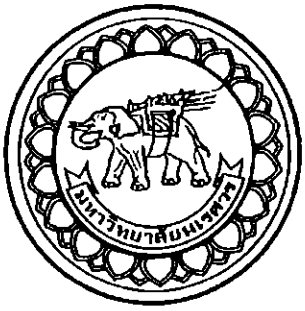


การออกแบบและจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

Design and simulation of electric car used in the city

นายเกรียงไกร	เทศสมบูรณ์	รหัส 52360898
นายธีรวัฒน์	ทองบุญโท	รหัส 52361024
นายเนชรินณ์	ฉิมพาลี	รหัส 52361062

ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 2 ต.ค. 2556
เลขทะเบียน 1643059
เลขเรียกหนังสือ ว.
มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พ. 2555

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2555

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน การออกแบบและจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

ผู้ดำเนินโครงงาน

นายเกรียงไกร	เทศสมบูรณ์	รหัส	52360898
นายธีรวัฒน์	ทองบุญโท	รหัส	52361024
นายเนชรินณ์	ฉิมพาลี	รหัส	52361062

ที่ปรึกษาโครงงาน ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็น**ส่วนหนึ่งของ**การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ
(รศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร. ขวัญชัย ไกรทอง)

หัวข้อโครงงาน : การออกแบบและจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

ผู้ดำเนินโครงงาน นาย เกรียงไกร เทศสมบูรณ์ รหัส 52360898
นาย ธีรวัฒน์ ทองบุญโท รหัส 52361024
นาย เนชรินณ์ ฉิมพาลี รหัส 52361062
ที่ปรึกษาโครงงาน: ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว
สาขาวิชา: วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา: 2555

.....

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาออกแบบและสร้างแบบจำลองของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณการใช้พลังงานภายในระบบของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง, โหลดภาระต่างๆและวัฏจักรการขับขี่ (Driving Cycle) สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานเมืองโครงงานนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 35 กิโลวัตต์ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (100Ah/10Hr) จำนวน 15 ลูก น้ำหนักรวมของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองประมาณ 950 กิโลกรัม และน้ำหนักของคนขับและผู้โดยสารประมาณ 150 กิโลกรัม ในการสร้างแบบจำลองเพื่อหาความเร็ว, ความเร่งและระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถวิ่งไปได้ไกลสูงสุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการสร้างแบบจำลองของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 จะสรุปได้ว่าอัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 3.98 m/s^2 และระยะทางที่ได้ต่อการชาร์จ 1 ครั้งเท่ากับ 85 กิโลเมตร

Project title: Design and simulation of electric car used in the city
Name: Mr. Kriangkrai Thessomboon ID 52360898
Mr. Teerawat Thongboontho ID 52361024
Mr. Necharin Chimphalee ID 52361062
Project advisor: Dr. Ananchai Ukaew
Major: Mechanical Engineering
Department: Mechanical Engineering
Academic year: 2012

ABSTRACT

The project is to study for designing and creating model of electric car used in the city. The computation used energy within the system of electric cars, were explained by MATLAB program, load burden and driving cycle. The project has a DC motor with 35 kW and 15 lead-acid batteries (100Ah/10hr) and total weight is about 950 kg. The weight of drivers and passengers are about 150 kg. According to create model of this project is for computing acceleration and maximum distance which can run furthest, in order to compare the information's creating of model of electric cars (General Motors EV1). This can conclude that computing acceleration is 3.98 m/s^2 and maximum distance which is 85 km for charging once.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งกรุณาให้โอกาสให้ความรู้ความแนะนำคำปรึกษาและตรวจข้อบกพร่องต่างๆจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล, ผศ.ดร. ขวัญชัย ไกรทอง ที่ให้ความกรุณารับเป็นกรรมการในการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้ดำเนินโครงการอย่างสม่ำเสมอตลอดมา และบุคคลอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้ตลอดจนให้การดูแลและให้ประสบการณ์เกี่ยวกับการทำงาน ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อท่านผู้สนใจ ได้ในระดับหนึ่งตลอดจนเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

นาย เกรียงไกร เทศสมบูรณ์
นาย ธีรวัฒน์ ทองบุญโท
นาย เนชรินณ์ ฉิมพาลี

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญกราฟ ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน 2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.6 แผนการดำเนินงาน 2
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน 3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 4
2.1 แบบจำลองแรงฉุดลาก 4
2.2 แบบจำลองมอเตอร์ 9
2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่ 10
2.4 แบบจำลองการไหลเวียนพลังงาน 13

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 14
3.1 การสร้างแบบจำลองสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 14
3.2 การสร้างแบบจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 21
3.3 ข้อมูลของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 25

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 27
4.1 ผลการตรวจสอบ Code 27
4.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 29
4.3 การสร้างแบบจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 30
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 31
5.1 บทสรุป 31
5.2 ข้อเสนอแนะ 32
อ้างอิง 33
ภาคผนวก 34
ภาคผนวก (ก) 35
ภาคผนวก (ข) 39
ประวัติผู้จัดทำโครงงาน 65

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.2 ตารางรายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน 3
2.1 ตารางแสดงพารามิเตอร์ของสมการที่ 2.19 10
3.1 ตาราง specification ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 17
3.2 ตาราง specification of General Motors EV1 25
4.1 ตารางสรุปผลการตรวจสอบและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง 28
4.2 ตารางการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง
กับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 30
1 ก ตารางแสดงข้อมูลต่างๆ ของมอเตอร์ BLDC 35 kW 38

สารบัญกราฟ

กราฟที่ หน้า

3.1 กราฟแสดง Driving cycle ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง 21
3.2 กราฟแสดงสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 26
3.3 แสดงระยะทางขับขี่ไกลสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1
เปรียบเทียบระหว่าง Headlights, radio, and heater on.และOnly the radio on 26
4.1 แสดงการหาระยะการขับขี่สูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1
จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB 27
4.2 กราฟแสดงการหาระยะขับขี่สูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1
จากผลการจำลองของหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained 28
4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองกับ
รถยนต์ไฟฟ้า General MotorsEV1 29
4.4 แสดงแบบจำลองระยะทางสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเปรียบเทียบกับ
รถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 30

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์ 4
2.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน 6
2.3 แผนภาพการไหลเวียนของพลังงานที่การเข้า-ออกส่วนประกอบภายในระบบของรถไฟฟ้า ทั้งไปข้างหน้าธรรมดา และการเบรกซ้ำ 13
3.1 รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองที่ใช้ในการจำลอง (ก) 15
3.2 รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองที่ใช้ในการจำลอง (ข) 15
3.3 รถยนต์ไฟฟ้า Smart รุ่น Fortwo Electric Drive 16
3.4 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 35 kW 18
3.5 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid) ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ 22
3.6 รถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 25

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

F_r คือ แรงต้านทานการกลิ้ง (N)

μ_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง แรงดันลมและพื้นถนน

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

F_d คือ แรงต้านทานจากอากาศ (N)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน

v คือ ความเร็วของรถ (m/s)

F_d คือ แรงตามทางลาดชัน (N)

θ คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

$F_{a,l}$ คือ แรงต้านจากความเร่งเชิงเส้น (N)

a คือ ความเร่ง (m/s^2)

T คือ แรงบิดของมอเตอร์ (Nm)

F_t คือ แรงต้านรวมทั้งหมด (N)

G คือ อัตราทดเกียร์

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rpm)

r คือ รัศมีของยาง (m)

F_{ω} คือ แรงของล้อที่ต้องการให้เกิดความเร่งเชิงมุม (N)

η_g คือ ประสิทธิภาพระบบเกียร์

η_m คือ ประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า

k_c คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากทองแดง

k_i คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากธาตุเหล็ก

k_w คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทานและใบพัดลม

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ(ต่อ)

C	คือ การสูญเสียพลังงานคงที่นำไปใช้ที่ความเร็วใดๆ(ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและแรงบิด)
E	คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)
DoD	คือ ความลึกการปล่อยของแบตเตอรี่ (%)
n	คือ จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่
I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
P	คือ กำลังของแบตเตอรี่ (W)
V	คือ แรงดันย่อยของแบตเตอรี่ (V)
R	คือ ค่าต้านทานภายในของเซลล์ (Ω)
C_P	คือ ความจุของแบตเตอรี่ (Ah)
k	คือ ความสามารถในการจุกระแสไฟฟ้า
T	คือ เวลา(ชั่วโมง)
CR	คือ ประจุที่ออกจากแบตเตอรี่
P_{le}	คือ กำลังที่จำเป็นในการเคลื่อนย้ายพาหนะ (W)
i	คือ อัตราทดเฟือง

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันปัญหาสภาวะโลกร้อนได้มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและธรรมชาติบนโลกเป็นอย่างมาก สาเหตุเหตุหนึ่งของปัญหาเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ในรถยนต์ และในปัจจุบันมีจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นทำให้ความต้องการการใช้พลังงานเชื้อเพลิงก็เพิ่มขึ้นด้วย ราคาพลังงานเชื้อเพลิงก็เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่แหล่งทรัพยากรธรรมชาติลดน้อยลงเรื่อยๆ ทำให้มีการหาพลังงานทดแทนมาแทนที่พลังงานจากเชื้อเพลิงมากขึ้น ในการใช้พลังงานทดแทนโดยการใช้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยลดมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้เกิดความคิดที่จะทำแบบจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นโปรแกรมจำลองการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเพื่อหาสมรรถนะและระยะทางที่สามารถวิ่งได้ไกลที่สุดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองได้ เพื่อใช้เป็นตัวเลือกในการตัดสินใจสร้างรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อออกแบบจำลองระบบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.2.2 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ทราบถึงข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้า, มอเตอร์และแบตเตอรี่

1.3.2 ได้ทราบถึงหลักการทำงานของรถยุนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.3.3 ผู้ที่สนใจและผู้ที่ทำการศึกษาสามารถนำข้อมูลความรู้เกี่ยวกับรถไฟฟ้าที่เป็นประโยชน์ไปใช้งานในการตัดสินใจออกแบบได้

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

1.4.1 ออกแบบรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองขนาด 2 ที่นั่ง แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid) (12V, 100AH) มอเตอร์ BLDC ขนาด 35 kW และน้ำหนักรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองรวมกับน้ำหนักของผู้ขับขี่ 1100 กิโลกรัม

1.4.2 ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณแบบจำลองการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.4.3 ใช้ข้อมูลของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1เป็นข้อมูลเปรียบเทียบและตรวจสอบ code

1.4.4 ใช้วัฏจักรการขับขี่แบบ Simplified Urban Driving Cycle เป็นการจำลองสภาพการขับขี่ในเมือง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆเกี่ยวกับรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.5.2 ศึกษาเกี่ยวปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.5.3 คำนวณหาค่าตัวแปลที่จำเป็นต่างๆของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.5.4 สร้างแบบจำลองของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1.5.5 ทดสอบผลที่ได้จากการจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เปรียบเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

1.5.6 สรุปวิเคราะห์ผลและจัดทำรายงาน

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางระยะเวลาการดำเนินงาน

การดำเนินการ	พ.ศ. 2555				พ.ศ. 2556				
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค	ม.ค.	ก.พ.	มี.ย.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	■	■							
2. ออกแบบระบบจำลอง			■	■	■				
3. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและสรุปผลการทดลอง						■	■	■	
4. จัดทำรายงานผลการทดลอง									■

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

ตาราง 1.2 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

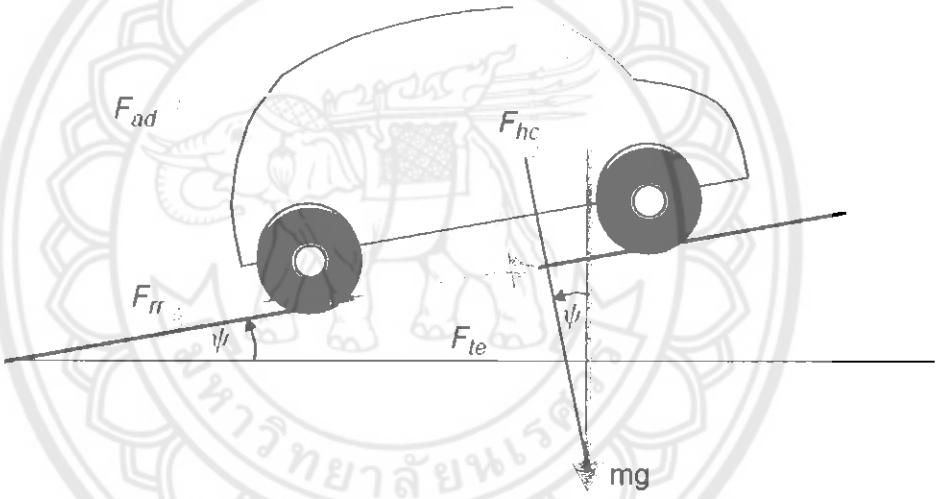
ลำดับที่	รายการ	ราคา	
1	ค่ากระดาษ	1200	บาท
2	ค่าพิมพ์รายงาน	1000	บาท
3	ค่าเข้าเล่มโครงงาน	800	บาท
รวม		3000	บาท

