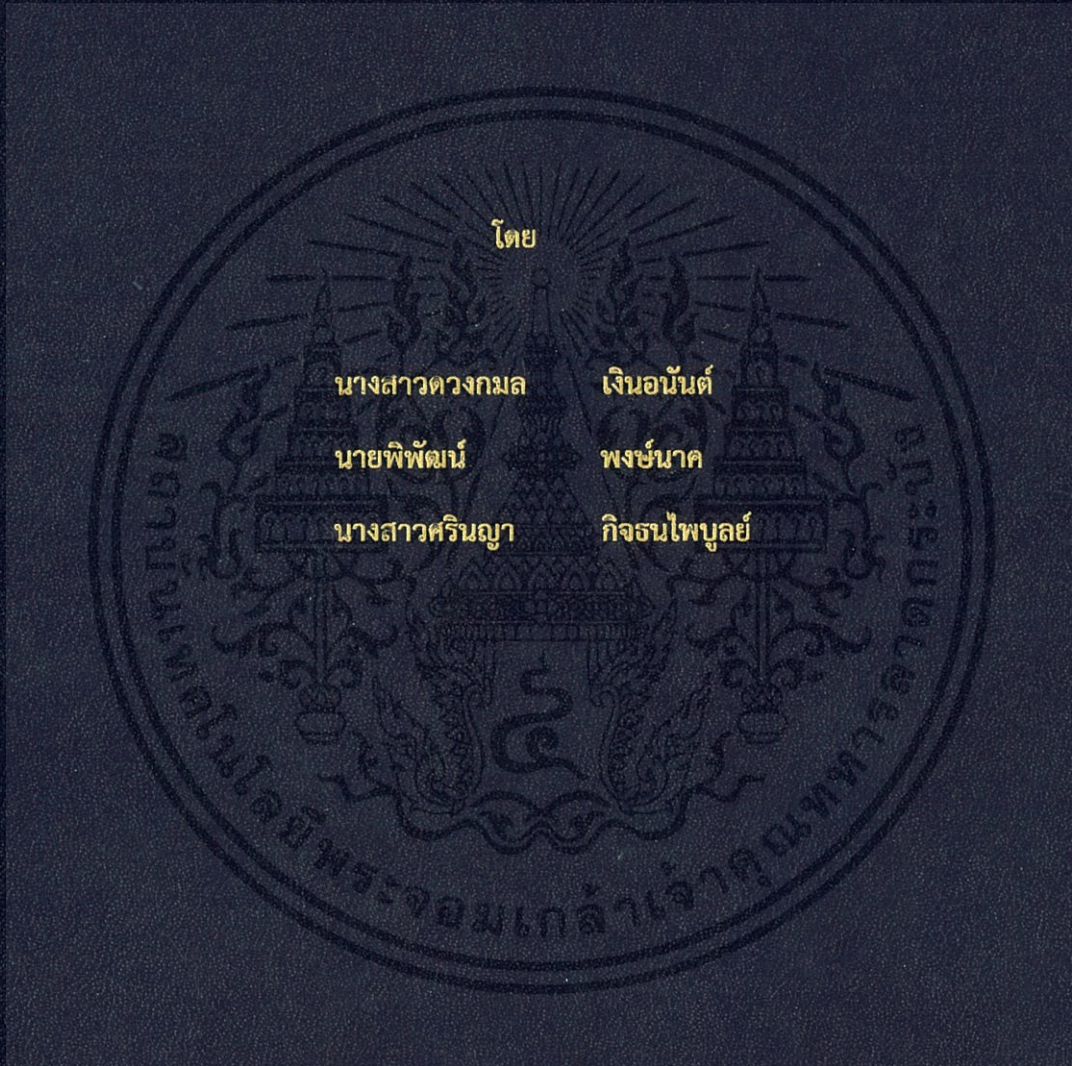


การศึกษาจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ
A STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE FOR PUBLIC TRANSPORT
TO DECREASE AIR POLLUTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ
A STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE FOR PUBLIC TRANSPORT
TO DECREASE AIR POLLUTION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE FOR PUBLIC TRANSPORT
TO DECREASE AIR POLLUTION



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHEL DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การศึกษารถจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ

A STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE FOR PUBLIC TRANSPORT

TO DECREASE AIR POLLUTION



อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย

อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาจํกรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ

ผู้จัดทำ

1. นางสาวดวงกมล เงินอนันต์
2. นายพิพัฒน์ พงษ์นาค
3. นางสาวศรินญา กิจธนไพบูลย์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์ คำฝอย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ชัยทัต มณีอินทร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษารถจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ

นางสาว ดวงกมล	เงินอนันต์	
นาย พิพัฒน์	พงษ์นาค	
นางสาว ศรินญา	กิจธนไพบูลย์	
รศ.ดร. สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา
อ. ชัยทัต	มณีอินทร์	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561		

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศในกรุงเทพมหานคร โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR), ระยะคืนทุน (PB) และสัดส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (P/C) จากการเปลี่ยนรถจักรยานยนต์สาธารณะแบบเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ ศึกษาความเปลี่ยนแปลงในการลดมลพิษทางอากาศหากเปลี่ยนรถจักรยานยนต์สาธารณะแบบสันดาปภายในจำนวน 50,000 คันเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ และศึกษาการออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ โดยลงพื้นที่สอบถามผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะ เก็บข้อมูลความต้องการและความคิดเห็นเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรมรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า นำผลการออกแบบมาสร้างต้นแบบของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะโดยนำรถจักรยานยนต์แบบสันดาปมาดัดแปลงด้วยการเปลี่ยนเครื่องยนต์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ จากนั้นทดสอบสมรรถนะการขับขี่ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้ ความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง, ระยะทางสูงสุดต่อการประจุแบตเตอรี่ คือ 25 กิโลเมตร และค่าการใช้พลังงาน คือ 0.11 บาทต่อกิโลเมตร ปฏิญานิพนธ์นี้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการเปลี่ยนแปลงรถจักรยานยนต์แบบสันดาปภายในเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะได้ซึ่งสามารถลดมลพิษทางอากาศในกรุงเทพมหานครอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีค่าใช้จ่ายในระยะยาวที่น้อยกว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบบสันดาปอีกด้วย

A STUDY OF ELECTRIC MOTORCYCLE FOR PUBLIC TRANSPORT TO DECREASE AIR POLLUTION

Ms. Duangkamon Ngenanan
Mr. Phiphat Pongnak
Ms. Sarinya Gitthanapaiboon
Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi Advisor
Chaitat Maneeinn Advisor
Year 2018

ABSTRACT

This thesis proposes a study of public electric motorcycles to reduce air pollution in Bangkok by conducting the study in economic feasibility such as net present value (NPV), internal rate of return (IRR), payback period (PB) and benefit cost ratio (P / C) due to changes in public motorcycles with internal combustion engines as public electric motorcycles. The study will include the change of air pollution if the internal combustion motorcycle is changed to 50,000 electric motorcycles and studying the design of a public electric motorcycle by asking public motorcycle riders and collecting information or needs, including opinions for economic analysis by engineering design of public electric motorcycles. The result of the design is to create a prototype of a public electric motorcycle by replacing the internal combustion engine with an electric motor and installing a battery storage system. Then, driving performance test, which results in the highest speed is 90 kilometers per hour, the maximum distance to charge the battery is 25 kilometers and energy consumption is 0.11 baht per kilometer. This thesis can be used as a prototype model for changing the internal combustion motorcycles into a public electrical motorcycle which can significantly reduce air pollution in Bangkok. Additionally, the electric motorcycle also has a long-term cost that is less than the internal combusting motorcycle.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณา และคำแนะนำจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และแนะนำข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาโครงการวิจัย โดยเริ่มต้นอย่างแนะนำแนวทางในการศึกษา และทฤษฎีต่าง ๆ รวมไปถึงการใส่ใจและให้คำปรึกษาที่ดีเมื่อเกิดปัญหาระหว่างโครงการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนอาจารย์ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ซึ่งให้ความรู้ และอบรมสั่งสอนมาโดยตลอดทำให้เป็นความรู้ในการทำโครงการวิจัย และประกอบวิชาชีพในอนาคตได้ต่อไป

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในอาคารปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทน REAL (Renewable Energy Application Laboratory) ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาตลอดเวลาด้วยความเต็มใจจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อาทิเช่น พี่ต้น พี่วิน น้องปิ่น และบริษัท PG Electric Group จำกัด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และส่งเสริมทางการศึกษา จนสามารถสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในครั้งนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้แก่ทุกท่านที่สนใจสามารถนำไปศึกษาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาและใช้ในงานวิจัยอื่น ๆ ต่อไป

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 จักรยานยนต์	5
2.2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของรถจักรยานยนต์	5
2.3 จักรยานยนต์ไฟฟ้า	7
2.3.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า	7
2.3.2 อุปกรณ์ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า	8
2.4 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสชนิดไร้แปรงถ่าน	9
2.5 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	10
2.5.1 สเตเตอร์	10
2.5.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ	11
2.5.3 โรเตอร์	13
2.5.4 เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟค	14
2.5.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	19
2.6.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสชนิดไร้แปรงถ่าน	20
2.6.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน แบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์	20
2.7 ลำดับในการคอมมิวเตชัน	23
2.8 แบตเตอรี่ในยานยนต์	24
2.9 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	27
2.9.1 แบตเตอรี่และการจัดการแบตเตอรี่	29
2.9.2 ระดับชุดแบตเตอรี่	30
2.10 การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	31
2.11 ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงการ	32
2.12 การศึกษาความเป็นไปได้	34
2.13 หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจเพื่อการลงทุน	35
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	37
2.15 สรุป	38
บทที่ 3 ขั้นตอนดำเนินงานและการออกแบบโครงการ	39
3.1 บทนำ	39
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	41
3.2.1 การสัมภาษณ์	41
3.2.2 การศึกษารูปแบบและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์	43
3.2.3 ศึกษาจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล	43
3.3.1 การวิเคราะห์เชิงพรรณนา	43
3.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ	44
3.4 การออกแบบจักษยานยนต์ไฟฟ้า	45
3.5 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม	46
3.5.1 แรงต้านทานการหมุนของล้อ	46
3.5.2 แรงต้านทานอากาศ	47
3.5.3 แรงต้านทานความชัน	48
3.5.4 แรงต้านทานการเคลื่อนที่รวม	48
3.5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การคำนวณขนาดแบตเตอรี่	48
3.6.1 การคำนวณหาขนาดความจุแบตเตอรี่จากข้อมูลลงพื้นที่สอบถาม	49
3.7 กล้องควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	51
3.8 การออกแบบขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ	52
3.8.1 การเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ	52
3.8.2 การทดสอบความเร็วและระยะทาง	53
3.9 สรุป	54
บทที่ 4 ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล	54
4.1 บทนำ	54
4.2 ผลการสำรวจข้อมูลและการเปรียบเทียบเชิงเทคนิคของ จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า	54
4.2.1 ประสิทธิภาพของจักรยานยนต์ไฟฟ้ากับเครื่องยนต์สันดาปภายใน	54
4.2.2 เปรียบเทียบด้านเทคนิคระหว่างจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในกับ จักรยานยนต์ไฟฟ้า	55
4.3 ผลการสำรวจตลาดแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออน	56
4.3.1 ความต้องแบตเตอรี่และกำลังการผลิต	56
4.3.2 ราคาแบตเตอรี่	57
4.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	58
4.4.1 ประเมินต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม	59
4.5 การประเมินค่าซ่อมบำรุงจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า	60
4.6 การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์	63
4.6.1 ผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน	63
4.6.2 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ	66
4.6.3 อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน	66
4.6.4 ระยะเวลาคืนทุน	68
4.7 การวิเคราะห์การอ่อนไหวจากราคาน้ำมันและราคาค่าไฟฟ้า	69
4.7.1 ความอ่อนไหวต่อราคาน้ำมัน	69
4.7.2 ความอ่อนไหวของราคาค่าไฟฟ้า	70

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.8 การสร้างต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสาธารณะ	71
4.8.1 วัตถุประสงค์	71
4.8.2 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้า	71
4.9 ผลการทดลองประสิทธิภาพของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสาธารณะ	77
4.9.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานในการขับขี่ระยะทาง 1 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง	77
4.9.2 ผลการทดสอบระยะทางในการขับขี่ทั้งหมดต่อการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง	78
4.10 ต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับระบบสาธารณะ	79
บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	80
5.1 บทสรุป	80
5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ	80
5.3 แนวทางการพัฒนา	81
เอกสารอ้างอิง	82
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก ต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งสาธารณะ	84
ภาคผนวก ข เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์	87
ภาคผนวก ค บทความเชิงวิชาการ	89
ภาคผนวก ง โปสเตอร์นำเสนอผลงาน	90
ประวัติผู้เขียน	96

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ	6
2.2 หลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า	7
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า	8
2.4 มอเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า	9
2.5 ขดลวดในสลอตของสเตเตอร์ใน Hub motor	10
2.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับแบบ Trapezoidal	12
2.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับแบบ Sinusoidal	12
2.8 ลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ	13
2.9 แม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งผิวรอบนอกโรเตอร์ (ซ้าย) และแม่เหล็กถาวรถูกฝังภายในโรเตอร์ (ขวา)	14
2.10 สัญญาณของเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์	15
2.11 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน	16
2.12 แสดงสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับและกระแสไฟฟ้า	17
2.13 โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก	19
2.14 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน	20
2.15 แสดงสัญญาณ Hall Sensor, สัญญาณควบคุมสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัวแบบ PWM และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ และกระแสไฟฟ้าเฟส	22
2.16 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่	24
2.17 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่าง ๆ	25
2.18 Region chart ของค่าความหนาแน่นพลังงาน และพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ	27
2.19 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนประเภทต่าง ๆ	28
2.20 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ	31
2.21 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	32
3.1 แผนผังการดำเนินการ	40
3.2 แผนที่พื้นที่สอบถามผู้ขับขี่จักรยานยนต์	41
3.3 ตัวอย่างแบบสอบถามข้อมูลและการใช้งานของกลุ่มผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะ	42
3.4 แผนผังการใช้งานอุปกรณ์ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า	46
3.5 เปรียบเทียบความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่แต่ละชนิด	49
3.6 เส้นทางระหว่างรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรี ถึง มศว.	49
3.7 เส้นทาง ระหว่างรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรี ถึง ตึก GMM Grammy	50
3.8 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	51
3.9 คอนโทรลเลอร์ รุ่น SVMC96100 ของบริษัท MQCON Science and Technology Co.,Ltd	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แอปพลิเคชัน MQCON	52
3.11 Power Quality Analyzer PW3198	53
3.12 DATA CAPTURE W MULTI-GNSS RECEIVERS	53
4.1 การแปรรูปพลังงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้ากับจักรยานยนต์เครื่องยนต์ สันดาปภายใน	55
4.2 เปรียบเทียบสัดส่วนประสิทธิภาพด้านเทคนิคของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า	56
4.3 สัดส่วนของการผลิตแบตเตอรี่ในปีพ.ศ. 2559	57
4.4 สัดส่วนของการผลิตแบตเตอรี่ในปีพ.ศ. 2563	57
4.5 กำลังการผลิตแบตเตอรี่สำหรับพาหนะยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก	57
4.6 ราคาของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเฉลี่ยต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (เหรียญต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)	58
4.7 การเปรียบเทียบราคาน้ำมันกับต้นทุนการเดินทางของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน	69
4.8 การเปรียบเทียบราคาค่าไฟฟ้ากับต้นทุนการเดินทางของจักรยานยนต์ไฟฟ้า	70
4.9 การต่ออุปกรณ์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า	71
4.10 จักรยานยนต์ รุ่น Wave 110 ก่อนดัดแปลง	72
4.11 จักรยานยนต์ รุ่น Wave 110 หลังถอดเครื่องยนต์และถังน้ำมัน	72
4.12 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Hub Motor)	73
4.13 ตำแหน่งของคอนโทรลเลอร์	73
4.14 โครงพื้นที่สำหรับวางคอนโทรลเลอร์	73
4.15 ตำแหน่งของแบตเตอรี่	74
4.16 โครงพื้นที่สำหรับวางแพคแบตเตอรี่ โดยโปรแกรม AutoCAD	74
4.17 Intelligent DC-DC Converter	75
4.18 ระบบไฟแสงของจักรยานยนต์สันดาปภายใน	75
4.19 Converter ต่อเข้าไประบบไฟ	75
4.20 การออกแบบกรอบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า	76
4.21 การเดินสายไฟเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า	76
4.22 ประกอบเฟรมเข้ากับโครงมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า	77
4.23 การใช้พลังงานในระยะทาง 1 กิโลเมตรที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง	77
4.24 การใช้พลังงานในระยะทาง 22.60 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง	78
4.25 ต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าระบบสาธารณะ	79

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานโครงการ	3
2.1 ลำดับการคอมมิวเตเตอร์	24
2.2 สมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ	26
2.3 สมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด	28
3.1 เกณฑ์การประเมินเปรียบเทียบทางเทคนิคระหว่างจักษยานยนต์เครื่องยนต์และไฟฟ้า	43
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ด้านทานการหมุนของล้อกับสภาพพื้นถนน	47
3.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศกับยานพาหนะชนิดต่าง ๆ	47
4.1 เปรียบเทียบด้านเทคนิคจักษยานยนต์เครื่องยนต์กับไฟฟ้า	55
4.2 การปล่อยคาร์บอนมอนนอกไซด์และมลพิษต่าง ๆ จากการขับเคลื่อนจักษยานยนต์เครื่องยนต์กับไฟฟ้า	59
4.3 ต้นทุนของมลพิษจากการขับเคลื่อนจักษยานยนต์สันดาปภายในและไฟฟ้า	59
4.4 ค่าอะไหล่สิ้นเปลืองตามตารางบำรุงรักษาของจักษยานยนต์สันดาปภายใน	61
4.5 ค่าอะไหล่สิ้นเปลืองตามตารางบำรุงรักษาของจักษยานยนต์ไฟฟ้า	62
4.6 เปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างจักษยานยนต์สันดาปภายในกับไฟฟ้า	63
4.7 รายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่างบประมาณของจักษยานยนต์สันดาปภายใน	64
4.8 วิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่างบประมาณของจักษยานยนต์สันดาปภายใน	65
4.9 รายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่างบประมาณของจักษยานยนต์ไฟฟ้า	65
4.10 วิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่างบประมาณจักษยานยนต์ไฟฟ้า	65
4.11 การเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ	66
4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนของจักษยานยนต์สันดาปภายใน	67
4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนของจักษยานยนต์ไฟฟ้า	67
4.14 อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินทุน	68
4.15 สมรรถนะของต้นแบบจักษยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ	79
4.16 สมรรถนะด้านการขับเคลื่อนของต้นแบบจักษยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ	80
4.17 ระบบเบรก และใช้ค้อพ	80
4.18 มิติของจักษยานยนต์ไฟฟ้า	80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ด้วยปัจจัยทางด้านการดำเนินชีวิตที่เร่งรีบของคนเมือง และสภาพการจราจรที่ติดขัด ทำให้รถจักรยานยนต์รับจ้างถูกใช้อย่างแพร่หลาย จนกลายเป็นการขนส่งสาธารณะที่มีเอกลักษณ์ที่สุดในโลก ซึ่งสามารถพบเห็นได้ทุกซอกทุกมุมในเขตกรุงเทพฯ ฯ และยังคงเป็นทางเลือกในการเดินทางของคนเมืองที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะรถจักรยานยนต์สาธารณะที่ประจำอยู่ ณ จุดเชื่อมต่อของสถานีรถไฟฟ้า BTS และรถไฟใต้ดิน MRT จึงทำให้รถจักรยานยนต์สาธารณะ สามารถเติมเต็มการเดินทางของคนเมืองทั้งในด้านความสะดวกและรวดเร็ว

ปี 2560 กรุงเทพมหานครมีปริมาณรถจักรยานยนต์สาธารณะ 99,644 คัน คิดเป็น 51.26% ของปริมาณรถจักรยานยนต์สาธารณะทั่วประเทศ ทำให้มีการปล่อยปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากถึง 21,151 พันตันต่อปี (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2560) เป็นสาเหตุให้ปีพ.ศ. 2560 ภาคการขนส่งมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ระดับ 73.0 ล้านตัน ซึ่งทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.6 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้น้ำมันสำเร็จรูป อยู่ที่ระดับ 67.9 ล้านตัน ซึ่งทำให้ระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.9 (กระทรวงพลังงาน, 2560) ทั้งนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังเป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะโลกร้อนที่จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลกที่เพิ่มขึ้น ความแปรปรวนของฤดูกาล และภัยพิบัติทางธรรมชาติได้ทวีความรุนแรงขึ้น

สถิติการเกิดอุบัติเหตุจากรถจักรยานยนต์สาธารณะในพื้นที่กรุงเทพมหานคร 11,574 ครั้งภายในปี 2560 เป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียทั้งชีวิต และทรัพย์สินมากมาย โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุ คือ การเมาแล้วขับ การขับรถไว การไม่สวมหมวกนิรภัย และการไม่ปฏิบัติตามกฎจราจร (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2560)

ทางคณะวิจัยจึงได้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นกับรถจักรยานยนต์สาธารณะ เพื่อลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ประโยชน์ที่นำมาเสนอการศึกษาการจราจรจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ และการออกแบบโครงสร้าง รูปร่าง และลักษณะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศในกรุงเทพมหานคร ป้องกันอุบัติเหตุ และความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ขับขี่และผู้โดยสาร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้รถจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าแทนรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน สำหรับระบบขนส่งสาธารณะในกรุงเทพมหานคร
2. เพื่อออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ
3. เพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากรถจักรยานยนต์สาธารณะ อุบัติเหตุ และความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ขับขี่ และผู้โดยสาร

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ศึกษาความเป็นไปได้ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าในเชิงทางเทคนิค, เศรษฐศาสตร์ และผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพื่อเปรียบเทียบกับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน ลดอุบัติเหตุ และความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ขับขี่ และผู้โดยสาร

1.4 วิธีการใช้ในโครงการ

1. การลงพื้นที่ศึกษาพฤติกรรมการใช้รถจักรยานยนต์สาธารณะของผู้ขับขี่ และความต้องการของผู้โดยสารในพื้นที่กรุงเทพมหานคร
2. ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า และเปรียบเทียบกับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน
3. การออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ
4. การศึกษาประสิทธิภาพรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ และศึกษาความพึงพอใจของผู้ขับขี่ และผู้โดยสาร

1.5 แผนการดำเนินงาน

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎี ตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการออกแบบและจัดสร้างชิ้นงาน โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2561 ถึงเดือนพฤษภาคม 2562 รวมเป็นระยะเวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินงานดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง										
2.รวบรวมผลการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูล										
3.ทำการลงสำรวจพื้นที่เพื่อออกแบบ และพัฒนา										
4.ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า										
5.ออกแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ										
6.ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต้นแบบ และบันทึกผล										
7.รวบรวมข้อมูลงานวิจัย และจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ประเมินศักยภาพในการเลือกใช้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในระบบขนส่งสาธารณะ
2. สร้างต้นแบบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ
3. ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากรถจักรยานยนต์สาธารณะ
4. ลดการเกิดอุบัติเหตุ และความเสียหายที่จะเกิดกับผู้ขับขี่ และผู้โดยสารรถจักรยานยนต์สาธารณะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

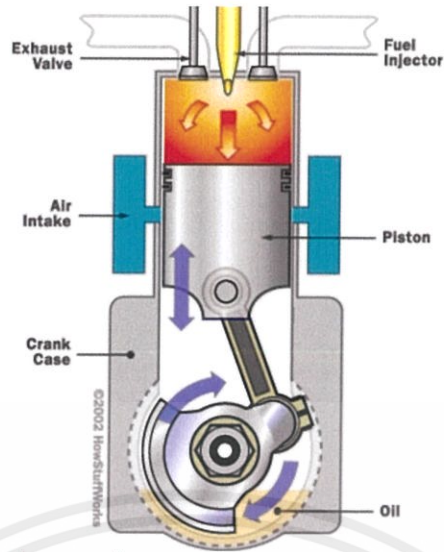
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และ จักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยจะอธิบายหลักการทำงาน และข้อมูลของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาเลือกใช้ สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก ๆ ที่จะกล่าวถึงในบทนี้ ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า และชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ การอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า และการปล่อยมลพิษของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า

2.2 จักรยานยนต์

จักรยานยนต์ถือเป็นพาหนะหลักของประชาชนในประเทศไทย ได้รับความนิยมนั่งในเมืองใหญ่ดังเช่นกรุงเทพมหานคร และต่างจังหวัดเนื่องจากมีความสะดวกคล่องตัวในการใช้งาน เหมาะสำหรับการเดินทางระยะใกล้อีกทั้งราคาไม่แพง คนทุกระดับสามารถเป็นเจ้าของได้ จากสถิติของกรมขนส่งทางบกเมื่อวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2561 พบว่ามียอดจดทะเบียนระจักรยานยนต์ส่วนบุคคล 20,787,930 คัน และจักรยานยนต์สาธารณะ 184,824 คัน (กลุ่มสถิติการขนส่ง กรมขนส่งทางบก, 2561) ในโครงการวิจัยนี้สนใจศึกษาเทคโนโลยีของจักรยานยนต์ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง การซ่อมบำรุง และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของจักรยานยนต์ จึงได้รวบรวมเนื้อหาที่สำคัญดังนี้

2.2.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของรถจักรยานยนต์

จักรยานยนต์ทั่วไปที่มีใช้งานอยู่ในประเทศไทย และทั่วโลก จะเป็นจักรยานยนต์ที่ใช้แก๊สโซลีน (Gasoline) คือ น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงเกือบทั้งหมด เครื่องยนต์แก๊สโซลีน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ (Spark-ignition engine, SI engine) เป็นเครื่องยนต์สันดาปภายใน มีการจุดระเบิดโดยใช้ประกายไฟ และใช้เชื้อเพลิงที่เป็นน้ำมันเบาที่มีการระเหยง่าย มีลักษณะการเผาไหม้โดยที่อากาศกับเชื้อเพลิงจะทำการผสมกันในระบบไอดี ก่อนที่จะเข้าไปในกระบอกสูบโดยใช้ระบบการฉีดจ่ายเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรเตอร์ หรือระบบหัวฉีด เครื่องยนต์สันดาปภายในต้องการอัตราส่วนผสมของอากาศกับเชื้อเพลิงที่ถูกต้องแน่นอนในแต่ละสภาวะการทำงานของเครื่องยนต์ ปริมาณของอากาศที่ต้องการทางทฤษฎี คือ ปริมาณของอากาศซึ่งต้องเพียงพอสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง โดยส่วนผสมของเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนต่าง ๆ ที่ป้อนเข้ากับเครื่องยนต์จะมีผลต่อกำลังงานของเครื่องยนต์ และความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.1 เครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟ

สำหรับเครื่องยนต์คาร์บูเรเตอร์ อากาศจะไหลผ่านท่อเวนจูรี (Venturi) ทำให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างความดันที่ทางเข้าของท่อเวนจูรี และความดันที่คอคออดของท่อ ซึ่งถูกใช้ในการจัดปริมาณของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมจากห้องลูกลอยเข้าไปผสมกับอากาศที่คอคออดหลังจากท่อเวนจูรีจะเป็นลิ้นเร่งซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการไหลของสารผสมอากาศกับเชื้อเพลิง และควบคุมกำลังที่ออกจากเครื่องยนต์ในที่สุด สำหรับเครื่องยนต์ที่ใช้ระบบหัวฉีดเชื้อเพลิงแบบฉีดเข้าที่ช่องไอดี เชื้อเพลิงจะถูกฉีดผ่านหัวฉีดโดยหัวฉีดจะถูกควบคุมโดยชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรับสัญญาณจากตัวรับรู้ (Sensor) และสวิทช์ต่าง ๆ แล้วนำไปประมวลผล และส่งสัญญาณไปให้หัวฉีดเพื่อทำการฉีดเชื้อเพลิงออกไปในปริมาณที่ถูกต้อง

โดยทั่วไปเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยประกายไฟสามารถจำแนกตามกระบวนการทำงานออกเป็น 2 ลักษณะ คือ เครื่องยนต์ 2 จังหวะ (Two-stroke Engine) และเครื่องยนต์ 4 จังหวะ (Four-stroke Engine) การวิจัยนี้กล่าวถึงจกัรยานยนต์เครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะเป็นหลัก เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้งานของจกัรยานยนต์เครื่องยนต์แบบ 4 จังหวะมากกว่าเครื่องยนต์แบบ 2 จังหวะ เครื่องยนต์ 4 จังหวะ เป็นเครื่องยนต์แบบลูกสูบชักที่มีกระบวนการในการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นแรงขับเคลื่อนทางกล จำนวน 4 กระบวนการ หรือ 2 รอบ การหมุนของเพลาคอเหวี่ยงเพื่อให้ครบ 1 วัฏจักรการทำงาน การจุดระเบิดของกระบอกสูบเกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง (Fuel) ผสมกับก๊าซไอดี (Intake) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม รวมทั้งแรงอัดอากาศในจังหวะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ขึ้นไปตำแหน่งศูนย์ตาย (Top Dead Center) จากนั้นเกิดประกายไฟจากหัวเทียน ทำให้เกิดการระเบิดขึ้นหลังจากเกิดการระเบิดแล้วก็จะเกิดไอเสีย (Exhaust) ชั้บออกไปหาท่อไอเสีย และก็จะเกิดเหตุการณ์นี้ซ้ำ ๆ กันไป

2.3 จักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นรูปแบบของพาหนะสองล้อที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งเก็บพลังงาน (Battery) ไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ ดังนั้นระยะทางการวิ่งจึงขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาด และชนิดของแบตเตอรี่ รวมทั้งน้ำหนักบรรทุกทุก จึงไม่มีการปล่อยมลพิษเมื่อเปรียบเทียบกับจักรยานยนต์สันดาปภายในที่มีเผาไหม้เชื้อเพลิง จักรยานยนต์ไฟฟ้าได้ชื่อว่าเป็นพาหนะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีใช้งานมาแล้วหลายปีแต่ 7 ปีหลังได้รับความนิยมอย่างสูงในประเทศต่าง ๆ โดยเฉพาะในประเทศไทย ขณะนี้ในประเทศไทยตลาดจักรยานยนต์ไฟฟ้ากำลังเติบโตด้วยเช่นกันอันเป็นผลมาจากราคาน้ำมันที่พุ่งสูงขึ้นเรื่อย ๆ ประกอบกับกระแสอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

