205	อู่คลองเตย – เดอะมอลล์ท่าพระ	16.5	14	231
4	ท่าเรือคลองเตย – ท่าน้ำภาษีเจริญ	15.5	10	155
515	ราชมงคลวิทยาเขตศาลายา – อนุสาวรีย์ชัย	28	8	224
16	หมอชิต 2 – สุรวงศ์	25	8	200
49	หมอชิต 2 – หัวลำโพง	20.5	10	205



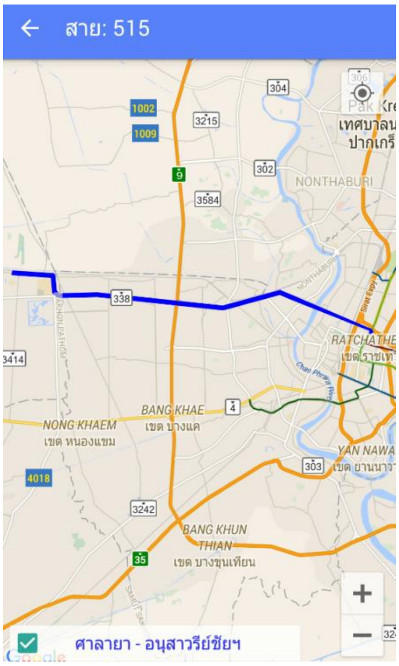
รูปที่ 6-1 เส้นทาง (วงกลม) รามคำแหง – ถนนรัชดาภิเษก สาย 137 ระยะทาง 26 กิโลเมตร



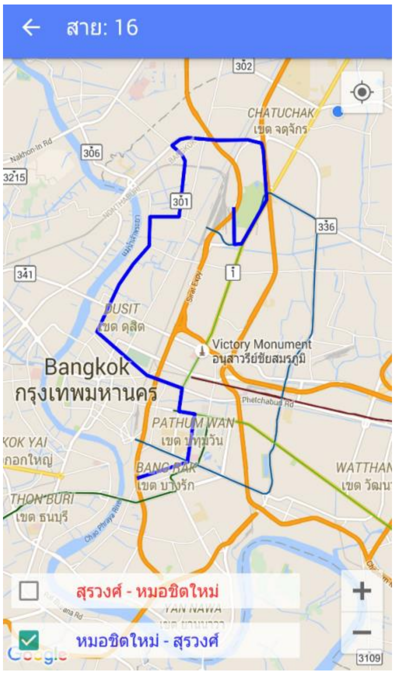
รูปที่ 6-2 เส้นทาง อู่คลองเตย – เดอะมอลล์ท่าพระ สาย 205 ระยะทาง 16.5 กิโลเมตร



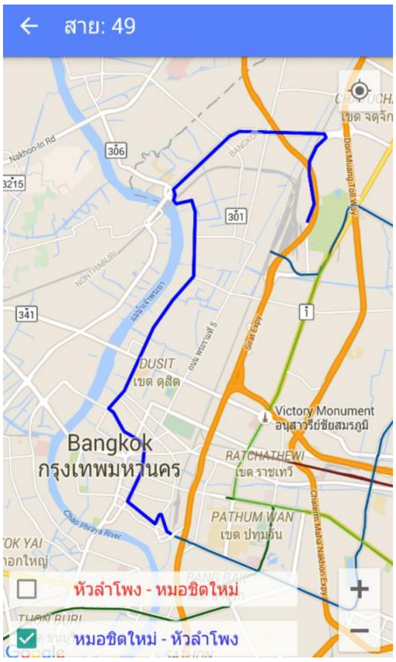
รูปที่ 6-3 เส้นทาง ท่าเรือคลองเตย – ท่าน้ำภาษีเจริญสาย 4 ระยะทาง 15.5 กิโลเมตร



รูปที่ 6-4 เส้นทาง ราชมงคลวิทยาเขตศาลายา – อนุสาวรีย์ชัย สาย 515 ระยะทาง 28 กิโลเมตร



รูปที่ 6-5 เส้นทาง หมอชิต 2 – สุรวงศ์ สาย 16 ระยะทาง 25 กิโลเมตร



รูปที่ 6-6 เส้นทาง หมอชิต 2 – หัวลำโพง สาย 49 ระยะทาง 20.5 กิโลเมตร

ซึ่งหากพิจารณาการเลือกรูปแบบการให้บริการโดยใช้วิธีการทดแทนรถโดยสารที่มีอยู่เดิม รถโดยสารไฟฟ้าควรจะสามารถวิ่งได้ระยะทางมากกว่าวันละ 231 กิโลเมตรขึ้นไปต่อการอัดประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง และหากคิดค่าแฟกเตอร์เผื่อไว้ รถโดยสารไฟฟ้าควรจะสามารถวิ่งได้ในระยะทางวันละ 250 กิโลเมตร ต่อการอัดประจุ 1 ครั้ง เพื่อไม่ให้เกิดขั้นตอนการบริหารการจัดการการอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าที่ยุ่งยากระหว่างช่วงเวลาปฏิบัติการการเดินรถ

6.1.2 การเปรียบเทียบข้อกำหนดต่างๆของรถโดยสารไฟฟ้ายี่ห้อชั้นนำของโลก

การเปรียบเทียบข้อกำหนดต่างๆของรถโดยสารไฟฟ้ายี่ห้อชั้นนำของโลกนี้ เพื่อเป็นการศึกษาข้อดีและข้อด้อยของรถโดยสารไฟฟ้าที่ผลิตใช้งานจริงที่มีอยู่ในปัจจุบัน ข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวิธีการอัดประจุแบตเตอรี่และขนาดของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับโครงการนี้ โดยยี่ห้อรถโดยสารไฟฟ้าที่เลือกมาใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่ รถโดยสารไฟฟ้าของ Zhongtong รถโดยสารไฟฟ้าของ BYD รถโดยสารไฟฟ้าของ SIEMENS และรถโดยสารไฟฟ้าของ Proterra

ตารางที่ 6-2 แสดงรายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Zhongtong ตารางที่ 6-3 แสดงรายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ BYD ตารางที่ 6-4 แสดงรายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ SIEMENS และ ตารางที่ 6-5 แสดงรายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Proterra

ตารางที่ 6-2 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Zhongtong

รายการ	รายละเอียด
1. Length/Width/High (mm)	11970/2550/3930
2. Max. total mass (kg)	18000
3. Max. speed (km/h)	90
4. Battery (Ah)	195
5. Battery manufacturer	Tian JinLishen
6. Battery type	Lithium Iron Phosphate Lithium Ion Battery
7. Unit voltage/capacity	3.2 V/20Ah
8. Total voltage (V)	576 V/320Ah
9. Starter motor model	Hunan
10. Motor type	Asynchronous AC motor
11. Voltage (V)	360
12. Rated/Max power (kW)	100/150
13. Rated/Max torque (N-m)	810/2850

ตารางที่ 6-3 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ BYD

รายการ	รายละเอียด
1. Length/Width/High (mm)	12000/2550/3360
2. Curb weigh/Gross weight (kg)	13300/19000
3. Seats (persons)	25+1
4. Top speed (km/h)	70
5. Max. gradeability	15%
6. Range (km)	>=250
7. Motor type	AC Synchronous motor (brushless) – BYDTYC90A
8. Max. power	180 kw (90 kw x 2)
9. Rated power	150 kw (75 kw x 2)
10. Max. torque	700 N-m (350 N-m x 2)
11. Battery type	Fe battery
12. Capacity	324 kWh/600 Ah (200 Ah x 3)
13. Power	60 kW (30 kW x 2, 380 V, 3 phase AC
14. Charging time (hr)	5

ตารางที่ 6-4 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ SIEMENS

รายการ	รายละเอียด
1. Total weight (kg)	20400
2. Tare weight (kg)	12000
3. Length/height (mm)	13900/3100
4. Width (mm)	2700 or 3000
5. Passenger capacity (persons)	Max. 112
6. Battery	LFP (Lithium Ferrophosphate) Min. 85 kWh
7. Engine	Permanent magnet synchronous motor rated power 160 kW
8. Inverter	DC-AC IGBT Inverter
9. Charger (on-board)	AC 3 phase 400 V to DC 700 V, output power 14 kW
10. Charger (off-board)	DC 700V, output power 30 kW or 60 kW
11. Charging time	2-3 hours (off-board charger)
12. Performance	Up to 50 km/h
13. Brake	Regenerative braking system

ตารางที่ 6-5 รายละเอียดข้อกำหนดของรถโดยสารไฟฟ้าของ Proterra

รายการ	รายละเอียด
1. Length/width/height (m)	12/2.5/3.4
2. Gross vehicle weight (kg)	19525
3. Fuel economy (kWh/km)	1.0625
4. Top speed (km/h)	104
5. Lighting	LED interior lighting system
6. Charging	FC and front manual charge
7. Fast charge (FC)	Less than 10 minutes (for 80 km)
8. Nominal charge (minutes)	90
9. Nominal range	288 km per charge
10. Motor	220 kW peak permanent magnet drive motor
11. Battery type	Lithium Titanate
12. Bas warranty	Complete bus – 1 year or 80,000 km
13. Battery warranty (years)	6

เมื่อนำข้อมูลจากข้อกำหนดต่างๆของทั้ง 4 ยี่ห้อมาเปรียบเทียบคุณสมบัติสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6-6

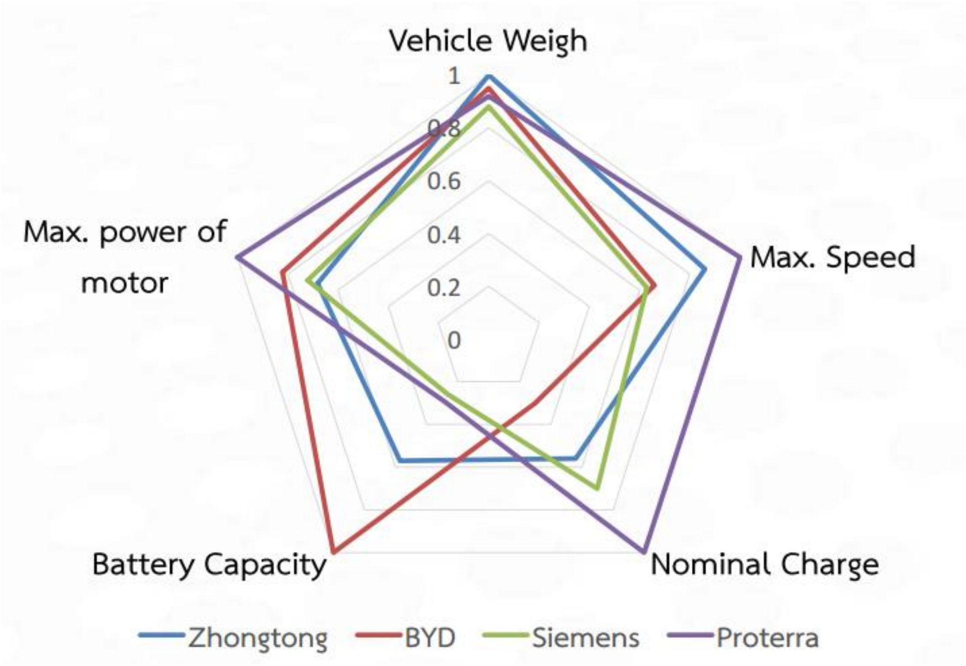
ตารางที่ 6-6 เปรียบเทียบคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้า 4 ยี่ห้อ

Items	Zhongtong	BYD	Siemens	Proterra
Vehicle Weigh (kg)	18,000	19,000	20,400	19,525
Max. Speed (km/h)	90	70	65	104
Nominal Charge (h)	3.7	5	3	1.5
Battery Capacity (kWh)	185	324	85	94
Max. power of motor (kW)	150	180	160	220

Items	Zhongtong	BYD	Siemens	Proterra
Motor Type	Asynchronous AC motor	AC Synchronous Motor (Brushless)	Permanent magnet synchronous motor	Permanent magnet motor
Battery Type	Lithium iron phosphate	Lithium iron phosphate	Lithium ferrophosphate	Lithium Titanate

จากนั้นเมื่อให้คะแนนสำหรับคุณสมบัติแต่ละด้านโดยให้นำหนักตั้งแต่ 0 ถึง 1 (1 หมายถึง ดีที่สุด และ 0 หมายถึงแย่ที่สุด) คุณสมบัติแต่ละด้านที่พิจารณาได้แก่ (1) นำหนักของรถ (Vehicle weight) นำหนักมากหมายถึงแย่ นำหนักเบาหมายถึงดี (2) ความเร็วสูงสุดของรถโดยสาร (Max. speed) ช้าหมายถึงแย่ เร็วหมายถึงดี (3) ระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ปกติซึ่งเป็นแบบ Slow charge (Nominal charge) อัดประจุเป็นระยะเวลานานหมายถึงแย่ อัดประจุเป็นระยะเวลาสั้นหมายถึงดี (4) ความจุของแบตเตอรี่ (Battery capacity) ความจุแบตเตอรี่ต่ำหมายถึงแย่ ความจุแบตเตอรี่สูงหมายถึงดี และ (5) กำลังสูงสุดของมอเตอร์ (Max. power of motor) กำลังสูงสุดของมอเตอร์ต่ำหมายถึงแย่ กำลังสูงสุดของมอเตอร์สูงหมายถึงดี

โดยคะแนนวัดคุณสมบัติต่างๆสามารถนำมาสรุปเป็นแผนภาพเพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยในแต่ละคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ กล่าวโดยสรุปรวมๆจากรูปที่ 6.7 พบว่าระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่มีความสัมพันธ์กับความจุของแบตเตอรี่อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ รถโดยสารไฟฟ้าที่ออกแบบมาให้ความจุของแบตเตอรี่สูง มักจะใช้ระยะเวลาในการอัดประจุปกติเป็นเวลานาน ดังเช่น รถโดยสารไฟฟ้าของ BYD และหากความจุของแบตเตอรี่ต่ำ รถโดยสารไฟฟ้าจะถูกออกแบบมาให้ระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่เร็ว ดังเช่น รถโดยสารไฟฟ้าของ Proterra นอกจากนี้ยังพบว่ารถโดยสารไฟฟ้าของ SIEMENS และ PROTERRA มีคุณสมบัติโดยรวมคล้ายคลึงกัน เนื่องจากใช้เทคโนโลยีมอเตอร์เป็นแบบแม่เหล็กถาวรเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีมอเตอร์ชนิดนี้ปัจจุบันยังมีราคาแพงอยู่ ขณะที่รถโดยสารของ Zhongtong และ BYD ก็จะมีคุณสมบัติโดยรวมคล้ายคลึงกัน เนื่องจากใช้เทคโนโลยีมอเตอร์เอซีซิงโครนัส (AC Synchronous motor) ความแตกต่างขึ้นอยู่กับว่ารถโดยสารแต่ละยี่ห้อจะเลือกใช้ความจุของแบตเตอรี่มากหรือน้อย ซึ่งหากเลือกใช้เทคโนโลยีของมอเตอร์ชนิดนี้จำเป็นต้องประเมินระยะทางที่รถโดยสารวิ่งเฉลี่ยใน 1 วัน เพื่อกำหนดขนาดความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม



รูปที่ 6-7 แผนภาพสรุปข้อดีและข้อด้อยสำหรับคุณสมบัติแต่ละด้านของรถโดยสารไฟฟ้าแต่ละยี่ห้อ

6.1.3 รูปแบบการให้บริการรถโดยสารไฟฟ้า

จากข้อมูลการศึกษาในหัวข้อ 6.1.1 และ 6.1.2 ประกอบการพิจารณาในเรื่องของอุปสรรคในการสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่แบบเร็ว (Quick charge) ที่กระจายตัวอยู่ตามป้ายรถโดยสารต่างๆ เนื่องจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่สูง ซึ่งจะมีผลกระทบกับวิธีการจ่ายไฟที่มีความยุ่งยากในการจัดหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าเนื่องจากในอนาคตการไฟฟ้านครหลวงมีแผนงานที่จะก่อสร้างสายเคเบิลใต้ดินในหลายพื้นที่ในกรุงเทพมหานคร และอาจเป็นสิ่งกีดขวางบนทางฟุตบาทซึ่งต้องขออนุญาตจากเจ้าของพื้นที่ คือ กรุงเทพมหานคร อีกทั้งการที่มีสถานีอัดประจุแบตเตอรี่แบบเร็วกระจายตัวอยู่ในหลายพื้นที่ จะส่งผลต่อวิธีการบริหารการบำรุงรักษาเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่ง ขสมก. ยังขาดบุคคลการที่มีความชำนาญเฉพาะด้านและต้องจัดหาเครื่องมือพิเศษเพิ่มเติมในการบำรุงรักษา ทำให้โดยภาพรวมอาจทำให้โครงการรถโดยสารไฟฟ้าเกิดความล่าช้าในการดำเนินงานและไม่ประสบความสำเร็จ เพราะต้องยุ่งเกี่ยวกับหน่วยงานหลายภาคส่วน ดังนั้นรูปแบบการให้บริการที่เป็นไปได้ จึงใช้วิธีการใช้รถโดยสารไฟฟ้าทดแทนรถโดยสารเดิมที่มีอยู่ ซึ่งจะมีข้อดีในเรื่องความไม่ยุ่งยากในการบริหารจัดการ

6.1.4 รูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่

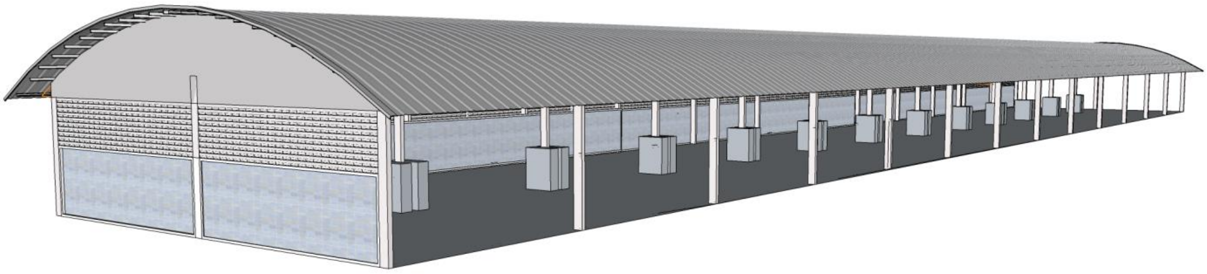
หากพิจารณาเรื่องของระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่แบบปกติในหัวข้อ 6.1.2 พบว่า ระยะเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เพียงพอสำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่แบบปกติ ซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการให้บริการการเดินรถตามรูปแบบในหัวข้อ 6.1.3 จึงสามารถเลือกที่จะสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ที่ใช้เทคโนโลยีการอัดประจุแบตเตอรี่แบบปกติที่อู่รถ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบ 3 เฟส ซึ่งจะไม่ผลกระทบต่อปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าเรื่องแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลแม้ว่าจะมีการอัดประจุแบตเตอรี่พร้อมๆกันของรถโดยสารไฟฟ้าทั้ง 50 คัน

ข้อดีของรูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่แบบนี้ คือจะทำให้การบริหารจัดการอัดประจุรถโดยสารไฟฟ้าง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีความเสี่ยงที่จะเกิดไฟฟ้าดับในกรุงเทพมหานคร และอาจส่งผลกระทบต่อการให้บริการของรถโดยสารไฟฟ้าหากการเกิดไฟฟ้าดับเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่อัดประจุแบตเตอรี่ จึงออกแบบให้แต่ละอู่สำรองการติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบเร็วไว้อู่ละ 2 ชุด

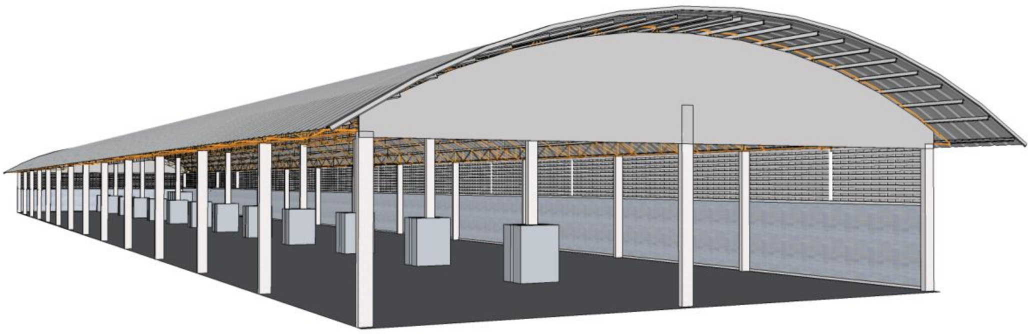
6.2 รูปแบบโครงสร้างอาคารสำหรับติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

จากการประมาณการพื้นที่ที่จำเป็นสำหรับการก่อสร้างอาคารเพื่อติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่โดยพิจารณาจากความกว้างถนนปกติ 1 เลนประมาณ 3.5 เมตร ซึ่งถ้าออกแบบให้สำหรับจอดรถ 2 คันก็จะใช้พื้นที่กว้าง 7 เมตร และเมื่อรวมระยะเผื่อไว้สำหรับการปฏิบัติงาน จึงกำหนดให้ความกว้างสำหรับการจอดรถ 2 คันเท่ากับ 10 เมตร ซึ่งหากแบ่งพื้นที่การจอดเป็น 2 อาคาร โดยแต่ละอาคารสามารถรองรับรถโดยสารไฟฟ้าอาคารละไม่น้อยกว่า 25 คัน ซึ่งในที่นี้ได้เผื่อสำรองพื้นที่สำหรับการอัดประจุแบบเร็ว 1 คัน จึงออกแบบให้ตัวอาคารสามารถรองรับรถโดยสารไฟฟ้าได้ 26 คัน (25 คัน และ สำรอง 1 คัน) ซึ่งจะต้องใช้พื้นที่ยาวทั้งหมด 130 เมตร

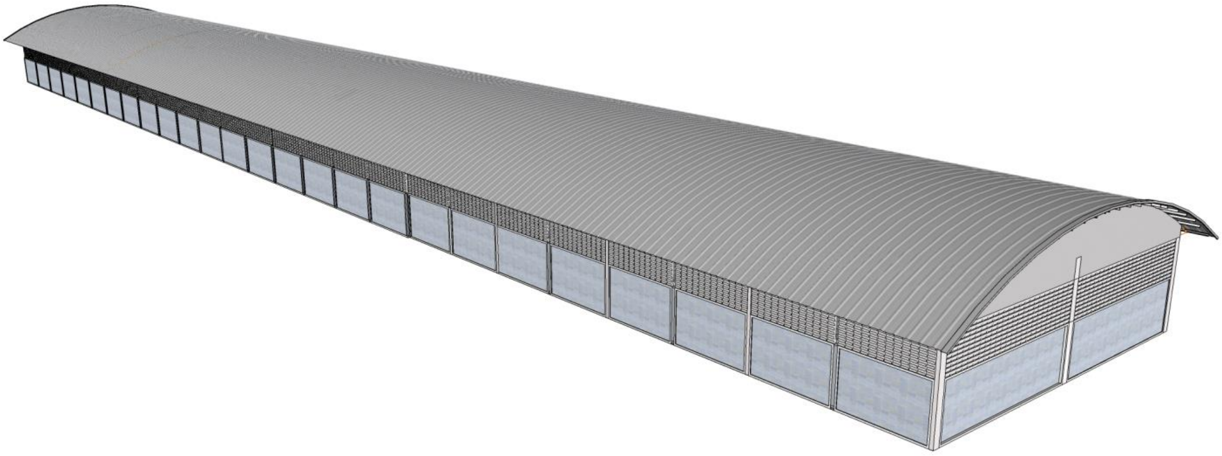
จากการพิจารณาความยาวของตัวรถโดยสาร ซึ่งปกติประมาณ 12 เมตร จึงออกแบบให้ตัวอาคารกว้างประมาณ 20 เมตร เพื่อให้สะดวกในการเข้าออกของรถโดยสารไฟฟ้า ดังนั้นกล่าวโดยสรุปคือ ในแต่ละอู่รถจะประกอบด้วยอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แบบปกติที่ใช้พื้นที่ประมาณ กว้าง 20 เมตร ยาว 130 เมตร จำนวน 2 อาคาร โดย 2 อาคารนี้มีลักษณะเหมือนกัน เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คันในแต่ละอู่ รูปที่ 6-8 ถึงรูปที่ 6-12 แสดงลักษณะตัวอาคารในมุมมองต่างๆ โดยภายในอาคารได้แสดงตำแหน่งการติดตั้งตู้ MDB สำหรับระบบไฟฟ้าและตำแหน่งของเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่