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

การจำลองระบบของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง จะต้องสร้างจากหลักการวิศวกรรมและทฤษฎี 4 อย่าง คือ แรงฉุดลาก มอเตอร์ แบตเตอรี่และการไหลเวียนพลังงาน

2.1 แบบจำลองแรงฉุดลาก

ขั้นตอนแรกในการสร้างแบบจำลองการทำงานของยานยนต์คือการหาสมการสำหรับแรงฉุดลาก ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนที่ของยานยนต์ที่ส่งไปยังพื้นถนนผ่านล้อ พิจารณายานยนต์ของมวล m ดำเนินการที่ความเร็ว v ขึ้นทางลาดชันของมุม ψ เช่นเดียวกับใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์

2.1.1 แรงต้านการเคลื่อนที่การกลิ้ง (Rolling resistance force)

แรงต้านทานส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสภาพพื้นถนนและยังมีแรงต้านทานจากแบริ่ง, ชุดเฟืองเกียร์ โดยจะประมาณให้แรงต้านทานการกลิ้งนั้นคงที่และไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ แต่จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของยานยนต์ แสดงได้ดังสมการ

$$F_{rr} = \mu_{rr} m g \tag{2.1}$$

โดย

F_{rr} คือ แรงต้านทานการกลิ้ง (N)

μ_{rr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง แรงดันลมและพื้นถนน

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 (m/s^2)

2.1.2 แรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศ (Aerodynamic drag)

เนื่องจากแรงต้านทานจากอากาศเป็นแรงที่เกิดจากตัวรถเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ซึ่งแรงต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้ารถ, รูปร่างของยานยนต์และชิ้นส่วนที่ยื่นออกจากข้างตัวรถแสดงได้ดังสมการ

$$F_{ad} = \frac{1}{2}\rho A C_d v^2 \tag{2.2}$$

โดย

F_{ad} คือ แรงต้านทานจากอากาศ (N)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ

v คือ ความเร็วของรถ (m/s)

2.1.3 แรงตามทางลาดชัน (Hill climbing force)

แรงตามทางลาดชันนี้เป็นแรงที่สำคัญสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์เพื่อไปข้างหน้าเมื่อขึ้นทางลาดชันและแรงตามทางลาดชันขึ้นอยู่กับน้ำหนักของยานยนต์และความชัน แสดงได้ดังสมการ

$$F_{cl} = mg\sin\theta \tag{2.3}$$

โดย

F_{cl} คือ แรงตามทางลาดชัน (N)

θ คือ มุมความลาดเอียงของพื้น

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

2.1.4 แรงต้านจากความเร่ง (Acceleration force)

โดยปกติยานยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วหนึ่งๆ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของยานยนต์เราจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงให้กับยานยนต์ โดยแรงที่เพิ่มให้กับยานยนต์นี้คือแรงต้านจากความเร่ง ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$F_{a,l} = ma \tag{2.4}$$

โดย

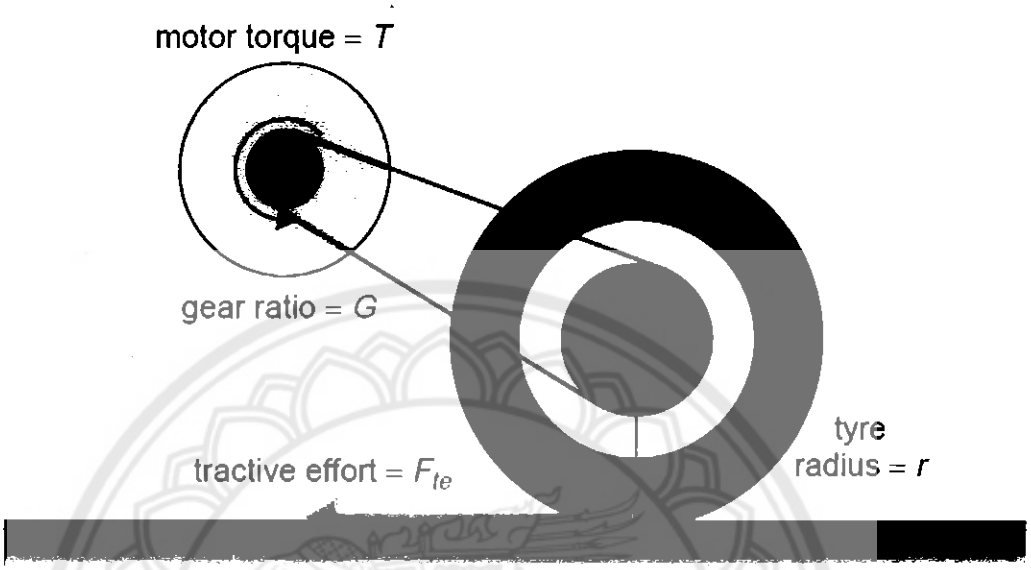
$F_{a,l}$ คือ แรงต้านจากความเร่งเชิงเส้น (N)

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

a คือ ความเร่ง (m/s^2)

อย่างไรก็ตาม เพื่อความถูกต้องเกี่ยวกับแรงที่ทำให้ยานยนต์มีความเร่ง เราจะพิจารณาเฉพาะส่วนที่เกิดการหมุน (Angular acceleration) ตลอดจนความเร่งเชิงเส้น (linear acceleration)

2.1.5 แรงจากความเฉื่อยของล้อ (Moment of inertia)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน

จากรูปที่ 2.2 เห็นได้ชัดเจนว่า แรงบิดของล้อเท่ากับ $T = \frac{F_{te}\, r}{G}$ เมื่อ r คือรัศมีของยางและ F_{te} คือแรงที่พยายามดึงจากการส่งกำลังกำลังของมอเตอร์ ถ้า G คืออัตราทดเกียร์ของระบบมอเตอร์เชื่อมไปยังล้อ และ T คือแรงบิดของมอเตอร์แล้วจะได้สมการคือ

$$F_{te} = \frac{G}{r} T \tag{2.5}$$

ทำการแก้ไขสมการอีกครั้ง ดังนี้
ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

ความเร็วเชิงมุมเพลา $\omega = \frac{v}{r} rad/s$

ดังนั้น

$$\omega = G\frac{v}{r} rad/s \tag{2.6}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\dot{\omega} = G\frac{a}{r} rad/s^{-2}$$

แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการเร่งความเร็วเชิงมุมนี้คือ

$$T = IG\frac{a}{r} \tag{2.7}$$

เมื่อ I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์ของมอเตอร์ แรงของล้อที่ต้องการให้ความเร่งเชิงมุม $\left(F_{\omega a}\right)$ ที่พบโดยการรวมสมการ จากสมการที่ (2.5) และจากสมการที่ (2.7) จะได้

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} IG\frac{a}{r} \tag{2.8}$$

$$F_{\omega a} = I\frac{G^2}{r^2}a \tag{2.9}$$

ในสมการที่ (2.9) ผ่านมาเราได้สันนิษฐานว่าระบบเกียร์มีประสิทธิภาพ100% แต่ในความเป็นจริงระบบจะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นด้วย ทำให้ระบบเกียร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่า100% ดังนั้นจากสมการที่ (2.9) จะได้ว่า

$$F_{\omega a} = I\frac{G^2}{\eta_g r^2}a \tag{2.10}$$

โดย

$F_{\omega a}$ คือ แรงของล้อที่ต้องการให้เกิดความเร่งเชิงมุม (N)

η_g คือ ประสิทธิภาพระบบเกียร์

2.1.6 แรงรวมทั้งหมดจากการส่งกำลังของมอเตอร์

$$F_{te} = F_{rr} + F_d + F_{cl} + F_{al} + F_{\omega a} \tag{2.11}$$

โดย

F_{rr} คือ แรงต้านทานการกลิ้ง (N)

F_d คือ แรงต้านทานจากอากาศ (N)

F_d คือ แรงปตามทางลาดชัน (N)

F_{al} คือ แรงต้านจากความเร่งเชิงเส้น (N)

$F_{\omega a}$ คือ แรงของล้อที่ต้องการให้เกิดความเร่ง(N)

จาก $\omega < \omega_c$,หรือ $v < \frac{r}{G}\omega_c$ ดังนั้น $T = T_{\max}$

เมื่อแรงบิดนี้คงที่ถูกส่งผ่าน $\omega \le \omega_c$ หรือ $v \le \frac{r\omega_c}{G}$ แล้วทั้งพลังงานเป็นค่าคงที่เช่นเดียวกับมอเตอร์ประเภท brushless หรือมอเตอร์ซิงโครนัส 3 เฟส และเราจะได้

$$T = \frac{T_{\max}\omega_c}{\omega} = \frac{rT_{\max}\omega_c}{Gv} \tag{2.12}$$

หรือแรงบิดตามสมการเชิงเส้น

$$T = T_0 - k\omega$$

เมื่อสมการ (2.7) จะถูกแทนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมจะได้

$$T = T_0 - \frac{kG}{r}v \tag{2.13}$$

จากสมการที่ (2.11) แทนค่าสมการจะได้

$$F_{te}\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_dv^2 + ma + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}a$$

แทนค่าสมการที่ (2.5) สำหรับ F_{te} และสังเกตว่า $a = \frac{dv}{dt}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{G}{r}T\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_dv^2 + \left(m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}\right)\frac{dv}{dt} \tag{2.14}$$

ในระยะเร่งเริ่มต้นเมื่อ $T = T_{\max}$ ดังนั้นสมการที่ (2.14) กลายเป็น

$$\frac{G}{r}T_{\max}\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_dv^2 + \left(m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}\right)\frac{dv}{dt} \tag{2.15}$$

และในระยะที่ 2 เมื่อ $T = T_{P_{const}} = \frac{rT_{\max}\omega_c}{Gv}$ แรงบิดจะลดลงด้วยกำลังมอเตอร์คงที่ $T_{P_{const}}$ ดังนั้นจะได้

$$\frac{G}{r}T_{P_{const}}\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_dv^2 + \left(m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}\right)\frac{dv}{dt} \tag{2.16}$$

2.2 แบบจำลองมอเตอร์

ในระบบรถไฟฟ้า มอเตอร์จะแทนที่เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ในการให้แรงบิดที่จะขับรถตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งยังมีผลต่อแรงฉุดของยานพาหนะ สมการแรงบิดมอเตอร์ ความเร็วเชิงมุมและประสิทธิภาพของมอเตอร์จะถูกแสดงไว้ในสมการที่ (2.17), (2.18) และ (2.19) ตามลำดับดังนี้

2.2.1 แรงบิดมอเตอร์ (T)

จากสมการที่ (2.5) จะได้แรงบิดของมอเตอร์คือ

$$T = \frac{F_{tc} r}{G} \; N.m \tag{2.17}$$

2.2.2 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

จาก ความเร็วเชิงมุมเพลา $= \frac{v}{r} \; rad/s$

ดังนั้นความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ $\omega = G\frac{v}{r} \; rad/s$ (2.18)

ในทำนองเดียวกันการเร่งความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ $\dot{\omega} = G\frac{a}{r} \; rad/s^{-2}$

2.2.3 ประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งที่มาสำคัญของการสูญเสียในการแปรงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเช่นเดียวกับทุกประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้าและสามารถแบ่งออกเป็นสี่ประเภทหลักดังนี้ ประการแรกมีความสูญเสียที่ที่ทองแดง เหล่านี้เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของสายและแปรงของมอเตอร์นี้จะทำให้เกิดความร้อนและบางส่วนของพลังงานไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานไฟฟ้าผลของความร้อนกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วรอบในการหมุน

$$\eta_m = \frac{\text{output power}}{\text{input power}}$$

$$\eta_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i + k_w + C} \tag{2.19}$$

โดย

k_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทองแดง

k_i คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียธาตุเหล็ก

k_w คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทานและพัดลม

C คือ การสูญเสียคงที่นำไปใช้ที่ความเร็วใดๆ(ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและแรงบิด)

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของสมการที่ (2.19)