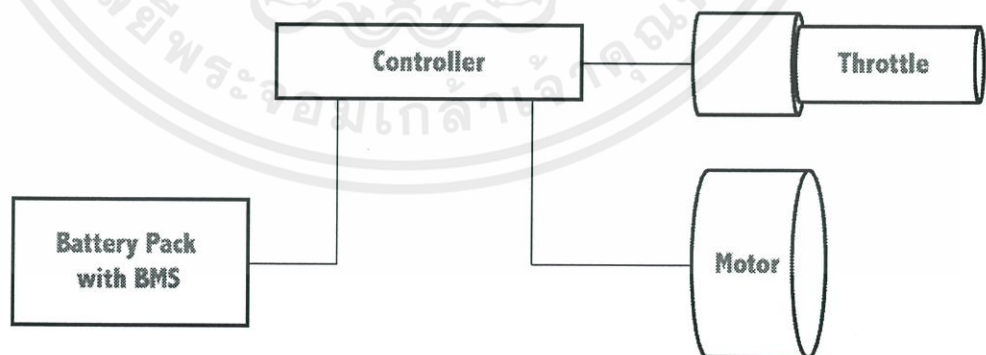
2.3.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นยานพาหนะซึ่งขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าแทนการใช้เครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้สันดาปภายใน รถไฟฟ้าใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานแทนที่น้ำมัน หรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าในรถไฟฟ้าจะเปลี่ยนไฟฟ้าซึ่งโดยปกติมาจากชุดแบตเตอรี่ให้เป็นพลังงานกลเพื่อการขับเคลื่อนล้อ เมื่อเปรียบเทียบกับรถที่ใช้ น้ำมันองค์ประกอบของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีความซับซ้อนที่น้อยกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยหลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วยระบบต่าง ๆ ดังนี้

ระบบกำลัง หมายถึง จักรยานยนต์ไฟฟ้าจะเก็บพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ และนำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยมีเครื่องควบคุมการทำงานของชุดแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS)

ระบบพลังงาน หมายถึง การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าจากที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์จะถูกกำหนดโดยตัวควบคุมเครื่อง (Motor Controller) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของระบบพลังงาน

การขับเคลื่อน หมายถึง หลักการพื้นฐานของยานยนต์ไฟฟ้าก็คือการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า



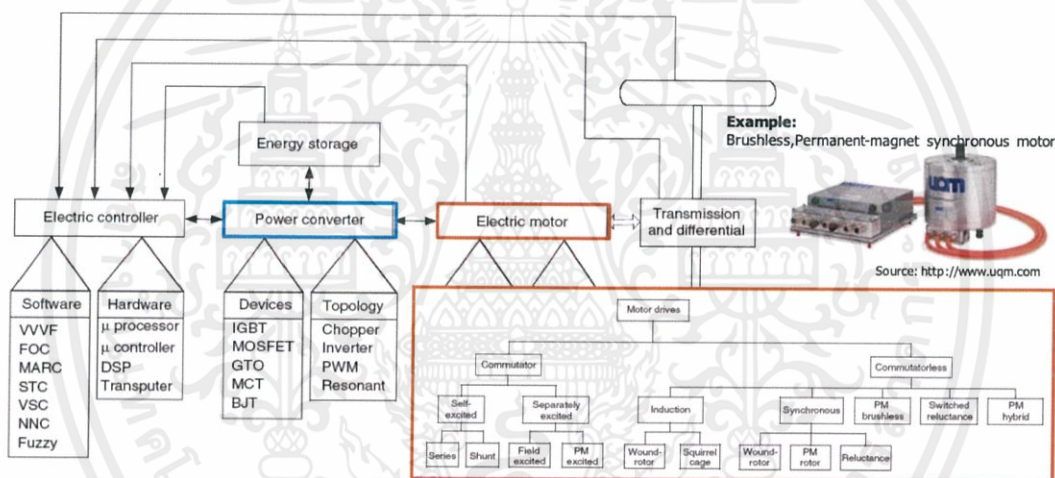
รูปที่ 2.2 หลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

2.3.2 อุปกรณ์ในจํกรยานยนต์ไฟฟ้า

2.3.2.1 มอเตอร์

หมายถึง จํกรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ามีหลายชนิดแล้วแต่เทคโนโลยีที่มีผลกับราคาและความซับซ้อน โดยมอเตอร์ที่นิยมนำมาใช้กับจํกรยานยนต์ไฟฟ้ามี 2 แบบหลัก ๆ คือ แบบมีแปรงถ่าน (Brush DC Motor) และแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ซึ่งมอเตอร์แบบแปรงถ่านมีการใช้งานน้อยเนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ แต่ชุดควบคุมจะง่ายกว่า และราคาถูกกว่าเนื่องจากไม่มี Hall sensor บ้อนกลับ และโดยปกติเป็นการควบคุมแบบเปิด (Open-loop Controller)

การประยุกต์ใช้การขับเคลื่อนมอเตอร์ไร้แปรงถ่านทั้งในยานยนต์ไฟฟ้า และในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีเหตุผล คือ การมีอายุใช้งานที่ยาวนาน ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ และดูแลรักษาน้อย แม้ว่าอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบนี้มีราคาที่แพงกว่าคอนเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงมีแปรงถ่าน แต่ก็มีราคาลดลงตามเวลาที่ผ่านไปเนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.3 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

2.3.2.2 แบตเตอรี่

หมายถึง จํกรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ราคาของแบตเตอรี่มีตั้งแต่ราคาถูกจนถึงราคาแพง แต่เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของจํกรยานยนต์ไฟฟ้า

หัวใจของจํกรยานยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ คุณภาพของแบตเตอรี่ส่งผลถึงการขับเคลื่อนจํกรยานยนต์ไฟฟ้า การเลือกแบตเตอรี่ที่มีคุณภาพดีจึงเป็นสิ่งสำคัญ แบตเตอรี่ที่นิยมในปัจจุบันมี 3 ประเภท SLA (Seal Lead Acid), Li-NiCoMn และ LiFePO₄

แบตเตอรี่แบบ SLA มีราคาถูกแต่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก โดยทั่วไปมีความจุ 12 V 7 AH ถึง 12 V 18 AH มีน้ำหนักตั้งแต่ 2-7 กิโลกรัมต่อแบตเตอรี่ 1 ก้อน เหมาะกับการใช้งานไม่หนักมาก ประสิทธิภาพต่ำ ปกติแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดจะมีรูสำหรับระบายอากาศ

แบตเตอรี่ LiFePO₄ สามารถอัดประจุใช้ได้ถึง 2,000 ครั้ง โดยการอัดประจุให้เต็มเสมอหลังการใช้งานจะสามารถยืดอายุการใช้งานได้ เป็นแบตเตอรี่ที่มีความปลอดภัยสูง ไม่ระเบิดหากตกหล่นหรือลัดวงจร มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีประสิทธิภาพสูง

แบตเตอรี่ Li-NiCoMn มีคุณภาพรองจากแบตเตอรี่ LiFePO₄ อายุการใช้งาน 800 ครั้ง ราคาไม่สูงมาก มีประสิทธิภาพต่ำกว่า LiFePO₄ แต่สูงกว่า SLA

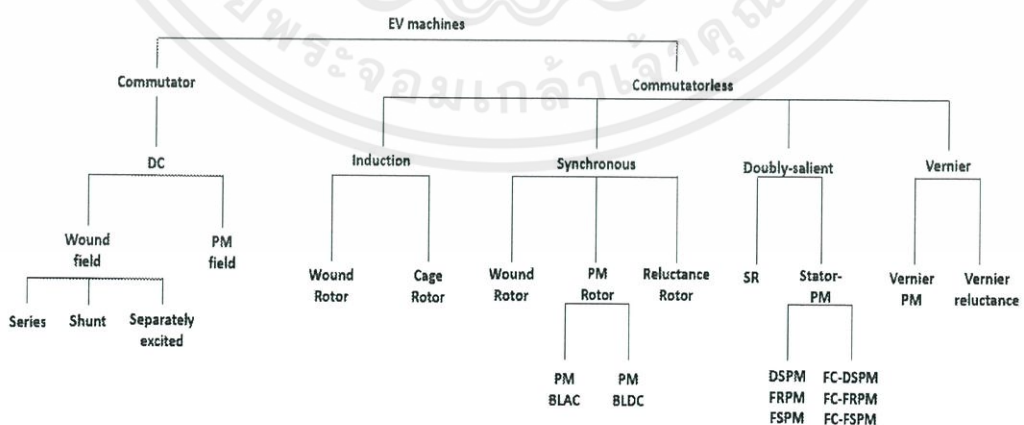
2.3.2.3 ชุดควบคุมมอเตอร์

หมายถึง ชุดควบคุมจะขึ้นอยู่กับว่าใช้กับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน หรือเป็นมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน มอเตอร์ทั้งสองแบบเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านมีการใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากการบำรุงรักษาต่ำ ไม่ต้องเปลี่ยนแปรงถ่าน

ชุดควบคุมประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การเปิดปิดสวิตช์ แต่การใช้งานทั่วไปจะใช้การควบคุมแบบปรับความเร็วตามความต้องการ โดยมอเตอร์จะถูกสั่งงานจากคันเร่ง และชุดเบรกทำหน้าที่ตัดการทำงานของชุดควบคุม

2.4 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน หรือเรียกว่า Brushless DC motor (BLDC) ที่เลือกมาใช้ในการศึกษานี้เป็นมอเตอร์ซิงโครนัส หรือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) ซึ่งต้องใช้ไฟสามเฟสในการขับ ซึ่งในอดีตการใช้งานมอเตอร์ AC Synchronous ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟสามเฟส มอเตอร์เหล่านี้จะหมุนด้วยความเร็วที่เป็นจำนวนเท่า หรือที่เรียกกันว่า ซิงค์ของความถี่ของไฟสามเฟสที่จ่าย เช่น 50 Hz ข้อจำกัดในการปรับความเร็วรอบจึงทำให้มอเตอร์ประเภทนี้ไม่ถูกใช้งานมากนักในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่ว ๆ ไปในครัวเรือน ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันเราสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ค่าต่าง ๆ โดยไม่ต้องซิงค์กับ 50 เฮิร์ตซ์ โดยการใช้อุปกรณ์การขับด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งทำงานโดยการรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งก็คือ ดีซีมอเตอร์ใช้วิธีสลับทิศทางการจ่ายกระแส (Commute) จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้ขดลวดผ่าน Commutator ซึ่งใช้แปรงถ่านในการทำหน้าทีนี้ แต่ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ถูกออกแบบให้ขดลวดสเตเตอร์รับกระแสไฟฟ้า และมีแม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์หมุนได้ แล้วใช้วิธีการสลับทิศทางการจ่ายให้ขดลวดด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนการใช้แปรงถ่านจึงกลายเป็นที่มาของชื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.4 มอเตอร์ชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับประเภทซิงโครนสมอเตอร์ มีโรเตอร์ (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวร มีทั้งแบบแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส หรือหลายเฟส โดยทั่วไปนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแบบแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส เพราะให้แรงบิดมาก มีการกระเพื่อมของแรงบิดน้อย และถูกนำมาใช้ในโครงการนี้ โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านประกอบด้วย 3 ส่วน คือ สเตเตอร์ (Stator), แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF), โรเตอร์ (Rotor) และเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect Sensor)

2.5.1 สเตเตอร์ (Stator)

สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ประกอบด้วยแผ่นเหล็กอัดกันเป็นชั้น ๆ มีขดลวดพันอยู่ภายในตามช่องสล็อต (Slot) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งคล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแต่จะมีการพันมีแตกต่างกันไป ขดลวดแต่ละขดมาจากการนำเส้นลวดจำนวนมากมารวมกันเป็นขดลวดหนึ่งขด หรือมากกว่าจะถูกนำไปวางในช่องสล็อต และต่อกันเป็นวงจรเพื่อสร้างขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นจำนวนคู่ ซึ่งสเตเตอร์จะเป็นส่วนที่ใหญ่หนึ่งในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ขดลวดในส่วนของสเตเตอร์มีอยู่หลัก ๆ ด้วยกันสองแบบ คือ การพันขดลวดแบบ Sinusoidal และขดลวดแบบ Trapezoidal ความแตกต่างของการพันขดลวดสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับ การพันขดลวดที่แตกต่างกัน รูปแบบการพันขดลวดที่แตกต่างกันทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF) ที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 เป็นรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้าต้านกลับหรือ Back EMF แบบ Sinusoidal และแบบ Trapezoidal ตามลำดับ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะถูกนำไปใช้งานเกี่ยวกับ หุ่นยนต์ และงานที่ต้องใช้การเคลื่อนที่เช่นมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า โดยใช้ในลักษณะ Hub motor



รูปที่ 2.5 ขดลวดใน slot ของสเตเตอร์ใน Hub motor

2.5.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF)

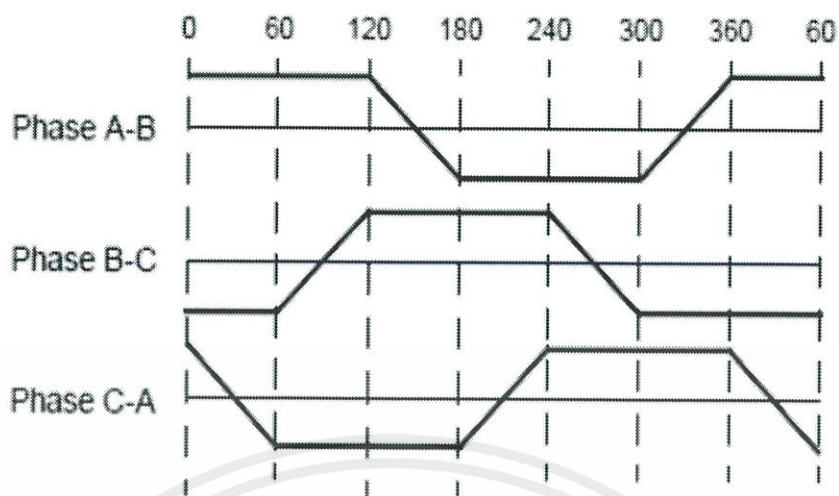
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ คือ การหมุนของสนามแม่เหล็กไปตัดกับขดลวดของสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ หรือเรียกอีกชื่อว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$E = K_E W \quad (2.1)$$

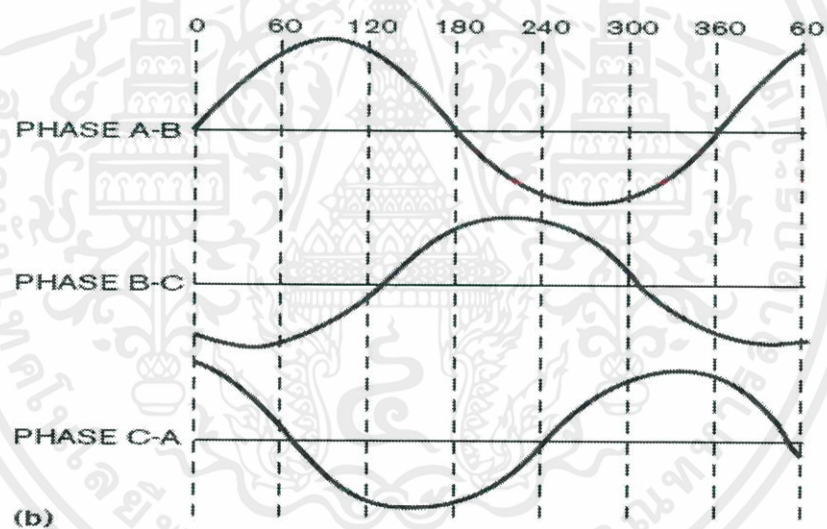
โดยที่ ค่า K_E คือ ค่าครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าคงที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

ทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับจะสลับตามขั้วของแม่เหล็กถาวรที่เปลี่ยนตำแหน่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับนี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการป้องกันทิศทางของกระแสไฟฟ้าอินพุต โดยทั่วไปจะแบ่งชนิดของมอเตอร์จากการใช้เกณฑ์ว่าอินพุต เป็นกระแสไฟฟ้าตรง (DC) หรือกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) แต่มอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจริง ๆ แล้วถือเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) เพราะสร้างสัญญาณคลื่นออกมาเป็น Trapezoidal หรือ Quasi-Square) ภายหลังจึงมีการแยกประเภทจากสัญญาณคลื่นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Back EMF) อีกด้วย ซึ่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะสร้างสัญญาณคลื่นแบบ Trapezoidal และมอเตอร์ซิงโครนัส Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) จะสร้างแบบ Sinusoidal Back EMF





รูปที่ 2.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับแบบ Trapezoidal



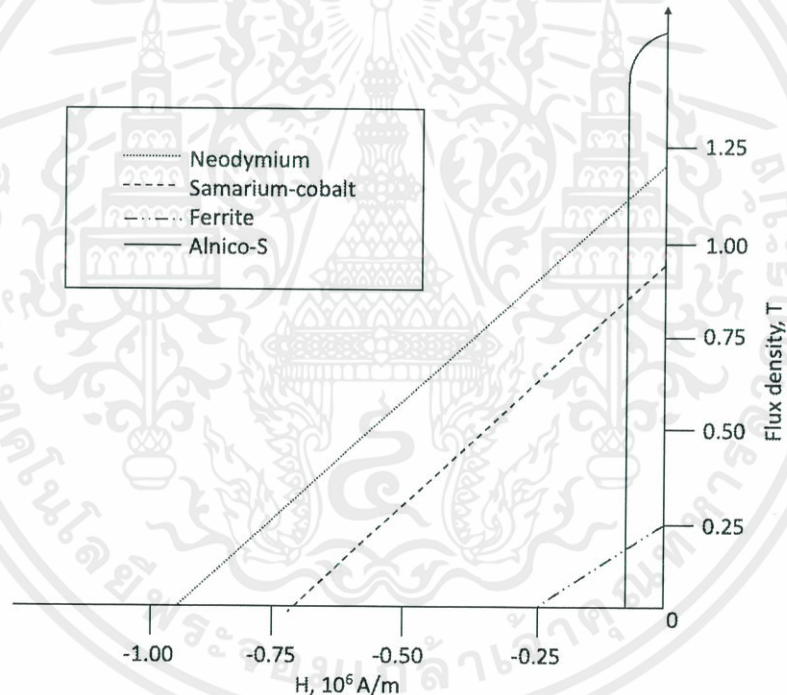
รูปที่ 2.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับแบบ Sinusoidal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 โรเตอร์ (Rotor)

โรเตอร์ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยโรเตอร์ มอเตอร์ชนิดนี้ทำมาจากแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) ซึ่งมีขั้วทางไฟฟ้า คือ ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) เนื่องจากต้องการให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กในโรเตอร์มีความหนาแน่นสูง วัสดุส่วนใหญ่ที่นำมาทำโรเตอร์ คือ แม่เหล็กเฟอร์ไรต์ และเนื่องจากเทคโนโลยีสมัยนี้มีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงทำให้แม่เหล็กอัลลอยด์ซึ่งมีความหนาแน่นแม่เหล็กสูงกว่าทำให้โรเตอร์สามารถบีบอัดได้มากขึ้น จึงได้รับความนิยมสูงกว่า และมีการปรับปรุงแม่เหล็กอัลลอยด์ทำให้โรเตอร์จากเหล็กอัลลอยด์มีแรงบิดสูงกว่าแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ โดยที่มอเตอร์มีขนาดเท่ากัน

ตัวอย่างวัสดุที่นำแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) มีหลายชนิดเช่น Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) แม่เหล็กชนิดนี้ประกอบไปด้วย นีโอมีเดียมเหล็ก และโบรอน ซึ่งมีค่า Remanence (Br) และ Coercivity (Hc) สูง การเปรียบเทียบกราฟตัวอย่างคุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งพบว่าวัสดุแม่เหล็กชนิด Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) ให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Flux density) และความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Intensity, H) สูงที่สุด

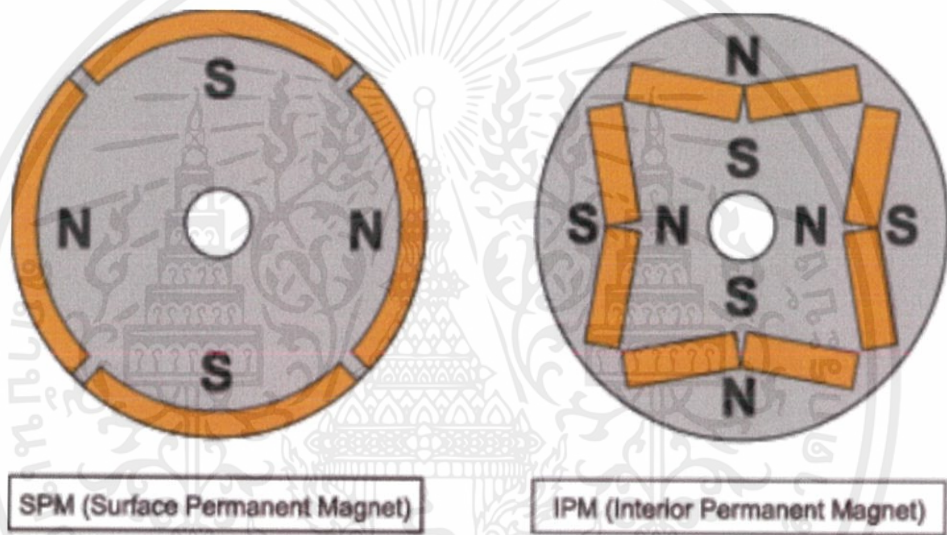


รูปที่ 2.8 ลักษณะของวัสดุแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาตามลักษณะการติดตั้งแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. โรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งบนผิวรอบนอกของโรเตอร์ (Surface Mounted Permanent Magnet Rotor) แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยใช้แท่งแม่เหล็กถาวรที่มีผิวโค้งยึดติดบนผิวของโรเตอร์ด้วยกาวชนิดพิเศษเพื่อป้องกันไม่ให้หลุดง่าย และยังคงให้ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูง

2. โรเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรถูกฝังภายในโรเตอร์ (Interior Permanent Magnet Rotor) แสดงดังรูปที่ 2.9 โรเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้ในงานที่ต้องการความเร็วรอบมอเตอร์สูง เนื่องจากแม่เหล็กถาวรถูกฝังในตัวโรเตอร์ทำให้ทนทาน วัสดุแม่เหล็กถาวรไม่หลุดร่อนที่รอบความเร็วสูง อย่างไรก็ตามโรเตอร์ชนิดนี้มีกระบวนการผลิตที่ยากกว่าแบบแม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งบนผิวรอบนอกของโรเตอร์ทำให้ราคาก็ยังสูงขึ้นไปตาม



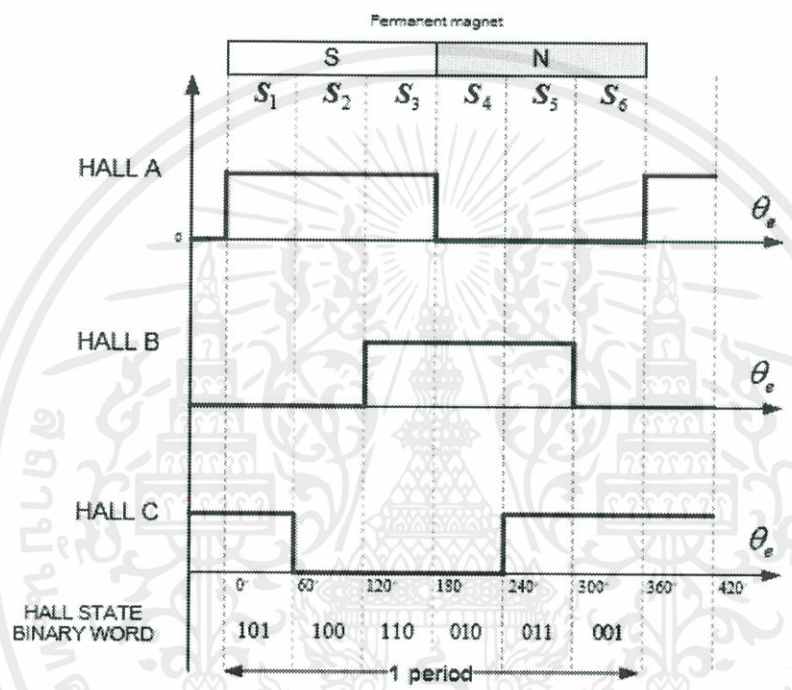
รูปที่ 2.9 แม่เหล็กถาวรถูกติดตั้งผิวรอบนอกโรเตอร์ (ซ้าย) และแม่เหล็กถาวรถูกฝังภายในโรเตอร์ (ขวา)

2.5.4 เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect sensors)

เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่สเตเตอร์ (Stator) เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ในการใช้ทั่วไปเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ 3 ตัวติดอยู่กับสเตเตอร์ (Stator) เมื่อโรเตอร์หมุนไปนั้นจะหมุนผ่านตำแหน่งของเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ที่ติดตั้งไว้ และเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์จะทำหน้าที่ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์และส่งสัญญาณไฟฟ้า เพื่อควบคุมการเปิดปิดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเมื่อฮอลล์เซนเซอร์เจอขั้วเหนือของโรเตอร์จะส่งลอจิก High และเมื่อเจอขั้วลบของโรเตอร์จะส่งลอจิก Low เพื่อบอกลำดับในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน หรือเรียกว่าการคอมมิวเตชัน (Commutation) กระแสไฟฟ้าให้ถูกต้องโดยตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์มีหลายชนิด เช่น เอ็นโคเดอร์ (Encoder), รีโซลเวอร์ (Resolver) และ เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect sensor) ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวตรวจจับแบบฮอลล์เอฟเฟกต์ เพราะมีขนาดเล็กและราคาถูก ใช้งานง่าย เมื่อ

นำมาใช้งานกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านวางตำแหน่งเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ จะวางให้มีความต่างเฟสกัน (Phase shift) 60 หรือ 120 ของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสามเฟส หรือสามชุด ขดลวดขึ้นอยู่กับกรอกแบบของผู้ผลิต

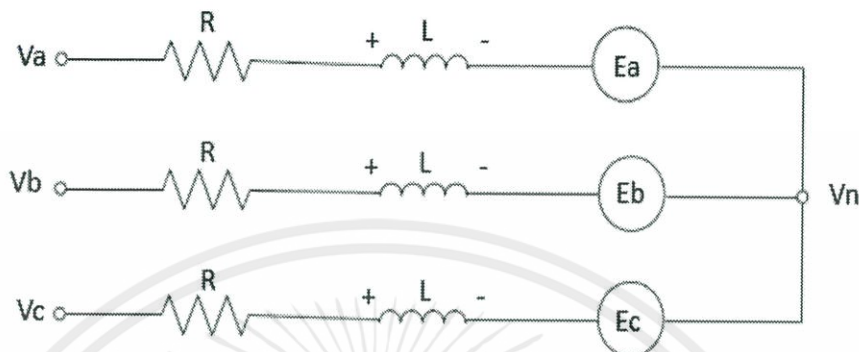
เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์แต่ละตัวจะให้สัญญาณเอาต์พุต เป็นลอจิก 1 (High) เมื่อเจอขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์และให้ลอจิกเป็น 0 (Low) เมื่อเจอขั้วใต้ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ เนื่องจากในโครงงานนี้ตำแหน่งติดตั้งของฮอลล์เซนเซอร์วางกันห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า ทำให้ในหนึ่งคาบการหมุนแบ่งสัญญาณการทำงานออกมาเป็น 6 ช่วง (Commutation States) ซึ่งแต่ละช่วงห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า ซึ่งทำให้ครบรอบทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 สัญญาณของเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์

2.5.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

เพื่อให้สามารถเข้าใจ และอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ ของการขับเคลื่อนมอเตอร์ เช่น กระแสไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, ความเร็วรอบ และแรงบิดที่สภาวะชั่วขณะ และสภาวะคงตัวของมอเตอร์ จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.11 ซึ่งเป็นวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ขดลวดสเตเตอร์ถูกเชื่อมแบบววาย ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่นิยมเชื่อมต่อขดลวดที่สเตเตอร์แบบววาย จึงทำให้สามารถเขียนสมการแรงดันสเตเตอร์ได้ดังนี้

$$V_{an} = R I_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (2.2)$$

$$V_{bn} = R I_b + L \frac{dI_b}{dt} + E_b \quad (2.3)$$

$$V_{cn} = R I_c + L \frac{dI_c}{dt} + E_c \quad (2.4)$$

โดยที่	V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	คือ แรงดันไฟฟ้าด้านเทียบกับจุดต่อร่วมนิวทรอลในแต่ละเฟส (V)
	E_a, E_b, E_c	คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับในแต่ละเฟส (V)
	R	คือ ตัวต้านทานของขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Ω)
	$L = L_s - M$	คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Ω)
	L_s	คือ ความเหนี่ยวนำขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส (H)
	M	คือ ความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างเฟส (H)

สำหรับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_a = K_E \omega_m f_a(\theta) \tag{2.5}$$

$$E_b = K_E \omega_m f_b(\theta) \tag{2.6}$$

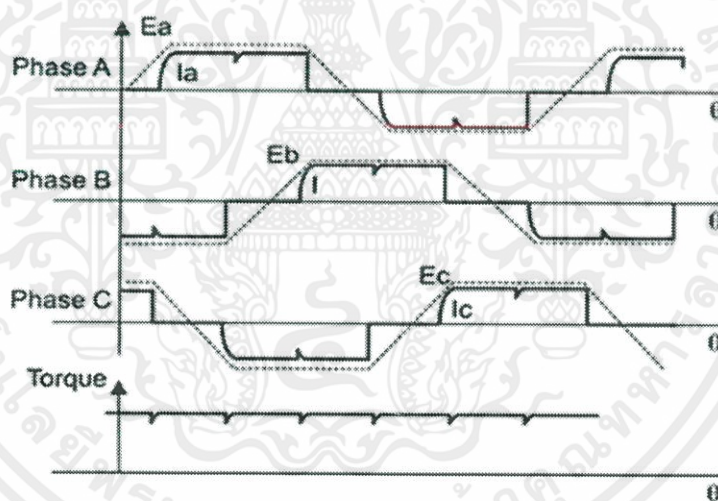
$$E_c = K_E \omega_m f_c(\theta) \tag{2.7}$$

โดยที่ E_a, E_b, E_c คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับในแต่ละเฟส (V)
 K_E คือ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ (V หรือ rad/s)
 ω_m คือ ความเร็วรอบทางกลของมอเตอร์ (rad/s)
 $f_a(\theta), f_b(\theta), f_c(\theta)$ คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นกับตำแหน่งมุมโรเตอร์ซึ่งมีการกระจายเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Back EMF) ที่เปลี่ยนค่าตามตำแหน่งโรเตอร์

ซึ่งจากสมการ (2.5) - (2.7) พบว่าค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับมีค่าเท่ากับดังนี้

$$E = K_E \omega_m \tag{2.8}$$

ซึ่งความสัมพันธ์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ และกระแสไฟฟ้า

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับมอเตอร์มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Back EMF) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงถูกจ่ายเข้าขดลวดมอเตอร์แต่ละเฟส ในขณะที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับมอเตอร์คงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.12

จากนั้นกำลังไฟฟ้า และแรงบิดมอเตอร์จึงถูกนำมาพิจารณา โดยสมการกำลังไฟฟ้า และแรงบิดของมอเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.9) และ (2.10)

$$P_e = E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c \quad (2.9)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = [E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c] \frac{1}{\omega_m} \quad (2.10)$$

