การพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า

DESIGN AND DEVELOPMENT OF SUSPENSION PARTS FOR IN-WHEEL TMAC FORMULA

นายศุภวิทย์ อิศรนาเวศ รหัสนิสิต 57362538

นายสุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน รหัสนิสิต 57362606

นายสุริยา เขตประทุม รหัสนิสิต 57362620

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรมเครื่องกล

หัวข้อโครงงาน : การพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า (Design and Development of Suspension Parts for In-Wheel TMAC Formula)

ผู้ดำเนินโครงงาน : นายศุภวิทย์ อิศรนาเวศ รหัสนิสิต 57362538
นายสุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน รหัสนิสิต 57362606
นายสุริยา เขตประทุม รหัสนิสิต 57362620

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน : ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2560

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับ**นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตา**มหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงงาน

..... **ที่ปรึกษาโครงงาน**

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

..... **กรรมการ**

(อาจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

..... **กรรมการ**

(อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์)

หัวข้อโครงงาน : การพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า
ผู้ดำเนินโครงงาน : นายศุภวิทย์ อิศรนาเวศ รหัสนิสิต 57362538
นายสุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน รหัสนิสิต 57362606
นายสุริยา เขตประทุม รหัสนิสิต 57362620
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน : ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2560

.....

บทคัดย่อ

การพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า เป็นการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนของระบบช่วงล่างเพื่อนำไปใช้กับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้ารวมถึงการทดสอบสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ล้อ ซึ่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้นนี้จะนำเอาโครงและชิ้นส่วนต่างๆ ของรถฟอร์มูล่าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ มาสร้างเป็นรถฟอร์มูล่าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยตัวรถจะมีขนาดกว้าง 141 เซนติเมตร ยาว 237 เซนติเมตร สูง 123 เซนติเมตร ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 3 กิโลวัตต์ 72 โวลต์ แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12 โวลต์ 65 แอมป์ต่อชั่วโมง จำนวน 6 ลูก มีน้ำหนักรวมของตัวรถ 330 กิโลกรัม จุดสำคัญที่เน้นในการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ ความปลอดภัยในการใช้งาน

จากการทดสอบใช้งานรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร พบว่า รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 67 กิโลเมตรต่อการประจุไฟหนึ่งครั้ง ที่ความเร็วเฉลี่ยในการขับขี่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้พลังงานทั้งหมดที่ 3.719 หน่วย หรือใช้พลังงาน 0.056 หน่วยต่อ 1 กิโลเมตร ใช้เวลาในการประจุไฟหนึ่งครั้ง 24 ชั่วโมง รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำความเร็วจาก 0 จนถึง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ใน 8.088 วินาที มีระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็ว 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอยู่ที่ 4.6, 8.9, 18.3 เมตร ตามลำดับ มีรัศมีความโค้งแคบที่สุดที่สามารถเลี้ยวได้ขณะความเร็ว 10, 15 และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอยู่ที่ 2, 3.5, 4.5 เมตร ตามลำดับ

Project Title : Design and Development of Suspension Parts for In-Wheel TMAC Formula

Name : Mr. Supawit itsaranawet Code 57362538
Mr. Suttipan Chatruprachewin Code 57362606
Mr. Suriya Ketpraatum Code 57362620

Project Advisor : Assist.professor Dr. Ananchai Ukaew

Department : Mechanical Engineering

Academic : 2017

.....

Abstract

This project for design and development of suspension parts for in-wheel tmac formula, is to design and build parts of suspension systems for use with the electric formula car includes a performance test. The electric formula car that will be built, will bring out the chassis and components of formula car. To build a car that is powered by an electric motor. Electric formula car has a wide 141 centimeters, long 237 centimeters, High 123 centimeters. This car consists of 3 KW 72 V Brushless DC electric motor, six 12 V 65 Ah deep cycle lead-acid batteries. This car weight is 330 kg, the important point to emphasize in creating electric formula car is the safety in use.

From the testing of the electric formula car, At Naresuan University found that the electric formula car could run for up to 67 kilometers per charge. At an average speed of 30 km /hr, using all the energy is 3.719 units or 0.056 units per 1 km. Time to charge once for 24 hours. The electric formula car can take speed from 0 to 60 km /hr in 8.088 seconds. The shortest braking distance at speeds of 30, 40 and 50 km /hr is 4.6, 8.9, 18.3. The narrowest radius that can be turned at speeds of 10, 15 and 20 km/hr is 2, 3.5, 4.5 m, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิศวกรรมเครื่องกลฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่กรุณาให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงงาน ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูและสั่งสอนจนกระทั่งสามารถเติบโตมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนช่วยอุปการะทางการเงินและคอยให้กำลังใจ จนกระทั่งโครงงานนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณฝ่ายเลขานุการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงงาน

ขอขอบพระคุณ นายชัชชัย อินเขียน และพี่ๆนิสิตป.โทที่ช่วยสร้างและจัดหาอุปกรณ์สำคัญของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าหลายชิ้น

ขอขอบพระคุณบุคลากรและเพื่อนๆทุกคนสำหรับคำปรึกษา แนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงงานนี้

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินงานขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงงานนี้ แด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงงานนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้ดำเนินโครงงาน
ศุภวิทย์ อิศรนาเวศ
สุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน
สุริยา เขตประทุม

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองโครงงาน ..... ก
บทคัดย่อ ..... ข
Abstract ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูปภาพ ..... ฌ
สารบัญสัญลักษณ์ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงาน 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน 3

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี
2.1 หลักการของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 4
2.2 ระบบกันสะเทือน (Suspension System) 5
2.2.1 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension) 5
2.3 พื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์ 7
2.3.1 แรงต้านการเคลื่อนที่ 7
2.3.2 แรงเฉื่อย 12
2.3.3 แรงรวมทั้งหมดจากการส่งกำลังของมอเตอร์ 15
2.3.4 กำลังของมอเตอร์ 16
2.4 มอเตอร์ขับเคลื่อน 16
2.4.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 17
2.4.2 แบบจำลองมอเตอร์ 18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5 การจำลองความเร่งยานยนต์ (modeling vehicle acceleration) 21
2.6 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก 22
2.7 การเข้าโค้งบนโค้งราบ 25
2.8 การหาจุดศูนย์กลางมวล 26
2.9 แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 26
2.9.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด 26
2.9.2 การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 27
2.10 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง 28
2.10.1 องค์ประกอบชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง 28
2.11 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 29
2.11.1 ดิสก์เบรก (Disk Brakes) 29
2.11.2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative brake) 29

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน
3.1 การออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 32
3.1.1 หลักการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 32
3.1.2 การออกแบบชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 33
3.1.3 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อการออกแบบ 35
3.2 การคำนวณระยะทางในการเบรก 37
3.3 การคำนวณรัศมีวงเลี้ยวบนถนนราบ 38
3.4 การจำลองหาความเร็วและความเร่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 39
3.5 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์ 44
3.6 วิธีการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 48
3.5.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง 48
3.5.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 49
3.5.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ 50
3.5.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว 51

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง 53

4.1.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง 53

4.1.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 54

4.1.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ 55

4.1.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว 55

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง 56

4.2.1 วิเคราะห์ระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 56

4.2.2 วิเคราะห์อัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 57

4.2.3 วิเคราะห์ระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 58

4.2.4 วิเคราะห์รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 59

บทที่ 5 สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงงาน 61

5.1.1 สรุปผลการทดสอบระสิทธิภาพรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 61

5.1.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 62

บรรณาณุกรม 63

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในออกแบบและการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 65

ภาคผนวก ข. รูปการณ์ออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 70

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน 74

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 2
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของยานยนต์ประเภทต่างๆ.....9
ตารางที่ 2.2 สมการการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่างๆ 14
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสเปคมอเตอร์ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 20
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต (μ_s) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k)..... 24
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง . 54
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อพลังงานที่ใช้ในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง..... 54
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 54
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ..... 55
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบรัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็วต่างๆ..... 56

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 4
รูปที่ 2.2 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ 5
รูปที่ 2.3 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ 6
รูปที่ 2.4 แรงขับเคลื่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์มีการเคลื่อนที่กับแรงต้านทั้งหมด 8
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงต่างๆ 11
รูปที่ 2.6 แรงต้านทางชัน 11
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน 13
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อน 17
รูปที่ 2.9 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน 18
รูปที่ 2.10 แสดงรูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวมล้อ 18
รูปที่ 2.11 ภาพภายในมอเตอร์ 20
รูปที่ 2.12 แรงกระทำกับรถในทำการเบรก 22
รูปที่ 2.13 แรงกระทำต่อรถในขณะเลี้ยวบนถนนโค้งราบ 25
รูปที่ 2.14การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม 27
รูปที่ 2.15 การสัมผัสของผ้าเบรกกับจานโรเตอร์ 29
รูปที่ 2.16 Energy flow in the classic battery-powered electric vehicle, which has regenerative braking 30
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน 31
รูปที่ 3.2 โครงและชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าที่จะนำไปพัฒนาและออกแบบเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 33
รูปที่ 3.3 การออกแบบคอม้า 33
รูปที่ 3.4 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหลัง 34
รูปที่ 3.5รางวางแบตเตอรี่ 34
รูปที่ 3.6 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ 35
รูปที่ 3.7 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับ 35
รูปที่ 3.8 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ 36
รูปที่ 3.9 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ 36
รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ 40

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของมอเตอร์ 41
รูปที่ 3.12 การสร้างสมการ Interpolation ระหว่างความเร็วกับแรงบิด ใน Matlab..... 42
รูปที่ 3.13 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab..... 42
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา..... 43
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา 43
รูปที่ 3.16โครงและชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าที่จะนำไปพัฒนาและออกแบบเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 44
รูปที่ 3.17 มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W 44
รูปที่ 3.18 คอนโทรลเลอร์ KLS7245H..... 44
รูปที่ 3.19 คันเร่ง 45
รูปที่ 3.20 แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ รุ่น EB65 ขนาด 12V 65AH 45
รูปที่ 3.21 ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15..... 45
รูปที่ 3.22 ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15..... 45
รูปที่ 3.23 ปั๊มเบรก Brombo 4 Pot ขนาดเล็ก และจานดิสเบรค SPARK-115 i (3รู)..... 46
รูปที่ 3.24 ลูกหมากตาเหลือก ROD END 46
รูปที่ 3.25 เบาะนั่ง..... 46
รูปที่ 3.26 สีสเปรย์..... 46
รูปที่ 3.27 เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่างๆ..... 47
รูปที่ 3.28 เข็มขัดนิรภัย 47
รูปที่ 3.29 แตรรถเสียงไซเรน 47
รูปที่ 3.30 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ..... 47
รูปที่ 3.31 จูลมิเตอร์ JUNTEK 48
รูปที่ 3.32 GPS Lap Timer LT-Q6000..... 49
รูปที่ 3.33 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง 49
รูปที่ 3.34 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 50
รูปที่ 3.35 จุดเริ่มเบรก..... 51
รูปที่ 3.36 การวัดระยะเบรกจากล้อหน้ากับจุดเริ่มเบรก..... 51
รูปที่ 3.37 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว 52
รูปที่ 3.38 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ..... 52
รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ บริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร..... 53

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงวัฏจักรการขับขี่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร 54
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับเวลา..... 55
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา เปรียบเทียบความเร็วระหว่างการคำนวณและจากการทดลอง..... 57
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา 57
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับระยะเบรก..... 58
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรัศมีวงเลี้ยว 59

ลำดับสัญลักษณ์ (การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	แรงเสียดทานการเบรก	N
m_R	มวลที่กดลงบนล้อที่ทำการเบรก	kg
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m / s^2
m_{total}	มวลทั้งหมดของรถ	kg
a	ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก	m / s^2
s	ระยะทางในการเบรก	m
u	ความเร็วเมื่อรถเริ่มทำการเบรก	m / s
v	ความเร็วเมื่อรถหยุดนิ่ง	m / s
μ	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน	

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ลำดับสัญลักษณ์ (การเข้าโค้งบนโค้งราบ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F_c	แรงที่ทำให้ทรงตัวได้	N
f_s	แรงเสียดทาน	N
m	น้ำหนักของรถ	kg
v	อัตราเร็วของรถที่ทำให้รถเริ่มไถล	m / s
r	รัศมีความโค้งของการเลี้ยว	m
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m / s^2
μ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยางกับถนน	

