

การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อทำนายอัตราการใช้พลังงาน

นางสาวชญาดา ไชยมานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC MODELING OF ELECTRIC VEHICLE FOR PREDICTING  
ENERGY CONSUMPTION

Miss Chayada Chaiyamanon

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University



ชญาดา ไชยमानนท์ : การพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อทำนาย  
อัตราการใช้พลังงาน (DYNAMIC MODELING OF ELECTRIC VEHICLE FOR PREDICTING  
ENERGY CONSUMPTION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์, อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.อังคิรี ศรีภคากร, 101 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า  
เพื่อทำนายอัตราการใช้พลังงาน แบบจำลองดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ของระบบย่อยต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า ได้แก่  
แบบจำลอง Traction Model และแบบจำลองแบตเตอรี่ ซึ่งแบบจำลอง Traction Model นั้นจะ  
ประกอบด้วยระบบควบคุม มอเตอร์ ระบบส่งกำลัง และ Roadload ส่วนแบบจำลองแบตเตอรี่นั้น  
ถูกพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบ ในเบื้องต้นนี้การออกแบบและ  
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของรถจะอ้างอิงจากรดตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเพราะเป็นรถที่ใช้ในการขับทดสอบ จาก  
การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่าผลการจำลองมีความถูกต้องแม่นยำ สามารถ  
จำลองการทำงานได้ใกล้เคียงกับผลการขับทดสอบจริง ส่วนถัดมาเป็นการจำลองการทำงานของ  
แบบจำลองกับ Bangkok Driving Cycle เพื่อหาอัตราการใช้พลังงานและระยะทางที่สามารถขับที่  
ได้ต่อการชาร์จ โดย Bangkok Driving Cycle นี้ได้จากการเก็บข้อมูลความเร็วในการขับทดสอบ  
รถยนต์ตามเส้นทางในเขตเมืองของกรุงเทพฯ พบว่าแบบจำลองใช้พลังงานในการขับเคลื่อน  
11.55 kWh และสามารถขับที่ได้ระยะทาง 32.13 km ก่อนที่แบตเตอรี่จะไม่สามารถให้พลังงานใน  
การขับเคลื่อนได้เพียงพอ จากนั้นเป็นการวิเคราะห์หาขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม  
กับการจราจรในกรุงเทพฯ โดยกำหนดสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าในเรื่องของความเร็วสูงสุด และ  
ความเร่งสูงสุดจาก Bangkok Driving Cycle เพื่อใช้คำนวณหาขนาดของมอเตอร์ และกำหนด  
ระยะทางทั้งหมดที่ใช้ในการขับเพื่อหาพลังงานและเลือกขนาดของแบตเตอรี่ จากการคำนวณ  
พบว่าขนาดของมอเตอร์ที่เหมาะสม คือ มีกำลังสูงสุด 6.46 kW สร้างแรงบิดสูงสุดได้ 25.56 Nm  
และสามารถทำความเร็วรอบได้ 3,819 rpm ส่วนขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมคือ เป็นแบตเตอรี่  
ขนาด 12 V ที่ความจุมากกว่า 21.04 Ah จำนวน 5 ก้อน

ภาควิชา...วิศวกรรมเครื่องกล... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา...วิศวกรรมเครื่องกล... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5570151421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORDS: ELECTRIC TUKTUK / ENERGY CONSUMPTION / ROADLOAD

CHAYADA CHAIYAMANON : DYNAMIC MODELING OF ELECTRIC VEHICLE  
FOR PREDICTING ENERGY CONSUMPTION. ADVISOR : NUKSIT  
NOOMWONGS, D.Eng., CO - ADVISOR : ASST. PROF. ANGKEE  
SRIPAKAGORN, Ph.D., 101 pp.

This thesis presents the development and simulation results of dynamic model for electric vehicle that can be used to predict energy consumption. The model was established from the mathematical model of sub models that are constituent of electric vehicle. The model is separated in two subsystem that are traction model and battery model. Traction model is composed of controller, motor, transmission and roadload. The battery model was developed by mathematical model and testing. In the preliminary, system design and parameters are based on electric Tuk-tuk because it's used for test driving. From the model validation, the simulation results and real driving test results are alike so the model can represent accurately the actual electric vehicle behavior and calculate results with a reliable level of accuracy. For Predicting energy consumption and ranges per charge, the model was simulated with Bangkok driving cycle that is from the data collection of main road in urban Bangkok. The overall energy consumption is 11.55 kWh and the vehicle can drive 32.13 km before battery cannot provide sufficient power. Furthermore, this research tries to select the suitable size of motor and battery for Bangkok driving. The method is specifying max velocity and max acceleration to determine the performance of motor which are max power, max torque and max speed. Then specify the driving ranges to calculate the energy required. From the calculation, the motor that has 6.46 kW power generating, 25.56 Nm max torque and 3,819 rpm max speed is appropriate for Bangkok driving. For the battery, the suitable size of battery for Bangkok driving is 12 V 21.04 Ah and the total number required is 5 cells.

Department : ..~~Mechanical Engineering~~.. Student's Signature .....

Field of Study : ~~Mechanical Engineering~~ Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2012..... Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า และแบตเตอรี่เพื่อใช้ในการทดสอบจาก Toyota Tsusho Electronics (Thailand) Co.,Ltd. ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างทางบริษัท Toyota Tsusho Electronics (Thailand) Co.,Ltd. กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในการพัฒนารถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัยและให้เงินทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก เป็นอย่างสูง ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาในทุกเรื่อง และตรวจแก้ไขงานวิจัยจนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อังคีร์ ศรีภคการ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ ประธานกรรมการ ผศ.ดร. สัณหพศ จันทรานุกวัฒน์ กรรมการ และ รศ.ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาเสียสละเวลา รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน เป็นอย่างดีตลอดมา และเป็นผู้ที่มีพระคุณต่อผู้วิจัยอย่างหาที่เปรียบมิได้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป .....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
บทที่ 2 ปรีทอร์ศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 ประเภทของแบบจำลอง .....	4
2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่ .....	7
2.2.1 Simple model .....	8
2.2.2 Improved simple model .....	8
2.2.3 Thevenin battery model .....	9
2.2.4 Non-linear dynamic battery model .....	9
2.2.5 New dynamic battery model.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	14

3.1 ระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า.....	14
3.2 ส่วนประกอบระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า.....	17
3.2.1 มอเตอร์ขับเคลื่อน.....	17
3.2.1.1 Brushed DC motor.....	18
3.2.1.2 Brushless DC motor.....	20
3.2.2 แบตเตอรี่.....	22
3.2.2.1 แบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว.....	22
3.2.2.2 ความจุของแบตเตอรี่.....	23
3.2.2.3 ประสิทธิภาพการประจุ.....	24
3.2.2.4 การคายประจุไฟฟ้าภายในตัวเอง.....	24
3.2.2.5 แบบจำลองของแบตเตอรี่.....	24
3.2.2.6 แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน.....	25
3.2.2.7 แบบจำลองเทวีเนียน.....	27
3.2.2.8 แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ.....	28
3.2.2.9 แบบจำลองมูลฐาน.....	30
3.2.3 แบบจำลองการขับเคลื่อนของรถยนต์.....	31
3.2.3.1 แรงต้านทานการกลิ้ง.....	31
3.2.3.2 แรงต้านทานอากาศ.....	31
3.2.3.3 แรงที่เกิดจากทางลาดชัน.....	32
3.2.3.4 แรงเนื่องจากความเร่ง.....	32
บทที่ 4 การออกแบบแบบจำลองระบบขับเคลื่อน.....	34
4.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....	34
4.1.1 Traction Model.....	34
4.1.2 Energy Storage Model.....	38



4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง .....	40
บทที่ 5 การทดสอบและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	43
5.1 การทดสอบแบตเตอรี่.....	43
5.2 ผลการทดสอบแบตเตอรี่.....	44
5.3 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า .....	48
5.3.1 การทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า .....	48
5.3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดสอบจริง .....	49
บทที่ 6 การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า การกำหนดขนาดของมอเตอร์ และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม .....	52
6.1 การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า.....	52
6.2 การกำหนดขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม .....	56
6.2.1 การกำหนดขนาดของมอเตอร์.....	56
6.2.2 การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ .....	60
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	63
7.1 บทสรุป.....	63
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก การวัดและอุปกรณ์ .....	70
ภาคผนวก ข แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า.....	81
ภาคผนวก ค การใช้โปรแกรม LabView .....	87
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบแบตเตอรี่.....	88

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 101

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบ จนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาป ภายในกับระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า .....	15
ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ .....	40
ตารางที่ 4-2 Motor Electrical Parameters รุ่น PMAC-DS (ME0913) .....	41
ตารางที่ 4-3 Motor Mechanical Parameters รุ่น PMAC-DS (ME0913) .....	41
ตารางที่ 4-4 Specification ของแบตเตอรี่ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA (AGM) .....	42
ตารางที่ 4-5 Characteristics ของแบตเตอรี่ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA (AGM) .....	42
ตารางที่ 5-1 ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ .....	43
ตารางที่ 6-1 สมรรถนะของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อน .....	60
ตารางที่ 6-2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบขนาดของแบตเตอรี่ .....	62
ตารางที่ ก-1 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัด NI USB-6251 .....	71
ตารางที่ ก-2 ลักษณะเฉพาะของ Multifunction Electronic Load PLZ1004W .....	74
ตารางที่ ก-3 ลักษณะเฉพาะและการติดตั้ง Hall effect magnetic sensor .....	75
ตารางที่ ก-4 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น CSLA2DK .....	77
ตารางที่ ก-5 ลักษณะเฉพาะของ SSI-4 .....	80
ตารางที่ จ-1 พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ .....	88
ตารางที่ จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง SOC และแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ .....	89
ตารางที่ จ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขณะเบ็ดดวงจรและระดับการประจุ .....	93
ตารางที่ จ-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในกับระดับการประจุ .....	97

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-2 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วย PSAT กับค่าที่วัดจาก OBD.....	6
รูปที่ 2-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบจริงที่ความเร่งต่างๆ .....	7
รูปที่ 2-4 Simple battery model.....	8
รูปที่ 2-5 แบบจำลองเทวีนิน.....	9
รูปที่ 2-6 Non-linear dynamic battery model .....	10
รูปที่ 2-7 New dynamic battery model .....	10
รูปที่ 2-8 แผนภาพไดอะแกรมของขั้นตอนการคำนวณของ New dynamic battery model .....	11
รูปที่ 2-9 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองเทียบกับการทดสอบ ภายใต้คุณสมบัติต่างๆ .....	11
รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดสอบแบบเป็นวัฏจักร.....	12
รูปที่ 3-1 โครงสร้างของรถยนต์ไฟฟ้า .....	14
รูปที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบสำหรับเครื่องยนต์และมอเตอร์ .....	17
รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบที่สำคัญของ Brushed DC motor .....	18
รูปที่ 3-4 รูปไดอะแกรมของมอเตอร์.....	19
รูปที่ 3-5 Brushless DC motor.....	21
รูปที่ 3-6 แบบจำลองโครงสร้างของ Brushless DC motor.....	22
รูปที่ 3-7 ส่วนประกอบและสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว .....	23
รูปที่ 3-8 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent circuit) .....	25
รูปที่ 3-9 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของ ก) แบบจำลองธีวีนิน และ ข) แบบจำลองของ Dürr และคณะ.....	28

รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของ แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินินกับผลการทดสอบจริง .....	28
รูปที่ 3-11 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ .....	29
รูปที่ 3-12 การเปรียบเทียบผลการจำลองระดับการประจุของแบบจำลอง แบบความต้านทานภายในและแบบจำลองโดยตัวต้านทานและ ตัวเก็บประจุ กับผลการทดสอบจริง .....	29
รูปที่ 3-13 Free body diagram ของแรงที่กระทำกับรถยนต์ .....	30
รูปที่ 4-1 แผนภาพไดอะแกรมของ Traction Model .....	35
รูปที่ 4-2 แผนภาพไดอะแกรมของมอเตอร์ .....	35
รูปที่ 4-3 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองแบตเตอรี่ .....	38
รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานงานสูงสุดของแบตเตอรี่ที่ การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ .....	44
รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ .....	45
รูปที่ 5-3 ค่าความต้านทานภายในต่อค่าแรงดันไฟฟ้าและระดับการประจุ .....	46
รูปที่ 5-4 แผนภาพไดอะแกรมการทดสอบความถูกต้องของแบตเตอรี่ .....	54
รูปที่ 5-5 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับ แรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ .....	55
รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบผลความเร็วจากแบบจำลองกับความเร็วจากการขับทดสอบ .....	56
รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบผลของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับกำลังไฟฟ้า จากการขับทดสอบ .....	51
รูปที่ 6-1 เส้นทางการขับทดสอบจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไปยังอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ .....	52
รูปที่ 6-2 Bangkok Driving Cycle (BDC) .....	53
รูปที่ 6-3 ผลกำลังไฟฟ้าที่ใช้จากแบบจำลองกับ BDC .....	54
รูปที่ 6-4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้า .....	55

รูปที่ 6-5 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้า.....	56
รูปที่ 6-6 Roadload Power ที่ความเร็วต่างๆ.....	58
รูปที่ 6-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่สร้างกับความเร็วรอบของมอเตอร์.....	59
รูปที่ ก-1 NI USB 6251.....	70
รูปที่ ก-2 Multifunction Electronic Load PLZ1004W.....	73
รูปที่ ก-3 PLZ2004WB DC Loads Power Supplies.....	73
รูปที่ ก-4 Hall effect magnetic sensor.....	75
รูปที่ ก-5 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น CSLA2DK.....	76
รูปที่ ก-6 ขนาดและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกับสายไฟฟ้า.....	77
รูปที่ ก-7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง SSI-4.....	78
รูปที่ ก-8 ภาพโปรแกรม LogWorks3 ขณะเก็บข้อมูล.....	79
รูปที่ ข-1 การตั้งค่า Current Folder.....	82
รูปที่ ข-2 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่.....	83
รูปที่ ข-3 แบบจำลองแบตเตอรี่.....	84
รูปที่ ข-4 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลอง Traction model.....	84
รูปที่ ข-5 แบบจำลอง Traction model.....	85
รูปที่ ข-6 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า.....	86
รูปที่ ข-7 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า.....	86
รูปที่ ค-1 ลักษณะการใช้งานของโปรแกรม LabView.....	87

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$a$	คือ	ความเร่งของรถยนต์
$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์
$b$	คือ	ค่าคงที่ของแรงเสียดทาน
$C_d$	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ
$C_r$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง จะขึ้นอยู่กับชนิดของยางรถยนต์ และชนิดของผิวถนน
$C_p$	คือ	Peukert Capacity
$C_{10}$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการจ่ายไฟฟ้า 10 ชั่วโมง
$DOD$	=	ค่าความลึกการคายประจุ
$E_{cd}$	คือ	พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายไป
$E_L$	คือ	พลังงานที่เหลือในแบตเตอรี่
$F_d$	คือ	แรงต้านอากาศ
$F_{hc}$	คือ	แรงที่เกิดจากทางลาดชัน
$F_{la}$	คือ	แรงเนื่องจากความเร่งเชิงเส้น
$F_{wa}$	คือ	แรงเนื่องจากความเร่งเชิงมุม
$F_r$	คือ	แรงต้านทานการกลิ้ง
$g$	คือ	ความเร่งสู่ศูนย์กลาง
$G$	คือ	อัตราทดของระบบส่งกำลัง
$i$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
$I$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์
$J$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และภาระที่ติดตั้งอยู่
$J_L$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของภาระที่ติดตั้งอยู่
$J_m$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์
$K_e$	คือ	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

$K_i$	คือ	ค่าคงที่ของแรงบิด
$K_p$	คือ	Peukert Coefficient
$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำ
$m$	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักที่บรรทุก
$n$	คือ	จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่
$N_i$	คือ	อัตราทดรวมที่ความเร็วต่างๆ
$\eta$	คือ	ประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง
$r$	คือ	รัศมีของล้อรถยนต์
$r_{in}$	คือ	ความต้านภายในต่อเซลล์ที่ 1 แอมแปร์-ชั่วโมง
$R$	คือ	ความต้านทานภายนอก
$R_{in}$	คือ	ความต้านภายในของแบตเตอรี่
$SOC$	คือ	ระดับการประจุของแบตเตอรี่
$t$	คือ	เวลา
$T$	คือ	ระยะเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า
$T_m$	คือ	แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น
$v$	คือ	ความเร็วของรถยนต์
$V$	คือ	แรงดันไฟฟ้า
$V_{oc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร
$\omega_L$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของล้อ
$\omega_m$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของแกนหมุนของมอเตอร์
$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ
$\theta$	คือ	มุมความลาดเอียงของพื้นถนน



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหามลพิษทางอากาศในเขตเมืองกำลังเป็นปัญหาสำคัญที่ควรรีบแก้ไข สาเหตุหลักเกิดจากยานพาหนะบนท้องถนน โดยเฉพาะไอเสียของรถยนต์น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน ประกอบกับปัญหาปริมาณน้ำมันที่เหลือน้ำมันลดลง และปัญหาค่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้น จึงได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ เพื่อที่จะหาพลังงานทางเลือกใหม่แทนการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง

จากความต้องการลดปัญหามลพิษทางอากาศ จึงได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์อย่างกว้างขวาง เช่น การพัฒนารถยนต์พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง รถยนต์ไฮบริด รถยนต์ไฟฟ้า และรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากการใช้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยในการลดไอเสียจากยานพาหนะ ในปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าจึงได้ถูกพัฒนาและเข้ามามีบทบาทในระบบคมนาคมขนส่งมากขึ้น เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาเรื่องมลพิษทางอากาศแล้ว ระบบการทำงานยังมีเสียงรบกวนอยู่ในระดับต่ำอีกด้วย แต่รถยนต์ไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางการขับขี่ เนื่องจากราคาและความสามารถในการเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ ดังนั้นการหาอัตราการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยในการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากนี้แล้วการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถนะต่างๆ ของรถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นในต่างประเทศ [1] เช่น ในประเทศญี่ปุ่นที่มีลักษณะเส้นทางสภาพถนน และสภาพการจราจรที่แตกต่างออกไป จึงไม่สามารถที่จะสรุปถึงประสิทธิภาพและอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าว่าเหมาะสมกับการจราจรในกรุงเทพฯ ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์

สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อหาอัตราการใช้พลังงาน โดยจำลองกับข้อมูลการขับขี่จริงในกรุงเทพฯ จากนั้นวิเคราะห์หาขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าในส่วนของแบตเตอรี่ มอเตอร์ และระบบพลศาสตร์ของรถ สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นพิจารณาเลือกเส้นทางการขับขี่จริงในกรุงเทพฯ เพื่อเก็บข้อมูลความเร็วและใช้เป็น Bangkok Driving Cycle เพื่อแทนสภาพการจราจรของกรุงเทพฯ จากนั้นวิเคราะห์หาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า ระยะทางที่รถยนต์สามารถขับขี่ได้ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง และพัฒนาแบบจำลองเพื่อหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการขับขี่ในกรุงเทพฯ

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อระบุปัญหาและข้อบกพร่องของงานวิจัยดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปเป็นหัวข้อวิจัย
2. ศึกษาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า
3. สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า
4. ออกแบบขั้นตอนและจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง
5. ทดสอบและเก็บข้อมูลการขับขี่จริงของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (รถยนต์ไฟฟ้าสามล้อ)
6. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลจากการทดสอบจริง
7. สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าได้
2. สามารถทำนายอัตราการใช้พลังงานและระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าสามารถขับขี่ได้ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง ภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ
3. สามารถวิเคราะห์หาขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมต่อการขับขี่ในกรุงเทพฯ ได้

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรม

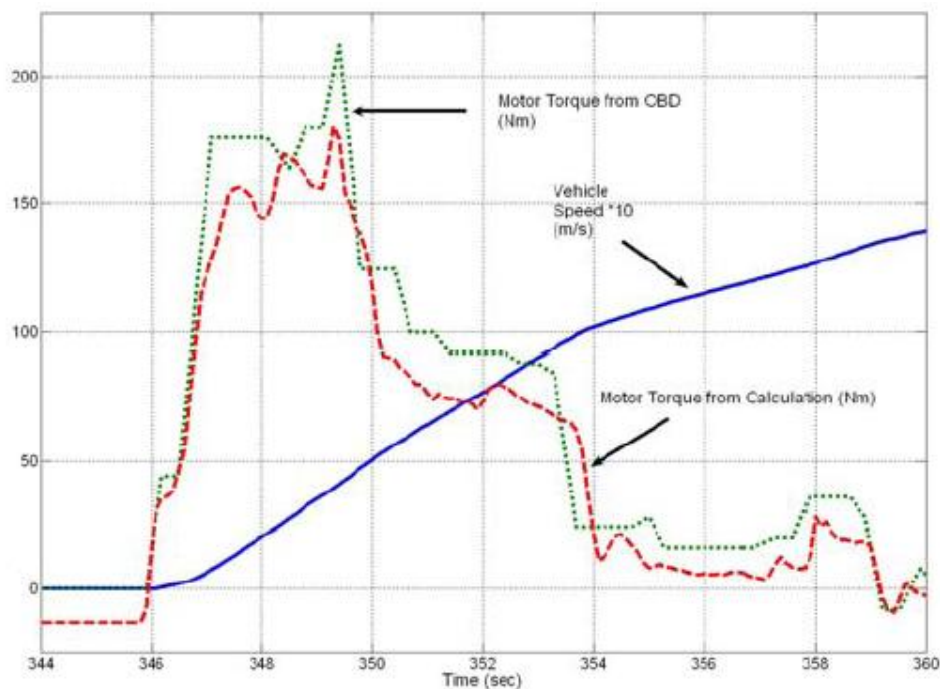
#### 2.1 ประเภทของแบบจำลอง

ในปัจจุบัน ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและการขาดแคลนพลังงานกำลังเป็นปัญหาสำคัญ โดยเฉพาะในเขตเมือง สาเหตุหลักเกิดจากการใช้ยานพาหนะบนท้องถนน ไอเสียจากเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั้นจะประกอบด้วยควันและก๊าซต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และเขม่าควัน เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเป็นสาเหตุหลักของการเกิดก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน [2] จากสาเหตุดังกล่าวในปี 1998 คณะกรรมการควบคุมมลพิษทางอากาศของรัฐแคลิฟอร์เนีย (California Air Regulatory Board, CARB) ได้ออกเกณฑ์ข้อบังคับเกี่ยวกับระดับสารพิษที่ปล่อยจากไอเสียรถยนต์ให้อยู่ในระดับต่ำ (Ultralow or zero emission) ปรากฏว่ามีเพียงรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฮบริดเท่านั้นที่สามารถผ่านเกณฑ์ข้อบังคับนี้ได้ [3] และด้วยสาเหตุที่ต้องการจะหาพลังงานทางเลือกใหม่และการประหยัดพลังงาน ในปัจจุบันรถยนต์ไฟฟ้าจึงเข้ามามีบทบาทในการคมนาคมอย่างมาก ทางผู้ผลิตยานยนต์ได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากรถยนต์ไฟฟ้าที่มีในตลาด เช่น Nissan leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus BEV, BMW mini, Think city และ Tesla Roadster เป็นต้น การศึกษาและการพัฒนาสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้านั้น หากทำโดยการสร้างรถยนต์ไฟฟ้าต้นแบบเพื่อทดสอบ จะมีความยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลานานและเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงได้เปลี่ยนเป็นการสร้างแบบจำลองรถยนต์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบจำลองรถยนต์ไฟฟ้า คือ การจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อเป็นตัวแทนของระบบจริงในการทดสอบ เช่น การทดสอบหาสมรรถนะ การทดสอบหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น นอกจากนี้แบบจำลองยังสามารถปรับปรุงและพัฒนาระบบควบคุมเพื่อลดอัตราการใช้พลังงานในขณะที่ยังคงมีสมรรถนะสูงได้โดยสะดวก และประหยัดเวลาได้อีกด้วย ประเภทของแบบจำลองนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองแบบสภาวะคงตัว (Steady state model, Static model) แบบจำลองแบบ quasi-steady state และแบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic model) แบบจำลองแบบสภาวะคงตัวและแบบ quasi-steady state หรือ quasi-static นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกัน ใช้การ Lookup table และการนำค่าจากกราฟลักษณะการทำงานของแต่ละระบบย่อยมาคำนวณ เช่น กราฟสมรรถนะของมอเตอร์ เป็นต้น ใช้ในการคำนวณหาสมรรถนะการ

ทำงาน (Performance Characteristics) อัตราการใช้พลังงาน (Energy consumption) ปริมาณไอเสียที่ปล่อย [4] แบบจำลองทั้งสองนี้มีข้อดี คือ ใช้พารามิเตอร์ในการคำนวณน้อย สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว ไม่ซับซ้อน แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในช่วง Transient นั้นจะมีความคลาดเคลื่อน ตัวอย่างของโปรแกรมที่จำลองการทำงานของรถโดยการสร้างแบบจำลองแบบสภาวะคงตัวและแบบ quasi-static เช่น ADVISOR และ PSAT เป็นต้น [6-9] ส่วนแบบจำลองพลศาสตร์นั้นจะเป็นการจำลองพฤติกรรมหรือการทำงานของระบบในช่วงเวลาต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะมีความถูกต้องแม่นยำ ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง สามารถจำลองการทำงานในช่วง Transient และคำนวณหาค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นของระบบย่อย เช่น แบตเตอรี่ Ultracapacitor และองค์ประกอบอื่นๆ เป็นต้น นิยมใช้กับระบบที่มีการพิจารณาในเรื่องของ drivability เสถียรภาพการบังคับรถ ระบบที่มีการพิจารณาในเรื่องของการสิ้นหรือกรณีที่ มีสัญญาณรบกวน [4] นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบระบบควบคุม (Controller) เพื่อให้การตอบสนองของแบบจำลองเหมือนกับระบบจริงได้ แต่จะต้องใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าแบบจำลองสองประเภทแรก เนื่องจากระบบมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมาก การคำนวณมีความซับซ้อน [8]

นอกจากนี้ถ้าพิจารณาในเรื่องของทิศทางการคำนวณแล้ว แบบจำลองยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ แบบจำลองแบบคำนวณไปข้างหน้า (Forward - looking model) และแบบจำลองแบบคำนวณย้อนกลับ (Backward-facing model) การสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานโดยเริ่มจากการคำนวณในส่วนของแบตเตอรี่ มอเตอร์ และควบคุมให้รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วตาม driving cycle นั้น จัดเป็นแบบจำลองแบบคำนวณไปข้างหน้า ส่วนการเริ่มต้นคำนวณจากภาระของรถยนต์ หรือ Tractive effort เพื่อหาอัตราการใช้พลังงานนั้น จัดเป็นแบบจำลองแบบคำนวณย้อนกลับ ซึ่งสามารถคำนวณได้เร็วกว่าแบบแรก แต่ความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่า [4,5]

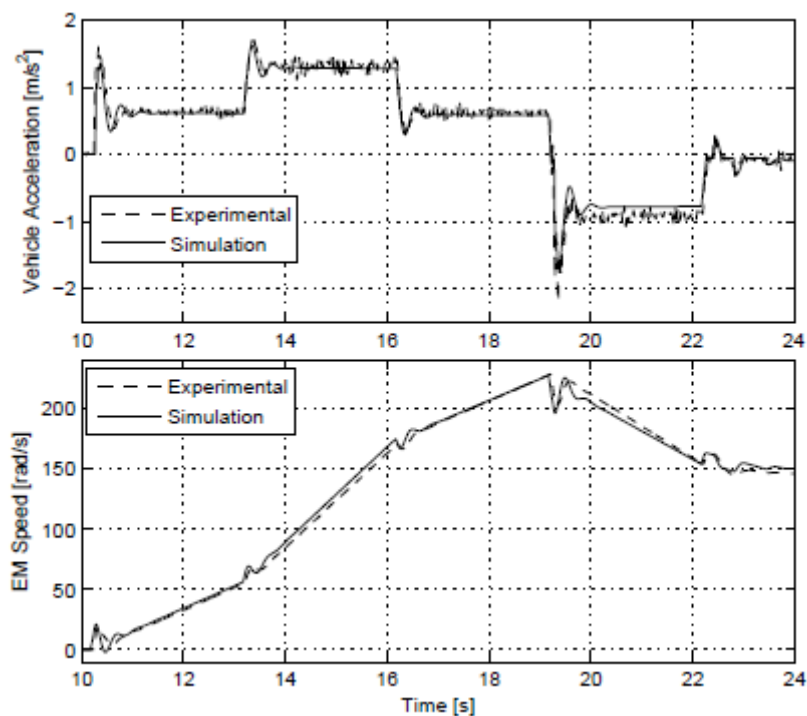
โปรแกรม PSAT ที่สร้างโดยใช้แบบจำลองแบบ quasi-steady state เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของรถยนต์นั้น [5-8] เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าแรงบิดที่เวลาต่างๆ จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จาก On-Board Diagnostic (OBD) ดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 การเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณด้วย PSAT  
กับค่าที่วัดจาก OBD

จากรูปที่ 2-2 จะเห็นว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มไปในแนวเดียวกับค่าที่วัดได้จริงจาก OBD ในช่วงแรกที่มีความเร็วของรถมีค่าคงที่เส้นกราฟแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จาก PSAT ทับกับเส้นกราฟวัดได้จาก OBD แต่ในช่วงที่รถยนต์เริ่มเปลี่ยนแปลงความเร็วจะเห็นว่าค่าที่ได้จาก PSAT จะแตกต่างจากค่าที่ได้จาก OBD [9] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง PSAT ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบ quasi-steady state นั้นสามารถจำลองการทำงานของรถยนต์ได้ดีในช่วงที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวหรือมีความเร็วคงที่ แต่ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในช่วง Transient จะยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก

จากการตรวจสอบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของรถยนต์ไฮบริดกับการทดสอบจริง [4] จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อรถมีความเร่ง ความเร็วของรถและมอเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง เส้นกราฟความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากการจำลองการทำงานมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 2-3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพลศาสตร์สามารถคำนวณและจำลองการทำงานของระบบในช่วง Transient ได้ใกล้เคียงกับระบบจริง



รูปที่ 2-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วของมอเตอร์ที่ได้จากแบบจำลอง  
กับค่าที่วัดได้จากการทดสอบจริงที่ความเร่งต่างๆ