โดยที่ T_e คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N.m)
 P_e คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (W)
 ซึ่งแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านสัมพันธ์กับสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ดังสมการ (2.11)

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (2.11)$$

(2.12) นอกจากนี้ความสัมพันธ์ความเร็วเชิงมุม และตำแหน่งของมอเตอร์แสดงดังสมการ

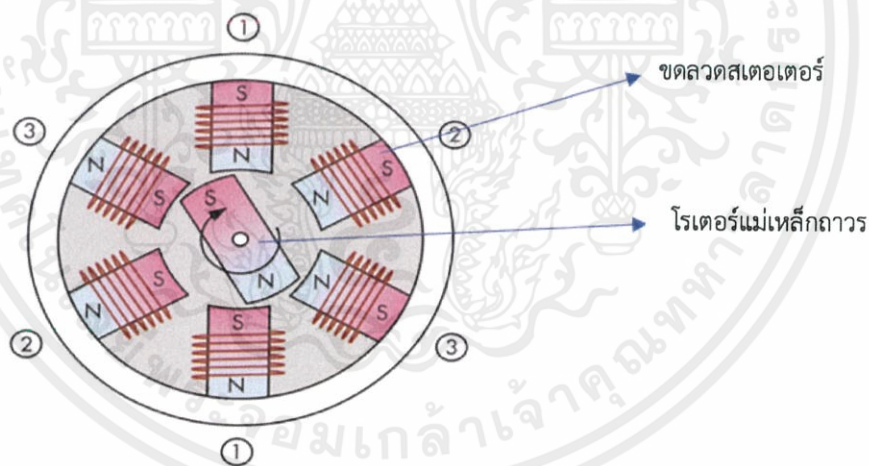
$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.12)$$

โดยที่ T_L คือ แรงบิดของโหลด (N.m)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (N.m)
 B คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมอเตอร์ และโหลด

2.6 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยการเริ่มหมุนจะอาศัยแรงดูด (Attraction) และแรงผลัก (Repulsion) ระหว่างขั้วแม่เหล็กในมอเตอร์ไฟฟ้ามีขดลวดทั้งหมดสามชุด โดยกระแสจะจ่ายเข้าขดลวดชุดที่หนึ่งที่สเตเตอร์ และสร้างขั้วแม่เหล็กนั้นเป็นแรงดูดให้สนามแม่เหล็กครอบรอบของขั้วที่ต่างกัน เกิดลำดับการเปลี่ยนแปลงแต่ละชุดของขดลวดโดยอาศัยหลักการคอมมิวเตชันทำให้โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.13 ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนต่อเนื่องไปได้

ซึ่งการคอมมิวเตชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านจะอาศัยการทำงานครึ่งละสองชุดขดลวด โดยมีขดลวดหนึ่งเป็นขดที่จ่ายพลังงานเป็นบวก (กระแสไหลเข้าขดลวด) และขดที่สองเป็นลบ (กระแสไหลออก) และขดลวดชุดที่สามไม่มีการกระตุ้น จะทำให้เกิดแรงบิด เพราะมีการตัดกันระหว่างสนามแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์กับแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กทั้งสองทำมุม 90 องศาซึ่งกันและกัน และตกลงมาเมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่พร้อมกัน เพื่อที่จะให้มอเตอร์มีการหมุนอย่างต่อเนื่อง สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างโดยขดลวด จะต้องเลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ให้หมุนตามสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์ให้ทันโดยอาศัย การบอกตำแหน่งของฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall sensor) และหลักการคอมมิวเตชัน (Commutation) ซึ่งควบคุมโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ กล้องควบคุม (Controller) ซึ่งจะควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยการควบคุมสวิตช์กำลังในการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในแต่ละขดลวดของสเตเตอร์



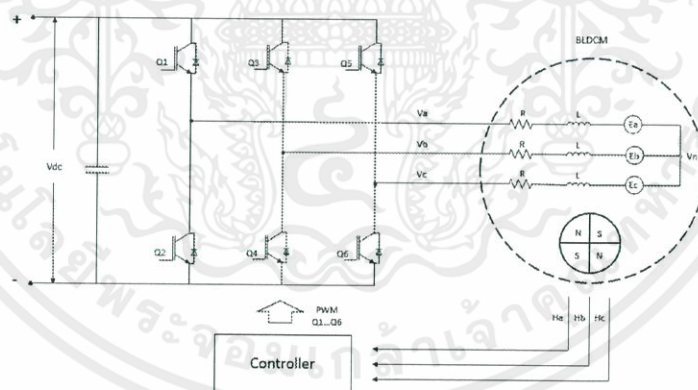
รูปที่ 2.13 โรเตอร์ติดตามการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็ก

2.6.1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านสามารถแบ่งได้สองประเภท คือ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ และการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านแบบไม่ใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ แต่ในโครงการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แบบมีตัวตรวจจับโรเตอร์ คือ เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ติดที่ส่วนของสเตเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดทางเทคนิคเฉพาะของกล่องควบคุมชุดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Controller) ดังต่อไปนี้

2.6.2 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านแบบใช้ตัวตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

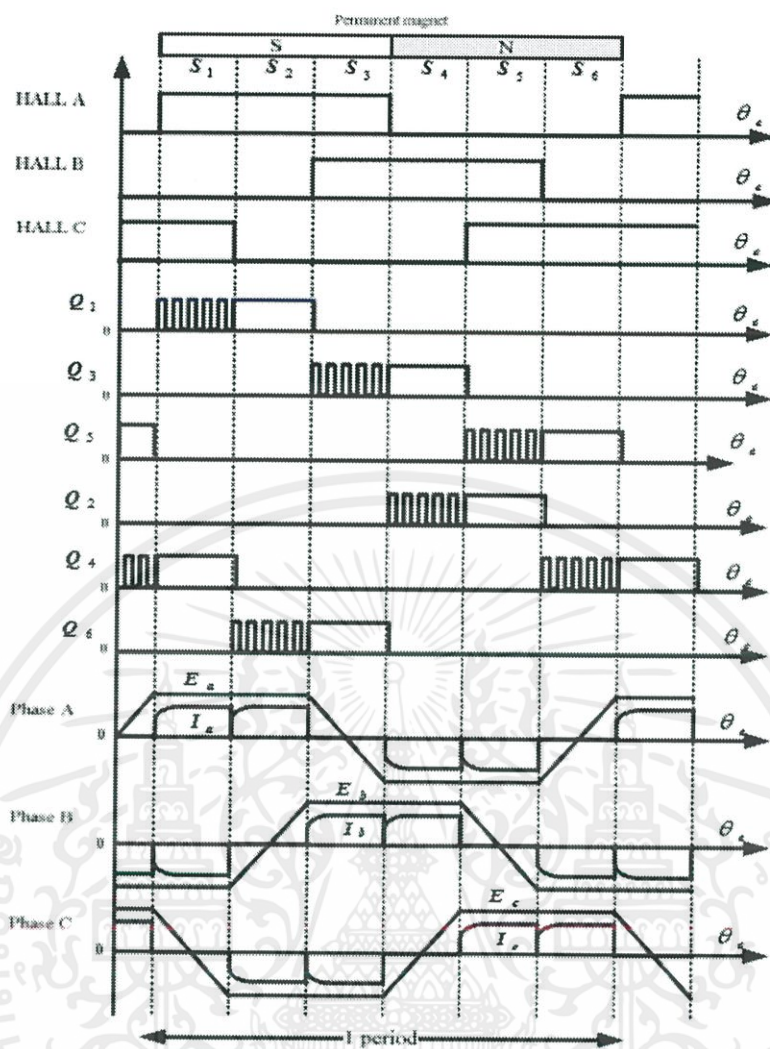
เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ที่ทำหน้าที่จัดเรียงกระแสเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบปกติ ดังนั้นการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้จึงจำเป็นต้องใช้วงจรสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งวงจรมีตัวควบคุมอยู่ในกล่องควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้แล้ว วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วยสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งหมด 6 ตัว สวิตซ์ที่ใช้จะเป็น MOSFETs, IGBTs หรือ Bipolar Transistors ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ส่วนใหญ่จะเป็น MOSFETs โดยที่ Q1,Q3,Q5 เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชุดบน และ Q2,Q4,Q6 เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชุดล่าง นอกจากนี้ยังมีตัวควบคุมที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์โดยรับข้อมูลเข้ามาเป็นตำแหน่งโรเตอร์ที่ได้มาจากตัวฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ส่งไปให้กล่องควบคุม (Controller) สั่งการในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.14 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

สำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้ นิยมใช้วิธีการขับเคลื่อนแบบ Six-Step โดยแบ่งช่วงการคอมมิวเตชัน (Commutation States) หรือช่วงเปลี่ยนทิศทางไหลของกระแสไฟฟ้าเป็น 6 ช่วง คือ S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 แต่ละช่วงจะห่างกัน 60 องศาไฟฟ้า โดยในทุกช่วงของการหมุนจะมีการจ่ายแรงดันผ่านขดลวดของมอเตอร์ทีละ 2 เฟส ส่วนขดลวดอีก 1 เฟสจะถูกปล่อยลอยไว้ เมื่อแรงดันไฟฟ้าถูกจ่ายให้กับขดลวดทั้งสองเฟส กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าไปที่ขดลวดเฟสหนึ่ง และไหลออกอีกเฟสหนึ่ง จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลทั้งช่วงบวก และช่วงลบ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละเฟสมีช่วงการนำกระแสอยู่ 120 องศาไฟฟ้า และมีลักษณะเสมือนสี่เหลี่ยม (Quasi-Square) ดังแสดงดังรูปที่ 2.15

เพื่อให้สามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ จึงมีการนำเทคนิคพัลส์วิดธมอดูเลชัน (PWM) มาใช้ในการกำหนดช่วงเวลาในการเปิด-ปิด สวิตช์ทั้ง 6 ตัว เพื่อควบคุมการส่งกระแสเข้าขดลวดที่สเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน เมื่อพิจารณาช่วงการนำกระแส 120 องศาไฟฟ้าของสวิตช์แต่ละตัว ช่วงการนำกระแสไฟฟ้านี้ถูกแบ่งเป็น 2 ช่วงย่อย คือ 60 องศาไฟฟ้าแรก สวิตช์นำกระแส และหยุดนำกระแสสลับไปมาเนื่องจากการกำหนดค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) การปรับค่าดิวตี้ไซเคิล หรืออัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาเปิดสวิตช์ (T_{on}) กับคาบเวลาสวิตช์ซึ่ง (T_s) เพื่อควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ของกล่องควบคุมไว้ที่ค่าหนึ่งเรียกว่า การทำงานแบบ PWM และช่วง 60 องศาไฟฟ้าถัดมา สวิตช์นำกระแสต่อเนื่อง และการทำงานของคู่สวิตช์ในแต่ละเฟส Q1, Q2 สำหรับ เฟส A Q3, Q4 สำหรับเฟส B และ Q5, Q6 สำหรับเฟส C ซึ่งสัญญาณควบคุมการเปิดปิดสวิตช์ชุดบนกับชุดล่าง ซึ่งสัญญาณของการควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัว แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 สัญญาณฮอลล์เซ็นเตอร์, สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ แบบ Trapezoidal, สัญญาณเข้าที่พุ่มแรงบิด (Torque) และกระแสเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดไร้แปรงถ่าน

2.7 ลำดับในการคอมมิวเตชัน

จากรูปที่ 2.15 สัญญาณควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้ง 6 ตัวแบบ PWM, แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับ และกระแสไฟฟ้าเฟส แสดงลำดับการสวิตช์ที่สัมพันธ์กับเซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์สอดคล้องกับการหมุนทุก ๆ 60 องศาไฟฟ้าหนึ่งในฮอลล์เซ็นเซอร์ จะเปลี่ยนสถานะและจะต้องทำทั้ง 6 ขั้นตอนจนครบรอบทางไฟฟ้า S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

ช่วง S1 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส A (Hall A) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็น 1 ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเตอร์ เฟส B (Hall B) มีสถานะลอจิกเป็น 0 และตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส C (Hall C) มีสถานะลอจิกเป็น 1 ตัวควบคุมส่งสัญญาณ PWM ควบคุมการเปิดปิด สวิตช์ Q1 และ Q4 นำกระแสต่อเนื่องทำให้มีกระแสไหลเข้าที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A และเฟส B ส่วนขดลวดมอเตอร์เฟส C ถูกปล่อยลอยไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล

ช่วง S2 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส C (Hall C) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็น 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์ Q1 นำกระแสต่อเนื่อง และ Q6 ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ เฟส A และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C ส่วนขดลวดเฟส B ไม่มีกระแสไหล

ช่วง S3 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์เฟส B (Hall B) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็นลอจิก 1 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์ Q3 นำกระแสไฟฟ้า และ Q6 นำกระแสต่อเนื่อง ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ เฟส B และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส C ส่วนขดลวดเฟส A ไม่มีกระแสไหล

ช่วง S4 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส A (Hall A) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็นลอจิก 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์ Q3 นำกระแสต่อเนื่อง และ Q2 ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ เฟส B และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ส่วนขดลวดเฟส C ไม่มีกระแสไหล

ช่วง S5 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส C (Hall C) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 0 เป็นลอจิก 1 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์ Q5 ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM และ Q2 นำกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ เฟส C และออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส A ส่วนขดลวดเฟส B ไม่มีกระแสไหล

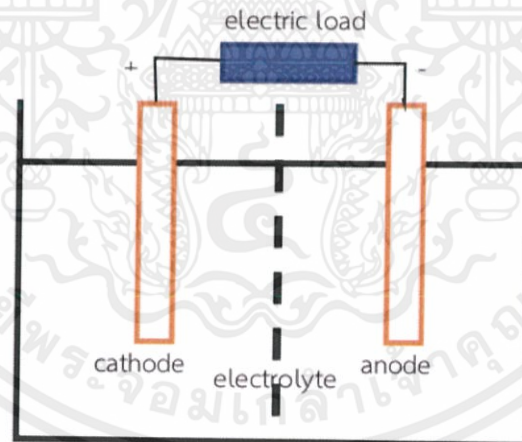
ช่วง S6 : ตัวตรวจจับฮอลล์เซ็นเซอร์ เฟส B (Hall B) เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก 1 เป็น ลอจิก 0 ตัวควบคุมจะสั่งงานสวิตช์ Q5 นำกระแสต่อเนื่อง และ Q4 ถูกควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดมอเตอร์ เฟส C และ ไหลออกที่ขดลวดมอเตอร์เฟส B ส่วนขดลวดเฟส A ไม่มีกระแสไหล และวนกลับมาช่วง S1 อีกครั้งเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ

ตารางที่ 2.1 ลำดับการคอมมิวเตเตอร์

Sequence number	Hall sensor Input			Active PMWs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	1	0	1	Q1	Q4	+	-	OFF
2	1	0	0	Q1	Q6	+	OFF	-
3	1	1	0	Q3	Q6	OFF	+	-
4	0	1	0	Q3	Q2	-	+	OFF
5	0	1	1	Q5	Q2	-	OFF	+
6	0	0	1	Q5	Q4	OFF	-	+

2.8 แบตเตอรี่ในยานยนต์

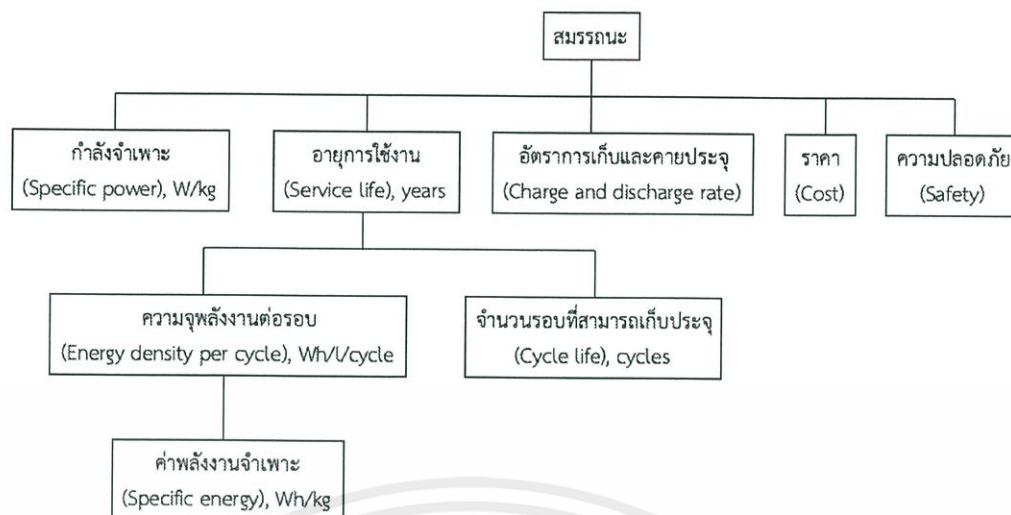
แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักทางเคมีไฟฟ้าในการเก็บพลังงาน ส่วนประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่ประกอบด้วยขั้วแบตเตอรี่ (ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด) และสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แบตเตอรี่จะเป็นทั้งเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) ในขณะใช้งาน และเซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic cell) ในขณะประจุไฟฟ้า ในขณะใช้งานกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแคโทดผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าไปสู่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่

การวัดสมรรถนะของแบตเตอรี่จะวัดกันในหลายมิติ มิติที่สำคัญได้แก่ กำลังจำเพาะ (Specific power, W/kg), อายุการใช้งาน (Service life), อัตราการเก็บและคายประจุ (Charge and Discharge Rate), ราคา(Cost) และความปลอดภัย (Safety) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นกับความจุ (Capacity, Ah) และจำนวนรอบที่สามารถเก็บประจุ (Charge cycles) ซึ่งค่าความจุจะขึ้นกับค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy, Wh/kg) หรือค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density, Wh/l) องค์ประกอบในการพิจารณาสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่าง ๆ

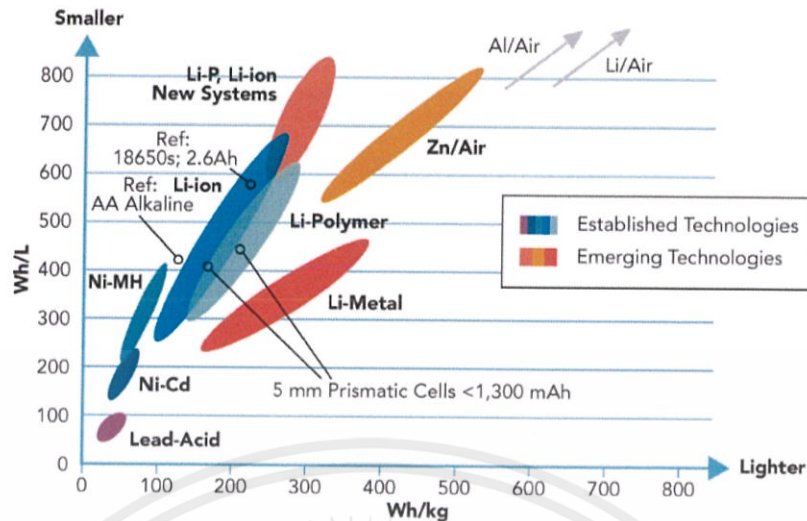
ในกรณีสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า USABC (The United States Advanced Battery Consortium) ได้กำหนดสมรรถนะเป้าหมายของแบตเตอรี่ไว้ โดยมีการกำหนดเป้าหมาย 2 ระยะ คือ เป้าหมายขั้นต่ำ (Minimum goals) สำหรับการนำไปใช้เชิงพาณิชย์ และเป้าหมายระยะยาว (Long-Term Goals) ซึ่งเป็นเป้าหมายที่ทำให้ยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแข่งขันกับรถยนต์ที่ใช้น้ำมันได้ ทั้งนี้สมรรถนะที่ต้องการคือยานยนต์ไฟฟ้าจะต้องสามารถวิ่งได้อย่างน้อย 200 ไมล์ (320 กิโลเมตร) ต่อการชาร์จประจุ 1 ครั้ง และอายุการใช้งานแบตเตอรี่ต้องมากกว่า 100,000 ไมล์ (160,000 กิโลเมตร)

จากปัจจัยองค์ประกอบต่อสมรรถนะแบตเตอรี่ และสมรรถนะเป้าหมายของแบตเตอรี่ ดังที่กล่าวมาจึงเกิดการพัฒนาแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead-Acid Battery) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd Battery) แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮดรอกไซด์ (Ni-Mh Battery) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion Battery) ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละประเภทมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป

ตารางที่ 2.2 สมบัติของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ

สมบัติ	ประเภทของแบตเตอรี่				
	Ni-Cd	Ni-Mh	Lead-Acid	Li-ion	Li-Polymer
Specific Energy (Wh/kg)	45-80	20-120	30-50	110-160	100-130
Cycle Life (Up to 80% of initial capacity)	1,500	300-500	200-300	500-1,000	300-500
Fast charge Time	1 hr	2-4 hr	8-16 hr	2-4 hr	2-4 hr
Overcharge Tolerance	Moderate	Low	High	Very low	Low
Self-discharge per month (Temp. room)	20%	30%	5%	10%	10%
Cell Voltage (nominal)	1.25 V	1.25 V	2 V	3.6 V	3.6 V
Operating Temperature (Discharge)	-40 - 60 °C	-20 - 60 °C	-20 - 60 °C	-20 - 60 °C	0 - 60 °C
Typical battery cost (US\$)	\$50 (7.2 V)	\$60 (7.2V)	\$25 (7.2V)	\$100 (7.2V)	\$100 (7.2V)
Cost per kWh (US\$)	11.00	18.50	8.50	24.00	-
Cost per cycle (US\$)	0.04	0.12	0.10	0.14	0.29

การพัฒนาแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนในปัจจุบันมาจากการพัฒนาแบตเตอรี่ 2 ประเภทหลัก คือ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (รวมแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์) ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะมีองค์ประกอบของตะกั่วที่มีพิษ แต่เทคโนโลยีการรีไซเคิลแบตเตอรี่ประเภทนี้ก้าวหน้าไปมากจนสามารถรีไซเคิลทุกชิ้นส่วนของแบตเตอรี่ประเภทนี้ นอกจากนั้นแบตเตอรี่ตะกั่วกรดยังมีราคา และ Self Discharge Rate ต่ำกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น ๆ การพัฒนาแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจึงยังเป็นที่สนใจในการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่วนแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนนั้นมีข้อดีที่สำคัญ คือ ค่าความจุพลังงานจำเพาะสูง ทำให้น้ำหนักแบตเตอรี่เบา นอกจากนี้ยังไม่มี Memory Effect ซึ่งมีผลต่อการประจุแบตเตอรี่ในครั้งต่อ ๆ ไป แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบ Traditional ที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เหลว มีข้อเสียที่ต้นทุนยังสูง และยังมีปัญหาเรื่องการระเบิดเมื่ออุณหภูมิขึ้นสูง และเกิดการรั่วของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นจึงมีการออกแบบแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ (Li-Polymer Battery) ที่ใช้พอลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์แบบแข็ง (Solid Electrolyte) แบตเตอรี่ประเภทนี้จะมีค่าพลังงานจำเพาะ และกำลังจำเพาะเทียบเคียงกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพราะใช้วัสดุอิเล็กโทรดประเภทเดียวกัน แต่มีข้อดี คือ ไม่เกิดการรั่วของอิเล็กโทรไลต์ ทำให้โอกาสในการระเบิดต่ำกว่า และสามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบรวมไปถึงในรูปทรงที่บาง และมีน้ำหนักเบา เพราะไม่ใช้โลหะเป็นวัสดุหุ้มอิเล็กโทรด (Case) ข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทนี้ คือ มีต้นทุนที่สูงกว่า ความทนทานต่อการชาร์จประจุเกินต่ำ และสามารถเสีรูปอันเนื่องมาจากความร้อนและความดันได้ง่ายกว่า นอกจากนี้ยังมีจำนวนรอบการชาร์จต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบเดิม



รูปที่ 2.18 Region chart ของค่าความหนาแน่นพลังงานและพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ

2.9 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่มีค่าพลังงานจำเพาะสูง เนื่องจากลิเทียมมีน้ำหนักที่เบา สมรรถนะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขึ้นกับวัสดุที่ใช้ทำขั้วแบตเตอรี่ และการออกแบบแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ประเภทนี้ประกอบด้วยขั้วบวกที่ทำจากลิเทียมเมทัลออกไซด์ (LiMO_2) และขั้วลบที่เป็นคาร์บอน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นลิเทียมเฮกซะฟลูออโรฟอสเฟต (LiPF_6) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการคายประจุเป็นดังนี้



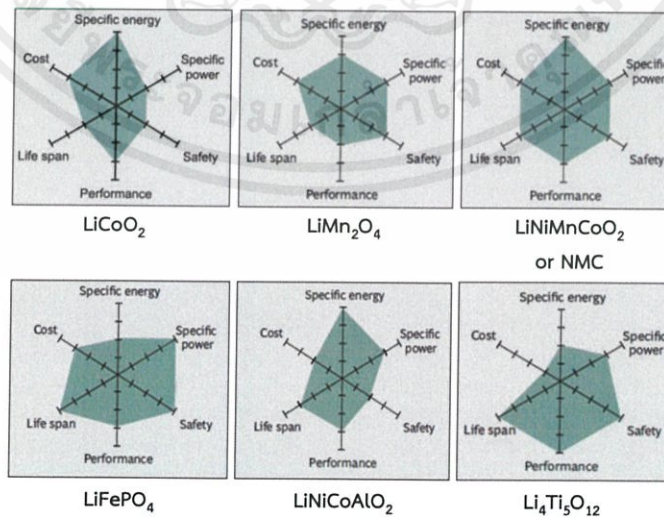
จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าสมรรถนะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขึ้นกับชนิดของวัสดุ การพัฒนาวัสดุสำหรับเป็นขั้วบวกของแบตเตอรี่เริ่มตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1972-1980 ซึ่งใช้วัสดุจากพวก Dichalcogenides เช่น LiTiS_2 , LiAl , LiVSe_2 และพัฒนาต่อมาเป็นวัสดุ Trichalcogenides เช่น Li_2NdSe_3 เป็นต้น แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนก็ยังไม่ถูกพัฒนาจนเป็นผลิตภัณฑ์ออกจำหน่ายได้ จนกระทั่งมีการพัฒนาขั้วอิเล็กโทรดจากออกไซด์ในช่วงปีค.ศ. 1980-1990 โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นสารประกอบของโลหะลิเทียมออกไซด์ที่มีธาตุทรานสิชันเป็นองค์ประกอบ เช่น แมงกานีส โคบอลต์ โครเมียม เป็นต้น การพัฒนาวัสดุขั้วอิเล็กโทรดมีความก้าวหน้าเป็นลำดับจากออกไซด์แบบ Interlayer เป็นออกไซด์ที่มีโครงสร้าง Spinel (LiMnO_2) จนกระทั่งสารประกอบออกไซด์ที่มีธาตุทรานสิชันมากกว่า 1 ธาตุเป็นองค์ประกอบ เช่น LiNiMnCoO_2 (NMC) หรือ LiNiMnAlO_3 จนกระทั่งมีการพัฒนาวัสดุลิเทียมฟอสเฟต เช่น LiFePO_4

ตารางที่ 2.3 สมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำขั้วอิเล็กโทรด

ประเภทของวัสดุ	Nominal Volt limit	Charge Volt limit	Charge and Discharge C-rate	Specific Energy (Wh/kg)	Cycle Life	Safety	Cost
LiCoO ₂	3.6	4.2	1C limit	110-190	500-1,000	น้อย	สูง
LiMn ₂ O ₄	3.7-3.8	4.2	10C cont. 40C pulse	110-120	>500	มาก	ค่อนข้างสูง
LiNiMnCoO ₂	3.7	4.1	5C cont. 30C pulse	95-130	500-1,000	น้อย	ค่อนข้างสูง
LiFePO ₄	3.2-3.3	3.6	35C	95-140	>2,000	มากที่สุด	ถูก

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า LiCoO₂ ไม่เหมาะที่จะใช้เป็นแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากกำลังจำเพาะต่ำ (พิจารณาจาก C-rate) สำหรับแบตเตอรี่ประเภทอื่นต้องพิจารณาองค์ประกอบอื่นร่วมด้วย เช่น อายุการใช้งาน ความปลอดภัย และราคา Cadex Electronics Inc. และ Boston Consulting Group ได้เปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่าง ๆ ไว้ดังแสดงในรูปที่

ในรูปที่ 2.19 องค์ประกอบเรื่องอายุการใช้งาน (Life span) พิจารณาจากจำนวนรอบในการเก็บและคายพลังงาน ส่วนด้านสมรรถนะ (Performance) หมายถึง ความสามารถในการใช้แบตเตอรี่ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น หนาวจัด หรือร้อนจัด ด้านความปลอดภัยพิจารณาเรื่องความร้อนขณะใช้งานและขณะ Overcharge รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ แล้ว LiFePO₄ และ LiNiMnCoO₂ เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากมีกำลังจำเพาะ และอายุการใช้งานสูง ในขณะที่ราคาไม่สูงมากนัก ปัจจุบันการพัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพื่อให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้นจึงยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.19 การเปรียบเทียบองค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO_4)

แบตเตอรี่ LiFePO_4 จะยึดโครงสร้างเหมือนลิเทียมพอลิเมอร์ทั่วไป แต่มีการเปลี่ยนวัสดุที่ขั้วบวกเป็นโลหะแทนการใช้ก๊าซจากวัสดุ เช่น Cobalt Dioxide ทำให้มีความทนทานมากยิ่งขึ้น และราคาถูกลงอีกด้วยเนื่องจากธาตุเหล็กซึ่งหาได้ง่ายบนโลก การเปลี่ยนวัสดุที่ขั้วบวกเป็นโลหะทำให้ปลอดภัยจากปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดความร้อนในแบตเตอรี่แบบลิเทียมพอลิเมอร์แบบทั่วไปเลยทำให้แบตเตอรี่ LiFePO_4 ติดไฟ หรือเกิดเผาไหม้ได้ยากมากหากทำงานเกิดพิคัด หรือขอบเขต ในขณะเดียวกันแบตเตอรี่ LiFePO_4 มีข้อดี และเหมาะกับการเลือกมาใช้เป็นแบตเตอรี่มอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า สาธารณะอีกด้วยหลักการการทำงานเหมือนกันกับแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน แต่มีข้อดีมากกว่าในการเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ และลักษณะการนำไปใช้ในด้านมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าสาธารณะ ข้อดีของแบตเตอรี่ชนิด LiFePO_4 ในการใช้ด้านมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า