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ลำดับสัญลักษณ์ (การจำลองความเร่งยานยนต์)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	แรงบิดมอเตอร์	$N \cdot m$
V	ความเร็ว	m / s
ρ	ความหนาแน่นอากาศ	kg / m^3
m	มวลทั้งหมด (มวลคน+มวลรถ)	kg
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m / s^2
r	รัศมีของล้อ	m
R_a	ความต้านทานของอาร์มาเจอร	Ω
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad / s
A	พื้นที่หน้าตัดของรถ	m^2
E_s	แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์	V
Ø	ค่าฟลักซ์ไฟฟ้า	$N \cdot m^2 / C$
E_s	แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์	V
G	อัตราทดเกียร์	
C_d	สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ	
K_m	ค่าคงที่ของมอเตอร์	
η_{gear}	ประสิทธิภาพเกียร์	
μ	สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ล้อ	

ลำดับสัญลักษณ์ (แรงต้านการเคลื่อนที่)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F_{te}	แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด	N
F_r	แรงต้านการหมุนของล้อ	N
m	มวลของรถ	Kg
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m / s^2
θ	มุมความลาดเอียงของทางชัน	$^\circ$
F_d	แรงต้านจากอากาศ	N
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg / m^3
A	พื้นที่หน้าตัดรถ	m^2
V	ความเร็วของรถ	m / s
F_{cl}	แรงต้านทางชัน	N
$F_{a,l}$	แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น	N
a	ความเร่งของรถ	m / s^2
$F_{\omega a}$	แรงของล้อที่ต้องการให้เกิดความเร่งเชิงมุม	N
I	โมเมนต์ความเฉื่อย	m^4
P	กำลังของมอเตอร์	W
f_r	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	
C_d	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน	
G	อัตราทดเกียร์	
η_g	ประสิทธิภาพของระบบเกียร์	

ลำดับสัญลักษณ์ (มอเตอร์ขับเคลื่อน)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	แรงบิดมอเตอร์	$N \cdot m$
F_{te}	แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด	N
r	รัศมีวงล้อ	m
ω	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์	rad / s
$\dot{\omega}$	ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์	rad/ s^2
V	ความเร็วของรถ	m / s
a	ความเร่งของรถ	m / s^2
G	อัตราทดเกียร์	
η_m	ประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
k_c	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทองแดง	
k_i	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียธาตุเหล็ก	
k_w	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทาน	

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ในปัจจุบัน การใช้ยานยนต์พลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบโลกยานยนต์ เนื่องจากปัญหามลภาวะต่างๆ เพราะยานยนต์พลังงานไฟฟ้าไม่มีการปล่อยก๊าซไอเสียออกสู่บรรยากาศ สามารถช่วยให้สภาวะแวดล้อมของโลกดีขึ้น หรืออย่างน้อยที่สุดจะไม่ทำให้สภาวะแวดล้อมปัจจุบันเสียหายไปมากกว่าเดิม และสามารถช่วยลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นอย่างมาก ซึ่งพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สามารถผลิตขึ้นเองได้ เช่น เขื่อน พลังงานงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น ประกอบกับส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้านั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนน้อยกว่าส่วนประกอบของการใช้เครื่องยนต์แบบสันดาป และยังสามารถปรับเปลี่ยนส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้าได้ง่ายกว่า ยานยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่มีแนวโน้มการขยายตัวสูงขึ้น

การพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจของประเทศนั้นไม่ได้ควบคู่ไปกับการพัฒนาทางด้านสิ่งแวดล้อม และปริมาณยานยนต์ที่มีมากขึ้นจากนโยบายของรัฐบาล ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงขึ้น การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้ดำเนินโครงงานจึงนำเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้ามาใช้กับรถฟอร์มูล่า โดยใช้มอเตอร์แบบสวมล้อมาเป็นตัวขับเคลื่อนที่ล้อหลังของรถฟอร์มูล่า ใช้สำหรับการศึกษาระบบและกลไกช่วงล่างของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า และทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อเป็นการลดปัญหามลภาวะต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งการลดการใช้เครื่องยนต์สันดาปเป็นการลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ และยังช่วยลดมลพิษทางเสียง และผู้ดำเนินโครงการมีความคิดที่จะออกแบบพัฒนาระบบช่วงล่างของรถฟอร์มูล่า ให้เหมาะกับการใช้ระบบไฟฟ้าแทนการใช้เครื่องยนต์สันดาป ซึ่งเป็นรถที่ใช้สำหรับศึกษาและพัฒนาต่อได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1) เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบช่วงล่างของรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า ในการประยุกต์ใช้กับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแทนการใช้เครื่องยนต์

2) เพื่อสร้างรถต้นแบบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์สวมล้อ สำหรับการศึกษาพัฒนาระบบช่วงล่างและระบบขับเคลื่อนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

3) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์สวมล้อ

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1) ออกแบบสร้างชิ้นส่วนสำหรับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 1 ที่นั่ง โดยใช้มอเตอร์ DC แบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 3 กิโลวัตต์ 72 โวลต์ 2 ตัว โดยติดตั้งมอเตอร์ที่ 2 ล้อหลัง

2) ใช้แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด (12V 65AH) จำนวน 6 ลูก

3) ใช้ระบบเบรกเป็นแบบดิสก์เบรกทั้งสี่ล้อ

4) ทำการทดสอบภาคสนามบริเวณภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการปฏิบัติการ	2560				2561			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2.ออกแบบชิ้นส่วนและระบบช่วงล่าง								
3.จัดหาและสั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์								

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)

แผนการปฏิบัติการ	2560				2561			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
4.สร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า								
5.ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ								
6.วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ								
7.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ล้อมาเป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาต่อ
2) ได้ความรู้การออกแบบช่วงล่างยานยนต์ไฟฟ้า
3) ได้ความรู้ทักษะด้านการทดสอบประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของยานยนต์ไฟฟ้า
4) ได้นำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในงานจริง
5) ได้ความรู้ความสามารถด้านการเขียนแบบจากโปรแกรม Autodesk Fusion 360

1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

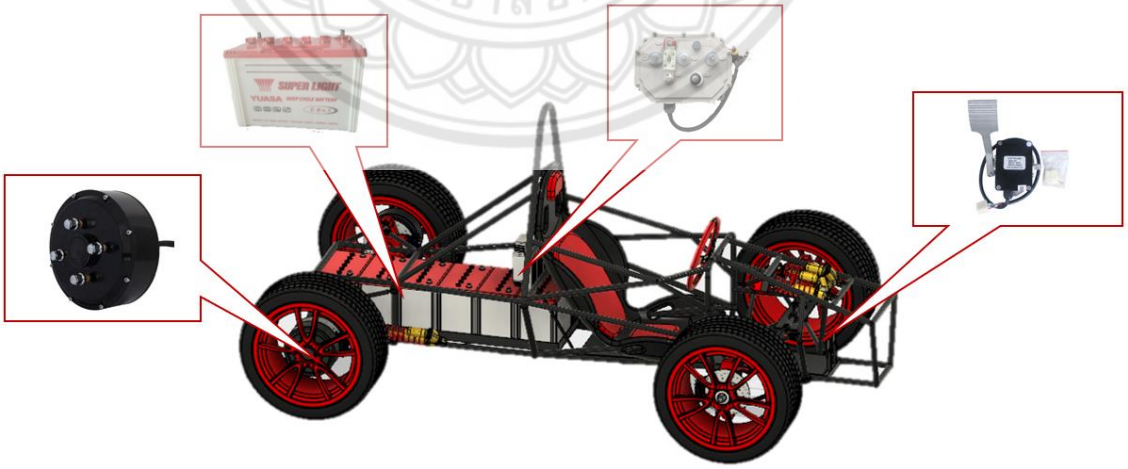
ชุดตัวควบคุมและมอเตอร์แบบสวมล้อ (72VDC 3kW) จำนวน 2 ตัว	50,000 บาท
แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด (12V65AH) จำนวน 6 ลูก	21,000 บาท
ล้อยางพร้อมสีแม็กซ์ จำนวน 4 ล้อ	5,500 บาท
ชุดคอถอดและพวงมาลัย	2,400 บาท
ชุดอุปกรณ์โครงสร้างและอุปกรณ์ไฟฟ้า	25,000 บาท
รวม	103,900 บาท

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

หลักการของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ จะใช้แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH จำนวน 6 ลูก ในการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านคอนโทรลเลอร์ ไปยังมอเตอร์แบบสวมล้อขนาด 3kW จำนวน 2 ตัว และมอเตอร์ที่ติดกับล้อจะทำการหมุนล้อโดยการเหยียบคันเร่ง
ส่วนประกอบหลักสำหรับการขับเคลื่อนรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่แสดงใน รูปที่ 2.1 มีดังนี้

1) มอเตอร์แบบสวมล้อ Hub Motor 3000W
2) แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH
3) คอนโทรลเลอร์ KLS7245H
4) คันเร่ง



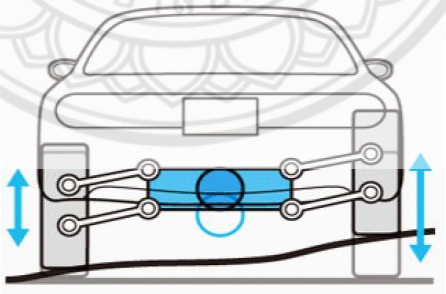
รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนไฟฟ้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2.2 ระบบกันสะเทือน (Suspension System)

ระบบกันสะเทือน ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวรถ เครื่องยนต์ ผู้โดยสาร และสิ่งของใดๆ ที่อยู่ในรถอีกทั้งยังช่วยรองรับแรงสะเทือนจากถนนและยังช่วยทำให้ผู้ขับรถสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปตามทุกสภาพ และความเร็วของถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกด้วยอุปกรณ์รองรับน้ำหนักที่สำคัญในระบบกันสะเทือนคือ สปริง (Spring) และโช๊คอัพ (Shock Absorber)

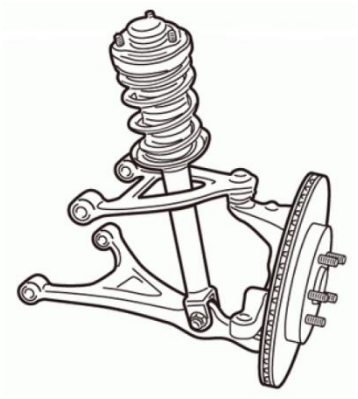
2.2.1 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension)

ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นระบบกันสะเทือนที่ได้รับการพัฒนาให้แยกหน้าที่ รองรับน้ำหนักและแรงสะเทือนระหว่างล้อซ้ายและล้อขวาออกจากกัน เมื่อล้อใดล้อหนึ่งตกหลุมหรือกระแทกสิ่งกีดขวางแรงสะเทือนที่เกิดขึ้นก็จะกระทำต่อล้อนั้นเสียส่วนใหญ่และจะส่งแรงสะเทือนนี้ไปสู่ตัวรถและอุปกรณ์ต่อเนื่องกันให้น้อยที่สุดเพื่อให้เกิดความนุ่มนวลในห้องโดยสารมากที่สุด รถที่ขับเคลื่อนล้อหน้า หรือขับเคลื่อนล้อหลัง ที่ใช้ระบบกันสะเทือนแบบอิสระจะมีข้อต่ออ่อน (Universal Joint) อยู่ระหว่างเพลาขับไปจนถึงล้อเพื่อที่ว่าเวลาล้อเคลื่อนที่ไปตามสภาพถนนแล้วเกิดตกหลุมหรือค่อมสิ่งกีดขวางใดๆ จุดศูนย์กลางของล้อจะไม่ตรงกับแกนเพลาหมุนข้อต่ออ่อนก็ยังคงส่งแรงหมุนนี้ไปตามเพลาหมุนไปจนถึงล้อได้แม้ว่าสภาพถนนจะเป็นอย่างไรก็ตาม



รูปที่ 2.2 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ
ที่มา : หนังสือ The Gran Turismo Magazine Beyond the Apex

รูปแบบระบบกันสะเทือนแบบอิสระที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ (Double Wishbone)



รูปที่ 2.3 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่
ที่มา : หนังสือ The Gran Turismo Magazine Beyond the Apex

ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะมีส่วนประกอบที่ดูคล้ายกับปีกนกอยู่ 2 ชิ้น ติดตั้งอยู่ด้านบนและด้านล่างอย่างละ 1 ชิ้น ด้านหนึ่งยึดติดกับโครงรถอีกด้านหนึ่งยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวที่ติดอยู่กับดุมล้อจะเป็นการติดตั้ง ปีกนกด้านบน (Upper Control Arm) ด้านหนึ่งเกาะติดกับโครงรถด้วยแกนยึดกับโครงรถอีกด้านหนึ่งยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวด้วยลูกหมาก (Ball Joint) และปีกนกด้านล่าง (Lower Control Arm) ก็จะยึดติดด้วยวิธีเดียวกัน ขณะเดียวกันแกนบังคับเลี้ยวจากพวงมาลัยจะมายึดเกาะติดกับข้อบังคับเลี้ยวตราบใดที่มีการหมุนพวงมาลัยเพื่อเลี้ยวซ้ายหรือขวาแกนบังคับเลี้ยวนี้จะ ดึงและดัน ข้อบังคับเลี้ยวให้เปลี่ยนทิศทางเมื่อข้อบังคับเลี้ยวเปลี่ยนทิศทางดุมล้อที่ยึดเกาะกับแกนบังคับเลี้ยวก็จะเปลี่ยนทิศทางด้วยทำให้ล้อเปลี่ยนทิศทางไปเช่นกัน สปริงและโช๊คอัพจะติดตั้งอยู่ระหว่างปีกนกด้านบนและด้านล่างเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนในขณะที่ล้อรถตกหลุม สปริงจะดีดล้อลงและในขณะที่ขับรถข้ามสิ่งกีดขวางสปริงจะพยายามส่งผ่านแรงสะเทือนไปที่โครงรถอย่างนุ่มนวล

2.3 พื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์

การเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นจำเป็นต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่มาจากเครื่องยนต์ โดยเครื่องยนต์จะถ่ายทอดการหมุนของเครื่องยนต์ไปยังล้อขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดแรงขับเคลื่อน ให้เคลื่อนที่ไปได้ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับพื้นถนนซึ่งทำให้รถเคลื่อนที่ไปได้ เมื่อนำแรงขับเคลื่อนทั้งหมดมาพิจารณา จะได้เป็นกำลังขับเคลื่อนซึ่งเป็นพื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์ได้ดังนี้

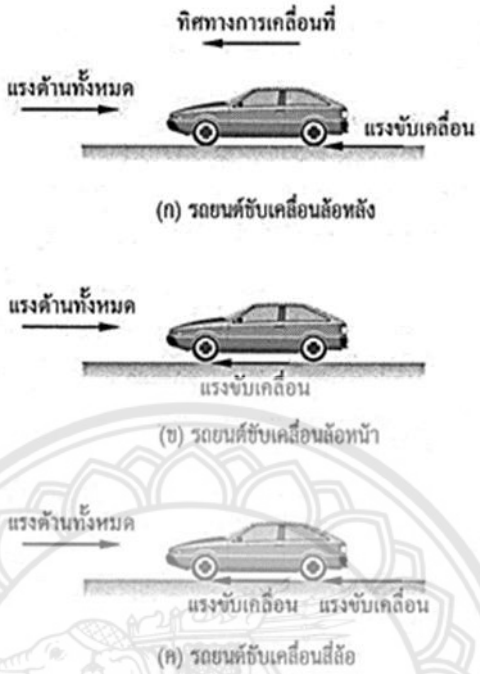
2.3.1 แรงต้านการเคลื่อนที่

รถยนต์จะเคลื่อนที่ได้ต้องอาศัยการส่งกำลังจากเครื่องยนต์ ผ่านระบบถ่ายทอดกำลังมาจนถึงล้อขับเคลื่อน เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นโดยอาศัยความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นผิวถนน ในขณะเดียวกันรถยนต์เกิดการเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้นด้วย ซึ่งจะเกิดแรงต้านในทิศที่สวนทางกับแรงขับเคลื่อนถ้ารถยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันจะได้ว่า

$$\text{แรงขับเคลื่อน} = \text{แรงต้านทั้งหมด} \qquad (2.1)$$

จากกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันกล่าวคือ วัตถุจะรักษาสภาวะอยู่นิ่งหรือสภาวะการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นตรง นอกจากมีแรงลัพธ์ซึ่งมีค่าไม่เป็นศูนย์มากระทำ คือ ถ้าวัตถุอยู่นิ่งก็ยังคงอยู่นิ่งเหมือนเดิมหรือถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ความเร็วคงที่ หรือความเร่งจะเป็นศูนย์ แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนมีค่ามากกว่าแรงต้านทั้งหมดรถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น หรือมีอัตราเร่งจนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดของการเคลื่อนที่อีกครั้ง แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมด รถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงหรือมีอัตราเร็วลดลง ในขณะที่อัตราเร็วลดลงนั้นแรงต้านทั้งหมดก็จะลดลงตามไปด้วย จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมดอีกครั้งและรถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ต่อไป

รูปที่ 2.4 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนกับแรงต้านทั้งหมดในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่



รูปที่ 2.4 แรงขับเคลื่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์มีการเคลื่อนที่กับแรงต้านทั้งหมด
ที่มา : http://www.auto2drive.com

กำลังจากเครื่องยนต์ที่ส่งไปยังล้อขับเคลื่อนจะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เพราะมีบางส่วนสูญเสียไปในระบบถ่ายทอดกำลัง เรียกว่าการสูญเสียในการถ่ายทอด (Transmission Loss) กำลังส่วนที่เหลือที่ล้อขับเคลื่อนจะใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านต่างๆ เพื่อให้รถยนต์เคลื่อนที่ได้ แรงต้านเหล่านั้นได้แก่

1) แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

2) แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

3) แรงต้านทางชัน (Gradient Resistance)

นอกจากนี้ ในขณะเร่งเครื่องยนต์ กำลังบางส่วนต้องสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของรถยนต์ เรียกว่าแรงต้านความเฉื่อย (Inertia Resistance)

1) แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

แรงต้านการหมุนของล้อรถนี้จัดว่าเป็นแรงต้านทานบนถนนอย่างหนึ่ง ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งในสภาพพื้นถนนที่ต่างกันจะมีแรงต้านทานการหมุนของล้อที่แตกต่างกันด้วย และแรงต้านทานการหมุนนี้ยังเกิดขึ้นได้จากอีกหลายปัจจัย เช่น ลักษณะโครงสร้างของขนาดของ

ยาง ลักษณะของดอกยางและสภาพของดอกยาง ความดันของลมในยาง ความเร็วของตัวรถ ความฝืดลูกปืนล้อ น้ำหนักของรถ โดยแรงต้านการหมุนของล้อนี้หาได้จาก

$$F_r = f_r w_r = f_r mg\cos\theta \qquad (2.2)$$

โดยที่ F_r คือ แรงต้านทานการหมุนของล้อ (N)

f_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

m คือ มวลของรถ (Kg)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก m/s^2

θ คือ มุมความลาดเอียงของทางชัน

จะเห็นได้ว่า แรงต้านการหมุนของล้อมีผลเนื่องมาจากล้อได้รับแรงกระแทกซึ่งเป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวถนนและหน้ายาง เป็นต้น และจากเหตุนี้แรงต้านทานจะขึ้นอยู่กับสภาพของถนน น้ำหนักรถ และในกรณีนี้มีการคำนึงถึงความลาดชั้นของพื้นถนนด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของยานยนต์ประเภทต่างๆ

ประเภทของยานยนต์	น้ำหนักรวม (กก.)	C_d	A (ตารางเมตร)	f_r
จักรยาน	130	0.9	0.30	0.0044
รถจักรยานยนต์	190	0.9	0.60	0.014
รถยนต์ส่วนบุคคลขนาดเล็ก (เช่นโคโรลล่า)	1,200	0.30	1.9	0.012
รถยนต์ส่วนบุคคลขนาดกลาง (เช่นแคมรี่)	1,600	0.32	2.2	0.013
รถ SUV ขนาดกลาง (เช่นฟอร์จูนเนอร์)	2,000	0.42	2.8	0.015
รถโดยสารในเมือง (30 ที่นั่ง)	13,300	0.9	8	0.009

ที่มา : หนังสือวิศวกรรมยานยนต์ ,ธีระยุทธ สุวรรณประธีป

จากตารางที่ 2.1 จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านการหมุนของล้อจะขึ้นอยู่กับประเภทของยานยนต์ โดยที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้นั้น จะประกอบด้วยล้อแม็กซ์จำนวน 4 ล้อ คือส่วนของล้อหน้าและล้อหลัง ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ เท่ากับ 0.012

2) แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

แรงต้านอากาศคือแรงฉุดที่เกิดขึ้นบนผิวของรถยนต์อันเนื่องมาจากแรงดันและแรงเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านรถยนต์ แรงต้านทานจากอากาศนั้นจะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถไปเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการหมุนได้ แต่ถ้าหากรถวิ่งด้วยความเร็วสูง แรงต้านทานจากลมจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง การออกแบบรูปทรงของรถยนต์จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักการทางอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์ เนื่องจากกำลังจากเครื่องยนต์ที่ถูกส่งไปยังล้อ จะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เพราะจะเกิดการสูญเสียในระบบถ่ายทอดกำลัง ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ตัวถังรถยนต์มีลักษณะลู่ลม เพื่อลดแรงต้านทานที่จะเกิดขึ้น โดยจากการทดลอง

$$F_d = \frac{1}{2}\rho A C_d V^2 \qquad \textbf{(2.3)}$$

โดยที่ F_d คือ แรงต้านจากอากาศ (N)

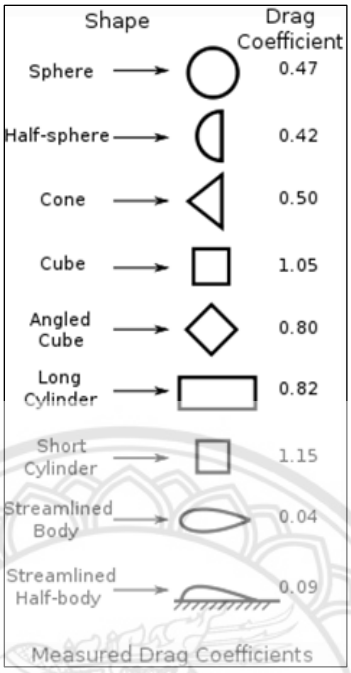
ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg / m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดรถ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)

V คือ ความเร็วของรถ (m / s)

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแรงต้านอากาศแปรผันกับความเร็วกำลังสอง ซึ่งหมายความว่าความเร็วของตัวรถมีผลต่อแรงต้านอากาศโดยตรง และแรงต้านอากาศยังมีผลเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของตัวรถอีกด้วย และที่สำคัญอีกหนึ่งค่าคือสัมประสิทธิ์ความต้านทานหรือ ซึ่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า มีพื้นที่หน้าตัดเป็นแบบ Long Cylinder มีค่าเท่ากับ 0.82 แต่เนื่องจากรถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีพื้นที่หน้าตัดที่เป็นโครงสร้าง ซึ่งอากาศที่ผ่านสามารถไหลผ่านได้ จึงพิจารณาให้ค่า ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเท่ากับ 0.7

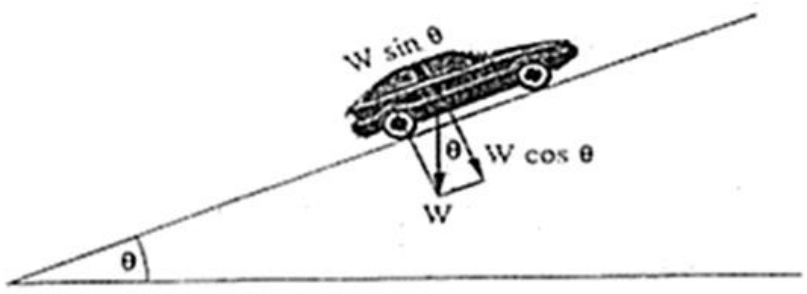


รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงต่างๆ

ที่มา : https://en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient

3) แรงต้านทางชัน (gradient resistance)

ขณะที่รถยนต์วิ่งขึ้นทางชัน กำลังจากเครื่องยนต์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (Gradient Resistance) ทำให้เครื่องยนต์ต้องทำงานหนักขึ้นมากกว่าการวิ่งบนถนนระดับแต่ในทางกลับกัน ถ้ารถยนต์วิ่งลงทางลาด เครื่องยนต์จะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลกแรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ น้ำหนักของรถยนต์ และความชันของถนน



รูปที่ 2.6 แรงต้านทางชัน

ที่มา : หนังสือวิศวกรรมยานยนต์ ,ธีระยุทธ สุวรรณประธีป

น้ำหนัก w ของรถยนต์สามารถแตกออกเป็นสองแนวตามรูปที่ 2.6 $W\sin\theta$ และ $W\cos\theta$ ซึ่งแรงต้านทางชันเกิดจาก $W\sin\theta$ คือ รถยนต์จะต้องเพิ่มแรงขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรง $W\sin\theta$ ดังนั้น แรงต้านทางชันคือ

$$F_{cl} = mg\sin\theta \qquad (2.4)$$

โดยที่ F_{cl} คือ แรงต้านทางชัน (N)