รูปที่ 6-8 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้าซ้าย)

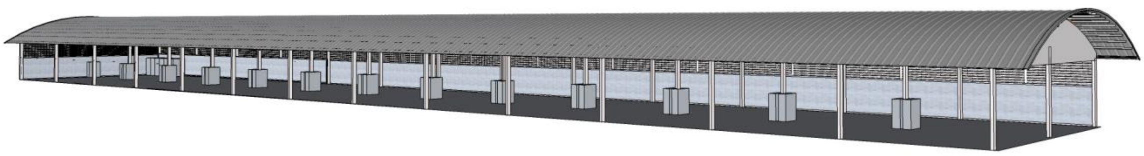


รูปที่ 6-9 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้าขวา)



รูปที่ 6-10 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหลังขวา)

รูปที่ 6-11 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า
ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหลังซ้าย)



รูปที่ 6-12 อาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งรองรับการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 25 คัน (ด้านหน้า)

6.3 การออกแบบระบบไฟฟ้าเพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้า

6.3.1 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง

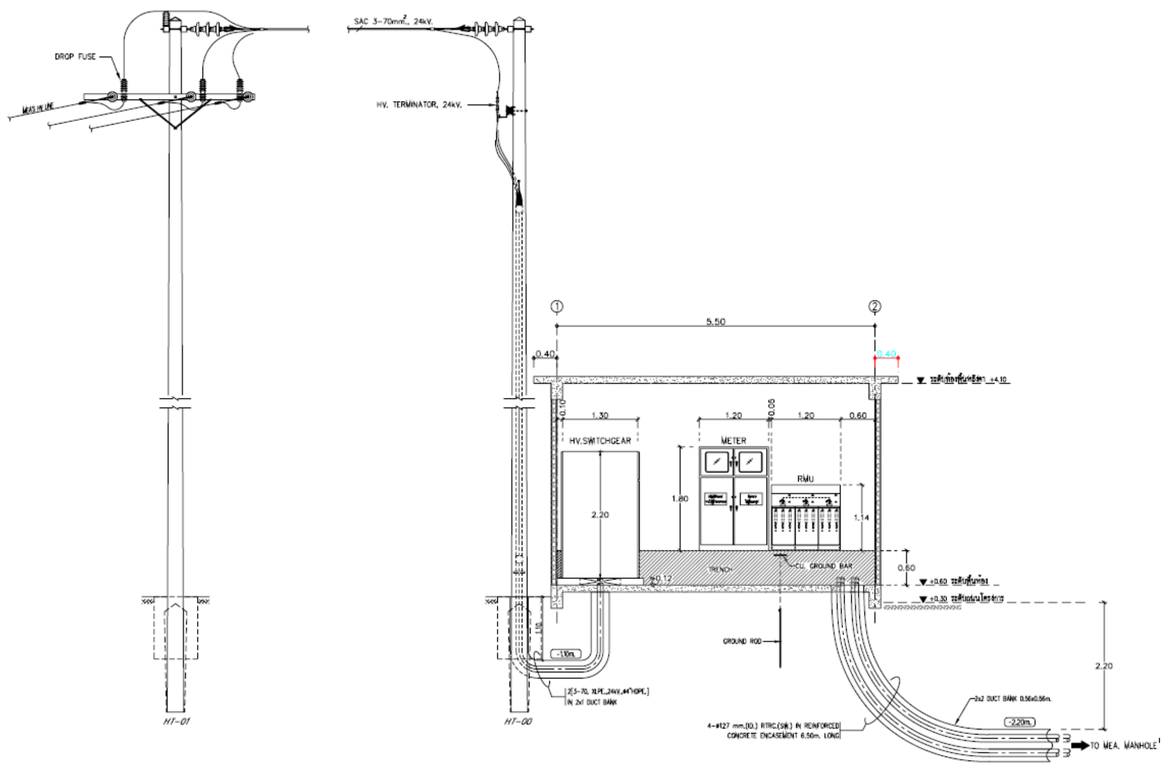
การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ขอใช้ไฟฟ้านั้น โดยปกติแล้วทางการไฟฟ้าจะพิจารณาจากปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ หากใช้โหลดตั้งแต่ 300 kVA ขึ้นไป ทางการไฟฟ้าจะจ่ายไฟฟ้าให้เป็นระบบแรงดันปานกลาง (Medium Voltage) ในกรณีที่การไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ในระบบแรงดันปานกลางนั้น ลักษณะการจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้า จะขึ้นกับระบบของการไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ และระบบของสถานประกอบการ ลักษณะการจ่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังนี้

1) ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟฟ้าด้ายสายอากาศ จากสายป้อนอากาศของการไฟฟ้า
2) ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟฟ้าด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนอากาศของการไฟฟ้า
3) ผู้ใช้ไฟฟ้ารับไฟฟ้าด้วยสายไฟฟ้าใต้ดินจากสายป้อนใต้ดินของการไฟฟ้า

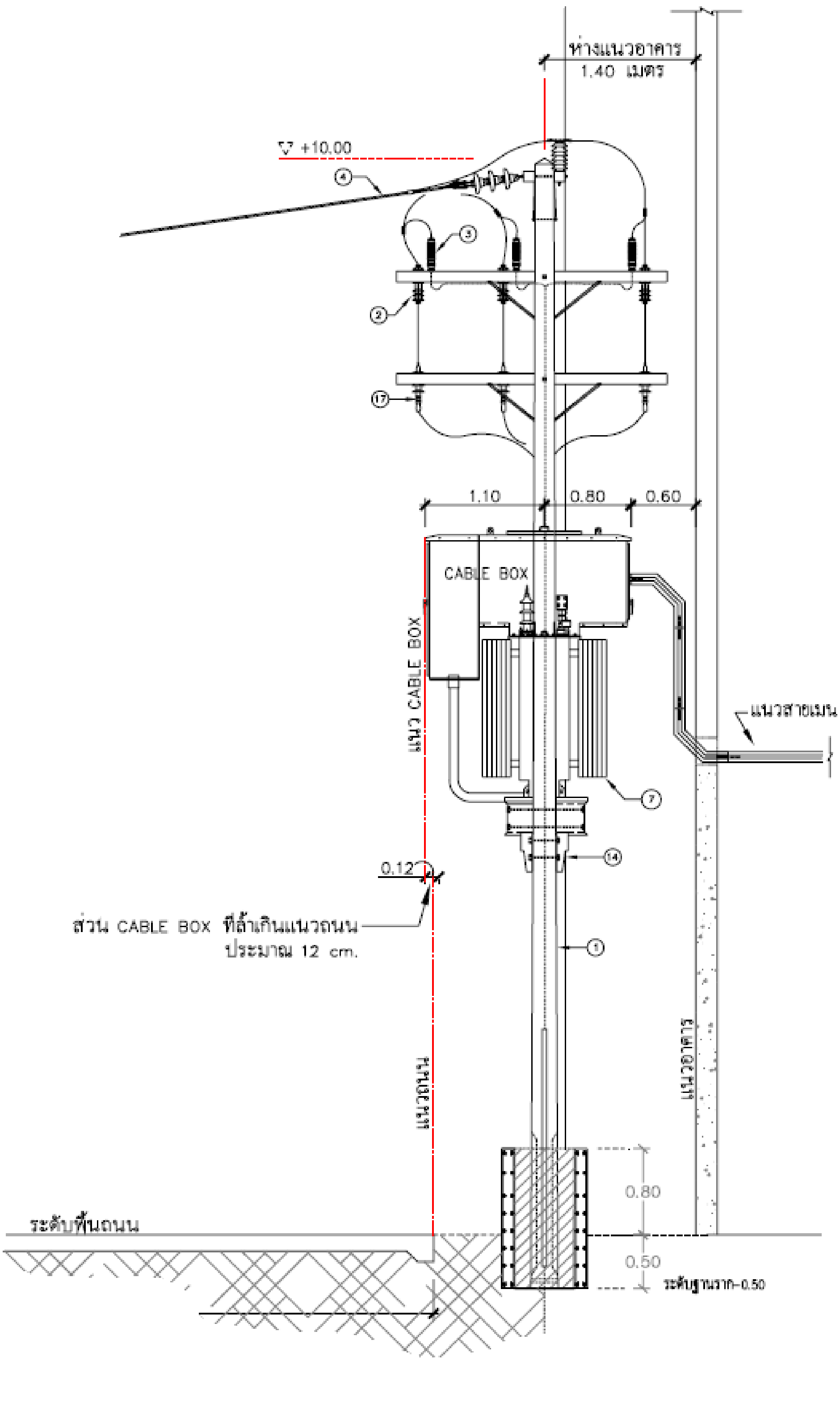
จากการสำรวจสภาพพื้นที่ของอู่รถทั้ง 4 แห่ง พบว่า อู่รถตั้งอยู่ในพื้นที่ที่การไฟฟ้านครหลวงมีแผนดำเนินงานก่อสร้างสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งแม้ว่าในปัจจุบันในพื้นที่ยังใช้สายป้อนอากาศของการไฟฟ้า แต่การไฟฟ้านครหลวงก็บังคับให้ผู้ขอใช้ไฟ ติดตั้งตู้ Ring Main Unit (RM) เพื่อรองรับการรับไฟผ่านสายเคเบิลใต้ดินในอนาคตในพื้นที่นั้นๆ

รูปแบบการรับไฟแรงสูง 24 kV จากการไฟฟ้านครหลวงโดยรับไฟจากสายอากาศจากนั้นร้อยท่อสายไฟผ่าน RISER POLE เพื่อนำสายไฟลงดินผ่านตู้ Switchgear มิเตอร์วัดของตู้ RMU และตู้ RMU แบบเข้า 1 วงจร ออก 2 วงจร โดย 2 วงจรต่อออกไปผ่านท่อร้อยสายฝังใต้ดินเพื่อไปขึ้น RISER POLE เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 2 ตัวแบบฉนวนน้ำมัน ตั้งอยู่บนนั่งร้านและมี Cable Box

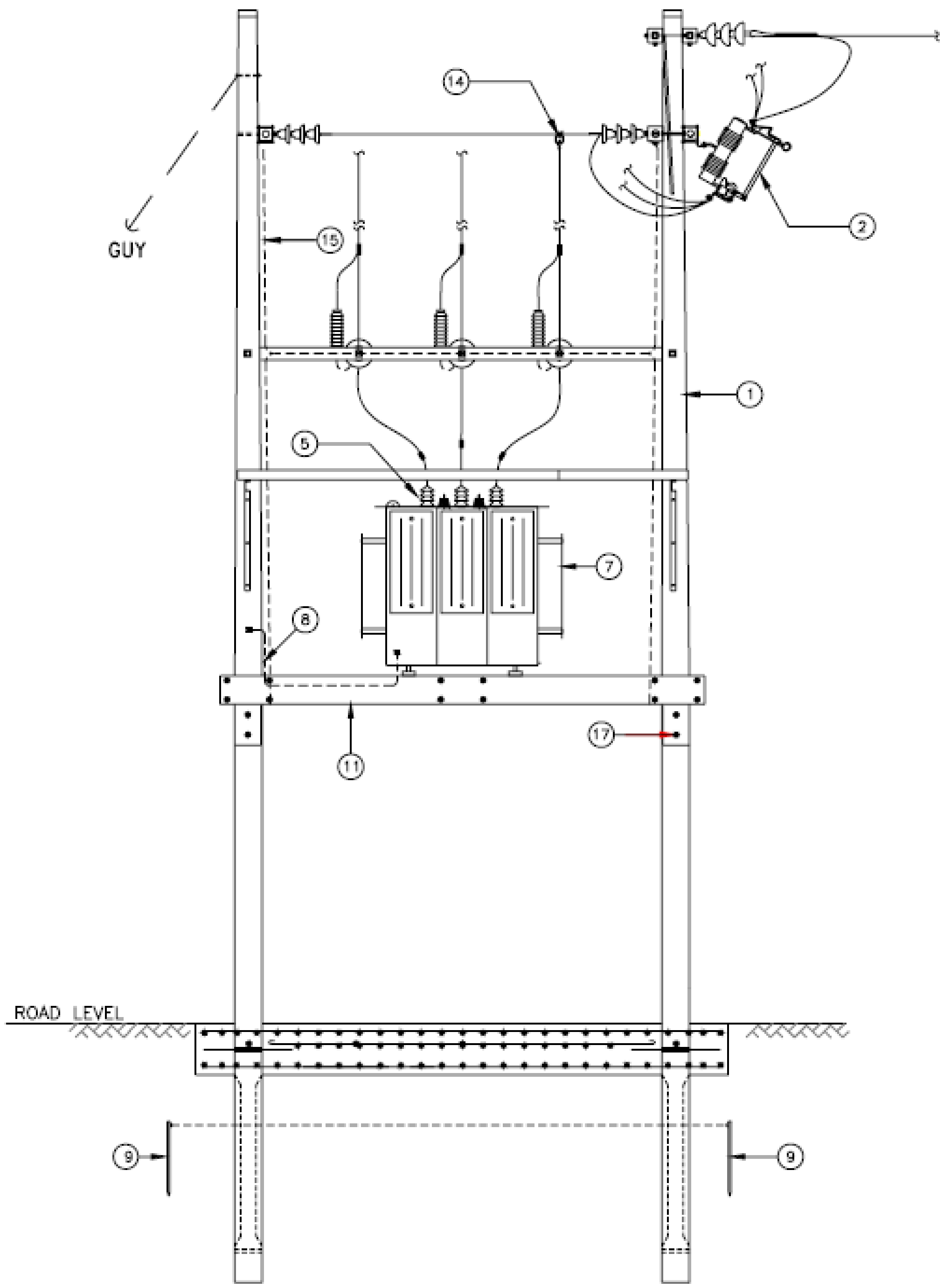
รูปที่ 6-13 แสดงรูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV ผ่านตู้ RMU และฝังสายเคเบิลใต้ รูปที่ 6-14 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV จากตู้ RMU ขึ้น RISER POLE และเชื่อมเข้ากับหม้อแปลงกำลัง



รูปที่ 6-13 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV ผ่านตู้ RMU และฝังสายเคเบิลใต้



รูปที่ 6-14 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV จากตู้ RMU ขึ้น RISER POLE
และเชื่อมเข้ากับหม้อแปลงกำลัง (ด้านข้าง)



รูปที่ 6-15 รูปแบบการรับไฟด้านแรงสูง 24 kV จากตู้ RMU ขึ้น RISER POLE และเชื่อมเข้ากับหม้อแปลงกำลัง (ด้านหน้า)

6.3.2 การประมาณโหลดเพื่อเลือกขนาดหม้อแปลง

การประมาณโหลด (Load Estimating) เป็นการประมาณโหลดรวมของอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ เพื่อหาขนาดของระบบไฟฟ้าและสามารถหาขนาดหม้อแปลงเพื่อที่จะสามารถจ่ายโหลดให้เพียงพอต่อความต้องการ โดยจะแบ่งการประมาณโหลด เป็น 3 ส่วน คือ (1) ส่วนของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ และ (2) ส่วนบริเวณรอบสถานประกอบการ เช่น ลานจอดรถ ทางเดินเข้าสำนักงาน

6.3.2.1 การประมาณโหลดของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

จากมาตรฐานของ IEEE ได้มีการประมาณโหลดต่างๆไว้ดังนี้

- แสงสว่าง (Lighting) 30 VA/m^2
- เต้ารับ (Receptacle) 10 VA/m^2
- รวมโหลดต่อพื้นที่เท่ากับ 40 VA/m^2

ส่วนพื้นที่ภายในโรงอาคารจอดรถของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่อาคารที่ 1 มีพื้นที่สำหรับจอดรถ 25 คัน พื้นที่ประมาณ 130 x 20 = 2,600 m^2 จึงใช้โหลดทั่วไปประมาณ 40 x 2,600 = 104,000 VA = 104 kVA

- เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 50 kW แบบ Slow charge ใช้เวลาในการอัดประจุประมาณ 5 ชั่วโมง จำนวน 25 ตัว รวมโหลดเท่ากับ $\frac{50}{0.8} \times 25 = 1{,}562.5$ kVA
- สำรองสำหรับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่จำนวน 1 ตัว (ประมาณการว่าใช้กระแสในการอัดประจุแบเตอรรี่มากกว่า Slow charge ประมาณ 5 เท่า) $\frac{50}{0.8} \times 5 = 312.5$ kVA

6.3.2.2 การประมาณการโหลดบริเวณรอบสถานประกอบการ

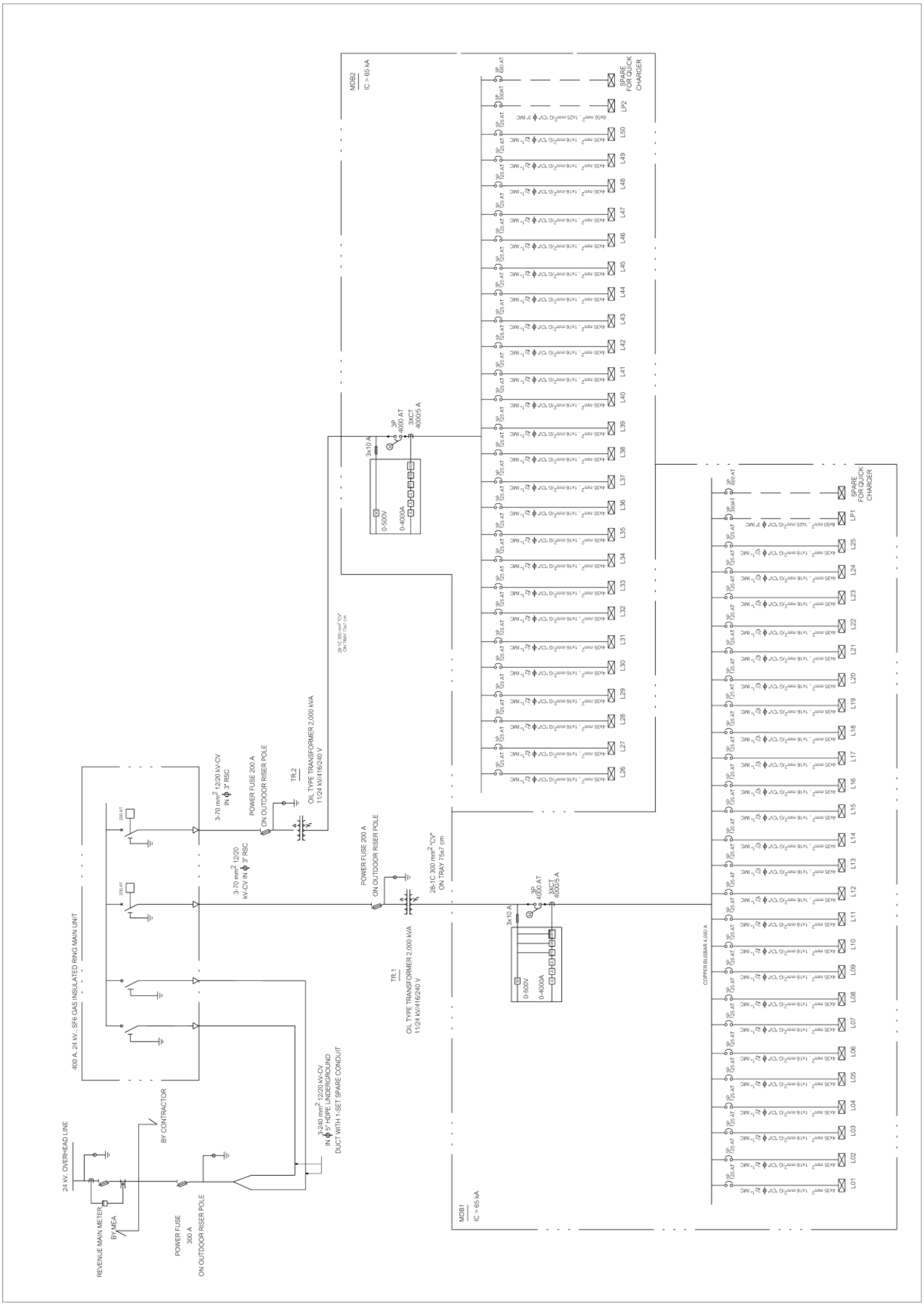
บริเวณรอบอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ทั้งบริเวณลานจอดรถพนังงาน และบริเวณทางเดินเข้าสำนักงาน โดยบริเวณส่วนนี้มีพื้นที่ประมาณ 2,000 m^2 โดยโหลดส่วนใหญ่เป็นโหลดแสงสว่างประมาณ 10 VA/m^2 ดังนั้นโหลดส่วนบริเวณนี้ประมาณ 2,000 x 10 = 20,000 VA = 20 kVA

6.3.2.3 การประมาณการโหลดรวมของ

การประมาณการโหลดของทุกส่วนของสถานประกอบการร่วมกัน 104 + 1,562.5 + 312.5 + 20 = 1,999 kVA ดังนั้นเลือกใช้หม้อแปลงขนาด 2,000 kVA ต่ออาคารจอดรถของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อจอดรถ 25 คัน ดังนั้นหม้อแปลงที่ใช้ในโครงการนี้ จึงเป็นหม้อแปลงขนาด 2,000 kVA จำนวน 2 ตัว ตั้งอยู่บนนั่งร้าน จ่ายไฟแต่ละอาคารแยกกัน

6.3.3 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

รูปที่ 6-16 แสดง Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ทั้งสองอาคาร



รูปที่ 6-16 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

6.3.4 การคำนวณหาขนาดอุปกรณ์ป้องกันและสายไฟ

จากรูปที่ 6-16 สามารถคำนวณหาค่ากระแสโหลดเพื่อนำไปใช้ในการเลือกขนาดอุปกรณ์ป้องกันและขนาดสายไฟเหมาะสม โดยประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญต่างๆดังต่อไปนี้

6.3.4.1 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 50 kW 400 V (คิด Power Factor เท่ากับ 0.8)

$$I_L = \frac{50 \times 1000}{0.8 \times \sqrt{3} \times 400} = 90.21 \text{ A}$$