1. แบตเตอรี่ลิเทียมเหล็กฟอสเฟตมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และมีวงจรชีวิตมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วไป
2. สามารถทนความร้อนได้ในอุณหภูมิสูงจึงเหมาะกับการใช้งานในประเทศไทย และมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าสาธารณะที่ใช้งานเป็นเวลานาน
3. ไม่มีคุณสมบัติในการติดไฟและเผาไหม้ตัวเอง และมีความปลอดภัยสูงหากเกิดอุบัติเหตุจากการจราจรไม่เกิดระเบิด
4. มีขนาดเล็กน้ำหนักเบา และวัสดุที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม
5. ชาร์จไวกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดอื่น ๆ เหมาะกับการใช้งานกับมอเตอร์ไซค์สาธารณะ
6. จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงมากขึ้น และการจ่ายกระแสสูงช่วยขณะได้มากขึ้น
7. มีการเผื่อต่อการชาร์จเกินสูง และมีสมรรถนะที่ปลอดภัยกว่า

2.9.1 แบตเตอรี่และการจัดการแบตเตอรี่

การออกแบบติดตั้งแบตเตอรี่ และการจัดการแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่มีน้ำหนักมากการจัดวางตำแหน่งจึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้า จึงต้องคำนึงการจัดวางให้ได้สมดุลน้ำหนักที่เหมาะสมด้วย

แรงดันไฟฟ้า (Voltage: V)

หมายถึง แบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่หลาย ๆ เซลล์ต่อเข้าด้วยกัน แต่ละเซลล์มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ และแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับส่วนประกอบของสารเคมี เช่น เซลล์แบบ NiCad/NiMH มีแรงดันไฟฟ้า 1.2 V, เซลล์แบบ Lead Acid มีแรงดันไฟฟ้า 1.2 V หรือเซลล์แบบ Li^+ มีแรงดันไฟฟ้า 3.7 V โดยการนำมาใช้กับจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะนำแบตเตอรี่มาประกอบด้วยเซลล์หลาย ๆ เซลล์ต่ออนุกรมกัน

แอมป์อ่าวว์ (Amp Hour: AH)

หมายถึง เมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ไปเรื่อย ๆ กระแสไฟฟ้าจะถูกดึงออกไปจากแบตเตอรี่ แรงดันจะลดลงอย่างช้า ๆ จนแรงดันคงที่ และแรงดันจะลดลงอย่างฮวบฮาบ ระยะเวลาที่แรงดันสามารถใช้งานสุดท้ายขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็นแอมป์-ชั่วโมง (AH) ถ้าแบตเตอรี่มีความจุ 1 AH หมายความว่าแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสได้ 1 แอมป์ต่อเนื่องเป็นระยะ 1 ชั่วโมง ซึ่งขนาด และราคาเป็นสัดส่วนกับความจุของแบตเตอรี่

วัตต์อาวัวร์ (Watt Hour: WH)

หมายถึง พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในแบตเตอรี่ โดยคำนวณจาก $AH \times Voltage$ of Battery ถ้าแรงดันสูงขึ้นก็จะใช้กระแสน้อยลง ทำให้จักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แรงดันสูงไปได้ระยะทางไกลกว่าจักรยานยนต์ที่ใช้แรงดันต่ำ

ความหนาแน่นพลังงาน

หมายถึง เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถการจ่ายพลังงานตามระยะเวลาต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่หนึ่งกิโลกรัม เช่น แบตเตอรี่แบบ Lead Acid มีขนาดเป็น 20-30 WH/kg, แบตเตอรี่แบบ NiMH มีขนาดเป็น 50-60 WH/kg, แบตเตอรี่แบบ Li^+ มีขนาดเป็น 110 WH/kg และแบตเตอรี่ Li Polymer มีขนาดเป็น 160 WH/kg ซึ่งจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ Li Polymer น้ำหนักเท่ากับแบตเตอรี่ Lead acid สามารถจ่ายพลังงานได้มากกว่าสามเท่า

ซีเรต (C-Rate)

หมายถึง เป็นค่าที่บอกสมรรถนะทางด้านความจุของแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับค่ากลาง เพื่ออธิบายถึงความจุที่มีค่าแตกต่างกัน เช่น ถ้าแบตเตอรี่ขนาด 8 AH คำว่า 1 C คือ 8 AH, คำว่า 2 C คือ 16 AH, คำว่า 0.25 C คือ 2 AH เป็นต้น ค่าซีเรตของแบตเตอรี่สูง ๆ ยังเป็นการแสดงถึงความสามารถของแบตเตอรี่ที่สามารถจ่ายกระแสออกมาสูงกว่าค่าปกติ

ระบบสำรองไฟฟ้า

หรือแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าตัดแปลงประกอบด้วยองค์ประกอบทั้งหมด 5 ส่วนด้วยกัน คือ เซลล์แบตเตอรี่, โครงชุดแบตเตอรี่, อุปกรณ์ทางไฟฟ้า, การจัดการแบตเตอรี่ และการระบายความร้อน

ระดับเซลล์แบตเตอรี่ (Cell battery)

หมายถึง การเลือกเซลล์ ซึ่งได้แก่ การเลือกชนิดเคมีของเซลล์แบตเตอรี่, รูปทรงของแบตเตอรี่, ขนาดและความจุแบตเตอรี่

2.9.2 ระดับชุดแบตเตอรี่ (Battery module or Battery pack)

หมายถึง การประกอบชุดแบตเตอรี่จากเซลล์แบตเตอรี่ โดยนอกจากการสร้างโครงชุดแบตเตอรี่แล้ว (Battery Housing) ยังรวมถึงการติดตั้งระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) ติดตั้งระบบระบาย

ความร้อนแบตเตอรี่ (Battery Thermal Management System, BTMS) ติดตั้งอุปกรณ์วัด (Sensor) เดินสายไฟ (Electric connection) และสร้างระบบป้องกันภายในชุดแบตเตอรี่ (Safety device)

ระดับโครงสร้าง (Vehicle) โครงสร้างรถเพื่อให้มีพื้นที่ และจุดยึดสำหรับติดตั้งระบบแบตเตอรี่ รวมถึงระบบที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนผังการเดินสายไฟ การเดินระบบท่อลมหรือน้ำสำหรับระบายความร้อน เป็นต้น

แบตเตอรี่จำนวนมากที่อยู่ในจักรยานยนต์ไฟฟ้าก่อให้เกิดความร้อนเมื่อใช้งานส่งผลให้ต้องมีระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ โดยระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่จะทำหน้าที่คอยควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงใช้งาน โดยทั่วไปสำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมจะอยู่ที่ $-20^{\circ}C$ ถึง $60^{\circ}C$ และยังคงควบคุมการกระจายของอุณหภูมิในชุดแบตเตอรี่ให้สม่ำเสมอ โดยทั่วไปสำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมจะอยู่ที่ $6^{\circ}C$ ถึง $7^{\circ}C$ ปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าปล่อยให้การระบายความร้อนเป็นไปโดยธรรมชาติ หรือที่พบรองลงมาคือการระบายความร้อนโดยใช้ลมเป่า หรือดูระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ ซึ่งแนวโน้มของเทคโนโลยีจะอยู่ที่ความพยายามในการลดขนาด และน้ำหนักของแพ็คเกจนำระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่มาใช้ และการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนให้รองรับกับการประจุไฟฟ้าแบบเร่งด่วน (Fast charging)

2.10 การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

เป็นการเชื่อมต่อจักรยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่ออัดประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ เปรียบเทียบได้กับการเติมน้ำมันของยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน การใช้งานจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะทำให้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ลดลงไปตามการใช้งาน และหากพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่หมดลงจักรยานยนต์ไฟฟ้าก็จะไม่สามารถขับเคลื่อนด้วยต่อไปได้อีก

เทคโนโลยีการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging) และการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) ซึ่งการอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำนั้นเป็นการอัดประจุแบตเตอรี่โดยเชื่อมต่อจักรยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรงผ่านสายเคเบิล (หรือสายชาร์จ) โดยวิธีนี้จะอาศัยหลักการนำไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นรูปแบบการอัดประจุที่มีการใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถติดตั้งได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียตรงที่ใช้เวลาในการอัดประจุก่อนข้างนานไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะที่มีเวลาที่เร่งด่วน



รูปที่ 2.20 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ

เนื่องจากจักรยานยนต์ไฟฟ้าต้องการการอัดประจุไฟฟ้าที่ใช้เวลาน้อย การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จึงเป็นวิธีการที่สะดวกเนื่องจากสามารถทำได้รวดเร็ว ยกตัวอย่างเช่น จักรยานยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อโกโก้ ใช้เวลาในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เพียง 8 วินาที จึงเหมาะสมกับสภาวะเร่งรีบ



รูปที่ 2.21 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

2.11 ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงการ

การวิเคราะห์โครงการ เป็นวิธีการคัดเลือกการลงทุนแบบกรณีโดยกรณีไปโดยองค์ประกอบหลักของการวิเคราะห์ด้านเศรษฐกิจ คือ การระบุรายการ และการตีมูลค่าต้นทุน และผลประโยชน์ของโครงการทั้งหมดแล้วนำมาวิเคราะห์ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจลงทุนแบบต่าง ๆ เพื่อบ่งชี้ว่าโครงการใดมีความเหมาะสมต่อการลงทุนต่อไปโดยโครงการที่ได้นับการคัดเลือกแล้วนั้นจะเป็นโครงการที่ก่อให้เกิดคุณค่าสูงสุดตรงตามวัตถุประสงค์ การวิเคราะห์โครงการจะประกอบด้วย การวิเคราะห์ในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์ทางด้านเทคนิค (Technical Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ความเหมาะสมทางเทคนิคของโครงการควรพิจารณาถึงรูปแบบทางเทคนิคในทางเลือกต่าง ๆ ซึ่งจะบรรลุถึงวัตถุประสงค์ของโครงการ ณ ต้นทุนที่ต่ำสุด รูปแบบที่เลือกมาควรมีเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดพร้อมกับวิธีการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด รูปแบบโครงการที่ดีจะต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่อาจจะเกิดขึ้นได้ และโครงการไม่ควรก่อให้เกิดผลในทางลบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ควรทำการวิเคราะห์ด้วยว่า องค์ประกอบต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันอย่างไรทั้งภายในโครงการ และกับโครงการอื่น ๆ ในพื้นที่เดียวกัน และสุดท้ายรูปแบบโครงการที่ดีจะต้องรวมเอาความต้องการด้านการดำเนินการ และบำรุงรักษาเมื่อโครงการจบสิ้นลงแล้วเข้าไว้ด้วย

2. การวิเคราะห์ทางด้านสังคม (Social Analysis)

การวิเคราะห์ทางด้านสังคมพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Expected Changes) จากโครงการซึ่งจะนำไปสู่สิ่งแวดล้อมของมนุษย์ (Human Environment) ในรูปขององค์การทางสังคม และมาตรฐานการครองชีพ และการเข้าใจกระบวนการทางสังคมที่เกี่ยวข้อง โดยปกติวัตถุประสงค์หลักของการพัฒนา คือ การปรับปรุงความเป็นอยู่ของประชากร (Well Being of The Population) ให้ดีขึ้นหากโครงการใดสามารถดำเนินการได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาดังกล่าวจะพิจารณาได้ว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมทางสังคมสำหรับการลงทุน

3. การวิเคราะห์ทางด้านสถาบัน (Institutional Analysis)

ผลของโครงการพัฒนาขึ้นอยู่กับคุณภาพของสถาบันที่รับผิดชอบต่อโครงการนั้น ๆ ซึ่งจะรวมไปถึงไม่เพียงองค์กรที่ปฏิบัติการ และดำเนินการโครงการเท่านั้นแต่ยังรวมถึงสถาบันของรัฐบาลสาขาเศรษฐกิจต่าง ๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อความสำเร็จของโครงการอีกด้วย การพัฒนาทางด้านสถาบัน คือ การเพิ่มขีดความสามารถของสถาบันในการที่จะกำหนดวัตถุประสงค์การพัฒนาให้ชัดเจนและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับทรัพยากรมนุษย์ทรัพยากรการเงิน และทรัพยากรอื่น ๆ เพื่อนำไปสู่ความสำเร็จตามวัตถุประสงค์เหล่านั้น สถาบันที่เข้มแข็งประกอบกับมีกำลังคนเพียงพอ แผนนโยบาย และระเบียบการที่แน่นอนถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นต่อความสำเร็จ

4. การวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Analysis)

สิ่งแวดล้อมเกี่ยวข้องกับเรื่องต่าง ๆ มากมายรวมถึงสาธารณสุข และความปลอดภัยในการประกอบอาชีพการควบคุมมลพิษทางอากาศน้ำ และที่ดินการจัดการที่เหมาะสมกับทรัพยากรธรรมชาติประเภทที่เกิดทดแทนใหม่ได้การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรธรรมชาติโดยวิธีการใช้ให้หลากหลายการนำกลับมาใช้อีก และการป้องกันการพังทลายการอนุรักษ์พืช และสัตว์พันธุ์หายาก และการบำรุงทางด้านวัฒนธรรมปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในประเทศพัฒนาแล้ว และประเทศกำลังพัฒนามีความแตกต่างกันในเรื่องขนาดความรุนแรงมากกว่าเรื่องประเภทของปัญหาการวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

5. การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐกิจและการเงิน (Economic and Financial Analysis)

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐกิจ และการเงินจะช่วยให้กรอบงานที่ข้อเสนอโครงการทุกด้านจะได้รับการประเมินแบบประสานอย่างเป็นระบบผลการวิเคราะห์มีความสำคัญต่อผู้กำหนดนโยบาย และหน่วยงานที่สนับสนุนทางการเงิน เพราะเป็นการบ่งชี้ถึงความสมเหตุสมผลสำหรับการตัดสินใจที่จะรับ หรือปฏิเสธโครงการเพื่อการลงทุนโครงการใดที่ประเทศเลือกที่จะนำไปปฏิบัติสมควรจะมีลำดับความสำคัญสูงในแผนงานการพัฒนาแห่งชาติการคัดเลือกโครงการเหล่านี้ควรพิจารณาจากทางเลือกโครงการที่ดีที่สุดในรูปแบบของความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐกิจ และการเงิน (Economic and Financial Worth)

2.12 การศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility)

คือ การจัดทำเอกสารที่ประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นที่แสดงถึงเหตุผลสนับสนุน (Justification) ความถูกต้องสมบูรณ์ (Soundness) ของโครงการเพื่อให้ได้มา ซึ่งโครงการที่ดี โดยจะได้แก่ โครงการที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริง และเมื่อปฏิบัติแล้วจะให้ผลประโยชน์ตอบแทนคุ้มค่าต่อการลงทุน

การศึกษาความเป็นไปได้ประกอบด้วยการศึกษาในด้านต่าง ๆ ต่อไปนี้

ความเป็นไปได้ทางด้านตลาดหรืออุปสงค์ (Market or Demand Feasibility)

เป็นการศึกษาถึงความต้องการ หรือความเป็นไปได้ทางการตลาด ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ที่คุ้มค่าต่อการลงทุน

ความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค (Technical Feasibility)

เป็นการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ในทางเทคนิคของโครงการ โดยพิจารณาถึงรูปแบบทางเทคนิคในทางเลือกต่าง ๆ ที่ต้นทุนต่ำสุด และเหมาะสมที่สุด ความเป็นไปได้ของโครงการที่ดีจะต้องมีความยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นได้

ความเป็นไปได้ทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environment Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ด้านสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับโครงการ รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมของโครงการ

ความเป็นไปได้ทางการเงิน (Financial Feasibility) และความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐกิจ (Economic Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงิน และทางด้านเศรษฐกิจ จะช่วยให้กรอบงานที่ข้อเสนอโครงการทุกด้านจะได้รับการประเมินแบบประสานอย่างเป็นระบบ ซึ่งข้อมูลจากการศึกษาจะมีความสำคัญต่อการตัดสินใจในการกำหนดนโยบายที่สนับสนุนทางการเงิน

ความเป็นไปได้ทางด้านสถาบัน (Institutional Feasibility)

การศึกษาความเป็นไปได้ทางการบริหาร การศึกษาดังกล่าวเกี่ยวเนื่องกับองค์กรที่ปฏิบัติการ และดำเนินการโครงการเพื่อนำไปสู่ความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ มีแนวนโยบายการดำเนินการที่แน่นอน ซึ่งถือเป็นสิ่งต่อการดำเนินโครงการ

2.13 หลักเกณฑ์ในการตัดสินใจเพื่อการลงทุน

การวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐกิจจะเน้นถึงผลตอบแทนที่มีต่อเศรษฐกิจโดยรวม ทั้งนี้เพื่อบรรลุถึงประสิทธิภาพในการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของผลตอบแทนที่ได้จะสูงกว่า หรือต่ำกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไปหลักเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบค่าของโครงการเหล่านี้ โดยส่วนใหญ่จะเป็นเกณฑ์การตัดสินใจแบบปรับค่าของเวลาโดยทั่วไปโครงการส่วนใหญ่ที่มีอายุมากกว่า 1 ปีผลประโยชน์ และต้นทุนของโครงการจะเกิดขึ้นในระยะเวลาดัง ๆ กัน ตลอดอายุของโครงการจึงยากที่จะนำมาเปรียบเทียบกันโดยตรงจะต้องมีการปรับค่าของเวลาการได้มาซึ่งผลประโยชน์และต้นทุนที่จะต้องเสียไปให้เป็นมูลค่าในอนาคตโดยการคิดแบบทบต้น (Compounding) โดยใช้อายุของโครงการเป็นเวลาในอนาคตนั้นหรือการปรับให้เป็นมูลค่าในปัจจุบัน (Present Value) โดยคำนวณหักส่วนลด (Discounting) จึงจะสามารถทำการวินิจฉัยได้ว่าโครงการนั้นจะให้ผลตอบแทนคุ้มค่า หรือไม่ เกณฑ์ในการตัดสินใจลงทุนแบบปรับค่าของเวลาในการวิเคราะห์ โดยทั่ว ๆ ไปที่ใช้กันแพร่หลายมี 3 ประเภท

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

คือ ผลต่างระหว่างค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ในแต่ละปีของโครงการตลอดอายุโครงการ (Present Value Benefit: PVB) กับมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนค่าใช้จ่ายของโครงการตลอดอายุโครงการ (Present Value Cost) เพื่อวัดค่าว่าโครงการที่พิจารณาอยู่นั้นจะให้ผลประโยชน์คุ้มค่านำลงทุนหรือไม่ถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก หรือศูนย์โครงการนั้นจะถือว่าเป็นโครงการที่คุ้มค่านำลงทุน แต่ถ้าค่าที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ หรือน้อยกว่าศูนย์แสดงว่าโครงการนั้นจะไม่คุ้มค่านำลงทุน เกณฑ์การตัดสินใจนี้นำมาใช้เพื่อช่วยเลือก หรือปฏิเสธโครงการสามารถเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังสมการที่ 2.13

$$NPV = PVB - PVC \quad (2.13)$$

2. อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit - cost Ratio: BCR)

คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ตลอดอายุของโครงการหารด้วยมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมตลอดอายุของโครงการนั้นดังสมการที่ 2.14

$$BCR = PVB/PVC \quad (2.14)$$

หลักเกณฑ์การตัดสินใจที่จะยอมรับโครงการ คือ BCR มีค่ามากกว่าหนึ่งจะถือว่าโครงการนั้นคุ้มค่าเหมาะสมแก่การลงทุนแต่ข้อเสียสำหรับเกณฑ์การตัดสินใจชนิดนี้คือโครงการใหญ่ ๆ มีผลตอบแทนสูง และในขณะเดียวกันก็มีค่าใช้จ่ายสูงตามไปด้วยดังนั้นแม้ BCR จะมากกว่าหนึ่งแต่อาจจะเกินไม่มากทั้ง ๆ ที่โครงการนี้อาจจะทำให้มีรายได้ทั้งหมดมากกว่าโครงการอื่น แต่ค่า BCR สูงกว่าก็เป็นได้ ในกรณีเช่นนี้ มีผลทำให้ตัดสินใจเลือกโครงการเกิดความผิดพลาดได้ควรมีเกณฑ์ตัดสินใจชนิดอื่นควบคู่ด้วย

3. อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

คือ อัตราที่ทำให้ผลประโยชน์ และค่าใช้จ่ายที่คิดลดเป็นมูลค่าปัจจุบันแล้วมีค่าเท่ากัน ซึ่งอัตราดังกล่าวเป็นอัตราความสามารถของเงินทุนที่จะก่อให้เกิดรายได้คุ้มกับเงินลงทุน หรือมูลค่า NPV แตกต่างกันตรงที่เปลี่ยนจากอัตราดอกเบี้ยมาเป็นอัตราการคิดลดเท่านั้น และนำค่า IRR ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเสียโอกาสของเงินทุน หรืออัตราดอกเบี้ยที่เป็นต้นทุนของเงินทุน (Cost of Capital) ถ้าค่า IRR ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าต้นทุนของเงินทุนแสดงว่าการลงทุนในโครงการนี้จะให้ผลที่คุ้มค่าและเป็นที่น่าลงทุน เพราะผลประโยชน์ของเงินที่ได้ใช้ไปในโครงการจะสูงกว่าการใช้เงินทุนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางเลือกอื่น ๆ ในทางตรงข้ามถ้าค่า IRR ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าต้นทุนของเงินทุนแสดงว่าโครงการให้ผลประโยชน์ไม่คุ้มค่า และไม่น่าตัดสินใจลงทุน

4. ระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period: PB)

คือ ระยะเวลาของกระแสเงินสด (Net Cash Inflow) ที่คาดว่าจะได้รับในอนาคต เท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก (Investment Cost) ของโครงการแบ่งเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่หนึ่ง: กระแสเงินสดรับสุทธิในแต่ละปีมีมูลค่าเท่ากันคิดจากสมการที่ 2.15

$$\text{ระยะเวลาในการคืนทุน (PB)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนเริ่มแรกสุทธิ (ปี)}}{\text{กระแสเงินสดสุทธิที่คาดว่าจะได้รับต่อปี}} \quad (2.15)$$

กรณีที่สอง: กรณีเงินสดรับสุทธิในแต่ละปีมีมูลค่าไม่เท่ากันการคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุนจะพิจารณาจากกระแสเงินสดรับสุทธิในแต่ละปีรวมกันเป็นกระแสเงินสดรับสุทธิสะสมเท่ากับจำนวนเงินลงทุนเริ่มแรก เกณฑ์การตัดสินใจทำการยอมรับโครงการเมื่อระยะเวลาในการคืนทุนที่คำนวณได้น้อยกว่าระยะเวลาในการคืนทุนที่ต้องการ และปฏิเสธโครงการเมื่อระยะเวลาในการคืนทุนที่คำนวณได้มากกว่าระยะเวลาในการคืนทุนที่ต้องการวิธีที่เหมาะสมที่จะใช้สำหรับกรณีวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจขั้นต้นเท่านั้น เพราะเป็นวิธีที่ไม่บอกให้ทราบถึงอัตราผลตอบแทนจากการลงทุนว่าเป็นเท่าไร เพราะยังมีได้ค่านึงถึงค่าปัจจุบันของเงินที่ได้รับในอนาคตตลอดอายุโครงการด้วยถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่คำนวณง่าย แต่การใช้ผลการคำนวณจากวิธีงวดเวลาที่ได้ทุนคืนมาพิจารณาเพียงอย่างเดียวอาจจะทำให้การตัดสินใจผิดพลาดได้

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสิทธิ์ และคณะ (2555) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ยานพาหนะพลังงานไฟฟ้าทดแทนยานพาหนะพลังงานปิโตรเลียม กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตโดยพิจารณาถึงปัจจัยหลัก 3 ประการ คือ ด้านเทคนิค ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านการจัดการเพื่อประเมินความเหมาะสม และวางแผนในการนำมาใช้เป็นพาหนะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จากผลการวิจัยพบว่าในด้านเทคนิคจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการเดินทางสูงกว่าจักรยานยนต์แก๊สโซลีนร้อยละ 40 และความสามารถในการแข่งขันขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ในด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีต้นทุนการเดินทางที่ถูกกว่าจักรยานยนต์แก๊สโซลีนร้อยละ 28.9 ในด้านการจัดการพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต โดยต้องมีการส่งเสริมโครงสร้างพื้นฐาน อาทิ เช่น สถานีชาร์จ ศูนย์ซ่อมบำรุง และระบบควบคุมการใช้พลังงาน เป็นต้น ผลการศึกษาพบว่าหากเปลี่ยนจากการใช้จักรยานยนต์แก๊สโซลีนทั้งหมดมาใช้เป็นจักรยานยนต์ไฟฟ้า จะทำให้ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานในการเดินทางต่อกิโลเมตรต่อคนลดลง เป็น 0.439 เมกะจูลต่อกิโลเมตร หรือ 2.35 บาทต่อกิโลเมตร ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานรวมได้ ถึง 34,801 เมกะจูลต่อวันหรือเป็นจำนวนเงิน 440,737.20 บาทต่อวัน อีกทั้งยังสามารถลดมลพิษทางอากาศการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเสียงลงได้ซึ่งเป็นผลดีทางด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

โชคชัย แสนสีละ (2555) ทำการเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า และจักรยานยนต์ กรณีใช้เดินทางภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต โดยการวิเคราะห์ต้นทุนการเดินทางซึ่งประกอบด้วย ราคาซื้อพาหนะ ค่าพลังงาน ค่าซ่อมบำรุง และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่เกิดตลอดอายุการใช้งาน ผลการศึกษาพบว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีต้นทุนการเดินทางถูกกว่าจักรยานยนต์ทั่วไปร้อยละ 28.96 โดยมีต้นทุนการเดินทาง 1.39 บาทต่อกิโลเมตร และ 1.95 บาทต่อกิโลเมตร ตามลำดับ โดยตลอดอายุการใช้งาน 7 ปี ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ 31,646 บาทต่อคัน ลดการปล่อย CO₂ ปริมาณ 2.3 ตันต่อคัน ลดชั่วโมงทำงานของช่างซ่อมบำรุงอย่างน้อย 34 ชั่วโมง จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นพาหนะเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการเดินทาง ลดค่าใช้จ่ายภาพรวม ลดมลพิษทางอากาศ และมลพิษทางเสียงภายในมหาวิทยาลัยอีกด้วย

Cedric De Cauwer และคณะ (2558) ทำการศึกษาปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางจลนศาสตร์ เช่น โครงสร้างของถนน การจราจร ลักษณะการขับขี่ อุณหภูมิ ฯลฯ กับการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า และรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้าจริงจากทั่วโลก เพื่อสร้างโมเดลในการคำนวณการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า โดยทำการสร้างต้นแบบโมเดลออกมาสามารถปรับแบบโดยยึดหลักการพื้นฐานจากสมการทางไดนามิก โมเดลแบบแรกใช้ทำนายค่าการใช้พลังงานของยานยนต์แบบง่าย ซึ่งใช้ค่าตัวแปรป้อนเข้าแบบง่าย เช่น ระยะทาง เวลาที่ใช้ในการขับขี่ อุณหภูมิ เป็นต้น โมเดลแบบที่สองเพิ่มรายละเอียดของข้อมูลในการเร่งความเร็วเข้ามาใช้ในการคำนวณด้วย โมเดลแบบที่สาม ใช้ข้อมูลดิบของตัวแปรทางจลนศาสตร์เป็นข้อมูลป้อนเข้าเพื่อใช้ในการทำนายการใช้พลังงาน โดยโมเดลนี้มีศักยภาพในการนำไปใช้ต่อยอดการพัฒนาในอนาคตได้

Andrzej Lebkowski (2559) ได้ทำโครงการวิจัย Electric Motorcycle Powertrain Analysis โดยแสดงข้อมูลกระบวนการออกแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดย และแสดงข้อมูลความเป็นมาของจักรยานยนต์ไฟฟ้าในตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยโครงการวิจัยนี้แสดงถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า เช่น อินเวอร์เตอร์ และแบตเตอรี่แพ็คเกจระบบการจัดการแบตเตอรี่ รวมถึงแสดงผลการทดลองเมื่อประกอบเสร็จกับสภาพถนนสาธารณะ โดยจักรยานยนต์ไฟฟ้านี้ถูกสร้างขึ้นที่มหาวิทยาลัย Gdynia Maritime ในประเทศโปแลนด์ โดยทำการคำนวณขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าจากสมการหาขนาดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการของมอเตอร์ไฟฟ้า และได้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO_4) เมื่อกำหนดอุปกรณ์ต่าง ๆ ครบ จึงทำการทดลองผลลัพธ์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสของแบตเตอรี่ต่อความเร็ว และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ารวมไปถึงแสดงค่าของมอเตอร์ไฟฟ้าขณะทำงานอีกด้วย

2.15 สรุป

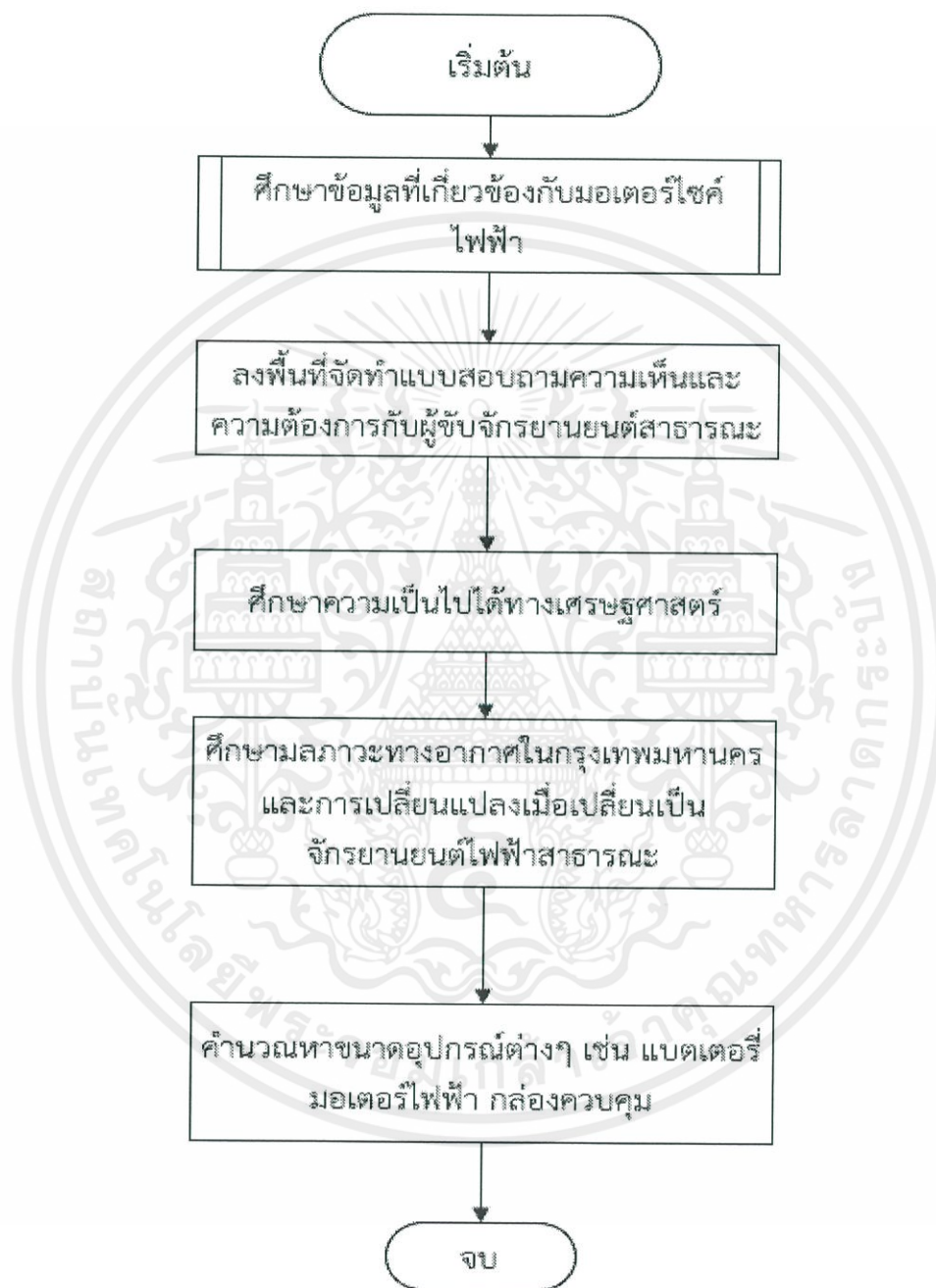
จากเนื้อหาทฤษฎีทั้งหมดในบทนี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์หลักต่าง ๆ เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า อาทิเช่น หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านรวมถึงวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และการเปรียบเทียบเชิงเทคนิคของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดต่าง ๆ โดยโครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO_4) ซึ่งสามารถใช้เป็นความรู้ในการออกแบบโครงสร้างการทำงานในบทต่อไป และยังคงกล่าวถึงทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์เกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงการ, การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ และการตัดสินใจการลงทุน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าแทนจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และนำทฤษฎีนี้ไปออกแบบโครงการวิจัยในบทต่อไปทำให้การออกแบบและการเข้าใจดียิ่งขึ้น