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า แบบจำลองแบบสภาวะคงตัวและแบบ quasi-steady state สามารถจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าได้ดีในช่วงที่รถมีความเร็วคงที่ แต่แบบจำลองพลศาสตร์จะสามารถจำลองการทำงานได้ทั้งในช่วงสภาวะคงตัวและในช่วง Transient สำหรับการขับขี่จริงบนท้องถนนนั้น รถจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยเฉพาะการขับขี่ในเมืองที่จะต้องมีการเร่งและเบรกอยู่บ่อยครั้ง

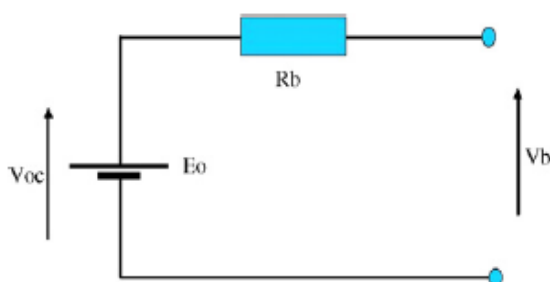
## 2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่

แบบจำลองแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีหลากหลายแบบจำลอง ซึ่งแต่ละแบบจำลองก็มีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันออกไป ในการทำงานจริงของแบตเตอรี่ จะมีพารามิเตอร์หลายค่าที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นการยากที่จะนำผลของพารามิเตอร์ทุกค่ามาคิดรวมไว้ในแบบจำลอง รายละเอียดของแต่ละแบบจำลองสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.2.1 Simple model

แบบจำลองอย่างง่ายที่ส่วนใหญ่นิยมใช้กัน คือ แบบจำลองแบบความต้านทานภายในในวงจรที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 โดยจะกำหนดให้ค่าความต้านทานภายในมีค่าคงที่ตลอดช่วงการทำงาน ส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรจะใช้คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าร่วมกับความต้านทานภายในสำหรับแบตเตอรี่แบบอุดมคติ [9,10]

แบบจำลองอย่างง่ายนี้จะไม่สามารถแสดงถึงค่าความต้านทานภายในที่แท้จริงได้ เพราะในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานภายในจะขึ้นอยู่กับระดับการประจุของแบตเตอรี่และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สำหรับแบบจำลองอย่างง่ายนี้แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้อย่างไม่มีข้อจำกัด จึงเหมาะสมที่จะใช้จำลองการทำงานของแบตเตอรี่ที่ไม่ต้องคำนึงถึงระดับการประจุ



รูปที่ 2-4 Simple battery model [20]

### 2.2.2 Improved simple model

แบบจำลองแบตเตอรี่แบบนี้จะเป็นแบบจำลองแบบความต้านทานภายในไม่คงที่ โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับระดับการประจุ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-4 เช่นเดียวกับแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย แต่จะต่างกันตรงที่ค่าความต้านทานภายในเป็นฟังก์ชันของระดับการประจุ  $R_b = f(SOC)$  และสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2)

$$R_b = \frac{R_o}{S^K} \quad (2-1)$$

โดยที่

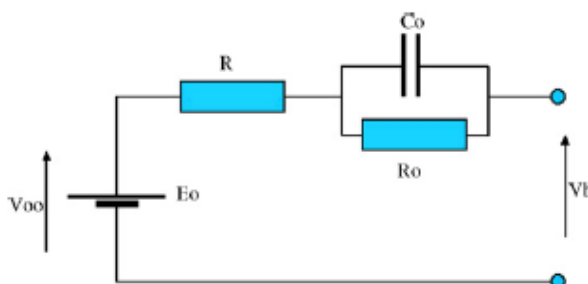
$$S = 1 - \frac{Ah}{C_{10}} \quad (2-2)$$



เมื่อ	$R_b$	คือ	ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $\Omega$ )
	$R_o$	คือ	ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เมื่อระดับการประจุเต็ม ( $\Omega$ )
	$S$	คือ	ระดับการประจุของแบตเตอรี่ (SOC)
	$k$	คือ	capacity coefficient
	$A$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่าย (แอมแปร์)
	$h$	คือ	ระยะเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า (ชั่วโมง)
	$C_{10}$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการจ่ายไฟฟ้า 10 ชั่วโมง (แอมแปร์-ชั่วโมง)

### 2.2.3 Thevenin battery model

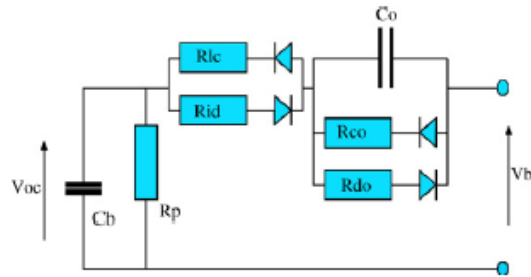
แบบจำลองเทวินินเป็นแบบจำลองพลศาสตร์ที่จำลองการทำงานในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานภายใน และตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2-5 แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นค่าคงที่ ผลการจำลองจึงยังไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของแบตเตอรี่



รูปที่ 2-5 แบบจำลองเทวินิน

### 2.2.4 Non-linear dynamic battery model

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของแบตเตอรี่นั้นพัฒนาขึ้นจากแบบจำลองแบตเตอรี่เทวินิน แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้นั้นจะเป็น non linear [10,11] ค่าพารามิเตอร์ของความต้านทานภายใน self-discharge resistance และ overcharge resistance จะแยกเป็นแบตเตอรี่ขณะประจุและคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2-6

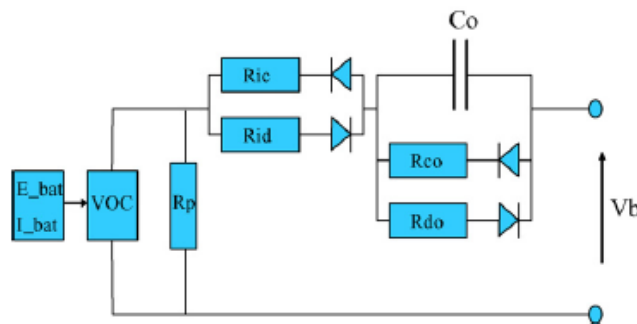


รูปที่ 2-6 Non-linear dynamic battery model

แบบจำลองทางพลศาสตร์นี้สามารถจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่การหาค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวจะต้องได้จากการทดลองและมีความซับซ้อนมาก

### 2.2.5 New dynamic battery model

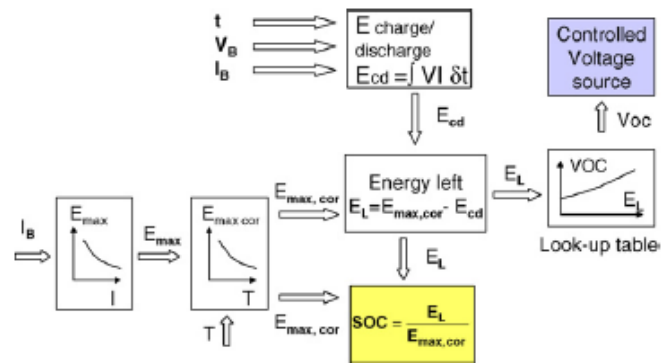
จากงานวิจัยของ Dürr ที่นำเสนอวิธีการคำนวณแบบจำลองทางพลศาสตร์ของแบตเตอรี่วิธีใหม่ แบบจำลองจะมีลักษณะคล้ายกับ Non-linear dynamic battery model แต่วิธีการคิดและการหาค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้ง่ายกว่า และได้รวมผลของอุณหภูมิที่มีต่อความจุของแบตเตอรี่มาพิจารณาด้วย โดยมีแผนภาพไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 New dynamic battery model

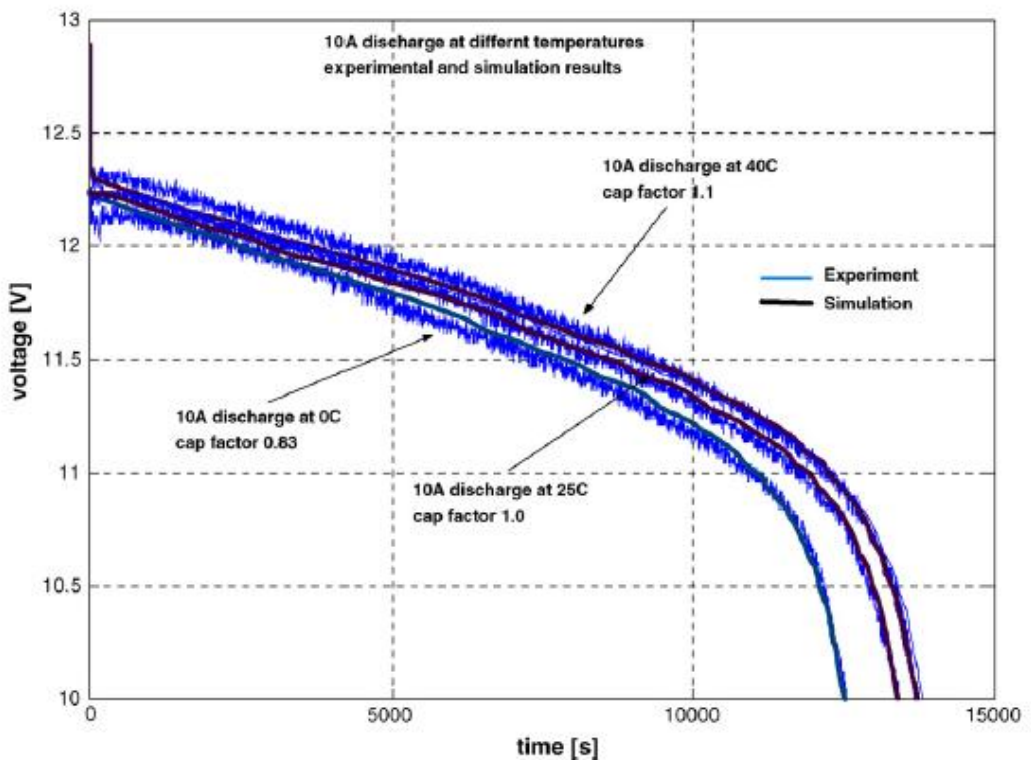
แบบจำลองนี้จะเริ่มจากการคำนวณพลังงานมากที่สุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้,  $E_{max}$  จากกระแสไฟฟ้าที่จ่าย,  $I_b$  จากนั้นจะมาคำนวณในส่วนของ Temperature corrected maximum energy,  $E_{max,corr}$  เพื่อคิดผลของอุณหภูมิที่มีต่อพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ จากนั้นจะมาคำนวณหาพลังงานที่แบตเตอรี่ใช้ไป,  $E_{cd}$  จากการอินทิเกรตผลคูณของแรงดันไฟฟ้า

และกระแสไฟฟ้าที่จ่าย เพื่อมาคำนวณหาพลังงานของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่,  $E_L$  และคำนวณหา ระดับการประจุของแบตเตอรี่,  $SOC$  ส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรสามารถหาได้จากการ Look-up table ซึ่งแผนภาพไดอะแกรมของขั้นตอนการคำนวณสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 แผนภาพไดอะแกรมของขั้นตอนการคำนวณของ New dynamic battery model

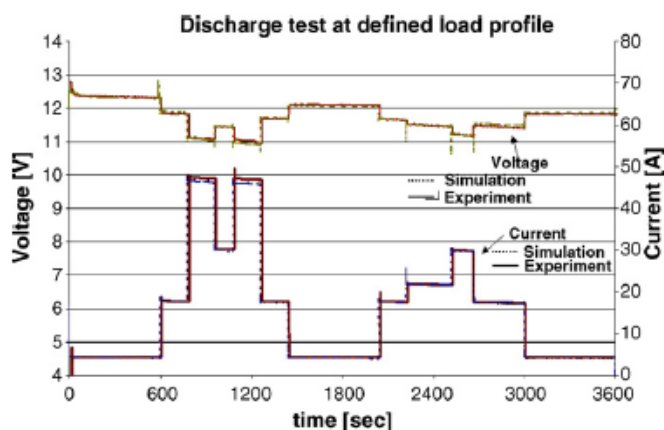
ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองเปรียบเทียบกับ การทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองเทียบกับการทดสอบภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 2-9 จะเห็นว่าผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันส่งผลต่อความจุของแบตเตอรี่ และพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ โดยที่อุณหภูมิต่ำ ความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้น้อยลง แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความจุของแบตเตอรี่จะมากขึ้น แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดสอบสำหรับกรณีที่มีแบตเตอรี่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักรดังรูปที่ 2-10 จะเห็นว่าผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดสอบมากจนเกือบจะทับเป็นเส้นเดียวกัน



รูปที่ 2-10 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับการทดสอบแบบเป็นวัฏจักร

ดังนั้นจะเห็นว่า New dynamic battery model เป็นแบบจำลองที่มีวิธีการคำนวณและการหาค่าพารามิเตอร์ได้ง่าย แต่รวมเอาผลของระดับการประจุและอุณหภูมิที่มีผลการทำงานของแบตเตอรี่มาพิจารณาด้วย และสามารถจำลองการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เนื่องจากข้อจำกัดของรถยนต์ไฟฟ้าในเรื่องของระยะทางที่สามารถขับขี่ได้กับพลังงานจากแบตเตอรี่ การคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะใช้ในการพิจารณาการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่และมอเตอร์ให้เหมาะสมกับการจราจรในแต่ละพื้นที่ แต่การพัฒนาของรถยนต์ไฟฟ้าหรืองานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเพิ่มขึ้นในต่างประเทศ ซึ่งมีสภาพการจราจรที่แตกต่างจากกรุงเทพฯ จึงไม่สามารถที่จะบอกได้ว่ารถยนต์ไฟฟ้านั้นเหมาะสมกับการจราจรในกรุงเทพฯ

จากช่องว่างทางวิชาการดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างและพัฒนาแบบจำลอง

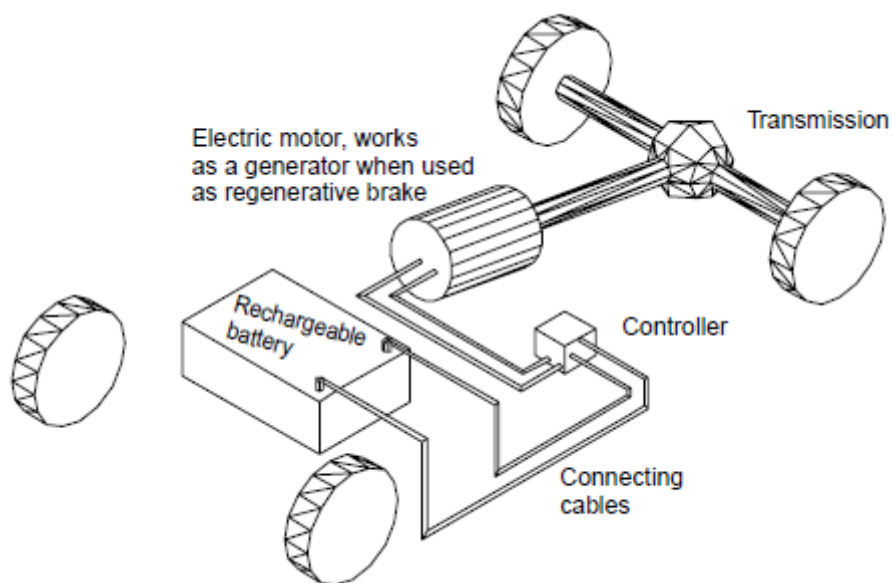
พลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ

### บทที่ 3

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1 ระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าประกอบด้วย มอเตอร์ขับเคลื่อน ชุดควบคุม ระบบส่งกำลัง และแหล่งจ่ายพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 3-1 มอเตอร์จะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์ โดยจะใช้มอเตอร์เพียงตัวเดียวในการรับภาระการขับเคลื่อนทั้งหมด หรือใช้มอเตอร์หลายตัวก็ได้แล้วแต่การออกแบบ ในรถยนต์ทั่วไป เครื่องยนต์จะส่งกำลังขับผ่านชุดเฟืองทดที่มีหลายอัตราทด แต่ในกรณีระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าจะใช้อัตราทดคงที่ แรงบิดและกำลังขับของมอเตอร์จะถูกควบคุมโดยชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Controller) ที่จะทำหน้าที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระที่เวลาหนึ่งๆ ในส่วนของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้านั้นอาจเป็นแบตเตอรี่ ชุดเก็บประจุความจุสูง (Supercapacitor, Ultracapacitor) หรือเซลล์เชื้อเพลิงก็ได้



รูปที่ 3-1 โครงสร้างของรถยนต์ไฟฟ้า

จากปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากไอเสียของรถยนต์ การขาดแคลนและราคาที่เพิ่มสูงขึ้นของน้ำมันเชื้อเพลิง จึงนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้ามีข้อได้เปรียบมากกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เป็นต้นกำลัง ดังนี้

- ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เมื่อพิจารณาจากการนำน้ำมันดิบมาแปลงเป็นพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของรถยนต์ (Well-to-wheel efficiency) ดังแสดงในตารางที่ 3-1 [12] แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในแต่ละขั้นตอนของการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบจนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในกับระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า

ตารางที่ 3-1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากน้ำมันดิบจนถึงพลังงานขับเคลื่อนที่ล้อของรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในกับระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า

ICEV	Efficiency (%)		EV	Efficiency (%)	
	Max	Min		Max	Min
Crude oil			Crude oil		
Refinery (petroleum)	90	85	Refinery (fuel oil)	97	95
Tank	99	95	Electric generation	40	33
engine	22	20	Transmission to wall outlet	92	90
Transmission/axle wheels	98	95	Battery charger	90	85
			Battery (lead acid)	75	75
			Motor/controller	85	80
			Transmission/axle wheels	98	95
Overall efficiency (Crude oil to wheel)	19	15	Overall efficiency (Crude oil to wheel)	20	14

- ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าสามารถนำพลังงานที่สูญเสียจากการเบรกกลับมาใช้ใหม่ได้ (Regenerative braking) โดยเมื่อมีการเบรกหรือหน่วงความเร็วของรถ มอเตอร์

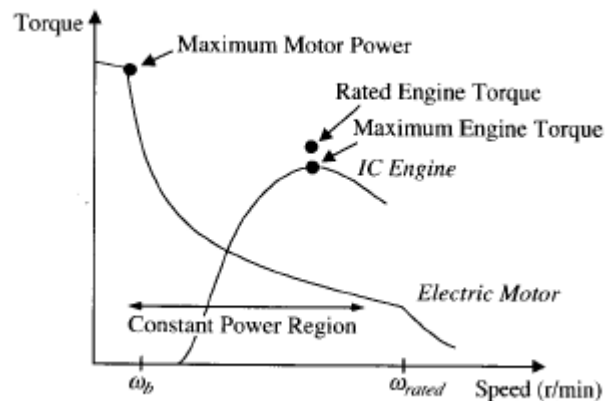
ขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Generator) ส่งมาเก็บในแบตเตอรี่ (Charge) เหมาะสมกับการขับขี่ในเมืองที่ต้องมีการเบรกและหยุดรถบ่อยครั้ง

- ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้ามีระดับเสียงของการทำงานที่ต่ำและมีความคงทน มีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นต้นกำลัง เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้ามีส่วนประกอบและกลไกการเคลื่อนที่ของระบบขับเคลื่อนที่น้อยกว่า กล่าวคือ รถยนต์ไฟฟ้าจะมีแค่เพียงมอเตอร์ขับเคลื่อน แบตเตอรี่ และชุดเฟืองที่อัตราทดคงที่ แต่สำหรับรถยนต์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเครื่องยนต์ที่มีกลไกการเคลื่อนที่ของลูกสูบ การเปิดปิด วาล์ว มีชุดเฟืองทดหลายอัตราทด และต้องใช้น้ำมันเครื่องในปริมาณมากเพื่อการหล่อลื่นกลไกทั้งในเครื่องยนต์และชุดเฟืองทด

- การใช้ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าจะปราศจากมลพิษทางอากาศและยังช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากไอเสียของรถยนต์ ถึงแม้ว่าจะไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไอเสีย แต่พลังงานไฟฟ้าที่รถยนต์ไฟฟ้าใช้นั้นได้ผลิตจากโรงไฟฟ้าที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือแม้แต่โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ซึ่งต่างก็ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกันทั้งสิ้น

- การเปลี่ยนแปลงแรงบิดต่อความเร็วรอบระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าจะดีกว่าระบบขับเคลื่อนที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากที่ความเร็วรอบต่ำ เครื่องยนต์จะให้แรงบิดน้อย แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้น แรงบิดก็จะเพิ่มขึ้นตามจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วรอบต่อไปแรงบิดจะค่อยๆ ลดลง จึงต้องมีชุดเฟืองทดหลายอัตราทดเพื่อช่วยให้มีแรงบิดเพียงพอในการออกตัวของรถ แต่สำหรับระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้านั้นจะมีแรงบิดสูงสุดในขณะที่รถหยุดนิ่ง และมีช่วงกำลังสูงสุดที่กว้าง ดังแสดงในรูปที่ 3-2 [12] จึงไม่จำเป็นต้องมีชุดเฟืองทดหลายอัตราทดหรือสามารถขับโดยไม่ต้องใช้เฟืองทดก็ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางกลอีกด้วย





รูปที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบสำหรับเครื่องยนต์และมอเตอร์

### 3.2 ส่วนประกอบระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

#### 3.2.1 มอเตอร์ขับเคลื่อน

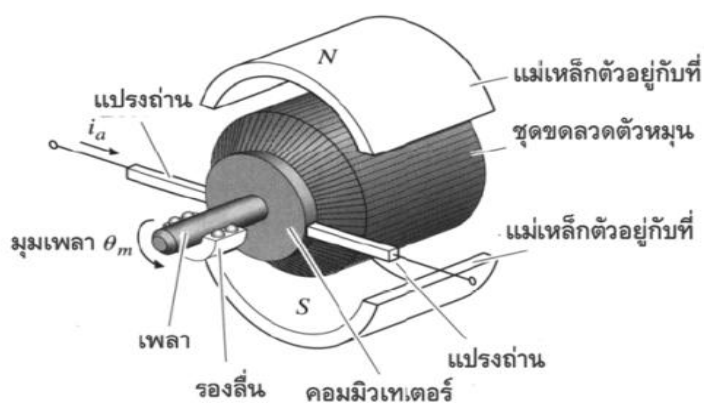
มอเตอร์ขับเคลื่อนเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เป็นพลังงานทางกลเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน แต่ในกรณีของ Regenerative braking นั้น มอเตอร์จะทำหน้าที่เหมือนเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน โดยเปลี่ยนพลังงานทางกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเก็บในแบตเตอรี่ มอเตอร์แต่ละประเภทจะมีลักษณะเฉพาะและหลักการทำงานที่แตกต่างกันออกไป จึงควรเลือกใช้ประเภทของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับงาน

ในปี ค.ศ.1980 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) ถูกนำมาใช้งานการขับเคลื่อนรถยนต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากแรงบิดต่อความเร็วรอบเหมาะสมกับการนำมาใช้ขับเคลื่อนรถยนต์ ประกอบกับมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถควบคุมการทำงานได้ง่าย แต่เนื่องจากโครงสร้างมีแปรงถ่าน (Brush) และคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) จึงยากต่อการบำรุงรักษา ปัจจุบันได้เปลี่ยนมาใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ (Brushless DC motor, BLDC) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะมีประสิทธิภาพสูงและทนทาน [12]

### 3.2.1.1 Brushed DC motor

ส่วนประกอบอย่างง่ายของ Brushed DC motor ประกอบด้วยแกนหมุน (Rotor) ซึ่งมีขดลวดตัวนำ (Armature) ทำหน้าที่รับกระแสไฟฟ้าจากคอมมิวเตเตอร์ที่ต่ออยู่กับปลายของขดลวด และจะหมุนไปพร้อมกับชุดแกนหมุน คอมมิวเตเตอร์จะสัมผัสกับแปรงถ่านเพื่อรับกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ที่ตัวโครงของมอเตอร์มีแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้าติดอยู่ในแนวล้อมรอบแกนหมุนที่เรียกว่า สเตเตอร์ (Stator)

มอเตอร์จะเริ่มทำงานเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งต่ออยู่กับแปรงถ่านที่สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ และจะส่งต่อไปยังขดลวดในแกนหมุนต่อไป เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะก่อให้เกิดแรงผลัก ทำให้แกนหมุนเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 3-3 [11] ถ้าหากมีขดลวดเพียงชุดเดียวจะทำให้แรงผลักที่เกิดขึ้นนั้นไม่สม่ำเสมอในการใช้งานจริงจึงต้องมีขดลวดหลายๆ ชุดเพื่อให้สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างสม่ำเสมอ



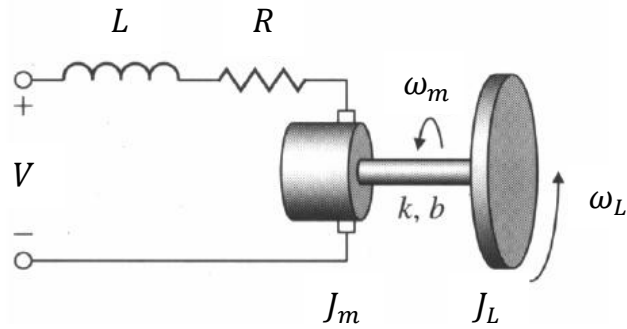
Basic Components of DC servo motors

รูปที่ 3-3 ส่วนประกอบที่สำคัญของ Brushed DC motor [15]

เนื่องจากแกนหมุนหมุนผ่านสนามแม่เหล็ก จึงทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขดลวดในแกนหมุน เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back voltage) ขึ้น แรงดันที่เกิดขึ้นจะต้านแรงดันจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ไหลภายในขดลวด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าวรวมลดลง แรงบิดจึงมีค่าลดลง

หลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 3-4 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของแกนมอเตอร์กระแสตรง (Dynamic model of

DC motor) นั้นสามารถแบ่งได้เป็นสมการทางกล (Mechanical equation) และสมการทางไฟฟ้า (Electrical equation)



รูปที่ 3-4 รูปไดอะแกรมของมอเตอร์ [15]

ในการควบคุมมอเตอร์จะมีการควบคุมอยู่ 2 วิธีคือ การควบคุมกระแสไฟฟ้า และการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้การควบคุมแรงดันไฟฟ้าเมื่อต้องการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เป็นหลัก ในขณะที่การควบคุมกระแสไฟฟ้านั้นจะเหมาะสำหรับการควบคุม torque ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการควบคุมการเคลื่อนที่การหมุนของมอเตอร์ และสามารถจำลองการทำงานของมอเตอร์ได้ดังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

สมการทางไฟฟ้า (Electrical equation) แสดงดังสมการที่ 3-1

$$V - K_e \omega_m = iR + L \frac{di}{dt} \quad (3-1)$$

เมื่อ	$K_e$	คือ	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF constant, $\frac{\text{Volt}}{\text{rad/sec}}$ )
	$i$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (แอมแปร์)
	$R$	คือ	ความต้านทานภายในมอเตอร์ (โอห์ม)
	$L$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำ (henry)
	$\omega_m$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของแกนหมุนของมอเตอร์ (rad/sec)

เนื่องจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3-2

$$T_m = K_t i \quad (3-2)$$

เมื่อ  $T_m$  คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (Nm)  
 $K_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque constant, Nm/amp)

เมื่อมอเตอร์มีภาระติดตั้งอยู่ สามารถจำลองการทำงานได้ตามสมการทางกล (Mechanical equation) ดังสมการที่ 4-15

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - b\omega_m \quad (3-3)$$

เมื่อ  $b$  คือ ค่าคงที่ของแรงเสียดทาน  
 $J$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และภาระที่ติดตั้งอยู่

โดยที่ 
$$J = J_m + \frac{J_L}{N^2} \quad (3-4)$$

เมื่อ  $J_m$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ( $\text{kg/m}^2$ )  
 $J_L$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของภาระที่ติดตั้งอยู่ ( $\text{kg/m}^2$ )  
 $N$  คือ อัตราทดของระบบส่งกำลัง

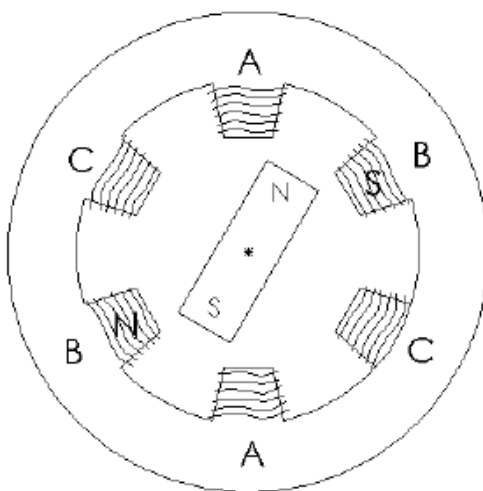
### 3.2.1.2 Brushless DC motor (BLDC)

Brushless DC motor เป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้งานทั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มอเตอร์ขับเคลื่อนรถยนต์ อากาศยาน อุตสาหกรรม และการแพทย์ BLDC มีข้อได้เปรียบ Brushed DC motor ดังนี้

- มีลักษณะความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วที่ดีกว่า และมีช่วงของความเร็วที่กว้าง
- มีการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่ดี
- มีความทนทาน อายุการใช้งานยาวนาน
- มีประสิทธิภาพสูง ไม่มีเสียงรบกวนขณะทำงาน

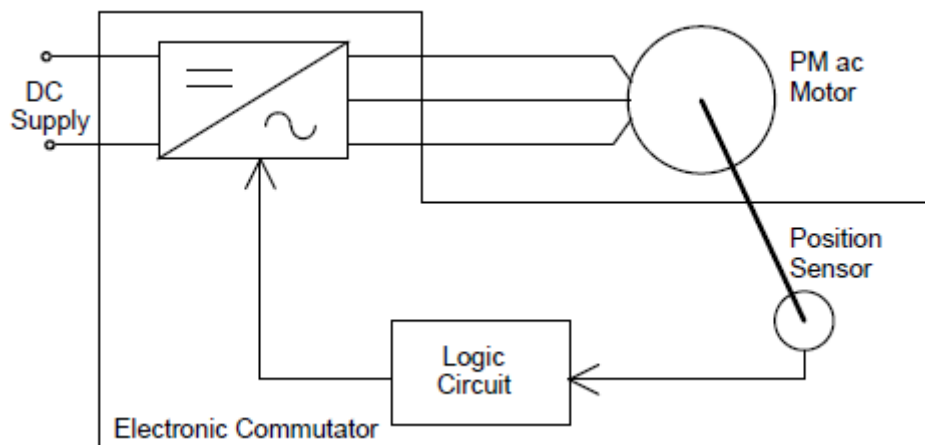
BLDC มีหลักการทำงานเป็นแบบ Synchronous motor คือ rotor และ stator จะหมุนไปพร้อมกัน มีทั้งที่เป็นแบบ 1-phase 2-phase และ 3-phase แต่ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ แบบ 3-phase การทำงานจะใช้แกนหมุนเป็นแม่เหล็กถาวรและที่โครงของมอเตอร์จะมีขดลวดสเตเตอร์