ขนาด CB ใช้

$$I_{CB} \geq 1.25 \times 90.21 = 112.76 \text{ A}$$

ดังนั้นเลือก CB ขนาด 125 AT
ดังนั้นเลือกใช้สาย CV 1C ขนาด 4 x 35 mm^2 (131 A) เดินในท่อร้อยสายโลหะ
ขนาดสายดิน 16 mm^2 (เครื่องป้องกันกระแสไม่เกิน 200 A)
สาย 35 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 4x201 = 804 mm^2
สาย 16 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 133 mm^2
ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรวม = 804+133 = 937 mm^2
ท่อขนาด 50 mm (2”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 785 mm^2
ท่อขนาด 65 mm (2 ½”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1,327 mm^2
ดังนั้นใช้ท่อขนาด 65 mm (2 ½”)

6.3.4.2 เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ 250 kW 400 V แบบ Quick Charge สำรอง (คิด Power Factor เท่ากับ 0.8)

$$I_L = \frac{250 \times 1000}{0.8 \times \sqrt{3} \times 400} = 451.05 \text{ A}$$

ขนาด CB ใช้

$$I_{CB} \geq 1.25 \times 451.05 = 563.82 \text{ A}$$

ดังนั้นเลือก CB ขนาด 600 AT
ใช้สายควบ 3 เส้นต่อเฟส (200 A ต่อเส้น)
ดังนั้นเลือกใช้สาย CV 1C ขนาด 12 x 70 mm^2 (3 x 202 = 606 A) เดินในท่อร้อยสายโลหะ
ขนาดสายดิน 50 mm^2 (เครื่องป้องกันกระแสไม่เกิน 800 A)
สาย 70 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 12x284 = 3,408 mm^2
สาย 50 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 227 mm^2
ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรวม = 3,408+227 = 3,635 mm^2

ท่อขนาด 100 mm (4”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3,142 mm^2
ท่อขนาด 125 mm (2 ½”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 4,909 mm^2
ดังนั้นใช้ท่อขนาด 125 mm (5”)

6.3.4.3 แสงสว่างและเต้ารับสำหรับอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่และแสงสว่างบริเวณรอบอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

โหลดรวมเท่ากับ 104 + 20 = 124 kVA

$$I_L = \frac{124 \times 1000}{0.8 \times \sqrt{3} \times 400} = 223.72\ A$$

ขนาด CB ใช้

$$I_{CB} \geq 1.25 \times 223.72 = 279.65\ A$$

ดังนั้นเลือก CB ขนาด 300 AT
ใช้สายควบ 2 เส้นต่อเฟส (150 A ต่อเส้น)
ดังนั้นเลือกใช้สาย CV1C ขนาด 8 x 50 mm^2 (2 x 159 = 318 A) เดินในท่อร้อยสายโลหะ
ขนาดสายดิน 25 mm^2 (เครื่องป้องกันกระแสไม่เกิน 400 A)
สาย 50 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 8x227 = 804 mm^2
สาย 25 mm^2 มีพื้นที่หน้าตัด = 165 mm^2
ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดรวม = 1,816+165 = 1,981 mm^2
ท่อขนาด 65 mm (2 ½”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 1,327 mm^2
ท่อขนาด 80 mm (3”) 40% ของพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 2,011 mm^2
ดังนั้นใช้ท่อขนาด 80 mm (3”)

6.3.4.4 ขนาดสายไฟด้านแรงสูงของหม้อแปลง 2,000 kVA

$$I_n(HV) = \frac{2000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 24 \times 1000} = 48.11\ A$$

$$I_n(LV) = \frac{2000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = 2{,}886.75\ A$$

ขนาด CB ใช้

$$I_{CB} \geq 1.25 \times 48.11 = 60.14\ A$$

ดังนั้นเลือก CB ขนาด 200 AT (เผื่อการขยายตัวของโหลดในอนาคต)
ค่ากระแสลัดวงจรที่ขั้วแรงต่ำของหม้อแปลงจากตารางมีค่า $I_C \geq 44.8\,\text{kA}$

$$I_{CU} \geq 1.25 \times 44.8 = 56\ \text{kA}$$

ดังนั้นเลือก $I_{CU} = 65\ \text{kA}$ (เผื่อการเพิ่มขึ้นของกระแสลัดวงจรจากการขยายตัวของโหลดในอนาคต)

6.3.5 การประมาณราคาระบบไฟฟ้า

จาก Single Line Diagram ในรูปที่ 6-16 สามารถแบ่งหมวดงานเพื่อการประมาณราคาระบบไฟฟ้าได้ออกเป็น 3 หมวด ได้แก่ งาน Main Incoming & HV Routing งานแผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB) และสายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟ ซึ่งในแต่ละงานสามารถสรุปราคาประมาณได้ดังตารางที่ 6-7 ถึง ตารางที่ 6-9 ซึ่งหากรวมทั้ง 3 หมวดงานแล้ว ค่าใช้จ่ายในส่วนของระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คันต่อ 1 อู่จะมีค่าเท่ากับ 15,053,800 บาท (สิบห้าล้านห้าหมื่นสามพันแปดร้อยบาท) ซึ่งหากรวมทั้ง 4 อู่ ซึ่งสามารถรองรับรถโดยสารไฟฟ้าได้ 200 คัน ค่าใช้จ่ายในส่วนของระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า จะมีค่าเท่ากับ 60,215,200 บาท (หกสิบล้านสองแสนหนึ่งหมื่นห้าพันสองร้อยบาท)

ตารางที่ 6-7 สรุปราคาประมาณของหมวดงาน Main Incoming & HV Routing

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวมค่าวัสดุ
				ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	และแรงงาน
1	**หมวดงาน Main Incoming & HV Routing**							
	XLPE 1C=70 Sq.mm. (24 kV)	100	เมตร	620	62,000.00	66	6,600.00	68,600.00
	XLPE 1C-240 Sq.mm (24 kV)	200	เมตร	925	185,000.00	155	31,000.00	216,000.00
	TR Oil Type 2000 kVA 24 kV -240/416	2	ชุด	1,500,000.00	3,000,000.00	20,000.00	40,000.00	3,040,000.00
	Ring Main Unit (RUM) 400 A, 16 kA, 2 IN 2 OUT	1	ชุด	800,000.00	800,000.00	60,000.00	60,000.00	860,000.00
	ท่อ HDPE	200	เมตร	300	60,000.00	70	14,000.00	74,000.00
	แนวท่อ 2x2 DUCT BANK 0.56x0.56 m	200	เมตร	3,500.00	700,000.00	850	170,000.00	870,000.00
	Riser Pole 12 m and HV equipment	2	ชุด	35,000.00	70,000.00	9,500.00	19,000.00	89,000.00
	Pole 12 m and HV equipment	2	ชุด	25,000.00	50,000.00	5,500.00	11,000.00	61,000.00
	Manhole Type C-1	1	ชุด	65,000.00	65,000.00	10,000.00	10,000.00	75,000.00
	Cable Support, Pillow and Accessories	2	ชุด	7,500.00	15,000.00	1,200.00	2,400.00	17,400.00
	HV Grounding System for Riser Pole	2	ชุด	7,500.00	15,000.00	2,500.00	5,000.00	20,000.00
	กิโลวัตต์ฮาวมิเตอร์ 3 เฟส	2	ชุด	10,500.00	21,000.00	700	1,400.00	22,400.00
	อุปกรณ์ประกอบระบบไฟฟ้าแรงสูง	2	ชุด	13,000.00	26,000.00	0	0.00	26,000.00
รวมหมวดงาน Main Incoming & HV Routing					**5,069,000.00**		**370,400.00**	**5,439,400.00**

ตารางที่ 6-8 สรุปราคาประมาณของหมวดงานแผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB)

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวมค่าวัสดุ
				ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	และแรงงาน
2	แผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB)							
	ACB 4000 AT/4000 AF 3P	2	ชุด	475,000.00	950,000.00	20,000.00	40,000.00	990,000.00
	MCCB 125 AT/200 AF 3P	50	ชุด	10,000.00	500,000.00	150	7,500.00	507,500.00
	MCCB 300 AT/400 AF 3P	2	ชุด	15,600.00	31,200.00	250	500.00	31,700.00
	MCCB 600 AT/1000 AF 3P	2	ชุด	25,000.00	50,000.00	250	500.00	50,500.00
	KILOWAT-HOUR METER	2	ชุด	15,500.00	31,000.00	2,000.00	4,000.00	35,000.00
	CURRENT TRANSFORMER 4000/5 A	6	ชุด	5,500.00	33,000.00	250	1,500.00	34,500.00
	CONTROL FUSE 5A	2	ชุด	250	500.00	100	200.00	700.00
	VOLT METER 0-500 V	2	ชุด	1,000.00	2,000.00	250	500.00	2,500.00
	AMP METER 0-4000 A	2	ชุด	1,000.00	2,000.00	250	500.00	2,500.00
	SELECTOR VOLT	2	ชุด	500	1,000.00	100	200.00	1,200.00
	SELECTOR AMP	2	ชุด	500	1,000.00	100	200.00	1,200.00
	PILOT LAMP	6	ชุด	250	1,500.00	100	600.00	2,100.00
	Grounding System	2	ชุด	5,000.00	10,000.00	2,000.00	4,000.00	14,000.00
	BUSBAR & WIRING	2	เหมา	500,000.00	1,000,000.00	80,000.00	160,000.00	1,160,000.00
	PANEL BOARD	2	ชุด	98,500.00	197,000.00	5,000.00	10,000.00	207,000.00
	ACCESSORIES	2	เหมา	25,000.00	50,000.00	25,000.00	50,000.00	100,000.00
รวมหมวดงานแผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB)					**2,860,200.00**		**280,200.00**	**3,140,400.00**

ตารางที่ 6-9 สรุปราคาประมาณของหมวดงานสายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟ

ลำดับที่	รายการ	จำนวน	หน่วย	ค่าวัสดุ		ค่าแรงงาน		รวมค่าวัสดุ
				ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	ราคาต่อหน่วย	จำนวนเงิน	และแรงงาน
3	**สายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟฟ้า**							
	สาย CV 1C-16 Sq.mm.	1900	เมตร	90	171,000.00	20	38,000.00	209,000.00
	สาย CV 1-25 Sq. mm.	200	เมตร	130	26,000.00	25	5,000.00	31,000.00
	สาย CV 1-35 Sq. mm.	7100	เมตร	180	1,278,000.00	30	213,000.00	1,491,000.00
	สาย CV 1-50 Sq.mm.	2100	เมตร	300	630,000.00	50	105,000.00	735,000.00
	สาย CV 1-70 Sq. mm.	4000	เมตร	400	1,600,000.00	80	320,000.00	1,920,000.00
	สาย CV 240 SQ. MM.	450	เมตร	1,100.00	495,000.00	80	36,000.00	531,000.00
	สาย CV 300 Sq.mm.	550	เมตร	1,400.00	770,000.00	90	49,500.00	819,500.00
	IMC 2 1/2 นิ้ว	1200	เมตร	363	435,600.00	50	60,000.00	495,600.00
	IMC 3 นิ้ว	300	เมตร	456	136,800.00	60	18,000.00	154,800.00
	RSC 3 นิ้ว	20	เมตร	1,000.00	20,000.00	105	2,100.00	22,100.00
	TRAY 75x7 CM	20	เมตร	3,000.00	60,000.00	250	5,000.00	65,000.00
รวมหมวดงานสายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟ					**5,622,400.00**		**851,600.00**	**6,474,000.00**

6.3.6 การประมาณราคาค่าก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน

การประมาณราคาค่าก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน จะใช้รูปแบบโครงสร้างอาคารสำหรับติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ในหัวข้อที่ 6.2 โดยใน 1 อู่จะประกอบด้วยอาคารจอดรถรูปแบบเดียวกัน 2 อาคาร พื้นที่ในแต่ละอาคารจะมีขนาด 130x20 = 2,600 m^2 รวมพื้นที่ 2 อาคารจะมีค่าเท่ากับ 2x2,600 = 5,200 m^2 การก่อสร้างอาคารในลักษณะโกดังโรงงานจะมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 10,000 บาทต่อตารางเมตร ซึ่งรวมแล้วเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด 10,000x5,200 = 52,000,000 บาท (ห้าสิบสองล้านบาท)

6.3.7 การประมาณราคารวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

การประมาณราคารวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6.10 โดยมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 67,053,800 บาท (หกสิบเจ็ดล้านห้าหมื่นสามพันแปดร้อยบาท) และคิดเป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด 268,215,200 บาท (สองร้อยหกสิบแปดล้านสองแสนหนึ่งหมื่นห้าพันสองร้อยบาท)

ตารางที่ 6-10 สรุปราคาประมาณรวมทั้งหมดของระบบไฟฟ้าและการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่เพื่อรองรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน

ลำดับที่	รายการ	ค่าวัสดุ	ค่าแรงงาน	รวมค่าวัสดุ
		จำนวนเงิน	จำนวนเงิน	และแรงงาน
1	งานระบบไฟฟ้าสำหรับอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ จำนวน 2 หลัง			
1.1	หมวดงาน Main Incoming & HV Routing	5,069,000.00	370,400.00	5,439,400.00
1.2	แผงสวิตช์ไฟฟ้าประธาน (MDB)	2,860,200.00	280,200.00	3,140,400.00
1.3	สายไฟฟ้าและท่อร้อยสายไฟฟ้า	5,622,400.00	851,600.00	6,474,000.00
2	งานก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับจอดรถ 25 คัน 2 หลัง			52,000,000.00
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด				**67,053,800.00**

6.3.8 อัตราค่าไฟฟ้า

การใช้ไฟฟ้าเพื่อใช้ในสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า จะเข้าลักษณะการใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 สำหรับกิจการขนาดใหญ่ ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงได้ให้นิยามไว้ว่า ลักษณะการใช้สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ สถานที่ทำการเกี่ยวกับกิจการของต่างชาติ และสถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการพลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือ มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน เกินกว่า 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดหน่วยไฟฟ้าเครื่องเดียว ซึ่งมีอัตราการเก็บค่าไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่

(1) อัตราตามช่วงเวลาของวัน (Time of Day Tariff : TOD Tariff)

(2) อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff : TOU Tariff)

พิจารณาจากรูปแบบการให้บริการที่กำหนดไว้ การอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา Off peak เท่านั้น กล่าวคือไม่อยู่ในช่วงเวลา 9.00-22.00 น. ในวันทำงาน (ช่วงเวลา Peak) ซึ่งระบบ TOU จะมีต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยถูกที่สุดคือ 2.6295 บาทต่อหน่วย และไม่มีการเก็บค่า Peak สำหรับการรับไฟจากแรงดันไฟฟ้า 24 kV แตกต่างจากระบบ TOD ที่มีต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยถึง 3.1729 บาทต่อหน่วยสำหรับการรับไฟจากแรงดันไฟฟ้า 24 kV เช่นเดียวกัน จากเหตุผลนี้ รูปแบบการอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าจะสามารถใช้การอัดประจุแบบปกติได้ตั้งแต่หลังเวลา 22.00 น. ไปจนถึงก่อนเวลา 9.00 น. ในวันถัดไป ซึ่งมีระยะเวลาถึง 11 ชั่วโมง ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่ปกติแบบ Slow charge จะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 5 ชั่วโมง ดังนั้นต้นทุนพลังงานสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าจึงสามารถควบคุมได้ด้วยการควบคุมเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงเวลา Off peak ซึ่งจะทำให้มีต้นทุนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.6295 บาทต่อหน่วย

ตารางที่ 6-11 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD)

อัตรารายเดือน	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)			ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	On Peak	Partial Peak	Off Peak	ทุกช่วงเวลา	
4.1.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	224.30	29.91	0	3.1355	312.24
4.1.2 แรงดัน 12 - 24 กิโลโวลต์	285.05	58.88	0	3.1729	312.24
4.1.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	332.71	68.22	0	3.2009	312.24

On Peak : เวลา 18.30 - 21.30 น. ของทุกวัน

Partial Peak : เวลา 08.00 - 18.30 น. ของทุกวัน คิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้าเฉพาะส่วนที่เกินจากช่วง On Peak

Off Peak : เวลา 21.30 - 08.00 น. ของทุกวัน ไม่คิดค่าความต้องการพลังไฟฟ้า

ตารางที่ 6-12 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

อัตรารายเดือน	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)		ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
	On Peak	Off Peak	On Peak	Off Peak	
4.2.1 แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	74.14	0	4.1283	2.6107	312.24
4.2.2 แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	132.93	0	4.2097	2.6295	312.24
4.2.3 แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	210.00	0	4.3555	2.6627	312.24

On Peak : เวลา 09.00 - 22.00 น. วันจันทร์ - วันศุกร์

Off Peak : เวลา 22.00 - 09.00 น. วันจันทร์ - วันศุกร์

: เวลา 00.00 - 24.00 น. วันเสาร์ - วันอาทิตย์ วันแรงงานแห่งชาติ วันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันพืชมงคลและวันหยุดชดเชย)

6.3.9 การศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

ประเด็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งอาจผลส่งกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าข้างเคียง สรุปได้ดังนี้

(1) ปัญหาแรงดันตก

เนื่องจากการอัดประจุแบตเตอรี่เปรียบเสมือนการเพิ่มโหลดของระบบไฟฟ้าให้มากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาแรงดันตกในระบบไฟฟ้าขึ้นได้

(2) ปัญหาการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเกินพิกัดกำลัง

เนื่องจากการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าในปัจจุบันเป็นการออกแบบพิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้าตามโหลดติดตั้ง ในอนาคตเมื่อมีการใช้งานรถโดยสารไฟฟ้ามากขึ้นจะต้องมีการปรับปรุงถึงแม้ว่าหม้อแปลงในระบบจำหน่ายจะสามารถจ่ายโหลดเกินได้ร้อยละ 160 ก็ตาม

(3) ปัญหาการจ่ายโหลดเกินของสายไฟแรงต่ำ

เมื่อมีการอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้มีกำลังไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเวลาที่มีการใช้โหลดสูงสุดและอาจจะเป็นช่วงเวลาเดียวกันที่มีการ อัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า

(4) ปัญหาความสูญเสียที่เพิ่มขึ้น

การอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าจะทำให้ความสุญเสียในระบบจำหน่ายเพิ่มสูงขึ้น โดยตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ ระยะเวลาการอัดประจุแบตเตอรี่ และจำนวนรถโดยสารไฟฟ้า จะเป็นปัจจัยหลักในการทำให้เกิดความสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้น

(5) ปัญหาความถี่ตก

การอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าคือการเพิ่มโหลด ดังนั้นจึงมีผลต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าด้วย

(6) ปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล

เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า หากเป็นระบบ 1 เฟส และไม่มีการจัดโหลดให้เหมาะสม จะมีโอกาสทำให้เกิดแรงดันไม่สมดุลขึ้น

(7) ปัญหาฮาร์มอนิคส์ของกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สวิทชิ่งอิเล็กทรอนิกส์ จึงอาจก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ ของกระแสไฟฟ้าได้

อย่างไรก็ตาม จากการออกแบบสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คันต่ออู่ เนื่องจากโหลดรวมในแต่ละสถานีมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้ใน 1 ฟีดเดอร์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง 24 kV และกระจายตัวอยู่ห่างไกลกันถึง 4 แห่ง ดังนั้นในเบื้องต้นผลกระทบต่างๆที่อาจเกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้า จะส่งผลไม่เด่นชัดมากนักเนื่องจากขนาดของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้ายังมีขนาดไม่ใหญ่มากนักเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่สายฟีดเดอร์จ่ายได้ ซึ่งถ้าหากว่าในอนาคต ขสมก. มีการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และมีการก่อสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่กระจายตัวเพิ่มขึ้น ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าก็จะเริ่มส่งผลให้เห็นมากขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องสร้างแนวทางศึกษาผลกระทบของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

6.3.10 แนวการศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการศึกษาผลกระทบ ได้เลือกใช้โปรแกรม DIgSILENT Power Factory ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เป็นที่ยอมรับของการไฟฟ้าในประเทศไทยมาเป็นเครื่องมือในการจำลองระบบไฟฟ้าและสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ การอัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้าในสถานี จะขึ้นอยู่กับสถานะคงเหลือของแบตเตอรี่และเวลาการเข้าถึงสถานี รวมถึงจำนวนหัวอัดประจุแบตเตอรี่ในหนึ่งสถานี กำลังไฟฟ้าต้องการจากระบบไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตัวแปรดังกล่าวข้างต้น

- สมมุติฐาน

ในการการศึกษาจะดำเนินการจำลองการติดตั้งสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้า และจำลองการอัดประจุแบตเตอรี่ ด้วยสมมุติฐาน คือ จำลองติดตั้งเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ทั้งหมด 50 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องมีกำลังไฟฟ้าจริง 50 kW ที่เพาเวอร์แฟกเตอร์ 0.8 เวลาเข้าชาร์จเป็นไปตามเวลาที่เข้าในสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า (Arrival time)

- สถานะของแบตเตอรี่คงเหลือและระยะเวลาในการประจุ

สถานะของแบตเตอรี่คงเหลือและระยะเวลาในการอัดประจุ เป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของการอัดประจุแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้า และมีส่วนสำคัญของการสร้างโพรไฟลการอัดประจุแบตเตอรี่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการใช้รถโดยสารไฟฟ้า มีค่าผกผันกับระยะทางที่ใช้รถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพการจราจรและปัจจัยอื่นๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

- เวลาในการเข้าอัดประจุแบตเตอรี่ในสถานี

เวลาเข้าเพื่ออัดประจุแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า จะศึกษาตามกรณีศึกษาดังต่อไปนี้

(1) กรณีอัดประจุแบตเตอรี่พร้อมกันทั้ง 50 เครื่อง

(2) กรณีอัดประจุแบตเตอรี่ไม่พร้อมกันโดยมีการตั้งระยะเวลาหน่วงที่ห่างกัน 1 นาที

6.3.11 แผนงานการดำเนินงาน

ตารางที่ 6-13 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานโครงการภายตั้งแต่เริ่มต้นจนแล้วเสร็จภายในระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน

ตารางที่ 6-13 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

ลำดับ	รายการ	กำหนดเวลาดำเนินการ											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	จัดเตรียมเอกสารหลักฐานในการขอใช้ไฟฟ้า												
	1.1 จ้างเขียนแบบก่อสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าๆ (Detail Drawing), Load Schedule และรายการคำนวณทางไฟฟ้า												
	1.2 ตารางกรอกข้อมูลการใช้พื้นที่อาคารและอุปกรณ์ไฟฟ้า												
	1.3 ใบอนุญาตให้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมสาขาวิศวกรรมโยธารับรองฐานรากของฐานรากตั้งหม้อแปลง												
	1.4 หนังสือแสดงความจำนงค์ ว่าต้องการให้ กฟน. ดำเนินการส่วนใด และผู้ขอใช้ไฟฟ้าจะดำเนินการเองส่วนใด												
	1.5 ใบอนุญาตให้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังประเภทสามัญวิศวกรขึ้นไปของผู้ออกแบบและควบคุมการติดตั้ง												
	1.6 Specification ของหม้อแปลงและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง												
	1.7 แบบแสดงตำแหน่งและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ												
2	ออกแบบโครงสร้างอาคารจอดรถ												
3	จัดหาผู้รับเหมา												
4	การขออนุญาตก่อสร้าง												
5	ดำเนินการก่อสร้างโครงสร้างอาคารและระบบไฟฟ้า												
6	ทดสอบระบบ												
7	ตรวจรับงาน												
8	ดำเนินการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า 200 คัน												