ตัวแปร	มอเตอร์ขนาด $2-5kW$	มอเตอร์ขนาด $100kW$
k_c	1.5	0.3
k_i	0.1	0.01
k_w	10^{-5}	5×10^{-6}
C	20	600

2.3 แบบจำลองแบตเตอรี่

2.3.1 แรงดันไฟฟ้าแต่ละชนิดของแบตเตอรี่

พฤติกรรมพลวัตของแบตเตอรี่จะมีผลกระทบอย่างมากกับประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่ทั่วไปมี 3 ประเภท คือ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid), นิกเกิลแคดเมียม และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แต่ละประเภทจะมีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (E) ของแบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถ คำนวณการเสื่อมของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid)

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1 เซลล์หรือมากกว่า แบตเตอรี่ประกอบด้วยอุปกรณ์

$$E = n\cdot\left(2.15 - DoD\cdot\left[2.15-2.00\right]\right) \tag{2.20}$$

แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์

นอกเหนือจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid) ในเวลาต่อมายังมีการพัฒนาแบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel Metal Hydride) หรือที่เรียกโดยย่อว่า NiMH ที่มีความจุพลังงานสูงขึ้น แบตเตอรี่ NiMH นับเป็นเทคโนโลยีที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid) แล้ว ยังมีความปลอดภัย ทนทานต่อการใช้งานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า

$$E = n\cdot\begin{pmatrix} -8.2816DoD^7 \\ +2.35749DoD^6 \\ -30DoD^5 \\ +23.7053DoD^4 \\ -12.5877DoD^3 \\ +4.1315DoD^2 \\ -0.8658DoD+1.37 \end{pmatrix} \tag{2.21}$$

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

จากแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid) ที่นำพาการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้ามานับศตวรรษ มาถึงแบตเตอรี่ NiMH ที่เป็นรูปแบบหลักในยานยนต์ลูกผสมในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาเพื่อใช้ในยานยนต์ ทั้งนี้ด้วยความจุพลังงานสูงค่าแรงดันต่อหน่วยย่อยสูง (3.6 โวลต์ต่อหน่วยย่อย) รวมทั้งเป็นแบตเตอรี่ที่ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ

$$E = n \cdot 3.3 \tag{2.22}$$

(พลังงานปกติ =3.3v up to 80% DoD)
ที่จำนวน n ของเซลล์แบตเตอรี่และ DoD เป็นการควบคุมการถ่ายประจุของแบตเตอรี่ (0 to 1)

2.3.2 การจำลองการใช้งานของแบตเตอรี่

ขั้นตอนแรกคือการหาสมการสำหรับ I กระแสจากแบตเตอรี่เมื่อถูกกดใช้งานที่กำลังไฟ $P(W)$โดยมีสมการดังนี้

$$P = V \times I$$

ดังนั้นจาก $$P = V \times I = (E - IR) \times I = EI - RI^2$$

ดังนั้นพลังงานที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่คือ

$$I_B = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP_{bat}}}{2R} \tag{2.23}$$

จาก $$V = E + IR$$

ดังนั้น $$V = V \times I = (E + IR) \times I = EI + RI^2$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ใช้ในช่วงเบรกคือ

$$I_B = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP_{bat}}}{2R} \tag{2.24}$$

ค่า R คือค่าต้านทานภายในของเซลล์ปกติ

2.3.3 การจำลองความจุของแบตเตอรี่

จุดเริ่มต้นของการจำลองความจุของแบตเตอรี่คือ มีความสามารถในการจุกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่าความจุ Peukert ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากสมการดังนี้

$$C_P = I^k T \tag{2.25}$$

โดยที่ค่า k แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-acid) $(k \approx 1.2)$ และลิเทียมไอออน $(k \approx 1)$ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ Peukert เทียบเท่ากับความจุ Amp hours
ความจุของแบตเตอรี่ (CR) มีการอัพเดทสำหรับขั้นตอนในแต่ละครั้ง (δt) ดังแสดงในสมการ
การจ่ายกระแสทั้งหมดออกจากแบตเตอรี่โดย n ขั้น ของการจำลอง

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \times I^k}{3600} Ah \tag{2.26}$$

ความลึกของการปล่อยกระแสของแบตเตอรี่คืออัตราส่วนของการชาร์จออกไปที่เดิมความจุ ดังนั้น ใน n ขั้นตอนที่ ของการจำลองขั้นตอนโดยขั้นตอนนี้คือ

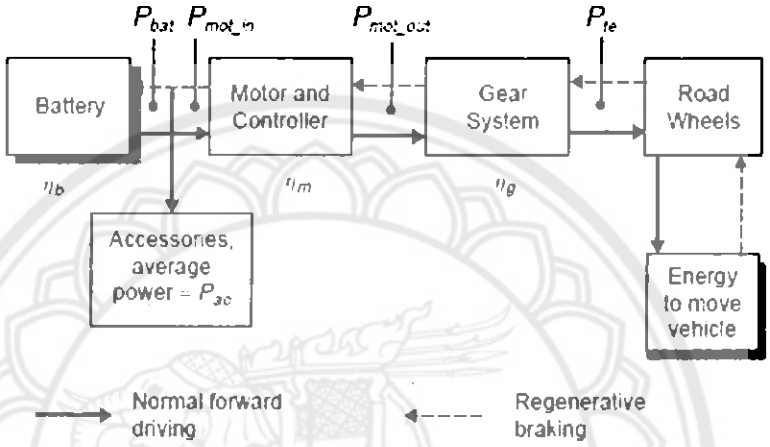
$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_P} \tag{2.27}$$

การชาร์จออกจากช่วงเบรก

$$CR_{n+1} = CR_n - \frac{\delta t \times I^k}{3600} Ah \tag{2.28}$$

2.4 แบบจำลองการไหลเวียนพลังงาน

เพื่อให้มีประสิทธิภาพ การจำลองการใช้พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการคำนวณและปรับปรุงอัตราการใช้พลังงานไปในส่วนประกอบต่างๆ ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง และล้อกับถนน ดังนั้นรูปแบบจะต้องมีความสามารถในการจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระแสไฟฟ้าในการขับขี่และการเบรก แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลเวียนของพลังงานที่เข้า - ออกส่วนประกอบภายในระบบของรถไฟฟ้าทั้งไปข้างหน้าธรรมดา และการเบรกช้ำ

2.4.1 กำลังที่จำเป็นในการเคลื่อนย้ายพาหนะสำหรับทุกวินาทีคือ:

$$P_{te} = F_{te} \times v \tag{2.29}$$

2.4.2 กำลังของมอเตอร์ในรูปแบบการเคลื่อนที่คือ:

$$P_{mot_in} = \frac{P_{mot_out}}{\eta_m}, P_{mot_out} = \frac{P_{te}}{\eta_g} \tag{2.30}$$

2.4.3 กำลังของมอเตอร์ในรูปแบบการเบรกคือ:

$$P_{mot_in} = P_{mot_out} \bullet \eta_m, P_{mot_out} = P_{te} \bullet \eta_g \tag{2.31}$$

2.4.4 พลังงานที่ใช้จากแบตเตอรี่คือ:

$$P_{bat} = P_{mot_in} + P_{ac} \tag{2.32}$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินโครงงาน

ในการดำเนินโครงการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การสร้างแบบจำลองสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองและการสร้างแบบจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

3.1 การสร้างแบบจำลองสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

การจำลองนี้เป็นการจำลองเพื่อหาสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยหาความเร่งและความเร็วสูงสุดที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถวิ่งได้

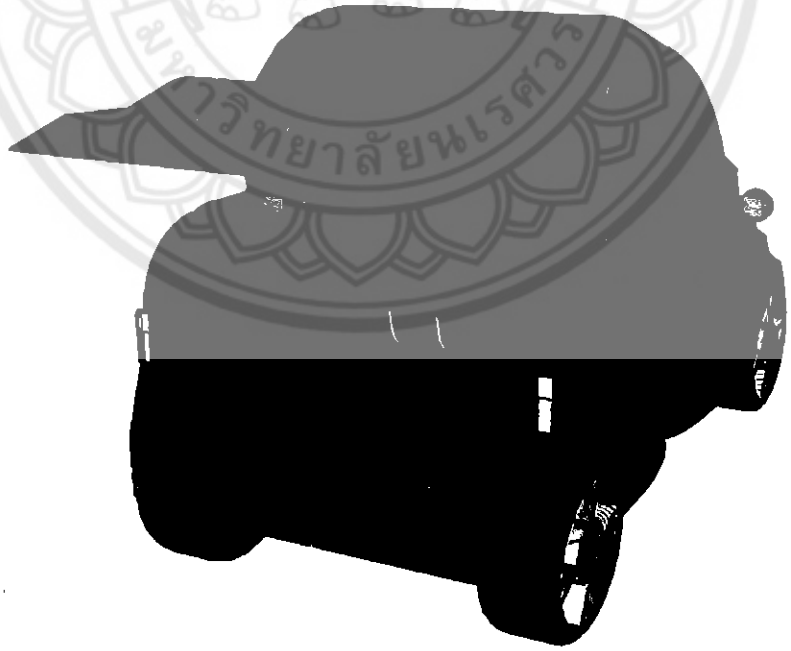
3.1.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

ในขั้นตอนการดำเนินงานเริ่มต้นจากการออกสำรวจความคิดเห็นความชอบและศึกษาค้นคว้าข้อมูลการจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้หลักการเดียวกับการจำลองรถไฟฟ้าแต่กำหนดตัวแปรต่างๆเป็นของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองแทนเนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองมีหลักการทำงานเหมือนรถไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแบบจำลองประสิทธิภาพรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองมีดังต่อไปนี้

1. น้ำหนักรวมของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง (mass, m)
2. ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ (Drag coefficient, C_d)
3. ค่าสัมประสิทธิ์ของการต้านต่อการหมุน (Rolling resistance, μ_{rr})
4. อัตราส่วนเกียร์ (Gear ratio, G)
5. ประสิทธิภาพเกียร์ (Gearing efficiency, η_g)
6. ประสิทธิภาพมอเตอร์ (Motor efficiency, η_m)
7. ขนาดมอเตอร์ (Power, P)
8. รัศมีล้อรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง (Tire radius, r)
9. พื้นที่ด้านหน้าของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง (Frontal area, A)
10. แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ (Max motor torque, T_{max})

3.1.2 การคำนวณหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

รูปที่ 3.1 รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองที่ใช้ในการจำลอง (ก)



รูปที่ 3.2 รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองที่ใช้ในการจำลอง (ข)

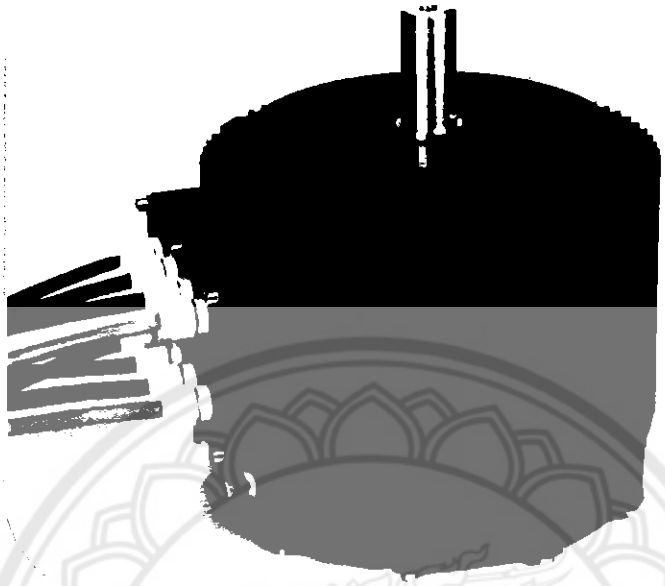
3.1.3 สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ (C_d)

รูปที่ 3.3 รถยนต์ไฟฟ้า Smart รุ่น Fortwo Electric Drive

เนื่องจากเราไม่สามารถทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ (C_d) ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองได้เอง ดังนั้นเราจึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศโดยออกแบบรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองให้มีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับรถยนต์ไฟฟ้า Smart รุ่น Fortwo Electric Drive เพื่อที่จะนำค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศของรถยนต์ไฟฟ้า Smart รุ่น Fortwo Electric Drive มาใช้ในแบบจำลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศคือ 0.38 ดังนั้นเราจึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเท่ากับ 0.38 เพื่อใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 3.1 specification ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