จำนวนหลายชุดทำหน้าที่เป็นขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดสเตเตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กดึงดูดให้แกนหมุนซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนมาอยู่ในแนวขดลวดที่มีกระแส เมื่อเปลี่ยนมาจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดชุดต่อไปอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดการหมุนของแกนหมุนตามการสลับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังขดลวดชุดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3-5 [13]



รูปที่ 3-5 Brushless DC motor [13]

Brushless DC motor จะใช้ไฟฟ้ากระแสสลับที่แปลงมาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง การทำงานจะซับซ้อนกว่า Brushed DC motor เพราะจะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดให้สอดคล้องกับการหมุนของ rotor จึงต้องมี sensor ที่ใช้สำหรับตรวจวัดตำแหน่งของแกนหมุนดังแสดงในรูปที่ 3-6 [14] ถึงแม้จะมีหลักการทำงานที่ซับซ้อนกว่า แต่สามารถที่จะควบคุมมอเตอร์ได้อย่างยืดหยุ่น เนื่องจากสามารถควบคุมแรงบิดได้โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวด ส่วนความเร็วนั้นจะถูกควบคุมด้วยความถี่ของการสลับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3-6 แบบจำลองโครงสร้างของ Brushless DC motor

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับ Brushed DC motor และมีแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่ความเร็วรอบสูงๆ เช่นเดียวกันแต่จะไม่มี การสูญเสียจากการเหนี่ยวนำในแกนหมุน เนื่องจากแกนหมุนนั้นเป็นแม่เหล็กถาวร นอกจากนี้แล้ว Brushless DC motor ยังไม่มีการสูญเสียในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้ระหว่างแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์อีกด้วย ดังนั้น Brushless DC motor จึงมีประสิทธิภาพดีและมีความทนทาน

การทำงานของ BLDC สามารถจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์แบบเดียวกับสมการของ Brushed DC motor ดังสมการที่ 3-1 ถึง 3-4 [11]

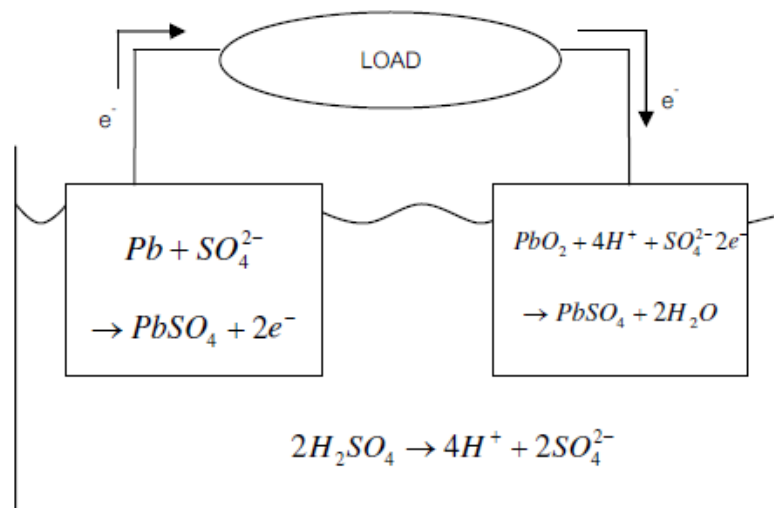
### 3.2.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีลักษณะการทำงานและขนาดที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ชนิดและขนาดของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับลักษณะของงาน เนื่องจากโครงการนี้ใช้แบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่วในการสร้างแบบจำลอง จึงจะขอกล่าวถึงลักษณะการทำงานและค่าตัวแปรต่างๆเฉพาะของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว

#### 3.2.2.1 แบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว

แบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่วประกอบด้วยเซลล์ย่อยๆ หลายเซลล์ประกอบกัน ซึ่งแต่ละเซลล์นั้นจะประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรด 2 แห่งที่เป็นอิเล็กโทรดบวก (Positive electrode) ทำจาก

แผ่นตะกั่วไดออกไซด์ ( $PbO_2$ ) และอิเล็กโทรดลบ (Negative electrode) ทำจากแผ่นตะกั่ว (Pb) ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน แผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ซึ่งเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา เมื่อต่อขั้วไฟฟ้ากับภาระ สารละลายกรดซัลฟิวริกจะเกิดการแตกตัวได้เป็น  $H^+$  และ  $SO_4^{2-}$   $SO_4^{2-}$  จะเข้าทำปฏิกิริยากับ Pb ที่แผ่นอิเล็กโทรดลบเกิดเป็นตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ ) เกาะอยู่ และอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านตัวนำไปยังแผ่นอิเล็กโทรดบวก และทำปฏิกิริยากับ  $PbO_2$  และ  $H^+$  เกิดเป็นตะกั่วซัลเฟต ( $PbSO_4$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเป็นเวลานาน จะมีปริมาณน้ำมากขึ้นทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เจือจางลง นอกจากนี้แล้วยังเกิด  $PbSO_4$  ที่แผ่นอิเล็กโทรดมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีหยุดลง ซึ่งก็คือกรณีที่แบตเตอรี่หมดพลังงาน แต่สามารถที่จะประจุไฟฟ้าใหม่ได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าย้อนกลับให้กับแบตเตอรี่ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีย้อนกลับ แบตเตอรี่จึงสามารถจ่ายพลังงานได้อีก ซึ่งส่วนประกอบและสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว นั้นแสดงดังรูปที่ 3-7 [13]



รูปที่ 3-7 ส่วนประกอบและสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว

### 3.2.2.2 ความจุของแบตเตอรี่ (Capacity)

การบอกขนาดของแบตเตอรี่จะบอกเป็นความจุของแบตเตอรี่ ในหน่วยของแอมแปร์ ชั่วโมง (Amp-Hour) เช่น แบตเตอรี่ขนาด 10 แอมแปร์ ชั่วโมง เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์

จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นาน 10 ชั่วโมง แต่ถ้าหากแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มากกว่า 1 แอมแปร์ เช่นจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 10 แอมแปร์ ก็จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้น้อยกว่า 1 ชั่วโมง หรือในกรณีที่แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 0.5 แอมแปร์ แบตเตอรี่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานมากกว่า 20 ชั่วโมง เป็นต้น แสดงว่าอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะมีผลต่อความจุของแบตเตอรี่ กล่าวคือเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่ามากๆ แบตเตอรี่จะมีความจุลดลง

### 3.2.2.3 ประสิทธิภาพการประจุ

พลังงานไฟฟ้าที่ประจุให้กับแบตเตอรี่นั้น แบตเตอรี่ไม่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้ทั้งหมด โดยจะขึ้นกับระดับการประจุ อุณหภูมิ และชนิดของแบตเตอรี่ ในช่วงแรกที่ประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ ประสิทธิภาพในการประจุจะมีค่าใกล้เคียง 100% แต่เมื่อระดับการประจุอยู่ที่ประมาณ 80% ประสิทธิภาพในการประจุจะลดลงเนื่องจากแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่จะมีพลังงานเต็มไม่พร้อมกัน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการจ่ายพลังงานให้กับเซลล์ที่ประจุเต็มก่อนแล้ว แต่ยังคงจ่ายพลังงานต่อไปเรื่อยๆ ให้กับเซลล์ที่ยังมีการประจุไม่เต็ม

### 3.2.2.4 การคายประจุไฟฟ้าภายในตัวเอง

แบตเตอรี่นั้นสามารถที่จะคายประจุภายในตัวเองได้ โดยขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของแบตเตอรี่ ถ้าแบตเตอรี่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่จะเพิ่มมากขึ้น สำหรับแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว นั้นการคายประจุภายในตัวเองนั้นเกิดจากการที่แท่งอิเล็กโทรดทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยตรง แล้วเกิด  $PbSO_4$  และน้ำ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลง จึงทำให้ระดับการประจุของแบตเตอรี่ลดลง

### 3.2.2.5 แบบจำลองของแบตเตอรี่

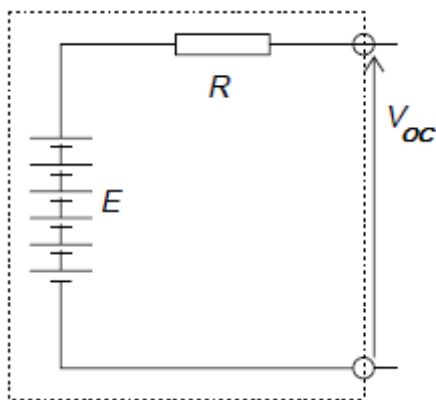
แบบจำลองของแบตเตอรี่มีอยู่หลายลักษณะ มีทั้งแบบที่การคำนวณง่ายและแบบที่การคำนวณซับซ้อน ได้แก่ แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน แบบจำลองอีวีเนิน แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ และแบบจำลองมัลติสแตท สำหรับแบบจำลองของแบตเตอรี่สามประเภทแรกนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้จากการทดลอง จึงสามารถใช้จำลองการทำงานได้ดี



เฉพาะกับแบตเตอรี่ที่นำมาทดสอบ ส่วนแบบจำลองแบบที่สี่นั้นจะเป็นการจำลองการทำปฏิกิริยาเคมีภายในแบตเตอรี่

### 3.2.2.6 แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน

แบบจำลองแบบความต้านทานภายใน นั้นสามารถแสดงได้ด้วยวงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent circuit) ดังรูปที่ 3-8 [13] จะเห็นว่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้นจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร (Open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความลึกการคายประจุ (DOD) และความต้านทานภายใน



รูปที่ 3-8 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent circuit)

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในยังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภท คือ

- 1) แบบจำลองแบบความต้านทานภายในเชิงเส้น
- 2) แบบจำลองแบบความต้านทานภายในไม่เชิงเส้น

แบบจำลองแบบความต้านทานภายในเชิงเส้น จะกำหนดให้ค่าความต้านทานภายในมีค่าคงที่ตลอดช่วงการทำงาน แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรจะเปลี่ยนแปลงตามระดับการประจุ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ โดยจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกไปกับค่าความจุของแบตเตอรี่ แบบจำลองดังกล่าวสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ [13] ดังนี้

ความจุของแบตเตอรี่

จากที่ได้เคยกล่าวไปแล้วว่าความจุของแบตเตอรี่นั้นไม่คงที่ แต่จะขึ้นกับอัตราการจ่ายกระแสไฟฟ้า การบอกความจุของแบตเตอรี่จึงต้องระบุช่วงเวลาการจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วย ในแบบจำลองนี้การระบุความจุของแบตเตอรี่จะใช้ค่า Peukert Capacity ดังสมการที่ 3-2

$$C_p = I^{K_p} T \quad (3-2)$$

เมื่อ	$C_p$	คือ	Peukert Capacity (แอมแปร์-ชั่วโมง)
	$K_p$	คือ	Peukert Coefficient
	$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจากแบตเตอรี่ (แอมแปร์)
	$T$	คือ	ระยะเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า (ชั่วโมง)

ระดับการประจุ (State of charge)

ระดับพลังงานในแบตเตอรี่นั้น จะแสดงด้วยระดับการประจุ (State of charge, SOC) ดังสมการที่ 3-3 ที่จะบอกเป็นร้อยละเทียบกับความจุ หรือแสดงด้วยค่าความลึกการคายประจุ (Depth of discharge, DOD) ดังสมการที่ 3-4

$$SOC = 1 - \int \frac{I^{K_p}}{3600C_p} dt \quad (3-3)$$

$$DOD = \int \frac{I^{K_p}}{3600C_p} dt \quad (3-4)$$

เมื่อ	$SOC$	=	ระดับการประจุของแบตเตอรี่ (State of charge)
	$DOD$	=	ค่าความลึกการคายประจุ (Depth of discharge)
	$t$	=	เวลา (วินาที)

แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

สมการที่ใช้แทนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน สำหรับแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรเป็นดังสมการที่ 3-5

$$V_{oc} = n \times [2.15 - DOD \times (2.15 - 2.00)] \quad (3-5)$$

เมื่อ  $V_{oc}$  = แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะเปิดวงจร  
 $n$  = จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Internal resistance)

ส่วนความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่าคงที่ขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์และความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-6

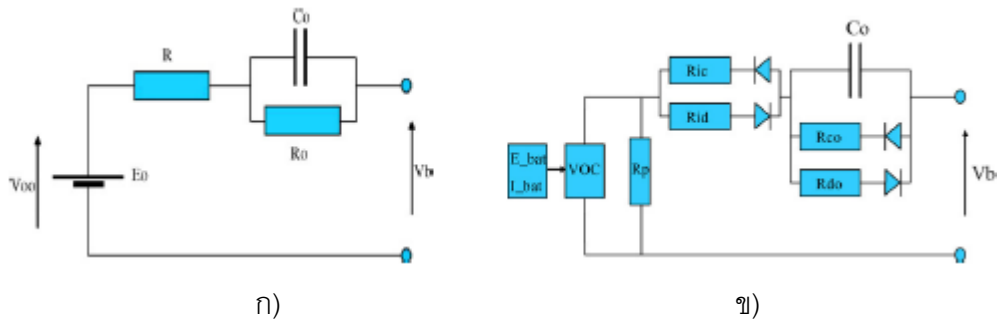
$$R_{in} = n \frac{r_{in}}{C_{10}} \quad (3-6)$$

เมื่อ  $R_{in}$  คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (โอห์ม)  
 $r_{in}$  คือ ความต้านทานภายในต่อเซลล์ที่ 1 แอมแปร์-ชั่วโมง (โอห์ม)  
 $C_{10}$  คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่อัตราการจ่ายไฟฟ้า 10 ชั่วโมง (แอมแปร์-ชั่วโมง)

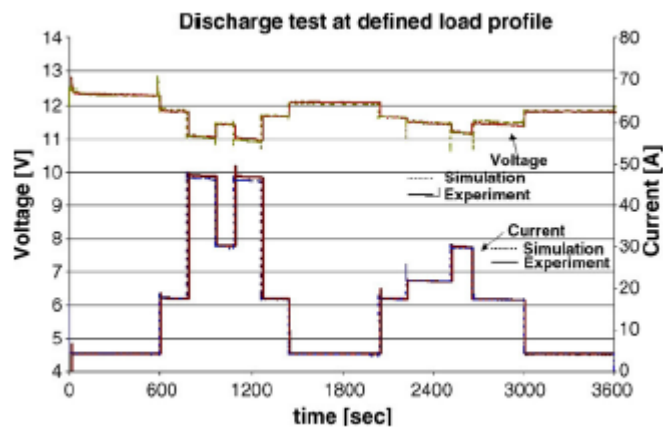
แบบจำลองแบบความต้านทานภายในไม่เชิงเส้นจะมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองแบบความต้านทานภายในเชิงเส้น แต่ค่าความต้านทานภายในจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับระดับการประจุและอุณหภูมิ แบบจำลองจึงสามารถจำลองการทำงานได้ใกล้เคียงกับความจริงมากขึ้น แต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นี้จะหาได้จากการทดสอบ ซึ่งมีความซับซ้อนมากโดยเฉพาะการหาความสัมพันธ์ของความต้านต่อระดับการประจุและอุณหภูมิ

### 3.2.2.7 แบบจำลองเทวินิน (Thevenin battery model)

แบบจำลองเทวินินเป็นแบบจำลองพลศาสตร์ที่จำลองการทำงานในส่วนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานภายใน และตัวเก็บประจุดังรูปที่ 3-9 ก แต่เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นค่าคงที่ ผลการจำลองจึงยังไม่สอดคล้องกับการทำงานจริงของแบตเตอรี่ Dür และคณะ [10] จึงได้พัฒนาแบบจำลองของเทวินิน และเสนอแบบจำลองพลศาสตร์ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3-9 ข โดยให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ขึ้นอยู่กับผลของระดับการประจุและอุณหภูมิ สามารถจำลองการทำงานได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-9 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของ ก) แบบจำลองอีวินิน และ ข) แบบจำลองของ Dür และคณะ

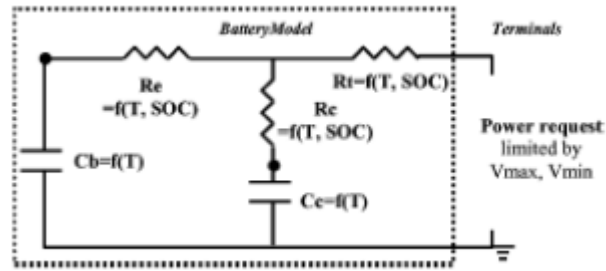


รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าต่างๆ ของแบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินินกับผลการทดสอบจริง

ถึงแม้ว่าจะสามารถจำลองการทำงานได้อย่างแม่นยำ แต่การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น  $R$   $R_0$   $C_0$  และ  $V_{oc}$  เป็นต้น ต้องใช้การทดสอบที่มีขั้นตอนยุ่งยากซับซ้อน เพราะค่าเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามระดับการประจุและอุณหภูมิ

### 3.2.2.8 แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (Resistance-Capacitance model)

แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุสามารถแทนได้ด้วยวงจรไฟฟ้าเทียบเท่าดังแสดงในรูปที่ 3-11 [15] แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองทางพลศาสตร์โดยกำหนดให้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่  $C_b$  แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ส่วนตัวเก็บประจุ  $C_c$  แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะไม่คงที่ และสามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปของ State space โดยให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายเป็น input ของระบบ ดังสมการที่ 3-7 ก และ ข [16]

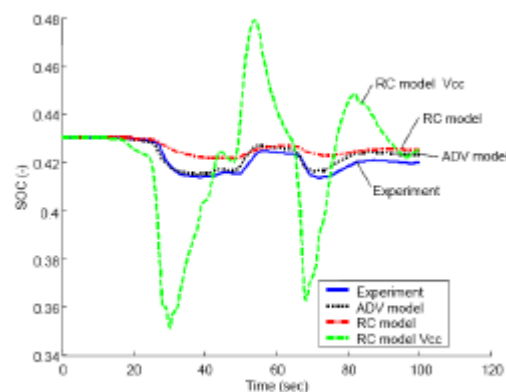


รูปที่ 3-11 วงจรไฟฟ้าเทียบเท่าของแบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ [33]

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Cb} \\ \dot{V}_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/C_b(R_e + R_c) & 1/C_b(R_e + R_c) \\ 1/C_c(R_e + R_c) & -1/C_c(R_e + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_c/C_b(R_e + R_c) \\ -1/C_c + R_c/C_c(R_e + R_c) \end{bmatrix} [I] \quad (3-7 \text{ ก})$$

$$[V_o] = \begin{bmatrix} R_c/(R_e + R_c) & R_e/(R_e + R_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} + \left[ R_t - \frac{R_c R_e}{R_e + R_c} \right] [I] \quad (3-7 \text{ ข})$$

แบบจำลองโดยวงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ สามารถจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ได้ดีในช่วง transient แต่เนื่องจากแบบจำลองประเภทนี้ไม่ได้รวมผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความจุ ผลการจำลองจึงมีความคลาดเคลื่อนดังแสดงในรูปที่ 3-12 นอกจากนี้แล้วการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ยังมีความยุ่งยากซับซ้อนอีกด้วย



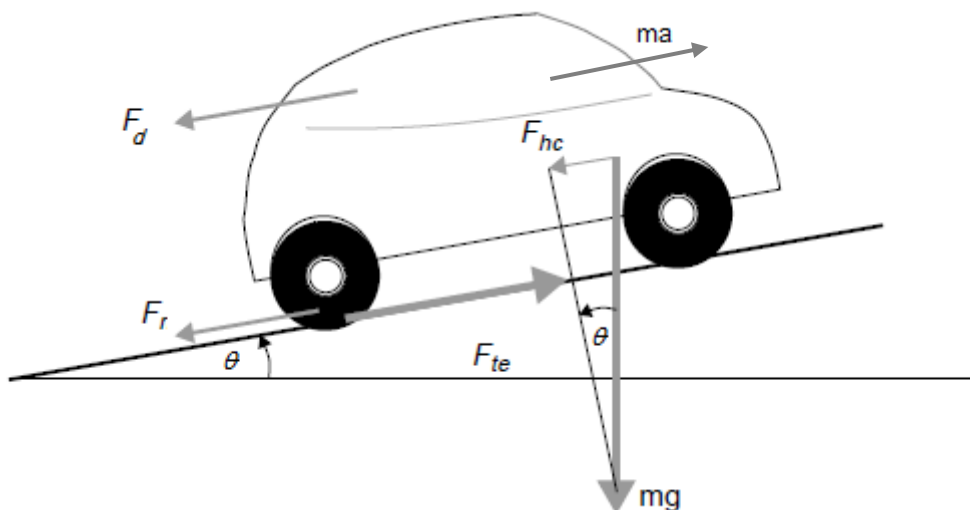
รูปที่ 3-12 การเปรียบเทียบผลการจำลองระดับการประจุของแบบจำลองแบบความต้านทานภายในและแบบจำลองโดยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ กับผลการทดสอบจริง

### 3.2.2.9 แบบจำลองมูลฐาน (Fundamental model)

แบบจำลองมูลฐานเป็นแบบจำลองที่จำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้จะเป็นพารามิเตอร์มูลฐาน ซึ่งไม่สามารถหาได้จากการทดสอบ เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทประจุของแผ่นแคโทด ความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น [15,17] แบบจำลองชนิดนี้จึงไม่เหมาะสมที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์มูลฐานนั้นทำได้ยาก ไม่สามารถหาได้จากการวัด และมีการคำนวณที่ซับซ้อน

### 3.2.3 แบบจำลองภาระการขับเคลื่อนของรถยนต์ (Road load, Tractive effort)

รถยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนสามารถชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ (Road load) ได้ ซึ่งแรงต้านทานการเคลื่อนที่นั้นจะประกอบด้วย แรงต้านทานการกลิ้งของล้อ (Rolling resistance force) แรงต้านทานการไหลของอากาศ (Aerodynamic drag force) แรงที่ใช้ในการขึ้นทางชัน (Hill climbing force) และแรงเนื่องจากความเร่ง (Acceleration force) ดังแสดงในรูปที่ 3-13



รูปที่ 3-13 Free body diagram ของแรงที่กระทำกับรถยนต์

### 3.2.3.1 แรงต้านทานการกลิ้ง (Rolling resistance force)

แรงต้านทานการกลิ้งจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดรูปของยางที่ล้อเมื่อเกิดการสัมผัสกับพื้นถนนขณะหมุน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-7

$$F_r = C_r mg \quad (3-7)$$

เมื่อ	$F_r$	คือ	แรงต้านทานการกลิ้ง (N)
	$C_r$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง จะขึ้นอยู่กับชนิดของยางรถยนต์ และชนิดของผิวถนน
	$m$	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักที่บรรทุก (kg)
	$g$	คือ	ความเร่งสู่ศูนย์กลาง ( $m/s^2$ )

### 3.2.3.2 แรงต้านทานอากาศ (Aerodynamic drag force)

แรงต้านทานอากาศนั้นเกิดจากการที่อากาศเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของรถยนต์ โดยจะมีค่าขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถ และความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านซึ่งจะมีค่าประมาณความเร็วของรถ แรงต้านทานอากาศสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3-8

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 \quad (3-8)$$

เมื่อ	$F_d$	คือ	แรงต้านอากาศ (N)
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
	$C_d$	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ (Aerodynamic drag coefficient)
	$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ ( $m^2$ )
	$V$	คือ	ความเร็วของรถยนต์ (m/s)

### 3.2.3.3 แรงที่เกิดจากทางลาดชัน (Hill climbing force)

ขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ขึ้นทางชัน จะมีแรงเกิดขึ้นเนื่องจากความชันของถนนในทิศตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 4-1 แต่เมื่อรถยนต์เคลื่อนที่ลงทางชัน แรงที่เกิดขึ้นจากทางลาดชันจะมีทิศเดียวกันกับการเคลื่อนที่ แรงที่เกิดจากทางลาดชันสามารถแทนด้วยสมการที่ 3-9

$$F_{hc} = mgsin(\theta) \quad (3-9)$$

เมื่อ	$F_{hc}$	คือ	แรงที่เกิดจากทางลาดชัน (N)
	$m$	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักที่บรรทุก (kg)
	$g$	คือ	ความเร่งสู่ศูนย์กลาง ( $m/s^2$ )
	$\theta$	คือ	มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

แต่เนื่องจากโครงการนี้สนใจเฉพาะกรณีการขับขึ้นรถยนต์บนพื้นราบเท่านั้น ค่ามุมความลาดเอียงของพื้นถนนเป็นศูนย์ จึงไม่นำแรงในการขึ้นทางชันมาคิด

### 3.2.3.4 แรงเนื่องจากความเร่ง (Acceleration force)

เมื่อความเร็วของรถเกิดการเปลี่ยนแปลง รถจะมีความเร่งเกิดขึ้น ซึ่งจะมีทั้งความเร่งเชิงเส้นและความเร่งเชิงมุม โดยแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเร่งเชิงเส้น (Linear acceleration force) นั้นจะเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ดังสมการที่ 3-10

$$F_{la} = ma \quad (3-10)$$

เมื่อ	$F_{la}$	คือ	แรงเนื่องจากความเร่งเชิงเส้น (N)
	$m$	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักที่บรรทุก (kg)
	$a$	คือ	ความเร่งของรถยนต์ ( $m/s^2$ )

ส่วนแรงเนื่องจากความเร่งเชิงมุม (Angular acceleration force) นั้นเกิดจากส่วนต่างๆ ของรถยนต์ที่มีการหมุน ได้แก่ แกนหมุนของมอเตอร์ และล้อรถยนต์ ซึ่งเป็นดังสมการที่ 3-11

$$F_{wa} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (3-11)$$



เมื่อ	$F_{wa}$	คือ	แรงเนื่องจากความเร่งเชิงมุม (N)
	$I$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ (Moment of inertia of the rotor, kg-m <sup>2</sup> )
	$G$	คือ	อัตราทดของระบบส่งกำลัง (Gear ratio)
	$r$	คือ	รัศมีของล้อรถยนต์ (m)
	$a$	คือ	ความเร่งของรถยนต์ (m/s <sup>2</sup> )

แต่เนื่องจากการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์นั้นซับซ้อนและทำได้ยาก จึงประมาณแรงเนื่องจากความเร่งเชิงมุมด้วยการเพิ่มมวลของรถอีก 5 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ภาระการขับเคลื่อนของรถยนต์รวมทั้งหมด (Total tractive effort,  $F_{te}$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-12

$$F_{te} = F_r + F_d + F_{hc} + F_{la} + F_{wa} \quad (3-12)$$

## บทที่ 4

### การออกแบบแบบจำลองระบบขับเคลื่อน

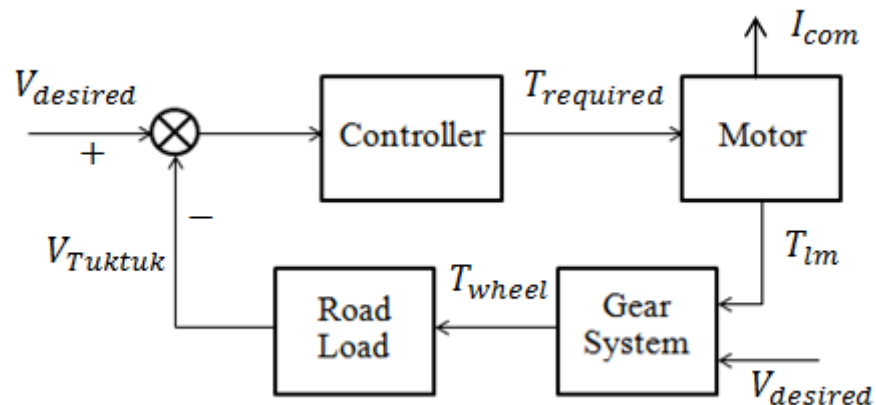
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ วิธีคิดและวิธีคำนวณของแบบจำลอง โดยในเบื้องต้นนั้นการออกแบบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณนั้นจะอ้างอิงจากรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (รถสามล้อไฟฟ้า) รุ่น QQ T1

#### 4.1 ขั้นตอนการออกแบบ

แนวทางการออกแบบนั้นเริ่มจากการแบ่งแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้านั้น ออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ Traction Model และ Energy Storage Model โดยในส่วนของ Traction model นั้น จะประกอบด้วยระบบย่อย คือ มอเตอร์ ระบบควบคุม ระบบส่งกำลัง และ Road load ส่วน Energy storage model จะประกอบด้วยแบบจำลองย่อย คือ แบตเตอรี่ แบบจำลองทั้งหมด จะสร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

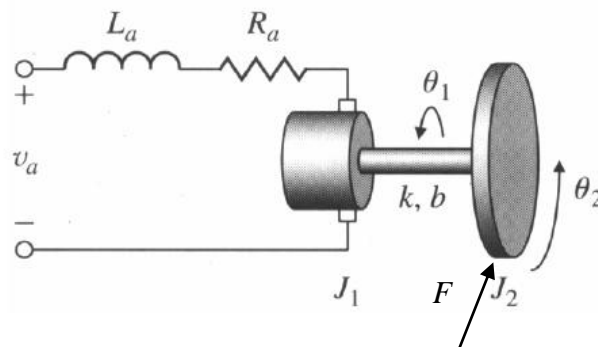
##### 4.1.1 Traction Model

Traction Model เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างกำลังงานเพื่อให้รถยนต์ไฟฟ้าสามารถเอาชนะภาระการขับเคลื่อน แบบจำลองในส่วนนี้มีแผนภาพไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4-1 จะเห็นว่าสัญญาณเข้าสู่ระบบ (Input) คือ วัฏจักรขับทดสอบของกรุงเทพฯ หรือความเร็วของรถที่ต้องการ จากนั้นระบบควบคุม ซึ่งในที่นี้ใช้ PID เป็น Control Law ทำหน้าที่คำนวณหาแรงบิดที่ต้องการ ( $T_{required}$ ) เพื่อสั่งมอเตอร์ให้สร้างแรงบิดที่สามารถเอาชนะภาระการขับเคลื่อนได้ ( $T_{lm}$ ) จากนั้นระบบส่งกำลังจะปรับแรงบิดให้เหมาะสมกับอัตราทดของเกียร์ที่ความเร็วนั้นๆ เพื่อมาคำนวณในส่วนของภาระการขับเคลื่อน และจะได้สัญญาณออกจากระบบ (Output) เป็นความเร็วของรถที่วิ่ง นอกจากนี้แล้วในส่วนของมอเตอร์จะสามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างแรงบิด เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานในแบบจำลองแบตเตอรี่ต่อไป รายละเอียดแบบจำลองของระบบย่อยแต่ละระบบมีดังนี้