บทที่ 7
การประเมินและรูปแบบการประเมินในโครงการ

- การประเมินโครงการ
- การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ
- การประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการ
- การประเมินต้นทุนทางการเงิน
- ด้านผลตอบแทนทางการเงิน
- สมมติฐาน
- การประเมินต้นทุนการเดินรถโดยสารและผลตอบแทน
- ผลการประเมินโครงการ
- การวิเคราะห์ความอ่อนไหว
- สรุปผลการประเมินโครงการและข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

7.1 การประเมินโครงการ

ทุกประเทศในโลกต่างต้องเผชิญกับความจำกัดของทรัพยากรที่ต้องใช้เพื่อความเป็นอยู่ที่ดีของประชากรในประเทศ ทั้งภาครัฐและเอกชนจะต้องตัดสินใจเลือกใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงที่สุดต่อสังคม (และต่อตนเองสำหรับภาคเอกชน) ซึ่งในการตัดสินใจดำเนินการในสิ่งใดจะต้องเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างสิ่งที่ได้มากับสิ่งที่ต้องเสียไป (Trade-off) ดังนั้น ในการตัดสินใจจึงจำเป็นต้องมีกระบวนการในการเปรียบเทียบเพื่อพิจารณาทางเลือกต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์สูงสุด การตัดสินใจของภาคเอกชนและภาครัฐมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ สำหรับภาคเอกชนจะประเมินบนพื้นฐานของการได้ประโยชน์สูงสุด (กำไรจากผลประกอบการ) จากการลงทุนหรือการใช้ทรัพยากรที่ตนเองมีอยู่ ในขณะที่ภาครัฐจะประเมินที่มุมมองที่ต่างออกไป ทั้งนี้เพื่อให้การใช้ทรัพยากรของภาครัฐเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อสังคมโดยรวม ซึ่งการประเมินโครงการของภาครัฐ ต้องประเมินจากหลายด้าน คือ

1. การประเมินด้านเทคนิค (Technical Aspects) โดยทำการรวบรวมองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีของเรื่องนั้นๆ มาประมวลไว้ แล้วพิจารณาโดยผู้เชี่ยวชาญว่าเป็นไปได้มากน้อยเพียงใด หรือเทคโนโลยีใดมีความเหมาะสมทางด้านเทคนิคกับสภาวการณ์ของโครงการที่สุด
2. การประเมินทางด้านการเงิน (Financial Aspects หรือ Financial Analysis) เป็นประเด็นสำคัญที่สุดที่ภาคเอกชนให้ความสนใจในการลงทุน โดยพิจารณาว่าโครงการลงทุนนั้นๆต้อง

ใช้เงินจำนวนเท่าใด หาเงินมาจากแหล่งไหน เมื่อใดจึงจะได้ผลตอบแทนจากการลงทุนมาอย่างไร ได้กำไรมากน้อยเพียงใด

3. การประเมินด้านสังคมและการเมือง (Social and Political Aspects) หลายโครงการอาจจะผ่านการประเมินในด้านอื่นๆแต่ไม่มีความเป็นไปได้ทางด้านสังคม เช่น การห้ามขายของบนทางเท้าทั่วทั้งกรุงเทพ
4. การประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Aspects) เป็นการประเมินโครงการที่ไม่ได้ให้ความสนใจกับกำไรที่เป็นตัวเงิน แต่เป็นการประเมินที่มีความสำคัญมากสำหรับโครงการของภาครัฐ หรือโครงการที่รัฐสนับสนุนให้ภาคเอกชนจัดทำ โดยประเมินว่าทรัพยากรที่ใช้ไปในโครงการนั้นจะก่อให้เกิดประโยชน์ในลักษณะต่างๆกับสังคมอย่างไรบ้าง เป็นการใช้ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อสังคมหรือไม่
5. การประเมินด้านการจัดการ (Managerial Aspects) เป็นการพิจารณาว่าถ้าจะจัดทำโครงการนั้นๆ ขึ้น การจัดการต่างๆจะเป็นเช่นไร เช่น โครงการทางด่วนขั้นที่ 2 ที่มีการขัดแย้งกันระหว่างการทางพิเศษกับบริษัทเอกชนผู้รับสัมปทานว่าฝ่ายใดจะเป็นฝ่ายจัดเก็บค่าผ่านทาง เป็นต้น

โดยส่วนใหญ่แล้วการวิเคราะห์โครงการมักจะใช้การวิเคราะห์ใน 2 รูปแบบ คือการวิเคราะห์โครงการทางการเงินและด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อแตกต่างระหว่างกันดังนี้[11]

การวิเคราะห์โครงการทางด้านการเงิน มุ่งเน้นที่ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุนหรือผลกำไรที่เป็นตัวเงินจากการดำเนินการ รวมถึงความสามารถในการจ่ายคืนเงินกู้ตลอดช่วงอายุของโครงการ ซึ่งสามารถใช้ราคาคงที่หรือราคาตลาดก็ได้

ในขณะที่การวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาถึงผลของโครงการที่มีต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวม และจะประเมินค่ารายการต้นทุนและผลประโยชน์ในรูปค่าที่แท้จริง (Real term) โดยใช้ราคาคงที่ ทำให้โครงการไม่ได้รับผลกระทบจากอัตราเงินเฟ้อ เพราะต้นทุนและผลประโยชน์ได้รับผลกระทบโดยเปรียบเทียบเท่ากัน ซึ่งข้อดีของการใช้ราคาคงที่มีดังนี้

1) จากงบกระแสเงินสดของโครงการ สามารถหาค่าอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนที่แท้จริง (Real IRR) ได้ทันที
2) สามารถเปลี่ยนค่าทางการเงินในงบกระแสเงินสดเป็นค่าทางเศรษฐกิจได้โดยใช้ค่าแปรราคาเงา (Conversion factor: CF)
3) ช่วยให้การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของโครงการง่ายขึ้น โดยเฉพาะการหาค่าเปลี่ยนการตัดสินใจ (Switching value) ง่ายขึ้น

ในโครงการขนาดใหญ่ มักมีผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมผ่านด้านต้นทุนค่าใช้จ่ายและผลประโยชน์ของโครงการ การวิเคราะห์ทางการเงินเพียงด้านเดียวไม่อาจนำไปสู่ข้อสรุปของการลงทุนในโครงการได้อย่างเชื่อมั่น จำเป็นต้องนำผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์มาประกอบการตัดสินใจ การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกันดังนี้

[11] http://www2.oae.go.th/FTA/PDF/km/1.pdf

7.1.1 การวิเคราะห์ต้นทุนต่ำสุด (Cost-minimization analysis: CMA)

การวิเคราะห์ต้นทุนต่ำสุดเป็นการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างทางเลือกหลายๆทางเลือก สามารถทำให้บรรลุผลที่เหมือนกันทุกประการ ทางเลือกใดที่เสียต้นทุนต่ำสุดย่อมเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น การพิจารณาสองโครงการที่เกี่ยวข้องกับการผ่าตัดย่อยให้ผู้ใหญ่ เช่น การผ่าตัดริดสีดวงการผ่าตัด และผลของการผ่าตัดจากทั้งสองโครงการมีผลเหมือนกันทุกประการ โครงการทั้งสองต่างกันเพียงโครงการหนึ่ง ให้ผู้ป่วยรักษาตัวในโรงพยาบาลหลังการผ่าตัดอย่างน้อยหนึ่งคืน ในขณะที่อีกโครงการหนึ่งให้คนไข้กลับไปพัก รักษาตัวที่บ้านเลย ถ้าประสิทธิผลของการรักษาเหมือนกันทุกประการ ต้นทุนของทางเลือกใดต่ำกว่าย่อมเป็น การประหยัดต่อสังคม กล่าวคือ การวิเคราะห์ต้นทุนต่ำสุดมีทั้งข้อดีและข้อจำกัด

ข้อดี	ข้อจำกัด
ผู้วิเคราะห์ไม่ต้องประเมินด้านผลประโยชน์ของโครงการ เพราะทุกโครงการให้ผลประโยชน์เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นจึงเปรียบเทียบกันเฉพาะด้านต้นทุน	ถ้าทางเลือกที่นำมาพิจารณาให้ผลประโยชน์ที่แตกต่างกันไป การวิเคราะห์ในรูปแบบนี้ก็ไม่เหมาะสม และเพื่อให้แน่ใจว่า ผลของแต่ละทางเลือกเหมือนกันทุกประการก็จะต้องมีการ ทดลองและทดสอบประกอบด้วย ดั้งนั้นการวิเคราะห์แบบนี้ จึงความจำกัดในการนำไปใช้

7.1.2 การวิเคราะห์ต้นทุน-ประสิทธิผล (Cost-Effectiveness analysis: CEA)

การวิเคราะห์ต้นทุน-ประสิทธิผลเป็นการวิเคราะห์ทางเลือกโครงการในกรณีที่มีหลายทางเลือกที่มี เป้าหมายเดียวกัน แต่แตกต่างกันที่ประสิทธิภาพในการบรรลุผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์เพียงต้นทุน อย่างเดียวจึงไม่เพียงพอจำเป็นต้องนำประสิทธิภาพของแต่ละทางเลือกเข้ามาพิจารณาเปรียบเทียบกับต้นทุน ด้วย ยกตัวอย่างเช่น การที่จะต่ออายุผู้ป่วยด้วยโรคไตวายอาจกระทำได้หลายวิธีเช่น ด้วยวิธีล้างไตหรือวิธีการ ผ่าตัดเปลี่ยนไต ซึ่งวิธีหรือทางเลือกทั้งสองต่างก็มีเป้าหมายในการช่วยยืดอายุผู้ป่วยออกไปเช่นกัน แต่ ประสิทธิผลในการยืดอายุของผู้ป่วยแต่ละทางเลือกนั้นต่างกันด้วย เราคงไม่สามารถตัดสินใจเลือกวิธีการใด วิธีการหนึ่งเพียงเพราะวิธีนั้นใช้ต้นทุนต่ำสุด เพราะวิธีการที่มีต้นทุนสูงกว่าอาจมีประสิทธิภาพในการยืดอายุ ผู้ป่วยได้นานกว่าด้วย กรณีเช่นนี้จึงต้องเปรียบเทียบต้นทุนต่อหน่วยของผลอันเป็นเป้าหมาย

ข้อดี	ข้อจำกัด
CEA เป็นการลดข้อจำกัดของวิธีการ CMA นั้นคือ โครงการที่นำมาเปรียบเทียบ ไม่จำเป็นต้องเป็นโครงการ ที่ให้ผลเหมือนกันทุกประการ เพียงแต่มีผลอันเป็น เป้าหมายร่วมอันเดียวกัน	CEA จะยังมีข้อจำกัดในการใช้ โครงการที่นำมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบกันตามวิธีการ CEA จะต้องเป็นเป้าหมายของ โครงการที่นำมาเปรียบเทียบนั้นต้องสามารถระบุและวัด ขนาดได้ เช่น ช่างเวลาที่สามารถยืดอายุผู้ป่วยออกไป หรือ จำนวนการตายที่ลดลง หรือจำนวนวันลาป่วยที่ลดลง เป็นต้น

7.1.3 การวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์ (Cost-Benefit analysis: CBA)

การวิเคราะห์ต้นทุนผลประโยชน์เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบโครงการโดยนำทั้งทางด้านต้นทุนและผลของโครงการมาคิดให้อยู่ในหน่วยของเงินเพื่อการเปรียบเทียบผลประโยชน์และต้นทุนของโครงการหนึ่งๆ โครงการที่นำมาเปรียบเทียบแต่ละโครงการนอกจากจะมีผลที่ตั้งใจให้เกิดอันเป็นเป้าหมายหลักร่วมกันแล้ว ยังมีผลที่มิได้ตั้งใจให้เกิด (ผลพลอยได้) หลายๆ ผลแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น รัฐมีเป้าหมายที่จะลดอัตราการเกิดของประชากรลงด้วยการคุมกำเนิด ซึ่งอาจเลือกวิธีการคุมกำเนิดได้หลายวิธี เช่น การรับประทานยา ใช้ถุงยางอนามัย การฉีดยา และอื่นๆ อันเป็นการคุมกำเนิดชั่วคราว ไปจนถึงวิธีการคุมกำเนิดที่ค่อนข้างจะถาวร ได้แก่ การทำหมันซึ่งในการวิเคราะห์ CBA ของแต่ละวิธีจะต้องนำเอาผลทั้งที่ตั้งใจให้เกิด และผลข้างเคียงของแต่ละวิธีเข้ามารวมไว้ในการวิเคราะห์

ข้อดี	ข้อจำกัด
การทำ CBA สำหรับโครงการหนึ่งโครงการใดจะต้องให้ข้อมูลที่ครบถ้วนสมบูรณ์กับผู้ตัดสินใจได้ทราบว่าโครงการนั้นต้องใช้ทรัพยากรไปเป็นมูลค่าเท่าใด และจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่างๆ คิดเป็นมูลค่าเท่าใด สุทธิแล้วโครงการนั้นๆจะให้ผลคุ้มกับการลงทุนหรือไม่ การที่ CBA สามารถให้ข้อมูลที่ค่อนข้างจะสมบูรณ์แก่ผู้ทำหน้าที่ตัดสินใจ อีกทั้งสามารถใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างทางเลือกต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางนับเป็นจุดดี	การที่ CBA ใช้ได้กับทุกโครงการอย่างกว้างขวางนั้นตั้งบนสมมติฐานที่ว่าต้นทุนและผลประโยชน์ต่างๆของทุกๆโครงการสามารถคิดค่าเป็นตัวเงินได้ แต่ยังเป็นเรื่องที่โต้แย้งกันในทางทฤษฎีหรือแนวความคิด และถึงแม้จะยอมรับในแนวความคิดกันได้ ความยุ่งยากในทางปฏิบัติก็ยังมีสูงมาก เรื่องการวัดและคิดมูลค่าของการได้มาใหม่หรือการสูญเสียอวัยวะส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกาย นอกจากนี้การคิดมูลค่าของชีวิตหรืออวัยวะออกมาเป็นตัวเงินเป็นสิ่งที่หลายคนโจมตีว่านักเศรษฐศาสตร์ที่กระทำดังกล่าวเป็นพวกเลือดเย็น ไม่มีน้ำใจ

7.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนอรรถประโยชน์ (Cost-utility Analysis: CUA)

การวิเคราะห์ต้นทุนอรรถประโยชน์เป็นการวิเคราะห์ด้วยหลักการเดียวกันกับ CBA เพียงแต่วิธีการคิดมูลค่าของผลประโยชน์แทนที่จะคิดมูลค่าในหน่วยของเงินซึ่งเป็นจุดที่หลายคนไม่ชอบใจ (โดยเฉพาะในโครงการด้านสาธารณสุขซึ่งเกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์เป็นสำคัญ) ไว้ในหน่วยวัดของอรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจ

สมมติว่าฝาแฝดหนึ่งมีสิ่งต่างๆ เหมือนกันทุกประการ ต่างกันเพียงอาชีพ คนหนึ่งเป็นนักวาดภาพโฆษณาในขณะที่อีกหนึ่งเป็นนักเขียน ถ้าทั้งคู่เกิดต้องสูญเสียแขนขวาไปเหมือนกันทุกประการได้กลายเป็นคนพิการไม่มีแขนขวา ถ้าเราให้คนทั้งสองแสดงความรู้สึกต่อฐานะสุขภาพของตนเองด้วยสเกลโดยให้สเกล 0 ถ้าตายและ 1 ถ้ามีสุขภาพดีสมบูรณ์ทุกประการ เราจะพบว่าถึงแม้คนทั้งสองจะเป็นฝาแฝดซึ่งมีอะไรเหมือนกันทุกประการอาจให้สเกลของการที่ต้องเป็นคนพิการแขนขวาด้วนต่างกันได้มาก เพราะความจำเป็นในการใช้แขนขวาหรือมือขวาหรือความสำคัญของแขนขวาของทั้งสองไม่เท่ากัน

ถึงแม้ CUA จะเป็นวิธีที่ค่อนข้างใหม่เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ที่กล่าวถึงแล้วข้างต้น แต่สำหรับโครงการด้านสาธารณสุขนักวิเคราะห์โครงการหลายคนเชื่อกันว่าวิธีการนี้ถ้าได้มีการพัฒนาปรับปรุงไปอย่างต่อเนื่องจะเป็นวิธีการที่น่าพึงพอใจ ทั้งนี้เพราะ CUA เป็นวิธีการเดียวที่จะสามารถรวมเอาความเปลี่ยนแปลงในคุณภาพชีวิต เข้าไว้ในการวิเคราะห์ได้ นักวิเคราะห์โครงการด้านสาธารณสุขจำนวนมากพอใจและยอมรับหน่วยวัดร่วมเชิงคุณภาพนี้มากกว่าหน่วยวัดของเงิน

ความยากในขณะนี้ของวิธี CUA คือในการแปลงผลของโครงการให้อยู่ในหน่วยวัด เชิงคุณภาพดังกล่าว ยังจะต้องการการพัฒนาปรับปรุงต่อไปอีกมาก ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี CUA มักจะสรุปอยู่ในรูปของต้นทุนต่อหนึ่งวันที่มีสุขภาพสมบูรณ์ หรือต้นทุนต่อหนึ่งปีที่มีสุขภาพสมบูรณ์ อันเป็นผลมาจากการดำเนินโครงการหนึ่งๆ การที่จะเลือกใช้วิธีการใดในการวิเคราะห์เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นภายหลังจากการได้ศึกษาถึงลักษณะต่างๆ ของโครงการ และโจทย์หรือคำถามที่ต้องการคำตอบ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้ได้เหมาะสม แต่ไม่ว่าจะเลือกวิธีการประเมินแบบใด การประเมินต้นทุนของโครงการเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

7.2 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ

การที่จะตัดสินใจเลือกดำเนินโครงการใดนั้นต้องมีการเปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์ของแต่ละโครงการ หากโครงการนั้นมีอายุโครงการเพียง 1 ปี การเปรียบเทียบต้นทุนและผลประโยชน์ย่อมทำได้ง่าย แต่โดยทั่วไปแล้วโครงการต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีอายุโครงการยาวนานกว่า 1 ปี รวมทั้งต้นทุนและผลประโยชน์ในแต่ละช่วงปีไม่เท่ากัน จึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรงในแต่ละปี เนื่องจากมูลค่าของต้นทุนและผลประโยชน์ในเวลาที่ต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน

เมื่อเป็นเช่นนั้น ในการเปรียบเทียบโครงการดังกล่าวจึงต้องมีการปรับค่าของต้นทุน (C_t) และผลประโยชน์ (B_t) ที่เกิดขึ้นต่างปีกันให้เป็นค่า ณ ปีใดปีหนึ่งที่เหมือนกัน ซึ่งโดยปกตินิยมคิดให้เป็นมูลค่า ณ ปีปัจจุบัน หรือเรียกว่ามูลค่าปัจจุบัน (Present Value หรือ Present Worth) มูลค่าปัจจุบันจึงหมายถึงมูลค่าของต้นทุนหรือผลประโยชน์จากการดำเนินโครงการที่คาดว่าจะได้รับในอนาคตที่ถูกปรับให้เป็นมูลค่า ณ ปัจจุบัน โดยการปรับมูลค่าในอนาคตลดลงในอัตราหนึ่ง ๆ ต่อปี ซึ่งอัตรานี้เรียกว่าอัตราคิดลด (Discount Rate)[12]

ดังนั้น เมื่อมูลค่าของต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการที่เกิดขึ้นในแต่ละปีตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดโครงการได้รับการปรับให้อยู่ในค่าปัจจุบันแล้ว มูลค่าดังกล่าวก็สามารถที่จะบวก-ลบหรือเปรียบเทียบกันได้ ผลประโยชน์สุทธิที่คิดอยู่ในมูลค่าปัจจุบันแล้วเรียกกันว่า “มูลค่าปัจจุบันสุทธิ” (Net Present Value, NPV หรือ Net Present Worth, NPW) ซึ่งคำนวณได้จากมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิหักลบกับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนสุทธิ ดังแสดงในสมการที่ (7-1)

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \tag{7-1}$$

เมื่อ NPV คือมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)

B_t คือ ผลประโยชน์ของโครงการที่เกิดขึ้นในปี t

C_t คือ ต้นทุนของโครงการที่เกิดขึ้นในปี t

r คือ อัตราคิดลด (Discount Rate)

---

12 ความหมายของอัตราคิดลด (Discount rate) มีอยู่ 2 แนวคิดคือ (1) อัตราชดเชยการบริโภคต่างเวลาของสังคม (Social rate of time preference: SRTP) คือ อัตราเปรียบเทียบความพอใจในการบริโภคของสังคมในอนาคตกับการบริโภคในปัจจุบัน อัตราที่นิยมใช้คืออัตราดอกเบี้ยพันธบัตรรัฐบาลระยะยาว เพราะการที่คนในสังคมกลุ่มหนึ่งยอมถือพันธบัตรฯทั้งๆที่ให้ผลตอบแทนต่ำ แสดงว่า SRTP ของคนกลุ่มนี้ ≤ อัตราผลตอบแทนพันธบัตรรัฐบาล และ (2) อัตราค่าเสียโอกาสของสังคม (Social opportunity cost rate: SOCR) หมายถึง ต้นทุนค่าเสียโอกาสของสังคมในการใช้ทรัพยากรเพื่อโครงการนั้นๆ อัตราที่นิยมใช้คือ อัตราผลตอบแทนของหน่วยลงทุนสุดท้ายในภาคเอกชนก่อนหักภาษี หรืออัตราดอกเบี้ยเงินกู้ต่ำสุด (ลูกค้าชั้นดีที่มีความเสี่ยงต่ำ) ที่หักเงินเฟ้อแล้ว

t คือ ปี (0 แทนปีปัจจุบัน 1 แทนอีก 1 ปีข้างหน้า ตามลำดับ)

ถ้า NPV มีค่าเป็นบวกหมายความว่าผลประโยชน์จากโครงการมีค่ามากกว่าต้นทุนของโครงการ การใช้ทรัพยากรในโครงการนั้นๆก็ให้ผลคุ้มค่าหรือมีกำไร หลักการตัดสินใจคือเลือกโครงการที่ NPV เป็นบวก หรือ มี NPV สูงที่สุด

7.2.1 หลักเกณฑ์ในการเลือกโครงการ

1. มูลค่าประโยชน์สุทธิ (NPV) ถ้า NPV > 0 ยอมรับโครงการ และถ้า NPV < 0 ปฏิเสธโครงการ
2. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return: IRR) คือ อัตราคิดลดที่ทำให้ NPV = 0 ถ้า IRR > r เป็นโครงการที่ดี ถ้า IRR < r เป็นโครงการที่ไม่ดี โดย r คือ ค่าเสียโอกาสของทรัพยากรที่นำมาใช้ในโครงการ
3. อัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C ratio) ถ้า B/C > 1 เป็นโครงการที่ดี ถ้า B/C < 1 ปฏิเสธโครงการ โดยคำนวณได้จากสมการ (7-2)

$$B/\mathrm{C\ ratio} = \sum_{t=0}^{n-1} \frac{B_t}{(1+r)^t} / \sum_{t=0}^{n-1} \frac{C_t}{(1+r)^t} \tag{7-2}$$