Total Vehicle Mass	950 kg
Passengers mass	150 kg
Climbing ability	5%
Coefficient of drag	0.38
Frontal area	1.225 x 1.525 x 0.8 m (1.6 m^2)
Tire radius	12 " (0.305 m)
Rolling resistance	0.015
Gear ratio	1:9
Gear efficiency	95%
Motor efficiency	94.9%
Power	35 kW
Limit motor torque	120 N.m
Max motor speed	6000 rpm
Max car speed	120 km/h
Battery Type	Lead-acid
Peukert coefficient	1.15
Number Of cells	90
Cell voltage	2
Capacity (Ah)	100
Depth of Discharge	80 %
Motor Type	Electric Vehicle Brushless Permanent Magnet DC Motor



รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรงขนาด $35\ kW$

ระยะที่ 1

หาสมการแรงบิดคงที่ในระยะเริ่มต้นจากสมการที่ (2.15)

$$\frac{G}{r}T_{\max}\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_d v^2 + \left(m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}\right)\frac{dv}{dt}$$

แทนค่าสมการที่(2.15) จะได้

$$\frac{9}{0.305}\times 120\times 0.95 = \left(0.015\times 1100\times 9.81\right) + 0.625\times 1.6\times 0.38v^2 + 1155\frac{dv}{dt}$$

ย้ายข้างสมการจะได้

$$1155\frac{dv}{dt} = 3202.07 - 0.38v^2$$

$$\therefore \frac{dv}{dt} = 2.77 - 0.00033v^2 \qquad 3.1$$

ระยะที่ 2

จากมอเตอร์ทำงานคงที่เท่ากับ $35kW$ หาแรงบิดจากสมการที่ 2.12 ดังต่อไปนี้

$$T = \frac{T_{\max}\omega_c}{\omega} = \frac{rT_{\max}\omega_c}{Gv}$$

$$T = \frac{0.305\times 35000}{9v} = \frac{1186.11}{v}$$

หาความเร็วขณะแรงบิดสูงสุดจะได้เท่ากับ

$$v = \frac{r}{G}\omega_c = \frac{0.305\times 628.32}{9} = 21.29 m/s$$

หาความเร็วขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์สูงสุดได้เท่ากับ

$$v = \frac{r}{G}\omega_{\max} = \frac{0.305\times 983.51}{9} = 33.33 m/s$$

เมื่อความเร็วถึง $33.33\ m/s$ สามารถหาสมการความเร็วได้จากสมการที่ 2.16 ดังต่อไปนี้

$$\frac{G}{r}T_{P_{comp}}\eta_g = \mu_{rr}mg + 0.625AC_dv^2 + \left(m + I\frac{G^2}{\eta_g r^2}\right)\frac{dv}{dt}$$

แทนค่าในสมการที่ 2.16 โดยกำหนดให้ $T_{P_{comp}} = \frac{1186.11}{v}$ จะได้

$$\frac{9}{0.305}\times\frac{1186.11}{v}\times 0.95 = (0.015\times 1100\times 9.81) + 0.625\times 1.6\times 0.38v^2 + 1155\frac{dv}{dt}$$

$$\frac{33249.97}{v} = 161.86\times 0.38v^2 + 1155\frac{dv}{dt}$$

ย้ายข้างสมการ

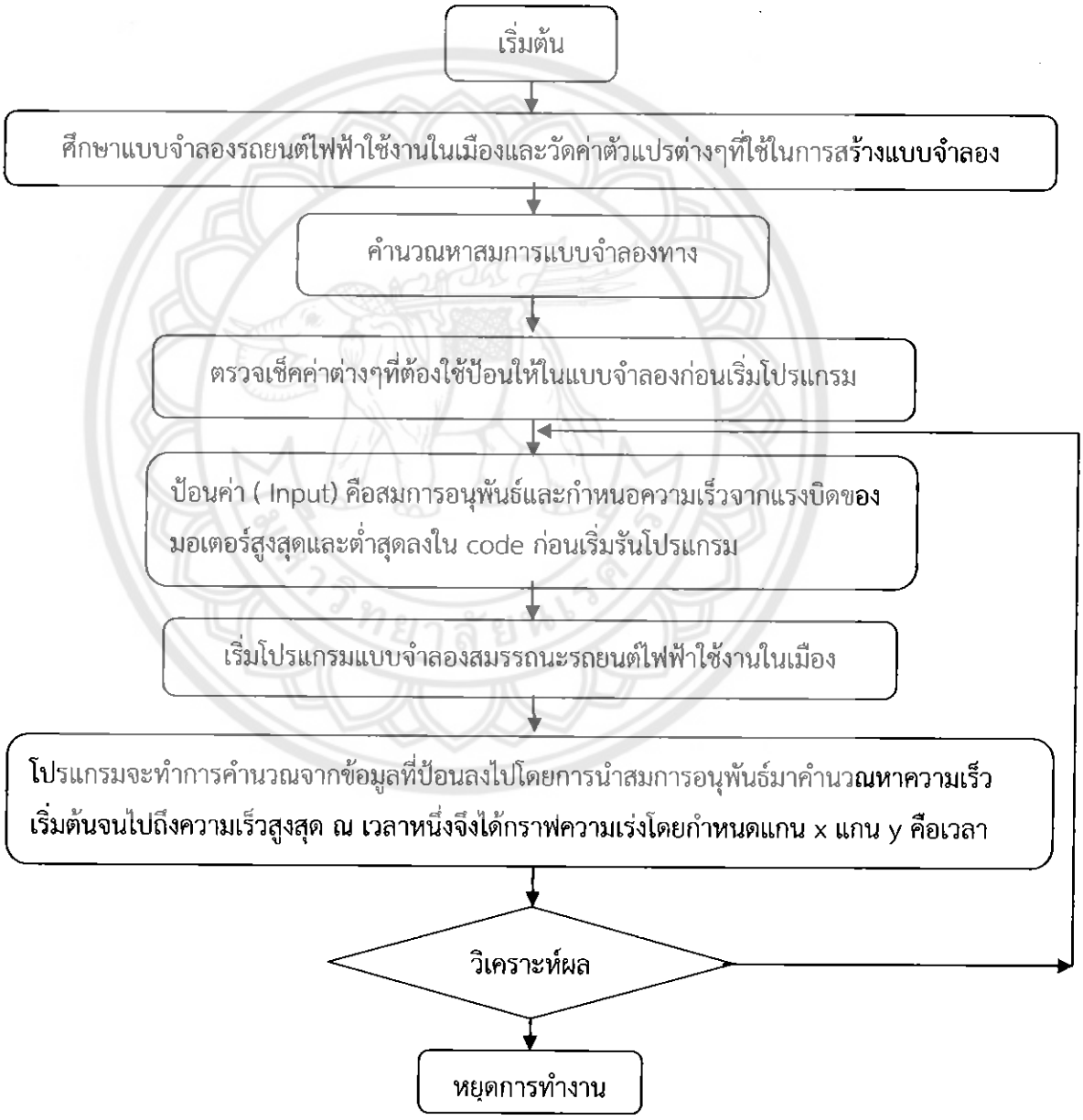
$$\therefore \frac{dv}{dt} = \frac{28.78}{v} - 0.14 - 0.00033v^2 \qquad 3.2$$

ดังนั้นจะได้สมการอนุพันธ์(Differential equation) ของความเร่งสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 นำไปคำนวณหาสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้ MATLAB โดยจะได้กราฟความเร่งของรถยนต์ไฟฟ้าในเมืองและความเร็วสูงสุดที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถวิ่งได้

3.1.4 ขั้นตอนการจำลองบนโปรแกรม MATLAB

ในขั้นตอนการจำลองบนโปรแกรม MATLAB จะทำการเขียนคำสั่ง (Code) เพื่อใช้คำนวณหากราฟความเร่งของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้สมการอนุพันธ์ (Differential equation) ของความเร่งสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 มาใส่ใน Code ของแบบจำลองและกำหนดขอบเขตของความเร็วขณะที่มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุดต่ำสุด

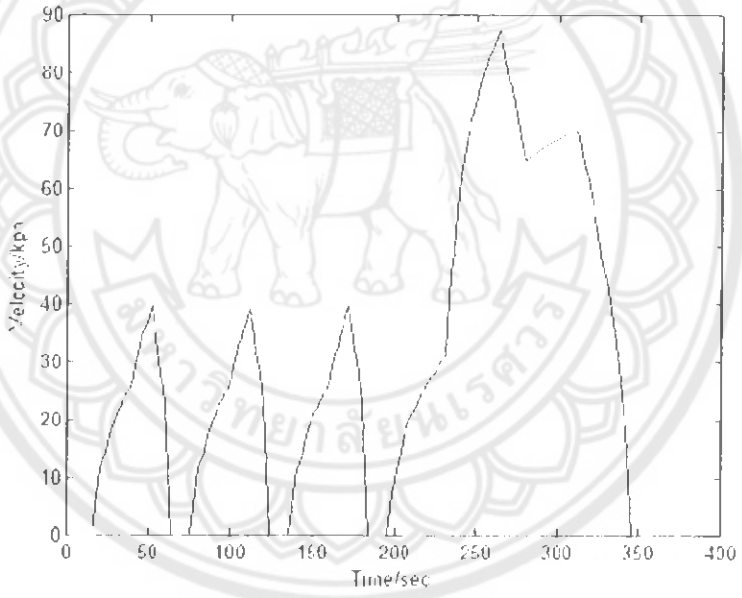
3.1.5 แผนผังขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองสมรรถนะรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง



3.2 การสร้างแบบจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

การจำลองการขับขี่เป็นการจำลองการไหลเวียนพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังส่วนต่างๆของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองที่สามารถทำให้รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเคลื่อนไปได้ไกลแค่ไหนต่อการชาร์จ 1 ครั้ง โดยจะใช้ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแบบจำลองประสิทธิภาพรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในการจำลองจากหัวข้อที่ 3.1 และใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 15 ลูกต่อกันแบบอนุกรมซึ่งจะได้แรงดันรวมเท่ากับ 180 โวลต์ โดยจะเพิ่ม input เพิ่มเติมคือ วัฏจักรการขับขี่ (Driving cycle) ซึ่งจะเลือกวัฏจักรการขับขี่ของรถไฟฟ้าใช้งานในเมืองเนื่องจากมีความเร็วใกล้เคียงกัน เมื่อได้ข้อมูลดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะนำไปคำนวณในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถวิ่งไปได้ไกลสูงสุดต่อการชาร์จ 1 ครั้งและแรงบิดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองขณะขับขี่

3.2.1 กราฟวัฏจักรการขับขี่ (Driving cycle)



กราฟที่ 3.1 แสดง Driving cycle ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

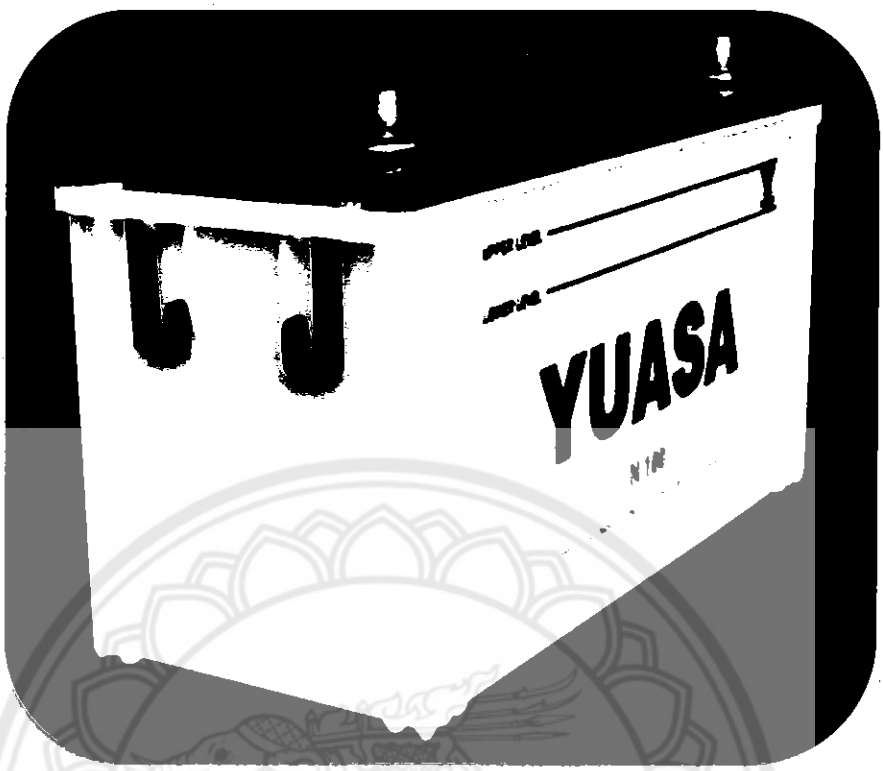
3.2.2 การจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในโปรแกรม MATLAB

3.2.2.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลอง

1. แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid) ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ 15 ลูก, ผลรวมของNo of cells = 90, Capacity = 100 Ah

2. จำกัดการปล่อยกระแสของแบตเตอรี่ (Limit discharge) ที่ 80%.