รูปที่ 4-1 แผนภาพไดอะแกรมของ Traction Model

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจำลองได้ดังรูปที่ 4-2 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของแกนมอเตอร์กระแสตรง (Dynamic model of DC motor) นั้นสามารถแบ่งได้เป็นสมการทางกล (Mechanical equation) และสมการทางไฟฟ้า (Electrical equation)



รูปที่ 4-2 แผนภาพไดอะแกรมของมอเตอร์ [11]

การควบคุมแรงบิดของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และสามารถจำลองการทำงานของมอเตอร์ได้ดังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

เนื่องจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นนั้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 4-1

$$T_m = K_i i \quad (4-1)$$

เมื่อ  $T_m$  คือ แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น (Nm)

$K_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque constant, Nm/amp)

เมื่อมอเตอร์มีภาระติดตั้งอยู่ สามารถจำลองการทำงานได้ดังนี้

$$T_m - T_1 = J_m \dot{\omega}_m \quad (4-2)$$

เมื่อ  $J_m$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ( $\text{kg/m}^2$ )

$\dot{\omega}_m$  คือ อัตราเร่งเชิงมุมของมอเตอร์

$T_1$  คือ แรงบิดที่ต้านการทำงานของมอเตอร์

เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำที่ล้อ โดยสมมติให้ล้อมีมวลน้อยมาก จะได้สมการโมเมนต์ดังนี้

$$\sum M = I\alpha \quad m \approx 0 \rightarrow I \approx 0 \quad (4-3)$$

$$Fr = NT_1 \quad (4-4)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงลัพท์ที่กระทำที่ล้อ

$N$  คือ อัตราทดของระบบส่งกำลัง

แทนค่า  $T_1$  จากสมการที่ (4-2) จะได้

$$Fr = N(T_m - J_m \dot{\omega}_m) \quad (4-5)$$

แบบจำลองภาระการขับเคลื่อนของรถยนต์ (Road load)

รถยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนสามารถชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ (Road load) ได้ ซึ่งแรงต้านทานการเคลื่อนที่นั้นจะประกอบด้วย แรงต้านทานการกลิ้งของล้อ (Rolling resistance force) แรงต้านทานการไหลของอากาศ (Aerodynamic drag force) แรงที่ใช้ในการขึ้นทางชัน (Hill climbing force) และแรงเนื่องจากความเร่ง (Acceleration force) จากแรงทั้งหมดสามารถคำนวณหาแรงลัพท์ได้ดังสมการที่ 4-5

$$F = mr\dot{\omega}_L + C_r mg + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (4-6)$$

เมื่อ  $C_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการกลิ้ง

$m$	คือ	มวลรวมของรถและน้ำหนักที่บรรทุก (kg)
$g$	คือ	ความเร่งสู่ศูนย์กลาง ( $m/s^2$ )
$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
$C_d$	คือ	สัมประสิทธิ์ความต้านทานอากาศ (Aerodynamic drag coefficient)
$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ ( $m^2$ )
$V$	คือ	ความเร็วของรถยนต์ ( $m/s$ )
$a$	คือ	ความเร่งของรถยนต์ ( $m/s^2$ )
$r$	คือ	รัศมีของล้อรถยนต์ (m)

#### ระบบส่งกำลัง (Transmission)

แบบจำลองของระบบส่งกำลังจะประกอบด้วย 5 อัตราทด เป็นอัตราทดเกียร์ไปข้างหน้า 4 อัตราทด และอัตราทดเกียร์ถอยหลัง 1 อัตราทด ซึ่งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มแรงบิดที่ล้อได้ดังสมการที่ 4-7 และ 4-8

$$T_L = N_i T_{Lm} \quad (4-7)$$

$$\dot{\omega}_m = N_i \dot{\omega}_L \quad (4-8)$$

เมื่อ	$N_i$	คือ	อัตราทดรวมที่ความเร็วต่างๆ
	$\dot{\omega}_L$	คือ	อัตราเร็วเชิงมุมของล้อ

เมื่อแทนสมการที่ (4-6) ลงในสมการที่ (4-5) และจัดรูปสมการ จะได้

$$mr^2 \dot{\omega}_L + C_r mgr + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 r = n(T_m - J_m n \dot{\omega}_L) \quad (4-9)$$

$$(mr^2 + J_m n^2) \dot{\omega}_L = nT_m - C_r mgr - \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 r \quad (4-10)$$

โดยที่	$J_e = mr^2 + J_m N^2$	(4-11)
--------	------------------------	--------

เมื่อ	$J_e$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยรวม ( $kg/m^2$ )
-------	-------	-----	-----------------------------------

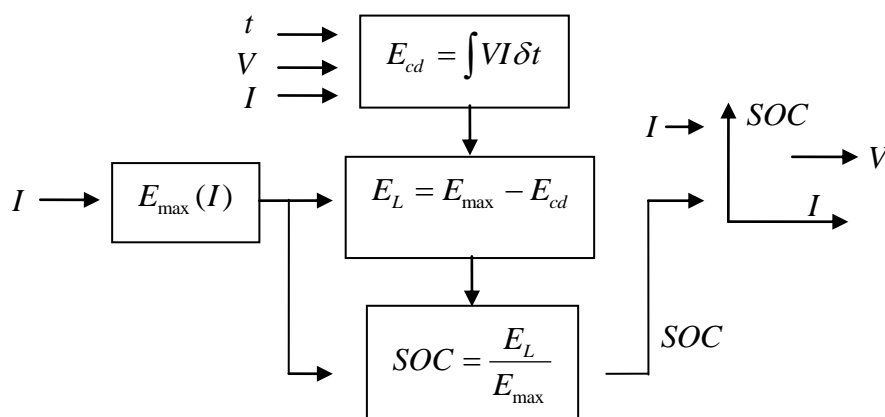
$J_m$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของของมอเตอร์ ( $\text{kg/m}^2$ )

จากสมการที่ (4-10) และ (4-11) สามารถจัดรูปใหม่ จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนที่ทำหน้าที่สร้างกำลังงานเพื่อให้รถยนต์ไฟฟ้าสามารถเอาชนะภาระการขับเคลื่อน โดยจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราเร่งเชิงมุม ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น  $\dot{\omega}_L = f(T_m)$  ได้ดังสมการที่ 4-8

$$\dot{\omega}_L = \frac{1}{J_e} \left( nT_m - C_r m g r - \frac{1}{2} \rho C_d A \omega_L^2 r^2 \right) \quad (4-8)$$

#### 4.1.2 Energy Storage Model

ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน (Energy Storage) ในที่นี้คือ แบตเตอรี่ โดยพิจารณาเลือกใช้แบบจำลองแบบความต้านทานภายในและใช้หลักการคำนวณในลักษณะคล้ายกับ New dynamic battery model ของ Dürr [10] โดยค่าความต้านทานภายในจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับระดับการประจุและอุณหภูมิ  $R_i = f(SOC, T)$  ส่วนแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามระดับการประจุ  $V_{OC} = f(SOC)$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับพลังงานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ เนื่องจากความสัมพันธ์ของความต้านทานต่อระดับการประจุและอุณหภูมิ จะต้องหาจากการทดลอง ซึ่งมีความซับซ้อนมาก จึงเปลี่ยนแบบจำลองเป็นการหาความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและระดับการประจุของแบตเตอรี่  $V = f(I, SOC)$  แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองแบตเตอรี่นี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 แผนภาพไดอะแกรมของแบบจำลองแบตเตอรี่

จากรูปที่ 4-3 จะเห็นว่าแบบจำลองมีสัญญาณที่เข้าสู่ระบบคือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายและ แรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่าย กระแสไฟฟ้าที่จ่ายนี้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาพลังงานสูงสุดที่ แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ ( $E_{\max}$ ) โดยสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง  $I$  กับ  $E_{\max}$  ส่วน พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายไปนั้นจะคำนวณได้จากสมการที่ (4-9)

$$E_{cd} = \int VI \delta t \quad (4-9)$$

เมื่อ	$E_{cd}$	คือ	พลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายไป (J)
	$V$	คือ	แรงดันไฟฟ้า (Volt)
	$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่จ่าย (A)
	$t$	คือ	เวลา (s)

จากนั้นก็จะสามารถคำนวณหาพลังงานที่เหลือในแบตเตอรี่ได้จากสมการที่ (4-10)

$$E_L = E_{\max} - E_{cd} \quad (4-10)$$

เมื่อ	$E_L$	คือ	พลังงานที่เหลือในแบตเตอรี่
-------	-------	-----	----------------------------

หลังจากนั้นระดับการประจุจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-11)

$$SOC = \frac{E_L}{E_{\max}} \quad (4-11)$$

แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาอัตราการใช้พลังงาน ได้โดยตรง และใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานภายในที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งขึ้นกับ แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรได้ดังสมการที่ 4-10 ส่วนรายละเอียดการทดสอบแบตเตอรี่นั้นจะ กล่าวในบทที่ 5

$$R_i = R \frac{(V_{oc} - V)}{V} \quad (4-10)$$

เมื่อ	$R_i$	คือ	ความต้านทานภายใน (โอห์ม)
	$R$	คือ	ความต้านทานภายนอก (โอห์ม)
	$V_{oc}$	คือ	แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Volt)

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)

#### 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

เนื่องจากในเบื้องต้นนี้ การออกแบบและการทดสอบต่างๆ จะใช้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า รุ่น QQT1 ดังนั้นพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองนี้จึงอ้างอิงจากรถดังกล่าว โดยแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ

Parameter	Description	Values
$C_r$	Rolling resistance coefficient	0.012
$m$	Total mass ( 3 passengers)	794.6 kg
$\rho$	Density of dry air	1.21 kg/m <sup>3</sup>
$C_d A$	Drag coefficient times frontal area	1.75 m <sup>2</sup>
$r$	Tire radius	30 cm
$N_i$	1st Gear ratio	21
	2nd Gear ratio	12
	3rd Gear ratio	9
	4th Gear ratio	6
	Reverse Gear ratio	21
$K$	Torque constant	0.175458 Nm/A
$J$	Moment of inertia of motor	0.0045 kg/m <sup>2</sup>
$n$	No. of battery	6 cells
$C_p$	Capacity of battery	60 Ah

ส่วนมอเตอร์ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้านั้นจะเป็นมอเตอร์แบบ Brushless dc motor รุ่น PMAC-DS (ME0913) ของ Motenergy (MARS) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ 4-2 และตารางที่ 4-3



ตารางที่ 4-2 Motor Electrical Parameters รุ่น PMAC-DS (ME0913)

Electrical Parameter	Unit	Parameter
Operating Voltage Range	VAC	0 minimum to 72 maximum
Rated Continuous Current	Arms	180
Peak Phase Current	Arms	550
No Load Current ( $I_{NL}$ )	Arms	Dependent on the motor control
Peak Stalled Current	Arms	550
Continuous Current	Arms	180 minimum
Voltage Constant	RPM/V	50 (DC input current to a motor controller)
Back EMF Constant ( $K_E$ )		
Phase Resistance (L-L)	Ohm	0.0125
Coil Connection	n/a	Y, non-grounded
Phase Turns	Turns	28
Phase Inductance	uH	110 at 1kHz 105 at 120Hz

ตารางที่ 4-3 Motor Mechanical Parameters รุ่น PMAC-DS (ME0913)

Mechanical Parameter	Unit	Parameter
Rated Speed	RPM	3000
Maximum Speed	RPM	5000
Rated Torque	Lb-in	288
Peak Stalled Torque	Ft Lb	70 (94 Nm)
Continuous Stalled Torque	Lb-in	288
Torque Constant	Lb-in/A	1.6 (DC input current to a motor controller)
Operating Ambient Temperature	C	-40 to 40
Motor Winding Insulation	Class	F
Abs. Winding Allowable Temperature	C	155
Max. Winding Operating Temperature	C	145
Thermal Impedance	Rth	n/a
Thermal Time Constant	Tth	n/a
Shaft Configuration		See Drawing
Face Mounting Details		See Drawing
Tightening Torque for Terminals		See Drawing
Weight	lb	39
Direction of Rotation	I	Bi-directional fan
Storage Temperature	C	-30 to 150

สำหรับแบตเตอรี่ของรถตักไฟฟ้า นั้น จะเป็นแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่ว ของ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA (AGM) ซึ่งมีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ 4-4 และตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-4 Specification ของแบตเตอรี่ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA (AGM)

specification		
Nominal voltage	12V	
Nominal capacity	60Ah	
Dimensions	Length	388mm
	Width	116mm
	Height	175mm
Weight	About21kg	

ตารางที่ 4-5 Characteristics ของแบตเตอรี่ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA (AGM)

Characteristics		
Capacity 25°C	1/3C (20A)	52Ah
	1C(60A)	43Ah
	3C (180A)	34Ah
Internal resistance 25°C	At full charge	About3.5mΩ
Temperature dependence on capacity (1/3C)	45°C	111%
	25°C	100%
	0°C	84%
Self-discharge 25°C	Remain capacity after 3month storage	91%

## บทที่ 5

### การทดสอบและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และการตรวจสอบแบบจำลองแบตเตอรี่ รวมถึงการทดสอบบรรทัดๆไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

#### 5.1 การทดสอบแบตเตอรี่

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ว่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองแบตเตอรี่นั้น จะสามารถหาได้จากการทดลองเท่านั้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์และพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในแบตเตอรี่ การทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์จะกำหนดให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยใช้เครื่อง Electronic Load PLZ-4W ทำหน้าที่ในการดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ และใช้อุปกรณ์ Data acquisition NI USB-6251 ทำหน้าที่เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงเวลาที่จ่ายกระแสไฟฟ้า จนกระทั่งค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Cut off voltage) ที่ทางผู้ผลิตแนะนำจึงตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่ยังคงเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแบตเตอรี่เข้าสู่ภาวะสมดุล แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าคงที่และเป็นแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร จากนั้นทำการทดสอบซ้ำแต่เปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่าย ในการทดสอบนี้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายจะใช้ค่า 0.1C, 0.3C, 0.5C, 1C, 1.5C, 2C, 2.5C และ 3C ส่วนแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ในการทดสอบเป็นแบตเตอรี่ของ Panasonic รุ่น EC-FV1260 VRLA(AGM) ขนาด 12V 60AH ซึ่งมีลักษณะเฉพาะดังตารางที่ 4-4 และตารางที่ 4-5 ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่นั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ดังแสดงในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

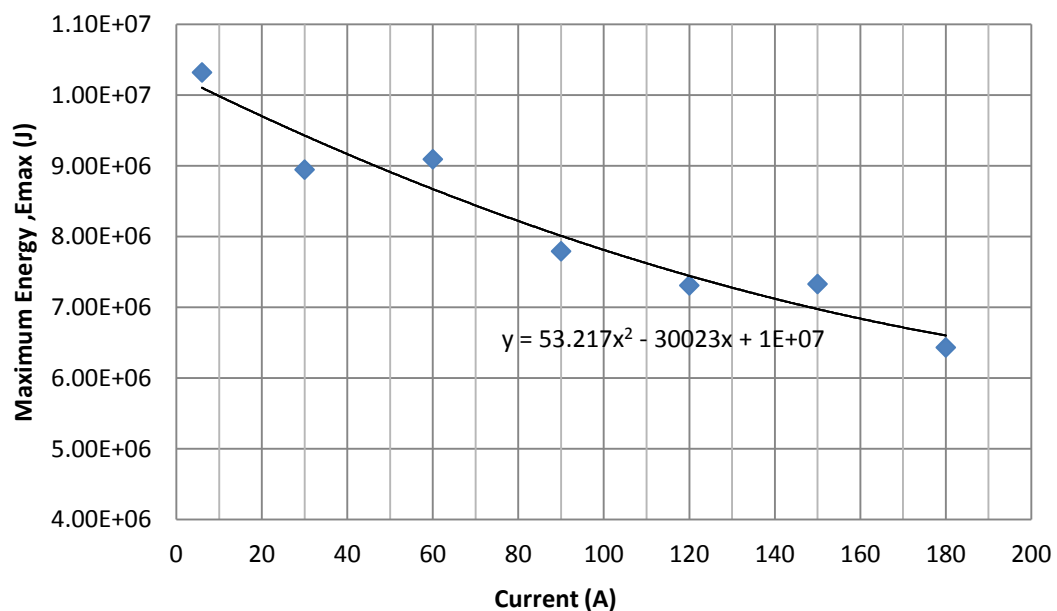
กระแสไฟฟ้าที่จ่าย	3A - 20A	20A - 60A	60A - 360A
ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (volt)	9.9	10.65 - 0.0375*i	8.4

จากงานวิจัยของ Dürr และคณะ [10] ที่กล่าวว่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรกับระดับการประจุของแบตเตอรี่แบบน้ำกรด-ตะกั่วมีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเชิงเส้น ดังนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงสามารถหาได้จากแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรขณะประจุเต็มกับแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรขณะคายประจุหมด ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรขณะคายประจุหมดนี้นิยมโดยการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรหลังจากที่จ่ายกระแสไฟฟ้าจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าลดลงถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด

## 5.2 ผลการทดสอบแบตเตอรี่

จากการทดสอบแบตเตอรี่ เมื่ออินทิเกรตผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายกับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการทดสอบ จะสามารถหาพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ และเมื่อพลอตกราฟระหว่างพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้กับค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายดังแสดงในรูปที่ 5-1

### Maximum energy vs. Discharge current

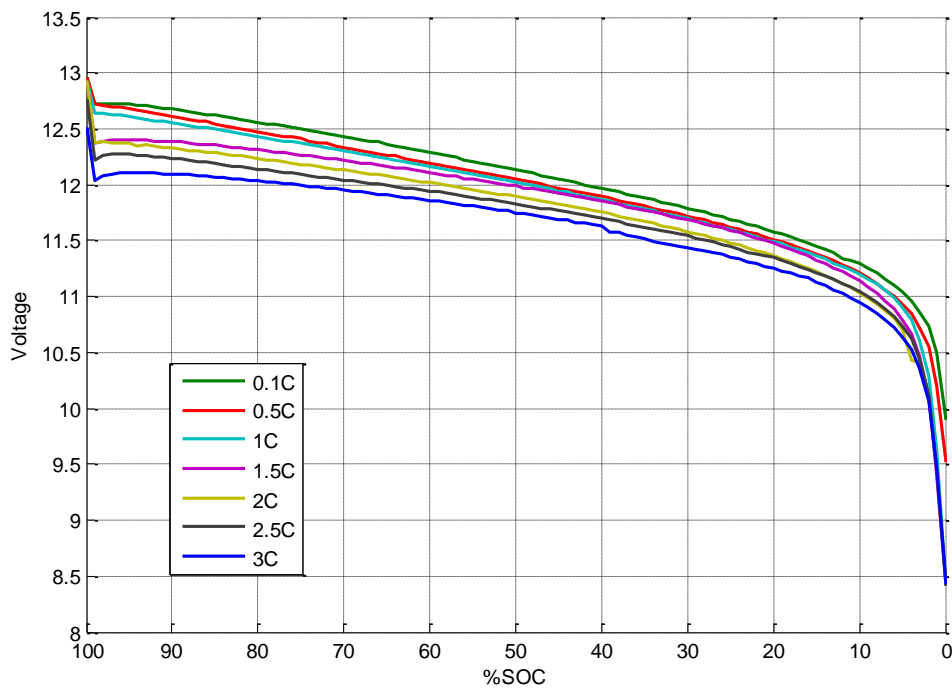


รูปที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสูงสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

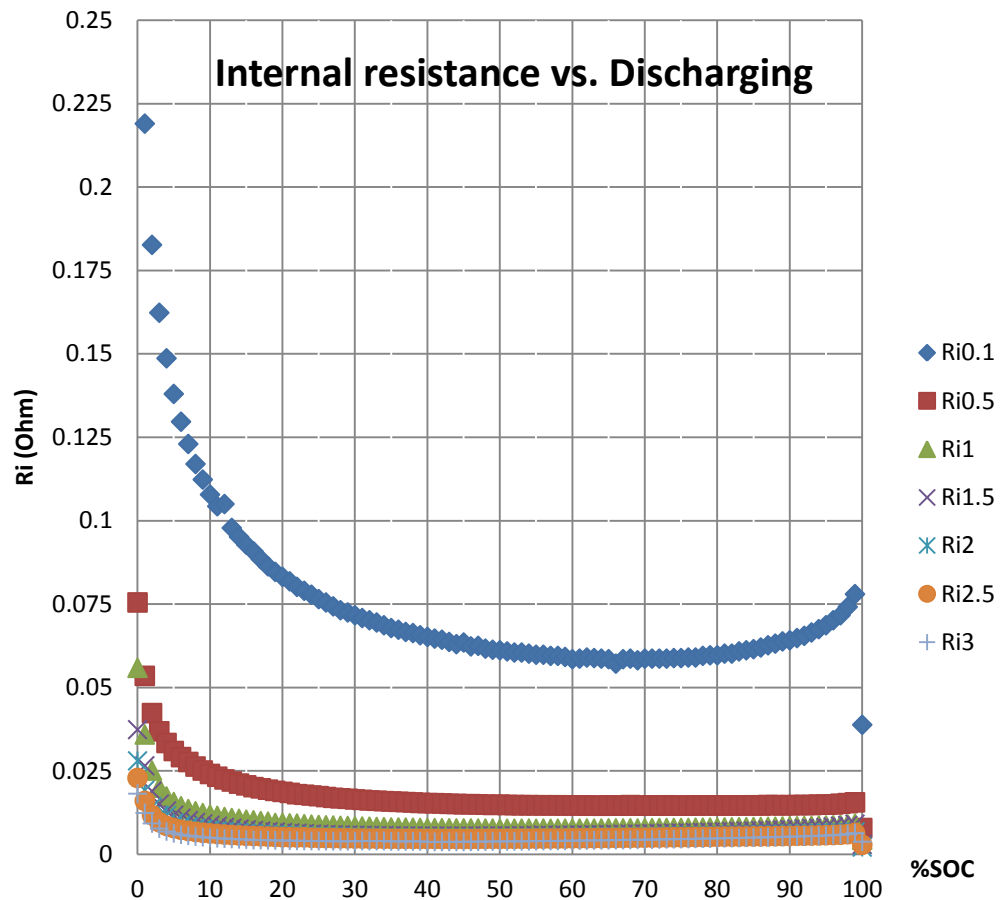
จากรูปที่ 5-1 จะได้สมการความสัมพันธ์ของพลังงานสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถให้ได้กับการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ดังสมการที่ 5-1

$$E_{\max} = 53.217I^2 - 30023I + 10^7 \quad (5-1)$$

ส่วนความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและระดับการประจุที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ จะแสดงดังรูปที่ 5-2 ซึ่งสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้านี้ไปใช้ในแบบจำลองได้โดยตรงเพื่อคำนวณหาพลังงานที่แบตเตอรี่ใช้ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและระดับการประจุสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-2 จากค่าแรงดันไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรนี้จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาความต้านทานภายในที่เปลี่ยนแปลงไปต่อระดับการประจุได้จากสมการที่ 4-10 ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-3

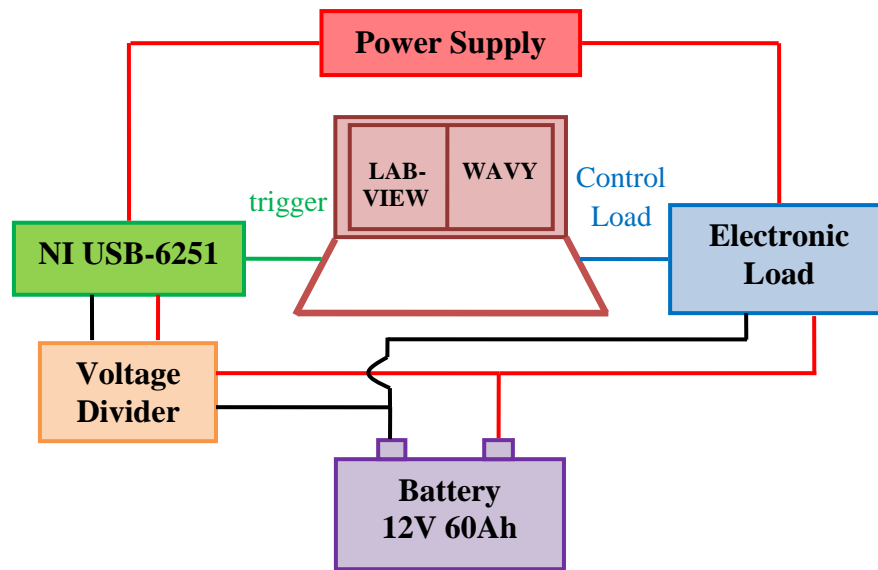


รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าต่อค่ากระแสไฟฟ้าและระดับการประจุ



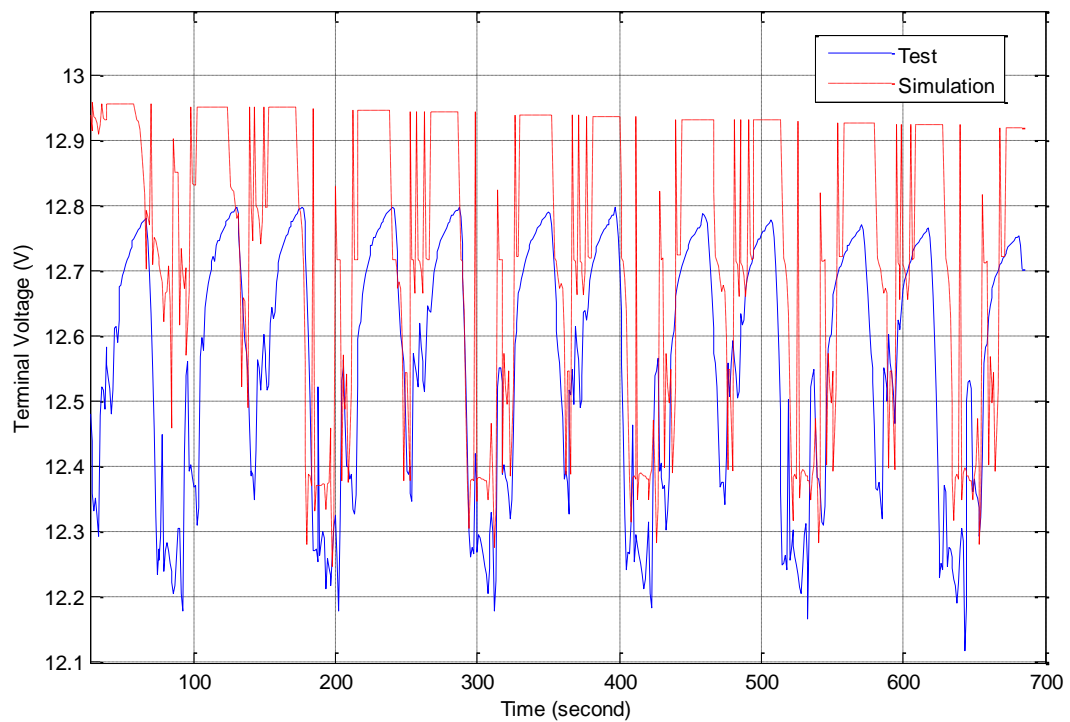
รูปที่ 5-3 ค่าความต้านทานภายในต่อค่าแรงดันไฟฟ้าและระดับการประจุ

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบตเตอรี่นั้น จะทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม WAVY ทำหน้าที่ควบคุมเครื่อง Electronic Load PLZ-4W ให้ดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่แบบเป็นวัฏจักร โดยวัฏจักรของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นวัฏจักรการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการชั่งทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายจะถูกบันทึกด้วย NI USB-6251 และส่งข้อมูลไปเก็บยังคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มีค่าสูงเกินสัญญาณที่อุปกรณ์ NI USB-6251 สามารถรับได้ คือ สามารถรับสัญญาณได้ในช่วง  $\pm 10$  V จึงต้องมี Voltage divider ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าให้มีค่าลดลงอยู่ในช่วงที่อุปกรณ์สามารถรับได้ จากนั้นสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ โดยแผนภาพไดอะแกรมการทดสอบแบตเตอรี่จะแสดงดังรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 แผนภาพไดอะแกรมการทดสอบความถูกต้องของแบตเตอรี่

ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ  
นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-5



รูปที่ 5-5 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ

จากรูปที่ 5-5 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะเห็นว่าในวัฏจักรแรกนั้น ช่วงที่มีการดึงกระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองจะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ เพราะในช่วงแรกนั้น การคำนวณของแบบจำลองแบบเตอริจะคิดให้ระดับการประจุเต็ม จึงทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่ามาก แต่เมื่อเข้าสู่วัฏจักรที่สองนั้นระดับการประจุเริ่มลดลงจึงทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองมีค่าลดลงมากขึ้นและสอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบ ส่วนในช่วงที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้านั้นจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนและความผิดพลาดอยู่ในทุกช่วง เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ว แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรของแบบเตอริจะต้องใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุล แต่สำหรับแบบจำลองนั้นแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรจะเข้าสู่ภาวะสมดุลอย่างทันทีทันใด จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในช่วงเวลาดังกล่าว จากผลการทดสอบจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองแบบเตอริ สามารถจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของแบบเตอริได้ใกล้เคียงกับการทำงานจริง แต่ยังคงมีความผิดพลาดในช่วงที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า พร้อมทั้งสามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานภายใน แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรต่อระดับการประจุที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ

### 5.3 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

ก่อนที่จะนำแบบจำลองไปใช้ในการทำนายอัตราการใช้พลังงานรถยนต์ไฟฟ้าจะต้องมีการสอบทวนความถูกต้องของแบบจำลองเสียก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองสามารถจำลองการทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในการสอบทวนนั้นจะดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลของความเร็วจากแบบจำลองกับความเร็วจากการทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบในส่วนของ Traction Model และเปรียบเทียบผลของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับกำลังไฟฟ้าจากการทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบแบบจำลองทั้งระบบ ส่วนการสอบทวนแบบจำลองแบบเตอรินี้ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.2