แต่อย่างไรก็ตาม ควรให้ความสำคัญกับ NPV เป็นอันดับแรก

เนื่องจากการวิเคราะห์ผลกระทบทางการเงินและผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการต่าง ๆ เป็นการวิเคราะห์ที่ทำก่อนการจัดทำโครงการจริง ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการในลักษณะต่าง ๆ เกิดจากการคาดการณ์อนาคตจากข้อมูลในอดีตด้วยเทคนิควิธีการต่าง ๆ ดังนั้น การคาดการณ์เหล่านั้นย่อมตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานหลายประการ ซึ่งส่งผลต่อความไม่แน่นอนของผลการวิเคราะห์

โดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของผลวิเคราะห์ (Sensitivity Analysis) สำหรับโครงการจะทำบนสมมติฐานที่เชื่อได้ว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุดในอนาคต ซึ่งเรียกกรณีนี้ว่า กรณีฐาน (Base case) หลังจากนั้นจึงจะทดลองเปลี่ยนสมมติฐานที่แตกต่างออกไปบางประการที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต แล้วจึงนำผลการวิเคราะห์ใหม่มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงกับกรณีฐาน ในการทดลองเปลี่ยนสมมติฐานจะทำทีละข้อเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสมมติฐานข้อนั้น เพราะการเปลี่ยนแปลงสมมติฐานครั้งละหลายข้อจะไม่สามารถวิเคราะห์แยกแยะผลกระทบของปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละข้อได้ อย่างไรก็ตาม การทำ Sensitivity Analysis ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงข้อสมมติฐานทุกข้อ ควรจะทำเฉพาะข้อสมมติฐานที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก หรือข้อสมมติฐานที่มีเหตุผลเชื่อได้ว่ามีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้ค่อนข้างสูงในอนาคต

การวิเคราะห์เพื่อทดสอบความอ่อนไหวของผลการศึกษาเมื่อค่าของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์เปลี่ยนไป ซึ่งจะใช้เมื่อกรณีที่ไม่แน่ใจว่าข้อมูลที่มีอยู่มีความแม่นยำเพียงใด เช่น ทดสอบด้วยการแทนค่ากรณีที่ดีที่สุด (Best case scenario) หรือกรณีเลวร้ายสุด (Worst case scenario)

โดยสรุป การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

1. การกำหนดกลุ่มอ้างอิง (referent group)
2. กำหนดทางเลือกที่จะดำเนินการที่เป็นไปได้

3. กำหนดผลกระทบ (ทั้งบวกและลบ) ทางกายภาพที่จะเกิดขึ้นของโครงการ
4. ระบุสิ่งที่จะเกิดขึ้นถ้าไม่มีโครงการดังกล่าว (without project)
5. คาดการณ์ผลกระทบเชิงปริมาณตลอดช่วงอายุโครงการ
6. แปลงผลกระทบทางกายภาพเป็นมูลค่าตัวเงิน
7. คิดลดต้นทุนและประโยชน์ของโครงการให้มาเป็นมูลค่าปัจจุบัน
8. คำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value: NPV)
9. วิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity analysis)
10. เสนอแนะทางเลือกจากผลของ Cost-benefit Analysis

7.3 การประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการ

การศึกษาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางการเงินของโครงการจัดหารถโดยสารไฟฟ้า ใช้เครื่องมือการประเมินทางการเงิน (Financial Appraisal) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนโครงการที่พิจารณาต้นทุนและผลตอบแทนเฉพาะที่เป็นตัวเงิน ในการจัดหารถโดยสารไฟฟ้าในกรณีต่างๆ เทียบกับการจัดหารถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ (NGV) เป็นหลัก โดยในการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินสำหรับโครงการรถโดยสารระบบไฟฟ้า มีกรอบแนวคิดวิธีการประเมิน 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

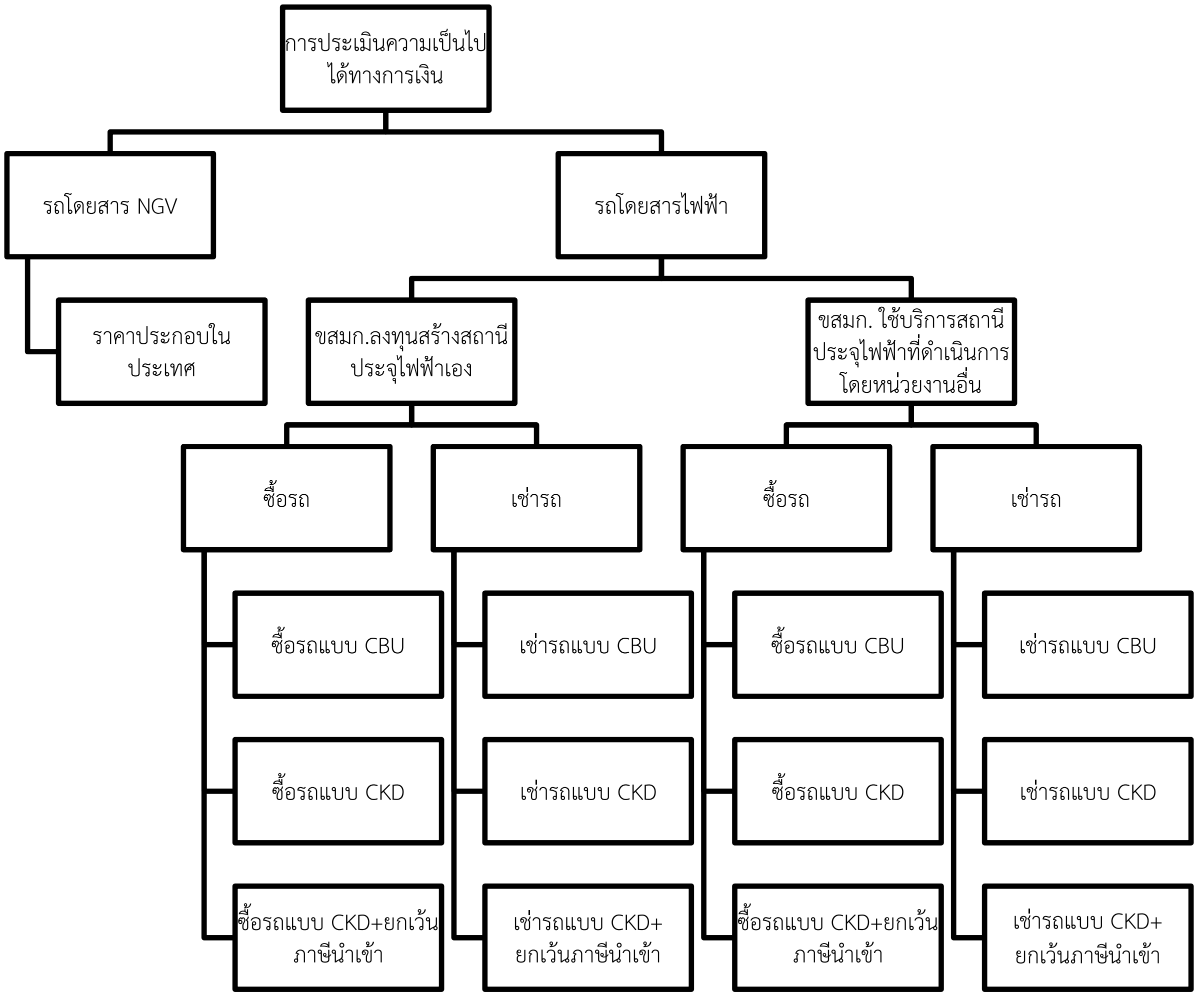
ขั้นตอนที่ 1 ศึกษางานวิจัย สถิติ ข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้อง
ในการประเมินความเป็นไปได้ของโครงการ ใช้ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary data) เป็นหลัก เช่น ต้นทุนและผลตอบแทนจากการเดินรถโดยสาร NGV และรถโดยสารไฟฟ้า โดยศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากเอกสาร บทความ สถิติ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อมูลมาสนับสนุนการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของโครงการ

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินของโครงการ
<u>กรณีฐาน:</u> กำหนดให้การประเมินต้นทุนรถโดยสาร NGV เป็นกรณีฐานเพื่อใช้เปรียบเทียบกับการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า
<u>กรณีทางเลือก:</u> การประเมินต้นทุนรถโดยสารไฟฟ้าเป็นกรณีทางเลือกโดยจะแยกประเมินออกเป็น 2 ระดับ ระดับแรกคือการพิจารณาลักษณะการลงทุนในการก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อราคาไฟฟ้า ระดับที่ 2 คือลักษณะการซื้อรถโดยสารซึ่งมีผลต่อราคาตัวรถโดยสารและต้นทุนการดำเนินการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3) ลักษณะการลงทุนด้านสถานีประจุไฟฟ้าแบ่งเป็น 2 กรณี คือ
   (1) ขสมก.ลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง
   (2) ขสมก. ใช้บริการสถานีประจุไฟฟ้าที่ดำเนินการโดยหน่วยงานอื่น เช่น กฟภ. หรือ กฟน.
4) ลักษณะการซื้อรถโดยสาร แยกย่อยตามวิธีการจัดหารถ 6 กรณี ได้แก่
   (1) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU)
   (2) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD)

(3) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการซื้อ โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD) โดยได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้า
(4) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน (CBU)
(5) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD)
(6) จัดหารถโดยสารปรับอากาศใหม่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการเช่าจากบริษัทเอกชน โดยวิธีนำเข้าชิ้นส่วน มาประกอบในประเทศ (CKD) โดยได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้า

รวมการประเมินต้นทุนรถโดยสารไฟฟ้าทั้งหมด 12 กรณี ดังแสดงได้ดังรูปที่ 7-1 โดยในการศึกษานี้กำหนดให้โครงการมีกรอบระยะเวลา 20 ปี ในการประเมินต้นทุนทั้งหมด



รูปที่ 7-1 ทางเลือกที่ทำการประเมินความเป็นไปได้ทางการเงินในการจัดซื้อรถโดยสาร

การประเมินผลประโยชน์ของแต่ละกรณีจะวิเคราะห์จากรายได้จากค่าโดยสารที่เป็นมูลค่าตลาด จากนั้น การประเมินผลของโครงการในแต่ละทางเลือกจะประเมินผ่านดัชนีชี้วัดทางการเงิน 3 แบบ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิทางการเงิน (Financial Net Present Value: FNPV) อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุนทางการเงิน (Financial Benefit-Cost Ratio: FB/C) และอัตราผลตอบแทนทางการเงินภายในโครงการ (Financial Internal Rate of Return: FIRR)

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงการ (Sensitivity Analysis)
ในการวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงการ เบื้องต้นเลือกตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลง 2 กรณีคือ กรณีที่ราคาพลังงานมีการเปลี่ยนแปลง (เพิ่ม/ลด) และกรณีที่ราคารถมีการเปลี่ยนแปลง (เพิ่ม/ลด)

7.4 การประเมินต้นทุนทางการเงิน

ต้นทุนทางการเงินในการซื้อรถโดยสารที่ใช้ไฟฟ้าหรือ NGV ของ ขสมก. สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ต้นทุนคงที่หรือค่าใช้จ่ายในการลงทุน และต้นทุนผันแปรหรือค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของโครงการ นั่นคือ

ต้นทุนรวม = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน + ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

1) ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) เป็นต้นทุนซึ่งเกิดขึ้นในปีเริ่มต้นโครงการ เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนครั้งแรก (Investment cost) เพื่อซื้อรถโดยสารและ/หรือก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้า การจัดซื้อสินทรัพย์ถาวร หรือค่าใช้จ่ายอื่นที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการก่อสร้าง โดยจะไม่ลงทุนเพิ่มตลอดอายุโครงการ
2) ต้นทุนผันแปร (Variable cost) หรือค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน เป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามการดำเนินงาน
    - ค่าเชื้อเพลิง
    - ค่าซ่อมบำรุง
    - ค่าแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้า
    - ค่าภาษีรถประจำปี
    - เงินเดือนพนักงาน
    - ค่าเช่าอุปกรณ์ระบบ GPS และ E-ticket
    - ค่าเช่ารถโดยสาร

(1) ต้นทุนตัวรถโดยสาร

จากข้อมูลราคารถโดยสารขนาดที่ ขสมก. ได้มีการจัดซื้อ พบว่า รถโดยสารที่ใช้ NGV มีราคาต่ำกว่าราคาของรถโดยสารไฟฟ้าที่ประมาณค่าโดยกระทรวงคมนาคม (2558) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ ราคารถนำเข้ารวมภาษี ราคารถแบบประกอบในประเทศ และราคารถแบบประกอบในประเทศโดยยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วน ดังแสดงในตารางด้านล่าง

ตารางที่ 7-1 ราคารถโดยสารปรับอากาศขนาดใหญ่ (12 เมตร) ในประเทศไทย

ชนิดเชื้อเพลิง	ราคา (ล้านบาท/คัน)
ไฟฟ้า*	นำเข้า/ประกอบในประเทศ/ประกอบในประเทศ ยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วน 15.00/12.00/10.00
NGV**	3.549

หมายเหตุ: * กระทรวงคมนาคม, 2558[13]

** ขสมก., ผลการประกวดราคาโครงการจัดซื้อรถโดยสารปรับอากาศใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ NGV จำนวน 489 คัน ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ (ครั้งที่ 3), 2558[14]

(2) ค่าต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

อ้างถึง **ตารางที่ 6-10** ต้นทุนการก่อสร้างอาคารสถานีอัดประจุแบตเตอรี่และระบบไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าจำนวน 50 คัน มีต้นทุนรวมที่ 67,053,800 บาทต่อสถานี

(3) ค่าเชื้อเพลิง/ค่าพลังงานไฟฟ้า

จากสถิติอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ปี 2554-2558 มีค่าเฉลี่ยคือ 1.59 กม./กก. (ตารางที่ 7-2) ส่วนรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้ไฟฟ้ามีผลการทดสอบของ ขสมก. ในโครงการการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า (2558) โดยใช้รถโมเดล BYD-K9 แบบ In wheel motor ขนาดกำลังไฟฟ้า 180 kW @ 6,000 รอบ ทดลองวิ่งในเส้นทางสาย 511, 141, 63 พบว่ามีอัตราสิ้นเปลืองไฟฟ้าคือ 0.88 กม./กิโลวัตต์-ชม. (1.14 กิโลวัตต์-ชม./กม.)

ตารางที่ 7-2 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ขสมก. (ข้อมูล ณ วันที่ 1 เดือนตุลาคม พ.ศ.2554 ถึงวันที่ 30 เดือนกันยายน พ.ศ.2558)

(กม./กก.)

ปี	เขต 1*	เขต 1**	เขต 2*	เขต 3*	เขต 5**	เขต 5*	เฉลี่ย
2554	1.61		-	-	-	-	**1.59**
2555	1.41		-	-	1.94	-	
2556	1.57	1.46	1.33	-	1.85	1.72	
2557	1.43	1.49	-***	-	1.82	1.75	
2558	1.37	1.52	1.41	1.62	1.83	1.73	
เฉลี่ย	**1.48**	**1.49**	**1.37**	**1.62**	**1.86**	**1.73**	

หมายเหตุ: *รถโดยสารปรับอากาศ GAS

**รถโดยสารปรับอากาศ PBC

***ไม่มีข้อมูล

ที่มา: ขสมก. 2554-2558

[13] สำนักงานปลัดกระทรวงคมนาคม. (2558) รายงานผลการศึกษา คณะทำงานศึกษาความเหมาะสมของระบบเชื้อเพลิงสำหรับรถโดยสารองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำนวน 2,694 คัน.

[14] ขสมก. (2558) รถประจำการขององค์การ ณ 31 ธันวาคม 2558

ตารางที่ 7-3 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้ไฟฟ้า

สาย	ระยะทางทดลองวิ่ง (กม.)	อัตราสิ้นเปลือง (กิโลวัตต์-ชม./กม.)
511	5.5	1.25
141	25	0.98
63	17	1.18
เฉลี่ย		**1.14**

ที่มา: ขสมก., 2558[15]

(4) ค่าซ่อมบำรุง

การซ่อมบำรุงรถของ ขสมก. ส่วนใหญ่จะทำสัญญาจ้างเหมาซ่อมกับบริษัทขายรถ โดยเป็นการเหมาทั้งค่าแรงและค่าอะไหล่ โดยบริษัทผู้ซ่อมมีภาระผูกพันในการรับประกันสภาพรถต้องสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น ถ้ารถโดยสารของ ขสมก. ที่บริษัทของตนรับผิดชอบถูกจับเรื่องควันดำ บริษัทฯจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าปรับนั้น นอกจากจ้างเหมาแล้ว รถของ ขสมก. อีกส่วนหนึ่งจะถูกดูแลรักษาโดยฝ่ายซ่อมบำรุงของ ขสมก. เอง จากราคากลางสำหรับซ่อมบำรุงรถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติของ ขสมก. (2558) มีต้นทุนในช่วง 5 ปีแรก (ระยะรับประกัน) อยู่ที่ 925 บาท/คัน/วัน และปีที่ 6 -10 เฉลี่ยปีละ 1,635 บาท/คัน/วัน ในส่วนของรถโดยสารปรับอากาศที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ที่ปรึกษาได้ประเมินค่าซ่อมบำรุงประมาณร้อยละ 65 ของค่าซ่อมบำรุงรถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน นอกจากนี้ยังมีค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าทุก 10 ปี ประมาณร้อยละ 40 ของราคารถไฟฟ้า ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7-4 ค่าซ่อมบำรุง

ชนิดของรถ	ชนิดเชื้อเพลิง	ค่าซ่อมบำรุงประจำปี	ค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่ (ทุก 10ปี)
ปรับอากาศ	ไฟฟ้า*	601 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 1-5) 1,063 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 6-10)	4.8 ล้านบาท
	NGV**	925 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 1-5) 1,635 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 6-10)	-

หมายเหตุ: * http://www.greencarreports.com/news/1080925_electric-car-maintenance-a-third-cheaper-than-combustion-vehicles

**ขสมก. (2558)[16]

(5) ค่าภาษีรถประจำปี

รัฐบาลได้มีนโยบายผลักดันการใช้ก๊าซธรรมชาติ (NGV) แทนการใช้น้ำมันดีเซลโดยใช้มาตรการต่างๆ รวมถึงทางด้านภาษี กล่าวคือ รถโดยสารของ ขสมก. ที่ใช้ NGV จะเสียภาษีประจำปีเพียง 1,450 บาท/คัน/ปี ขณะที่รถโดยสารที่ใช้น้ำมันดีเซลแบบเดิมต้องเสียภาษีประจำปีเท่ากับ 2,900 บาท/คัน/ปี นอกจาก NGV แล้วที่ได้รับการลดหย่อนภาษี รถโดยสารไฟฟ้าก็เป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่สามารถทดแทนดีเซลได้อย่างยั่งยืน อีกทั้งให้ประโยชน์ด้านอื่นแก่สังคม ดังนั้น ที่ปรึกษาใช้สมมติฐานให้รถโดยสารไฟฟ้าจ่ายภาษีรถประจำปีเท่ากับรถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ คือ 1,450 บาท/คัน/ปี

---

[15] ขสมก. (2558) โครงการการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า

[16] ขสมก. (2558) ราคากลางสำหรับซ่อมบำรุงรถโดยสารที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ 489 คัน

(6) เงินเดือนพนักงานขับรถ

กำหนดให้ตำแหน่งพนักงานขับรถได้รับเงินเดือนเริ่มต้นคือ 10,150 บาท มีค่าครองชีพ ค่าเบี้ยเลี้ยง ค่าล่วงเวลา สวัสดิการ รวมเป็นเดือนละ 19,457 บาท ทั้งนี้เงินเดือนจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 6.5 ต่อปี และจะได้รับค่าครองชีพเฉพาะกรณีที่เงินเดือนไม่เกิน 12,000 บาทต่อเดือนเท่านั้น ส่วนรายได้รายการอื่นๆ กำหนดให้มีค่าคงที่

ตารางที่ 7-5 รายได้ตำแหน่งพนักงานขับรถ

เงินเดือน	เบี้ยเลี้ยง	ค่าครองชีพ	เปอร์เซ็นต์	เบี้ยขยัน	ค่าล่วงเวลา	สวัสดิการ	รวม
10,150	1,300	1,500	567	150	2,537	3,253	19,457

ที่มา: ขสมก. (2558)

(7) ค่าเช่าอุปกรณ์ระบบ GPS และ E-ticket

ในรถโดยสารปรับอากาศรุ่นใหม่ที่ ขสมก. จะซื้อเพิ่ม กำหนดให้ใช้ระบบ GPS และ E-ticket แทนพนักงานเก็บเงินค่าโดยสาร โดยมีค่าเช่าตามราคากลางที่กำหนดไว้ คือ 4,300 และ 9,125 บาทต่อเดือน ตามลำดับ และกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดระยะเวลาโครงการ

(8) ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

กำหนดให้ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงสถานีอัดประจุแบตเตอรี่มีค่าร้อยละ 5 และ 10 ของต้นทุนคงที่ในการลงทุนสร้างสถานีในช่วง 10 ปีแรก และ 10 ปีหลัง ตามลำดับ

(9) เงินเดือนพนักงานประจำสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

กำหนดให้แต่ละสถานี มีพนักงานประจำทั้งหมด 8 คน รายละเอียดดังตารางด้านล่าง และกำหนดให้เงินเดือนเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.5 ต่อปี

ตารางที่ 7-6 อัตรากำลังคนประจำสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

ตำแหน่ง	จำนวน (คน)	เงินเดือนเริ่มต้น (บาท/เดือน)	เงินเดือนรวม (บาท/เดือน)
หัวหน้าวิศวกร	1	35,000	35,000
วิศวกร	1	25,000	25,000
ช่างเทคนิค	2	20,000	40,000
คนงาน	4	15,000	60,000
รวม	**8**		**160,000**

(10) ค่าเช่ารถโดยสาร

เนื่องจากรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้านั้นยังไม่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ในการประเมินต้นทุนค่าเช่ารถโดยสาร ที่ปรึกษากำหนดให้ต้นทุนค่าเช่าเท่ากับต้นทุนในกรณีซื้อรถโดยสารไฟฟ้าด้วยวิธีต่างๆ รวมต้นทุนการซ่อมบำรุง การเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ปีที่ 10 ค่าภาษีรถประจำปี และต้นทุนในการบริหารจัดการและกำไรของบริษัทเอกชนอีกร้อยละ 30

7.5 ด้านผลตอบแทนทางการเงิน

ผลตอบแทนทางการเงินหมายถึง รายรับจากการจำหน่ายผลผลิตของโครงการโดยตรง ในที่นี้กำหนดให้ผลตอบแทนของโครงการประกอบด้วยรายได้จากค่าโดยสารและค่าซากของรถโดยสาร รายได้จากค่าโดยสารแสดงได้ดังตารางด้านล่างนี้ รายได้อื่นๆรวมไปถึงรายได้จากการจำหน่ายคูปอง-ตั๋วล่วงหน้า การจำหน่ายบัตรเดือน รายได้ครอบครัวสุขสันต์ รายได้จาการให้เช่ารถเหมา รวมปี ละ 165,272 บาท/คัน/ปี หรือ 459 บาท/คัน/วัน นอกจากนี้ กำหนดให้มูลค่าซาก ณ ปีที่ (t) = มูลค่ารถ/$(1+10\%)^t$