θ คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

เมื่อรวมแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ และแรงต้านทางชัน จะได้แรงต้านทั้งหมดของรถยนต์ในขณะที่กำลังวิ่งขึ้นทางชัน (ถ้ารถยนต์วิ่งบนถนนระดับ แรงต้านทั้งหมดจะมีเพียงแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ)

2.3.2 แรงเฉื่อย

แรงเฉื่อย (Inertia force) เป็นแรงอีกส่วนหนึ่งที่มีผลมากต่อแรงขับที่จะต้องการจากต้นกำลังโดยการที่ยานยนต์จะขับเคลื่อนได้ หมายถึงการออกตัวจากหยุดนิ่ง รวมทั้งการเร่งตัวเพื่อไปสู่ความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งก็หมายถึงว่าที่ความเร็วหนึ่งๆ นอกจากยานยนต์จะต้องการแรงขับที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่แล้ว ยังต้องการแรงขับที่เกินจากแรงต้านการเคลื่อนที่เพื่อสร้างความเร่งด้วย

แรงเฉื่อยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม

1) แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น (Acceleration force)

โดยปกติยานยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วค่าหนึ่งๆ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของยานยนต์จำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงให้กับยานยนต์ โดยแรงที่เพิ่มให้กับยานยนต์นี้คือแรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) สามารถแสดงได้ดังสมการ

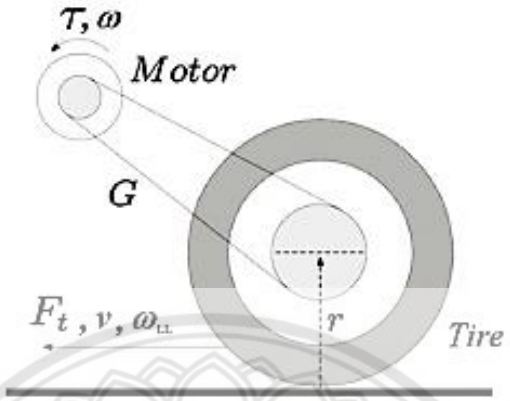
$$F_{a,l} = ma \qquad (2.5)$$

โดยที่ $F_{a,l}$ คือ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น (N)

m คือ มวลของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

a คือ ความเร่งของรถ (m/s^2)

2) แรงเพื่อความเร่งเชิงมุม



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน

ที่มา : https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/31638/45787

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าแรงบิดของล้อเท่ากับ $T = \frac{F_{te} r}{G}$ เมื่อ r คือ **รัศมีของยางและ** F_{te} **คือแรงที่พยาย**ามดึงจากการส่งกำลังของมอเตอร์ ถ้า G คืออัตราทดเกียร์ของระบบ**มอเตอร์เชื่อมไปยังล้อ** และ T **คือแรง**บิดของมอเตอร์แล้วจะได้สมการคือ

$$F_{te} = \frac{G}{r} T \qquad \textbf{(2.6)}$$

ทำการแก้สมการอีกครั้งดังนี้

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

ดังนั้น

$$\omega = G\frac{v}{r} rad/s \qquad \textbf{(2.7)}$$

ในทำนองเดียวกัน

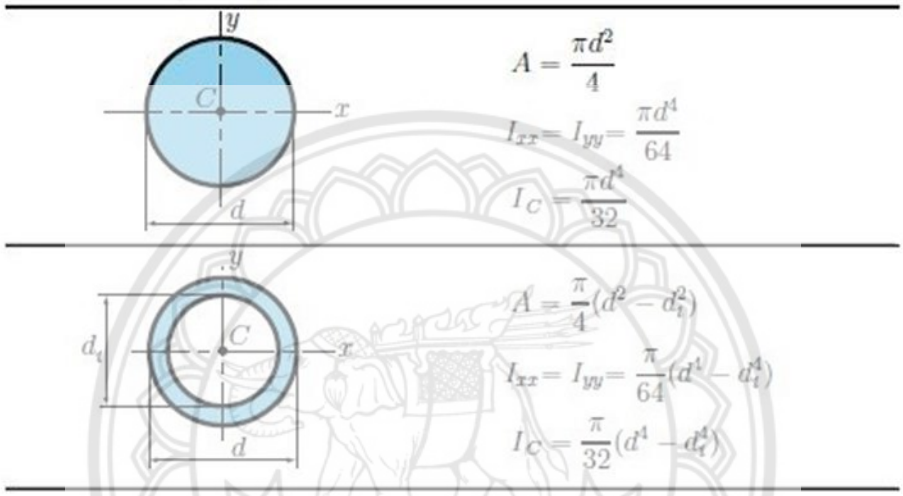
$$\dot{\omega} = G\frac{a}{r} rad/s^2$$

แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการเร่งความเร็วเชิงมุมนี้คือ

$$T = IG\frac{a}{r} \tag{2.8}$$

ตารางที่ 2.2 สมการการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่างๆ

Table: Area inertia properties for some common cross sections



ที่มา : https://www.pinterest.co.uk/pin/355714070561125916/?lp=true

วงกลมตัน $$I = \frac{\pi d^4}{64} \tag{2.9}$$

วงกลมกลวง $$I = \frac{\pi(d^4 - d_i^4)}{64} \tag{2.10}$$

เมื่อ I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์ของมอเตอร์ แรงของล้อที่ต้องการให้ความเร่งเชิงมุม ($F_{\omega a}$) ที่พบโดยการรวมสมการ จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.8) จะได้

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} IG\frac{a}{r} \tag{2.11}$$

$$F_{\omega a} = I\frac{G^2}{r^2}a \tag{2.12}$$

ในสมการที่ (2.12) เราได้สันนิษฐานว่าระบบเกียร์มีประสิทธิภาพ 100% แต่ในความเป็นจริงระบบจะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นด้วย ทำให้ระบบเกียร์มีประสิทธิภาพต่ำกว่า 100% ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) จะได้ว่า

$$F_{\omega a} = I\frac{G^2}{\eta_g r^2}a \qquad \textbf{(2.13)}$$

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

η_g คือ ประสิทธิภาพของระบบเกียร์

2.3.3 แรงรวมทั้งหมดจากการส่งกำลังของมอเตอร์

$$F_{te} = F_r + F_d + F_{cl} + F_{a,l} + F_{\omega a} \qquad \textbf{(2.14)}$$

โดยที่ F_r คือ แรงต้านการกลิ้ง (N)

F_d คือ แรงต้านทานจากอากาศ (N)

F_{cl} คือ แรงต้านทางลาดชัน (N)

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

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

จากที่กล่าวมา แรงที่นำมาใช้ในการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้นมีเพียง 4 แรง คือ แรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านทานจากอากาศ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้นและแรงของล้อที่ต้องการให้เกิดความเร่ง เนื่องจากรถวิ่งที่พื้นถนนระดับ จึงไม่นำแรงต้านทางลาดชัน มาพิจารณาในการออกแบบ

2.3.4 กำลังของมอเตอร์ (P)

คือการรวมแรงที่กระทำกับยานยนต์ทั้งหมดเพื่อที่จะหากำลังของมอเตอร์ ซึ่งเราสามารถเขียนสมการในรูปของกำลังจะได้ดังนี้

$$P = F_{te} \cdot V \quad (W) \tag{2.15}$$

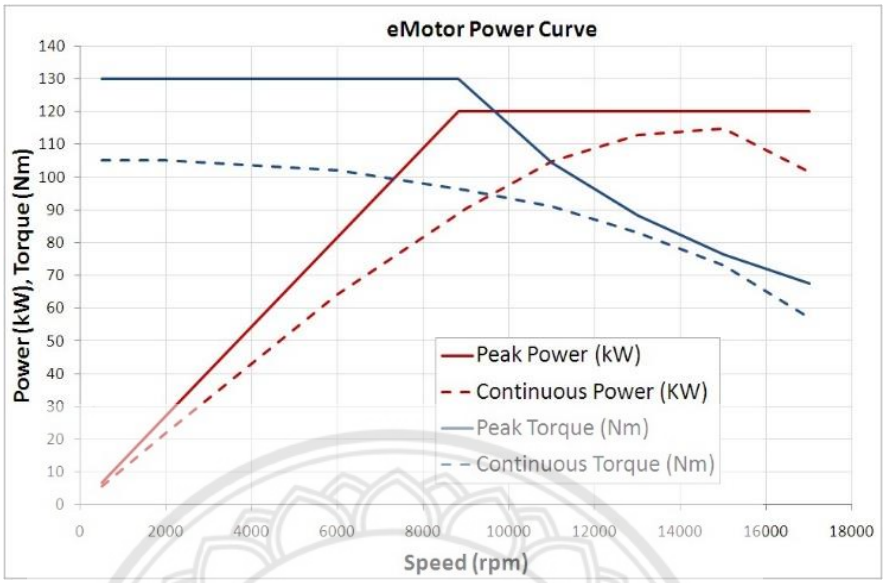
โดยที่ V คือ ความเร็ว (m/s)

F_{te} คือ แรงรวมทั้งหมดในระบบ (N)

2.4 มอเตอร์ขับเคลื่อน

สำหรับการใช้งานยานยนต์ เพื่อให้ได้สมรรถนะในการขับขี่ที่ดีนั้น มอเตอร์ควรสามารถจ่ายแรงบิดและกำลังขับได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้อัตราเร่งในการออกตัวดีหรือในขณะที่ขับเคลื่อนที่ความเร็วสูง มอเตอร์จะต้องให้แรงบิดที่เพียงพอลักษณะการแปรผันระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนดังรูปที่ 2.8 เมื่อที่ความเร็วเป็นศูนย์นั้นแรงบิดจะมีค่าสูงสุดและจะคงที่จนถึงความเร็วรอบหนึ่งที่เรียกว่าความเร็วฐานของมอเตอร์ซึ่งเป็นค่าความเร็วสำหรับการกำหนดค่ากำลังมอเตอร์ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเกินความเร็วฐาน แรงบิดจะลดลงและทำให้กำลังขับคงที่ โดยมอเตอร์ที่ให้แรงบิดสูงที่รอบต่ำจะทำให้การออกตัวและการขึ้นทางชันที่ดี

สำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์นั้น นอกจากลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วรอบแล้ว มอเตอร์ไฟฟ้าต้องมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมอื่นๆ เช่น มีประสิทธิภาพสูงในช่วงความเร็วรอบและช่วงแรงบิดที่กว้าง และให้การทำงานแบบ Regenerative Braking ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังต้องมีความทนทานต่อสภาวะการทำงานต่างๆ ทั้งอุณหภูมิสูง การสั่นสะเทือน และการขาดการบำรุงรักษา



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อน

ที่มา : http://www.mclarenelectronics.com/Content/Products/E-Motor/E-MotorPerformance.jpg

2.5.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนทางกลโดยใช้กลไกของแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสร้างออกมาได้หลากหลายรูปแบบตามชนิดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและโครงสร้างการส่งกำลัง โดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ได้แก่

มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motors) มอเตอร์ชนิดนี้จะวางโครงสร้างสลับกับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน โดยมีแกนหมุน (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวรแต่ขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ที่สเตเตอร์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำมีไม่ต่ำกว่าสามชุด มอเตอร์ชนิดนี้สามารถทำงานได้โดยการจ่ายไฟเข้าไปยังขดลวดแต่ละชุดเป็นเฟสสลับกันไปเรื่อยๆ เพื่อจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงและผลักแกนหมุนให้หมุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจจับตำแหน่งเพื่อเริ่มทำงานโดยใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Sensor) มอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับแรงบิดได้โดยปรับการจ่ายกระแสไฟ และปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับความถี่ในการสลับกระแสไฟของขดลวด ซึ่งสามารถเรียกการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุนตรงกับความเร็วของการหมุนของสนามแม่เหล็กว่าเป็นการทำงานแบบ Synchronous นั่นเอง แต่มอเตอร์ชนิดนี้ก็มีข้อเสียคือต้องการวงจรขับดันมอเตอร์ที่ซับซ้อน

รูปที่ 2.9 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
ที่มา : http://www.cnqsmotor.com/en

รูปแบบของมอเตอร์ที่ใช้ในฟอร์มูล่าไฟฟ้า มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านแบบดุมล้อ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 คือ มอเตอร์ที่มีโครงสร้างการวางของตัวมอเตอร์อยู่ในโครงของตัวล้อ ดังแสดงในรูป 2.10 มักจะนิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะจักรยานไฟฟ้า โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีการต่อสายไฟจ่ายพลังงานผ่านทางแกนของล้อ โครงสร้างทั้งหมดของ มอเตอร์จะวางตัวสลับที่กับมอเตอร์ปกติ ดังแสดงในรูป 2.11