#### 5.3.1 การทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

จากที่เคยกล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้จะใช้รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในการทดสอบแทนการใช้รถยนต์ไฟฟ้า เพราะเป็นรถขนาดเล็ก และเป็นรถที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับการจราจรในกรุงเทพฯ การ



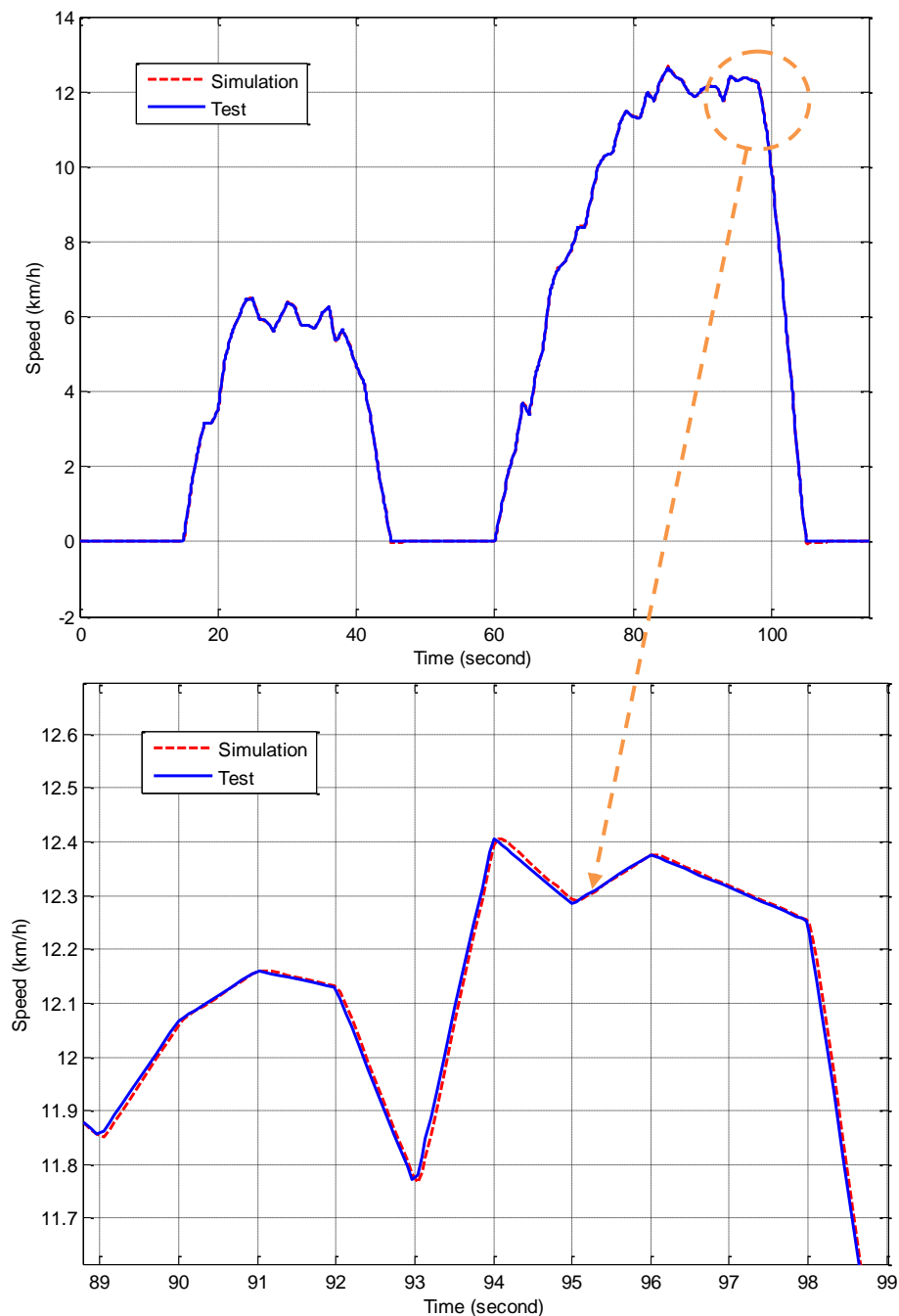
ทดสอบนั้นจะดำเนินการโดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดบนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า เพื่อวัดค่าความเร็วของรถ ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นจะกล่าวไว้ในส่วนของภาคผนวก ก. จากนั้นนำรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าไปขับทดสอบจริงพร้อมทั้งเก็บข้อมูลดังกล่าวด้วยโปรแกรม LogWorks3 โดยสถานที่ที่ใช้ในการขับทดสอบนั้น คือ บริเวณถนนอังรีดูนังต์ ซึ่งเป็นถนนที่ราบตลอดเส้นทาง จึงสอดคล้องกับเงื่อนไขของงานวิจัยที่สนใจเฉพาะการเคลื่อนที่ในทางตรงบนพื้นราบเท่านั้น

### 5.3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองกับการขับทดสอบจริง

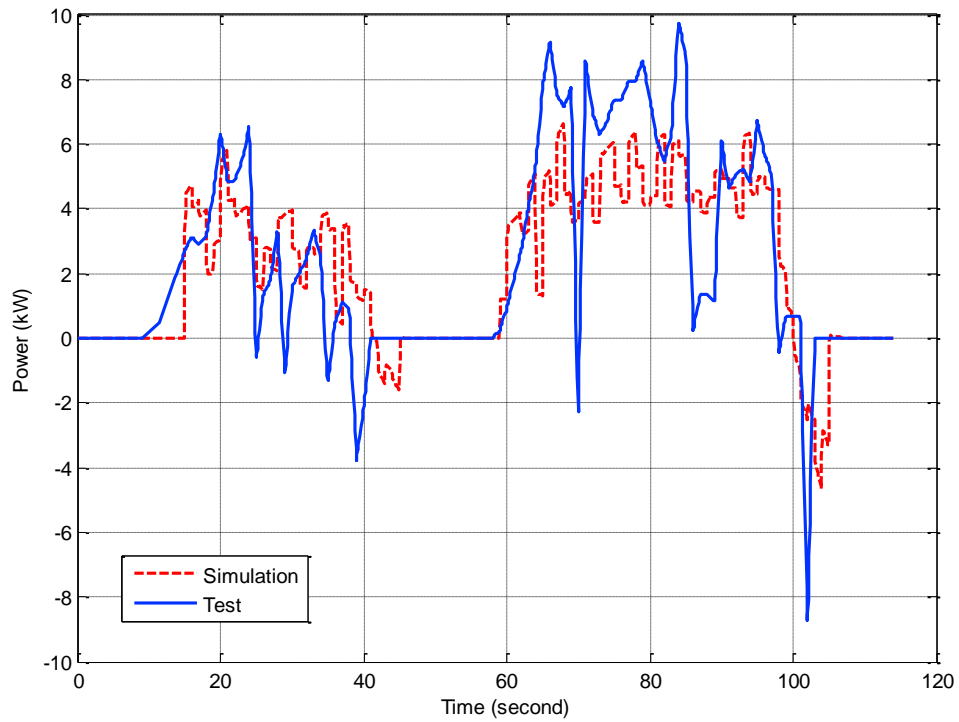
ข้อมูลความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าจากการขับทดสอบจริงนั้นจะถูกนำมาใช้เป็นตัวจักรความเร็ว หรือเป็นความเร็วที่ต้องการให้รถยนต์ไฟฟ้าสามารถขับขึ้นได้ เพื่อเป็นสัญญาณขาเข้าของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ต้องการควบคุมความเร็วของรถยนต์ไฟฟ้าให้เป็นตามที่ต้องการ แล้วคำนวณว่าพลังงานที่แบตเตอรี่ถูกใช้ไปทั้งหมดเป็นเท่าไร จากการเปรียบเทียบผลของความเร็วจากแบบจำลองกับความเร็วจากการขับทดสอบพบว่า ความเร็วทั้งสองมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงและสอดคล้องกันมาก โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.37% ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5-6 โดยเส้นประสีแดงแทนความเร็วจากแบบจำลอง ส่วนเส้นทึบสีน้ำเงินแทนความเร็วจากการขับทดสอบจริง

เมื่อเปรียบเทียบผลของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับกำลังไฟฟ้าจากการขับทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5-7 โดยกำลังไฟฟ้าจากการขับทดสอบนั้นสามารถคำนวณได้จากผลคูณของข้อมูลกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เก็บจากการขับทดสอบ จะเห็นว่ากราฟเส้นประสีแดงที่แทนกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับกราฟเส้นทึบสีน้ำเงินที่แทนกำลังไฟฟ้าจากการขับทดสอบจริงในช่วงความเร็วต่ำนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ยังคงมีความแตกต่างกันอยู่โดยเฉพาะช่วงที่มีการ Regenerative การขับทดสอบจริงมีการดึงพลังงานกลับมาเก็บในแบตเตอรี่มากกว่าแบบจำลอง ส่วนในช่วงที่ความเร็วสูงขึ้นจะเห็นว่ายังมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจากในการขับทดสอบจริงอาจมีแรงเสียดทานที่ไม่ทราบค่าและไม่ได้นำมารวมในการคำนวณด้วย ได้แก่ แรงเสียดทานที่เกิดจากชิ้นส่วนของรถยนต์ที่มีการหมุน เช่น ชุดเฟืองของระบบส่งกำลัง เพลา โรเตอร์ของมอเตอร์ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า TTQ1 นี้เป็นรถไฟฟ้าที่มีหลายอัตราทด ซึ่ง

ในขณะที่ขับรถทดสอบนั้น การเปลี่ยนอัตราทดจะขึ้นอยู่กับความตั้งใจของผู้ขับที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณของแบบจำลอง ทำให้ค่าแรงบิดจากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการขับรถทดสอบจริง ซึ่งค่าแรงบิดนี้จะใช้ในการคำนวณหากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่าย เพื่อไปคำนวณหากำลังที่แบตเตอรี่ใช้ในแต่ละวินาที จึงทำให้ผลของกำลังไฟฟ้าจากการขับรถทดสอบสูงกว่าผลการคำนวณจากแบบจำลอง



รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบผลความเร็วจากแบบจำลองกับความเร็วจากการขับรถทดสอบ



รูปที่ 5-7 การเปรียบเทียบผลของกำลังไฟฟ้าจากแบบจำลองกับกำลังไฟฟ้าจากการขั้ทดสอบ

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำลองความเร็วในการขั้ของระบบขั้เคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขั้ขึ้นนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ แต่ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

## บทที่ 6

### การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

#### การกำหนดขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงการกำหนดขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการจราจรในกรุงเทพฯ

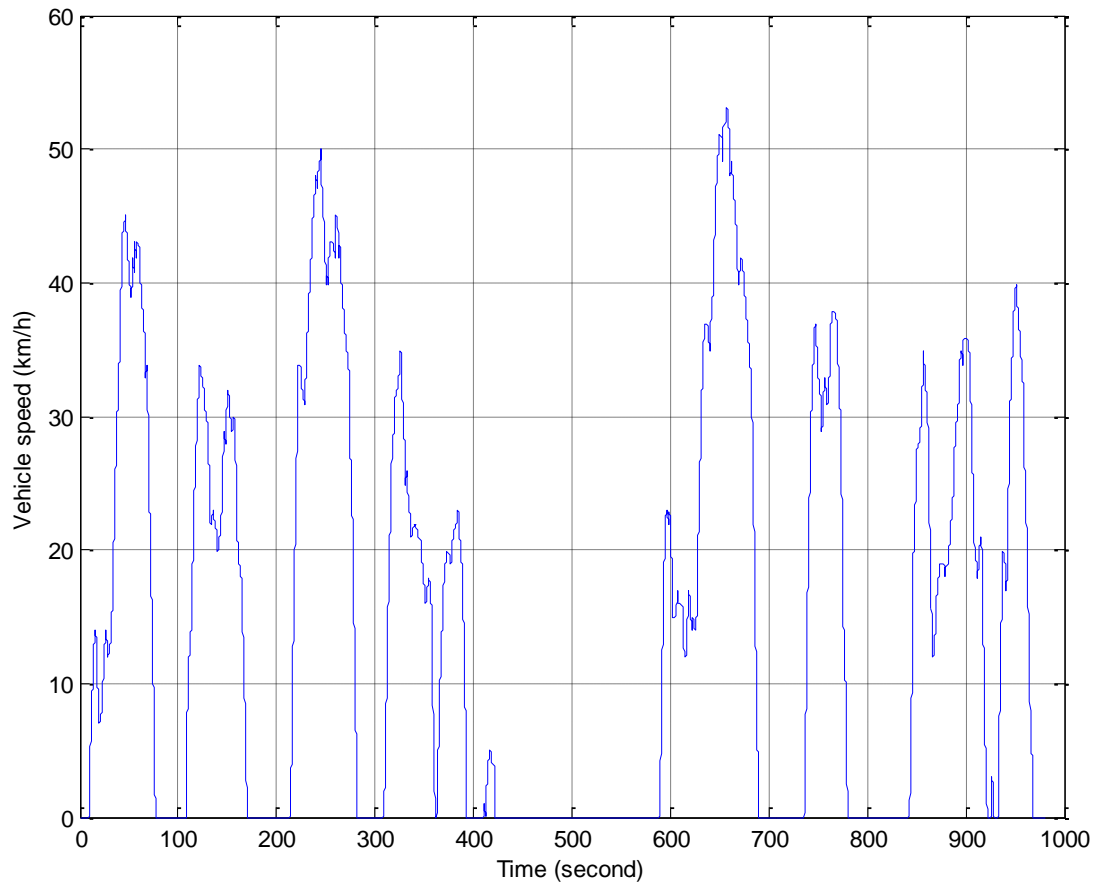
#### 6.1 การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า

การหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้านั้น ดำเนินการโดยจำลองแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้ากับ Bangkok Driving Cycle ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เมื่อ Bangkok Driving Cycle คือ วัฏจักรความเร็วของรถเทียบกับเวลาที่เป็นตัวแทนการจราจรในกรุงเทพฯ จากการขับรถทดสอบรถในหลายๆ เส้นทางในเขตเมืองของกรุงเทพฯ จะพบว่าความเร็วเฉลี่ยของรถนั้นอยู่ในช่วง 15 -17 กิโลเมตรต่อชั่วโมง[18,19] สำหรับงานวิจัยนี้ Bangkok Driving Cycle จะได้จากการขับรถทดสอบรถยนต์ SUV รุ่น Mitsubishi Pajero Sport พร้อมทั้งเก็บข้อมูลความเร็วของรถในขณะที่ขับขี่ โดยเส้นทางที่ขับรถทดสอบนั้นเริ่มต้นจากจุด A จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไปยังจุด B อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิดังแสดงในรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 เส้นทางขับรถทดสอบจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไปยังอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ

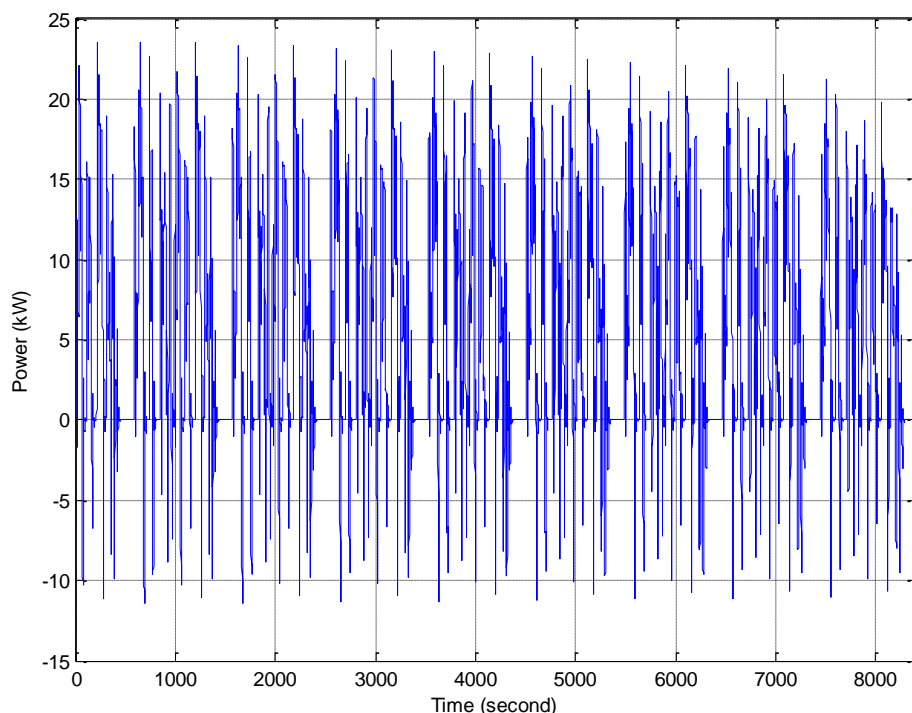
ส่วนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเทียบกับเวลาของ Bangkok Driving Cycle นั้น แสดงดังรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 Bangkok Driving Cycle (BDC)

จากรูปที่ 6-2 จะเห็นว่า Bangkok Driving Cycle มีอัตราเร็วเฉลี่ย 15.04 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีความเร็วสูงสุด 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีอัตราเร่งสูงสุด  $1.9 \text{ m/s}^2$  และคิดเป็นระยะทางการขับทั้งหมด 3.91 กิโลเมตร ภายในระยะเวลา 980 วินาที เมื่อพิจารณาประกอบกับลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ PMAC-DS (ME0913) ที่มี rated speed 3000 rpm และมีความเร็วรอบสูงสุด 5000 rpm หรือเมื่อคิดเป็นความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าคือ 26.93 km/h ที่อัตราทดเกียร์หนึ่ง และ 78.54 km/h ที่อัตราทดเกียร์สี่ ตามลำดับ จะพบว่าทั้งความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดอยู่ในช่วงที่มอเตอร์ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถทำงานได้

จากการจำลองแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้ากับ Bangkok Driving Cycle ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink จะได้ผลการใช้กำลังไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 6-3

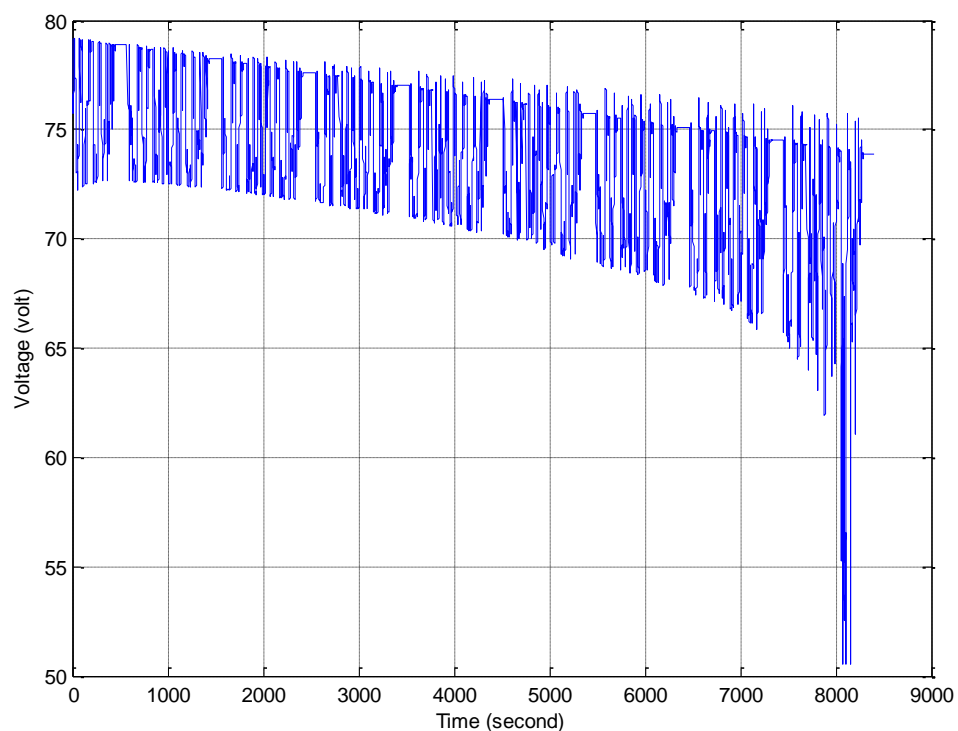


รูปที่ 6-3 ผลการจำลองกำลังไฟฟ้าที่ใช้จากแบบจำลองกับ Bangkok Driving Cycle

จากรูปที่ 6-3 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ คือ 23.53 กิโลวัตต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ คือ 30 กิโลวัตต์ ส่วนกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้ คือ 5.51 กิโลวัตต์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยตามลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ คือ 7 กิโลวัตต์ และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดตลอดช่วงการขับขี่ที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้เป็น 11.55 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยสามารถขับขี่ได้เป็นระยะทาง 32.13 กิโลเมตร ก่อนที่แบตเตอรี่จะไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอ โดยในที่นี้กำหนดให้โปรแกรมหยุดการจำลองเมื่อ %SOC ลดลงถึง 0% เพราะที่ %SOC เป็น 0 ในที่นี้หมายถึงแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Cutt off voltage) ที่ทางผู้ผลิตแบตเตอรี่แนะนำ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าของทางบริษัท Toyota Tsusho Electronics (Thailand) Co., Ltd. (TTET) พบว่ารถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางมากที่สุด 40.77 กิโลเมตร มากกว่าระยะทางที่ได้จากการจำลอง 8.64 กิโลเมตร ซึ่งอาจเกิดจากรูปแบบของความเร็วที่ขับขี่ เส้นทาง และช่วงเวลาที่ทำกรทดสอบ

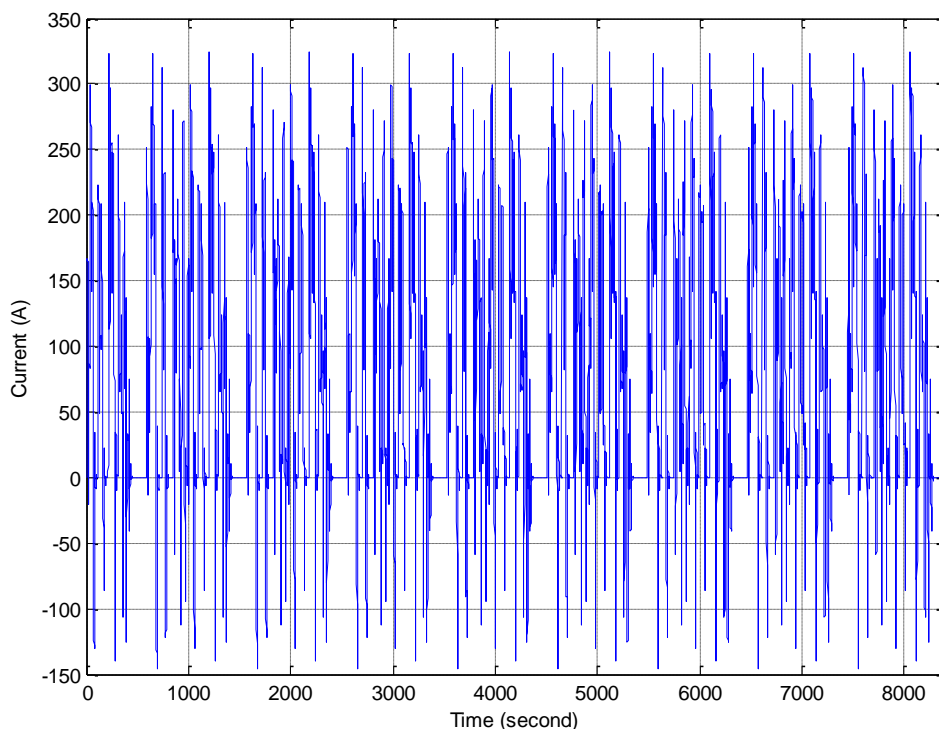
แตกต่างกัน นอกจากนี้แล้วจะเห็นว่าในช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าติดลบ ซึ่งแสดงว่าในช่วงที่รถมีการเบรกหรือความเร็วลดลงดังรูปที่ 6-2 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าจะดึงพลังงานบางส่วนย้อนกลับมาเก็บสะสมในแบตเตอรี่เพื่อเป็นแหล่งพลังงานต่อไป ส่วนแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าที่ลดลงนั้นเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่จ่ายทำให้ระดับประจุภายในแบตเตอรี่เหลือน้อยลง ส่งผลให้ค่าความจุของแบตเตอรี่ลดลงด้วย

เมื่อพิจารณาผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 6-4 จะเห็นว่าในตอนเริ่มต้นนั้นแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้า 79 โวลต์ แต่เมื่อจำลองการทำงานของแบบจำลองไปหลายรอบวัฏจักร จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยในช่วงแรกระดับแรงดันไฟฟ้าจะลดลงในอัตราที่ช้า แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น ระดับประจุในแบตเตอรี่จะลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าลดลงในอัตราที่เร็วขึ้น



รูปที่ 6-4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้า

ส่วนผลการจำลองกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 ผลการจำลองกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 6-5 จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละวัฏจักรมีค่าเหมือนกัน เนื่องจากแบบจำลองควบคุมกระแสเพื่อควบคุมการสร้างแรงบิดให้เพียงพอในการขับเคลื่อน ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าที่ติดลบนั้นจะแสดงถึงการ Regenerative พลังงานกลับเข้าสู่แบตเตอรี่เช่นเดียวกับกราฟของกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 6-3 นอกจากนี้จะเห็นว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดคือ 324 A ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถรับได้ คือ 350 A จึงไม่ส่งผลเสียต่อการทำงานของมอเตอร์

## 6.2 การกำหนดขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

### 6.2.1 การกำหนดขนาดของมอเตอร์

ในการออกแบบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า สิ่งที่สำคัญและจะต้องพิจารณาก่อน คือ การกำหนดสมรรถนะของรถในเบื้องต้น [20] เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะการขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้าในกรุงเทพฯ ดังนั้นสมรรถนะต่างๆ ของรถที่ออกแบบจึงต้องพิจารณาและอ้างอิงจาก Bangkok Driving Cycle ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



- รถยนต์ไฟฟ้าต้องสามารถขับด้วยอัตราเร็วสูงสุด 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ เนื่องจาก Bangkok Driving Cycle มีอัตราเร็วสูงสุด 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จึงควรกำหนดรถยนต์ไฟฟ้าให้สามารถขับด้วยอัตราเร็วสูงสุดที่มากกว่าค่าดังกล่าว
- รถยนต์ไฟฟ้าต้องสามารถเร่งความเร็วจาก 0 ถึง 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ภายในเวลา 5 วินาที

เนื่องจากในเบื้องต้นนี้ การออกแบบจะอ้างอิงจากรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ดังนั้นประเภทของมอเตอร์ที่พิจารณาเลือกใช้จึงเป็นมอเตอร์แบบ Brushless DC motor ซึ่งเป็นประเภทของมอเตอร์ที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้อยู่ นอกจากนี้แล้ว DC motor ยังสามารถควบคุมการทำงานได้ง่ายกว่า AC motor และไม่จำเป็นต้องมี inverter ในการแปลงสัญญาณไฟจาก AC เป็น DC ทำให้น้ำหนักรวมของรถยนต์ไฟฟ้าน้อยลง

สำหรับการเลือกขนาดของมอเตอร์นั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 พารามิเตอร์ที่จะต้องพิจารณา ได้แก่ กำลังสูงสุดของมอเตอร์ แรงบิดสูงสุด และความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์[21] ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์มีขั้นตอนในการพิจารณาดังนี้

ในขั้นแรกนั้นเป็นการพิจารณากำลังสูงสุดของมอเตอร์ โดยสามารถคำนวณจากกราฟของ Roadload Power กับ ความเร็วสูงสุดของรถที่ต้องการ โดย Roadload Power นั้นสามารถคำนวณจาก Roadload ดังสมการที่ 6-1

$$F_{RL} = c_r mg + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (6-1)$$

ส่วน Roadload Power สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6-2

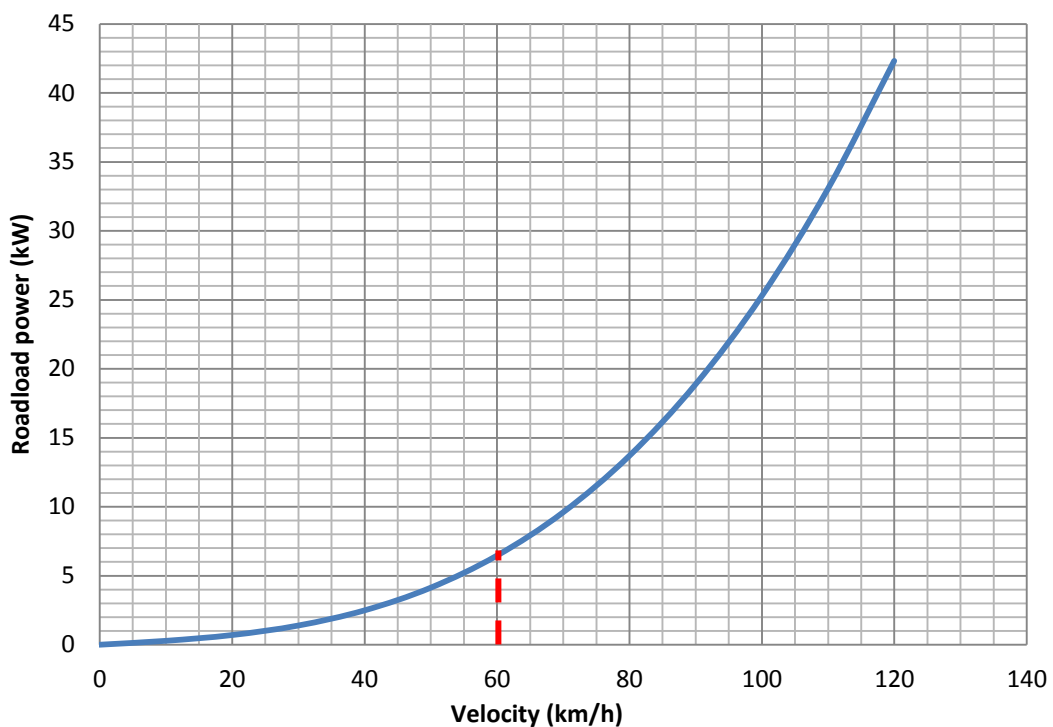
$$P_{RL} = F_{RL} v \quad (6-2)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (6-1) ลงในสมการ (6-2) จะได้สมการ Roadload Power ที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วดังสมการที่ (6-3)

$$P_{RL} = c_r mgv + \frac{1}{2} \rho C_d A v^3 \quad (6-3)$$

เนื่องจากได้กำหนดในเบื้องต้นไว้ว่าต้องการให้รถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 60 km/h ดังนั้นเมื่อคำนวณกำลังสูงสุดของมอเตอร์ตามสมการที่(6-3) จะได้ว่า Roadload power ที่ความเร็วสูงสุด