บทที่ 3

ขั้นตอนดำเนินงานและการออกแบบโครงการงาน

3.1 บทนำ

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) โดยมีวัตถุประสงค์เฉพาะเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าทดแทนจักรยานยนต์พลังงานปิโตรเลียม สำหรับระบบขนส่งสาธารณะ ซึ่งการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับจักรยานยนต์แก๊สโซลีนและจักรยานยนต์ไฟฟ้าในเชิงเทคนิค และเศรษฐศาสตร์ โดยขั้นตอนของการประเมินศักยภาพทางเทคนิคเริ่มจากการลงพื้นที่สอบถามข้อมูลและการใช้งานของกลุ่มผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะจริงในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยเน้นพื้นที่บริเวณที่ติดกับจุดเชื่อมต่อรถไฟฟ้า (BTS) และรวบรวมข้อมูลทางด้านเทคนิคและความต้องการต่าง ๆ เมื่อหันมาใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจออกแบบประสิทธิภาพและคำนวณขนาดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า และวิเคราะห์หาข้อเปรียบเทียบจุดเด่น และจุดด้อยของจักรยานยนต์ทั้งสองรูปแบบ การเปรียบเทียบข้อมูลเชิงการใช้งาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จากนั้นประเมินศักยภาพทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยเริ่มจากการประเมินศักยภาพทางเทคนิคมาคำนวณหามูลค่าทางการเงินและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยการประเมินจากส่วนต้นทุนของจักรยานยนต์, ต้นทุนการเดินทาง, ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และค่าบำรุงรักษา เฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานของยานพาหนะ และประเมินความเป็นไปได้ในการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าทดแทนการใช้จักรยานยนต์แก๊สโซลีนโดยการออกแบบ และคำนวณขนาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างจักรยานยนต์ไฟฟ้าตามแผนผังรูปที่ 3.1



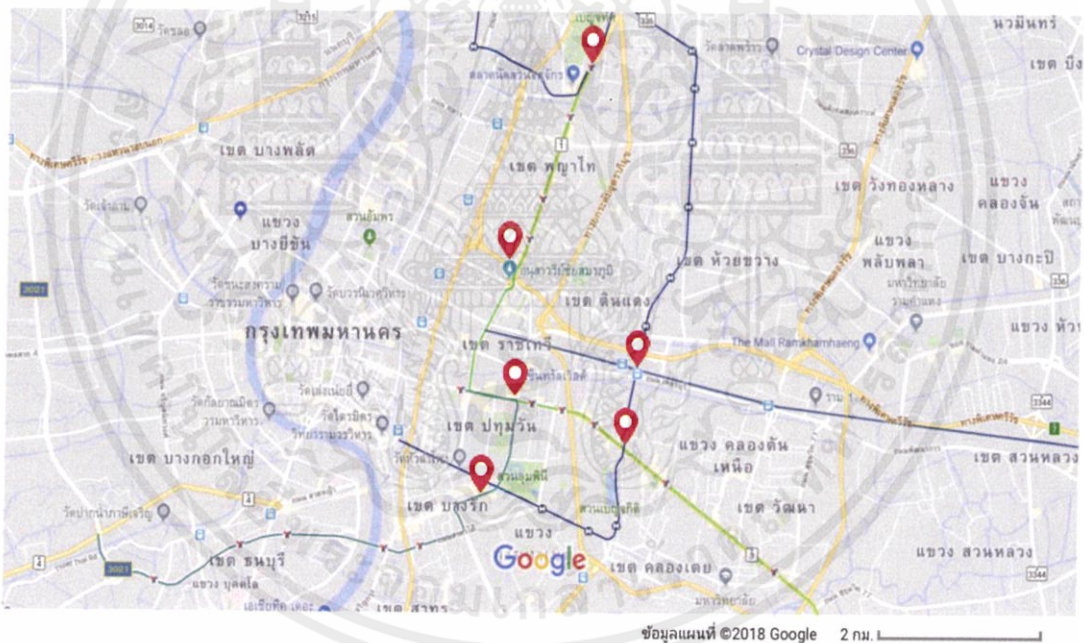
รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.2.1 การสัมภาษณ์ (Interview)

จัดทำเครื่องมือในการรวบรวมข้อมูลทั้งด้านการวางแผนพื้นที่ที่จะศึกษาวิจัย จากนั้นสร้างแบบสอบถามเพื่อรวบรวมข้อมูลด้านความคิดเห็นของผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะที่ใช้ในการประเมินรูปแบบ, พฤติกรรมการเดินทาง และค่าใช้จ่ายต่าง ๆ รวมถึงความต้องและความสนใจในการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งอ้างอิงจากการสุ่มสอบถามจากผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะบริเวณพื้นที่ที่ติดกับจุดเชื่อมต่อสถานีรถไฟฟ้า 6 ที่ ดังรูปที่ 3.2 ได้แก่ บริเวณสถานีแอร์พอร์ตลิงค์มีกะสาน, สถานีรถไฟฟ้าอโศก, สถานีรถไฟฟ้าหมอชิต, สถานีรถไฟฟ้าอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ, สถานีรถไฟฟ้าสยาม และสถานีรถไฟฟ้าช่องนนทรี ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างจากจักรยานยนต์สาธารณะในกรุงเทพมหานครทั้งสิ้นจำนวน 93,430 คัน และกำหนดกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธีสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จำนวน 100 คน ตามกระบวนการทางสถิติที่ระดับความน่าเชื่อถือร้อยละ 90 จากนั้นจึงทำการลงพื้นที่สัมภาษณ์โดยการสัมภาษณ์จากแบบสอบถามดังรูปที่ 3.3 และเก็บข้อมูลโดยการบันทึกเสียงผู้ตอบแบบการสอบถาม



รูปที่ 3.2 แผนที่พื้นที่สอบถามผู้ขับขี่จักรยานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสอบถามข้อมูลและการใช้งานของกลุ่มผู้ใช้จักรยานยนต์สาธารณะ

แบบสอบถามนี้จัดทำขึ้นสำหรับสอบถามข้อมูลพฤติกรรมการใช้งานและค่าใช้จ่ายต่างๆของผู้ใช้จักรยานยนต์สาธารณะในพื้นที่บริเวณติดสถานีรถไฟฟ้า กรุงเทพมหานคร รวมถึงความคิดเห็นและความต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนมาใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า

คำชี้แจง โปรดเติมค่าในช่องว่างตามความเป็นจริง

1. ตัวแทนจากวินจักรยานยนต์สาธารณะบริเวณ
จำนวนจักรยานยนต์ในวิน คัน
2. ระยะทางวิ่งเฉลี่ยต่อวัน กิโลเมตร
3. ความเร็วเฉลี่ย กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4. ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงต่อวัน บาท
5. ค่าบำรุงการรักษารักษา บาท
6. ช่วงระยะเวลาเร่งด่วนของวัน
7. เส้นทางในการวิ่งประจำ
8. ความคิดเห็นและความต้องการเมื่อมีการเปลี่ยนมาใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้า

.....

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบสอบถามข้อมูล และการใช้งานของกลุ่มผู้ใช้จักรยานยนต์สาธารณะ

3.2.2 ศึกษาารูปแบบและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเทคนิค และด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนโครงการโดยใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

3.2.3 ศึกษาจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทำการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาในเรื่องของจักรยานยนต์พลังงานปิโตรเลียม และจักรยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อศึกษา และประเมินความเป็นไปได้ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Method)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย โดยทราบถึงปัจจัยอันมีผลต่อโครงการ และผลประโยชน์ทางด้านสังคม และสิ่งแวดล้อมของโครงการ โดยมีการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่าง ๆ ในด้านเทคนิคของจักรยานยนต์ทั้งสองแบบ เปรียบเทียบด้านการใช้งานระหว่างจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์ทางด้านเทคนิค (Technical Analysis) เป็นการวิเคราะห์ความเหมาะสม และประสิทธิภาพมากที่สุด และไม่ก่อให้เกิดผลในทางลบต่อสิ่งแวดล้อม, วิเคราะห์เรื่องความต้องการในด้านการดำเนินการ และบำรุงรักษา, วิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (แก๊สโซลีน) และจักรยานยนต์ไฟฟ้า และวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของแนวโน้มของจักรยานยนต์ไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เภณฑ์ในการประเมินเปรียบเทียบเงื่อนไขด้านเทคนิคของตัวแทนจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (แก๊สโซลีน) และจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ชนิดของยานพาหนะ เกณฑ์ประเมิน	จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	จักรยานยนต์ไฟฟ้า
แหล่งต้นกำลัง	สันดาปภายใน 4 จังหวะ 4.02 แรงม้า	มอเตอร์ไฟฟ้า 3,000 W
การเติมเชื้อเพลิงต่อระยะทาง 100 กม.	อัตราการใช้น้ำมันของ เครื่องยนต์สันดาปภายใน 40-50 กม./ลิตร ดังนั้นใช้น้ำมันแก๊สโซลีน 91 2 ลิตร/100 กม.	การอัดประจุ 1 ครั้ง ได้ระยะทาง 60 กม. ดังนั้นการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ระยะทาง 100 กม. 43 Ah (4.2 kWh 96V)
เวลาในการเติมเชื้อเพลิงต่อระยะทาง 100 km	3 นาที	การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 1 นาที
การซ่อมบำรุง	ซับซ้อนมากกว่า	ไม่ซับซ้อน
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ เสียงดังจากเครื่องยนต์	มลพิษต่ำ ไม่มีเสียงรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Method)

เป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่า และความเป็นไปได้ทางการลงทุนของโครงการวิจัย โดยใช้การวิเคราะห์ต้นทุน และผลประโยชน์ที่ได้รับ ซึ่งมีต้นทุน ผลประโยชน์ และเงื่อนไขต่าง ๆ ของโครงการ ดังนี้

3.3.2.1 ต้นทุน

- ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment cost) เป็นค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มแรก ประกอบด้วย ค่ายานพาหนะ
- ค่าใช้จ่ายในด้านการดำเนินงาน (Operating cost) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างระยะเวลาที่ศึกษา ประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายค่าเชื้อเพลิง, ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษา และค่าเสื่อมราคา
- ผลประโยชน์ ประกอบด้วย รายได้สุทธิหลังหักค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขับซีจรรย์ยานยนต์รับส่งโดยสารสาธารณะ
- อัตราคิดลด คือ อัตราดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาสของเงินทุน โดยใช้อัตรากู้ยืมของธนาคารพาณิชย์ ซึ่งปัจจุบันเท่ากับร้อยละ 7 ต่อปี โดยอ้างอิงจากอัตราดอกเบี้ยลูกค้าเงินกู้รายย่อยขั้นต่ำ (Minimum Retail Rate : MRR) ของธนาคารไทยพาณิชย์ (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2561) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุน และผลประโยชน์ ซึ่งประกอบด้วย มูลค่าเงินปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return : IRR) และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-costs Ratio : BCR) โดยจำนำข้อมูลมาวิเคราะห์การเปรียบเทียบส่วนต่าง ๆ ของโครงการโดยใช้ดัชนีทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งมีเงื่อนไขในการยอมรับดังนี้

- มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) : $NPV > 0$ ยอมรับโครงการ
- อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) : $IRR > 3\%$ ยอมรับโครงการ
- ระยะเวลาคืนทุน (P/B period) : $P/B < 5$ ปี ยอมรับโครงการ
- สัดส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน : $B/C < 1$ ยอมรับโครงการ

สมการที่ใช้คำนวณวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิของโครงการ (Net Present Value: NPV) ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}
 NPV &= PVB - PVC \\
 &= \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right) \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

NPV	คือ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)
B_t	คือ	ผลตอบแทนในปีที่ t ($t= 1,2,3,\dots,n$)
C_t	คือ	ต้นทุนในปีที่ t ($t= 1,2,3,\dots,n$)
C_0	คือ	ต้นทุนปีเริ่มแรก
i	คือ	อัตราดอกเบี้ย หรืออัตราส่วนคิดลด (Discount rate)

อัตราส่วนของผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

ดังสมการที่ 3.2

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right) = 0 \quad (3.2)$$

อัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit Cost Ratio: B/C ratio)

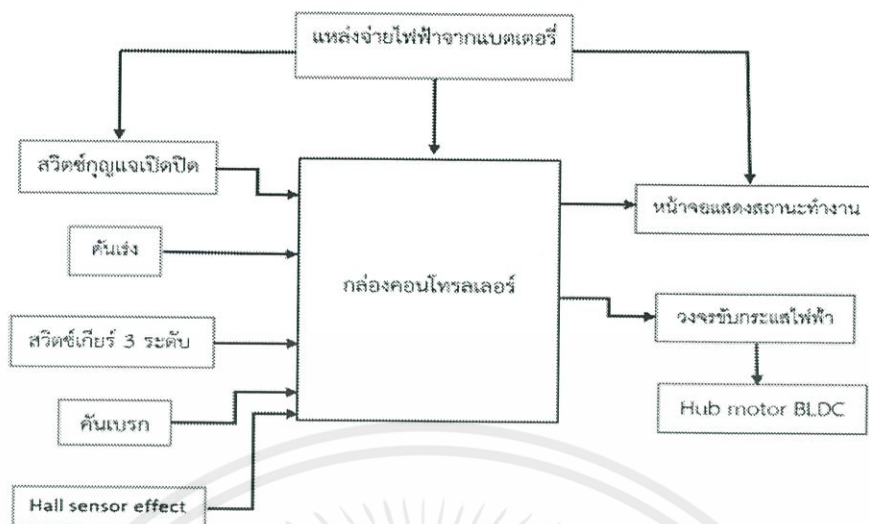
ดังสมการที่ 3.3

$$B/C \text{ ratio} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0} \quad (3.3)$$

3.4 การออกแบบจักษยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบ หรืออุปกรณ์ และองค์ประกอบต่าง ๆ ของจักษยานยนต์ไฟฟ้ามีดังนี้ ซึ่งมีแผนผังการใช้งานอุปกรณ์ภายในจักษยานยนต์ไฟฟ้างดรูปที่ 3.4

1. Hub motor ชนิด Brushless DC motor (BLDC motor) ล้อหลัง
2. กล่องคอนโทรลเลอร์ควบคุม BLDC motor
3. แพคแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion)
4. ตัวชาร์จแบตเตอรี่
5. คันเร่ง (Throttle)
6. คันเบรกหน้า-หลัง
7. หน้าจอแสดงสถานการณ์ทำงาน
8. สวิตช์เปลี่ยนเกียร์ 3 ระดับ
9. สวิตช์กุญแจเปิด-ปิด



รูปที่ 3.4 แผนผังการใช้งานอุปกรณ์ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า

3.5 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม

การคำนวณหาขนาดพิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเพื่อให้เหมาะสมกับการขับขี่สาธารณะ และความปลอดภัยจึงกำหนดความเร็วที่ต้องการไว้ กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยคำนวณหากำลังไฟฟ้า (Watts) จากสมการที่ 3.4

$$P_{\text{output}} = \frac{F_t \times V}{\eta} \quad (3.4)$$

โดย

F_t = แรงต้านทานรวมของการเคลื่อนที่รวม (นิวตัน)

V = ความเร็วของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการ (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

η = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยคิดแรงต้านทานการเคลื่อนที่รวมคิดจากแรงต้านทาน 3 ตัวรวมกันดังสมการที่ 3.5

$$F_t = \text{แรงต้านทานการหมุนของล้อ} (F_r) + \text{แรงต้านอากาศ} (F_d) + \text{แรงต้านทานทางชัน} (F_g) \quad (3.5)$$

3.5.1 แรงต้านทานการหมุนของล้อ (Rolling resistance)

กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านที่ล้อขับเคลื่อน จะถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทานการหมุนของล้อกับพื้นถนน (F_r) โดยสามารถคิดได้ดังสมการที่ 3.6

$$F_r = C \times mg \quad (3.6)$$

เมื่อ

C = ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุนของล้อ (Rolling resistance Coefficient)

m = มวลรวมของจักรยานยนต์ไฟฟ้ารวมคนขับ และผู้โดยสาร (300 กิโลกรัม)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

โดยเลือก $C = 0.015$ จากตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุนของล้อกับสภาพพื้นถนน

สภาพพื้นผิวถนน	ค่าสัมประสิทธิ์ (C)
สภาพถนนคอนกรีตเรียบ	0.01 - 0.015
ถนนเป็นหินกรวดอัด	0.015 - 0.020
ถนนไม้อัดกันเรียบ	0.020 - 0.030
ถนนเป็นหิน	0.016 - 0.07
ถนนเป็นทราย	0.15 - 0.3

จากสมการที่ 3.6 จะสามารถหาแรงต้านทานการหมุนของล้อได้ดังนี้

$$F_r = 0.015 \times 9 \times 300 = 44.1 \text{ นิวตัน}$$

3.5.2 แรงต้านทานอากาศ (Air resistance)

การขับเคลื่อนของจักรยานยนต์ไฟฟ้ายิ่งจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีความเร็วมากก็ยิ่งมีแรงต้านทานอากาศมากขึ้นทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านต้องมีกำลังมากพอในการเอาชนะแรงต้านทานอากาศ ทำให้ต้องคิดแรงต้านทานอากาศด้วยคิดโดยสมการที่ 3.7

$$F_d = C_d \times \frac{\rho v^2 A}{2} \quad (3.7)$$

โดย C_d = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ เลือก 0.3 จาก ตารางที่ 5.3

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (1.184 kg/m^3) ณ อุณหภูมิ องศาเซลเซียส 25

V = ความเร็วของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการ กำหนดที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

A = พื้นที่หน้าตัดของจักรยานยนต์ไฟฟ้า (0.76 m^2)

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศกับยานพาหนะชนิดต่าง ๆ

Vehicle	C_d	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
Motorcycle with rider	0.5 - 0.7	0.7 - 0.9
Open convertible	0.5 - 0.7	1.7 - 2.0
Limousine	0.22 - 0.4	1.7 - 2.3
Coach	0.4 - 0.8	6 - 10
Truck without trailer	0.45 - 0.8	6.0 - 10.0
Truck with trailer	0.55 - 1.0	6.0 - 10.0
Articulated vehicle	0.5 - 0.9	6.0 - 10.0

ดังนั้นหาค่าแรงต้านอากาศ เท่ากับ $F_d = 0.5 \times \frac{1.184 \times 13.85^2 \times 0.76}{2} = 43.15$ นิวตัน

3.5.3 แรงต้านทานความชัน

ในขณะที่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าวิ่งขึ้นทางชันกำลังของมอเตอร์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชันโดยโครงการวิจัยนี้จำกัดความชันที่ 4 องศาเนื่องจากเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ในกรุงเทพมหานคร ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านต้องทำงานหนักมากขึ้นมากกว่าบนทางระดับ โดยสามารถหาแรงต้านความชันได้ดังสมการที่ 3.8

$$F_g = mgsin\theta \quad (3.8)$$

โดย θ = มุมความชันของถนน กำหนด 7 เปอร์เซ็นต์ หรือ 4 องศา
ดังนั้นหาค่าแรงต้านอากาศเท่ากับ $F_g = 300 \times 9.8 \times \sin(4) = 205$ นิวตัน

3.5.4 แรงต้านทานการเคลื่อนที่รวม

แรงต้านทานการเคลื่อนที่รวมดังสมการที่ 3.9

$$F_t = F_r + F_d + F_g \quad (3.9)$$

ดังนั้นแรงต้านทานการเคลื่อนที่รวมเท่ากับ $F_t = 44.1 + 43.15 + 205$ นิวตัน

$$F_t = 292.25 \text{ นิวตัน}$$

3.5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยต้องการความเร็วอ้างอิงที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 13 เมตรต่อวินาที จากสมการที่ 3.10

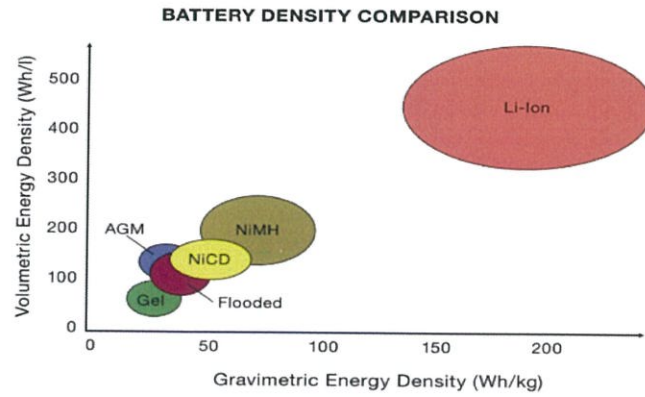
$$P_{\text{output}} = \frac{F_t \times v}{\eta} \quad (3.10)$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์คือ $P_{\text{output}} = \frac{292.25 \times 13.85}{0.9} = 4497.4$ วัตต์

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จะเลือกมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขนาด 5000 วัตต์ 96 โวลต์

3.6 การคำนวณและออกแบบขนาดแบตเตอรี่

การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะจะอ้างอิงจากระยะทางการขับขี่จากการลงพื้นที่สอบถามจากผู้ขับขี่มอเตอร์ไซค์สาธารณะจริง โดยแบตเตอรี่ที่เลือกใช้เป็นชนิดลิเทียมไอออน เนื่องจากปัจจุบันถือเป็นแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดสำหรับเก็บไฟฟ้ามีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง และมีขนาดเล็กน้ำหนักเบาเหมาะกับการใส่ในยานพาหนะ และได้เปรียบตรง วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม มีมากกว่าแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วแบบเก่าทำให้มีความหนาแน่นของพลังงานมากขึ้นดังรูปที่ 3.5 และมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า



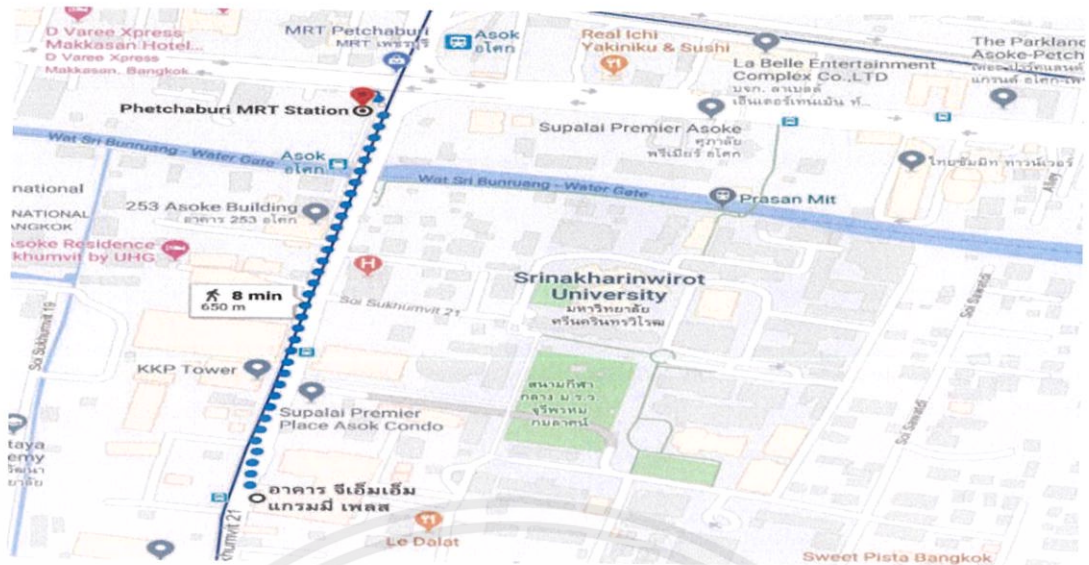
รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบความหนาแน่นพลังงานของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

3.6.1 การคำนวณหาขนาดความจุของแบตเตอรี่จากข้อมูลลงพื้นที่สอบถาม จากข้อมูลผลสำรวจโดยอ้างอิงใช้ผลการสอบถามที่ สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรี โดยส่วนมากมอเตอร์ไซค์สาธารณะจะมีเส้นทางวิ่งประจำ คือ จากสถานีรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรีไป มศว. และตึก GMM Grammy โดยระยะทางไปกลับดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 เส้นทางระหว่างรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรี ถึง มศว.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 เส้นทางระหว่างรถไฟฟ้าใต้ดินเพชรบุรี ถึง ดึก GMM grammy

โดยสามารถหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมได้ดังสมการที่ 3.11

$$E = \frac{1}{3600} \times [mg(F_t \cos\theta + \sin\theta) + 0.0386(\rho C_d \times A \times v^2) + \left(m \frac{dv}{dt}\right)] \times D \quad (3.11)$$

โดยที่ E = พลังงานที่แบตเตอรี่ต้องการต่อระยะทางที่กำหนด (kwh)

m = มวลรวมของจักรยานยนต์ไฟฟ้ารวมคนขับและผู้โดยสาร (300 Kg)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s²)

F_t = แรงต้านทานการเคลื่อนที่รวม (นิวตัน)

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ (1.184 kg/m³) ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

θ = มุมความชันของถนน กำหนด 4 องศา

C_d = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ เลือก 0.3 จาก ตารางที่ 5.3

V = ความเร็วของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการ กำหนดที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

A = พื้นที่หน้าตัดของจักรยานยนต์ไฟฟ้า (0.76 m²)

T = ช่วงเวลาความเร็วตั้งแต่ วินาที 5 ถึง 0

D = ระยะทางการใช้งาน กำหนดที่ กิโลเมตร 70

โดยจากสมการที่ 3.11 สามารถหาค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ต้องการต่อระยะทางที่กำหนด (kwh) เท่ากับ

$$E = \frac{1}{3600} \times \left[300 \times 9.8 (292.25 \cos 4 + \sin 4) + 0.0386 (1.184 \times 0.5 \times 0.76 \times 13.85^2) + \left(300 \times \frac{13.85 - 0}{5 - 0} \right) \right] \times D$$

$$0.0521 \times 30 = 1.497 \text{ kWh หรือ ประมาณ } 1.5 \text{ kWh}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยระยะทางของแบตเตอรี่ประมาณ 30 กิโลเมตรเนื่องจากในอนาคตมีโครงการที่จะจัดทำสถานีเปลี่ยนแบตเตอรี่ทั่วกรุงเทพมหานครในทุกพื้นที่เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

ดังนั้น เราสามารถหาความจุ (capacity: Ah) ของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมจากสมการ 3.12

$$Wh = V \times Ah \quad (3.12)$$

โดย Wh = พลังงานไฟฟ้าที่สะสมในแบตเตอรี่ เรียกว่า วัตต์อวัวร์ (Watt Hour)

V = แรงดันไฟฟ้า, โวลต์ 96 โวลต์

Ah = ความจุของแบตเตอรี่ เรียกว่า แอมป์อวัวร์ (Amp Hour)

$$1500 = 96 \times Ah$$

$$Ah = 15.6 \text{ Ah}$$

ดังนั้น ความจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 15.6 Ah โดยเลือกใช้เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion) ต่อกันเป็นแพ็คเกจอนุกรมกันโดยออกแบบเป็นทรงที่สามารถ Swapping ได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

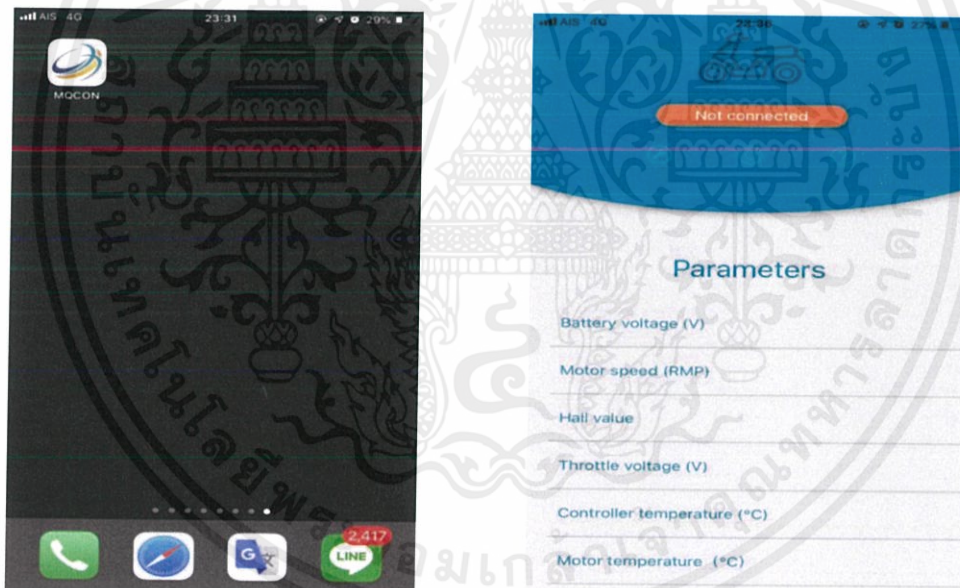
3.7 กล่องควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

คอนโทรลเลอร์เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่, มอเตอร์, คันเร่งไฟฟ้า, เบรกไฟฟ้า และสวิตช์กุญแจ เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนของจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้ใช้ MQCON Sine-Wave Controller รุ่น SVMC96100, 48-96 V, Max DC current 100 A และ Max Phase current 250 A