3. Regenerative ratio : Regen = 0



รูปที่ 3.5 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-acid) ขนาดแรงดัน 12 โวลต์

3.2.2.2 การคำนวณในโปรแกรม MATLAB

การคำนวณในโปรแกรม MATLAB สามารถทำได้จากการสร้างหนึ่งโปรแกรมหลักและสองโปรแกรมย่อยดังนี้

1. EVCAR.m (เป็นโปรแกรมหลักในการจำลอง)
2. one_cycle.m (แบบจำลองการไหลของพลังงานในหนึ่งรอบการขับขี่)
3. VELOCITY.m (Driving cycle ของรถไฟฟ้าใช้งานในเมือง)

เมื่อได้โปรแกรมการคำนวณทั้ง 3 โปรแกรมโดยโปรแกรมหลักจะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับ Input จาก 2 โปรแกรมย่อยเพื่อที่จะคำนวณหาระยะทางที่รถไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถเคลื่อนที่ไปได้ โดยกำหนดการใช้พลังงานแบตเตอรี่ทั้งหมด 80% เพื่อป้องกันการเสื่อมของแบตเตอรี่

1. โปรแกรม EVCAR.m เป็นโปรแกรมหลักในการจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

คำสั่ง (code) ของโปรแกรมหลักในการคำนวณของแบบจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยการกำหนดค่าตัวแปลต่างๆ ที่จำเป็นในการคำนวณ เช่น ค่าตัวแปรต่างๆ ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง ชนิดของแบตเตอรี่ที่ใช้ และค่าพลังงานที่สูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เป็นต้น หลังจากนั้นโปรแกรมจะนำค่าตัวแปรต่างๆส่งให้กับโปรแกรม ONE_CYCLE.m เพื่อคำนวณการใช้พลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองวิ่งที่ความเร็วขณะนั้น เมื่อได้ค่าพลังงานของแบตเตอรี่โปรแกรมจะ update ค่าการใช้พลังงาน ณ ความเร็วต่างๆ จนพลังงานที่อยู่ในแบตเตอรี่หมด โปรแกรมจะแสดงเป็นกราฟแสดงระยะทางการวิ่งของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเทียบกับการใช้พลังงานของแบตเตอรี่

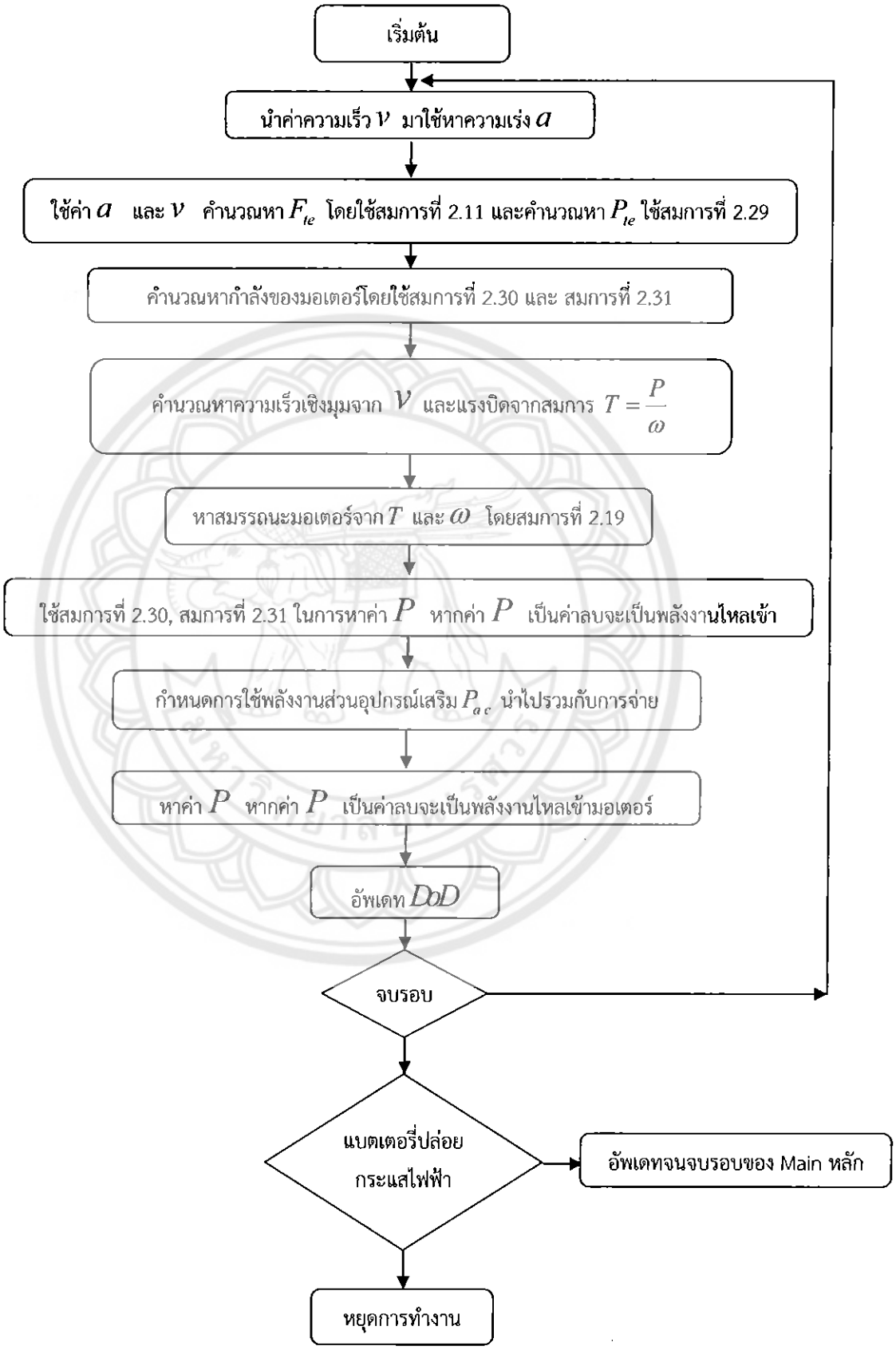
2. โปรแกรม ONE_CYCLE.m เป็นโปรแกรมการคำนวณการจำลองการไหลเวียนพลังงานที่ใช้ในระบบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

คำสั่ง (code) ของโปรแกรม ONE_CYCLE.m การคำนวณการไหลเวียนพลังงานในแบบจำลองของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในขณะที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองวิ่งที่ความเร็วแตกต่างกันรวมไปถึงการใช้พลังงานส่วนของการเบรกเพื่อนำค่าการใช้พลังงานต่างๆส่งไปยังโปรแกรมหลักเพื่อทำการ update ต่อไป

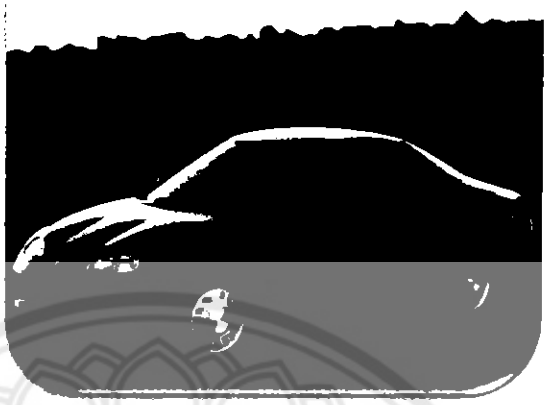
3. โปรแกรม VELOCITY.m เป็นโปรแกรมการจำลองการจำลองการวิ่งของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

คำสั่ง (Code) ของโปรแกรม VELOCITY.m เป็นการนำค่าความเร็วในการวิ่งจากวัฏจักรการขับขี่แบบ (SFUDS urban driving cycle) ของรถที่ใช้งานในเมืองซึ่งแสดงในกราฟที่ 3.5 นำมาใส่ในโปรแกรมเพื่อใช้เป็นค่า input ในการจำลองการวิ่ง

3.2.3 ลำดับขั้นตอนการจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในโปรแกรม MATLAB



3.3 ข้อมูลของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1



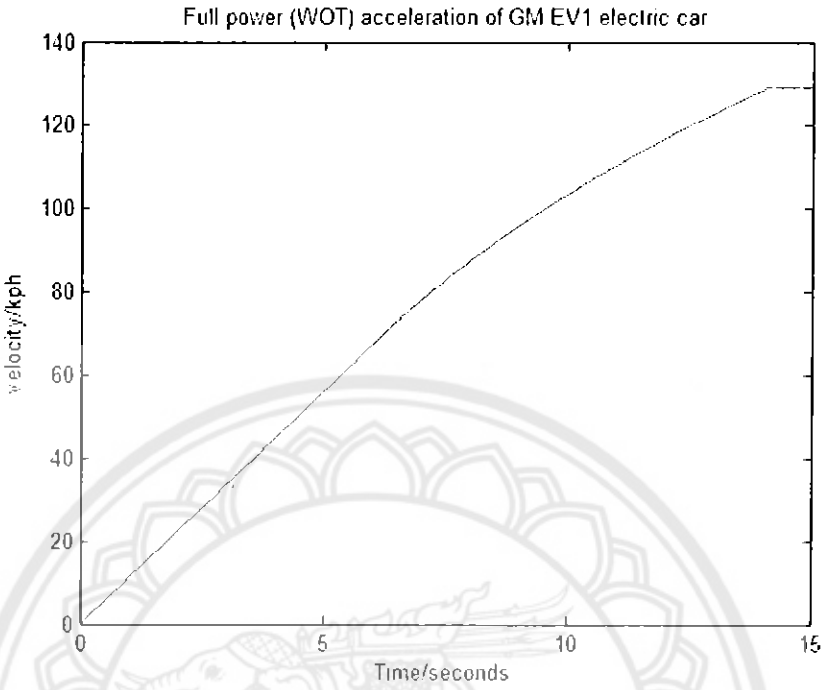
รูปที่ 3.6 รถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

ทำการตรวจสอบโปรแกรมโดยทำการจำลองรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 เพื่อตรวจสอบดูว่าได้คำตอบคล้ายกันโดยมีข้อมูลรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 ดังตารางที่ 3.2

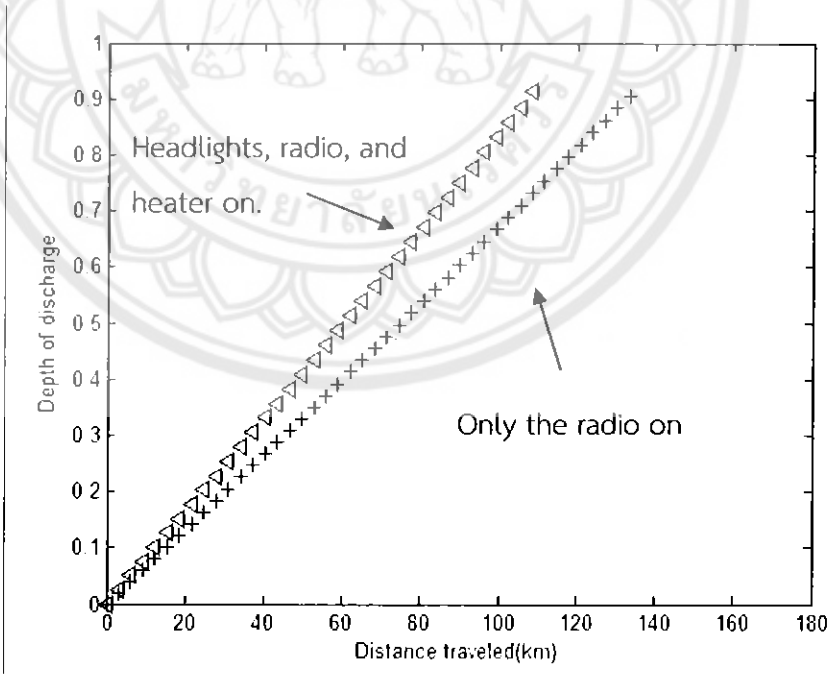
ตารางที่ 3.2 specification of General Motors EV1

vehicle mass	1400 kg
driver and a passenger	140 kg
gear ratio	11:1
max Torque	140 Nm
Continuous speed	7000 rpm
Max speed	19.8 m/s
Power motor	102 kW
frontal area	1.8 m^2
Gear efficiency	0.95
Motor efficiency	90 %
Battery Type	Lead-acid
Peukert coefficient	1.12
Number Of cells	156
Cell voltage	2 V
Capacity (Ah)	60
Limit discharge	80 %