ตารางที่ 7-7 รายได้ต่อคัน

รายการ	รายได้ (บาท/คัน/วัน)
รายได้ค่าโดยสาร	5,700
รายได้อื่นๆ	459
รวม	6,159

หมายเหตุ: *ข้อมูลจาก ขสมก. 2558

7.6 สมมติฐาน

สมมติฐานการประเมินความเป็นไปได้ทางด้านการเงินของโครงการ สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 7-8 สมมติฐานในการประเมิน

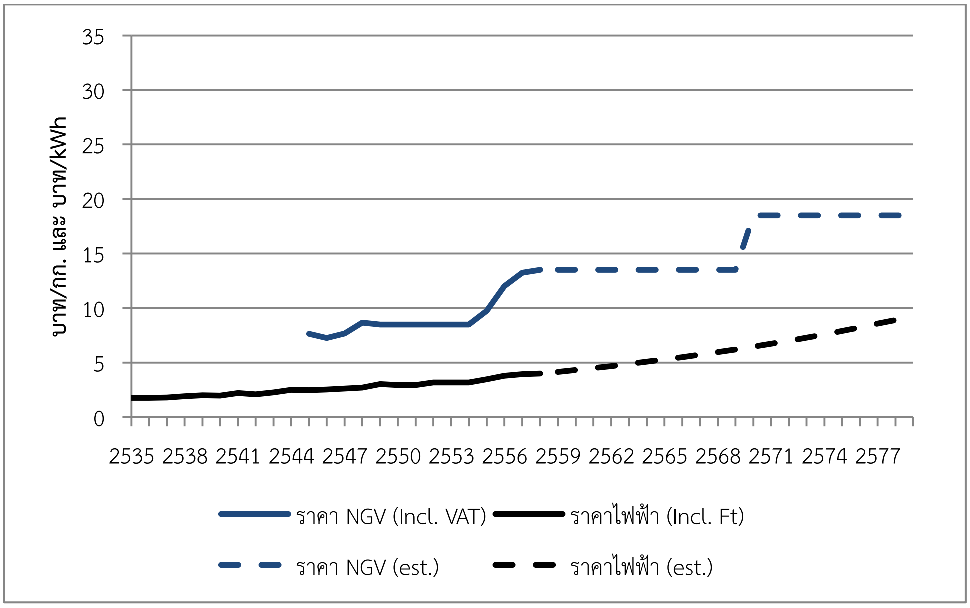
รายการ	รถโดยสาร NGV	รถโดยสารไฟฟ้า
ราคารถ (บาท/คัน)	3.549 ล้านบาท	CBU 15.0 ล้านบาท CKD 12.0 ล้านบาท CKD +ยกเว้นภาษีนำเข้า 10.0 ล้านบาท
ค่าเช่ารถ (บาท/คัน/ปี)	-	เช่ารถในอัตราต้นทุนซื้อรถ ค่าซ่อมบำรุง ค่าแบตเตอรี่ ค่าภาษีประจำปี รวมต้นทุนบริหารจัดการ และกำไรของบริษัทร้อยละ 30 CBU 2.54 ล้านบาท CKD 2.18 ล้านบาท CKD +ยกเว้นภาษีนำเข้า 1.94 ล้านบาท
ค่าพลังงาน (บาท/หน่วย)	13.50 บาท/กก.	1) ขสมก.ลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง และรับซื้อไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย 2) ขสมก. ใช้บริการสถานีประจุไฟฟ้าของผู้ให้บริการไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย
อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	1.59 กม./กก.	0.88 กม./หน่วย
ระยะวิ่งทำการ (กม./วัน)	280	
จำนวนวันทำการ (วัน/ปี)	365	
ค่าซ่อมบำรุง	925 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 1-5) 1,635 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 6-20)	601 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 1-5) 1,063 บาท/คัน/วัน (ปีที่ 6-20)
ค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่ (รถโดยสารไฟฟ้า) ณ ปีที่ 10	-	4.8 ล้านบาท
ค่าภาษีรถประจำปี	1,450 บาทต่อปี	
เงินเดือนพนักงานขับรถ	19,457 บาทต่อเดือน	

รายการ	รถโดยสาร NGV	รถโดยสารไฟฟ้า
ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket (บาท/เดือน)	4,300 และ 9,125 บาทต่อเดือน	
รายได้เฉลี่ยต่อคัน	6,159 บาทต่อวัน	

โดยช่วงเวลาที่ทำการวิเคราะห์ เท่ากับ 20 ปี (ปี 2559-2579) และอัตราส่วนคิดลด (Discount rate) เท่ากับร้อยละ 6.85 ต่อปี[17]

- **ราคาพลังงาน** จากการทบทวนราคาเฉลี่ยก๊าซ NGV และไฟฟ้าระหว่างปี พ.ศ. 2548 – 2558 (ย้อนหลัง 10 ปี) พบว่า ราคาเฉลี่ยของพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยราคาเฉลี่ยก๊าซ NGV มีการเปลี่ยนแปลงราคาต่อหน่วยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.5 ต่อปี ส่วนราคาไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.1 ต่อปี

  สำหรับการคาดการณ์ราคาพลังงานในอนาคต ระหว่างปี พ.ศ.2559-2579 (คาดการณ์ 20 ปี) คาดการณ์ในปี 2559 ราคาก๊าซ NGV อยู่ที่ 13.50 บาท/กก. และเพิ่มขึ้น 5 บาท ทุก 10 ปี ส่วนราคาไฟฟ้า อยู่ที่ 3.13 บาท/หน่วย [18]เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.1 ต่อปี ในปี พ.ศ.2579 ราคาก๊าซ NGV และ ไฟฟ้า จะมีราคาเป็น 18.50 บาท/กก. และ 6.99 บาท/หน่วย ตามลำดับ



ที่มา วิเคราะห์จากข้อมูล สนพ.(2559)

รูปที่ 7-2 สมมติฐานราคาของเชื้อเพลิง NGV และค่าไฟฟ้าในอนาคต

[17] อ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ยลูกค้ารายใหญ่ชั้นดี (MLR) ของธนาคารกรุงศรีอยุธยา ณ วันที่ 1 ก.พ. 2559

[18] กฟน. (2559) ราคาไฟฟ้าแบบ TOU แรงดันไฟฟ้า 12-24 kVA ราคา 2.67 บาท/kWh + Ft 0.5 บาท/kWh = 3.13 บาท/kWh

ดังนั้น ในการศึกษานี้ จึงกำหนดให้ราคาก๊าซ NGV คงที่ในระยะ 10 ปี (2559-2569) เพิ่มขึ้น 5 บาท ในปีที่ 11 และคงที่ไปจนจบโครงการ (2570-2579) ส่วนราคาไฟฟ้า เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.1 ต่อปี (ประเมินจากสถิติราคาพลังงาน 10 ปีย้อนหลัง) โดยราคาไฟฟ้า เป็นราคาที่รวมต้นทุนค่าไฟฟ้าที่จ่ายจากการไฟฟ้า รวมต้นทุนการสร้างสถานีประจุไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาสถานี ค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการ และกำไรแล้ว

- **ค่าเช่ารถโดยสารไฟฟ้า** เนื่องจากเป็นธุรกิจที่ยังไม่มีการดำเนินการในประเทศไทยและยังมีใช้งานไม่แพร่หลาย จึงประเมินค่าเช่ารถจากการประเมินต้นทุนของแต่ละกรณี ซึ่งรวมต้นทุนค่าจัดซื้อรถ ค่าซ่อมบำรุง ค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่ และค่าภาษีประจำปี และค่าใช้จ่ายในการบริหารจัดการและกำไรในอัตราร้อยละ 30 โดยให้ค่าเช่าคงที่ตลอด 20 ปี และ ขสมก. จ่ายค่าเช่าล่วงหน้าให้บริษัทแบบรายปี
- **เงินเดือนพนักงานขับรถ**เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.5 ต่อปี[19]
- **รายได้ค่าโดยสารต่อวัน** เพิ่มขึ้นร้อยละ 3 ต่อปี (ผลมาจากการขึ้นราคาค่าโดยสารและการเพิ่มจำนวนผู้โดยสาร) โดยให้ค่าโดยสาร ณ ปีที่ 0 (2559) คือ 5,700 บาท และมีการเพิ่มขึ้นของอัตราค่าโดยสาร ตั้งแต่ปีที่ 1 (2560) ที่อัตราร้อยละ 3 ต่อปี

7.7 การประเมินต้นทุนการเดินรถโดยสารและผลตอบแทน

(1) ต้นทุนตัวรถโดยสาร

ต้นทุนรถโดยสาร = ราคารถโดยสาร*จำนวนรถโดยสาร

(2) ต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่

ต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ = (ต้นทุนอาคารสิ่งปลูกสร้าง + ระบบไฟฟ้า)*จำนวนสถานี

(3) ค่าพลังงาน

การคำนวณต้นทุนค่าเชื้อเพลิงแต่ละชนิดของการให้บริการของ ขสมก. สามารถใช้ข้อมูลที่แสดงในตาราง โดยเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานที่แตกต่างกันซึ่งสะท้อนผ่านระยะทางที่วิ่งได้เมื่อใช้เชื้อเพลิง 1 หน่วย สูตรการคำนวณต้นทุนค่าเชื้อเพลิงแสดงได้ดังนี้

$$FP(t) = \frac{D(t) * \mathrm{Y(t)} * Pi(t)}{Ci(t)} \tag{7-3}$$

โดยที่ FP = ค่าเชื้อเพลิง

D = ระยะวิ่งทำการ (กม./วัน)

Y = จำนวนวันในหนึ่งปีที่รถที่ใช้เชื้อเพลิง i ให้บริการ (วัน/ปี)

P = ราคาตลาดของเชื้อเพลิง (บาท/หน่วย) โดย Pi มีการเพิ่มขึ้นในอัตราปีละ r% หรือ Pi(t) = Pi (0)*(1+r%)$^{(t)}$

C = อัตราการบริโภคเชื้อเพลิง (กม./หน่วย)

i = ชนิดเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วย ไฟฟ้า และ NGV

t = ปี

---

[19] เฉลี่ยจากข้อมูลจากสถิติเงินเดือนของพนักงาน ขสมก.

(4) ค่าซ่อมบำรุง

ค่าซ่อมบำรุง i = จำนวนวันทำการ (วัน/ปี) * ค่าซ่อมเหมาจ่าย (บาท/วัน)

(5) ค่าภาษีรถประจำปี

ค่าภาษีรถประจำปี = ค่าภาษีรถประจำปีตามกฎหมาย

(6) เงินเดือนพนักงานขับรถและพนักงานเก็บค่าโดยสาร

เงินเดือนปีที่ (t) = เงินเดือนปัจจุบัน*$(1+S\%)^t$ โดย S = อัตราเพิ่มขึ้นของค่าโดยสาร 6.5% ต่อปี

(7) รายได้จากค่าโดยสาร

รายได้จากค่าโดยสาร = รายได้ต่อวัน*D*Y*$(1+G\%)^t$ โดย G = อัตราเพิ่มขึ้นของค่าโดยสาร 3% ต่อปี

(8) มูลค่าซาก

คิดมูลค่าซาก ณ ปี ที่ 20 ซึ่งเป็นปีสิ้นสุดโครงการ โดยมูลค่าซาก ณ ปีที่ (t)

= มูลค่ารถ / $(1+10\%)^t$

(9) ค่าเช่ารถ

เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีบริษัทเอกชนใดให้บริการเช่ารถโดยสารไฟฟ้า ดังนั้นในการศึกษาจึงได้วิเคราะห์อัตราค่าเช่ารถคิดจากต้นทุนการจัดซื้อรถและการซ่อมบำรุงรวมถึงภาษีรถประจำปีจากกรณีซื้อรถรูปแบบต่างๆ โดยจะคำนวณหามูลค่าปัจจุบัน (PV) ของต้นทุนการจัดซื้อและซ่อมบำรุง แล้วนำมาหาต้นทุนตลอด 20 ปี แล้วจึงนำมาคิดรวมกับต้นทุนบริหารจัดการและกำไรร้อยละ 30 เพื่อเป็นต้นทุนต่อปีของบริษัทให้เช่า รายละเอียดแสดงได้ดังนี้

$$FV_{\text{ต้นทุนต่อปี}} = \frac{PV \times \frac{1}{(1+R)^t - 1}}{i(1+R)^t} \times 1.3 \qquad (7\text{-}4)$$

เมื่อ $PV = FV/(1+R)^t$

PV = มูลค่าปัจจุบัน

FV = มูลค่าในอนาคต

R = *discount rate*

(10) ผลประโยชน์สุทธิ (Net benefit)

ผลประโยชน์สุทธิ = ผลประโยชน์รวม – ต้นทุนรวม

โดย ผลประโยชน์รวม = รายได้จากค่าโดยสาร + มูลค่าซาก และ ต้นทุนรวม = ต้นทุนรถโดยสาร + ค่าพลังงาน + ค่าซ่อมบำรุง + ค่าภาษีรถประจำปี + เงินเดือนพนักงาน

(11) การคำนวณค่าดัชนีชี้วัดทางด้านการเงิน

การคำนวณหา NPV และ IRR ใช้ตามสมการ (1) และ B/C Ratio ตามสมการ (2) ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 2 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการ

7.8 ผลการประเมินโครงการ

7.8.1 การวิเคราะห์ด้านต้นทุนและผลตอบแทน

การวิเคราะห์ต้นทุนคงที่ ได้แก่ ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศและต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ ในส่วนต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ พบว่าการจัดซื้อรถโดยสาร NGV มีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าในทุกกรณี

ตารางที่ 7-9 ต้นทุนคงที่

(ล้านบาท)

รายการ	รถโดยสาร NGV	กรณีซื้อรถโดยสารไฟฟ้า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ	709.80	3,000.00	2,400.00	2,000.00
ต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่	0.00	268.22	268.22	268.22

การวิเคราะห์ต้นทุนแปรผันหรือค่าใช้จ่าย แบ่งเป็นด้านรถโดยสารและด้านสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ โดยต้นทุนแปรผันของรถโดยสาร ประกอบด้วย ค่าพลังงาน ค่าซ่อมบำรุง ค่าแบตเตอรี่สำหรับรถโดยสารไฟฟ้า ค่าภาษีรถประจำปี เงินเดือนพนักงานขับรถ ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket รวมไปถึงค่าเช่ารถโดยสารไฟฟ้า (กรณีเช่า) ส่วนต้นทุนแปรผันของสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ ประกอบด้วย ค่าซ่อมบำรุง และเงินเดือนพนักงานประจำสถานี

ตัวอย่างค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดโครงการของการจัดซื้อรถโดยสาร NGV การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า และการเช่ารถโดยสารไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 7-10 ถึง ตารางที่ 7-13

ในกรณี NGV (ตารางที่ 7-10) ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถโดยสารจำนวนทั้งหมด 200 คัน มีค่าการใช้พลังงานทั้งหมดปีละ 173.55 ล้านบาท มีค่าซ่อมบำรุงปีละ 67.53 ล้านบาท ภาษีรถประจำปี 290,000 บาท เงินเดือนพนักงานประจำรถ 46.70 ล้านบาท และค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket 32.22 ล้านบาท[20] รวมค่าใช้จ่ายในปีที่ 1 ทั้งหมด 320.28 ล้านบาท และค่าใช้จ่ายดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นทุกปีตามสมมติฐานที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 7.6 ซึ่งในปีที่ 20 จะมีค่าใช้จ่ายเป็น 456.80 บาทต่อปี รวมตลอดอายุโครงการ 20 ปีจะมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 8,219.62 ล้านบาท

ในลักษณะเดียวกับกรณีรถโดยสาร NGV การคำนวณค่าใช้จ่ายกรณีรถโดยสารไฟฟ้าที่สมมติให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.13 บาทต่อหน่วย แสดงได้ดังตารางที่ 7-11 โดยตลอดทั้งโครงการในระยะเวลา 20 ปี มีค่าการใช้พลังงานทั้งหมดปีละ 2,277.44 ล้านบาท มีค่าซ่อมบำรุงปีละ 1,383.17 ล้านบาท ค่าแบตเตอรี่ 960 ล้านบาท (เกิดขึ้น ณ ปีที่ 10) ภาษีรถประจำปี 5.8 ล้านบาท เงินเดือนพนักงานประจำรถ 1,327.76 ล้านบาท และค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket 644.40 ล้านบาท สรุปรวมมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 6,598.57 ล้านบาท

นอกจากค่าใช้จ่ายของรถโดยสารไฟฟ้าแล้ว ในกรณีที่ดำเนินการสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของสถานีประจุไฟฟ้าเพิ่มเติม ซึ่งเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับสถานีประจุไฟฟ้าทั้งหมด 4 สถานี จะมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ 20 ปีประกอบด้วย ค่าดำเนินการและซ่อมบำรุงทั้งหมด 402.32 ล้านบาท เงินเดือนพนักงานประจำสถานี 317.56 ล้านบาท สรุปมีค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด 719.88 ล้านบาท ดังแสดงในตารางที่ 7-12

---

[20] สมมติให้ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket เริ่มเกิดขึ้นในปีที่ 0 ซึ่งถือว่าเป็นค่าใช้จ่ายล่วงหน้าก่อนใช้งานระบบ และสิ้นสุดในปีที่ 19 รวมระยะเวลาเช่าทั้งหมด 20 ปี

ในกรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้าที่สมมติให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.13 บาทต่อหน่วย แสดงได้ดังตารางที่ 7-13 โดยตลอดทั้งโครงการในระยะเวลา 20 ปี มีค่าเช่ารถ 10,165.75 ล้านบาท[21] ค่าการใช้พลังงานทั้งหมดปีละ 1,2177.28 ล้านบาท เงินเดือนพนักงานประจำรถ 1,327.76 ล้านบาท และค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket 644.40 ล้านบาท สรุปรวมมีค่าใช้จ่ายทั้งหมด 14,415.34 ล้านบาท และหากมีการลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง ก็จะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในส่วนนี้เป็นไปดังแสดงในตารางที่ 7-12

ตารางที่ 7-10 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การจัดซื้อรถโดยสาร NGV

(ล้านบาท)

ปีที่	ค่าพลังงาน	ค่าซ่อมบำรุง	ภาษีรถประจำปี	เงินเดือนพนักงานประจำรถ	ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม
0	0.00	0.00	0.00	0.00	32.22	32.22
1	173.55	67.53	0.29	46.70	32.22	320.28
2	173.55	67.53	0.29	48.28	32.22	321.86
3	173.55	67.53	0.29	46.37	32.22	319.95
4	173.55	67.53	0.29	48.16	32.22	321.75
5	173.55	67.53	0.29	50.08	32.22	323.66
6	173.55	119.36	0.29	52.11	32.22	377.53
7	173.55	119.36	0.29	54.28	32.22	379.70
8	173.55	119.36	0.29	56.59	32.22	382.01
9	173.55	119.36	0.29	59.05	32.22	384.47
10	173.55	119.36	0.29	61.67	32.22	387.09
11	237.82	119.36	0.29	64.47	32.22	454.15
12	237.82	119.36	0.29	67.44	32.22	457.13
13	237.82	119.36	0.29	70.60	32.22	460.29
14	237.82	119.36	0.29	73.97	32.22	463.66
15	237.82	119.36	0.29	77.57	32.22	467.25
16	237.82	119.36	0.29	81.39	32.22	471.08
17	237.82	119.36	0.29	85.46	32.22	475.15
18	237.82	119.36	0.29	89.80	32.22	479.49
19	237.82	119.36	0.29	94.42	32.22	484.11
20	237.82	119.36	0.29	99.34	0.00	456.80
รวม	**4,113.71**	**2,127.95**	**5.80**	**1,327.76**	**644.40**	**8,219.62**

[21] สมมติให้ค่าเช่ารถได้รวมค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุง ภาษีประจำปี และค่าการเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถโดยสารแล้ว

ตารางที่ 7-11 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า ณ ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย

(ล้านบาท)

ปีที่	ค่าพลังงาน	ค่าซ่อมบำรุง	ค่าแบตเตอรี่	ภาษีรถประจำปี	เงินเดือนพนักงานประจำรถ	ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.22	32.22
1	75.69	43.89	0.00	0.29	46.70	32.22	198.79
2	78.79	43.89	0.00	0.29	48.28	32.22	203.47
3	82.02	43.89	0.00	0.29	46.37	32.22	204.79
4	85.39	43.89	0.00	0.29	48.16	32.22	209.95
5	88.89	43.89	0.00	0.29	50.08	32.22	215.37
6	92.53	77.58	0.00	0.29	52.11	32.22	254.73
7	96.33	77.58	0.00	0.29	54.28	32.22	260.70
8	100.28	77.58	0.00	0.29	56.59	32.22	266.96
9	104.39	77.58	0.00	0.29	59.05	32.22	273.53
10	108.67	77.58	960.00	0.29	61.67	32.22	1,240.43
11	113.12	77.58	0.00	0.29	64.47	32.22	287.68
12	117.76	77.58	0.00	0.29	67.44	32.22	295.29
13	122.59	77.58	0.00	0.29	70.60	32.22	303.28
14	127.61	77.58	0.00	0.29	73.97	32.22	311.67
15	132.85	77.58	0.00	0.29	77.57	32.22	320.51
16	138.29	77.58	0.00	0.29	81.39	32.22	329.77
17	143.96	77.58	0.00	0.29	85.46	32.22	339.51
18	149.87	77.58	0.00	0.29	89.80	32.22	349.76
19	156.01	77.58	0.00	0.29	94.42	32.22	360.52
20	162.41	77.58	0.00	0.29	99.34	0.00	339.62
รวม	2,277.44	1,383.17	960.00	5.80	1,327.76	644.40	6,598.57

ตารางที่ 7-12 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ สถานีอัดประจุแบตเตอรี่

(ล้านบาท)

ปีที่	ค่าดำเนินการและซ่อมบำรุง	เงินเดือนพนักงานประจำสถานี	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม (บาท)
0	0.00	0.00	0.00
1	13.41	8.18	21.59
2	13.41	8.71	22.12
3	13.41	9.28	22.69
4	13.41	9.88	23.29
5	13.41	10.52	23.93
6	13.41	11.21	24.62
7	13.41	11.93	25.35
8	13.41	12.71	26.12
9	13.41	13.54	26.95
10	13.41	14.42	27.83
11	26.82	15.35	42.18
12	26.82	16.35	43.17
13	26.82	17.41	44.24
14	26.82	18.55	45.37
15	26.82	19.75	46.57
16	26.82	21.04	47.86
17	26.82	22.40	49.22
18	26.82	23.86	50.68
19	26.82	25.41	52.23
20	26.82	27.06	53.88
รวม	402.32	317.56	719.88

ตารางที่ 7-13 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า ณ ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย

(ล้านบาท)

ปีที่	ค่าเช่ารถ	ค่าพลังงาน	เงินเดือนพนักงานประจำรถ	ค่าเช่าระบบ GPS และ E-ticket	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการรวม
0	508.29	0.00	0.00	32.22	540.51
1	508.29	75.69	46.70	32.22	662.90
2	508.29	78.79	48.28	32.22	667.58
3	508.29	82.02	46.37	32.22	668.90
4	508.29	85.39	48.16	32.22	674.06
5	508.29	88.89	50.08	32.22	679.47
6	508.29	92.53	52.11	32.22	685.15
7	508.29	96.33	54.28	32.22	691.12
8	508.29	100.28	56.59	32.22	697.38
9	508.29	104.39	59.05	32.22	703.95
10	508.29	108.67	61.67	32.22	710.85
11	508.29	113.12	64.47	32.22	718.10
12	508.29	117.76	67.44	32.22	725.71
13	508.29	122.59	70.60	32.22	733.70
14	508.29	127.61	73.97	32.22	742.10
15	508.29	132.85	77.57	32.22	750.92
16	508.29	138.29	81.39	32.22	760.19
17	508.29	143.96	85.46	32.22	769.93
18	508.29	149.87	89.80	32.22	780.17
19	508.29	156.01	94.42	32.22	790.93
20	0.00	162.41	99.34	0.00	261.74
รวม	**10,165.75**	**2,277.44**	**1,327.76**	**644.40**	**14,415.34**