รูปที่ 3.9 คอนโทรลเลอร์ รุ่น SVMC96100 บริษัท MQCON Science and Technology Co.,Ltd

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าดังรูปที่ 3.10 โดยมีการเชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ซึ่งเป็นตัวควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ไปเชื่อมกับอุปกรณ์ส่วนอื่นเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า และในส่วนของคอนโทรลเลอร์สามารถควบคุมได้ทางแอปพลิเคชัน MQCON ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แอปพลิเคชัน MQCON

3.8 การออกแบบขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

เมื่อจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะถูกประกอบขึ้น และสามารถขับเคลื่อนได้ จะเข้าสู่ขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะซึ่งประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ การเก็บค่าพลังงานไฟฟ้า และการทดสอบความเร็ว ระยะทาง และการขับขี่

3.8.1 การเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

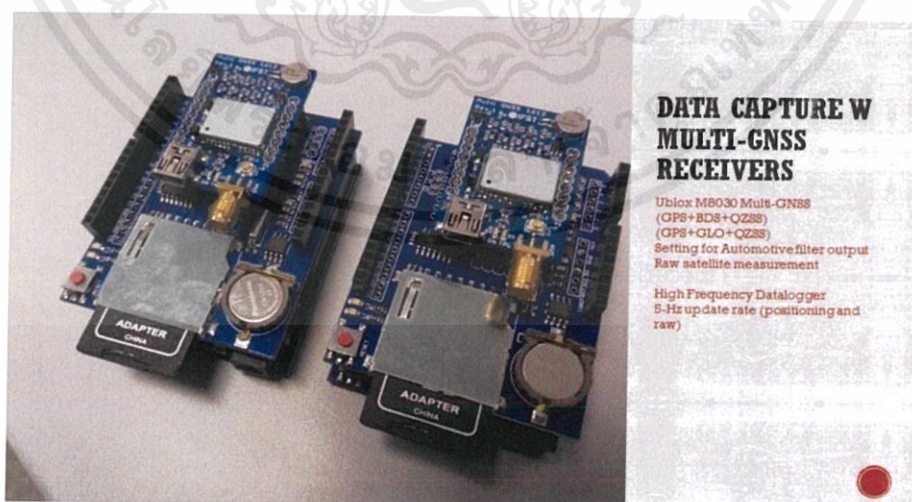
การเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าจะเก็บค่าโดยใช้อุปกรณ์ชื่อว่า Power Quality Analyzer PW3198 แสดงในรูป 3.11 ในการเก็บค่าตลอดการทดลอง ค่าที่ได้จากทดลอง คือ กราฟระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับระยะทาง 1 กิโลเมตร (kWh/1Km) ที่ความเร็วคงที่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และพลังงานไฟฟ้าต่อการขึ้นความชัน และระยะทางทั้งหมดต่อการชาร์จ 1 ครั้ง (กิโลวัตต์ชั่วโมง/การชาร์จ 1 ครั้ง)



รูปที่ 3.11 Power Quality Analyzer PW3198

3.8.2 การทดสอบความเร็วและระยะทาง

ขั้นตอนการทดสอบ คือ การขับขี่จักรยานยนต์ไฟฟ้าและเก็บค่าข้อมูลจำเพาะต่าง ๆ ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้อุปกรณ์ที่ชื่อว่า DATA CAPTURE W MULTI-GNSS RECEIVERS คือ ระบบที่สามารถคำนวณตำแหน่ง ความเร็ว และเวลา โดยรับสัญญาณจากดาวเทียม ได้ผลเป็นข้อมูลดิบดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 DATA CAPTURE W MULTI-GNSS RECEIVERS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวิธีดำเนินการ และแผนการดำเนินงานการ และกล่าวถึงการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าทดแทนจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และได้สำรวจลงพื้นที่สอบถามความคิดเห็นของผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะในพื้นที่เป้าหมาย ได้แก่ บริเวณพื้นที่ที่ติดกับจุดเชื่อมรถไฟฟ้าซึ่งเป็นบริเวณที่มีการใช้บริการจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะเป็นจำนวนมาก และแสดงรูปแบบการประเมินศักยภาพทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ NPV IRR ระยะคืนทุน และสัดส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อใช้ในการออกแบบ และคำนวณเพื่อเลือกขนาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างจักรยานยนต์ไฟฟ้า เช่น ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ขนาดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion) และกล่องควบคุมมอเตอร์ โดยข้อมูลต่าง ๆ ในบทนี้จะใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการต่อยอดการวิเคราะห์และแสดงผลต่อไปในบทที่ 4



บทที่ 4

ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้มาจากการสำรวจจากกลุ่มตัวอย่างจากผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะจำนวน 100 คนจากจำนวนผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะทั้งหมดในกรุงเทพมหานครทั้งสิ้น 93,430 คน และจากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยทำการค้นคว้างานวิจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาในเรื่องของจักรยานยนต์พลังงานปิโตรเลียมและจักรยานยนต์ไฟฟ้า นำข้อมูลที่ได้มาประเมินทั้งด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค มีการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งด้านประสิทธิภาพทางการขับขี่ และการใช้พลังงาน, การวิเคราะห์ข้อมูลตลาดของแบตเตอรี่, การวิเคราะห์ต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม จากมลพิษที่ปล่อยมาจากการขับขี่จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า, รวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาประเมินค่าซ่อมบำรุงของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า, รวบรวมข้อมูลนำมาใช้วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์, การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจากราคาน้ำมันและราคาค่าไฟฟ้า และการสร้างต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ได้จากการสร้างขึ้นโดยนำจักรยานยนต์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายในมาดัดแปลง นำส่วนของเครื่องยนต์ออกแล้วนำส่วนของไฟฟ้าเข้ามาแทนที่ ซึ่งจะทำให้การทดสอบและเก็บค่าการใช้พลังงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานของจักรยานยนต์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน

4.2 ผลการสำรวจข้อมูลและการเปรียบเทียบเชิงเทคนิคของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า

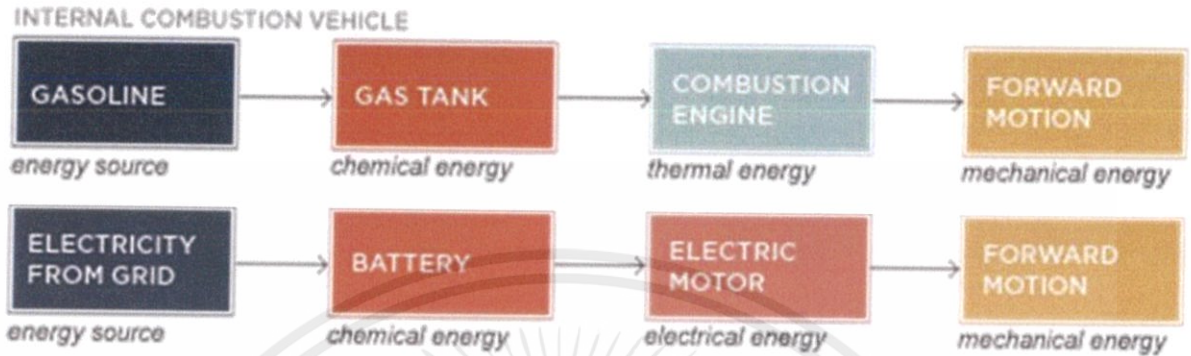
เนื่องจากจักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดหลายประการเมื่อเทียบกับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น ทำความเร็วได้ต่ำระหว่าง 45-60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ระยะที่วิ่งได้ต่อการอัดประจุ 1 ครั้งยังได้ระยะที่น้อยช่วง 50-60 กิโลเมตร ขณะที่ใช้เวลาอัดประจุจนถึง 6-8 ชั่วโมงต่อครั้ง และเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ที่ยังกระจายไปไม่ทั่วถึงกับคนทุกกลุ่ม ส่งผลให้ทัศนคติทางด้านการใช้งานของคนส่วนใหญ่ยังไม่เชื่อถือกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า แต่ด้วยประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานและความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นยานพาหนะสำหรับระบบขนส่งสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

4.2.1 ประสิทธิภาพของจักรยานยนต์ไฟฟ้ากับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า พลังงานเคมีถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนซึ่งแปรรูปเป็นไฟฟ้าได้กว่า 90% มีความสูญเสียบ้างเล็กน้อยในรูปความร้อน ส่วนจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน พลังงานเคมีเก็บไว้ในน้ำมันเชื้อเพลิง และนำมาแปรรูปเป็นความร้อนจากนั้นถูกสูบจะ

แปรรูปให้เป็นพลังงานกล ซึ่งมีประสิทธิภาพเพียง 35% โดยพลังงานส่วนใหญ่จะสูญเสียไปในรูปความร้อน

รูปที่ 4.1 การแปรรูปพลังงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้ากับจักรยานยนต์เครื่องยนต์ สันดาภายใน

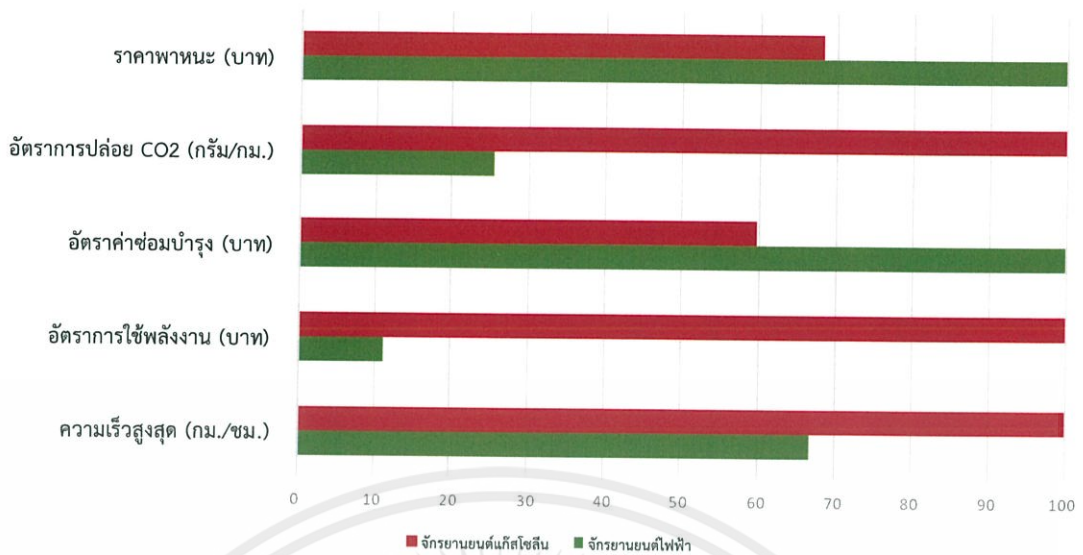


4.2.2 เปรียบเทียบด้านเทคนิคระหว่างจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาภายในกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

เปรียบเทียบเปรียบเทียบสัดส่วนประสิทธิภาพด้านเทคนิคของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้าดังรูปที่ 4.2 และ เปรียบเทียบด้านเทคนิคจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาภายในกับจักรยานยนต์ไฟฟ้าดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบด้านเทคนิคจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาภายในกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ชนิดของยานพาหนะ	จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	จักรยานยนต์ไฟฟ้า
เกณฑ์ประเมิน		
แหล่งต้นกำลัง	สันดาภายใน 4 จังหวะ 4.02 แรงม้า	มอเตอร์ไฟฟ้า 3,000 W
การเติมเชื้อเพลิงต่อระยะทาง 100 กม.	อัตราการใช้น้ำมันของเครื่องยนต์สันดาภายใน 40-50 กม./ลิตร ดังนั้นใช้น้ำมันแก๊สโซลีน 91 2 ลิตร/100 กม.	การอัดประจุ 1 ครั้ง ได้ระยะทาง 60 กม. ดังนั้นการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ต่อระยะทาง 100 กม. 43 Ah (4.2 kWh 96V)
เวลาในการเติมเชื้อเพลิงต่อระยะทาง 100 km	3 นาที	การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 1 นาที
การซ่อมบำรุง	ซับซ้อนมากกว่า	ไม่ซับซ้อน
ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม	เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ เสียงดังจากเครื่องยนต์	มลพิษต่ำ ไม่มีเสียงรบกวน



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัดส่วนประสิทธิภาพด้านเทคนิคของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า

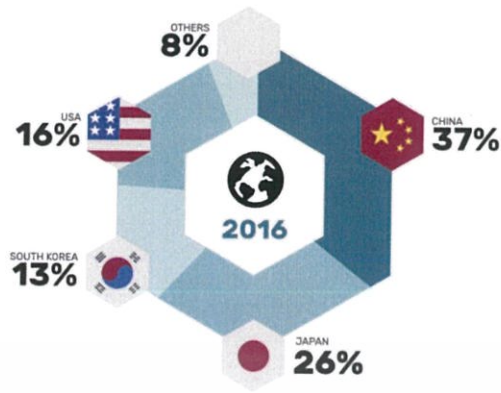
4.3 ผลการสำรวจตลาดแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน

ความต้องการแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนจากยานพาหนะไฟฟ้า ส่งผลให้ความสามารถในการผลิตแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าความต้องการ ซึ่งก่อให้เกิดความกดดันต่อราคาแบตเตอรี่ เป็นผลให้ราคาแบตเตอรี่ลดลงร้อยละ 79 จากปี 2553 และความอ่อนไหวของรอบอายุการใช้งานแบตเตอรี่ (Cycle life) ถือเป็นความท้าทายที่สำคัญมากกับการพัฒนาแบตเตอรี่

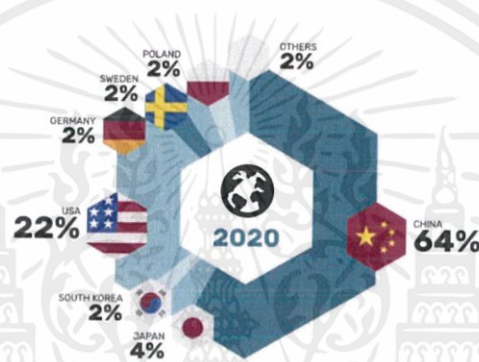
4.3.1 ความต้องการแบตเตอรี่และกำลังการผลิต

สำหรับความต้องการแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนจากยานพาหนะยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 4.5 จากการศึกษาของ Berylls Strategy ปี 2559 การผลิตแบตเตอรี่ของประเทศจีนมีสูงถึงร้อยละ 37 ของกำลังการผลิตทั่วโลกซึ่งมีค่าเป็นหนึ่งในสามของทั้งหมด และรองลงมาคือประเทศญี่ปุ่นร้อยละ 26% ซึ่งในส่วนของประเทศสหรัฐอเมริกา มีเพียงร้อยละ 16 แสดงในรูปที่ 4.3

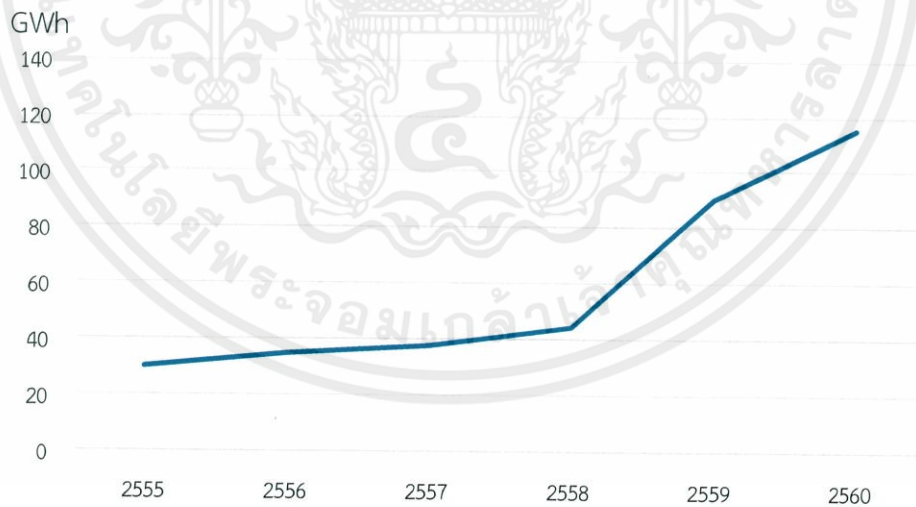
และในปี 2563 มีการคาดคะเนว่าแบตเตอรี่จากประเทศจีนจะมีปริมาณมากถึงสองในสามส่วนของการผลิตทั่วโลก และประเทศสหรัฐอเมริกาจะผลิตสูงขึ้นถึงหนึ่งในห้าของการผลิตทั่วโลก ซึ่งในส่วนของประเทศญี่ปุ่นและเกาหลีใต้จะลดลงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 สัดส่วนของการผลิตแบตเตอรี่ในปีพ.ศ. 2559



รูปที่ 4.4 สัดส่วนของการผลิตแบตเตอรี่ในปีพ.ศ. 2563



รูปที่ 4.5 กำลังการผลิตแบตเตอรี่สำหรับพาหนะยานยนต์ไฟฟ้าทั่วโลก

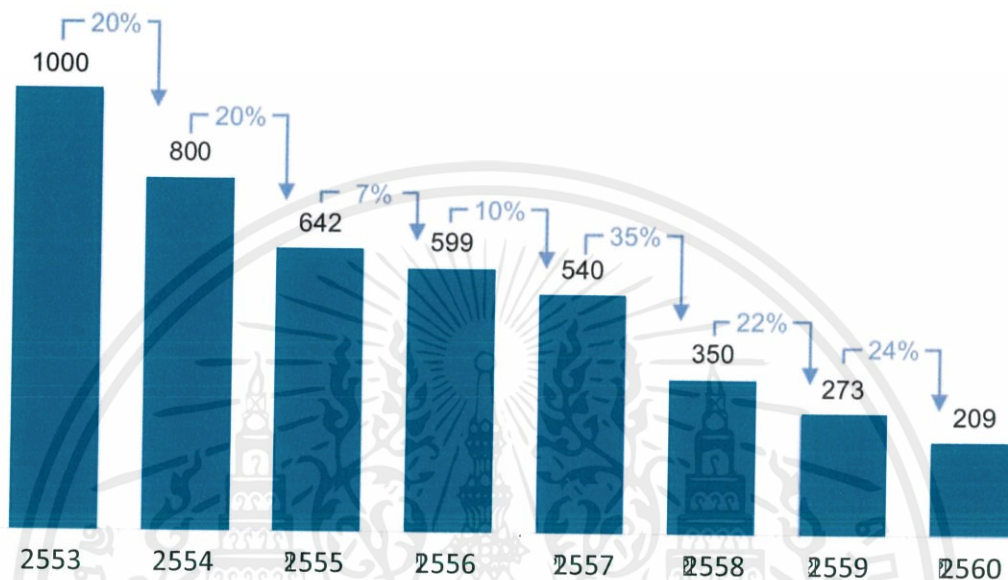
4.3.2 ราคาแบตเตอรี่

จากการสำรวจของบริษัท Bloomberg New Energy Finance ในปีพ.ศ. 2560 ราคาแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนเฉลี่ยอยู่ที่ 209 เหรียญต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (7,315 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งราคาแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนตกลงมาร้อยละ 24 จากปีพ.ศ. 2559 และร้อยละ 79 จากปี 2553 และจากราคาแบตเตอรี่ช่วงปีพ.ศ. 2553-2560 ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการลดลงเฉลี่ยประมาณปีละร้อยละ 18 เมื่อมีความต้องการเพิ่มเป็นทวีคูณในแต่ละปี ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ว่าราคาแบตเตอรี่จะลดลงต่อเนื่องโดยอยู่ที่ 96 เหรียญต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (3,360 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

Battery pack price (\$/kWh)



รูปที่ 4.6 ราคาของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

4.4 การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในการศึกษาเปรียบเทียบในส่วนของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะไม่มีมลพิษทางท่อไอเสียโดยตรงเช่นเดียวกับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่กระบวนการผลิตไฟฟ้าก็มีการปล่อยสารมลพิษเช่นกัน ซึ่งโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ, เชื้อเพลิงฟอสซิล หรือถ่านหิน และพลังงานน้ำ แต่ได้มีการจัดการเกี่ยวกับการปลดปล่อยมลพิษเข้าสู่บรรยากาศ ทั้งนี้อัตราการปล่อยสารมลพิษของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าในจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีอัตราการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 40.9 กรัมต่อกิโลเมตร ซึ่งจะสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ากับปริมาณการปลดปล่อยที่ปริมาณ 1,000 ต้นต่อจักรยานยนต์หนึ่งคันตลอดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ค่าการปล่อยสารมลพิษอื่นๆ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x), ฝุ่นละออง (PM) และสารอินทรีย์ไอระเหย (VOC) พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามจักรยานยนต์ไฟฟ้าจะมีการปลดปล่อยสารมลพิษทางอ้อมจากแบตเตอรี่ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ เกี่ยวกับการจัดการแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพอายุการใช้งาน เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลพิษต่างๆจากการขับขี่จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ชนิดของพาหนะ	มลพิษ (g/km)					
	CO ₂	CO	NO _x	PM	SO ₂	VOC
จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ¹	55.00	12.50	0.15	0.10	-	2.25
จักรยานยนต์ไฟฟ้า ²	14.10	-	0.031	0.0005	0.01	-

หมายเหตุ : ¹ABD (2552)

²P.Krittayakasem (2554)

4.4.1 ประเมินต้นทุนทางสิ่งแวดล้อม

ต้นทุนต่อหน่วยของมลพิษที่มีผลต่อสุขภาพก๊าซกลุ่มนี้มี 3 ตัว ได้แก่ สารอินทรีย์ไอระเหย (VOCs : สารประกอบของ VOCs นั้นประกอบไปด้วย Benzene, Toluene, Xylene), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และ ฝุ่นละออง (PM) ซึ่งมลพิษแต่ละตัวจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของมนุษย์และสภาพแวดล้อม โดยค่าที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษานำมาจากงานวิจัยของประเทศสวีเดน ซึ่งมีชื่อว่า “The Costs and Benefits of Electric Vehicles” ซึ่งมีต้นทุนต่อหน่วยแยกตามผลกระทบของมลพิษแต่ละตัว ดังนี้ ต้นทุนของสารอินทรีย์ไอระเหย (VOCs), ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x), และ ฝุ่นละออง (PM) มีค่าเท่ากับ 15.89, 31.9, และ 433.95 บาทต่อกิโลกรัมตามลำดับ โดยค่าที่แสดงได้ทำการปรับค่าโดยวิธี Benefit Transfer ที่นำสัดส่วนของ GDP per Capita ระหว่างสวีเดนและไทยมาใช้เป็น Conversion Factor (ยศพงษ์ ลออนวล, 2558) และจากรายงานฉบับผู้บริหาร “U.S. Green House Gas Abatement Mapping Initiative” ต้นทุนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) มีค่าเท่ากับ 50 USD ต่อตัน หรือประมาณ 1,750 บาทต่อตัน ซึ่งเท่ากับ 1.75 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นสามารถสรุปต้นทุนต่อหน่วยมลพิษที่มีผลต่อสุขภาพของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนของมลพิษจากการขับขี่จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า (หน่วย กรัม/กิโลเมตร)

ชนิดของพาหนะ	มลพิษ					
	CO ₂	CO	NO _x	PM	SO ₂	VOC
จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน	96.25	21.88	4.78	43.39	-	35.75
จักรยานยนต์ไฟฟ้า	24.67	-	0.98	0.22	0.017	-

4.5 การประเมินค่าซ่อมบำรุงจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ในปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในแบบสี่จังหวะ ซึ่งมีการทำงานที่ซับซ้อนผ่านอุปกรณ์หลายชิ้น จึงต้องมีการตรวจสอบ เปลี่ยนอุปกรณ์ และน้ำมันหล่อลื่นต่างๆตามระยะการใช้งาน ซึ่งเรียกอุปกรณ์เหล่านี้ว่าอุปกรณ์สิ้นเปลือง ได้แก่ หัวเทียน น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบรก ไส้กรองอากาศ ไส้กรองน้ำมัน และบำบัดไอเสีย

สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้าขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่จะมีชิ้นส่วนอุปกรณ์น้อยกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องซ่อมบำรุงอย่างต่อเนื่องเหมือนเครื่องยนต์สันดาปภายใน เพราะมอเตอร์ไฟฟ้ามีอายุใช้งานมากกว่า 12 ปี อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานจำกัดจำเป็นต้องเปลี่ยนเฉลี่ยทุก ๆ ระยะการเดินทาง 90,000 กิโลเมตร หรือ 1.5 ปี ในกรณีที่มีการประจุแบตเตอรี่ทุกวันสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน อะไหล่สิ้นเปลืองที่จักรยานยนต์และจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีเหมือนกัน คือ ระบบล้อและระบบเบรก เช่น ยางนอก และผ้าเบรก ซึ่งมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนตามระยะการใช้งานเช่นกัน ในตารางที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นตามตารางซ่อมบำรุงที่ระยะทางการใช้งานต่าง ๆ ตลอดอายุการใช้งาน 7 ปีของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 4.4 ค่าอะไหล่สิ้นเปลืองตามตารางบำรุงรักษาของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

ลำดับ	รายการซ่อมบำรุง	ราคา อะไหล่ (บาท)	ค่าอะไหล่สิ้นเปลือง (บาท) ตามระยะเวลาที่ใช้งาน (ปี) หรือตามระยะทาง (กิโลเมตร)														รวม	
			0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5		7
			0	30,000	60,000	90,000	120,000	150,000	180,000	210,000	240,000	270,000	300,000	330,000	360,000	390,000		420,000
1	ไส้กรองน้ำมันเชื้อเพลิง	130		130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	1,820
2	ไส้กรองอากาศ	170		170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	2,380
3	หัวเทียน	90		90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	1,260
4	น้ำมันเครื่อง	150		1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	1,800	25,200
5	สายพานโซ่ขับเคลื่อน	440		440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	6,160
6	น้ำมันเฟืองท้าย	60		360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	5,040
7	น้ำมันเบรก	85			85		85		85		85		85		85		85	595
8	ผ้าเบรคหน้าและหลัง	130		130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	2,730
9	ยาง(นอก+ใน,หน้า+หลัง)	700		700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	9,800
10	แบตเตอรี่	500					500				500			500				1,500
รวมค่าใช้จ่าย (บาท)			0	3,820	4,035	3,820	4,535	3,820	4,035	3,820	4,535	3,820	4,035	3,820	4,535	3,820	4,035	56,485
รวมค่าใช้จ่ายสะสม (บาท)			0	3,820	7,855	11,675	16,210	20,030	24,065	27,885	32,420	36,240	40,275	44,095	48,630	52,450	56,485	

หมายเหตุ : ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นเป็นค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของจักรยานยนต์สาธารณะ ซึ่งมีเทคโนโลยีแตกต่างกัน เช่นระบบหัวฉีดและคาร์บูเรเตอร์ ระบบเกียร์ธรรมดาและระบบเกียร์อัตโนมัติ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำและระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เป็นต้น

ตารางที่ 4.5 ค่าอะไหล่สิ้นเปลืองตามตารางบำรุงรักษาของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ลำดับ	รายการซ่อมบำรุง	ราคา อะไหล่ (บาท)	ค่าอะไหล่สิ้นเปลือง (บาท) ตามระยะเวลาที่ใช้งาน (ปี) หรือตามระยะทาง (กิโลเมตร)														รวม	
			0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5		7
			0	30,000	60,000	90,000	120,000	150,000	180,000	210,000	240,000	270,000	300,000	330,000	360,000	390,000		420,000
1	แบตเตอรี่	20,400				20,400			20,400			20,400			20,400			81,600
2	ยาง (หน้า+หลัง)	700		700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	9,800
3	น้ำมันเบรก	85			85		85		85		85		85		85		85	595
4	ผ้าเบรคหน้าและหลัง	130		130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	130	260	2,730
รวมค่าใช้จ่าย (บาท)			0	830	1,045	21,230	1,045	830	21,445	830	1,045	21,230	1,045	830	21,445	830	1,045	94,725
รวมค่าใช้จ่ายสะสม (บาท)			0	830	1,875	23,105	24,150	24,980	46,425	47,255	48,300	69,530	70,575	71,405	92,850	93,680	94,725	

4.6 การเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์

ปัจจัยหลักที่ใช้ในการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์คือค่าใช้จ่ายในการเดินทางเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงระหว่างรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และจักรยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงราคาของยานพาหนะในการประกอบการพิจารณา จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าใช้จ่ายในการเดินทางพบว่ารถจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าประมาณร้อยละ 11.12 หรือ 9 เท่า อีกทั้งค่าบำรุงรักษาที่ต่ำกว่า การบำรุงรักษาที่ซับซ้อนน้อยกว่า และประสิทธิภาพสมรรถนะในการใช้งานที่สูง จักรยานยนต์ไฟฟ้าถือว่าเป็นทางเลือกสำหรับผู้ใช้งานที่น่าสนใจมากทางหนึ่ง และหากมองในแง่ของจุดคุ้มทุนทางด้านค่าใช้จ่ายพลังงานต่อต้นทุนของยานยนต์พาหนะแล้วสามารถคืนทุนได้เร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ใช้งาน

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบต้นทุนเฉลี่ยต่อระยะทางระหว่างรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในกับรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

รายการค่าใช้จ่าย	จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	จักรยานยนต์ไฟฟ้า
ราคาซื้อพาหนะ (บาท/กม.)	0.110	0.610
ค่าเชื้อเพลิง/ไฟฟ้า (บาท/กม.)	0.810	0.090
ค่าซ่อมบำรุง (บาท/กม.)	0.130	0.100
ค่าภาษีและพร.บ. (บาท/กม.)	0.008	0.008
ต้นทุนการเดินทาง (บาท/กม.)	2.582	3.210

4.6.1 ผลการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน (Net Present Value)

รายละเอียดที่นำมาประเมินหาค่าความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