3.3.1 กราฟแสดงสมรรถนะการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1



กราฟที่ 3.2 แสดงสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1



กราฟที่ 3.3 แสดงระยะทางขับขี่ไกลสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

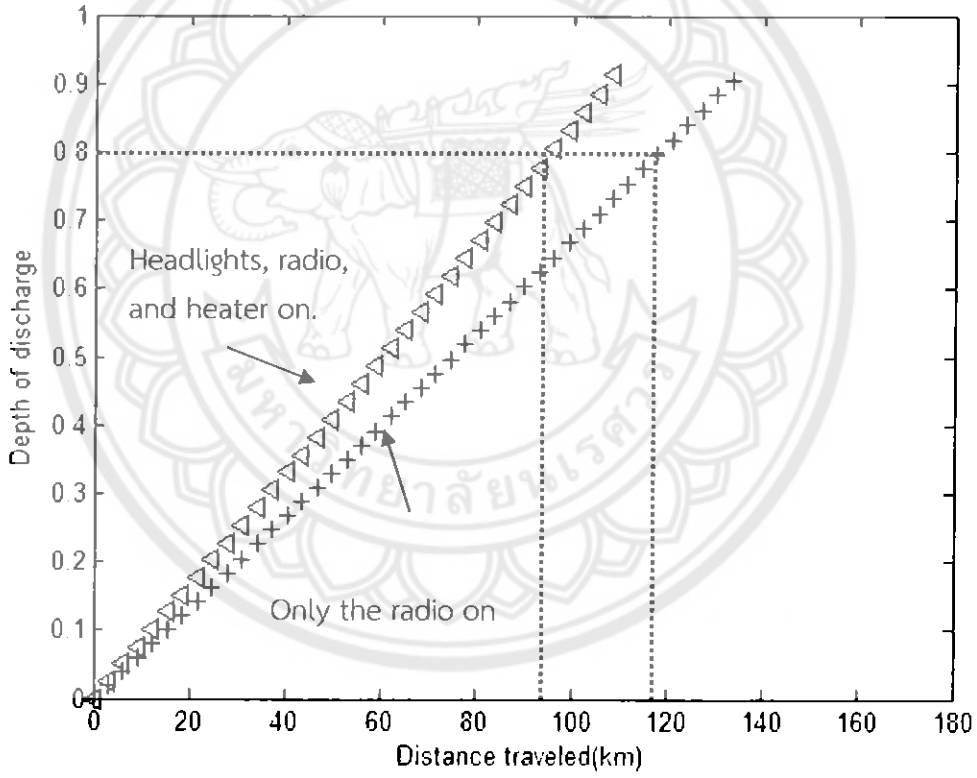
เปรียบเทียบระหว่าง Headlights, radio, and heater on.และOnly the radio on

บทที่ 4

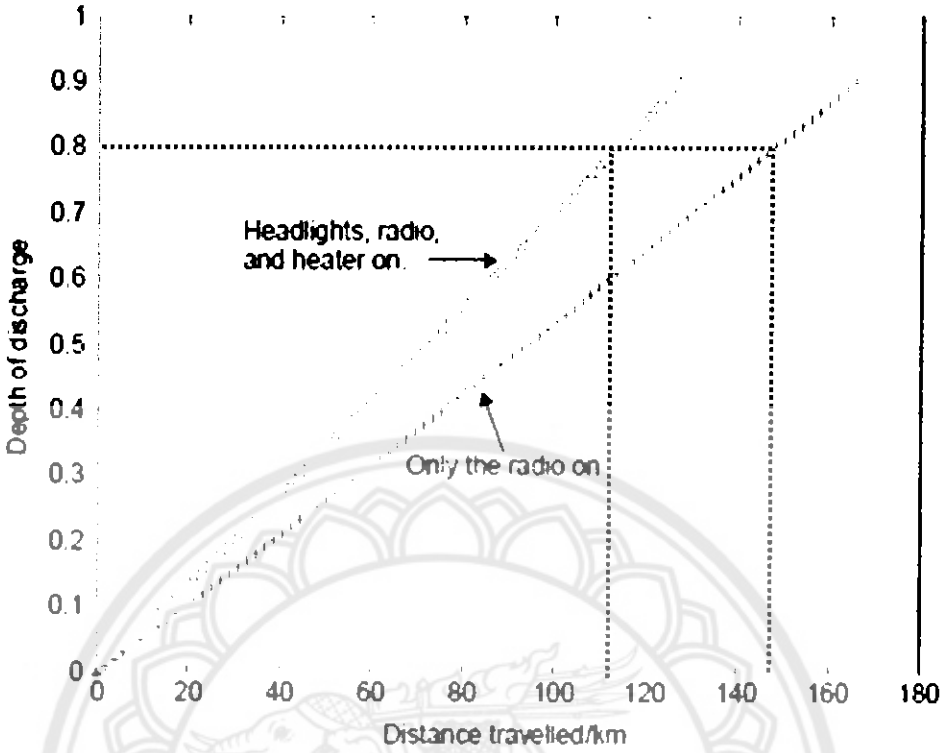
ผลการทดลองและวิเคราะห์

4.1 ผลการตรวจสอบ Code

4.1.1 ผลการตรวจสอบ Code ระยะขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับผลการจำลองของหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained



กราฟที่ 4.1 แสดงการหาระยะการขับขี่สูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 จากการจำลองในโปรแกรม MATLAB



กราฟที่ 4.2 แสดงการหาระยะขับขี่สูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 จากผลการจำลองของหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained

จากกราฟที่ 4.1 และ กราฟที่ 4.2 สรุปได้ว่าระยะการขับขี่สูงสุดของการจำลองระยะขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 เปรียบเทียบกับผลการจำลองของหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained ดังตารางที่ 4.1

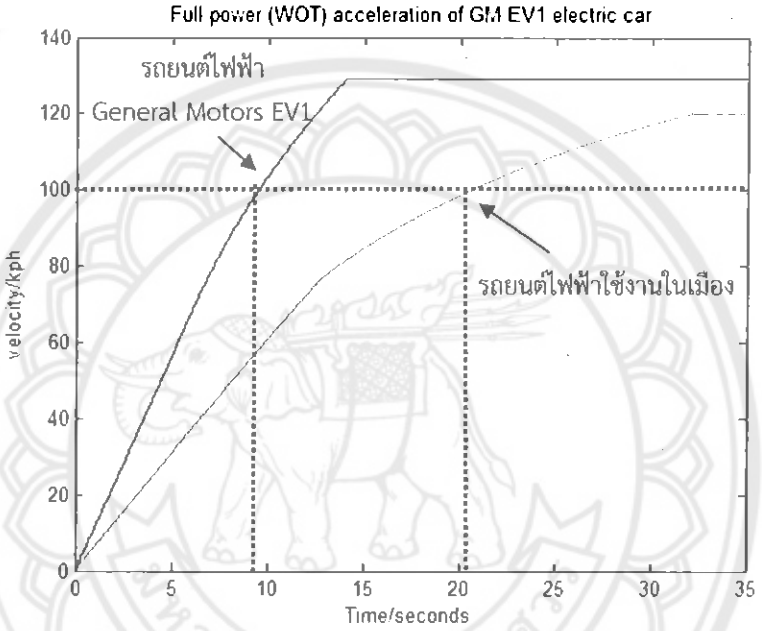
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการตรวจสอบและความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

	Headlights, radio, and heater on	Only the radio on
ผลการจำลอง	95	118
ผลการวิจัย	117	145
error	18.8 %	18.62 %

4.2 ผลจากการจำลองสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

4.2.1 การจำลองหาอัตราเร่งสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

จากการจำลองหาความเร็วสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยใช้สมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 คำนวณในโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังกราฟที่ 4.3



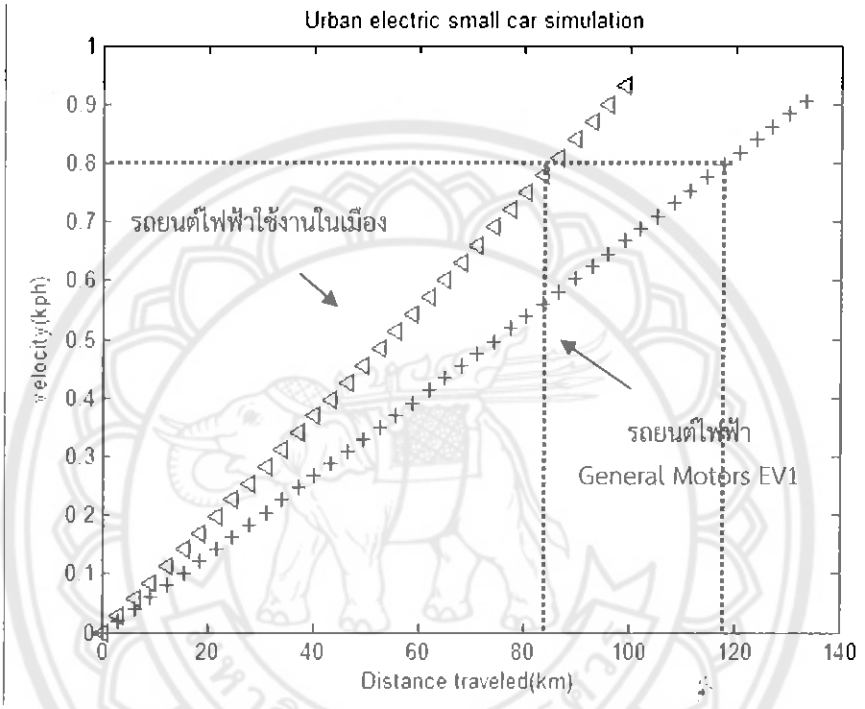
กราฟที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

กับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

จากกราฟที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่ารถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในแบบจำลองสามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุดที่ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1ในแบบจำลองสามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุดที่ความเร็ว 130 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในกราฟที่ 4.3 เป็นแบบจำลองหาอัตราเร่งของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองโดยมีความเร่งจาก 0 ถึง 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้เวลาประมาณ 21 วินาทีและรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 ทำเวลาได้ประมาณ 9 วินาที

4.3 ผลการจำลองการขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

การจำลองหาระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองวิ่งไปได้ไกลสูงสุดโดยใช้ Driving cycle ของรถยนต์ไฟฟ้าที่แสดงกราฟที่ 3.5 เป็นแบบจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองและใช้คุณสมบัติต่างๆรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองเป็นค่า input ในการคำนวณลงในโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ได้แสดงดังกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.4 แสดงแบบจำลองระยะทางสูงสุดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

เปรียบเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้การใช้พลังงานแบตเตอรี่สูงสุด 80 % (ซึ่งถือว่าเป็นระดับวิกฤตของแบตเตอรี่) จะเห็นว่ารถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองในสามารถวิ่งไปได้ระยะทางสูงสุดประมาณ 85 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง เมื่อเปรียบเทียบกับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 ค่าที่ได้จากแบบจำลองรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 วิ่งได้ระยะทางประมาณ 118 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองกับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

	รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง	General Motors EV1
0 – 100 (km/h)	21 (s)	9 (s)
Distance/charge	85 (km)	118 (km)

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ผลของการเปรียบเทียบลักษณะและขนาดของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองกับรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 มีขนาด 2 ที่นั่ง ใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรถ่าน (Brushless DC Motor) ขนาด 35 กิโลวัตต์ น้ำหนักของรถยนต์ไฟฟ้ารวมผู้ขับขี่และผู้โดยสาร 1100 กิโลกรัม แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead acid) 12 โวลต์ จำนวน 15 ลูก และรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 ใช้มอเตอร์ขนาด 102 กิโลวัตต์ น้ำหนักรวมทั้งหมดของรถยนต์ไฟฟ้า 1540 กิโลกรัม แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead acid) 12 โวลต์ จำนวน 26 ลูก

ผลการจำลองสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง พบว่ามีอัตราเร่งสูงสุดที่ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาประมาณ 32 วินาที และรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 มีอัตราเร่งสูงสุดที่ 130 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาประมาณ 14 วินาที

ผลการจำลองสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองมีอัตราเร่ง 0 – 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาประมาณ 21 วินาที และรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 มีอัตราเร่ง 0 – 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาประมาณ 9 วินาที

ผลการจำลองหาระยะการขับขี่ที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมืองสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุดประมาณ 85 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง และรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 สามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุดประมาณ 118 กิโลเมตรต่อการชาร์จ 1 ครั้ง

ความคลาดเคลื่อนจากผลการหาระยะสูงสุดในการขับขี่ โดยมีอุปกรณ์เสริม (Headlight radio and heater on) มีค่าความคลาดเคลื่อน 18.8 % และผลการจำลองหาระยะสูงสุดในการขับขี่ โดยมีอุปกรณ์เสริมเพียง (The radio on) มีค่าความคลาดเคลื่อน 18.62 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการใส่ค่า input ของลักษณะการขับขี่ (Drive cycle) ที่หลากหลาย เพื่อหาค่าเฉลี่ยของระยะทางสูงสุดของการขับขี่

5.2.2 การจำลองหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ควรจะเลือกชนิดแบตเตอรี่มากกว่าหนึ่งชนิด เพื่อความหลากหลายในการจำลองและเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกใช้แบตเตอรี่

อ้างอิง

กมลศักดิ์ จำปาศักดิ์ และธนกร สามโพธิ์ศรี. *การออกแบบและจำลองรถจักรยานไฟฟ้าดัดแปลง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2554.

ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. *วิศวกรรมยานยนต์*. (พิมพ์ครั้งที่ 10). กรุงเทพมหานคร : บริษัทจูน พับลิชชิ่ง จำกัด, 2542.

อังคีร์ ศรีภคากร. *ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ*. (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร : บริษัท แอคทีฟ พริ้นท์ จำกัด, 2554.

Larminie J., and Lowry J. *Electric Vehicle Technology Explained*. Chichester, West Sussex : John Wiley & Sons , 2003.

Mercedes-Benz USA, LLC. (2013). *Electric drive features and specifications*. Retrieved June 11, 2013. from http://www.smartusa.com/models/electric-drive/overview.aspx

Nanjing Lewis Import & Export Trading Co., Ltd. (2013). *Product Description*. Retrieved June 13, 2013.
from http://njlewis.en.made-in-china.com/product/HoUJYRprIMAX/China-Electric-Vehicle-Brushless-Permanent-Magnet-DC-Motor-10-35kw-.html

Wikipedia, The free encyclopedia. (2013). *Automobile drag coefficient : Typical drag coefficients*. Retrieved June 11, 2013.
from http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient

ภาคผนวก

ภาคผนวก (ก)

วิธีการคำนวณตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแบบจำลองรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

1. แรงต้านการหมุนของล้อ Rolling resistance force

จาก $F_{rr} = \mu_{rr} mg$

โดย $\mu_{rr} = 0.015$ (จากตาราง $\mu_{rr} = 0.015$ สำหรับยางชนิด Tire radius)

$m = 1100\ kg$

$\therefore \quad F_{rr} = 0.015 \times 1100 \times 9.81 = 161.86\ N$

2. แรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศ Aerodynamic drag

จาก $F_d = \frac{1}{2}\rho A C_d v^2$

โดย $\rho = 1.2$ (จากตาราง $\rho = 1.2\ kg/m^3$ สำหรับพื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ส่วนที่ต้านกับอากาศ $1.6\ m^2$)

$A = 0.8wh = 0.8 \times 1.2254 \times 1.525 \approx 1.6\ m^2$

$v = 120\ km/hr = 33.33\ m/s$

$\therefore \quad F_d = \frac{1}{2}(1.2 \times 1.6 \times 0.42 \times 33.33^2) = 447.91\ N$

3. แรงตามทางลาดชัน Hill climbing force

จาก $F_{cl} = mg\sin\theta$

โดย $\theta = 5^\circ$

$\therefore \quad F_{cl} = 1100 \times 9.81 \sin(5) = 940.49\ N$

ดังนั้น แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดเท่ากับ

$F_{te} = F_r + F_d + F_{cl}$

$= 161.86 + 447.91 + 940.49$

$= 1550\ N$

จะได้ แรงบิดที่ล้อ (T_w) มีค่าเท่ากับ

$$T_w = Fr \text{ (โดย } r \text{ คือรัศมีของยางรถยนต์)}$$

โดยที่ F คือแรงขับเคลื่อนที่ต้องมากกว่าหรือเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด(F_{te})

$$\therefore \quad T_w = 1550 \times 0.305 = 472.82 \ N \bullet m$$

4. คำนวณหาอัตราทดเฟืองท้าย

$$\omega_w = \frac{V}{r} \qquad \text{(โดย } \omega_w \text{ คือความเร็วเชิงมุมของล้อหลัง)}$$

$$\omega_m = G \times \omega_w \qquad \text{(โดย } \omega_m \text{ คือความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ } G \text{ คืออัตราส่วนเกียร์ เท่ากับ 9)}$$

$$\omega_w = \frac{33.33}{0.305} = 109.28 \ rad/s \text{ (โดย } V = 120 \ km/hr \text{ หรือ } V = 33.33 \ m/s)$$

$$\omega_m = 9 \times 109.28 = 983.51 \ rad/s$$

จะได้แรงบิดที่มอเตอร์ (T_m) มีค่าเท่ากับ

จาก $$T_m = \frac{T_w \times 100}{\eta_g i_g}$$

โดย $$\eta_g = 95\%$$

$$\therefore \quad T_m = \frac{472.82 \times 100}{95 \times 9} = 55.3 \ N \bullet m$$

5. คำนวณหากำลังของมอเตอร์

จาก $$P_m = \omega_m \times T_m$$

$$= 983.51 \times 55.3$$

$$= 54388.67 \ W$$

หรือ $$= \frac{54388.67}{746} \ W$$

$$= 72.9 \ hp$$

ตารางที่ 1ก แสดงข้อมูลต่างๆของมอเตอร์ BLDC 35kW

Power	The battery voltage	Speed	Rated torque	Peak torque	Peak power	current	Peak current	Efficiency	Weight
10kw	72V	1500rpm	63.7Nm	130Nm	25KW	154A	260A	93.6%	62kg
10kw	144V	1500rpm	63.7Nm	130Nm	25KW	77A	160A	93.6%	62kg
12kw	144V	3500rpm	32.7Nm	70Nm	30KW	91.3A	180A	93.7%	46kg
15kw	144V	3500rpm	40.1Nm	90Nm	40KW	114.4A	220A	93.8%	48kg
18 kw	144V	3500rpm	49Nm	120Nm	40KW	137.5A	270A	94.5%	55kg
25 kw	144V	4000rpm	60Nm	130Nm	60KW	191.4A	380A	94.8%	58kg
27 kw	144V	4500rpm	57Nm	130Nm	65KW	206.8A	380A	94.8%	62kg
30 kw	333V	6000rpm	47Nm	100Nm	65KW	100.1A	180A	94.8%	58kg
35kw	333V	6000rpm	55Nm	120Nm	70KW	116.6A	210A	94.9%	62kg

ภาคผนวก (ข)

Code ในการจำลองระบบของรถยนต์ไฟฟ้า

Code ในการจำลองระบบของรถยนต์ไฟฟ้า

คำสั่ง (Code) ในแบบจำลองประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

```
% ********** URBAN ELECTRIV SMALL CAR **********
% Simulates the WOT test of the electric small car.
t=linspace(0,50,501); % 0 to 20 seconds, in 0.1 sec. steps
v=zeros(1,501);% 301 readings of velocity
d=zeros(1,501);% Array for storing distance traveled
dT=0.1; % 0.1 second time step
% In this case there are three phases to the acceleration, as
% explained in the text.
for n=1:500
if v(n)< 21.29
v(n+1) = v(n) + dT*(1.72 - (0.000329*(v(n)^2)));
elseif v(n) > 33.33
% Controller stops any more speed increase
v(n+1) = v(n);
else
v(n+1) = v(n) + dT * ((28.77/v(n)) - 0.14 - (0.000329*(v(n)^2)));
end;
d(n+1)=d(n) + 0.1*v(n);% Compute distance traveled.
end;
v=v.*3.6; %Multiply all v values by 3.6 to
%convert to kph
%plot(t,d); axis([0 20 0 100]);
plot(t,v); axis([0 35 0 140]);
xlabel('Time/seconds');
ylabel('Velocity/kph');
%ylabel('Distance traveled/m');
title('Full power(WOT) acceleration of Urban electric small car');
holdoncommand
```

คำสั่ง (Code) ในแบบจำลองประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

```
% GMEV1 **********************
% Simulates the WOT test of the GM EV1 electric car.
t=linspace(0,150,1501); % 0 to 15 seconds, in 0.1 sec. steps
v=zeros(1,1501); % 151 readings of velocity
d=zeros(1,1501);
dT=0.1; % 0.1 second time step
% In this case there are three phases to the acceleration, as
% explained in the text.
for n=1:1500
if v(n)< 19.8
% Equation 7.21
v(n+1) = v(n) + dT*(3.11 + (0.000137*(v(n)^2)));
elseif v(n) > 35.8
% Controller stops any more speed increase
v(n+1) = v(n);
else
% Equation 7.22
v(n+1) = v(n) + dT * ((62.1/v(n)) - 0.046 - (0.000137*(v(n)^2)));
end;
d(n+1)=d(n) + 0.1*v(n);
end;
v=v.*3.6; %Multiply all v values by 3.6 to
%convert to kph
plot(t,v,'k');axis([0 15 0 140]);
xlabel('Time/seconds');
ylabel('velocity/kph');
title('Full power (WOT) acceleration of GM EV1 electric car');
```

EVCAR.m เป็นโปรแกรมหลักในการจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าใช้งานในเมือง

```
%%%%%%%% EVCAR %%%%%%%%%%%%

% Simulation of the EVCAR running the SFUDS
% driving cycle. This simulation is for range
% measurement. The run continues until the
% battery depth of discharge > 80%
VELOCITY;
N=length(V); % Find out how many readings
V=V./3.6; %Divide all velocities by 3.6, to convert to m/sec
% First we set up the vehicle data.
mass = 1100 ; % Vehicle mass+ two 70 kg passengers.
area = 1.6; % Frontal area in square metres
Cd = 0.38; % Drag coefficient
Gratio = 29.5; % Gearing ratio, = G/r
G_eff = 0.95; % Transmission efficiency
Regen_ratio = 0; % This sets the proportion of the
% braking that is done regeneratively
% using the motor.
bat_type='LA'; % Lead acid battery
NoCells=90; % 15 of 6 cell (12 Volt) batteries.
Capacity=100; % A100 Ah batteries. This is
% assumed to be the 10 hour rate capacity
k=1.15; % Peukert coefficient, typical for good lead acid about 1.15
Pac=250; % Average power of accessories.
% These are the constants for the motor efficiency
% equation, 7.23
kc=0.3; % For copper losses
ki=0.01; % For iron losses
kw=0.000005; % For windage losses
ConL=600; % For constant electronics losses
% Some constants which are calculated.
Frr=0.015 * mass * 9.8; % Equation 7.1
```

```
Rin= (0.022/Capacity)*NoCells; % Int. res, Equ. 2.2
Rin = Rin + 0.05; % Add a little to make allowance for
% connecting leads.
PeuCap= ((Capacity/10)^k)*10;
%PeuCap= ((Capacity)^k);% See equation 2.12, (Capacity/10)= I, 10 = T
% Set up arrays for storing data for battery,
% and distance traveled. All set to zero at start.
% These first arrays are for storing the values at
% the end of each cycle.
% We shall assume that no more than 100 of any cycle is
% completed. (If there are, an error message will be
% displayed, and we can adjust this number.)
DoD_end = zeros(1,100);
CR_end = zeros(1,100);
D_end = zeros(1,100);
% We now need similar arrays for use within each cycle.
DoD=zeros(1,N); % Depth of discharge, as in Chap. 2
CR=zeros(1,N); % Charge removed from battery, Peukert
% corrected, as in Chap 2.
D=zeros(1,N); % Record of distance traveled in km.
CY=1;
% CY controls the outer loop, and counts the number
% of cycles completed. We want to keep cycling till the
% battery is flat. This we define as being more than
% 90% discharged. That is, DoD end > 0.9
% We also use the variable XX to monitor the discharge,
% and to stop the loop going too far.
DD=0; % Initially zero.
while DD < 0.9
%Beginning of a cycle.**********
% Call the script file that performs one
% complete cycle.
one_cycle;
% One complete cycle done.
```

```
% Now update the end of cycle values.
DoD_end(CY) = DoD(N);
CR_end(CY) = CR(N);
D_end(CY) = D(N);
% Now reset the values of these "inner" arrays
% ready for the next cycle. They should start
% where they left off.
DoD(1)=DoD(N);
CR(1)=CR(N);D(1)=D(N);
DD=DoD_end(CY); % Update state of discharge
%END OF ONE CYCLE ***************
CY = CY +1;
end;    %axis([0 150 0 1]);
plot(D_end,DoD_end,'k+');
ylabel('velocity/kph');
%ylabel('Depth of discharge');
xlabel('Distance traveled/km');
title(' Urban electric small car simulation');
holdoncommand
```