รูปที่ 2.10 แสดงรูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวมล้อ

2.5.2 แบบจำลองมอเตอร์

ในระบบยานยนต์ไฟฟ้านั้น แบบจำลองมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมการแรงบิดมอเตอร์ ความเร็วเชิงมุม และประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยจะถูกแสดงตามลำดับดังนี้

1) แรงบิดมอเตอร์ (T)

$$T = F_{te} r \quad (N.m) \qquad \textbf{(2.16)}$$

2) ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ $$\omega = G\frac{v}{r} \quad (rad / s) \qquad (2.17)$$

ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ $$\dot{\omega} = G\frac{a}{r} \quad (rad / s^2) \qquad (2.18)$$

3) ประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งที่มาสำคัญของการสูญเสียในการแปรงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้าทุกประเภทและสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักดังนี้ ความสูญเสียที่ทองแดง เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของสายและบางส่วนของพลังงานไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานไฟฟ้าผลของความร้อนกระแสไฟฟ้า เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วรอบในการหมุน โดยค่าประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า จะใช้ค่าจากตารางที่ 2.3 สเปคของมอเตอร์ที่ผ่านการทดสอบจากโรงงานแล้ว

$$\eta_m = \frac{outputpower}{inputpower}$$

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

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสเปคมอเตอร์ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

QS 3000W 205 (50H) E-car Extra/V3 Type Hub Motor

No.	Parameter Value Units Notes	Value	Units	Notes
1	Motor Type	BLDC PMSM Outer Rotor E-car Hub Motor		
2	Axle Configuration	Single Axle		
3	Motor Diameter	222	mm	
4	PCD	4*100	mm	Optional: 4*114.3, 5*100 etc.
5	CB	60	mm	Optional: ≥60mm
6	Magnet Height	50	mm	
7	Number of Pole Pairs	16	Pairs	32 pcs
8	Rated Output Power	3000	Watt	
9	Peak Output Power	5097	Watt	Peak 6000W
10	Speed(depends on wheel size)	/	KPH	Optional: 40-70KPH
11	Matched Wheel	12inch		Optional: ≥12inch
12	Voltage	72	Volt	Optional: 48V-96V
13	Max RPM	956.5	RPM	
14	kV	13.28	RPM/V	
15	Continuous Input Current	45.3	Ampere	
16	Peak Input Current	79.05	Ampere	
17	Peak Phase Current	280	Ampere	in short time
18	Rated Torque	30.8	N.m	
19	Max Torque	≥182.2	N.m	
20	Max. Efficiency	90.5	%	88%~92%
21	Efficiency 80 % @ RPM	407.7~932.6	RPM	
22	Brake System	Disc Brake		PCD3*58mm, M8
23	Holder	Aluminum	-	
24	Number of Motor Phases	3	-	
25	Hall Sensors	2	Set	One for spare, Waterproof connector
26	Hall Sensor Phasing	120	°	
27	Hall Working Voltage	5	V	12(limitation)
28	Cross Section of Phase Wire	10	mm²	
29	Thermic Probe	KTY83/122		Customizable
30	Max. Operating Temperature	70	°C	Peak 120°C
31	Waterproof Grade	IP54	-	
32	Color	Black		
33	N.W./G.W.	17/18.5	kg	
34	Package	34*34*33	cm³	Carton

ที่มา : http://www.cnqsmotor.com/en

รูปที่ 2.11 ภาพภายในมอเตอร์

ที่มา : http://www.cnqsmotor.com/en

2.5 การจำลองความเร่งยานยนต์ (modeling vehicle acceleration)

การเร่งความเร็วของรถยนต์หรือรถจักรยานยนต์เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพที่สำคัญแม้ว่าจะไม่มีมาตรฐานที่ใช้ในการวัด โดยปกติแล้วจะใช้เวลาในการเร่งจากหยุดนิ่งถึง 60 ไมล์ต่อชั่วโมงหรือ 30 หรือ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเป็นค่าที่ใกล้ที่สุดกับมาตรฐาน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าคือ 0-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 0-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ไม่ใช่ค่าสำหรับยานพาหนะทั้งหมด)

ตัวเลขการเร่งความเร็วดังกล่าวพบได้จากการจำลองหรือการทดสอบจริงของยานยนต์ สำหรับการจำลองสมรรถนะของเครื่องยนต์สันดาปภายในจะกระทำที่กำลังสูงสุด หรือ ที่ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดกว้างที่สุด สำหรับการจำลองสมรรถนะของยานยนต์ไฟฟ้าจะกระทำที่แรงบิดสูงสุด

เราจะเห็นได้ว่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าคือ ฟังก์ชั่นของความเร็วเชิงมุม ในกรณีส่วนใหญ่ความเร็วต่ำสุดคือค่าแรงบิดสูงสุด เป็นค่าคงตัวจนกระทั่งความเร็วของมอเตอร์ถึงค่าวิกฤตหลังจากนั้นแรงบิดจะตก

ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนเกียร์และรัศมีของล้อ ในสมการที่ (2.17)

จากสมการแรงบิดมอเตอร์ $$T = K_m \Phi I \quad \textbf{(2.20)}$$

และ $$I = \frac{V}{R_a} = \frac{E_s - E_b}{R_a} = \frac{E_s}{R_a} - \frac{K_m \Phi}{R_a}\omega$$

ดังนั้น $$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a}\omega \quad \textbf{(2.21)}$$

จากสมการสม (2.14) โดยไม่คิดแรงต้านทางชัน

$$F_{te} = F_r + F_d + F_{a,l} + F_{\omega a}$$

จะได้สามารถจำลองความเร่งจากสมการ

$$\frac{\text{Gearratio}}{r} \times \eta_{gear} \times T = f_r \times mg + \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 + ma + m_{5\%}a \quad \textbf{(2.22)}$$

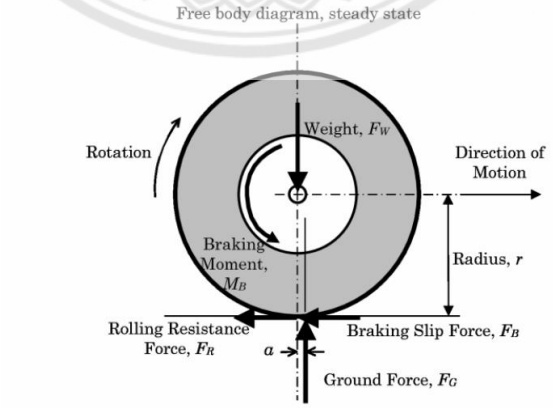
ดังนั้น สามารถจำลองความเร็วได้จากสมการ

$$\frac{\text{Gearratio}}{r} \times \eta_{gear} \times T = f_r \times mg + \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 + (m + m_{5\%})\frac{dv}{dt} \qquad \textbf{(2.23)}$$

โดยที่

K_m	คือ	ค่าคงที่ของมอเตอร์	Ø	คือ	ค่าฟลักซ์ไฟฟ้า
R_a	คือ	ความตานทานของอารมาเจอร	T	คือ	ค่าทอร์ก
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม	G	คือ	อัตราทดเกียร์
r	คือ	รัศมีของล้อ	η_{gear}	คือ	ประสิทธิภาพเกียร์
g	คือ	แรงโน้มถ่วงของโลก	m	คือ	มวลทั้งหมด (มวลคน+มวลรถ)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรถ	V	คือ	ความเร็ว
f_r	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ล้อ	E_s	คือ	แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์
ρ	คือ	ความหนาแน่นอากาศ มีค่า 1.2 kg/m^3	C_d	คือ	สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ

2.6 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก



รูปที่ 2.12 แรงกระทำกับรถในทำการเบรก

ที่มา : https://www.nap.edu/read/23038/chapter/5#23

จากรูปที่ 2.12 เมื่อรถกระทำการเบรกจะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานการเบรก F ซึ่งสามารถหาแรงดังกล่าวได้จากสมการ

$$F = \mu_k m_R g \quad \textbf{(2.24)}$$

และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน $F = m_{total} a$ **(2.25)**

นำสมการ (2.24) มาเท่ากับ (2.25)

จะได้ $\mu_k m_R g = m_{total} a$

จัดรูปสมการ $$a = \frac{\mu_k m_R g}{m_{total}} \quad \textbf{(2.26)}$$

เมื่อ μ_k คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (หาได้จากตารางที่ 2.4)

m_R คือ มวลที่กดลงบนล้อที่ทำการเบรก

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

m_{total} คือ มวลทั้งหมดของรถ

a คือ ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต (μ_s)และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k)

ผิวสัมผัส	μ_s	μ_k
ไม้กับไม้	0.70	0.40
เหล็กกล้ากับเหล็กกล้า	0.74	0.57
อะลูมิเนียมกับเหล็กกล้า	0.61	0.47
ทองแดงกับเหล็กกล้า	0.53	0.36
ทองเหลืองกับเหล็กกล้า	0.51	0.44
แก้วกับแก้ว	0.94	0.40
ทองแดงกับแก้ว	0.68	0.53
ยางกับคอนกรีต (แห้ง)	1	0.80
ยางกับคอนกรีต (เปียก)	0.30	0.25
ล้อยางกับถนน (แห้ง)	0.90	0.65
ล้อยางกับถนน (เปียก)	0.70	0.55

ที่มา : http://www.vcharkarn.com/lesson/1120

การหาระยะทางในการเบรกหาได้จากสมการการเคลื่อนที่

$$s = \frac{u^2 - v^2}{2a} \qquad \textbf{(2.27)}$$

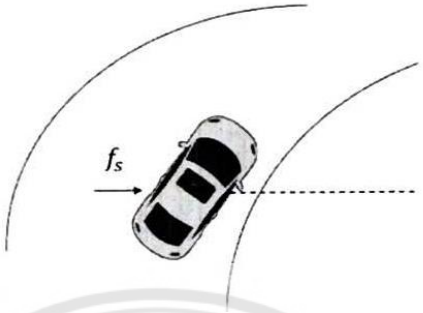
เมื่อ s คือ ระยะทางในการเบรก

v คือ ความเร็วเมื่อรถหยุดนิ่ง (มีค่า = 0)

u คือ ความเร็วเมื่อรถเริ่มทำการเบรก

a คือ ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก (หาได้จากสมการ 2.26)

2.7 การเข้าโค้งบนโค้งราบ



รูปที่ 2.13 แรงกระทำต่อรถในขณะเลี้ยวบนถนนโค้งราบ
ที่มา : หนังสือ APcen Physics

ขณะที่รถเลี้ยวโค้งบนถนนโค้งราบ ซึ่งมีแนวทางการเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมดังรูป 2.13 ดังนั้นต้องมีแรงสู่ศูนย์กลางกระทำต่อรถ เมื่อพิจารณาแรงกระทำต่อรถในแนวระดับพบว่าขณะรถเลี้ยวพยายามไถลออกจากโค้ง จึงมีแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อล้อรถในทิศทางพุ่งเข้าในแนวผ่านศูนย์กลางความโค้ง ดังนั้น แรงเสียดทาน จะเท่ากับ แรงสู่ศูนย์กลาง

แรงเสียดทาน = แรงสู่ศูนย์กลาง

$$f_s = F_C$$

$$\mu_s N = ma_c$$

$$\mu_s mg = m\frac{V^2}{r}$$

$$r = \frac{V^2}{\mu_s g} \qquad \textbf{(2.28)}$$

โดยที่ r คือ รัศมีความโค้งของการเลี้ยว มีหน่วยเป็น (m)

V คือ อัตราเร็วของรถที่ทำให้รถเริ่มไถล มีหน่วยเป็น (m/s)

μ_s คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยางกับถนน (หาได้จากตารางที่ 2.4)

g คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก 9.81 มีหน่วยเป็น (m/s^2)

2.8 การหาจุดศูนย์กลางมวล

จุดศูนย์ถ่วง หรือ จุดศูนย์กลางของความโน้มถ่วง จะเป็นจุดที่แรงลัพธ์ของแรงดึงดูดของโลกต่อส่วนต่างๆ ของวัตถุกระทำ ในสถานการณ์ธรรมดาทั่วๆ ไป ค่าสนามความโน้มถ่วงมีค่าคงที่สม่ำเสมอตลอดทั่ววัตถุที่พิจารณาจุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์กลางมวลจะเป็นจุดเดียวกัน แต่กรณีที่วัตถุมีขนาดใหญ่มาก จนแต่ละส่วนของวัตถุนั้นอยู่ในสนามความโน้มถ่วงที่มีค่าต่างกัน เป็นไปได้ที่จุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์กลางมวลจะอยู่คนละจุดกัน เราอาจจะกล่าวได้ในอีกแง่หนึ่งว่า จุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ คือ จุดที่น้ำหนักรวมทั้งหมดของวัตถุได้พิจารณาว่ารวมอยู่ที่จุดนั้น หาก พิจารณาเป็นแนวดิ่งเส้นตรงเราพบว่า น้ำหนักรวมทั้งหมดของวัตถุต้องผ่านแนวดิ่งเส้นตรงนี้ ผ่านจุดที่เราเรียกว่า จุดศูนย์ถ่วง จะทำให้วัตถุที่วางตัวอยู่ในแบบนี้อยู่ในสภาวะสมดุล สำหรับการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้นการหาจุดศูนย์กลางมวลของรถ (CG) หาได้จากโปรแกรม Autodesk Fusion 360