- 1) ระยะทางการใช้งานรถจักรยานยนต์เท่ากับ 60,000 กิโลเมตรต่อปี
- 2) การใช้งานรถจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้าเท่ากับ 7 ปี
- 3) ราคาค่าน้ำมันเชื้อเพลิงเบนซิน 91 อ้างอิงจากราคาขายปลีกมาตรฐาน ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ณ วันที่ 28 ตุลาคม พ.ศ. 2561 เท่ากับ 29.10 บาทต่อลิตร
- 4) อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในเฉลี่ย 0.63 บาทต่อกิโลเมตร
- 5) กำหนดราคาค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยหน่วยละ 3.96 บาทต่อหน่วย
- 6) อัตราสิ้นเปลืองค่าพลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเฉลี่ย 0.168 บาทต่อกิโลเมตร
- 7) ราคาแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเฉลี่ย 6,800 บาทต่อแพ็ค มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 1.5 ปี
- 8) ผลตอบแทนของผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะโดยหักค่าใช้จ่ายแล้วมีค่า 8,000 บาทต่อเดือน
- 9) กำหนดราคาซากของพาหนะทั้งสอง ณ สิ้นปีที่ 4 มีค่าร้อยละ 55 ของราคาแรกซื้อและลดลงร้อยละ 10 ต่อปี จนถึงสิ้นปีที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดัชนีที่ใช้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คือ ต้นทุนการเดินทางที่คิดรวมราคาซื้อพาหนะและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ระหว่างการใช้งานเทียบเป็นสัดส่วนต่อระยะทางจากการเปรียบเทียบ ต้นทุนการเดินทางพบว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายถูกกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ร้อยละ แต่ในด้านของราคาจักรยานยนต์ไฟฟ้ายังคงสูงกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากชิ้นส่วนบางอย่างยังคงต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นหากมองในมุมมองของผู้ใช้งานแล้วจักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่คุ้มค่า โดยเฉพาะในอนาคตข้างหน้าราคาปิโตรเลียมจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งส่งผลถึงราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และสำหรับการขนส่งสาธารณะนั้นไม่จำเป็นต้องการสมรรถนะด้านความเร็วของยานพาหนะที่สูงมากเพื่อเป็นการลดอุบัติเหตุที่เกิดจากความเร็วยิ่งอีกด้วย

จากการกำหนดให้ยานพาหนะทั้งสองประเภทคือ จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในและจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีอายุการใช้งานที่ 7 ปี มีระยะทางใช้งานต่อปีที่ 60,000 กิโลเมตร อัตราส่วนลดร้อยละ 7 ต่อปี ค่าใช้จ่ายแบ่งเป็น 4 ส่วนได้แก่ ราคาซื้อพาหนะ ค่าซ่อมบำรุงค่าแบตเตอรี่ ค่าพลังงาน และค่าซากในปีสุดท้าย โดยเปรียบเทียบรายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในดังตารางที่ 4.7 และกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังตารางที่ 4.8 และรายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์ไฟฟ้าตารางที่ 4.9 และวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์ไฟฟ้าดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	รายละเอียดค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี (บาท)							รวม	
	ปีที่ 0	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6		ปีที่ 7
ราคาจักรยานยนต์เฉลี่ย	-46,875.00								-46,875.00
ค่าเชื้อเพลิง		-48,600.00	-48,600.00	-48,600.00	-48,600.00	-48,600.00	-48,600.00	-48,600.00	-340,200.00
ค่าบำรุงรักษาเฉลี่ย		-7,855.00	-8,355.00	-7,855.00	-8,355.00	-7,855.00	-8,355.00	-7,855.00	-56,485.00
ค่าพ.ร.บ. และภาษี		-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-3,395.00
ผลตอบแทน		96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	672,000.00
ราคาซากหลังปีที่ 7								18,794.50	18,794.50
รวม	-46,875.00	39,060.00	38,560.00	39,060.00	38,560.00	39,060.00	38,560.00	57,854.50	243,839.50

ตารางที่ 4.8 วิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	กระแสเงินสดสุทธิ	มูลค่าปัจจุบัน
ปีที่ 0	-46,875.00	-46,875.00
ปีที่ 1	39,060.00	36,504.75
ปีที่ 2	38,560.00	33,680.00
ปีที่ 3	39,060.00	31,884.75
ปีที่ 4	38,560.00	29,417.25
ปีที่ 5	39,060.00	27,849.50
ปีที่ 6	38,560.00	25,694.25
ปีที่ 7	57,854.50	36,029.00
รวม	243,839.50	174,184.50

ตารางที่ 4.9 รายละเอียดของการวิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้า	รายละเอียดค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี(บาท)								รวม	
	ปีที่ 0	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7		
ราคาจักรยานยนต์เฉลี่ย	-68,757.00									-68,757.00
ค่าพลังงานไฟฟ้า		-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-5,400.00	-37,800.00
ค่าบำรุงรักษาเฉลี่ย		-1,875.00	-22,275.00	-22,275.00	-1,875.00	-22,275.00	-22,275.00	-1,875.00	-1,875.00	-94,725.00
ค่าพ.ร.บ. และภาษี		-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-485.00	-3,395.00
ผลตอบแทน		96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	96,000.00	672,000.00
ราคาซากหลังปีที่ 7									27,568.25	27,568.25
รวม	-68,757.00	88,240.00	67,840.00	67,840.00	88,240.00	67,840.00	67,840.00	67,840.00	115,808.25	494,891.25

ตารางที่ 4.10 วิเคราะห์เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้า	กระแสเงินสดสุทธิ	มูลค่าปัจจุบัน
ปีที่ 0	-68,757.00	-68,757.00
ปีที่ 1	88,240.00	82,467.50
ปีที่ 2	67,840.00	59,254.25
ปีที่ 3	67,840.00	55,377.75
ปีที่ 4	88,240.00	67,318.00
ปีที่ 5	67,840.00	48,369.00
ปีที่ 6	67,840.00	45,205.00
ปีที่ 7	115,808.25	72,119.75
รวม	494,891.25	361,354.25

4.6.2 อัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (Internal Rate of Return : IRR)

ในการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนโดยวิธีมูลค่าปัจจุบัน (Rate of Return Calculations by The Present Worth Method) จะต้องแปลงค่าของเงินที่ช่วงเวลาต่าง ๆ มาที่ช่วงเวลาปัจจุบัน ซึ่งอัตราผลตอบแทนภายในคืออัตราผลตอบแทนที่ทำให้ค่า NPV (Net Present Value) ของโครงการลงทุนนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งกล่าวง่าย ๆ ก็คืออัตราผลตอบแทนที่ทำให้เงินที่ลงทุนไปนั้นมีค่าเท่ากับเงินที่ได้รับกลับคืน หรือมองว่าผลตอบแทน (%) ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการนี้ การเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนภายในโครงการจะแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบอัตราผลตอบแทนภายในโครงการ

ประเภทจักรยานยนต์	Internal Rate of Return (IRR)
จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน	70 %
จักรยานยนต์ไฟฟ้า	102 %

จะเห็นได้ว่าค่าของผลตอบแทนภายในโครงการของมอเตอร์ไซค์เครื่องยนต์สันดาปภายในไฟฟ้ามามีค่าสูงกว่ามอเตอร์ไซค์สันดาปภายในเนื่องจากระหว่างการใช้งานค่าซ่อมบำรุงของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าจักรยานยนต์สันดาปภายในและมีค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยเปลี่ยนทีละ 1.5 ปีต่อครั้ง

4.6.3 อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (Benefit-cost ratio : B/C)

การประเมินค่าผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนของการใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากการเทียบค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง และค่าบำรุงรักษาของยานพาหนะทั้งสองชนิดที่อัตราใช้งานระยะ 60,000 กิโลเมตรต่อปี ที่อายุการใช้งานจักรยานยนต์ไฟฟ้า 7 ปี สามารถคำนวณได้ดังนี้ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน (B/C) = ผลประโยชน์/เงินลงทุนรวมกับค่าใช้จ่ายตลอดโครงการ แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่าย และผลตอบแทนของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (แก๊สโซลีน) ดังตารางที่ 4.12 และรายละเอียดค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนของจักรยานยนต์ไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.12 รายละเอียดค่าใช้จ่าย และผลตอบแทนของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (แก๊สโซลีน)

จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	ค่าใช้จ่ายรวม	ผลตอบแทนรวม
ปีที่ 0	-46,875.00	
ปีที่ 1	-56,940.00	96,000.00
ปีที่ 2	-57,440.00	96,000.00
ปีที่ 3	-56,940.00	96,000.00
ปีที่ 4	-57,440.00	96,000.00
ปีที่ 5	-56,940.00	96,000.00
ปีที่ 6	-57,440.00	96,000.00
ปีที่ 7	-56,940.00	114,794.50
รวม	-446,955.00	690,794.50

ตารางที่ 4.13 รายละเอียดค่าใช้จ่าย และผลตอบแทนของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้า	ค่าใช้จ่ายรวม	ผลตอบแทนรวม
ปีที่ 0	-68,757.00	
ปีที่ 1	-7,760.00	96,000.00
ปีที่ 2	-28,160.00	96,000.00
ปีที่ 3	-28,160.00	96,000.00
ปีที่ 4	-7,760.00	96,000.00
ปีที่ 5	-28,160.00	96,000.00
ปีที่ 6	-28,160.00	96,000.00
ปีที่ 7	-7,760.00	123,568.25
รวม	-204,677.00	699,568.25

จาก สมการที่ 4.1

$$B/C \text{ ratio} = \frac{B}{C} \quad (4.1)$$

โดยที่

- B/C คือ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน
 B คือ ผลตอบแทนรวมทั้งโครงการ
 C คือ ค่าใช้จ่ายรวมทั้งโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

B คือ ผลตอบแทนของผู้ซื้อซึ่งจักรยานยนต์สาธารณะโดยหักค่าใช้จ่ายแล้ว และค่าซากในปีสุดท้ายมีค่า 690,794.50 บาทต่อปีสำหรับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และมีค่า 699,568.25 บาทต่อปีสำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า

C คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมด ได้แก่ ค่าซ่อมบำรุง ค่าแบตเตอรี่ ค่าเชื้อเพลิง ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าภาษี ค่าพ.ร.บ. และค่าซื้อพาหนะ มีค่า 446,955.00 บาท สำหรับจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน และมีค่า 204,677.00 บาท สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้า และแสดงอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุน

	B/C ratio
จักรยานยนต์แก๊สโซลีน	1.5460
จักรยานยนต์ไฟฟ้า	3.4180

จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินลงทุนจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในสูงกว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากต้นทุนของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในต่ำกว่าต้นทุนของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

4.6.4 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period Method : PB)

ระยะเวลาของการลงทุนนั้นใช้ไปในการลงทุนเพื่อให้กระแสเงินสดรับสุทธิที่ได้จากการลงทุนคุ้มค่ากับต้นทุน ซึ่งระยะเวลาคืนทุนเป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนของโครงการที่ทำโดยมีหน่วยวัดเป็นระยะเวลาว่าเมื่อมีการลงทุนในโครงการนั้นแล้วจะใช้เวลากี่งวดในการคืนทุน

4.6.4.1 จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

ต้นทุนของพาหนะทั้งหมด คือ 46,875 บาท ผลตอบแทนปีที่ 1 คือ 39,060 บาท และปีที่ 2 คือ 38,560 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุน คือ 1 ปี 3 เดือน

4.6.4.2 จักรยานยนต์ไฟฟ้า

ต้นทุนของพาหนะทั้งหมด คือ 68,757 บาท ในช่วงปีแรกได้ผลตอบแทน คือ 88,240 บาท ดังนั้น ระยะเวลาคืนทุน คือ 10 เดือน

สรุป การเลือกใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นการลงทุนตอนต้นที่สูงกว่าการเลือกใช้จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่ระหว่างการใช้งานการซ่อมบำรุงของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายบำรุงรักษาต่ำกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ส่งผลให้การเลือกใช้จักรยานยนต์ไฟฟ้ามีความคุ้มค่ากว่าเมื่อเปรียบเทียบมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้วสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึงปีละ 26,738.54 บาท ที่อายุการใช้งาน 7 ปี

4.7 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวจากราคาน้ำมัน และราคาค่าไฟฟ้า

4.7.1 ความอ่อนไหวต่อราคาน้ำมัน

ราคาน้ำมันที่สูงขึ้นจะช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของยานพาหนะ ซึ่งราคาน้ำมันมีความผันผวนอยู่ตลอดเวลาโดยมีแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ส่งผลต่อต้นทุนการเดินทางของพาหนะดังแสดงในรูปที่ 4.7 ต่อไปนี้ โดยเปรียบเทียบกับราคาค่าไฟฟ้าคงที่ 3.96 บาทต่อหน่วย

ต้นทุนการเดินทางต่อกิโลเมตร (บาท/กม.)

1.2

1

0.8

0.6

0.4

0.2

0

5

10

15

20

25

30

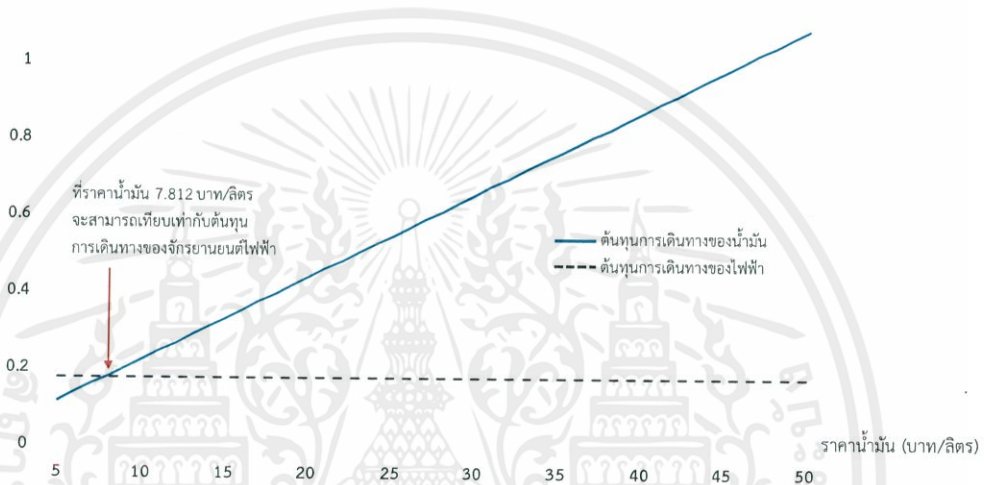
35

40

45

50

ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)

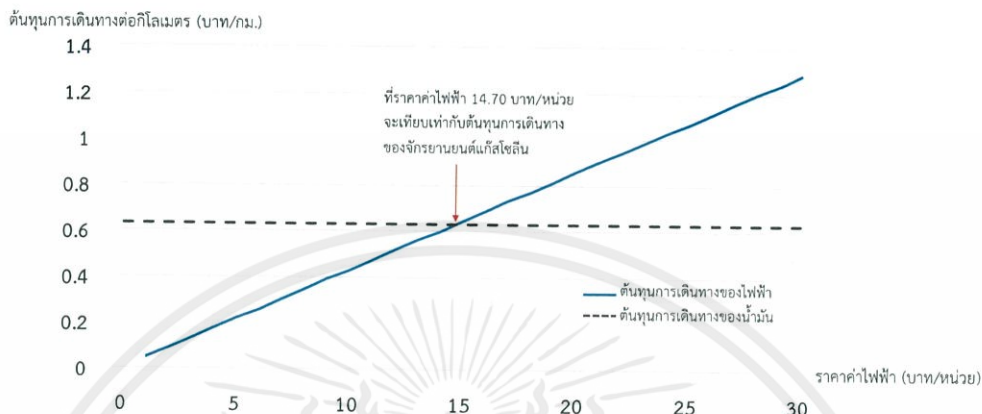


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบราคาน้ำมันกับต้นทุนการเดินทางของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าที่ราคาน้ำมันปัจจุบัน 29.10 บาท (ปตท., ตุลาคม 2561) มีต้นทุนการเดินทางเท่ากับ 0.63 บาทต่อกิโลเมตร และที่ราคาน้ำมันลดลงถึง 7.812 บาทต่อลิตร ซึ่งลดลงจากปัจจุบันร้อยละ 73.15 จะสามารถเทียบเท่ากับต้นทุนการเดินทางของไฟฟ้า

4.7.2 ความอ่อนไหวของราคาค่าไฟฟ้า

เนื่องจากราคาของพลังงานไฟฟ้ามีราคาไม่สูงมากถึงถือเป็นข้อดีสำหรับการแข่งขันกับราคาน้ำมัน ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการเดินทางของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีราคาที่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยเปรียบเทียบกับราคาน้ำมันคงที่ 29.10 บาทต่อลิตร



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบราคาค่าไฟฟ้ากับต้นทุนการเดินทางของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าที่ราคาค่าไฟฟ้าปัจจุบัน 3.96 บาท (กฟภ., ตุลาคม 2561) มีต้นทุนการเดินทางเท่ากับ 0.168 บาทต่อกิโลเมตร และที่ราคาค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 14.70 บาทต่อหน่วย ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปัจจุบันร้อยละ 271.21 จะสามารถเทียบเท่ากับต้นทุนการเดินทางของน้ำมัน

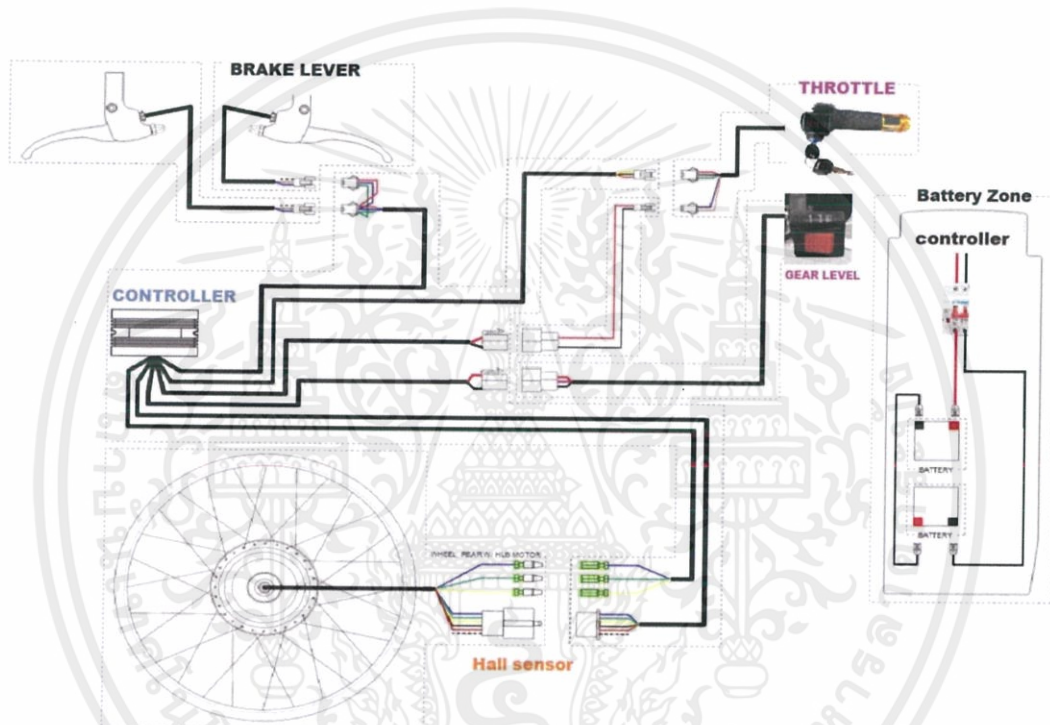
4.8 การสร้างต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสาธารณะ

4.8.1. วัตถุประสงค์

เพื่อดัดแปลงจักรยานยนต์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายในมาเป็นจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีอุปกรณ์หลัก ๆ 3 ส่วน ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านเป็นตัวขับเคลื่อน คอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม และแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า

4.8.2 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้า

สำหรับการดัดแปลงจักรยานยนต์จากเครื่องยนต์สันดาปภายในมาเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้า ทำโดยการต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

4.8.2.1 การดัดแปลงรถมอเตอร์ไซค์เครื่องสันดาปภายใน รุ่น Wave 110i
นำรถจักรยานยนต์เครื่องสันดาปภายในรุ่น Wave 110i ดังรูปที่ 4.10 ถอดอุปกรณ์
ในส่วนของการสันดาปภายในออก ได้แก่ เครื่องยนต์ และถังน้ำมัน ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 จักรยานยนต์ รุ่น Wave 110i ก่อนดัดแปลง



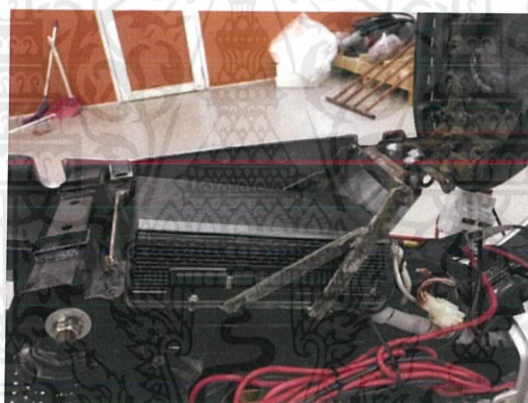
รูปที่ 4.11 จักรยานยนต์ รุ่น Wave 110i หลังถอดเครื่องยนต์และถังน้ำมันออก

นำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Hub Motor) ขนาด 5,000 W 96 V
ของบริษัท MQCON ที่คำนวณจากบทที่ 3 มาใส่แทนที่ล้อหลังเพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนให้กับ
จักรยานยนต์ไฟฟ้าไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.12

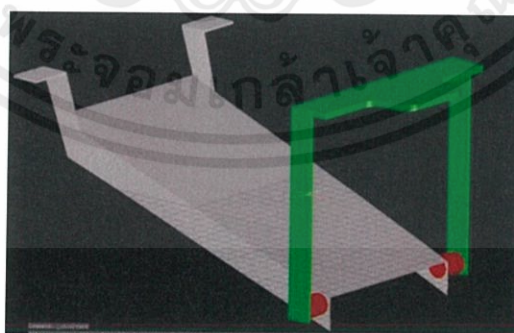


รูปที่ 4.12 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน (Hub Motor)

ออกแบบการวางตำแหน่งคอนโทรลเลอร์ MQCON Sine-Wave Controller รุ่น SVMC9610 โดยจะนำคอนโทรลเลอร์มาวางแทนที่ตำแหน่งถังน้ำมัน ดังรูปที่ 4.13 และทำการออกแบบโครงพื้นที่สำหรับวางคอนโทรลเลอร์ โดยโปรแกรม AutoCAD ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งของคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.14 โครงพื้นที่สำหรับวางคอนโทรลเลอร์ โดยโปรแกรม AutoCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบการวางตำแหน่งแพ็คแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน 96 V 7.8 Ah โดยจะนำแพ็คแบตเตอรี่มาวางแทนที่ตำแหน่งเครื่องยนต์ ดังรูปที่ 4.15 และทำการออกแบบโครงพื้นที่สำหรับวางแพ็คแบตเตอรี่ โดยโปรแกรม AutoCAD ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของแบตเตอรี่

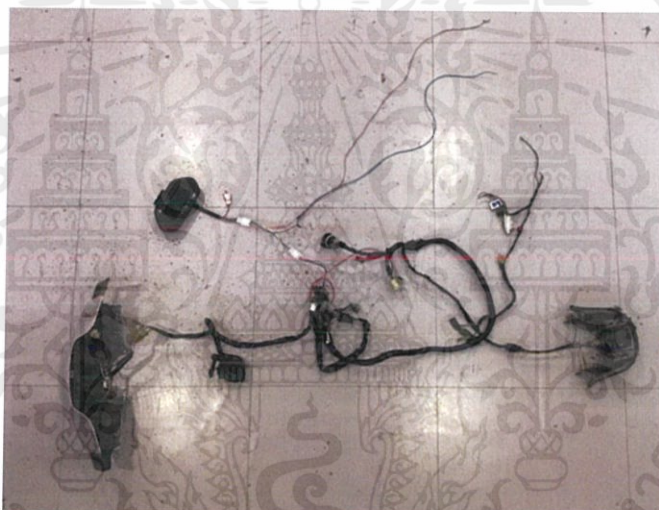


รูปที่ 4.16 โครงพื้นที่สำหรับวางแพ็คแบตเตอรี่ โดยโปรแกรม AutoCAD

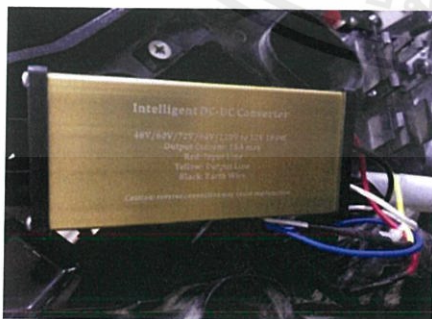
ระบบไฟแสงสว่างในจักรยานยนต์จะใช้จากระบบเดิมของจักรยานยนต์สันดาปภายใน แต่จากระบบเดิมใช้แหล่งจ่ายไฟโดยแบตเตอรี่ตะกั่วกรด 12 V จึงได้มีการนำ Intelligent DC-DC Converter เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 12 V และ 96 V เพื่อให้สามารถนำมาต่อกับแพ็คแบตเตอรี่ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.17 และระบบไฟฟ้างานรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 Intelligent DC-DC Converter



รูปที่ 4.18 ระบบไฟแสงสว่างของจักรยานยนต์สันดาปภายใน



รูปที่ 4.19 Converter ต่อเข้าไประบบไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สาขาศิลปอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง ได้ทำการออกแบบกรอบรถ ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 การออกแบบกรอบรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

นำอุปกรณ์ต่างๆมาประกอบกับโครงรถเดิม ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 การเดินสายไฟเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆในจักรยานยนต์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

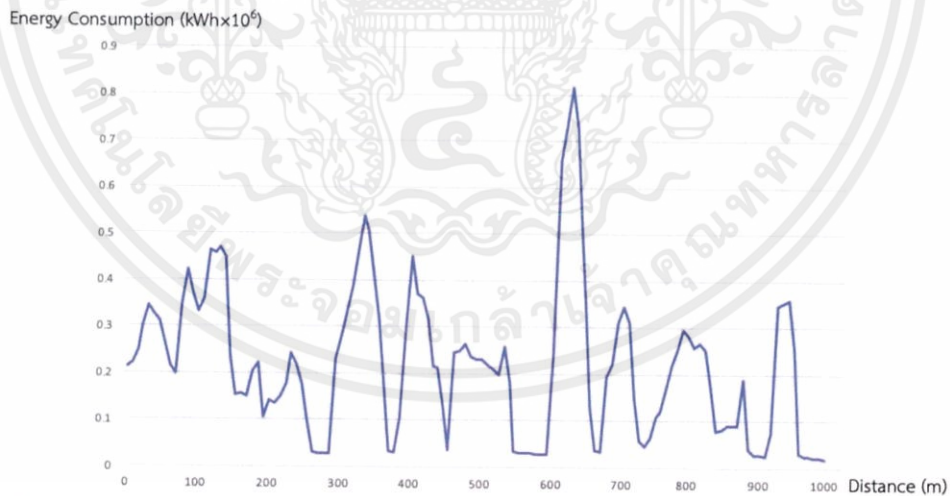


รูปที่ 4.22 ประกอบเฟรมเข้ากับโครงมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า

4.9 ผลการทดลองประสิทธิภาพของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับสาธารณะ

โดยจะทำการทดสอบการขับขี่ (Driving test) ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า และเก็บค่าจาก DATA CAPTURE W MULTI-GNSS RECEIVERS และ POWER QUALITY ANALYZER PW 3198

4.9.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานในการขับขี่ระยะทาง 1 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

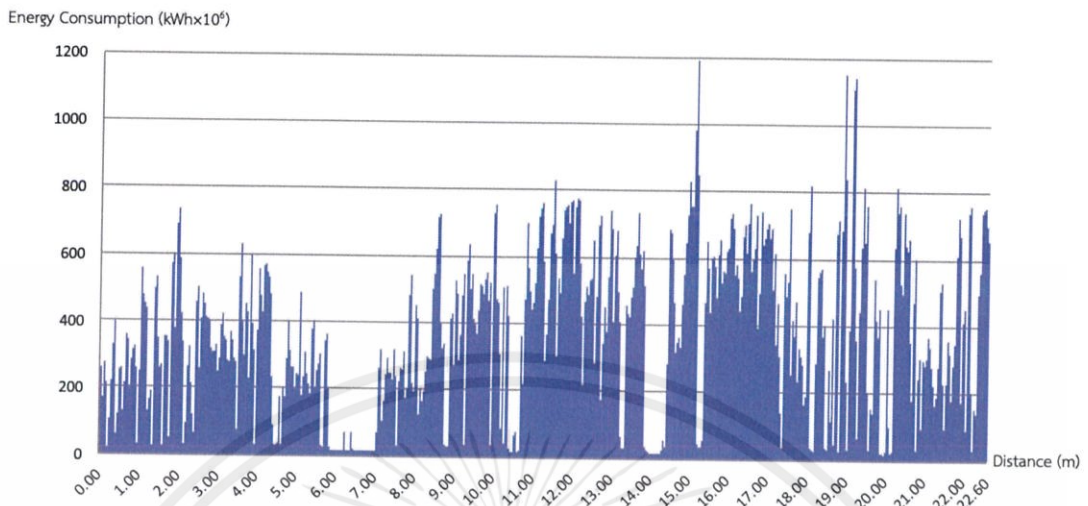


รูปที่ 4.23 การใช้พลังงานในระยะทาง 1 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากการทดสอบการขับขี่ระยะทาง 1 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร มีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.0285 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็นราคาค่าพลังงานได้ 0.11 บาทต่อกิโลเมตร ที่ราคาค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยหน่วยละ 3.96 บาทต่อหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.2 ผลการทดสอบระยะทางในการขับเคลื่อนทั้งหมดต่อการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 4.24 การใช้พลังงานในระยะทาง 22.60 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากการทดสอบการขับเคลื่อนตั้งแต่ประจุแบตเตอรี่เต็มจนถึงประจุแบตเตอรี่หมด ได้ระยะทางทั้งหมด 22.60 กิโลเมตร และมีการใช้พลังงานทั้งหมด 0.7408 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นราคาค่าพลังงานได้ 2.93 บาทต่อกิโลเมตร ที่ราคาค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยหน่วยละ 3.96 บาทต่อหน่วย

4.10 สรุปผลสมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับระบบสาธารณะ

โครงการวิจัยนี้ได้ทำจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะต้นแบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 และทดสอบสมรรถนะในการขับขี่ และแสดงสมรรถนะของต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะดังตารางที่ 4.15 และแสดงประสิทธิภาพด้านการขับขี่ดังตารางที่ 4.16 ระบบเบรก และใช้คอปดังตารางที่ 4.17 และแสดงมิติของจักรยานยนต์ไฟฟ้างดังตารางที่ 4.18



รูปที่ 4.25 ต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าระบบสาธารณะ

ตารางที่ 4.15 สมรรถนะของต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

ชนิด	Brushless DC Motor
กำลังของมอเตอร์	5000 W 96 V
ความเร็วสูงสุด	90 km/hr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 สมรรถนะด้านการขับเคลื่อนของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

การประจุแบตเตอรี่	การประจุผ่านตัวนำ และการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่
ชนิดของแบตเตอรี่	Li-ion 96 V 7.8 Ah
ระยะเวลาการประจุผ่านตัวนำ	1 ชั่วโมง 45 นาที
ระยะทางสูงสุดต่อการประจุ ที่ 30 กม./ชั่วโมง	25 กิโลเมตร
หน้าจอแสดงผล	หน้าจอดิจิทัล
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	220V
ความจุน้ำหนัก	น้อยกว่า 250 kg
ความชันถนน	11% (20 องศา)