GM_EV1.m เป็นโปรแกรมหลักในการจำลองการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1

```
%%%%% Code GM EV1 %%%%%%%%%
% Simulation of the GM EV1 running the SFUDS
% driving cycle. This simulation is for range
% measurement. The run continues until the
% battery depth of discharge > 90%
%sfuds; % Get the velocity values, they are in
VELOCITY;
% an array V.
N=length(V); % Find out how many readings
%Divide all velocities by 3.6, to convert to m/sec
V=V./3.6;
% First we set up the vehicle data.
mass = 1540 ; % Vehicle mass+ two 70 kg passengers.
area = 1.8; % Frontal area in square metres
Cd = 0.19; % Drag coefficient
Gratio = 37; % Gearing ratio, = G/r
G_eff = 0.95; % Transmission efficiency
Regen_ratio = 0.5; % This sets the proportion of the
% braking that is done regeneratively
% using the motor.
bat_type='LA'; % Lead acid battery
NoCells=156; % 26 of 6 cell (12 Volt) batteries.
Capacity=60; % 60 Ah batteries. This is
% assumed to be the 10 hour rate capacity
k=1.12; % Peukert coefficient, typical for good lead acid
Pac=250; % Average power of accessories.
% These are the constants for the motor efficiency
% equation, 7.23
kc=0.3; % For copper losses
ki=0.01; % For iron losses
kw=0.000005; % For windage losses
```

```
ConL=600; % For constant electronics losses
% Some constants which are calculated.
Frr=0.00048 * mass * 9.8; % Equation 7.1
Rin= (0.022/Capacity)*NoCells; % Int. res, Equ. 2.2
Rin = Rin + 0.05; % Add a little to make allowance for
% connecting leads.
PeuCap= ((Capacity/10)^k)*10; % See equation 2.12
% Set up arrays for storing data for battery,
% and distance traveled. All set to zero at start.
% These first arrays are for storing the values at
% the end of each cycle.
% We shall assume that no more than 100 of any cycle is
% completed. (If there are, an error message will be
% displayed, and we can adjust this number.)
DoD_end = zeros(1,100);
CR_end = zeros(1,100);
D_end = zeros(1,100);
% We now need similar arrays for use within each cycle.
DoD=zeros(1,N); % Depth of discharge, as in Chap. 2
CR=zeros(1,N); % Charge removed from battery, Peukert
% corrected, as in Chap 2.
D=zeros(1,N); % Record of distance traveled in km.
CY=1;
% CY controls the outer loop, and counts the number
% of cycles completed. We want to keep cycling till the
% battery is flat. This we define as being more than
% 90% discharged. That is, DoD end > 0.9
% We also use the variable XX to monitor the discharge,
% and to stop the loop going too far.
DD=0; % Initially zero.
while DD < 0.9
%Beginning of a cycle.**********
% Call the script file that performs one
% complete cycle.
```

```
ONE_CYCLE1;
% One complete cycle done.
% Now update the end of cycle values.
DoD_end(CY) = DoD(N);
CR_end(CY) = CR(N);
D_end(CY) = D(N);
% Now reset the values of these "inner" arrays
% ready for the next cycle. They should start
% where they left off.
DoD(1)=DoD(N); CR(1)=CR(N);D(1)=D(N);
DD=DoD_end(CY); % Update state of discharge
%END OF ONE CYCLE **************
CY = CY +1;
end;


plot(D_end,DoD_end,'k*'); axis([0 180 0 1]);
ylabel('Depth of discharge');
xlabel('Distance traveled/km');
holdoncommand
```

ONE_CYCLE.m เป็นโปรแกรมจำลองการไหลเวียนพลังงานของแบตเตอรี่

```
%%%%%%%% ONE_CYCLE %%%%%%%%%%%%

% ******************************
% ONE_CYCLE
% This script file performs one cycle, of any
% drive cycle of N points with any vehicle and
% for lead acid or NiCad batteries.
% All the appropriate variables must be set
% by the calling program.
% ******************************
for C=2:N
accel=V(C) - V(C-1);
Fad = 0.5 * 1.2 * area * Cd * V(C)^2; % Equ. 7.2
Fhc = 0; % Eq. 7.3, assume flat
Fla = 1.05 * mass * accel;
% The mass is increased modestly to compensate for
% the fact that we have excluded the moment of inertia
Pte = (Frr + Fad + Fhc + Fla)*V(C); %Equ 7.9 & 7.23
omega = Gratio * V(C);
if omega == 0 % Stationary
Pte=0;
Pmot_in=0; % No power into motor
Torque=0;
eff_mot=0.949; % Dummy value, to make sure not zero.
elseif omega > 0 % Moving
ifPte< 0
Pte = Regen_ratio * Pte; % Reduce the power if
end; % braking, as not all will be by the motor.
% We now calculate the output power of the motor,
% Which is different from that at the wheels, because
% of transmission losses.
ifPte>=0
```

```
Pmot_out=Pte/G_eff; % Motor power> shaft power
elseifPte<0
Pmot_out=Pte * G_eff; % Motor power diminished
end; % if engine braking.
Torque=Pmot_out/omega; % Basic equation, P=T * omega
if Torque>0 % Now use equation 7.23
eff_mot=(Torque*omega)/((Torque*omega)+((Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((omega^3)*kw)+Co
nL);
elseif Torque<0
eff_mot=(-Torque*omega)/((-Torque*omega)
+((Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((omega^3)*kw)+ConL);
end;
ifPmot_out>= 0
Pmot_in = Pmot_out/eff_mot; % Equ 7.23
elseifPmot_out< 0
Pmot_in = Pmot_out * eff_mot;
end;
end;
Pbat = Pmot_in + Pac; % Equation 7.26
ifbat_type=='NC'
E=open_circuit_voltage_NC(DoD(C-1),NoCells);
elseifbat_type=='LA'
E=open_circuit_voltage_LA(DoD(C-1),NoCells);
elseifbat_type=='Li'
E=open_circuit_voltage_Li(DoD(C-1),NoCells);
else
error('Invalid battery type');
end;
ifPbat> 0 % Use Equ. 2.20
I = (E - ((E*E) - (4*Rin*Pbat))^0.5)/(2*Rin);
CR(C) = CR(C-1) +((I^k)/3600); %Equation 2.18
elseifPbat==0
I=0;
elseifPbat<0
```

```
% Regenerative braking. Use Equ. 2.22, and
% double the internal resistance.
Pbat = - 1 * Pbat;
I = (-E + (E*E + (4*2*Rin*Pbat))^0.5)/(2*2*Rin);
CR(C) = CR(C-1) - (I/3600); %Equation 2.23
end;
DoD(C) = CR(C)/PeuCap; %Equation 2.19
ifDoD(C)>1
DoD(C) =1;
end
% Since we are taking one second time intervals,
% the distance traveled in metres is the same
% as the velocity. Divide by 1000 for km.
D(C) = D(C-1) + (V(C)/1000);
XDATA(C)=C; % See Section 7.4.4 for the use
YDATA(C)=eff_mot; % of these two arrays.
end;
```

open_circuit_voltage_LA.m เป็นโปรแกรมจำลองแรงดันแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วน้ำกรด

```
functionE_oc=open_circuit_voltage_LA(DoD,NoCells)
% Find the open circuit voltage of a lead acid
% battery at any value of depth of discharge
% The depth of discharge value must be between
% 0 (fully charged) and 1.0 (flat).

ifDoD<0
error('Depth of discharge <0.');
end
ifDoD> 1
error('Depth of discharge >1')
end

% The lead acid ocv is approximately linear
% with respect to depth of discharge, varying from
% 1.15 fully discharge to 1.25 fully charged.

% N is the number of cells

E_oc= (2.15 - ((2.15-2.00)*DoD)) * NoCells;
```

open_circuit_voltage_NC.m เป็นโปรแกรมจำลองแรงดันแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลแคดเมียม

```
%%%%%%%E=open_circuit_voltage_NC %%%%%%%

function E=open_circuit_voltage_NC(DoD,NoCells)
% Find the open circuit voltage of a nickel cadmium
% battery at any value of depth of discharge
% The depth of discharge value must be between
% 0 (fully charged) and 1.0 (flat).

ifDoD< 0
error('Depth of discharge <0.')
end
ifDoD> 1
error('Depth of discharge >1')
end


% discharge curve.
E=NoCells*( -8.2816 *(DoD^7)+23.5749*(DoD^6)-30*(DoD^5)+23.7053*(DoD^4)-
12.5877*(DoD^3)+4.1315*DoD*DoD - 0.8658*DoD +1.37);
end
```

open_circuit_voltage_Li.m เป็นโปรแกรมจำลองแรงดันแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

```
%%%%%%%E=open_circuit_voltage_Li %%%%%%%
function E=open_circuit_voltage_Li(DoD, NoCells)
% Find the open circuit voltage of a Li ion
% battery at any value of depth of discharge
% The depth of discharge value must be between
% 0 (fully charged) and 1.0 (flat).


ifDoD<0
error('Depth of discharge <0.');
end
ifDoD> 1
error('Depth of discharge >1')
end
% See equation >2.10 in text.
E = 3.3 * NoCells;

end
```

VELOCITY.m เป็นโปรแกรมจำลองลักษณะการขับขี่ในเมือง

```
V=[0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
2.4
4.8
7.2
9.7
11.1
12.2
13.4
14.6
15.8
16.9
17.9
18.7
19.5
20.1
20.8
```

21.4
22.0
22.7
23.3
24.0
24.5
24.9
25.6
26.1
27.5
29.0
30.3
31.5
32.8
34.0
35.1
36.0
37.0
37.8
38.8
39.6
37.8
35.9
34.1
32.0
30.1
27.7
25.3
22.7
17.1
11.4
5.8
0.2
0.0

0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
2.4
4.8
7.2
9.7
11.1
12.2
13.4
14.6
15.8
16.9
17.9
18.7
19.5
20.1
20.8
21.4
22.0
22.7
23.3
24.0
24.5
24.9
25.6

26.1
27.5
29.0
30.3
31.5
32.8
34.0
35.1
36.0
37.0
37.8
38.8
39.6
37.8
35.9
34.1
32.0
30.1
27.7
25.3
22.7
17.1
11.4
5.8
0.2
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0

0.0
0.0
0.0
2.4
4.8
7.2
9.7
11.1
12.2
13.4
14.6
15.8
16.9
17.9
18.7
19.5
20.1
20.8
21.4
22.0
22.7
23.3
24.0
24.5
24.9
25.6
26.1
27.5
29.0
30.3
31.5
32.8
34.0
35.1

36.0
37.0
37.8
38.8
39.6
37.8
35.9
34.1
32.0
30.1
27.7
25.3
22.7
17.1
11.4
5.8
0.2
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
2.4
4.8
7.2
9.7
11.1

12.2
13.4
14.6
15.8
16.9
17.9
18.7
19.5
20.1
20.8
21.4
22.0
22.7
23.3
24.0
24.5
24.9
25.6
26.1
26.6
27.0
27.4
27.8
28.3
28.8
29.3
29.6
30.1
30.4
30.9
31.2
36.5
41.0
45.4

49.2
52.8
56.0
59.2
62.1
63.7
65.2
66.6
68.1
69.5
70.8
72.1
73.2
74.4
75.5
76.6
77.7
78.7
79.7
80.6
81.4
82.4
83.2
84.0
84.8
85.5
86.3
86.9
87.5
86.1
84.7
83.2
81.8
80.3

78.9
77.4
76.0
74.5
73.1
71.8
70.3
68.9
67.6
66.3
64.9
65.0
65.3
65.5
65.7
66.0
66.1
66.3
66.5
66.8
66.9
67.1
67.3
67.4
67.6
67.8
67.9
68.1
68.2
68.4
68.6
68.7
68.9
68.9

69.0
69.2
69.4
69.5
69.5
69.7
69.8
69.8
70.0
68.7
67.3
66.0
64.5
63.2
61.8
60.4
59.1
57.6
56.2
54.7
53.3
51.8
50.2
48.8
47.2
45.7
44.1
42.3
40.6
38.8
37.0
35.2
33.3
31.2

29.1
26.7
24.3
21.6
18.2
14.2
9.3
4.5
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0
0.0];