60 km/h คือ 6.46 kW ดังแสดงในรูปที่ 6-6 และเมื่อพิจารณาสมรรถนะของมอเตอร์ รุ่น PMAC-DS (ME0913) ซึ่งเป็นขนาดของมอเตอร์ที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้อยู่ พบว่ากำลังสูงสุดของมอเตอร์ คือ 13 กิโลวัตต์ ซึ่งมีค่ามากกว่ากำลังสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ ดังนั้นมอเตอร์รุ่นดังกล่าวจึงสามารถให้กำลังกับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าได้เพียงพอกับการขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุด 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 6-6 Roadload Power ที่ความเร็วต่างๆ

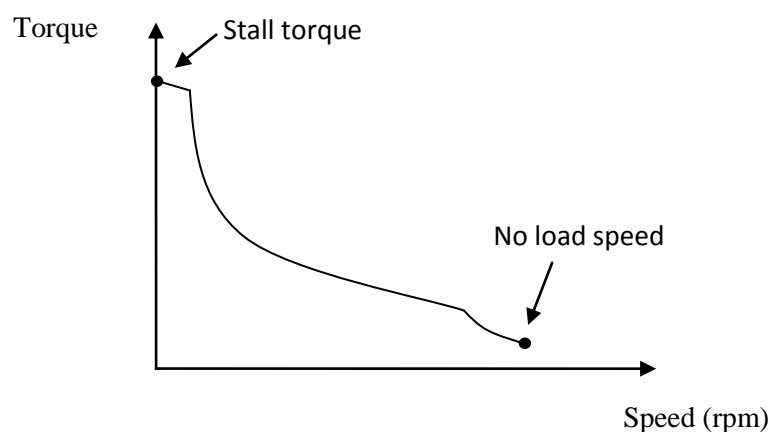
ขั้นตอนต่อมาเป็นการพิจารณาแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ จากรูปที่ 6-7 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ จะเห็นว่ามอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดสูงสุดได้ที่ความเร็วรอบต่ำหรือที่จุด Stall torque สำหรับการคำนวณหาแรงบิดสูงสุดที่จุด stall torque นั้นสามารถทำได้โดยการคำนวณหาความเร่งจากสมการการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงดังสมการที่ (6-4) ซึ่งจะได้ความเร่งสูงสุดที่ต้องการคือ  $1.94 \text{ m/s}^2$  จากนั้นคำนวณหาแรงบิดสูงสุดดังสมการที่ (6-5) ซึ่งจะต้องคิดผลความลาดชันของถนนด้วย เนื่องจากข้อกำหนดเกี่ยวกับการจัดสรรที่ดินของกรุงเทพฯ ได้กำหนดไว้ว่า ความลาดชันของผิวจราจรทุกจุดต้องไม่เกินร้อยละ 7 ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะการเคลื่อนที่ทางตรงในแนวราบ แต่จะนำผลของความลาดชัน

ของถนนมาคิดในการเลือกขนาดของมอเตอร์ด้วย เพื่อให้รถยนต์ไฟฟ้าสามารถสร้างกำลังขับเคลื่อนได้เพียงพอในทุกเส้นทางของกรุงเทพฯ

$$v = u + at \quad (6-4)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{N} (ma + mg \sin \theta) R \quad (6-5)$$

จากการคำนวณจะเห็นว่าแรงบิดสูงสุดที่ต้องการจากมอเตอร์ โดยคิดที่อัตราทดเกียร์หนึ่ง คือ 25.56 Nm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์รุ่น PMAC-DS (ME0913) สามารถทำได้ คือ 90 Nm



รูปที่ 6-7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่สร้างกับความเร็วรอบของมอเตอร์

การพิจารณาความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ จากที่กำหนดให้รถสามารถขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงสุดคือ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อคิดเป็นความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้อัตราทดเกียร์สี่จะได้ 3,819 rpm ซึ่งน้อยกว่าความเร็วรอบสูงสุดที่มอเตอร์ รุ่น PMAC-DS (ME0913) สามารถทำได้ คือ 5,000 rpm ดังนั้นมอเตอร์รุ่นดังกล่าวจึงสามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่สามารถทำให้รถขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้

จากการพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้ง 3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ซึ่งได้แก่ กำลังสูงสุดของมอเตอร์ แรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ และความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์ พบว่ามอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนในลักษณะดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6-1 สำหรับมอเตอร์ที่มีสมรรถนะสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 6-1 จะสามารถใช้เป็นต้นกำลังของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

ภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ ได้ และจากการพิจารณามอเตอร์รุ่น PMAC-DS (ME0913) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้อยู่ พบว่ามอเตอร์รุ่นดังกล่าวมีสมรรถนะสูงกว่าค่าที่ได้จากกำคำนวณ จึงสามารถใช้เป็นต้นกำลังของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ ได้

ตารางที่ 6-1 สมรรถนะของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับขี่

พารามิเตอร์	สมรรถนะของมอเตอร์ ที่จากการคำนวณ	สมรรถนะของมอเตอร์รุ่น PMAC-DS (ME0913)
Max-Power (kW)	6.46	13
Max-Torque (Nm)	25.56	90
Max-Rpm	3,819	5,000

### 6.2.2 การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่

การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ นับว่ามีความสำคัญอย่างมาก เพราะรถยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางการขับขี่ เนื่องจากมีแหล่งพลังงานที่ไม่เพียงพอ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการจราจรในกรุงเทพฯ ในเขตเมือง การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่นั้นจะกำหนดเป็นขนาดของแรงดันไฟฟ้า ความจุ และจำนวนก้อนของแบตเตอรี่ โดยเริ่มต้นจากการกำหนดระยะทางการขับขี่ต่อการชาร์จหรือระยะทางที่รถยนต์ไฟฟ้าจะต้องขับขี่ในหนึ่งวัน จากการสำรวจการใช้รถยนต์ในหนึ่งวันในเขตเมืองของ US Department of Transportation พบว่าระยะทางที่ใช้ในการเดินทางในหนึ่งวันส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ 25 กิโลเมตร[20] ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวอย่างของระยะทางการขับขี่ที่นำมาคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายได้โดยจำลองแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้ากับ Bangkok Driving Cycle และกำหนดให้หยุดการจำลองเมื่อระยะทางการขับขี่ครบ 25 กิโลเมตร จากนั้นหาพลังงานทั้งหมดที่ใช้จากการอินทิเกรตกำลังที่แบตเตอรี่จ่ายในเวลาต่างๆ ดังสมการที่ 6-6

$$Energy = \int_0^t Power dt \quad (6-6)$$

ผลการคำนวณจากแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าพลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่ใช้ในการขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า คือ 9.09 กิโลวัตต์ชั่วโมง

เมื่อคำนวณหาพลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่ใช้ได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาเป็นการกำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ใช้และความจุของแบตเตอรี่ โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้จะกำหนดจากมอเตอร์ ส่วนความจุของแบตเตอรี่นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6-7 [13]

$$\text{Energy in Watthours} = \text{Voltage} \times \text{Capacity in Amphours} \quad (6-7)$$

จากที่ได้พิจารณาเลือกขนาดของมอเตอร์รุ่น PMAC-DS (ME0913) ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ในหัวข้อ 6.2.1 ซึ่งมอเตอร์รุ่นดังกล่าวสามารถทำงานได้ที่ค่าแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ 72 V 60 V 48 V 36 V และ 24 V โดยปกติทั่วไปแล้วแบตเตอรี่ที่ใช้กับรถยนต์จะเป็นแบตเตอรี่ขนาด 12 V การเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ของมอเตอร์จะมีผลต่อขนาดและจำนวนแบตเตอรี่ที่ใช้ ซึ่งน้ำหนักของแบตเตอรี่จะส่งผลต่อน้ำหนักโดยรวมของรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและอาจมีผลต่อระยะทางการขับขี่อีกด้วย เนื่องจากเดิมมอเตอร์ของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าใช้แรงดันไฟฟ้าที่ค่า 72 V และใช้แบตเตอรี่รุ่น Panasonic EC-FV1260 VRLA (AGM) ที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12 V และมีน้ำหนัก 20 กิโลกรัม จำนวน 6 ก้อน งานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ 72 V และ 60 V มาใช้ในการคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ และพิจารณาผลของน้ำหนักแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นกับพลังงานที่เพิ่มขึ้น

ผลการคำนวณค่าความจุของแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 72 V คือ 126.26 Ah ดังนั้นขนาดแบตเตอรี่ที่ควรใช้ คือ 12 V 21.04 Ah จะเห็นว่าในการขับเคลื่อนที่ระยะทาง 25 กิโลเมตรสามารถใช้แบตเตอรี่ขนาดความจุที่น้อยกว่า 60 Ah ได้ แต่ต้องมีค่ามากกว่า 21.04 Ah อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้ว การคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ยังมีสิ่งที่ต้องพิจารณาอีกหลายประการ เช่น อายุของแบตเตอรี่ ระยะเวลาการใช้งาน และกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่าย เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะส่งผลให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลงอย่างรวดเร็ว

ส่วนการคำนวณเพื่อพิจารณาผลของน้ำหนักแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นกับพลังงานที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยจำลองแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้ากับ Bangkok Driving Cycle จนกระทั่งระยะทางการขับขี่ครบ 25 กิโลเมตร แต่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของความจุ จำนวนก้อนแบตเตอรี่ และมวลของรถใหม่ ซึ่งจะได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 6-2

ตารางที่ 6-2 ผลการคำนวณเปรียบเทียบขนาดของแบตเตอรี่

แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ 1 ก้อน (V)	12	12
จำนวนแบตเตอรี่ (ก้อน)	6	5
แรงดันไฟฟ้ารวม (V)	72	60
ความจุของแบตเตอรี่ (Ah)	21.04	21.04
น้ำหนักของแบตเตอรี่ (kg)	120	100
น้ำหนักของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า (kg)	794.6	774.6
พลังงานทั้งหมดที่ใช้ (kWh)	9.09	7.49

จากผลการคำนวณดังตารางที่ 6-2 พบว่าเมื่อใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V 21.04 Ah จำนวน 5 ก้อนนั้นสามารถขับเคลื่อนรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าได้ระยะทาง 25 กิโลเมตรเช่นเดียวกับเมื่อใช้แบตเตอรี่ขนาดเดียวกันจำนวน 6 ก้อน และพบว่ายังใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ 7.49 kW ซึ่งน้อยกว่าเมื่อใช้จำนวนแบตเตอรี่ 6 ก้อน แสดงว่าน้ำหนักของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ระบบมีแรงต้านการเคลื่อนที่มากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานในการขับเคลื่อนที่มากกว่า และจากการเมื่อจำลองแบบจำลองกับแบตเตอรี่ขนาดเดียวกัน จำนวนแบตเตอรี่ 4 ก้อน พบว่ารถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ถึงระยะทาง 25 กิโลเมตรตามที่กำหนดเงื่อนไขไว้ในเบื้องต้น ดังนั้นแบตเตอรี่ขนาดที่เหมาะสมต่อการขับขี่ในกรุงเทพฯ คือแบตเตอรี่ขนาด 12 V ที่มีความจุมากกว่า 21.04 Ah จำนวน 5 ก้อน แต่อย่างไรก็ตามผลการคำนวณนี้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจาก แบตเตอรี่แต่ละก้อนที่ขนาดแตกต่างกัน จะมีพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้พารามิเตอร์ต่างๆ จะอ้างอิงจากแบตเตอรี่ Panasonic EC-FV1260 VRLA (AGM)

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อทำนายอัตราการใช้พลังงาน โดยเฉพาะการหาอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ ในเบื้องต้นนี้การออกแบบแบบจำลองและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ จะอ้างอิงจากทางผู้ผลิตของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า QQ T1 เนื่องจากเป็นรถไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

ส่วนแรกนั้นเป็นการศึกษาส่วนประกอบ ลักษณะการทำงาน และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยระบบที่สำคัญ ได้แก่ แบตเตอรี่ ชุดควบคุม มอเตอร์ ระบบส่งกำลัง และ Road load โดยปกติแล้วรถยนต์ไฟฟ้าจะไม่มีระบบส่งกำลังที่มีหลายอัตราทด แต่สำหรับรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าที่ใช้ในการอ้างอิงนั้น ถูกดัดแปลงขึ้นจากรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป โดยการเปลี่ยนจากชุดเครื่องยนต์เป็นชุดของแบตเตอรี่และมอเตอร์ และระบบส่งกำลังที่มีหลายอัตราทดไว้เพื่อให้การขับขึ้นนั้นเหมือนกับรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป

จากนั้นเป็นการออกแบบแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า โดยพิจารณาเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของแต่ละระบบย่อย แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบย่อย สำหรับแบบจำลองแบตเตอรี่นั้นจะต้องมีการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองด้วย แบบจำลองทั้งหมดจะถูกสร้างด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อให้การแก้ไขปรับปรุงแบบจำลองสามารถทำได้สะดวก ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย โดยให้ input ของแบบจำลองคือ ความเร็วที่ต้องการให้รถขับ หรือ Driving cycle จากนั้นแบบจำลองจะควบคุมให้รถยนต์ไฟฟ้าขับด้วยความเร็วดังกล่าว พร้อมทั้งคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานและระยะทางการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้า รวมถึงสามารถคำนวณและแสดงพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของระบบย่อยของระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการขับทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าในสภาพการจราจรจริง พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองความเร็ว

ของรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ แต่สำหรับผลของกำลังไฟฟ้ายังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ เนื่องจากผลของแรงเสียดทานที่ไม่ทราบค่า และการเปลี่ยนอัตราทดที่ไม่แน่นอนของผู้ขับขี่ จึงส่งผลต่อการคำนวณที่คลาดเคลื่อน แต่ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ส่วนต่อมาเป็นการหาอัตราการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้า ภายใต้การขับขี่ในกรุงเทพฯ โดยการจำลองการทำงานของแบบจำลองกับ Bangkok Driving Cycle โดย Bangkok Driving Cycle นี้ได้จากการขับทดสอบรถยนต์ Mitsubishi Pajero Sport ในสภาพการจราจรจริงของกรุงเทพฯ ในเขตเมือง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลความเร็วของรถยนต์ในแต่ละเวลา จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ว่า รถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าสามารถขับขี่ได้ระยะทางทั้งสิ้น 32.13 กิโลเมตร ด้วยอัตราการใช้พลังงาน 11.55 กิโลวัตต์ชั่วโมง

ส่วนสุดท้ายเป็นการพิจารณาเลือกขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการจราจรในกรุงเทพฯ ในหนึ่งวัน หรือต่อการชาร์จ ซึ่งจะมีการกำหนดความเร็วสูงสุดและความเร่งสูงสุด เพื่อใช้ในการกำหนดขนาดของมอเตอร์จากการพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญทั้ง 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ กำลังสูงสุด แรงบิดสูงสุด และความเร็วรอบสูงสุด ที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ ส่วนการเลือกขนาดของแบตเตอรี่จะเริ่มจากการกำหนดระยะทางมากที่สุดที่ต้องการขับขี่ เพื่อหา กำลังไฟฟ้าและพลังงานที่แบตเตอรี่จ่าย ตามลำดับ จากนั้นจะสามารถเลือกแบตเตอรี่ที่มีความจุตามที่ต้องการ พร้อมทั้งจำนวนก้อนแบตเตอรี่ได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้นมีการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลจากการขับทดสอบจริงเพียงไม่กี่รอบของวัฏจักรขับทดสอบ แต่ในการจำลองการทำงานของแบบจำลองกับ Bangkok Driving Cycle นั้นจะจำลองหลายรอบจนกว่าระดับพลังงานในแบตเตอรี่จะไม่สามารถจ่ายได้เพียงพอ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว เมื่อระดับการประจุลดลง ความสามารถในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่จะลดน้อยลงด้วย จึงส่งผลให้รถยนต์ไฟฟ้าไม่สามารถขับขี่ได้จริงถึงความเร็วของ Bangkok Driving Cycle ได้เมื่อมีการจำลองไปหลายรอบวัฏจักรแล้ว จึงควรที่จะมีการศึกษาในส่วนนี้เพิ่มเติม



จากการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ จะพบว่าอายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นส่งผลอย่างมากต่อระดับพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ หรือแม้แต่แบตเตอรี่ประเภทเดียวกันที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าและความจุเท่ากัน ก็ยังไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อการคำนวณในแบบจำลองแบตเตอรี่

## รายการอ้างอิง

- [1] Kempton, W., and Kubo, T. Electric-drive vehicles for peak power in Japan. Energy Policy, 28, 1, (January 2000) : 9-18 .
- [2] Riezenman, M.J. Electric vehicles. IEEE Spectrum (November 1992): 18-101.
- [3] Wouk, V. Hybrids: Then and now. IEEE Spectrum , (July 1995): 16-21.
- [4] Koprubasi, K., B.S., and M.S. Modeling and control of a hybrid- electric vehicle for drivability and fuel economy improvements. Dissertation, The Ohio State University, 2008.
- [5] Gao, D.W., Mi, Ch., and Snadi, A. Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles. IEEE, 95, 4, ( April 2007).
- [6] Wipke, K.B., Cuddy, M.R., and Burch, S.D. ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 48, 6, (November 1999):1751-1761.
- [7] Markel, T., et al. Advisor: A system analysis tool for advanced Vehicle Modeling. Journal of Power Sources, 110, 2, (August 2002): 255-266.
- [8] Amrhein, M. Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 54, 3, (May 2005).
- [9] Rousseau, A., Kwon, J., Sharer, P., Pagerit, S. and Duoba, M. Integrating Data, Performing Quality Assurance, and Validating the Vehicle Model for the 2004 Prius Using PSAT. SAE International. 2006.
- [10] Matthias, D.rr, Cruden, A., Gair, S. and McDonald, J.R. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. Journal of Power Sources 161 (2006) : 1400-1411.

- [11] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์ (Control of Dynamic System). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- [12] Iqbal Husain. Electric and Hybrid Vehicles design fundamentals. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431 : CRC Press LLC, 2003.
- [13] Larminie, J., and Lowry, J. Electric Vehicle Technology Explained. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex U.S.A. : John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Watterson, P., and Zhu, J. Electromechanical Systems. 48531 Electromechanical Systems (Lecture Notes) :12.1-12.14.
- [15] Johnson, V.H. Battery performance models in ADVISOR. Journal of Power Sources 110 (2002) : 321-329.
- [16] Valerie, Johnson, H. and Pesaran, A. A. Temperature-Dependent Battery Models for High-Power Lithium-Ion Batteries. The 17th Annual Electric Vehicle Symposium (2000).
- [17] Harb, J.N., Johnson, V.H., and Rausen, D. Use of a fundamentally based lead-acid battery model in hybrid vehicle simulations. Annual Electrochemical Society Conference (1999).
- [18] Tamsanya, S., Chungpaibulpaattana, S., and Atthajariyakul, S. Development of automobile Bangkok driving cycle for emission and fuel consumption assessment. International conference "Sustainable Energy and Enviroment, 10, 2 (2009): 251-264.
- [19] Tamsanya, S., Chungpaibulpaattana, S., and Limmeechokchai, B. Development of a driving cycle for the measurement of fuel consumption and exhaust emissions of automobiles in bangkok during peak periods. International Journal of Automotive Technology, 10, 2, (2009) : 251-264.
- [20] Smith, R., Shahidienejad, S., Blair, D., and Bibeau, E.L. Characterization of urban commuter driving profiles to optimize battery size in light-duty plug-in electric vehicles. Transportation Research Part D ,16 (2011) : 218-224.

- [21] Kamenev, N. Modelling and Validation of electric vehicle component systems.  
Dissertation, The University of Manitoba, 2009.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การวัดและอุปกรณ์

การวัดและอุปกรณ์การวัดในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเป็นสองส่วน ดังนี้

1. การวัดค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบแบตเตอรี่
2. การวัดค่าพารามิเตอร์ในการขับเคลื่อนจริงของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

#### ก.1 การวัดค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบแบตเตอรี่

การทดสอบแบตเตอรี่ จะมีพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า สำหรับแรงดันไฟฟ้านั้นสามารถตรวจวัดและบันทึกค่าที่เวลาต่างๆ โดยการเชื่อมต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจวัดอัตโนมัติ (Data Acquisition, DAQ) รุ่น NI USB 6251 ดังแสดงในรูปที่ ก-1 และลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ ก-2



รูปที่ ก-1 NI USB 6251

ตารางที่ ก-1 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัด NI USB-6251

<b>Analog Input</b>	
<b>Channels</b>	16 , 8
<b>Single-Ended Channels</b>	16
<b>Differential Channels</b>	8
<b>Resolution</b>	16 bits
<b>Sample Rate</b>	1.25 MS/s
<b>Max Voltage</b>	10 V
<b>Maximum Voltage Range</b>	-10 V , 10 V
<b>Maximum Voltage Range Accuracy</b>	1.92 mV
<b>Maximum Voltage Range Sensitivity</b>	112 $\mu$ V
<b>Minimum Voltage Range</b>	-100 mV , 100 mV
<b>Minimum Voltage Range Accuracy</b>	52 $\mu$ V
<b>Minimum Voltage Range Sensitivity</b>	6 $\mu$ V
<b>Number of Ranges</b>	7
<b>Simultaneous Sampling</b>	No
<b>On-Board Memory</b>	4095 samples
<b>Analog Output</b>	
<b>Channels</b>	2
<b>Resolution</b>	16 bits
<b>Max Voltage</b>	10 V
<b>Maximum Voltage Range</b>	-10 V , 10 V
<b>Maximum Voltage Range Accuracy</b>	2.08 mV
<b>Minimum Voltage Range</b>	-5 V , 5 V
<b>Minimum Voltage Range Accuracy</b>	1.045 mV
<b>Update Rate</b>	2.86 MS/s
<b>Current Drive Single</b>	5 mA
<b>Current Drive All</b>	10 mA

Digital I/O	
<b>Bidirectional Channels</b>	24
<b>Input-Only Channels</b>	0
<b>Output-Only Channels</b>	0
<b>Timing</b>	Software , Hardware
<b>Maximum Clock Rate</b>	1 MHz
<b>Logic Levels</b>	TTL
<b>Input Current Flow</b>	Sinking , Sourcing
<b>Output Current Flow</b>	Sinking , Sourcing
<b>Programmable Input Filters</b>	Yes
<b>Supports Programmable Power-Up States?</b>	Yes
<b>Current Drive Single</b>	24 mA
<b>Current Drive All</b>	448 mA
<b>Watchdog Timer</b>	No
<b>Supports Handshaking I/O?</b>	No
<b>Supports Pattern I/O?</b>	Yes
<b>Maximum Input Range</b>	0 V , 5 V
<b>Maximum Output Range</b>	0 V , 5 V

ส่วนกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้เครื่อง Multifunction Electronic Load PLZ1004W ดังแสดงในรูปที่ ก-2 บังคับให้มีการดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งตลอดช่วงการทดสอบ แต่เนื่องจากเครื่อง PLZ1004W นั้นไม่สามารถสร้าง Load ได้เพียงพอ จึงต้องใช้อุปกรณ์ PLZ2004WB DC Loads Power Supplies ดังแสดงในรูปที่ ก-3 ต่อขนานกับ PLZ1004W โดยลักษณะเฉพาะของเครื่อง Multifunction Electronic Load PLZ1004W แสดงดังตารางที่ ก-2 ตามลำดับ





รูปที่ ก-2 Multifunction Electronic Load PLZ1004W

**● Booster PLZ2004WB**

- Operating voltage: 1.5 to 150 V
- Current: 400 A
- Power: 2000 W
- Input power supply voltage range: 100 to 240 VAC (90 to 250 VAC), single-phase connection
- Power consumption: Max. 200 VA
- Weight: Approx. 23 kg
- Dimensions: 429.5 (455) mm W × 128 (150) mm H × 550 (600) mm D



\* PLZ2004WB is a dedicated booster for PLZ1004W.  
It cannot be used with any other model.

รูปที่ ก-3 PLZ2004WB DC Loads Power Supplies

ตารางที่ ก-2 ลักษณะเฉพาะของ Multifunction Electronic Load PLZ1004W

**Rating**

Model	PLZ164W	PLZ334W	PLZ1004W	PLZ164WA
Operating voltage (DC)	1.5 V – 150 V <sup>+1</sup>			0 V – 1
Current	33 A	66 A	200 A	33 A
Power	165 W	330 W	1000 W	165 W
Minimum start voltage <sup>+3</sup>	0.3 V or greater			

**CC mode**

Model	PLZ164W	PLZ334W	PLZ1004W	PLZ164WA	
Operating range	Range H	0 A – 33 A	0 A – 66 A	0 A – 200 A	0 A – 33 A
	M	0 A – 3.3 A	0 A – 6.6 A	0 A – 20 A	0 A – 3.3 A
	L	0 A – 330 mA	0 A – 660 mA	0 A – 2 A	0 A – 330 mA
Setting range	Range H	0 A – 34.65 A	0 A – 69.3 A	0 A – 210 A	0 A – 34.65 A
	M	0 A – 3.465 A	0 A – 6.93 A	0 A – 21 A	0 A – 3.465 A
	L	0 A – 346.5 mA	0 A – 693 mA	0 A – 2.1 A	0 A – 346.5 mA
Resolution	Range H	1 mA	2 mA	10 mA	1 mA
	M	0.1 mA	0.2 mA	1 mA	0.1 mA
	L	0.01 mA	0.02 mA	0.1 mA	0.01 mA
Accuracy of setting	Range H, M	$\pm(0.2\% \text{ of set} + 0.1\% \text{ of f.s.}^{+1}) + V_{in}^{+2}/500 \text{ k}\Omega$			
	L	$\pm(0.2\% \text{ of set} + 0.1\% \text{ of f.s.})$			
Input voltage variation <sup>+3</sup>	Range H	2 mA	4 mA	10 mA	2 mA
	M	2 mA	4 mA	10 mA	2 mA
	L	0.1 mA	0.2 mA	0.6 mA	0.1 mA
Ripple	rms <sup>+4</sup>	3 mA	5 mA	20 mA <sup>+6</sup>	7.5 mA
	p-p <sup>+5</sup>	30 mA	50 mA	100 mA <sup>+6</sup>	50 mA

**Meters**

Model	PLZ164W	PLZ334W	PLZ1004W	PLZ164WA	
Voltmeter	Range H, M	0.00 V – 150.00 V			
	L	0.000 V – 15.000 V			
	Accuracy	$\pm(0.1\% \text{ of rdg} + 0.1\% \text{ of f.s.})$			
Ammeter	Range H, M	0.000 A – 33.000 A	0.000 A – 66.000 A	0.00 A – 200.00 A	0.000 A – 33.000 A
	L	0.00 A – 330.00 mA	0.00 A – 660.00 mA	0.0000 A – 2.0000 A	0.00 A – 330.00 mA
	Accuracy	$\pm(0.2\% \text{ of rdg} + 0.3\% \text{ of f.s.})$			
Wattmeter <sup>+1</sup>	Range H, M	0.00 W – 165.00 W	0.00 W – 330.00 W	0.0 W – 1000.0 W	0.00 W – 165.00 W
	L <sup>+2</sup>	0.000 W – 49.500 W	0.000 W – 99.000 W	0.00 W – 300.00 W	0.000 W – 49.500 W
	L <sup>+3</sup>	0.0000 W – 1.6500 W	0.0000 W – 3.3000 W	0.000 W – 10.000 W	0.0000 W – 1.6500 W

## ก.2 การวัดค่าพารามิเตอร์ในการขั้วทดสอบจริงของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า

การทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น มีพารามิเตอร์ที่ต้องการตรวจวัด 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความเร็วของรถ กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด มีดังนี้

ในส่วนของการวัดความเร็วของรถนั้น จะใช้การวัดความเร็วรอบของล้อ แล้วจึงแปลงความเร็วรอบของล้อให้กลายเป็นความเร็วของรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบ คือ อุปกรณ์ตรวจวัดรุ่น HAMLIN 55075 ซึ่งเป็น Hall effect magnetic sensor ดังแสดงในรูปที่ ก-4 ส่วนลักษณะเฉพาะและการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ก-3

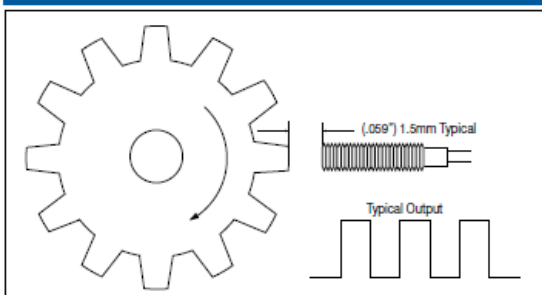


รูปที่ ก-4 Hall effect magnetic sensor

ตารางที่ ก-3 ลักษณะเฉพาะและการติดตั้ง Hall effect magnetic sensor

SPECIFICATIONS			
<b>Hall Type</b>			<b>Digital Switch 3 Wire ( Voltage Output)</b>
Supply Voltage (Note 1)	Maximum	Vdc	-25 to +25.2
	Operation	Vdc	4.75 to 25.2
	Overvoltage Protection	Vdc-max	27
Output High Voltage		Vdc-min	VDD - 2 (sinking outputs with internal pull-up resistor)
Output Low Voltage		Vdc-max	0.6 @ 20mA
Output Current (continuously on)		mA-max	20
		mA-min	1
		mA-max	10.5
Current Consumption		kHz-max	15
		°C	-40 to +85
Switching Speed	Operating	°C	-65 to +85
	Storage		
Note 1 - As long as Tj (Junction Temperature) is not exceeded			

### APPLICATION EXAMPLE - Geartooth Sensor



### CUSTOMER OPTIONS - Cable Length and Termination

TABLE 1		TABLE 2	
<b>Cable Length Options:- (Cable Type: 24 AWG 7/32 PVC 105°C, Double Insulated)</b>		<b>Termination Options:-</b>	
SELECT OPTION	CABLE LENGTH (in) mm	SELECT OPTION	DESCRIPTION
01	(3.94) 100	A	Tinned leads
02	(11.81) 300	B	Crimped terminals
03	(19.69) 500	C	6.35mm fastons
04	(29.53) 750	D	AMP MTE 2.54mm pitch
05	(39.37) 1000	E	JST XHP 2.5mm pitch

สำหรับการตรวจวัดกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้อุปกรณ์ตรวจวัดรุ่น CSLA2DK ดังแสดงในรูปที่ ก-5 คล้องไว้กับสายไฟฟ้าที่ออกจากแบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายจริงๆ ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ CSLA2DK แสดงดังตารางที่ ก-4 ส่วนวิธีการในการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกับสายไฟ แสดงดังรูปที่ ก-6