ตารางที่ 4.17 ระบบเบรก และใช้ค้อพ

ชนิดเบรก	ดรัมป์เบรก (ด้านหน้า) ดิสก์เบรก (ด้านหลัง)
ชนิดใช้ค้อพ	ไฮดรอลิก (ด้านขวา) แก๊ส (ด้านหลัง)

ตารางที่ 4.18 มิติของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

มิติของจักรยานยนต์ไฟฟ้า	696 × 1919 × 1089 มม.
เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อ	17 นิ้ว
ขนาดของหน้ายาง	2.5" ,2.75"

บทที่ 5

บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

5.1 บทสรุป

การเปลี่ยนจากจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในให้กลายเป็นจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นนอกจากช่วยลดมลพิษทางอากาศแล้วยังช่วยลดค่าภาระเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ และราคาค่าไฟฟ้ายังมีราคาต่ำกว่าราคาเชื้อเพลิงน้ำมัน แต่จักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อเสียด้านระยะทางในการขับขี่ กลุ่มของพวกเราจึงสนใจการลดปัญหาของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อดึงดูดให้ผู้ใช้งานจักรยานยนต์สนใจจักรยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น จากการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าเมื่อเราทำการเปลี่ยนจักรยานยนต์สาธารณะในกรุงเทพมหานครเป็นจักรยานยนต์ไฟฟ้า สามารถลดมลพิษที่ปลดปล่อยจากการใช้จักรยานยนต์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนของมลพิษลดลงไปได้ถึง 176.163 บาท/กิโลเมตร

จากการศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการลงทุนกับจักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าทางได้จากเงิน จากการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบัน (NPV) จักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่ามากกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยต่างกันว่า 133,537 บาท ในช่วงระยะเวลา 7 ปี และผลจากการวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR), อัตราส่วนของผลประโยชน์ต่อเงินทุน (B/C) และระยะเวลาคืนทุน (PB) ในส่วนของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีค่าที่มากกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งนั่นก็หมายความว่าในด้านของการลงทุนจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีความคุ้มค่ามากกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

และจากการศึกษาประสิทธิภาพของจักรยานยนต์ไฟฟ้า พบว่าในด้านของการใช้พลังงาน เมื่อเปรียบเทียบราคาพลังงานต่อระยะทาง1กิโลเมตร การใช้พลังงานของจักรยานยนต์มีราคาที่ต่ำกว่าจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่ในส่วนของระยะทางการวิ่งจักรยานยนต์ไฟฟ้าถือว่าเป็นข้อดีของจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาที่พบ

จากการดำเนินการทดลองตลอดโครงการวิจัย มีข้อเสนอแนะและปัญหาดังนี้

1. การสั่งของจากประเทศจีนมีความล่าช้า ทำให้ขั้นตอนต่างทดลองต่าง ๆ ดำเนินไปได้ช้า
2. แบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าต้องมีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลไปถึง Ah ที่ต่ำทำให้ระยะทางต่อการวิ่งต่ำ และเมื่อเพิ่มAhที่สูงขึ้น ก็ส่งผลถึงขนาดและน้ำหนักของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่เหมาะสมกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า
3. ควรมีการศึกษาการตั้งสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ เพื่อความสะดวกของผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะ

5.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้จักษยานยนต์ไฟฟ้าที่มีสมรรถนะการขับขี่ที่ใกล้เคียงกับจักษยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในสำหรับระบบสาธารณสุข และเป็นต้นแบบเพื่อลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากจักษยานยนต์สาธารณสุข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการขนส่งทางบก, จำนวนรถจดทะเบียนสะสม, 2560, ค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2561, จาก <https://web.dlt.go.th/statistics/>.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, “การปล่อยก๊าซ CO₂ จากการใช้พลังงานแยกภาคเศรษฐกิจและรายชนิดเชื้อเพลิง,” สถานการณ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคพลังงานรายปี 2560, 2560, หน้า 3-5.
- [3] Andrzej Lebkowski, “TECHNOLOGICAL SOLUTION OF AN ELETRIC POWERTRAIN,” ELECTRIC MOTORCYCLE POWERTRAIN ANALYSIS, 2017, Page 364.
- [4] โชคชัย แสนสีละ, “การเปรียบเทียบการซ่อมบำรุงและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของจักรยานยนต์ไฟฟ้ากับจักรยานยนต์ กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2556.
- [5] กิตติศักดิ์ หมึกแดง และ อติศักดิ์ คามพิณิจ, “รถจักรยานไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วย Brushless DC Motor 2 ตัว,” วิทยานิพนธ์ครุศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2553.
- [6] K. T. Chau, ELECTRIC VEHICLE MACHINES AND DRIVES DESIGN, ANALYSIS AND APPLICATION, 1st Ed., John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015.
- [7] TEXAS INSTRUMENTS, “Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle Using a BLDC Motor,” Application Report, 2014, page 3-10.
- [8] FINANCING SUSTAINABLE CITIES INITIATIVE, “Electric Buses in Cities Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂,” Bloomerg New Energy Finance, 2018, page 21-43..
- [9] ยศพงษ์ ลอนนวล, “การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย,” รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรม, 2558, หน้า 21-30.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>ต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้า</p> <ul style="list-style-type: none"> - ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ - ต้นทุนการเดินทาง 0.11 บาท/กิโลเมตร - ระยะทางสูงสุดต่อการประจุแบตเตอรี่ 22.6 กิโลเมตร ที่ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง - ความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตร/ชั่วโมง
	<p>แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน</p> <ul style="list-style-type: none"> - พิกัด 96 V, 7.6 Ah
	<p>คอนโทรลเลอร์</p> <ul style="list-style-type: none"> - รุ่น SVMC96100 ของบริษัท MQCON - แรงดัน 96V - กระแสลิมิต 100A
	<p>มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน</p> <ul style="list-style-type: none"> - ชนิด BLDC Hub Motor - รุ่น 260 ของบริษัท QS MOTOR - พิกัด 5,000W, 96V

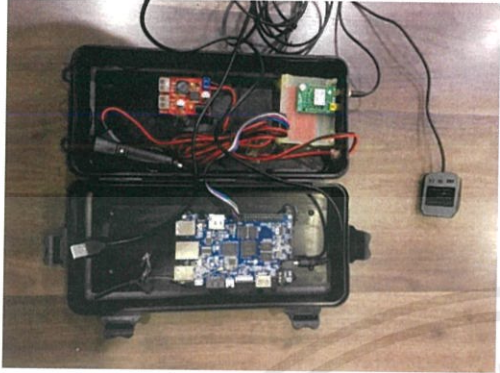

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>คอนเวอร์เตอร์</p> <p>- รุ่น 1600XD ของบริษัท Lippo</p>
	<p>คันเร่งไฟฟ้า</p> <p>- รุ่น FT-03 ของตัวแทนจำหน่าย EBIKE THAIKIT</p>
	<p>หน้าจอแสดงผลLCD</p> <p>- รุ่น LCD-3467 ของตัวแทนจำหน่าย EBIKE THAIKIT</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>DATA CAPTURE W MULTI-GNSS RECEIVERS</p> <p>เครื่องบันทึกค่าข้อมูลจำเพาะต่าง ๆ ของจักษยานยนต์ไฟฟ้า สามารถคำนวณตำแหน่ง ความเร็วและเวลาโดยรับสัญญาณจากดาวเทียม</p>
	<p>Power Quality Analyzer PW3198</p> <p>เครื่องบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า สามารถแสดงผลแบบดิจิทัลได้</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค
บทความทางวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษารถจักรยานยนต์พลังงานไฟฟ้าสาธารณะ เพื่อลดมลภาวะทางอากาศ

A Study of Electric Motorcycle for Public Transport to Decrease Air Pollution

นางสาวดวงกมล เงินอนันต์¹ นายพิพัฒน์ พงษ์นาค² นางสาวครินญา กิจธนไพบุลย์³
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลอมกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

E-mail: bossna_kub@hotmail.com

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะเพื่อลดมลภาวะทางอากาศใน กรุงเทพมหานคร โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในทาง เศรษฐศาสตร์ เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR), ระยะคืนทุน(PB) และสัดส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (P/C) จากการเปลี่ยนรถจักรยานยนต์ สาธารณะแบบเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นรถจักรยานยนต์ ไฟฟ้าสาธารณะ ศึกษาความเปลี่ยนแปลงในการลดมลพิษทาง อากาศหากเปลี่ยนรถจักรยานยนต์สาธารณะแบบสันดาป ภายในจำนวน 50,000 คันเป็นรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า สาธารณะ และศึกษาการออกแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้า สาธารณะ โดยลงพื้นที่สอบถามผู้ขับขี่จักรยานยนต์สาธารณะ เก็บข้อมูลความต้องการ และความคิดเห็นเพื่อนำมาวิเคราะห์ ทางเศรษฐศาสตร์ และใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรม รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า นำผลการออกแบบมาสร้างต้นแบบของ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะโดยนำรถจักรยานยนต์แบบ สันดาปมาดัดแปลงด้วยการเปลี่ยนเครื่องยนต์เป็นมอเตอร์ ไฟฟ้า และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ จากนั้นทดสอบ สมรรถนะการขับขี่ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังนี้ ความเร็วสูงสุด 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง, ระยะทางสูงสุดต่อการประจุแบตเตอรี่ คือ 25 กิโลเมตร และค่าการใช้พลังงาน คือ 0.11 บาทต่อ กิโลเมตร ปริญญานิพนธ์นี้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการ เปลี่ยนแปลงรถจักรยานยนต์แบบสันดาปภายในเป็น รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะได้ซึ่งสามารถลดมลพิษทาง อากาศในกรุงเทพมหานครอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ รถจักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีค่าใช้จ่ายในระยะยาวที่น้อยกว่า รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าแบบสันดาปอีกด้วย

Abstract

This thesis pollution if the internal combustion motorcycle is changed to 50,000 electric motorcycles and studying the design of a public electric motorcycle by asking public motorcycle

riders and collecting information or needs, including opinions for economic analysis by engineering design of public electric motorcycles. The result of the design is to create a prototype of a public electric motorcycle by replacing the internal combustion engine with an electric motor and installing a battery storage system. Then, driving performance test, which results in the highest speed is 90 kilometers per hour, the maximum distance to charge the battery is 25 kilometers and energy consumption is 0.11 baht per kilometer. This thesis can be used as a prototype model for changing the internal combustion motorcycles into a public electrical motorcycle which can significantly reduce air pollution in Bangkok. Additionally, the electric motorcycle also has a long-term cost that is less than the internal combusting motorcycle. proposes a study of public electric motorcycles to reduce air pollution in Bangkok by conducting the study in economic feasibility such as net present value (NPV), internal rate of return (IRR), payback period (PB) and benefit cost ratio (P / C) due to changes in public motorcycles with internal combustion engines as public electric motorcycles. The study will include the change of air .

1. บทนำ

ด้วยปัจจัยทางด้านการค้าเงินชีวิตที่เร่งรีบของคน เมือง และสภาพการจราจรที่ติดขัด ทำให้รถจักรยานยนต์ รั้งจ้าง ถูกใช้อย่างแพร่หลาย จนกลายเป็นการขนส่ง สาธารณะที่มีเอกลักษณ์ที่สุดในโลก สามารถพบเห็นได้ทุก ซอกทุกมุมในเขตกรุงเทพฯ และยังคงเป็นทางเลือกในการ เดินทางของคนเมืองที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะรถจักรยานยนต์สาธารณะที่ประจำอยู่ ณ จุด เชื่อมต่อของสถานีรถไฟฟ้า BTS และรถไฟใต้ดิน MRT จึงทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้รถจักรยานยนต์สาธารณะ สามารถเติมเต็มการเดินทางของ
คนเมืองทั้งในด้านความสะดวกและรวดเร็ว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

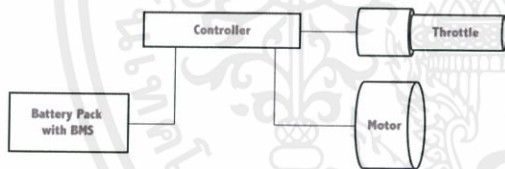
2.1 ทฤษฎีและหลักการการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

จักรยานยนต์ไฟฟ้าเป็นยานพาหนะซึ่งขับเคลื่อน
โดยมอเตอร์ไฟฟ้าแทนการใช้เครื่องยนต์ที่มีการเผาไหม้
สันดาปภายใน รถไฟฟ้าใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งพลังงานแทนที่
น้ำมันหรือเชื้อเพลิงอื่นๆ โดยมอเตอร์ไฟฟ้าในรถไฟฟ้าจะ
เปลี่ยนไฟฟ้าซึ่งโดยปกติมาจากชุดแบตเตอรี่ให้เป็นพลังงาน
กลเพื่อการขับเคลื่อนล้อ เมื่อเปรียบเทียบกับรถที่ใช้ น้ำมัน
องค์ประกอบของจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีความซับซ้อนที่น้อยกว่า
จักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน

ระบบกำลังหมายถึง จักรยานยนต์ไฟฟ้าจะเก็บ
พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่และนำมาใช้ในการขับเคลื่อน
มอเตอร์ โดยมีเครื่องควบคุมการทำงานของชุดแบตเตอรี่
(Battery Management System : BMS)

ระบบพลังงานหมายถึง การไหลผ่านของ
กระแสไฟฟ้าจากที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์จะถูก
กำหนดโดยตัวควบคุมเครื่อง (Motor Controller) ซึ่งเป็น
องค์ประกอบหลักของระบบพลังงาน

การขับเคลื่อนหมายถึง หลักการพื้นฐานของยาน
ยนต์ไฟฟ้าก็คือการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์
ไฟฟ้า โดยใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 1 หลักการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

2.2 หลักการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้
แปรงถ่าน

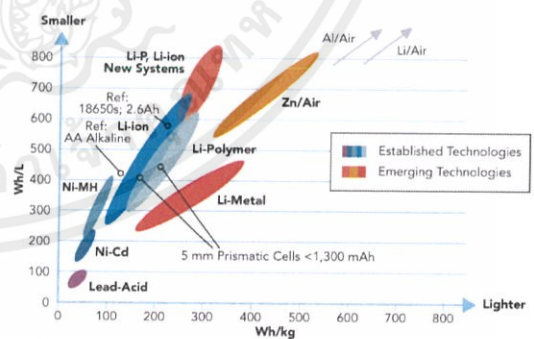
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านหรือ
เรียกว่า Brushless DC motor (BLDC) ที่เลือกมาใช้ใน
การศึกษานี้ เป็นมอเตอร์ซึ่งโครงสร้างประเภทหนึ่งหรือจะเป็นแบบ
permanent magnet synchronous motor (PMSM) ซึ่ง
ต้องใช้ไฟสามเฟสในการขับ ซึ่งในอดีตเราจะเห็นการใช้งาน
มอเตอร์ AC Synchronous นี้ในโรงงานอุตสาหกรรม
เนื่องจากมีแหล่งจ่ายไฟสามเฟส มอเตอร์เหล่านี้จะหมุนด้วย
ความเร็วที่เป็นจำนวนเท่า หรือที่เรียกกันง่าย ๆ ว่า ซิงค์ ของ
ความถี่ของไฟสามเฟสที่จ่าย เช่น 50 Hz ข้อจำกัดในการปรับ
ความเร็วรอบจึงทำให้มอเตอร์ประเภทนี้ไม่ถูกใช้งานมากนัก
ในอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปในครัวเรือน ด้วยเทคโนโลยี
ในปัจจุบัน เราสามารถควบคุมความเร็วรอบที่ค่าต่างๆ โดยไม่

ต้องซิงค์ กับ 50 Hz ได้ไม่ยาก ด้วยอุปกรณ์การขับด้วยวงจรรี
เล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งทำงานโดยการรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
มาสร้างเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสจ่ายให้กับ
มอเตอร์ ซึ่งจริงๆแล้ว DC มอเตอร์เองก็ใช้วิธีสลับทิศทางการ
จ่ายกระแส (Commute) จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายให้
ขดลวดผ่าน Commutator ซึ่งใช้แปรงถ่านในการทำหน้าที่นี้
แต่ในกรณีของ BLDC จะออกแบบให้ขดลวดสเตเตอร์รับ
กระแสไฟฟ้า และมีแม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์หมุนได้ แล้วใช้
วิธีการสลับทิศทางการจ่ายให้ขดลวดด้วยวงจรรีเล็กทรอนิกส์
กำลังแทนการใช้แปรงถ่านจึงกลายเป็นที่มาของชื่อ มอเตอร์
ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน

2.3 แบตเตอรี่ในยานยนต์

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักทางเคมีไฟฟ้าใน
การเก็บพลังงานส่วนประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่
ประกอบด้วยขั้วแบตเตอรี่ (ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด) และสาร
อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) แบตเตอรี่จะเป็นทั้งเซลล์กัลวานิก
(Galvanic cell) ในขณะที่ใช้งาน และเซลล์อิเล็กโทรไลติก
(Electrolytic cell) ในขณะที่ประจุไฟฟ้า ในขณะที่ใช้งาน
กระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแคโทดผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าไปสู่
ขั้วแอโนด

จากปัจจัยองค์ประกอบต่อสมรรถนะแบตเตอรี่
และสมรรถนะเป้าหมายของแบตเตอรี่ดังกล่าวมาจึงเกิดการ
พัฒนาแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด
(lead-acid battery) แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd
battery) แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮดรอกไซด์ (Ni-Mh battery)
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละ
ประเภทมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป



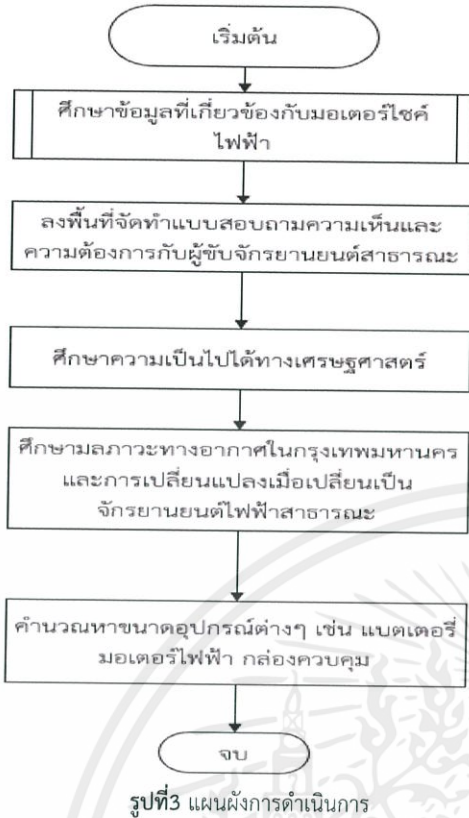
รูปที่ 2 Region chart ของค่าความหนาแน่นพลังงาน และ
พลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ

3. ออกแบบการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการออกแบบต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้า

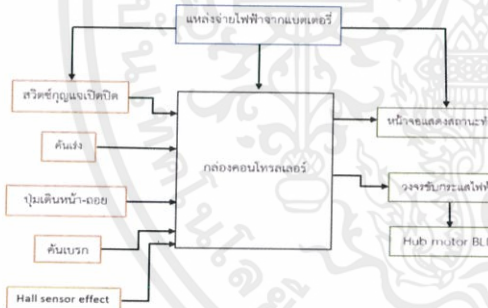
ในการออกแบบต้นแบบจักรยานยนต์ไฟฟ้าเริ่มต้น
จากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับจักรยานยนต์ไฟฟ้า และ
ปฏิบัติตามแผนผังดำเนินการดังรูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แผนผังการดำเนินการ

3.2 แผนผังภาพรวมการเชื่อมต่อของจักรยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 4 แผนผังภาพรวมของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

3.3 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่านดังสมการที่ 1

$$P_{output} = \frac{F_t \times V}{\eta} \quad (1)$$

เมื่อ

F_t = ผลรวมแรงต้านทานการหมุนของล้อกับแรงต้านอากาศ และแรงต้านทานทางอื่น

V = ความเร็วของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการ

η = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

3.4 การคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่

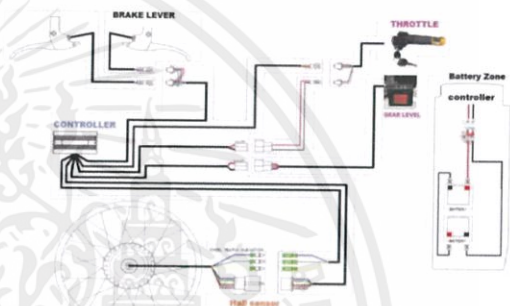
การคำนวณขนาดแบตเตอรี่จะอ้างอิงจากการใช้งานจริงของคนขับวินจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะที่ลงพื้นที่สอบถาม แล้วนำมาหาขนาดที่เหมาะสม

3.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดสอบจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ใช้เครื่องวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อกิโลเมตร โดยใช้เครื่อง Power Quality Analyzer PW3198 ติดตามการเคลื่อนที่ของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

4. ผลการดำเนินการและวิเคราะห์ผล

ในการออกแบบอุปกรณ์ภายในจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยคำนวณขนาดอุปกรณ์ต่าง ๆ จากบทที่ 3 และออกแบบแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 5

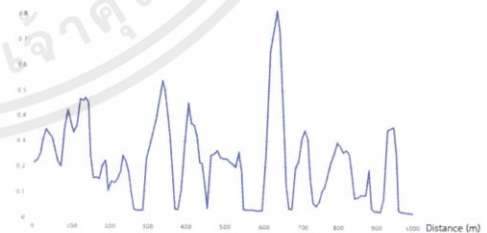


รูปที่ 5 แผนผังการต่ออุปกรณ์ภายในจักรยานยนต์ไฟฟ้า

4.1 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าต่อ 1 กิโลเมตร

ผลการทดสอบจากเครื่อง Power Quality Analyzer PW3198 โดยทดลองการขับขี่จักรยานยนต์ไฟฟ้าบนถนนที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในระยะทาง 1 กิโลเมตร และได้ผลการทดลองคือกราฟ กิโลวัตต์ต่อวัตต์ต่อ กิโลเมตร ดังรูปที่ 6

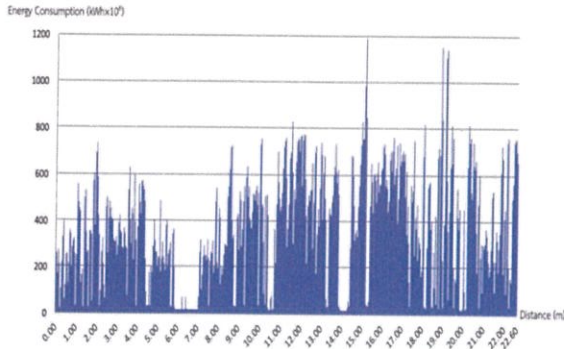
Energy Consumption (kWh x 10³)



รูปที่ 6 การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อ 1 กิโลเมตร

4.2 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าต่อการชาร์จประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่

ผลการทดลองการขับขี่จักรยานยนต์ไฟฟ้าตั้งแต่ประจุแบตเตอรี่เต็มจนถึงแบตเตอรี่หมดได้ระยะทางทั้งหมด 22.60 กิโลเมตร และได้กราฟการใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะทาง 22.60 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การใช้พลังงานไฟฟ้าในระยะทาง 22.60 กิโลเมตร

4.3 สมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

แสดงสมรรถนะจักรยานยนต์ไฟฟ้าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมรรถนะของจักรยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

ชนิดมอเตอร์ไฟฟ้า	Brushless DC Motor
กำลังของมอเตอร์ไฟฟ้า	5000 W 96 V
ความเร็วสูงสุด	90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
การประจุแบตเตอรี่	Li-ion 96V 7.8Ah
ระยะเวลาการชาร์จประจุ	1 ชั่วโมง 45 นาที
หน้าจอแสดงผล	หน้าจอดิจิตอล
ระยะทางสูงสุดต่อการชาร์จ	25 กิโลเมตร
ความจุน้ำหนัก	น้อยกว่า 250 กิโลกรัม
ความชันถนน	11% (20 องศา)

5. บทสรุป

การเปลี่ยนจากจักรยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในให้กลายเป็นจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นนอกจากช่วยลดมลพิษทางอากาศแล้วยังช่วยลดค่าภาระเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากจักรยานยนต์ไฟฟ้านั้นสามารถลดการใช้พลังงานได้และ ราคาไฟฟ้ายังมีราคาต่ำกว่าราคาเชื้อเพลิงน้ำมันจักรยานยนต์ แต่จักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อเสียด้านระยะทางในการขับขี่ ที่น้อยกว่าระยะทางของมอเตอร์ไซค์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปริณยานีพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจการลดปัญหาของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อดึงดูดให้ผู้ใช้จักรยานยนต์สนใจจักรยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นจักรยานยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อเสียด้านระยะทางในการขับขี่ปริณยานีพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจการลดปัญหาของจักรยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อดึงดูดให้ผู้ใช้จักรยานยนต์สนใจจักรยานยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Andrzej Lebkowski, "TECHNOLOGICAL SOLUTION OF AN ELECTRIC POWERTRAIN," ELECTRIC MOTORCYCLE POWERTRAIN ANALYSIS, 2017, Page 364.
- [2] K. T. Chau, ELECTRIC VEHICLE MACHINES AND DRIVES DESIGN, ANALYSIS AND APPLICATION, 1st Ed., John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2015.
- [3] TEXAS INSTRUMENTS, "Hardware Design Considerations for an Electric Bicycle Using a BLDC Motor," Application Report, 2014, page 3-10.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Electric Motorcycle for Public Transport to Decrease Air Pollution

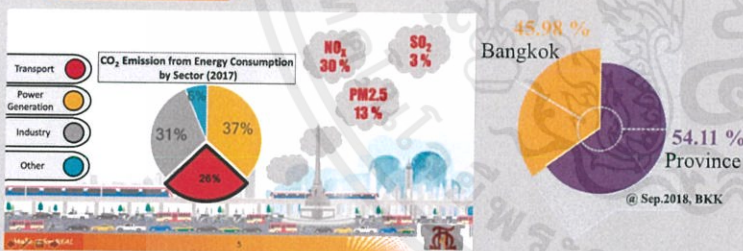
Duangkamon Ngen-anan¹, Phiphat Pongnak² and Sarinya Gitthanapaiboon³ and Assoc. Prof. Dr. Surin Khomfoi⁴

Abstract

This thesis is a study of electric motorcycle for public transport to decrease air pollution in Bangkok. According to widespread use of public traditional motorcycles in Bangkok, there are 99,644 public traditional motorcycles that emit 21,151 tons of carbon dioxide per year (National Statistical Office, 2017). Due to air pollution from public traditional motorcycles, we had studied about the economic feasibility of public traditional motorcycle and public electric motorcycle comparison includes Net Present Value, Internal Rate of Return, Payback Period and Benefit Cost ratio, the air pollution decreasing that arises from changing 50,000 public traditional motorcycles to 50,000 public electric motorcycles.

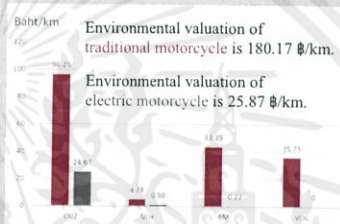
We interviewed public motorcycle drivers. Then, we used the information that we got to design and modify a traditional motorcycle to the public electric motorcycle. Having finished the modification, we rode the public electric motorcycle to test and collect the experimental results. This thesis can be used as an example of changing the traditional motorcycle to the public electric motorcycle and is the way that the air pollution in Bangkok absolutely can be decreased.

Introduction



Results

Environmental potential assessment



Economic potential assessment

	NPV	IRR	B/C	PB
Traditional motorcycle	174,183 ฿	70 %	1.54	1 year and 3 months
Electric motorcycle	371,753 ฿	102 %	3.42	10 months

Driving Test

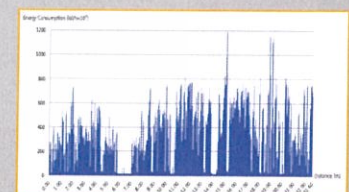


Performance

Max Power Output	5000 W (6.7 hp)
Max Speed	90 Km/Hr
Battery Type	Li-ion 96V 7.8 Ah
Max Range	25 Km
Hill climb ability	20 % (11.49°)
Recharge time	1 Hour 45 mins
kWh/Km	0.0285 kWh/Km
Baht/Km	0.1130 ฿ / Km

Conclusion

This thesis is attractive some public motorcycle drivers to may be change their motorcycle to an electric motorcycle and have a potential to be a good transportation policy to change public traditional motorcycle to public electric motorcycle in Bangkok. At average speed 30 km/hr, Bath per kilometer of electric motorcycle is 0.1130 lower cost than bath per kilometer of traditional motorcycle that is 0.63.



Methodology

Studying and Research
The information and theories about electric motorcycle and their parts

Economic assessment
To analyze value and feasibility of electric motorcycle

Calculate and design
the public electric motorcycle



Environmental assessment
to study the environmental impact of pollution from traditional motorcycle and electric motorcycle

Survey
public motorcycle stations situated close BTS station in Bangkok

Driving test
To drive on the road for performance including velocity, torque and energy consumption and calculate efficiency

References

- K. T. Chau, **ELECTRIC VEHICLE MACHINES AND DRIVES DESIGN, ANALYSIS AND APPLICATION**, 1st Ed., John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2014
- Andrzej Lebkowski, "TECHNOLOGICAL SOLUTION OF AN ELECTRIC POWERTRAIN," **ELECTRIC MOTORCYCLE POWERTRAIN ANALYSIS**, 2017, Page 263



ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นางสาว ดวงกมล เงินอนันต์
 วัน เดือน ปีเกิด 3 มีนาคม 2540
 ที่อยู่ 224/166 ธนาทาวเวอร์ คอนโดมิเนียม
 ซอยจรัญสนิทวงศ์40 ถนนจรัญสนิท
 วงศ์ แขวงบางยี่ขัน เขตบางพลัด
 กรุงเทพฯ 10700

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีวิทยา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สถาบันนวัตกรรม ปตท. แผนก Engine Test Lab

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 มิถุนายน 2560



ชื่อ-นามสกุล นายพิพัฒน์ พงษ์นาค
 วัน เดือน ปีเกิด 3 มกราคม 40
 ที่อยู่ 10/106 ถนน ฉลองกรุง แขวงทับยาว
 เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเตรียม
 อุดมศึกษาน้อมเกล้า

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บริษัท ผลิตไฟฟ้าราชบุรี จำกัด (มหาชน)

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 มิถุนายน 2560



ชื่อ-นามสกุล นางสาว ศรินญา กิจธนไพบุลย์

วัน เดือน ปีเกิด 5 กรกฎาคม 2540

ที่อยู่ 69/235 ซอยจรัญสนิทวงศ์23 ถนน
จรัญสนิทวงศ์ แขวงบางขุนศรี เขต
บางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558

ปีการศึกษา 2561

ฝึกงานภาคฤดูร้อน

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีวิทยา
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าพระนครเหนือ แผนก
บำรุงรักษาไฟฟ้าตามแผน
ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 31 มิถุนายน 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้