2.9 แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2.9.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นทางเลือกของแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานต่อน้ำหนักต่ำแต่ก็ยังมีราคาเริ่มต้นที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบต่อหน่วยพลังงานด้วย ดังนั้น จึงเหมาะกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วต่ำ ทั้งนี้ก็ด้วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ในตัวรถ ตัวอย่างการใช้งานก็เช่น รถกอล์ฟไฟฟ้า รถยกไฟฟ้า หรือรถโดยสารไฟฟ้าขนาดเล็กที่นิยมใช้กันอยู่อย่างกว้างขวางในประเทศไทย ในปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่วกรดจะใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วสูงหรือใช้กับรถกระบะที่มีพื้นที่พอติดตั้งแบตเตอรี่ โดยชนิดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด มีดังนี้

1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบน้ำ เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในระบบโซล่าเซลล์และระบบพลังงานทางเลือก เพราะเมื่อเปรียบเทียบกัน ต่อ Ah แล้ว เป็นชนิดแบตเตอรี่ที่คุ้มค่าต่อการลงทุนที่สุด แต่ก็เป็นแบตเตอร์รี่ที่ต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เช่น การเติมน้ำกลั่น หรือ การทำความสะอาดขั้วแบตเตอรี่ ส่วนการติดตั้ง ต้องติดตั้งในพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเท และวางในลักษณะตั้งขึ้นได้เท่านั้น

2) แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบแห้ง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่ใช้เจลเป็นวัสดุดูดซับกรด เรียกว่า แบตเตอรี่ แบบเจล และประเภทที่ใช้แผ่นซิลิกาไฟเบอร์เป็นตัวดูดซึม เรียกว่า แบตเตอรี่ แบบ AGM ซึ่งลักษณะการแบ่งประเภทแบบนี้เป็นการแบ่งตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ ของ แบตเตอรี่ แต่การแบ่งประเภทของ แบตเตอรี่ ตะกั่วกรดยังแบ่งได้อีกลักษณะหนึ่งคือ การแบ่งประเภทตามลักษณะ

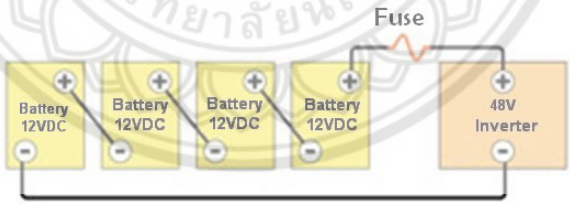
การใช้งาน โดยจะแบ่งเป็น แบตเตอรี่ แบบใช้งานทั่วไป หรือแบบที่ใช้สำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์ แบบคายประจุลึกและแบบลูกผสม

ความแตกต่างระหว่าง แบตเตอรี่ แบบเจลและแบบ AGM คือ แบตเตอรี่ แบบเจลจะเป็นแบตเตอรี่ ที่แห้งกว่าแบบ AGM ถ้าเปลือกนอกของมันแตกจะไม่มีน้ำกรดไหลหรือซึมออกมา แต่สำหรับแบบ AGM จะซับน้ำกรดได้ประมาณ 95% ดังนั้นถ้าเปลือกของมันแตกแม้น้ำกรดจะไหลออกมา แต่ก็อาจจะมีการซึมออกมาได้บ้างเล็กน้อย

ในปัจจุบันจะนิยมใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ AGM มากกว่าแบบเจล ส่วนแบบเจลมีการใช้น้อยลง เนื่องจากมีข้อเสีย คือ เจลมักจะละลายเมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่ร้อยและถ้าเกิดการโอเวอร์ชาร์จขึ้น เจลอาจจะเปลี่ยนรูปเป็นสารเหนียว ๆ ที่เรียกว่า วอยด์(Void) ไปเกาะติดแน่นอยู่ที่แผ่นธาตุขัดขวางการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างอิเล็กทรอไลต์และแผ่นธาตุ ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง

2.9.2 การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เป็นการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม การต่อแบตเตอรี่แบบนี้แบตเตอรี่ถูกเชื่อมต่อกันโดย ขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ตัวถัดไป ในการต่อแบบอนุกรมความจุที่ได้จะเท่ากับแบตเตอรี่แบบเดี่ยว แรงดันไฟฟ้าจะเท่ากับผลรวมแรงดันของแบตเตอรี่แต่ละตัว ซึ่งแสดงไว้ใน รูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

ที่มา : www.diy-solarcell.com/สาระน่ารู้พลังงาน%20(ความหมายของพลังงาน)แบตเตอรี่%20(Battery).html

2.10 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง

ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังในยานยนต์ไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการรับพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน และแปรให้เป็นระดับแรงดันที่ต้องการ เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้านั้นมีอุปกรณ์หลายชิ้นที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่ต่างกันไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ หรือชุดประจุไฟฟ้า

2.10.1 องค์ประกอบชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง

1) ตัวรับรู้

ตัวรับรู้ ทำหน้าที่หลักในการดูสถานะของมอเตอร์ในกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า หรือดูสถานะของแบตเตอรี่ในกรณีชุดควบคุมไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่ เมื่อรับรู้สถานะปัจจุบันแล้วตัวรับรู้ก็จะส่งข้อมูลสถานะให้ชุดควบคุมตัดสินใจสั่งงาน

ตัวรับรู้ทางกลเป็นอุปกรณ์ที่พบมากในการควบคุมมอเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้การตอบสนองตามที่ต้องการ ชุดควบคุมไฟฟ้ามีความจำเป็นที่จะต้องรู้สถานะทางกลของมอเตอร์เพื่อที่จะสามารถปรับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการทำงาน

2) ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง

ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการปรับกระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบที่ต้องการ ถ้าเป็นวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ความเร็วรอบของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับแรงดัน ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง จะทำการจ่ายไฟฟ้ากำลังให้มีระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ตามแต่ได้รับคำสั่งจากส่วนควบคุม ในกรณีที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังจะทำการจ่ายไฟฟ้ากำลังกลับขั้ว

3) ส่วนควบคุม

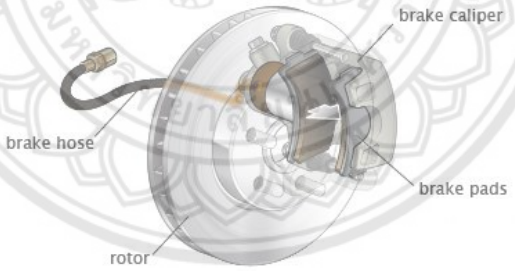
ส่วนควบคุมทำหน้าที่ในการนำความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น ความเร็ว อัตราเร่ง มาประมวลผลเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้ แล้วตัดสินใจสั่งงานส่วนขยายไฟฟ้ากำลังให้สร้างรูปแบบของไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมออกมาเพื่อส่งไปยังอุปกรณ์ปลายทาง ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์หรือชุดแบตเตอรี่

2.11 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

เบรกเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หน่วงความเร็วในขณะที่รถคลื่อนที่และทำให้รถหยุดหรือทำให้รถสามารถหยุดนิ่งบนพื้นเอียงได้ ซึ่งนับได้ว่าเบรกเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่ โดยระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ ดิสก์เบรก

2.11.1 ดิสก์เบรก (Disk Brakes)

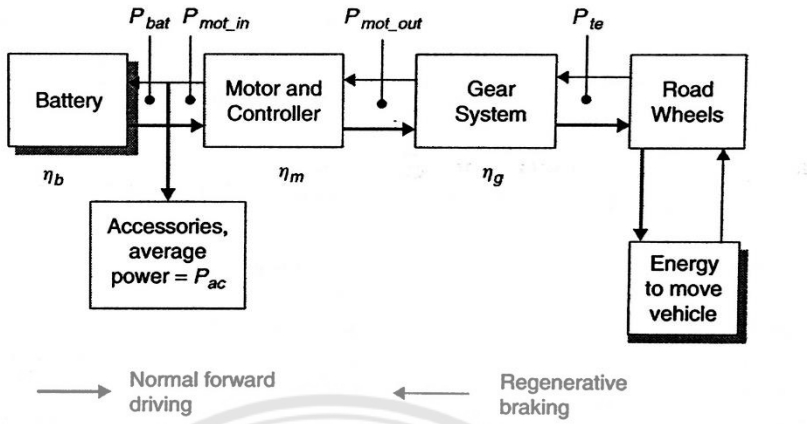
ดิสก์เบรก (Disk Brakes) เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งในระบบห้ามล้อของรถยนต์ ซึ่งก็จะทำหน้าที่ในการลดความเร็วและทำให้รถหยุดได้ในทันที โดยดิสก์เบรกจะประกอบด้วยจานโรเตอร์หรือจานดิสก์เบรกที่ทำจากเหล็กหล่อและติดตั้งให้หมุนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับล้อรถยนต์ โดยที่มันจะหมุนอยู่ระหว่างผ้าเบรกทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และถูกผลักดันเพื่อให้เกิดความฝืดขึ้นที่จานโรเตอร์ด้วยแรงเบรกที่เกิดจากลูกสูบซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันของไฮดรอลิกในขณะที่เหยียบเบรก เบรกชนิดนี้จะยอมให้เกิดการสึกหลอที่ผ้าเบรก โดยรักษาความดันบนพื้นผิวสัมผัสของผ้าเบรกให้คงที่ เบรกประเภทนี้จะมีข้อดี คือ มีพื้นผิวเปิดที่สัมผัสกับบรรยากาศได้มากขึ้น ทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการหล่อเย็นไปในตัว



รูปที่ 2.15 การสัมผัสของผ้าเบรกกับจานโรเตอร์
ที่มา : https://repairpal.com/estimator/brake-pad-replacement-cost

2.11.2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative brake)

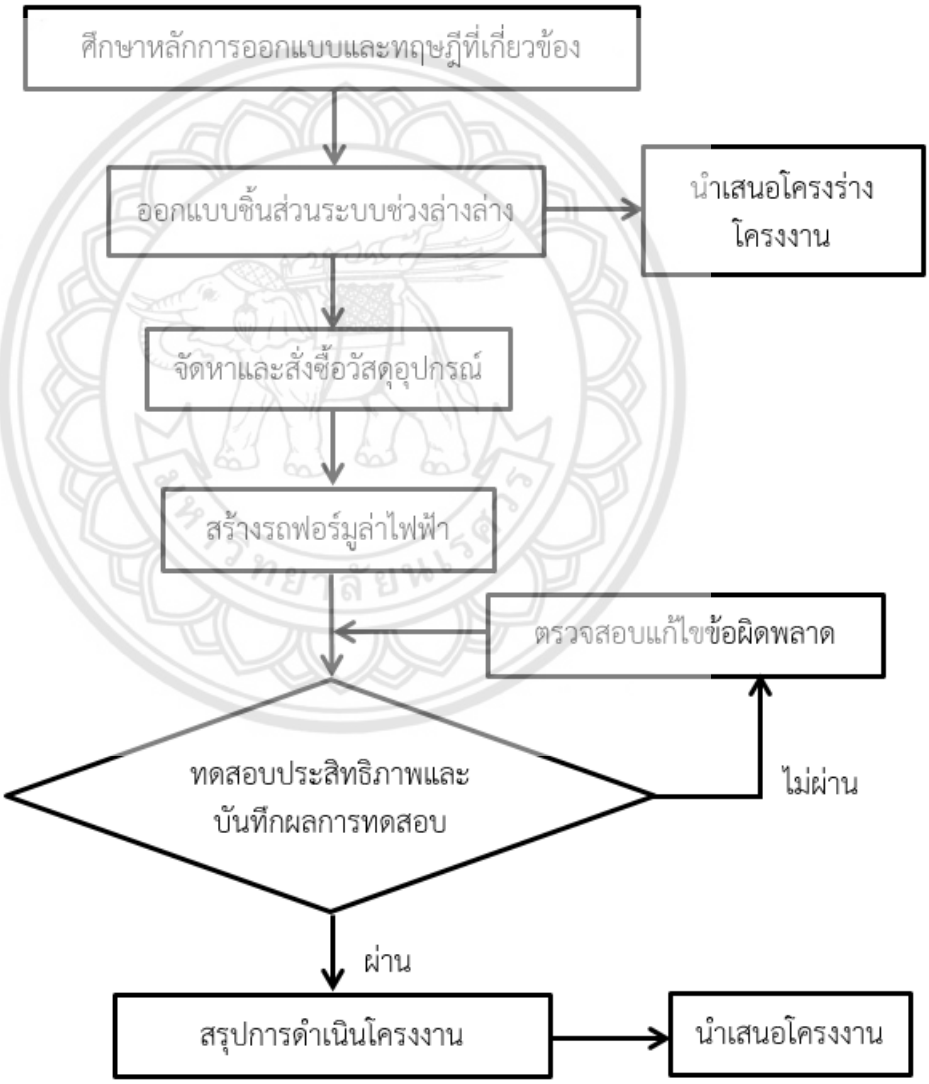
รถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อรถเบรก มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งไฟฟ้ากลับไปยังแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่ที่ได้ในช่วงทำการเบรก ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Energy flow in the classic battery-powered electric vehicle, which has regenerative braking