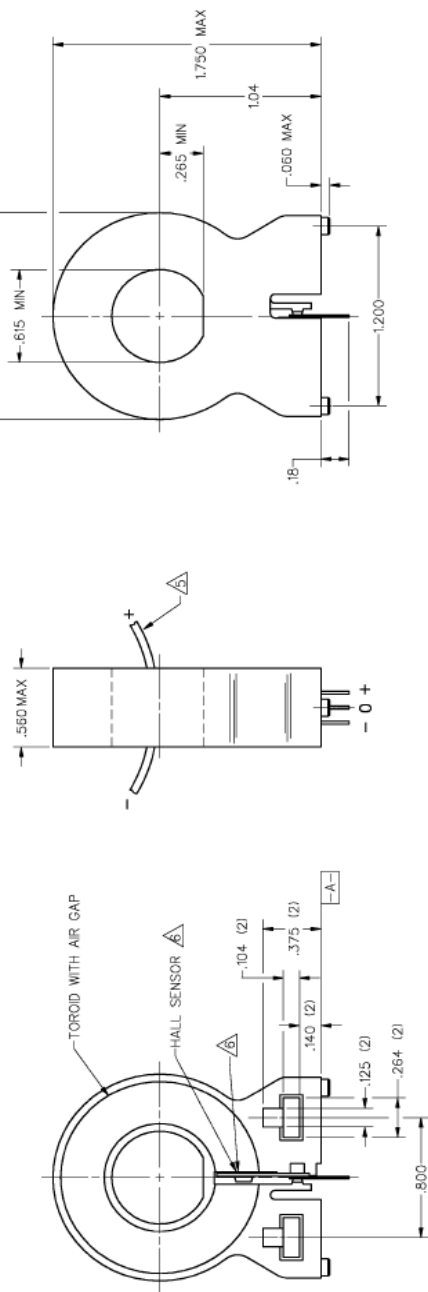


รูปที่ ก-5 อุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้านรุ่น CSLA2DK

ตารางที่ ก-4 ลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้ารุ่น CSLA2DK

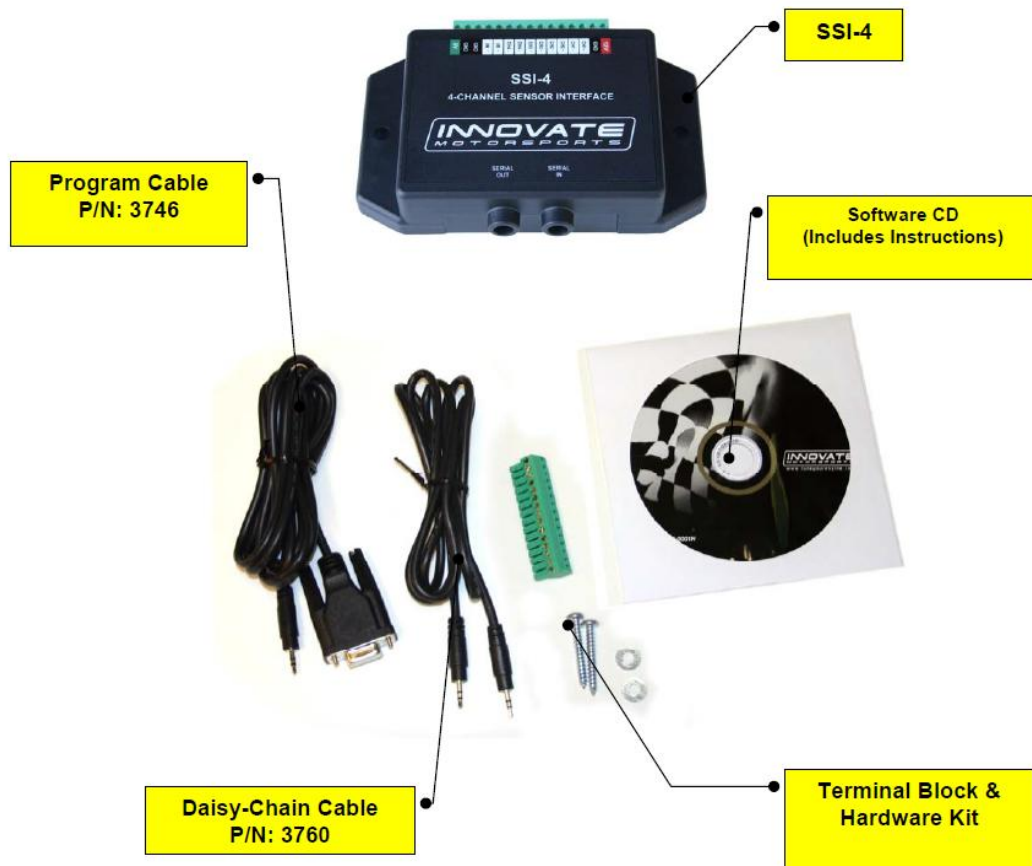
CHARACTERISTICS				
PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNITS
SUPPLY VOLTAGE	5.4	8.0	13.2	VOLTS
SUPPLY CURRENT		13	20	mA
OUTPUT CURRENT	1			mA
OUTPUT VOLTAGE SWING (-V)+1.25			(+V)-1.25	VOLTS
SENSITIVITY	5.3		6.25	mV/NI
LINEARITY		.5	1.0	% OF SPAN
$V_{out} \text{ @ } \emptyset$ NULL	.5(Vs)-2%		.5(Vs)+2%	VOLTS
TEMP ERROR-NULL	-0.13		+0.13	%/°C
TEMP ERROR-GAIN	-0.06		+0.01	5/°C

CONDITIONS/REMARKS  
 -25°C TO 85°C  
 MAX @ -25°C, TYP @ 25°C, Vs=8.0V, EXCLUDES LOAD  
 SINKING OR SOURCING  
 MAX CLAMPED @ 9.0 VOLTS MIN  
 @ Vs=8.0V & 25°C  $\nabla$   
 DEV FROM STR LINE FROM -I MAX TO +I MAX  $\nabla$   
 25°C  
 -25°C TO 85°C  
 -25°C TO 85°C



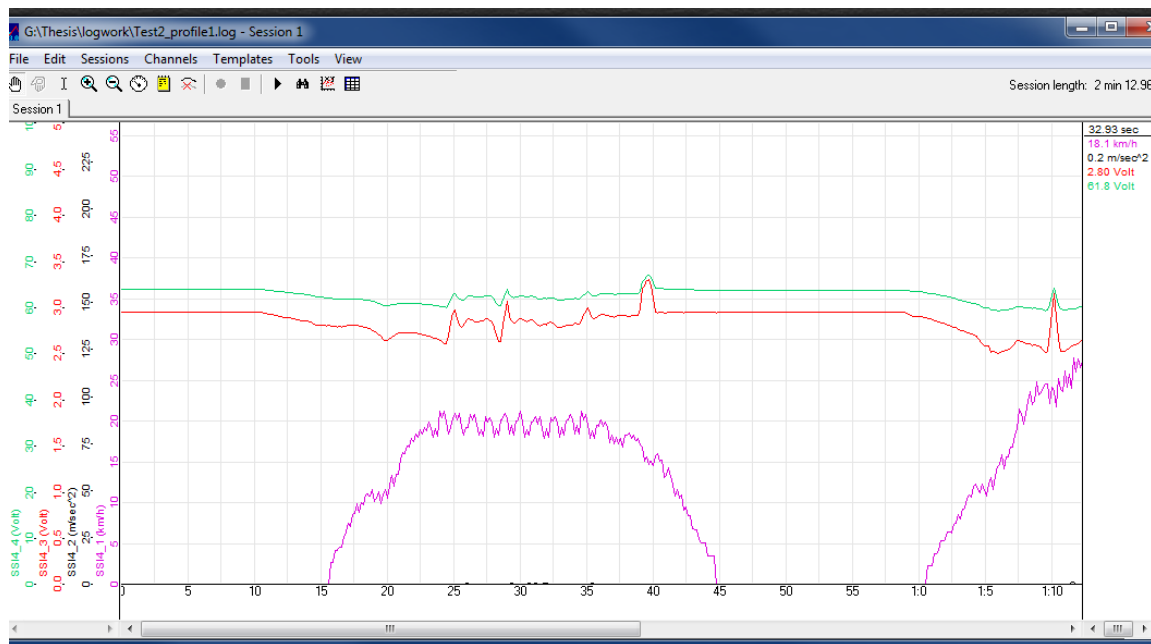
รูปที่ ก-6 ขนาดและวิธีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดกับสายไฟฟ้า

สำหรับการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้านั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดคือ SSI-4 Simple Sensor Interface 4 Channel User Manual ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ดังรูปที่ ก-7



รูปที่ ก-7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง SSI-4

SSI-4 อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจาก sensor และส่งสัญญาณต่อเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจะมีโปรแกรม LogWorks3 ที่ทำหน้าที่ในการแสดงผลของสัญญาณทั้งในรูปแบบของหน้าปัดและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ส่งเข้ามา กับเวลา ดังแสดงในรูปที่ ก-8 ส่วนลักษณะเฉพาะของ SSI-4 นั้นสามารถแดงได้ดังตารางที่ ก-5



รูปที่ ก-8 ภาพโปรแกรม LogWorks3 ขณะเก็บข้อมูล

ตารางที่ ก-5 ลักษณะเฉพาะของ SSI-4

<p><b>Power</b> Power requirements Power reversal protection External Sensor power</p>	<p>8-36 Volt / 50mA <sup>1</sup> Yes 5V (+- 2.5%), 300mA max.</p>
<p><b>Serial Communication</b> Serial Port Speed Packet/Logging Speed Sample Resolution</p>	<p>19.2 kbit/sec 81.92 msec/sample packet 10 bits (0..5V at 0.1% resolution)</p>
<p><b>Input Specifications</b> Number of Channels Input measurement range CHx+ max input voltages CHx- max input voltages Common Mode Rejection Range Input threshold for pulsed Signals Max Frequency Input Impedance</p>	<p>4 0..5V - 22.5 Volt to +300 Volt - 22.5 Volt to +27.5 Volt -22.5 Volt to +22.5 Volt  2.5V  15 kHz<sup>2</sup> 1 MOhm</p>
<p><b>Temperature</b> Max Operating Temperature</p> <p><b>Mechanical</b> Size (W x L x H) Weight</p>	<p>-20 to +80 deg Celsius</p> <p>133 x 65 x 26 mm 114 grams</p>
<p><i>Note 1:</i> <i>Supply current specified does not include external sensor current supplied by 5V output.</i></p> <p><i>Note 2:</i> <i>Sum of all frequency/Duty Cycle signals connected should not exceed 15 kHz.</i></p>	



## ภาคผนวก ข

### แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้า

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ไฟฟ้านั้นถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ประกอบด้วยแบบจำลองของ Traction Model และแบบจำลองแบตเตอรี่ การเข้าแฟ้มโปรแกรมและใช้งานแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำได้ดังนี้

#### ข.1 การเข้าแฟ้มโปรแกรม

แฟ้มโปรแกรมนั้นจะประกอบด้วย แฟ้มค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แฟ้ม Driving cycle แฟ้มแบบจำลอง และแฟ้มสำหรับการเปิดใช้งานโปรแกรม

##### 1. แฟ้มพารามิเตอร์ ประกอบด้วย

- Battery\_para.m คือ ไฟล์ที่เก็บค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้กับแบบจำลองแบตเตอรี่
- Traction\_para.m คือ ไฟล์ที่เก็บค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้กับแบบจำลอง Traction model

##### 2. แฟ้ม Driving cycle ประกอบด้วย

- Tuktuk\_speed.m คือ ไฟล์ที่เก็บค่าวัฏจักรความเร็วจากการขับทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า
- Tuktuk\_voltage.m คือ ไฟล์ที่เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักรจากการขับทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า
- Tuktuk\_current.m คือ ไฟล์ที่เก็บค่ากระแสไฟฟ้าแบบเป็นวัฏจักรจากการขับทดสอบรถตุ๊กตุ๊กไฟฟ้า
- BDC.m คือ ไฟล์ที่เก็บ Bangkok Driving Cycle

##### 3. แฟ้มแบบจำลอง ประกอบด้วย

- EV\_model.mdl คือ แบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า
- Battery\_model.mdl คือ แบบจำลองแบตเตอรี่

- Traction\_model.mdl คือ แบบจำลอง Traction model

#### 4. เพิ่มสำหรับการเปิดใช้งานโปรแกรม

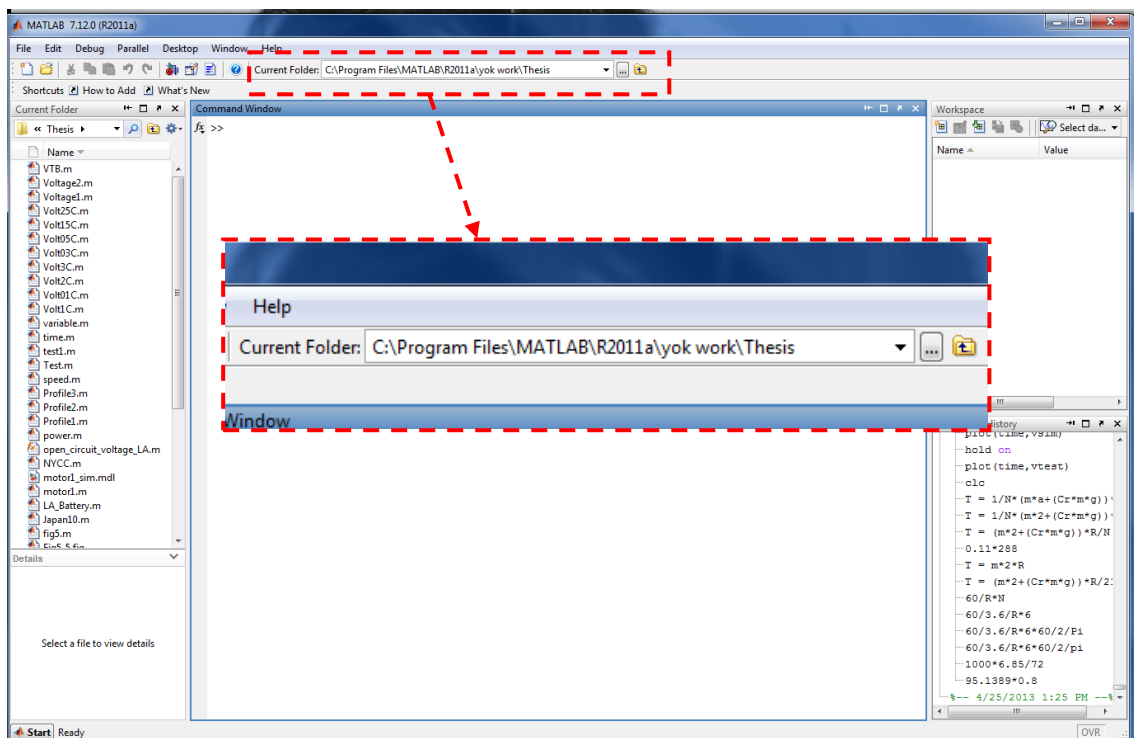
- open\_battery.m สำหรับการเปิดใช้งานโปรแกรมแบตเตอรี่
- open\_traction.m สำหรับการเปิดใช้งานโปรแกรม Traction model
- open\_EV.m สำหรับการเปิดใช้งานโปรแกรมระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

### ข.2 การใช้งานแบบจำลอง

การจะใช้งานแบบจำลองได้ เครื่องคอมพิวเตอร์จะต้องได้รับการติดตั้งโปรแกรม MATLAB/Simulink เสียก่อน จึงจะเข้าใช้งานแบบจำลองได้ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่ แบบจำลอง Traction model และแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

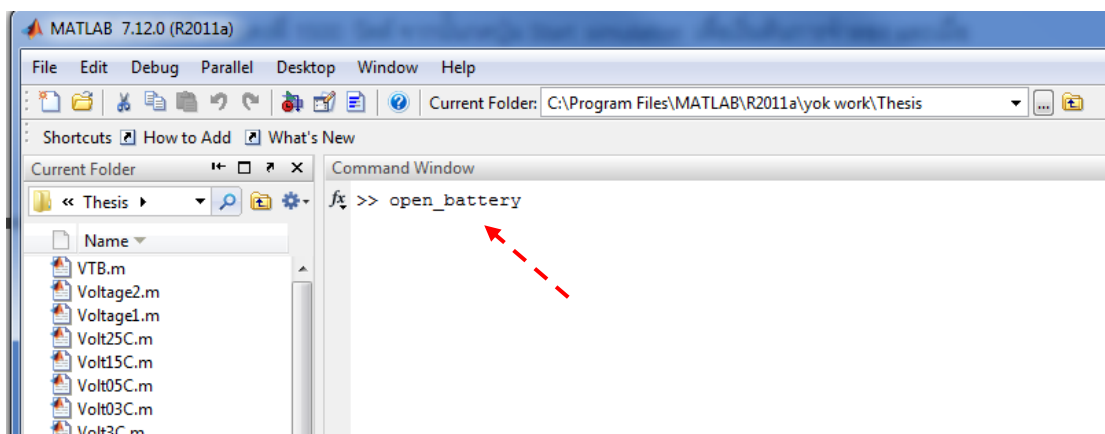
#### ข.2.1 การใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่

การใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่เริ่มจากต้องกำหนดให้ Current Folder อยู่ที่: C:\Program Files\MATLAB\R2011a\yok work\Thesis ดังแสดงในรูปที่ ข-1

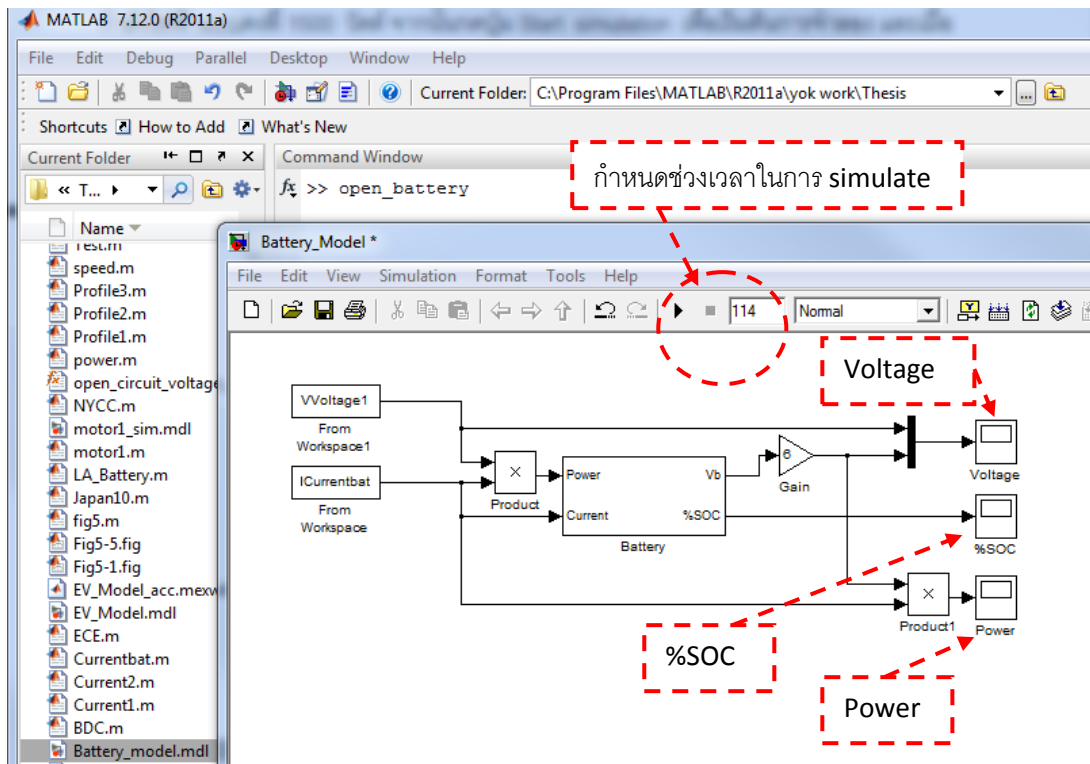


รูปที่ ข-1 การตั้งค่า Current Folder

เมื่อตั้งค่า Current Folder เสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้พิมพ์คำว่า open\_battery ลงไปในส่วนของ Command Window ดังแสดงในรูปที่ ข-2 โปรแกรมจะเปิดส่วนแบบจำลองแบตเตอรี่ขึ้นมาโดยอัตโนมัติ พร้อมทั้งเรียกไฟล์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองด้วย การใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่นี้จะเป็นการ Simulate เพื่อหาค่าของแรงดันไฟฟ้า ระดับการประจุ และกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ใช้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ ซึ่งสามารถดูกราฟได้แบบ real time เมื่อกดที่ตำแหน่ง scope ของค่าพารามิเตอร์แต่ละพารามิเตอร์ นอกจากนี้สามารถกำหนดระยะเวลาในการจำลองได้ดังแสดงในรูปที่ ข-3



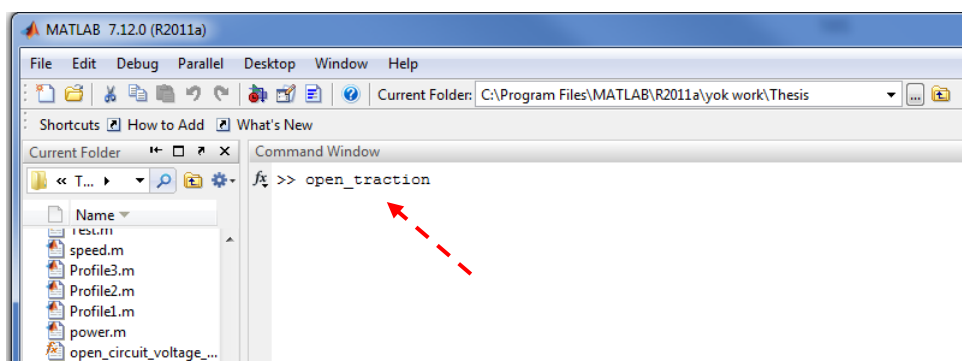
รูปที่ ข-2 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่



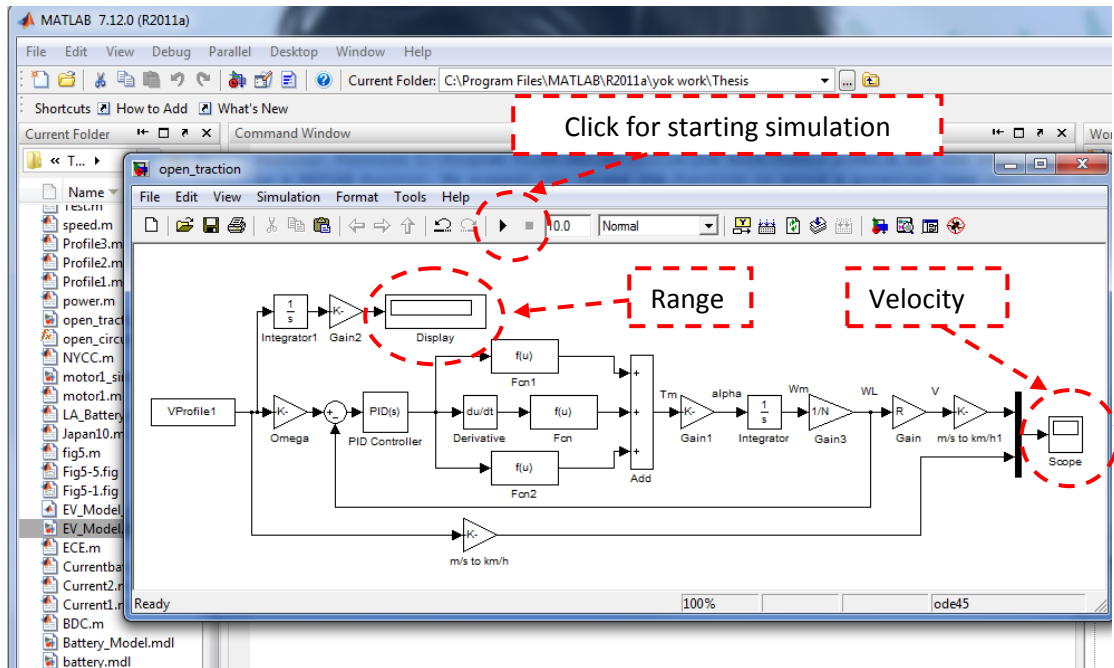
รูปที่ ข-3 แบบจำลองแบตเตอรี่

### ข.2.2 การใช้งานแบบจำลอง Traction Model

การใช้งานแบบจำลอง Traction Model มีขั้นตอนเช่นเดียวกับการใช้งานแบบจำลองแบตเตอรี่ คือจะต้องตั้ง Current folder ให้ตรงกับคำว่า C:\Program Files\MATLAB\R2011a\work\Thesis ก่อน จากนั้นจึงพิมพ์คำสั่งว่า open\_traction ลงใน Command Window ดังแสดงในรูปที่ ข-4 และปรากฏแบบจำลอง Traction model ขึ้นมาโดยอัตโนมัติดังแสดงในรูปที่ ข-5



รูปที่ ข-4 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลอง Traction model

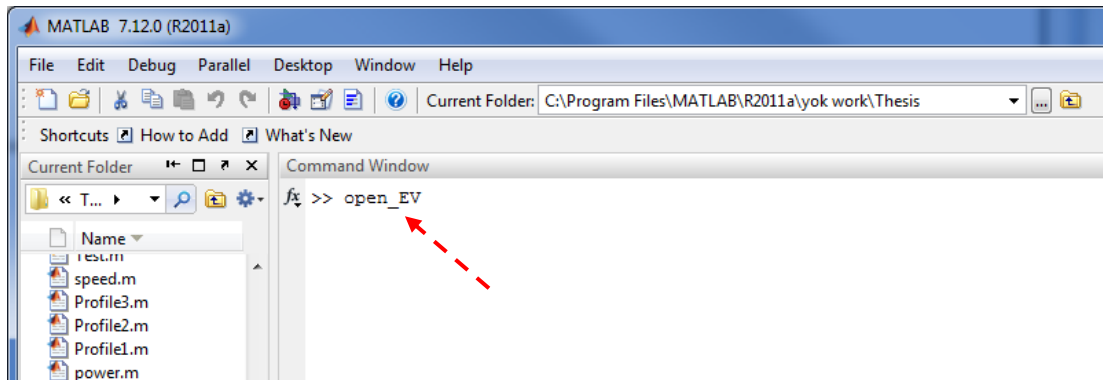


รูปที่ ข-5 แบบจำลอง Traction model

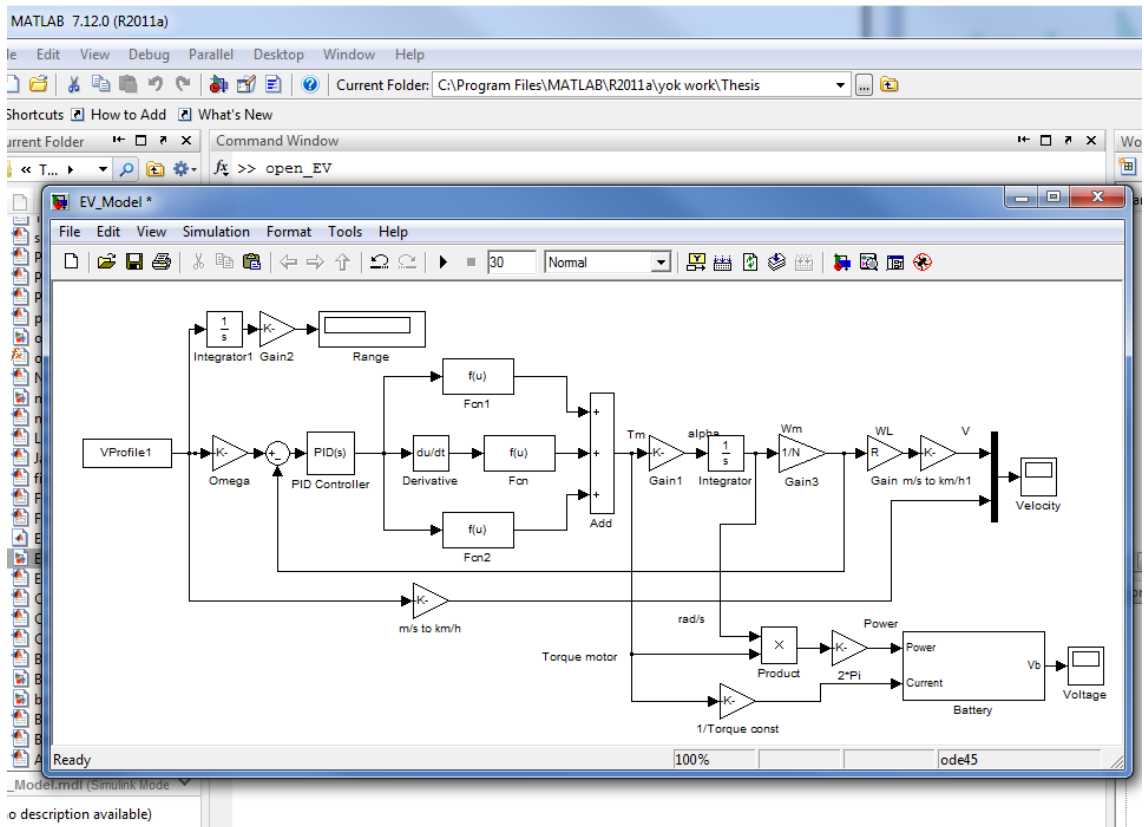
จากรูปที่ ข-5 จะเห็นว่าแบบจำลองจะแสดงค่าอยู่ 2 ค่า คือ ระยะทางที่รถขับขึ้นได้ กับ ความเร็วที่เวลาต่างๆ เปรียบเทียบกันระหว่างความเร็วที่ต้องการ (input) กับความเร็วที่รถวิ่งได้ (output)

### ข.2.3 การใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้านั้นเป็นแบบจำลองที่รวมทั้งแบบจำลอง แบตเตอรี่ และแบบจำลอง Traction model เข้าไว้ด้วยกัน หลักการเปิดใช้งานนั้นทำเช่นเดียวกับการเปิดใช้งานแบบจำลองทั้งสอง แต่เปลี่ยนเป็นการพิมพ์คำสั่งว่า open\_EV ลงใน Command Window แทน ดังแสดงในรูปที่ ข-6 หลังจากนั้นจะปรากฏแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าขึ้นมาโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ ข-7



รูปที่ ข-6 การพิมพ์คำสั่งเพื่อเปิดการใช้งานแบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า