การวิเคราะห์ผลตอบแทนหรือรายได้ของโครงการ ประกอบด้วย รายได้จากค่าโดยสาร และมูลค่าซาก ณ ปีที่ 20 ตารางที่ 7-14 แสดงประมาณการรายได้จากค่าโดยสารซึ่งเท่ากันในทุกกรณี ส่วนรายได้อื่นๆรวมไปถึงรายได้จากการจำหน่ายคูปอง-ตั๋วล่วงหน้า การจำหน่ายบัตรเดือน รายได้ครอบครัวสุขสันต์ รายได้จากการให้เช่ารถเหมา รวมปี ละ 167,568 บาท/คัน/ปี และมูลค่าซาก ณ ปีที่ 20 ของรถโดยสาร NGV 105.51 ล้านบาท รถโดยสารไฟฟ้า (การจัดซื้อแบบ CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า) 297.29 ล้านบาทและสถานีอัดประจุไฟฟ้า 39.97 ล้านบาท

ตารางที่ 7-14 ประมาณการรายได้จากการเดินรถโดยสารของโครงการ

(ล้านบาท)

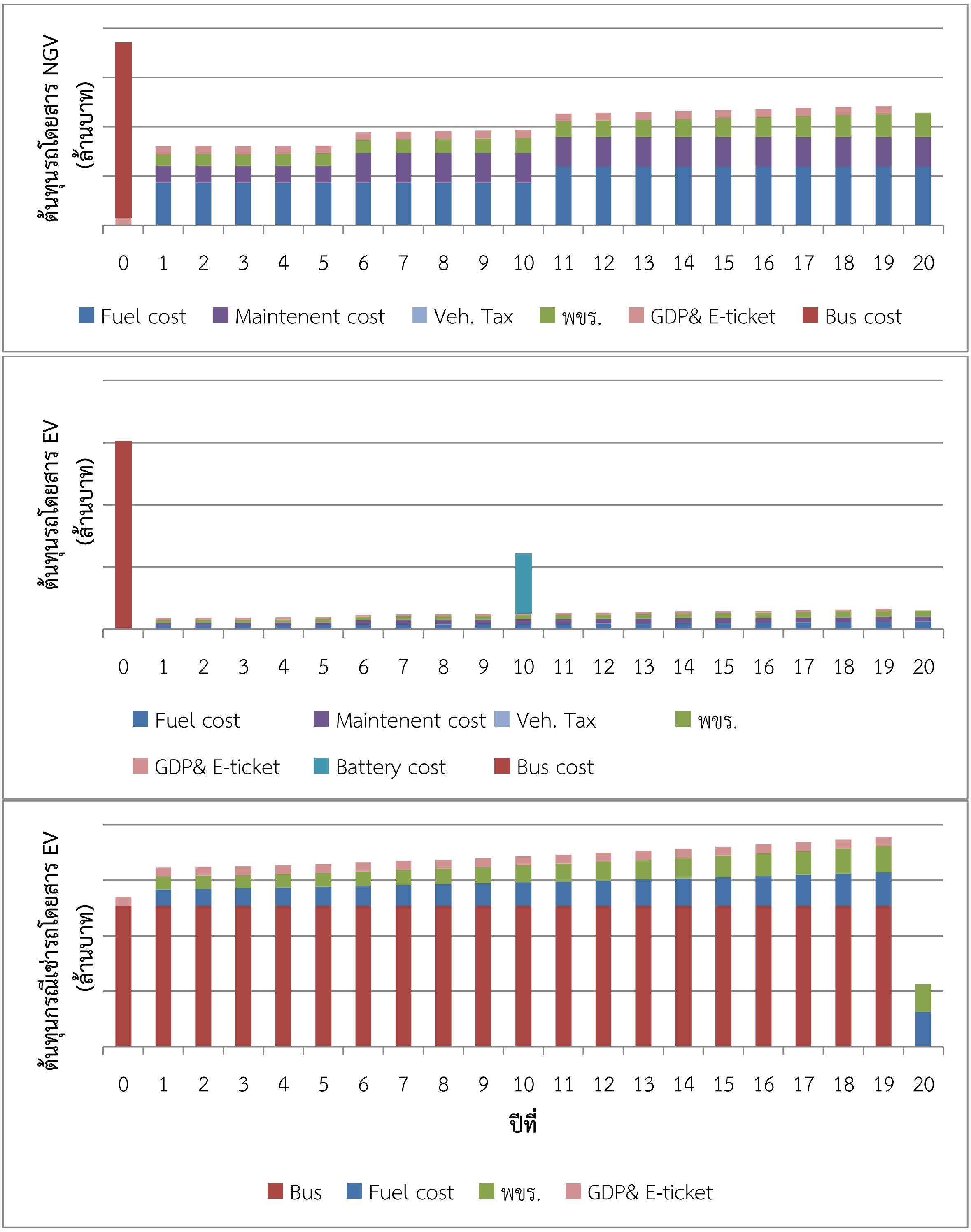
ปีที่	รายได้จากค่าโดยสาร	รายได้อื่นๆ	รวม
0	0.00	0	0.00
1	428.58	33.51	462.10
2	441.44	33.51	474.95
3	454.68	33.51	488.20
4	468.32	33.51	501.84
5	482.37	33.51	515.89
6	496.85	33.51	530.36
7	511.75	33.51	545.26
8	527.10	33.51	560.62
9	542.92	33.51	576.43
10	559.20	33.51	592.72
11	575.98	33.51	609.49
12	593.26	33.51	626.77
13	611.06	33.51	644.57
14	629.39	33.51	662.90
15	648.27	33.51	681.78
16	667.72	33.51	701.23
17	687.75	33.51	721.26
18	708.38	33.51	741.90
19	729.63	33.51	763.15
20	751.52	33.51	785.40
รวม	**11,516.19**	**670.27**	**12,186.46**

ในการจัดหารถโดยสารไฟฟ้าระหว่างการซื้อกับการเช่าก็มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและเงินเดือนพนักงานประจำรถเท่ากัน แตกต่างกันที่ค่าซ่อมบำรุง (รวมค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถโดยสารไฟฟ้า ณ ปีที่ 10) ค่าภาษีรถประจำปี และค่าเช่ารถ เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดซื้อรถโดยสาร NGV ก็พบว่าต้นทุนแปรผันของการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าต่ำกว่าของรถโดยสาร NGV และการเช่ารถโดยสารไฟฟ้า

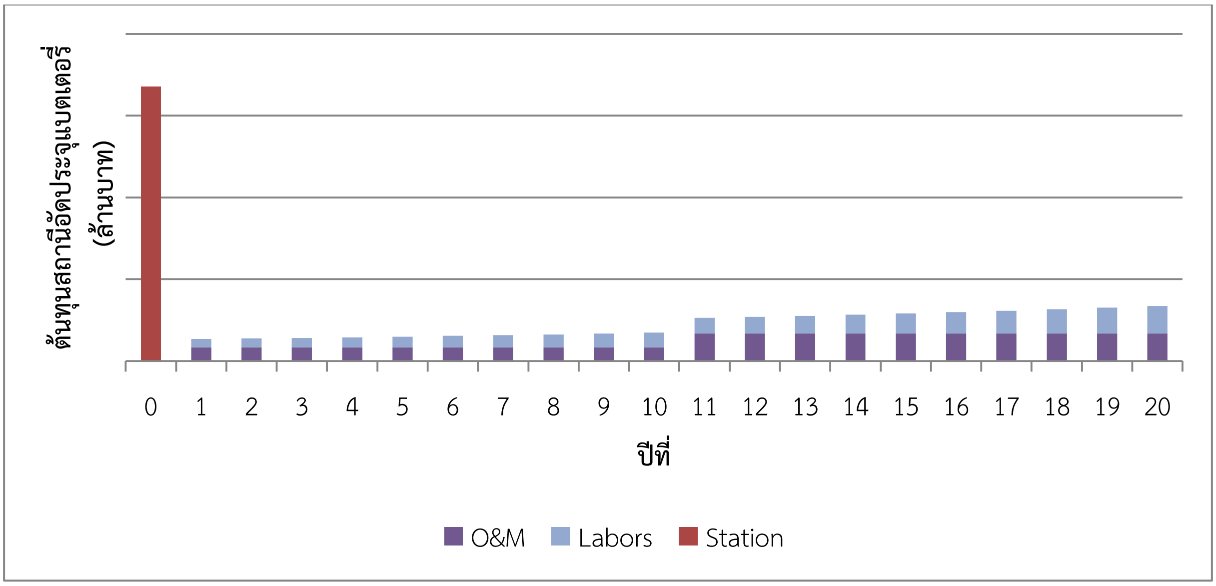
ต้นทุนรวมรายปีของการจัดซื้อรถโดยสาร การเช่ารถโดยสาร และการสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่สามารถแสดงตาม รูปที่ 7-3 และ รูปที่ 7-4 โดยสรุปผลการวิเคราะห์ต้นทุนดังตารางที่ 7-15 และ ตารางที่ 7-16 พบว่าในการจัดหารถโดยสารของ ขสมก. การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าต้นทุนในการเช่ารถจากบริษัทเอกชน และต้นทุนรวมการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้ากรณีประกอบในประเทศ (ทั้งยกเว้นและไม่ยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วน) ณ ราคาไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย มีค่าต่ำกว่าการจัดซื้อรถโดยสาร NGV

เมื่อแปลงต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการมาแสดงเป็นมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดตามลักษณะการลงทุนเพื่อจัดซื้อรถโดยสาร NGV และรถโดยสารไฟฟ้าด้วยการจัดซื้อหรือเช่า ดังแสดงใน รูปที่ 7-5 จะเห็นได้ว่าการจัดซื้อรถทั้งสองประเภทจำเป็นต้องมีการลงทุนเพื่อจัดซื้อรถในปีแรก ทำให้มีมูลค่าผลประโยชน์สุทธิติดลบในปีแรก แต่การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้ามีมูลค่ามากกว่ารถโดยสาร NGV จึงติดลบมากกว่า และในปีที่ 1 ไปจนจบโครงการก็จะมีต้นทุนแปรผันและผลประโยชน์จากรายได้จากค่าโดยสาร

ขณะที่การเช่ารถโดยสารไฟฟ้าจากบริษัทเอกชน จะมีเพียงค่าเช่ารายปีและต้นทุนค่าพลังงานและเงินเดือนพนักงาน



รูปที่ 7-3 ตัวอย่างต้นทุนการจัดหารถโดยสารของโครงการ
กรณีการจัดซื้อรถโดยสาร NGV (บน)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า (กลาง)
กรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้า (ล่าง)



รูปที่ 7-4 ตัวอย่างต้นทุนสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ของโครงการ

สรุปผลการวิเคราะห์ด้านต้นทุนและผลตอบแทนแสดงดัง ตารางที่ 7-15 ถึง ตารางที่ 7-18

ตารางที่ 7-15 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี (ล้านบาท)						
	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	ต้นทุนราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย					
		กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ต้นทุนคงที่	**709.80**	**3,268.22**	**2,668.22**	**2,268.22**	**268.22**	**268.22**	**268.22**
1.1) ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ	709.80	3,000.00	2,400.00	2,000.00	0.00	0.00	0.00
1.2) ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	268.22	268.22	268.22	268.22	268.22	268.22
2. ต้นทุนแปรผัน	**8,219.62**	**7,318.45**	**7,318.45**	**7,318.45**	**15,135.23**	**13,679.82**	**12,709.55**
2.1) ค่าเชื้อเพลิง	4,113.71	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44	2,277.44
2.2) ค่าบำรุงรักษา	2,127.95	1,383.17	1,383.17	1,383.17	0.00	0.00	0.00
2.3) ค่าซ่อมบำรุงใหญ่เครื่องยนต์/ค่าแบตเตอรี่	0.00	960.00	960.00	960.00	0.00	0.00	0.00
2.4) ค่าภาษีรถประจำปี	5.80	5.80	5.80	5.80	0.00	0.00	0.00
2.5) เงินเดือน พขร. และ พกง.	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76
2.6) ค่าเช่ารถ	0.00	0.00	0.00	0.00	10,165.75	8,710.34	7,740.07
2.7) ค่าเช่า GPS และ E-ticket	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40
รวม 2.1)-2.7)	8,219.62	6,598.56	6,598.56	6,598.56	14,415.34	12,959.94	11,989.67
2.8) ค่า O&M สถานีประจุไฟฟ้า	0.00	402.32	402.32	402.32	402.32	402.32	402.32
2.9) เงินเดือนพนักงานสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	317.56	317.56	317.56	317.56	317.56	317.56
รวม 2.8)-2.9)	0.00	719.88	719.88	719.88	719.88	719.88	719.88
ต้นทุนรวม (1+2)	**8,929.42**	**10,586.66**	**9,986.66**	**9,586.66**	**15,403.44**	**13,948.03**	**12,977.76**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน
CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

ตารางที่ 7-16 คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า

รายละเอียด	คาดการณ์เฉลี่ยต้นทุนการจัดหารถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน (ล้านบาท)						
	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	ต้นทุนราคาไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย					
		กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ต้นทุนคงที่	**709.80**	**3,000.00**	**2,400.00**	**2,000.00**	**0.00**	**0.00**	**0.00**
1.1) ต้นทุนตัวรถโดยสารปรับอากาศ	709.80	3,000.00	2,400.00	2,000.00	0.00	0.00	0.00
1.2) ต้นทุนสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2. ต้นทุนแปรผัน	**8,219.62**	**8,614.75**	**8,614.75**	**8,614.75**	**16,431.53**	**14,976.12**	**14,005.85**
2.1) ค่าเชื้อเพลิง	4,113.71	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62	4,293.62
2.2) ค่าบำรุงรักษา	2,127.95	1,383.17	1,383.17	1,383.17	0.00	0.00	0.00
2.3) ค่าซ่อมบำรุงใหญ่เครื่องยนต์/ค่าแบตเตอรี่	0.00	960.00	960.00	960.00	0.00	0.00	0.00
2.4) ค่าภาษีรถประจำปี	5.80	5.80	5.80	5.80	0.00	0.00	0.00
2.5) เงินเดือน พขร. และ พกง.	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76	1,327.76
2.6) ค่าเช่ารถ	0.00	0.00	0.00	0.00	10,165.75	8,710.34	7,740.07
2.7) ค่าเช่า GPS และ E-ticket	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40	644.40
รวม 2.1)-2.7)	8,219.62	8,614.75	8,614.75	8,614.75	16,431.53	14,976.12	14,005.85
2.8) ค่า O&M สถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.9) เงินเดือนพนักงานสถานีประจุไฟฟ้า	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
รวม 2.8)-2.9)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ต้นทุนรวม (1+2)	**8,929.42**	**11,614.75**	**11,014.75**	**10,614.75**	**16,431.53**	**14,976.12**	**14,005.85**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน
CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

7.8.2 การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

ในการศึกษานี้ ได้ประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการประเมินผลตอบแทนด้านอื่นๆ ของโครงการนอกจากด้านการเงิน เช่น ผลตอบแทนจากการลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ผลตอบแทนจากผลประโยชน์ต่อสังคม เป็นต้น เนื่องด้วยเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ด้วยจุดประสงค์ด้านการอนุรักษ์พลังงานและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการลดมลพิษทางอากาศในพื้นที่เขตเมือง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้วิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าใน 2 ประเด็น คือผลตอบแทนจากการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศและผลตอบแทนจากการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การลดการนำเข้าพลังงานฟอสซิลประเมินจากผลต่างของพลังงานที่ใช้โดยรถโดยสาร NGV และรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยานยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมดีกว่ายานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานฟอสซิลประมาณ 71,925 พันตันเทียบเทาน้ำมันดิบ (ktoe) คิดเป็นมูลค่าการนำเข้าพลังงานทั้งหมดประมาณ 998,428 ล้านบาท ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้รวมทั้ง น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ในการศึกษานี้จึงสมมติให้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการประเมินโครงการเป็นเชื้อเพลิงที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด โดยมีมูลค่าเฉลี่ยประมาณ 13.88 ล้านบาทต่อ ktoe[22]

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประเมินจากผลต่างของปริมาณการปล่อย CO_2 จากการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติจากรถโดยสาร NGV กับปริมาณการปล่อย CO_2 จากโรงไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในรถโดยสารไฟฟ้าตามระยะทางวิ่งและอัตราการใช้พลังงานที่กำหนดไว้ในการประเมินโครงการ การศึกษานี้สมมติให้อัตราการปล่อย CO_2 ของการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเท่ากับ 0.06162 kg/MJ และอัตราการปล่อยก๊าซ CO_2 ของการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 0.589 kg/kWh มูลค่าของ CO_2 ประเมินจากมูลค่าการซื้อขาย CO_2 ในตลาดยุโรป ซึ่งปัจจุบันมีมูลค่าอยู่ประมาณ 5 Euro ต่อตัน CO_2 (หรือ 200 บาทต่อตัน) [23]

ผลการประเมินปริมาณและมูลค่าการลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลจากต่างประเทศและผลการประเมินปริมาณการลดการปล่อย CO_2 และมูลค่าของการลดการปล่อย CO_2 (CO_2 avoided cost) แสดงได้ดังตารางที่ 7-17 ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโครงการรถโดยสารไฟฟ้าสามารถช่วยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงได้ 3,027,030 MJ/ปี (72.30 ktoe/ปี) หรือคิดเป็นเงิน 1.004 ล้านบาทต่อปี นอกจากนั้น ยังช่วยลดปริมาณการปล่อย CO_2 ได้ประมาณ 144 ตัน/ปี หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 28,775 บาทต่อปี

ตารางที่ 7-17 ผลการวิเคราะห์การลดการนำเข้าพลังงานและการปล่อย CO_2 ของรถโดยสาร 1 คัน

	รถโดยสาร NGV		รถโดยสารไฟฟ้า	
ปริมาณการใช้พลังงาน	64,277	kg/ปี	116,167	kWh/ปี
	3,445,233	MJ/ปี	418,202	MJ/ปี
ผลประหยัดพลังงาน			3,027,030	MJ/ปี
			1.004	ล้านบาท/ปี
ปริมาณการปล่อย CO_2	212	ตัน/ปี	68	ตัน/ปี
ผลการลดการปล่อย CO_2			144	ตัน/ปี
			28,775	บาท/ต่อปี

[22] http://www.dede.go.th/download/state_59/sit_2.pdf

[23] http://thecleanrevolution.org/_assets/files/May-Insight-Briefing---Carbon-Pricing.pdf และสมมติให้ 1 Euro เท่ากับ 40 บาท

ตารางที่ 7-18 คาดการณ์ผลตอบแทนรถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน พร้อมสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ 4 สถานี

รายละเอียด	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ผลประโยชน์							
1.1) รายได้จากค่าโดยสาร	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516
1.2) รายได้อื่นๆ	670	670	670	670	670	670	670
1.3) มูลค่าซาก	106	337	337	337	40	40	40
1.4) การลดการนำเข้าก๊าซ NGV	0	4,139	4,139	4,139	4,139	4,139	4,139
1.5) การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	0	127	127	127	127	127	127
ผลประโยชน์ทางการเงิน (1.1 ถึง 1.3)	**12,292**	**12,524**	**12,524**	**12,524**	**12,226**	**12,226**	**12,226**
ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ (1.1 ถึง 1.5)	**12,292**	**16,790**	**16,790**	**16,790**	**16,493**	**16,493**	**16,493**
2. ผลประโยชน์สุทธิ							
ผลประโยชน์สุทธิทางการเงิน	**3,363**	**1,937**	**2,537**	**2,937**	**-3,177**	**-1,722**	**-751**
ผลประโยชน์สุทธิทางเศรษฐศาสตร์	**3,363**	**6,204**	**6,804**	**7,204**	**1,090**	**2,545**	**3,515**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน
CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

ตารางที่ 7-19 คาดการณ์ผลตอบแทนรถโดยสาร ขสมก. จำนวน 200 คัน และใช้บริการอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า

รายละเอียด	การจัดซื้อรถโดยสาร NGV	กรณีจัดซื้อ			กรณีเช่า		
		CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD ยกเว้นภาษีนำเข้า
1. ผลประโยชน์							
1.1) รายได้จากค่าโดยสาร	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516	11,516
1.2) รายได้อื่นๆ	670	670	670	670	670	670	670
1.3) มูลค่าซาก	106	297	297	297	0	0	0
1.4) การลดการนำเข้าก๊าซ NGV	0	4,139	4,139	4,139	4,139	4,139	4,139
1.5) การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	0	127	127	127	127	127	127
ผลประโยชน์ทางการเงิน (1.1 ถึง 1.3)	**12,292**	**12,484**	**12,484**	**12,484**	**12,186**	**12,186**	**12,186**
ผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ (1.1 ถึง 1.5)	**12,292**	**16,751**	**16,751**	**16,751**	**16,453**	**16,453**	**16,453**
2. ผลประโยชน์สุทธิ							
ผลประโยชน์สุทธิทางการเงิน	**3,363**	**869**	**1,469**	**1,869**	**-4,245**	**-2,790**	**-1,819**
ผลประโยชน์สุทธิทางเศรษฐศาสตร์	**3,363**	**5,136**	**5,736**	**6,136**	**22**	**1,477**	**2,447**

หมายเหตุ: CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน
CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

7.8.3 ผลการวิเคราะห์ทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางการเงินและทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ เป็นการวิเคราะห์หาเกณฑ์การตัดสินใจในการลงทุน ซึ่งประกอบด้วยการหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)) โดยทั่วไปการคัดเลือกโครงการจะพิจารณาจากมูลค่าประโยชน์สุทธิ (NPV) ซึ่งถ้า NPV > 0 ยอมรับโครงการ และถ้า NPV < 0 ปฏิเสธโครงการ อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ถ้า IRR > r เป็นโครงการที่ดี ถ้า IRR < r เป็นโครงการที่ไม่ดี โดย r คือ ค่าเสียโอกาสของทรัพยากรที่นำมาใช้ในโครงการ และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C ratio) ถ้า B/C > 1 เป็นโครงการที่ดี ถ้า B/C < 1 ปฏิเสธโครงการ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 7-20

จากการประเมินมูลค่าประโยชน์สุทธิของการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้า พบว่า การจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเป็นกรณีที่ให้มูลค่าสูงที่สุด ตามมาด้วยกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศ และกรณีจัดซื้อรถที่นำเข้าแบบประกอบสำเร็จให้มูลค่าต่ำที่สุด เช่นเดียวกับการเช่ารถโดยสารไฟฟ้าจากบริษัทเอกชน ด้วยกรณีนำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าเป็นกรณีที่ให้มูลค่าติดลบน้อยที่สุด ตามมาด้วยกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศ และกรณีจัดซื้อรถที่นำเข้าแบบประกอบสำเร็จ ซึ่งอัตราผลตอบแทนภายในและอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุนของการจัดซื้อรถโดยสารแต่ละกรณีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม การจัดหารถโดยสารไฟฟ้าทุกกรณียังให้อัตราผลตอบแทนภายในต่ำกว่าการจัดซื้อรถโดยสารก๊าซธรรมชาติ