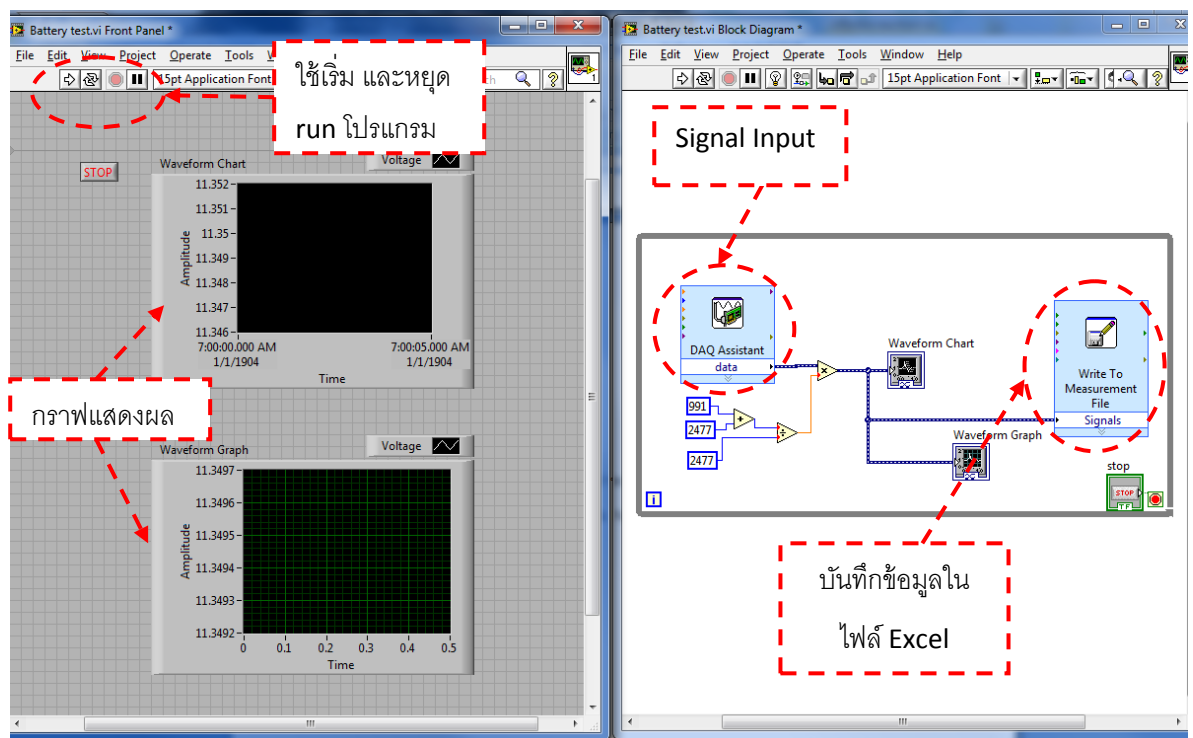


รูปที่ ข-7 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า


ภาคผนวก ค

## การใช้โปรแกรม LabView

ในการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้า โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจาก Data Acquisition คือ โปรแกรม National Instruments LabView เมื่อเปิดโปรแกรม LabView ขึ้นมาจะแสดงหน้าจอดังรูปที่ ค-1



รูปที่ ค-1 ลักษณะการใช้งานของโปรแกรม LabView

จากรูปที่ ค-1 เมื่อต้องการเริ่มการบันทึกข้อมูล ให้กดปุ่มลูกศร  โปรแกรมจะเริ่ม run และเก็บบันทึกข้อมูล และเมื่อบันทึกข้อมูลเสร็จแล้วให้กดปุ่มวงกลมสีแดงหรือกดปุ่ม STOP เพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรมและบันทึกไฟล์

## ภาคผนวก จ

## ผลการทดสอบแบตเตอรี่

## จ.1 ผลการทดสอบหาค่าพลังงานสูงสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

จากการทดสอบแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ค่าหนึ่งแล้วเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อนำข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวคูณกับกระแสไฟฟ้าแล้วอินทิเกรตตั้งสมการที่ 4-9 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ดังตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

Current (A)	Max Energy (J)
0	$1.03 \times 10^7$
30	$8.95 \times 10^6$
60	$9.09 \times 10^6$
90	$7.79 \times 10^6$
120	$7.31 \times 10^6$
150	$7.33 \times 10^6$
180	$6.43 \times 10^6$

เมื่อนำค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ กับพลังงานที่ใช้ไปแต่ละช่วงเวลามาคำนวณหา SOC จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง SOC และแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ ดังตารางที่ จ-2



ตารางที่ ๑-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง SOC และแรงดันไฟฟ้าที่การจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าต่างๆ

%SOC	Current (A)							
	0	0.1C	0.5C	1C	1.5C	2C	2.5C	3C
0	11.7	9.9	9.525	8.415	8.415	8.406	8.415	8.426
1	11.713	10.5	10.199	9.628	9.404	9.476	9.46	9.48
2	11.725	10.732	10.548	10.291	10.103	10.088	10.116	10.059
3	11.738	10.868	10.726	10.612	10.465	10.411	10.443	10.352
4	11.750	10.964	10.845	10.786	10.666	10.427	10.622	10.522
5	11.763	11.042	10.931	10.9	10.793	10.713	10.737	10.638
6	11.776	11.106	11	10.989	10.89	10.802	10.822	10.725
7	11.788	11.16	11.058	11.055	10.966	10.876	10.891	10.796
8	11.801	11.21	11.113	11.11	11.03	10.936	10.948	10.854
9	11.813	11.252	11.163	11.156	11.085	10.988	10.998	10.905
10	11.826	11.293	11.208	11.196	11.136	11.036	11.042	10.95
11	11.839	11.328	11.247	11.234	11.179	11.079	11.081	10.992
12	11.851	11.338	11.285	11.269	11.221	11.12	11.12	11.029
13	11.864	11.395	11.318	11.302	11.258	11.156	11.153	11.062
14	11.876	11.425	11.351	11.331	11.294	11.188	11.185	11.095
15	11.889	11.453	11.381	11.36	11.33	11.224	11.215	11.123
16	11.902	11.479	11.411	11.387	11.363	11.253	11.239	11.168
17	11.914	11.507	11.436	11.415	11.393	11.283	11.264	11.178
18	11.927	11.534	11.462	11.439	11.423	11.312	11.294	11.205
19	11.939	11.558	11.487	11.476	11.448	11.339	11.319	11.227
20	11.952	11.581	11.51	11.489	11.475	11.364	11.345	11.25
21	11.965	11.603	11.533	11.512	11.501	11.388	11.366	11.273
22	11.977	11.627	11.559	11.53	11.524	11.413	11.386	11.295
23	11.989	11.648	11.578	11.556	11.548	11.434	11.391	11.315
24	12.002	11.669	11.599	11.578	11.571	11.459	11.428	11.335

25	12.015	11.691	11.619	11.598	11.591	11.482	11.449	11.354
26	12.028	11.711	11.641	11.619	11.612	11.502	11.467	11.374
27	12.040	11.732	11.662	11.637	11.633	11.523	11.487	11.395
28	12.053	11.753	11.681	11.657	11.651	11.544	11.505	11.409
29	12.065	11.771	11.699	11.674	11.67	11.562	11.521	11.428
30	12.078	11.79	11.719	11.696	11.688	11.578	11.542	11.44
31	12.091	11.809	11.737	11.713	11.706	11.599	11.557	11.444
32	12.103	11.827	11.756	11.73	11.722	11.618	11.575	11.462
33	12.116	11.845	11.773	11.749	11.741	11.636	11.591	11.476
34	12.128	11.864	11.791	11.767	11.753	11.653	11.607	11.489
35	12.141	11.883	11.808	11.786	11.772	11.669	11.622	11.525
36	12.154	11.9	11.825	11.802	11.789	11.688	11.638	11.54
37	12.166	11.918	11.842	11.818	11.805	11.705	11.652	11.553
38	12.179	11.934	11.859	11.834	11.821	11.718	11.668	11.569
39	12.191	11.952	11.877	11.852	11.835	11.738	11.681	11.581
40	12.204	11.969	11.893	11.869	11.851	11.751	11.698	11.628
41	12.217	11.986	11.908	11.884	11.866	11.766	11.711	11.645
42	12.229	12.002	11.924	11.9	11.879	11.782	11.726	11.656
43	12.242	12.02	11.942	11.915	11.894	11.796	11.738	11.666
44	12.254	12.038	11.957	11.933	11.91	11.811	11.753	11.683
45	12.267	12.049	11.974	11.946	11.922	11.824	11.769	11.694
46	12.279	12.07	11.987	11.961	11.934	11.837	11.782	11.707
47	12.292	12.083	12.003	11.977	11.948	11.852	11.791	11.718
48	12.305	12.102	12.02	11.993	11.962	11.869	11.804	11.729
49	12.317	12.118	12.036	12.007	11.974	11.88	11.812	11.742
50	12.330	12.133	12.048	12.024	11.989	11.891	11.83	11.75
51	12.343	12.149	12.065	12.038	12.001	11.906	11.84	11.765
52	12.355	12.165	12.08	12.052	12.014	11.917	11.852	11.776
53	12.368	12.179	12.095	12.066	12.026	11.931	11.863	11.787

54	12.380	12.195	12.109	12.078	12.038	11.945	11.875	11.798
55	12.393	12.211	12.124	12.095	12.049	11.956	11.887	11.808
56	12.406	12.225	12.138	12.107	12.052	11.969	11.898	11.819
57	12.418	12.241	12.153	12.125	12.076	11.983	11.909	11.83
58	12.431	12.255	12.166	12.138	12.085	11.995	11.922	11.84
59	12.443	12.271	12.182	12.152	12.098	12.006	11.933	11.85
60	12.456	12.289	12.195	12.164	12.11	12.017	11.939	11.86
61	12.469	12.302	12.21	12.179	12.122	12.03	11.953	11.87
62	12.481	12.314	12.225	12.191	12.133	12.042	11.963	11.88
63	12.494	12.329	12.24	12.207	12.143	12.054	11.974	11.89
64	12.506	12.344	12.255	12.221	12.154	12.062	11.983	11.899
65	12.519	12.359	12.266	12.232	12.165	12.076	11.994	11.909
66	12.532	12.381	12.282	12.246	12.176	12.089	12.003	11.918
67	12.544	12.387	12.296	12.261	12.187	12.097	12.015	11.926
68	12.557	12.4	12.306	12.273	12.198	12.11	12.024	11.936
69	12.569	12.417	12.324	12.292	12.208	12.122	12.034	11.946
70	12.582	12.428	12.338	12.298	12.219	12.132	12.044	11.96
71	12.595	12.442	12.351	12.313	12.228	12.142	12.055	11.965
72	12.607	12.456	12.367	12.326	12.238	12.154	12.065	11.973
73	12.619	12.47	12.378	12.34	12.247	12.163	12.072	11.979
74	12.632	12.483	12.394	12.353	12.257	12.174	12.082	11.988
75	12.645	12.497	12.409	12.368	12.266	12.184	12.095	11.997
76	12.658	12.51	12.423	12.382	12.276	12.191	12.101	12.005
77	12.670	12.524	12.436	12.392	12.286	12.206	12.11	12.012
78	12.683	12.535	12.449	12.405	12.294	12.214	12.12	12.02
79	12.695	12.548	12.463	12.418	12.304	12.226	12.131	12.026
80	12.708	12.562	12.478	12.432	12.311	12.236	12.137	12.035
81	12.721	12.573	12.492	12.443	12.32	12.243	12.146	12.04
82	12.733	12.587	12.506	12.456	12.328	12.256	12.16	12.048

83	12.746	12.597	12.52	12.469	12.335	12.266	12.169	12.058
84	12.758	12.609	12.534	12.482	12.344	12.274	12.179	12.062
85	12.771	12.621	12.547	12.494	12.354	12.283	12.188	12.07
86	12.784	12.632	12.563	12.508	12.359	12.293	12.199	12.075
87	12.796	12.642	12.573	12.518	12.365	12.303	12.209	12.082
88	12.809	12.653	12.588	12.531	12.373	12.31	12.218	12.088
89	12.821	12.663	12.604	12.542	12.384	12.32	12.227	12.091
90	12.834	12.675	12.616	12.554	12.384	12.33	12.237	12.096
91	12.847	12.685	12.63	12.566	12.391	12.338	12.243	12.1
92	12.859	12.695	12.643	12.576	12.393	12.348	12.253	12.104
93	12.872	12.703	12.658	12.588	12.401	12.355	12.259	12.104
94	12.884	12.711	12.668	12.599	12.407	12.343	12.266	12.108
95	12.897	12.718	12.682	12.608	12.404	12.371	12.271	12.106
96	12.909	12.723	12.695	12.62	12.402	12.378	12.275	12.104
97	12.922	12.728	12.702	12.629	12.399	12.379	12.276	12.096
98	12.935	12.727	12.711	12.633	12.39	12.381	12.266	12.081
99	12.947	12.718	12.718	12.633	12.371	12.372	12.217	12.039
100	12.960	12.967	12.963	12.936	12.935	12.938	12.77	12.515

จากผลงานวิจัยของ Dürr ที่กล่าวว่าแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับระดับการประจุ (SOC) จากการทดสอบแบตเตอรี่โดยการวัดแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรขณะประจุเต็มและขณะประจุหมด จะสามารถหาแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรที่ระดับการประจุต่างๆ ได้ดังตารางที่ จ-3

ตารางที่ ๑-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรและระดับการประจุ

SOC	Open Circuit Voltage (V)						
	0.1C	0.5C	1C	1.5C	2C	2.5C	3C
0	11.8	11.79	11.77	11.78	11.77	11.85	11.7
1	11.814	11.804	11.784	11.794	11.784	11.864	11.715
2	11.828	11.818	11.799	11.808	11.799	11.877	11.73
3	11.842	11.832	11.813	11.823	11.813	11.890	11.745
4	11.856	11.846	11.827	11.837	11.827	11.904	11.76
5	11.87	11.860	11.842	11.851	11.842	11.918	11.775
6	11.884	11.874	11.856	11.865	11.856	11.931	11.79
7	11.898	11.889	11.870	11.879	11.870	11.944	11.805
8	11.912	11.903	11.884	11.894	11.884	11.958	11.82
9	11.926	11.917	11.899	11.908	11.899	11.972	11.835
10	11.94	11.931	11.913	11.922	11.913	11.985	11.85
11	11.954	11.945	11.927	11.936	11.927	11.998	11.865
12	11.968	11.959	11.942	11.950	11.942	12.012	11.88
13	11.982	11.973	11.956	11.965	11.956	12.026	11.895
14	11.996	11.987	11.970	11.979	11.970	12.039	11.91
15	12.01	12.002	11.984	11.993	11.984	12.052	11.925
16	12.024	12.016	11.999	12.007	11.999	12.066	11.94
17	12.038	12.03	12.013	12.021	12.013	12.079	11.955
18	12.052	12.044	12.027	12.036	12.027	12.093	11.97
19	12.066	12.058	12.042	12.049	12.042	12.106	11.985
20	12.08	12.072	12.056	12.064	12.056	12.12	12
21	12.094	12.086	12.070	12.078	12.070	12.133	12.015
22	12.108	12.100	12.085	12.092	12.085	12.147	12.03
23	12.122	12.114	12.099	12.107	12.099	12.160	12.045
24	12.136	12.128	12.113	12.121	12.113	12.174	12.06

25	12.15	12.142	12.128	12.135	12.127	12.188	12.075
26	12.164	12.157	12.142	12.149	12.142	12.201	12.09
27	12.178	12.170	12.156	12.163	12.156	12.214	12.105
28	12.192	12.185	12.170	12.178	12.170	12.228	12.12
29	12.206	12.199	12.185	12.192	12.185	12.242	12.135
30	12.22	12.213	12.199	12.206	12.199	12.255	12.15
31	12.234	12.227	12.213	12.220	12.213	12.268	12.165
32	12.248	12.241	12.228	12.235	12.228	12.282	12.18
33	12.262	12.255	12.242	12.249	12.242	12.296	12.195
34	12.276	12.269	12.256	12.263	12.256	12.309	12.21
35	12.29	12.284	12.270	12.277	12.270	12.322	12.225
36	12.304	12.298	12.285	12.291	12.285	12.336	12.24
37	12.318	12.312	12.299	12.305	12.299	12.349	12.255
38	12.332	12.326	12.313	12.319	12.313	12.363	12.27
39	12.346	12.34	12.328	12.334	12.328	12.376	12.285
40	12.36	12.354	12.342	12.348	12.342	12.39	12.3
41	12.374	12.368	12.356	12.362	12.356	12.404	12.315
42	12.388	12.382	12.371	12.376	12.371	12.417	12.33
43	12.402	12.396	12.385	12.391	12.385	12.430	12.345
44	12.416	12.410	12.399	12.405	12.399	12.444	12.36
45	12.43	12.424	12.414	12.419	12.414	12.458	12.375
46	12.444	12.439	12.428	12.433	12.428	12.471	12.39
47	12.458	12.453	12.442	12.447	12.442	12.484	12.405
48	12.472	12.467	12.456	12.462	12.456	12.498	12.42
49	12.486	12.481	12.471	12.476	12.471	12.512	12.435
50	12.5	12.495	12.485	12.49	12.485	12.525	12.45
51	12.514	12.509	12.499	12.504	12.499	12.538	12.465
52	12.528	12.523	12.514	12.518	12.514	12.552	12.48
53	12.542	12.537	12.528	12.533	12.528	12.566	12.495

54	12.556	12.551	12.542	12.547	12.542	12.579	12.51
55	12.57	12.566	12.556	12.561	12.556	12.592	12.525
56	12.584	12.58	12.571	12.575	12.571	12.606	12.54
57	12.598	12.594	12.585	12.589	12.585	12.619	12.555
58	12.612	12.608	12.599	12.604	12.599	12.633	12.57
59	12.626	12.622	12.614	12.618	12.614	12.646	12.585
60	12.64	12.636	12.628	12.632	12.628	12.66	12.6
61	12.654	12.650	12.642	12.646	12.642	12.674	12.615
62	12.668	12.664	12.657	12.660	12.657	12.687	12.63
63	12.682	12.678	12.671	12.675	12.671	12.700	12.645
64	12.696	12.692	12.685	12.689	12.685	12.714	12.66
65	12.71	12.706	12.699	12.703	12.699	12.728	12.675
66	12.724	12.721	12.714	12.717	12.714	12.741	12.69
67	12.738	12.735	12.728	12.731	12.728	12.754	12.705
68	12.752	12.749	12.742	12.746	12.742	12.768	12.72
69	12.766	12.763	12.757	12.759	12.757	12.782	12.735
70	12.78	12.777	12.771	12.774	12.771	12.795	12.75
71	12.794	12.791	12.785	12.788	12.785	12.808	12.765
72	12.808	12.805	12.799	12.802	12.799	12.822	12.78
73	12.822	12.819	12.814	12.817	12.814	12.836	12.795
74	12.836	12.833	12.828	12.831	12.828	12.849	12.81
75	12.85	12.848	12.842	12.845	12.842	12.862	12.825
76	12.864	12.862	12.857	12.859	12.857	12.876	12.84
77	12.878	12.876	12.871	12.873	12.871	12.889	12.855
78	12.892	12.889	12.885	12.888	12.885	12.903	12.87
79	12.906	12.904	12.899	12.902	12.899	12.916	12.885
80	12.92	12.918	12.914	12.916	12.914	12.93	12.9
81	12.934	12.932	12.928	12.930	12.928	12.944	12.915
82	12.948	12.946	12.943	12.944	12.943	12.957	12.93

83	12.962	12.960	12.957	12.959	12.957	12.970	12.945
84	12.976	12.974	12.971	12.973	12.971	12.984	12.96
85	12.99	12.988	12.986	12.987	12.986	12.998	12.975
86	13.004	13.003	12.999	13.001	12.999	13.011	12.99
87	13.018	13.017	13.014	13.015	13.014	13.024	13.005
88	13.032	13.031	13.028	13.029	13.028	13.038	13.02
89	13.046	13.045	13.043	13.044	13.043	13.052	13.035
90	13.06	13.059	13.057	13.058	13.057	13.065	13.05
91	13.074	13.073	13.071	13.072	13.071	13.078	13.065
92	13.088	13.087	13.086	13.086	13.086	13.092	13.08
93	13.102	13.101	13.099	13.101	13.099	13.106	13.095
94	13.116	13.115	13.114	13.115	13.114	13.119	13.11
95	13.13	13.129	13.128	13.129	13.128	13.132	13.125
96	13.144	13.144	13.143	13.143	13.143	13.146	13.14
97	13.158	13.158	13.157	13.157	13.157	13.159	13.155
98	13.172	13.172	13.171	13.172	13.171	13.173	13.17
99	13.186	13.186	13.186	13.186	13.186	13.186	13.185
100	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2

เมื่อทราบค่าของแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร และความต้านทานภายนอก จะสามารถหาความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงได้จากสมการที่ 4-10 ดังรูปที่ 5-3 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ จ-4



ตารางที่ ๑-4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในกับระดับการประจุ

SOC	Internal resistance ( $\Omega$ )						
	0.1C	0.5C	1C	1.5C	2C	2.5C	3C
0	0.316667	0.0755	0.055917	0.037389	0.028033	0.0229	0.018189
1	0.219	0.053503	0.035938	0.026558	0.019236	0.016023	0.012417
2	0.182667	0.04234	0.025127	0.018949	0.014255	0.01174	0.009283
3	0.162333	0.036877	0.020015	0.015084	0.011683	0.00965	0.007739
4	0.148667	0.03338	0.017353	0.013009	0.011668	0.008547	0.006878
5	0.138	0.030983	0.015692	0.011756	0.009404	0.00787	0.006317
6	0.129667	0.029153	0.014447	0.010836	0.008782	0.007393	0.005917
7	0.123	0.02769	0.013585	0.010149	0.008284	0.007023	0.005606
8	0.117	0.026327	0.012907	0.009596	0.007903	0.006733	0.005367
9	0.112333	0.02513	0.012378	0.009142	0.007589	0.00649	0.005167
10	0.107833	0.0241	0.01195	0.008733	0.007308	0.006287	0.005
11	0.104333	0.02327	0.011555	0.008413	0.007069	0.006117	0.00485
12	0.105	0.022473	0.01121	0.008104	0.006847	0.005947	0.004728
13	0.097833	0.021843	0.010898	0.007851	0.006666	0.005817	0.004628
14	0.095167	0.021213	0.010653	0.007609	0.006518	0.005693	0.004528
15	0.092833	0.020683	0.010408	0.007367	0.006337	0.005583	0.004456
16	0.090833	0.020153	0.010197	0.007158	0.006215	0.005513	0.004289
17	0.0885	0.01979	0.009968	0.006982	0.006084	0.005437	0.004317
18	0.086333	0.019393	0.009807	0.006807	0.005962	0.005327	0.00425
19	0.084667	0.01903	0.009428	0.006687	0.005856	0.00525	0.004211
20	0.083167	0.018733	0.00945	0.006544	0.005767	0.005167	0.004167
21	0.081833	0.018437	0.009305	0.006413	0.005686	0.005117	0.004122
22	0.080167	0.01804	0.009243	0.006316	0.005597	0.005073	0.004083
23	0.079	0.017877	0.009048	0.006207	0.005541	0.00513	0.004056
24	0.077833	0.017647	0.00892	0.006109	0.005452	0.004973	0.004028
25	0.0765	0.01745	0.008825	0.006044	0.005379	0.004923	0.004006
26	0.0755	0.017187	0.008713	0.005969	0.005332	0.004893	0.003978
27	0.074333	0.016957	0.008652	0.005893	0.005276	0.00485	0.003944
28	0.073167	0.016793	0.008557	0.005851	0.00522	0.00482	0.00395

29	0.0725	0.016663	0.008512	0.005798	0.005189	0.004803	0.003928
30	0.071667	0.016467	0.008383	0.005756	0.005175	0.004753	0.003944
31	0.070833	0.016337	0.008338	0.005713	0.005119	0.004743	0.004006
32	0.070167	0.016173	0.008293	0.005693	0.00508	0.004713	0.003989
33	0.0695	0.016077	0.008215	0.00564	0.005049	0.004697	0.003994
34	0.068667	0.015947	0.008153	0.005664	0.005027	0.00468	0.004006
35	0.067833	0.01585	0.008075	0.005611	0.005013	0.00467	0.003889
36	0.067333	0.015753	0.008047	0.00558	0.004973	0.004653	0.003889
37	0.066667	0.015657	0.008018	0.00556	0.004951	0.00465	0.0039
38	0.066333	0.01556	0.00799	0.00554	0.004962	0.004633	0.003894
39	0.065667	0.01543	0.007928	0.005542	0.004914	0.004637	0.003911
40	0.065167	0.015367	0.007883	0.005522	0.004925	0.004613	0.003733
41	0.064667	0.015337	0.007872	0.005513	0.004919	0.004617	0.003722
42	0.064333	0.015273	0.007843	0.005527	0.004905	0.004607	0.003744
43	0.063667	0.015143	0.007832	0.005518	0.004908	0.004617	0.003772
44	0.063	0.015113	0.00777	0.005498	0.004902	0.004607	0.003761
45	0.0635	0.015017	0.007792	0.005522	0.004912	0.00459	0.003783
46	0.062333	0.015053	0.00778	0.005547	0.004923	0.004593	0.003794
47	0.0625	0.01499	0.007752	0.005549	0.004918	0.004623	0.003817
48	0.061667	0.014893	0.007723	0.005551	0.004895	0.004627	0.003839
49	0.061333	0.01483	0.007728	0.005576	0.004922	0.004663	0.00385
50	0.061167	0.0149	0.007683	0.005567	0.00495	0.004633	0.003889
51	0.060833	0.014803	0.007688	0.005591	0.004944	0.004657	0.003889
52	0.0605	0.014773	0.007693	0.005604	0.004972	0.004667	0.003911
53	0.0605	0.014743	0.007698	0.005629	0.004974	0.004683	0.003933
54	0.060167	0.014747	0.007737	0.005653	0.004977	0.004693	0.003956
55	0.059833	0.014717	0.007692	0.005689	0.005004	0.004703	0.003983
56	0.059833	0.01472	0.00773	0.005813	0.005015	0.00472	0.004006
57	0.0595	0.01469	0.007668	0.005704	0.005017	0.004737	0.004028
58	0.0595	0.014727	0.00769	0.005762	0.005037	0.00474	0.004056
59	0.059167	0.014663	0.007695	0.005776	0.005064	0.004757	0.004083
60	0.0585	0.0147	0.007733	0.0058	0.005092	0.004807	0.004111
61	0.058667	0.01467	0.007722	0.005824	0.005103	0.004803	0.004139

62	0.059	0.01464	0.00776	0.00586	0.005122	0.004827	0.004167
63	0.058833	0.01461	0.007732	0.005907	0.005141	0.004843	0.004194
64	0.058667	0.01458	0.007737	0.005942	0.005193	0.004873	0.004228
65	0.0585	0.014683	0.007792	0.005978	0.005196	0.00489	0.004256
66	0.057167	0.01462	0.007797	0.006013	0.005207	0.00492	0.004289
67	0.0585	0.014623	0.007785	0.006049	0.005259	0.00493	0.004328
68	0.058667	0.01476	0.007823	0.006084	0.00527	0.00496	0.004356
69	0.058167	0.01463	0.007745	0.006131	0.005289	0.004983	0.004383
70	0.058667	0.014633	0.007883	0.006167	0.005325	0.005007	0.004389
71	0.058667	0.01467	0.007872	0.006224	0.005361	0.005023	0.004444
72	0.058667	0.014607	0.007893	0.006271	0.00538	0.005047	0.004483
73	0.058667	0.01471	0.007898	0.006329	0.005424	0.00509	0.004533
74	0.058833	0.014647	0.00792	0.006376	0.005452	0.005113	0.004567
75	0.058833	0.014617	0.007908	0.006433	0.005488	0.005117	0.0046
76	0.059	0.01462	0.007913	0.00648	0.005548	0.005167	0.004639
77	0.059	0.014657	0.007985	0.006527	0.005542	0.005197	0.004683
78	0.0595	0.014693	0.008007	0.006596	0.005595	0.00522	0.004722
79	0.059667	0.014697	0.008028	0.006642	0.005614	0.005237	0.004772
80	0.059667	0.014667	0.008033	0.006722	0.00565	0.005287	0.004806
81	0.060167	0.01467	0.008088	0.00678	0.005711	0.005317	0.004861
82	0.060167	0.014673	0.00811	0.006849	0.005722	0.005313	0.0049
83	0.060833	0.014677	0.008132	0.006929	0.005757	0.005343	0.004928
84	0.061167	0.01468	0.008153	0.006987	0.00581	0.005367	0.004989
85	0.0615	0.014717	0.008192	0.007033	0.005854	0.005397	0.005028
86	0.062	0.014653	0.008197	0.007136	0.00589	0.005413	0.005083
87	0.062667	0.01479	0.008268	0.007227	0.005926	0.005437	0.005128
88	0.063167	0.01476	0.00829	0.007296	0.005987	0.005467	0.005178
89	0.063833	0.014697	0.008345	0.007331	0.006023	0.005497	0.005244
90	0.064167	0.014767	0.008383	0.007489	0.006058	0.00552	0.0053
91	0.064833	0.01477	0.008422	0.007569	0.006111	0.00557	0.005361
92	0.0655	0.014807	0.008493	0.007704	0.006147	0.005593	0.005422
93	0.0665	0.014777	0.008532	0.007773	0.006208	0.005643	0.005506
94	0.0675	0.014913	0.008587	0.007864	0.006427	0.005687	0.005567

95	0.068667	0.014917	0.008675	0.008056	0.006312	0.005743	0.005661
96	0.070167	0.014953	0.008713	0.008236	0.006373	0.005807	0.005756
97	0.071667	0.01519	0.008802	0.008427	0.006484	0.00589	0.005883
98	0.074167	0.01536	0.008973	0.008684	0.006587	0.006047	0.00605
99	0.078	0.015597	0.009212	0.009053	0.006781	0.006463	0.006367
100	0.038833	0.0079	0.0044	0.002944	0.002183	0.002867	0.003806

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชญาดา ไชยमानนท์ เกิดเมื่อวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิศวกรรมยานยนต์ จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา พ.ศ. 2554 โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมีผลงานทางวิชาการที่ได้เผยแพร่ ดังนี้

- Chayada Chaiyamanon, Nuksit Noomwong, Angkee Sripakagorn. Dynamic modeling of electric Tuk-tuk for predicting energy consumption in Bangkok driving condition, APAC-17 Asia-Pacific Automotive Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 1 - 4 April, 2013.