ส่วนการประเมินมูลค่าประโยชน์สุทธิของการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าโดยใช้บริการสถานีอัดประจุไฟฟ้าของผู้ให้บริการไฟฟ้า พบว่า มีทิศทางเช่นเดียวกันกับกรณีการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าพร้อมสร้างสถานีอัดประจุไฟฟ้า แต่ทั้งนี้กรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าซึ่งเป็นกรณีที่ให้มูลค่ามากที่สุด

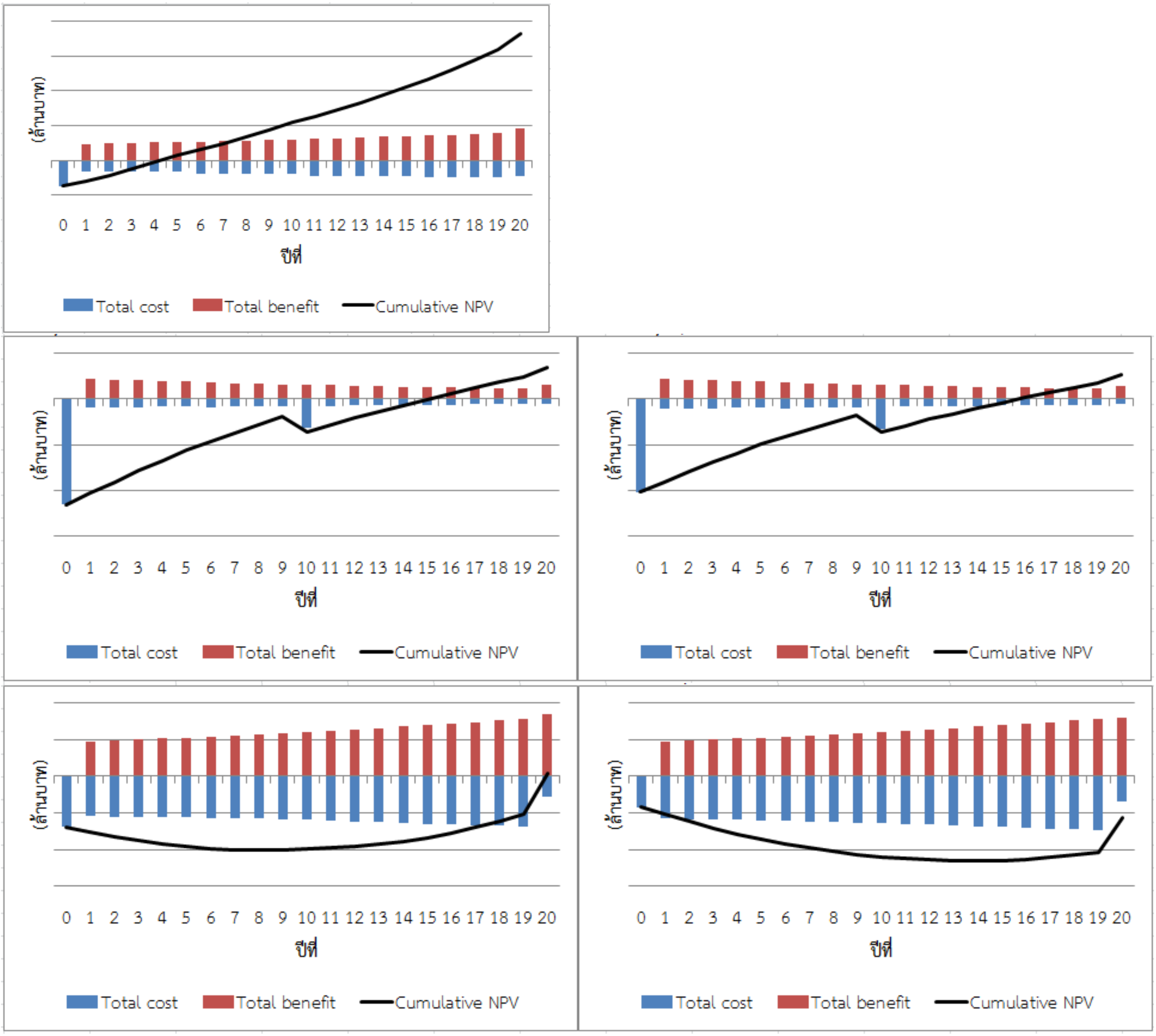
เมื่อเปรียบเทียบการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้ากับรถโดยสาร NGV พบว่า กรณี ขสมก. ซื้อรถที่ประกอบในประเทศและได้รับยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วนและสร้างสถานีไฟฟ้าเองจะมีค่ามูลค่าประโยชน์สุทธิดีกว่าทุกกรณีของการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า แต่ยังด้อยกว่ากรณีรถโดยสาร NGV (EV = 300 ล้านบาท < NGV = 1,284 ล้านบาท) อัตราผลตอบแทนภายในของรถโดยสารไฟฟ้าต่ำกว่ารถโดยสาร NGV (EV = 8.34% < NGV = 22.47%) และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ของรถโดยสารไฟฟ้ามีค่า 1.05 ต่ำกว่าของรถโดยสาร NGV ที่มีค่า 1.26

ในกรณีการเช่ารถ พบว่าค่า B/C Ratio ต่ำกว่ากรณีซื้อรถที่ประกอบในประเทศและได้รับยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วน โดยในกรณีที่สร้างสถานีอัดประจุไฟฟ้าเองและกรณีใช้บริการ ณ สถานีประจุไฟฟ้าที่หน่วยงานอื่นดำเนินการให้มีค่า B/C Ratio ประมาณ 0.86 และ 0.81 ตามลำดับ

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าหากคิดเฉพาะผลด้านการเงินโครงการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าให้ผลตอบแทนน้อยกว่าการใช้รถโดยสาร NGV และในบางกรณีเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุนมากนักเนื่องจากค่าดัชนีต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น ในกรณีเช่ารถจากบริษัทเอกชน อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงด้านพลังงานเขามาเกี่ยวข้อง ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าโครงการรถโดยสารไฟฟ้าสามารถช่วยลดการนำเข้าพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมของประเทศได้ ซึ่งมูลค่าเหล่านี้ส่งผลให้โครงการรถโดยสารไฟฟ้ามีความเหมาะสมในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น โดยกรณีการจัดซื้อรถไฟฟ้าเองจากการนำเข้าชิ้นส่วนที่ได้รับการยกเว้นด้านภาษีมาประกอบในประเทศและ

ดำเนินการก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองจะให้ผลตอบแทนสูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 7-18 และกราฟกระแสเงินสดของตัวอย่างโครงการลงทุนแสดงได้ดังรูปที่ 7-5

ดังนั้นจากการศึกษานี้ ลักษณะของโครงการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าที่ควรลงทุน คือ ขสมก. ควรจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าโดยการนำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศซึ่งต้องได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วนต่างๆ ด้วย และพร้อมลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้า โดยเมื่อสมมติให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.13 บาทต่อหน่วยจะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 300 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 8.34% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.05 หรือเมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 2,587 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 18.89% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.44



รูปที่ 7-5 ตัวอย่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสด กรณีการจัดซื้อรถโดยสาร NGV (บน)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าและสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (กลางซ้าย)
กรณีจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า โดยไม่สร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (กลางขวา)
กรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้าและสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (ล่างซ้าย)
และกรณีเช่ารถโดยสารไฟฟ้า โดยไม่สร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่ (ล่างขวา)

ตารางที่ 7-20 การวิเคราะห์ NPV B/C Ratio และ IRR

		การซื้อรถโดยสาร NGV	กรณีสร้างสถานีอัดประจุแบตเตอรี่*					
			การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า			การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า		
			CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า
Discount Rate		6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%
Financial Analysis	NPV (ล้านบาท)	1,284	-700	-100	300	-2,409	-1,576	-1,020
	B/C Ratio	1.26	0.90	0.98	1.05	0.72	0.80	0.86
	IRR	22.47%	4.25%	6.42%	8.34%	N/A	-10.26%	-4.60%
Economic Analysis	NPV (ล้านบาท)		1,587	2,187	2,587	-122	711	1,267
	B/C Ratio		1.23	1.35	1.44	0.99	1.09	1.18
	IRR		12.28%	15.71%	18.89%	5.67%	14.38%	21.28%
			กรณีใช้บริการสถานีอัดประจุแบตเตอรี่จากผู้ให้บริการไฟฟ้า**					
			การจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้า			การเช่ารถโดยสารไฟฟ้า		
			CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า	CBU	CKD	CKD+ยกเว้นภาษีนำเข้า
Discount Rate			6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%	6.85%
Financial Analysis	NPV (ล้านบาท)		-1,091	-491	-91	-2,801	-1,967	-1,412
	B/C Ratio		0.85	0.93	0.99	0.69	0.76	0.81
	IRR		2.20%	4.36%	6.31%	N/A	N/A	N/A
Economic Analysis	NPV (ล้านบาท)		1,196	1,796	2,196	-514	320	875
	B/C Ratio		1.16	1.27	1.35	0.94	1.04	1.12
	IRR		11.43%	15.14%	18.71%	0.15%	11.69%	21.98%

หมายเหตุ: *ราคาไฟฟ้า 3.13 บาท/หน่วย

**ราคาไฟฟ้า 5.9 บาท/หน่วย

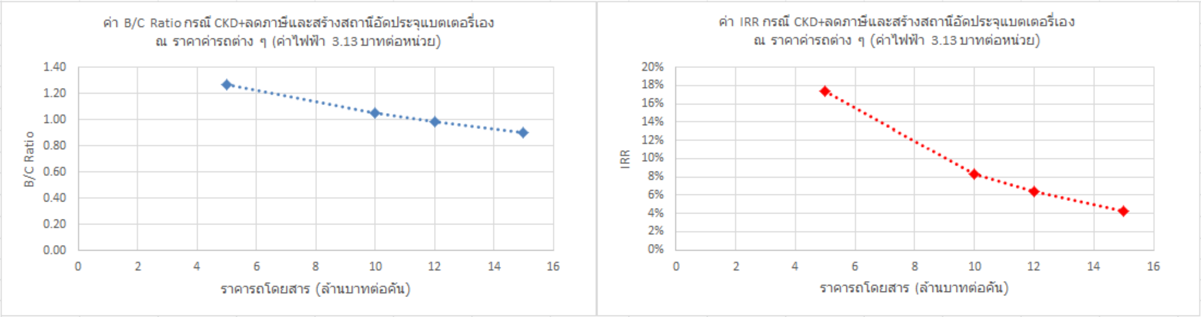
CBU คือ การนำเข้าสำเร็จรูปทั้งคัน

CKD คือ การนำเข้าชิ้นส่วนเข้ามาประกอบในประเทศ

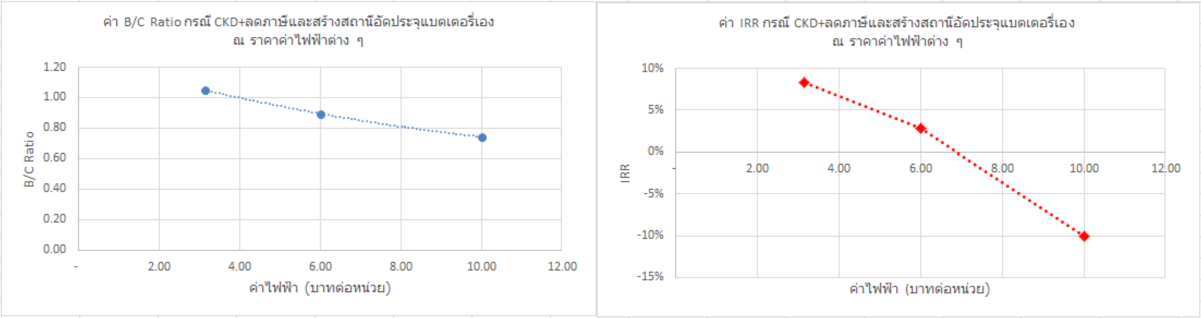
7.9 การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวจากปัจจัยต่าง ๆ ต่อผลตอบแทนของโครงการ การศึกษานี้ได้ทดลองปรับค่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีความสำคัญต่อโครงการ 2 ค่า ได้แก่ มูลค่าของรถโดยสารและค่าไฟฟ้า ซึ่งสองปัจจัยนี้เป็นต้นทุนสำคัญต่อโครงการการใช้รถโดยสารไฟฟ้าของ ขสมก. ในการวิเคราะห์ได้คัดเลือกโครงการที่คาดว่าจะมีผลตอบแทนดีที่สุดจากการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้านี้ นั่นคือ (1) กรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองกับ (2) กรณีการเช่ารถโดยสารจากบริษัทเอกชนที่ที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเอง การวิเคราะห์พิจารณาผลของปัจจัยทั้ง 2 ต่อค่าดัชนีที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกโครงการคือค่า B/C Ration และ IRR

ผลการวิเคราะห์ในกรณี (1) แสดงในรูปที่ 7-6 และ 7-7 ซึ่งพิจารณาจากค่า B/C Ratio มากกว่า 1.0 และค่า IRR มากกว่า Discount Rate (6.85% ต่อปี) จะเห็นได้ว่ารถโดยสารที่จะทำให้โครงการประสบผลสำเร็จจะต้องมีค่าไม่เกิน 12 ล้านบาทต่อคันโดยประมาณและค่าไฟฟ้าไม่ควรเกินประมาณ 4 บาท

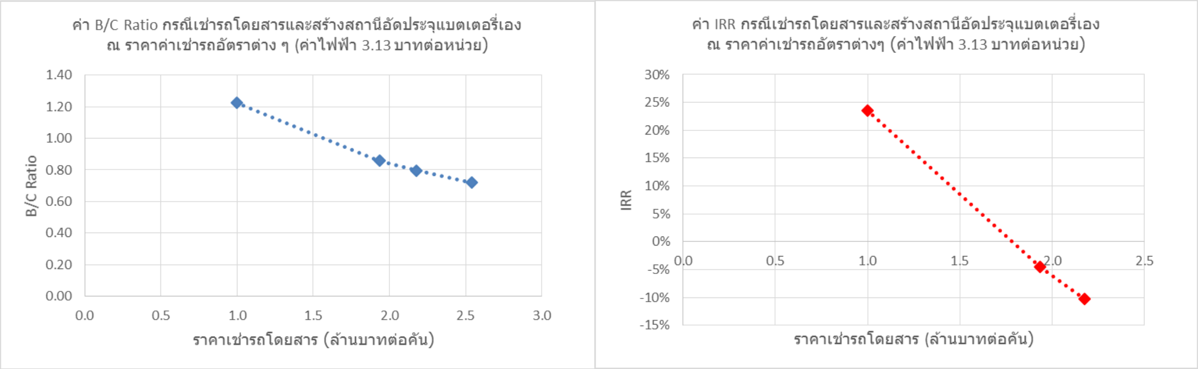


รูปที่ 7-6 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงราคารถโดยสาร

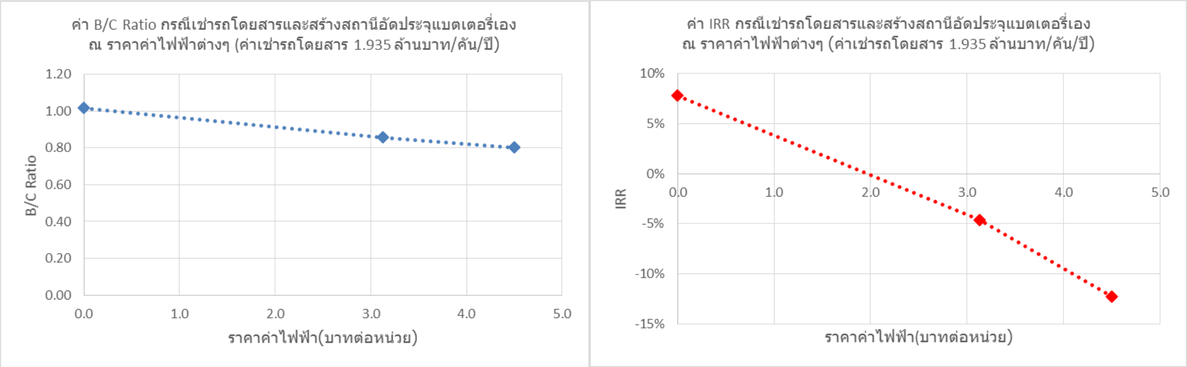


รูปที่ 7-7 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการจัดซื้อรถที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงราคาไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ในกรณี (2) แสดงในรูปที่ 7-8 และรูปที่ 7-9 ซึ่งพิจารณาจากค่า B/C Ratio และค่า IRR จะเห็นได้ว่าราคาค่าเช่ารถโดยสารที่จะทำให้โครงการเหมาะสมแก่การลงทุนควรมีค่าไม่เกิน 1.8 ล้านบาทต่อคันต่อปีโดยประมาณ ในขณะที่หากพิจารณาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพบว่าราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วยควรจะไม่เกิน 0.5 บาทต่อหน่วยจึงทำให้ค่า IRR ต่ำกว่าค่า Discount Rate ที่ 6.85% ต่อปี



รูปที่ 7-8 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการเช่ารถจากบริษัทเอกชนที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเช่ารถ



รูปที่ 7-9 ค่า B/C Ratio และค่า IRR ในกรณีการเช่ารถจากบริษัทเอกชนที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและการจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าไฟฟ้า

7.10 สรุปผลการประเมินโครงการและข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

จากการวิเคราะห์ผลตอบแทนโครงการจัดหารถโดยสารไฟฟ้าเพื่อทดแทนการใช้รถโดยสาร NGV ในการให้บริการของ ขสมก. จำนวนทั้งหมด 200 คัน โดยแบ่งกรณีศึกษาเป็น 12 กรณี คือการจัดซื้อรถแยกเป็น 4 กรณี ได้แก่ การจัดซื้อรถโดยสารเองแบบนำเข้าทั้งคัน (CBU) นำเข้าชิ้นส่วนรถมาประกอบในประเทศ (CKD) นำเข้าชิ้นส่วนรถมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีชิ้นส่วน และการเช่าจากบริษัทเอกชน รวมทั้งการจัดหาไฟฟ้าแยกเป็น 2 กรณีคือจัดสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองและซื้อไฟฟ้าจากสถานีประจุไฟฟ้าจากหน่วยงานอื่น

ผลการวิเคราะห์ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) พบว่ากรณีเช่ารถมีค่า NVP ติดลบ ค่า B/C Ratio ต่ำกว่า 1.0 และค่า IRR น้อยกว่า Discount Rate (6.85% ต่อปี) ซึ่งหมายถึงผลประกอบการของโครงการโดยการเช่ารถขาดทุนตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ 20 ปี อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าดัชนีดังกล่าวข้างต้นของกรณีการจัดซื้อรถพบว่า กรณีการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าที่นำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศและได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าและใช้บริการสถานีอัดประจุไฟฟ้าของผู้ให้บริการไฟฟ้าเป็นกรณีที่เหมาะสมในการลงทุนด้านการเงินที่สุด แต่ยังด้อยกว่ากรณีรถโดยสาร NGV (EV = 300 ล้านบาท < NGV = 1,284 ล้านบาท) อัตราผลตอบแทนภายใน

ของรถโดยสารไฟฟ้าแย่กว่ารถโดยสาร NGV (EV = 8.34% < NGV = 22.47%) และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) ของรถโดยสารไฟฟ้ามีค่า 1.05 ต่ำกว่าของรถโดยสาร NGV ที่ 1.26

ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าหากคิดเฉพาะผลด้านการเงินโครงการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าให้ผลตอบแทนน้อยกว่าการใช้รถโดยสาร NGV และในบางกรณีเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุนมากนักเนื่องจากค่าดัชนีต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น ในกรณีเช่ารถจากบริษัทเอกชน อย่างไรก็ตาม เมื่อนำผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงด้านพลังงานเขามาเกี่ยวข้อง ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าโครงการรถโดยสารไฟฟ้าสามารถช่วยลดการนำเข้าพลังงานและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมของประเทศได้ ซึ่งมูลค่าเหล่านี้ส่งผลให้โครงการรถโดยสารไฟฟ้ามีความเหมาะสมในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น โดยกรณีการจัดซื้อรถไฟฟ้าเองจากการนำเข้าชิ้นส่วนที่ได้รับการยกเว้นด้านภาษีมาประกอบในประเทศและดำเนินการก่อสร้างสถานีประจุไฟฟ้าเองจะให้ผลตอบแทนสูงที่สุด

ดังนั้นจากการศึกษานี้ ลักษณะของโครงการจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าที่ควรลงทุน คือ ขสมก. ควรจัดซื้อรถโดยสารไฟฟ้าโดยการนำเข้าชิ้นส่วนมาประกอบในประเทศซึ่งต้องได้รับการยกเว้นภาษีนำเข้าชิ้นส่วนต่างๆ ด้วย และพร้อมลงทุนสร้างสถานีประจุไฟฟ้า โดยเมื่อสมมติให้ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 3.13 บาทต่อหน่วยจะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 300 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 8.34% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.05 หรือเมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จะให้มูลค่าประโยชน์สุทธิ 2,587 ล้านบาท อัตราผลตอบแทนภายใน 18.89% และอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุน 1.44

ถึงแม้ว่าการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าไม่ได้ให้ผลตอบแทนทางด้านการเงินดีกว่าการใช้รถโดยสาร NGV ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่เมื่อวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์แล้วแสดงให้เห็นว่าการใช้รถโดยสารไฟฟ้าให้ผลตอบแทนที่ดีกว่า ดังนั้นในการส่งเสริมการใช้รถโดยสารไฟฟ้าควรจะต้องมีการสนับสนุนเงินทุนในการดำเนินงานจากภาครัฐหรือเงินกองทุนที่เกี่ยวข้องกับด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการลดภาษีการนำเข้าชิ้นส่วนยานยนต์ที่สำคัญเพื่อนำมาประกอบในประเทศ

การส่งเสริมให้มีการผลิตรถโดยสารไฟฟ้าภายในประเทศนอกจากจะเป็นทางเลือกที่จะทำให้ต้นทุนของรถโดยสารลดลงกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศแล้ว ยังเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้กับกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ภายในประเทศอีกด้วย ดังนั้น ทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องทั้งกระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงคมนาคม กระทรวงพลังงาน และกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ควรจะต้องร่วมกันวางยุทธศาสตร์ในการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยให้ยั่งยืนในระยะยาว

ในการส่งเสริมให้เกิดการลงทุนพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศนั้น ในระยะเริ่มต้นภาครัฐจะต้องมีนโยบายและมาตรการส่งเสริมการลงทุนให้กับชิ้นส่วนเทคโนโลยีที่สำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น มอเตอร์ แบตเตอรี่ และระบบควบคุม เป็นต้น โดยมาตรการส่งเสริมดังกล่าวต้องกำหนดให้มีกลไกการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ประกอบการของคนไทยเพื่อเพิ่มขีดความสามารถทางด้านเทคโนโลยีภายในประเทศในระยะยาว