ที่มา : หนังสือElectric Vehicle Technology Explained

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

การดำเนินโครงงานตามแผนผังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มจาก ศึกษาหลักการการออกแบบและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการออกแบบชิ้นส่วนคอม้า ชิ้นส่วนปีกนกสำหรับล้อหลังและรางวางแบตเตอรี่ แล้วนำเสนอโครงร่างโครงงาน จะทำการจัดหาและสั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในประกอบสร้างและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพภายในมหาวิทยาลัยนเรศวรแล้วสรุปผลการดำเนินโครงการ

3.1 การออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

3.1.1 หลักการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

หลักการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเป็นการนำเอาโครงและชิ้นส่วนต่างๆของรถฟอร์มูล่าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.15 มาสร้างเป็นรถฟอร์มูล่าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยจะนำชิ้นส่วนต่างๆของรถฟอร์มูล่าที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ที่ยังสามารถใช้ได้มาเป็นส่วนประกอบ และชิ้นส่วนส่วนๆอื่นที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดมาประยุกต์ใช้ในการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในครั้งนี้ ทั้งนี้เพราะการสร้างชิ้นส่วนขึ้นมาเองนั้นมีต้นทุนสูงและมีความยุ่งยากในการสร้างมาก ดังนั้นการเลือกใช้ชิ้นส่วนประยุกต์สามารถทำ ได้รวดเร็วกว่า การจัดหาชิ้นส่วนสำรองและอุปกรณ์ซ่อมบำรุงสามารถจัดหาได้สะดวก และมีราคาที่ไม่สูงมาก เช่น ดิสก์เบรก ปั๊มเบรก เบาะ พวงมาลัย เป็นต้น โดยอุปกรณ์ที่จัดหาเพิ่มจะแสดงในรูปที่ 3.16 - 3.29

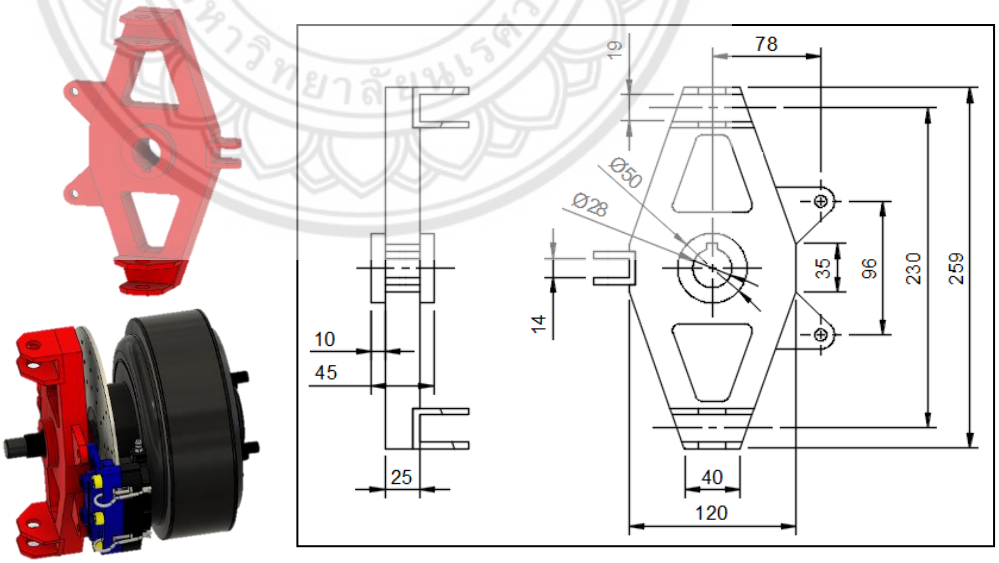
ส่วนชิ้นส่วนที่มีลักษณะเฉพะ เช่น ที่วางแบตเตอรี่ ชิ้นส่วนคอม้า จะทำการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับมอเตอร์แบบสวมล้อและประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นได้ มีความแข็งแรงน้ำหนักเบาและมีต้นทุนในการผลิตไม่สูงมากในการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านี้ จะทำการออกแบบเพื่อจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ

1) ออกแบบสร้างชิ้นส่วนสำหรับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 1 ที่นั่ง
2) ใช้ระบบเบรกเป็นแบบดิสก์เบรกทั้งสี่ล้อ
3) ติดตั้งมอเตอร์แบบสวมล้อ (Hub motor) ที่ 2 ล้อหลัง
4) ใช้แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด (12V 65AH) จำนวน 6 ลูก

รูปที่ 3.2 โครงและชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าที่จะนำไปพัฒนาและออกแบบเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

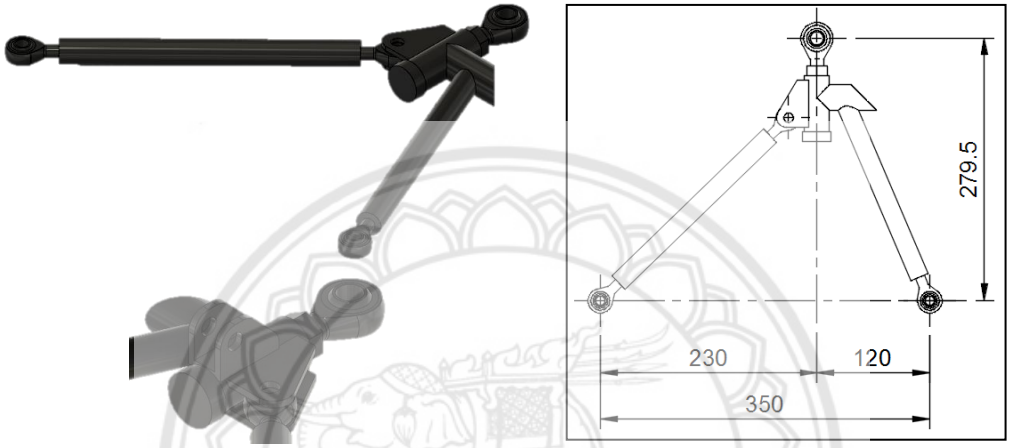
3.1.2 การออกแบบชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1) การออกแบบคอม้า ดังแสดงในรูป 3.3 การกำหนดขนาดของคอม้าขึ้นอยู่กับขนาดของปีกนก ดิสก์เบรก ปั้มเบรก ลูกหมาก และมอเตอร์ ความหนาของคอมม้าอ้างอิงจากเป็นเหล็กเพลตที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด



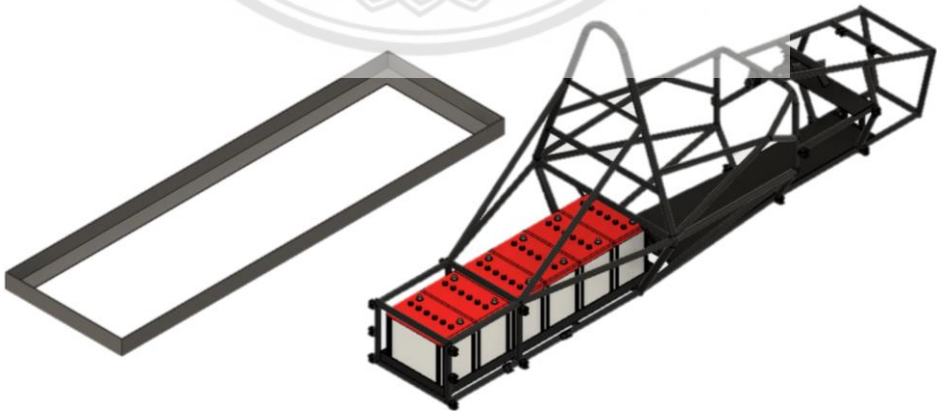
รูปที่ 3.3 การออกแบบคอม้า

2) การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหลัง เป็นการดัดแปลงจากปีกนกของโครงเดิม โดยได้ดัดแปลง ปีกนกให้เยื้องมาทางด้านหลัง การกำหนดขนาดของปีกนกสำหรับล้อหลัง ขึ้นอยู่กับขนาดของ โครงของตัวรถ ลูกหมาก โช๊คอัพ และจุดศูนย์ถ่วง (CG) ของรถ เนื่องจากปีกนกฝั่งซ้ายและฝั่งขวามีความสมมาตรกันจึงได้ออกแบบให้เหมือนกัน ส่วนปีกนกด้านบนได้ส่วนยึดจับตัวส่งแรงไปยังโช๊คอัพดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหลัง

3) การออกแบบรางวางแบตเตอรี่ การกำหนดขนาดของรางวางแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ 6 ลูก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กฉากที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด ขนาดที่ได้คือ กว้าง 317 mm ยาว 1048 mm เหล็กฉาก ขนาด 40 x 40 x 4 mm

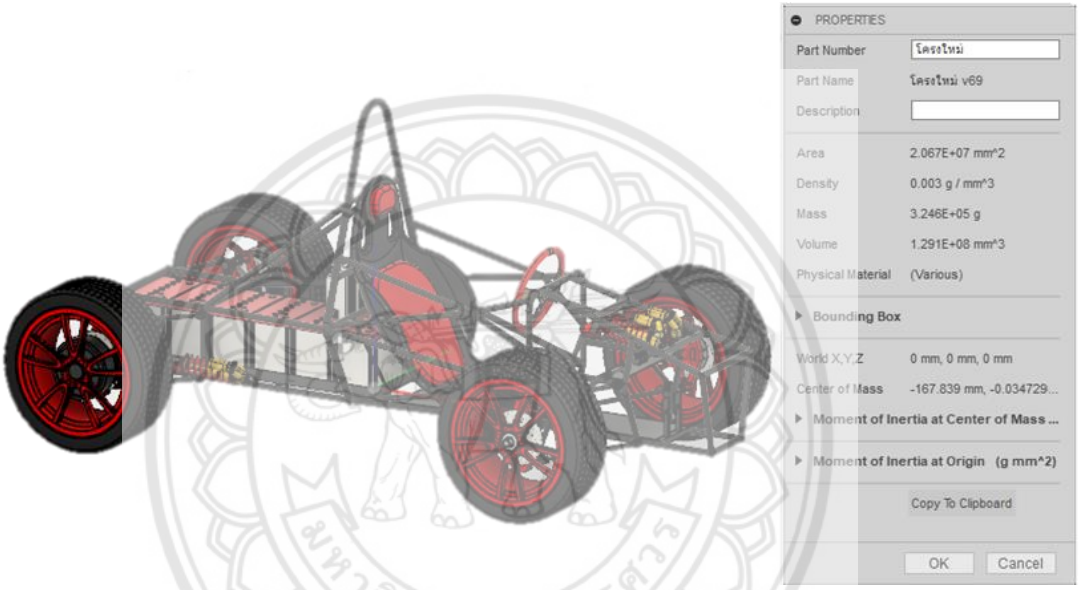


รูปที่ 3.5 รางวางแบตเตอรี่

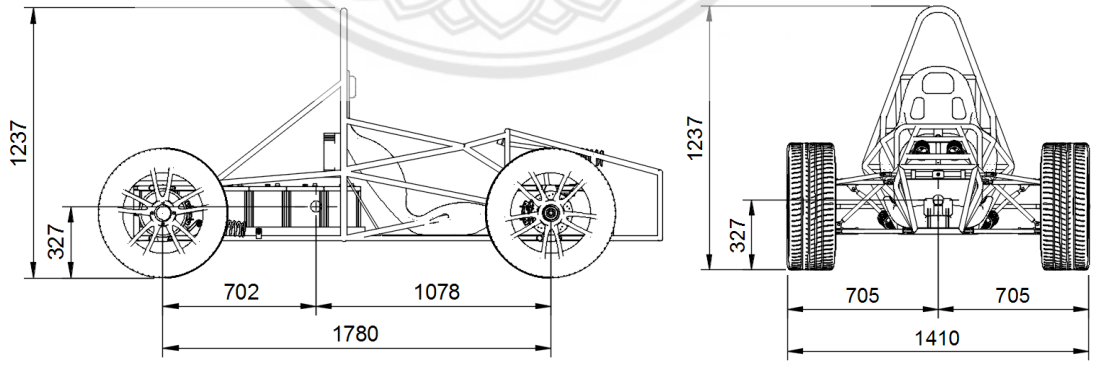
3.1.3 การหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) และน้ำหนัก ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อการออกแบบ

ในการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะต้องมีการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) และน้ำหนักของตัวรถ เพื่อความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของรถ ให้รถอยู่ในสภาพที่สมดุลในขณะเคลื่อนที่และจอดหยุดนิ่ง ซึ่งในการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) จะคำนวณจากโปรแกรม Autodesk Fusion 360 โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับ



รูปที่ 3.6 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ

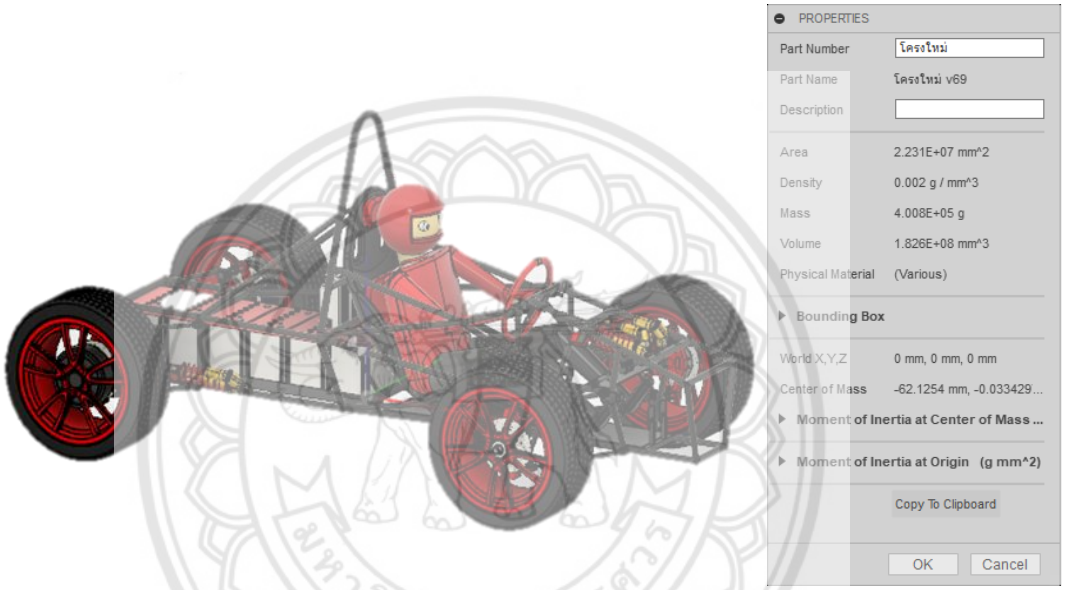


รูปที่ 3.7 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับ

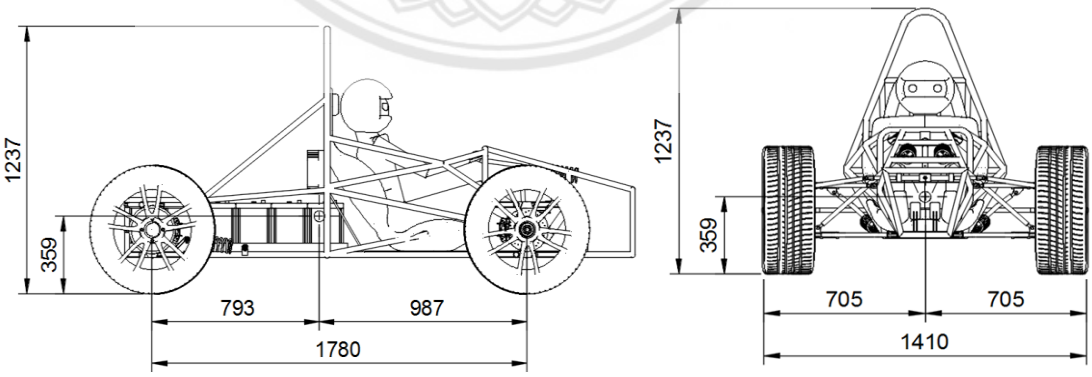
จากรูปที่ 3.6 ใช้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงโดยอ้างอิงจากจุด Origin ของแบบ 3 มิติ โดยการออกแบบระยะห่างของล้อดังนี้ ล้อหน้ามีระยะห่างจากล้อหลัง 178 cm และ

ระยะห่างล้อซ้ายกับล้อขวาสูงสุด 141 cm แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับอยู่ที่ตำแหน่งเยื้องไปทางด้านหลัง ห่างจากกึ่งกลางระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังพอสมควร สูงจากพื้น 32.7 cm กึ่งกลางระหว่างล้อซ้ายกับล้อขวา ห่างจากล้อหน้า 107.8 cm และห่างจากล้อหลัง 70.2 cm ตามรูปที่ 3.7 และมีน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ 330 กิโลกรัม

2) การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ



รูปที่ 3.8 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ



รูปที่ 3.9 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ

จากรูปที่ 3.8 ใช้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงโดยอ้างอิงจากจุด Origin ของแบบ 3 มิติ โดยการออกแบบระยะห่างของล้อดังนี้ ล้อหน้ามีระยะห่างจากล้อหลัง 178 cm และระยะห่างล้อซ้ายกับล้อขวาสูงสุด 141 cm แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับอยู่ที่ตำแหน่งเยื้องไปทางด้านหลัง ห่างจากกึ่งกลางระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังไม่มากนัก สูงจากพื้น 35.9 cm กึ่งกลางระหว่างล้อซ้ายกับล้อขวา ห่างจากล้อหน้า 98.7 cm และห่างจากล้อหลัง 79.3 cm ตามรูปที่ 3.9 และมีน้ำหนักของรถขณะมีคนขับ 400 กิโลกรัม

3.2 การคำนวณระยะทางในการเบรก

การคำนวณระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าบนพื้นคอนกรีตที่ความเร็วในการเบรก 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นคอนกรีตแห้งเป็นแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_k = 0.65$ (ตารางที่ 2.4) โดยน้ำหนักรวมของรถรวมคนขับเท่ากับ 400 กิโลกรัม และทำการเบรกทั้ง 4 ล้อ

จากสมการ

$$F = ma$$

$$\mu_k m_R g = ma$$

$$0.65 \times 400 \times 9.81 = 400a$$

$$a = 6.451 \text{ m/s}^2$$

จะได้ความเร่งในการเบรกเท่ากับ 6.451 m/s^2

1) ระยะเบรกที่ความเร็ว 30 km/hr

$$s = \frac{u^2 - V^2}{2a}$$

$$s = \frac{\left(\frac{30}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.451)}$$

$$s = 5.382 \text{ m}$$

2) ระยะเบรกที่ความเร็ว 40 km/hr

$$s = \frac{u^2 - V^2}{2a}$$

$$s = \frac{\left(\frac{40}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.451)}$$

$$s = 9.569 \text{ m}$$

3) ระยะเบรกที่ความเร็ว 50 km/hr

$$s = \frac{u^2 - V^2}{2a}$$

$$s = \frac{\left(\frac{50}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.451)}$$

$$s = 14.951 \text{ m}$$

3.3 การคำนวณรัศมีวงเลี้ยวบนถนนราบ

การคำนวณรัศมีวงเลี้ยวบนถนนราบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าบนพื้นคอนกรีตที่ความเร็ว 10, 15 และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นคอนกรีตแห้งเป็นแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_s = 0.9$ (ตารางที่ 2.4)

1) รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 10 km/hr

$$r = \frac{v^2}{\mu_s g}$$

$$r = \frac{\frac{10^2}{3.6^2}}{0.90(9.81)}$$

$$r = 0.874 \text{ m}$$

2) รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 15 km/hr

$$r = \frac{v^2}{\mu_s g}$$

$$r = \frac{\frac{15^2}{3.6^2}}{0.90(9.81)}$$

$$r = 1.966 \text{ m}$$

3) รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 20 km/hr

$$r = \frac{v^2}{\mu_s g}$$

$$r = \frac{\frac{20^2}{3.6^2}}{0.90(9.81)}$$

$$r = 3.496 \text{ m}$$

3.4 การหาความเร็วและความเร่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การจำลองการหาความเร็วและความเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เพื่อหาสมรรถนะภาพของตัวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในทางทฤษฎี

ตัวแปรที่ใช้

Gearratio	เท่ากับ 1 (เพราะไม่มีอัตราทดเกียร์)
r	เท่ากับ 0.3 m (รัศมีล้อ)
η_{gear}	เท่ากับ 0.98% (เนื่องจากไม่มีเกียร์)
f_r	เท่ากับ 0.012 (จากตารางที่ 2.1)
m	เท่ากับ 400 kg (มวลของรถ)
$m_{5\%}$	เท่ากับ 20 (มวล 5% โดยประมาณ เกิดจากการหมุนของชิ้นส่วนของรถ)

C_d เท่ากับ 0.7 (ประมาณจากรูปที่ 2.6)

A เท่ากับ 1 m^2 (จากการประมาณพื้นที่หน้าตัดของรถ)

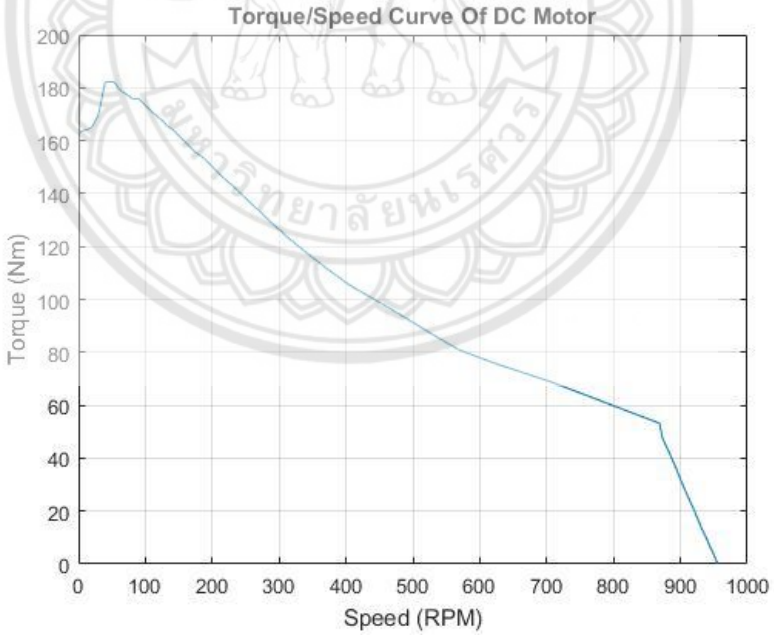
จากสมการที่ (2.23)

$$\frac{\text{Gearratio}}{r}\times\eta_{gear}\times T = f_r\times mg+\frac{1}{2}\rho C_d A V^2+(m+m_{5\%})\frac{dv}{dt}$$

จะได้ $$\frac{1}{0.3}\times 0.98\times T = 0.012\times 400(9.81)+\frac{1}{2}(1.2)(0.7)(1)V^2+(400+20)\frac{dv}{dt} \quad \textbf{(3.1)}$$

ทำการ Interpolation ระหว่างค่าความเร็วรอบ (RPM) กับค่าแรงบิดมอเตอร์ (Nm) จากตารางในรูปที่ 3.11 ลงใน Matlab เพื่อนำไปแทนค่า T ในสมการ (3.1)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

	电压	电流	输入功率	转矩	转速	输出功率	效率
序号	V	A	W	N.m	rpm	W	%
1	72.36	4.204	304.2	0.0	956.5	4.00	1.3
2	72.34	4.193	303.4	0.0	956.2	6.40	2.1
3	72.34	4.568	330.5	0.3	956.2	30.43	9.2
4	72.32	5.418	391.8	0.9	954.7	99.15	25.3
5	72.30	7.237	523.2	2.2	952.1	224.8	42.9
6	72.25	9.960	719.7	4.1	948.8	411.6	57.1
7	72.19	13.34	963.6	6.5	944.4	650.2	67.4
8	72.15	17.34	1251	9.6	939.1	943.9	75.4
9	72.09	21.90	1579	12.9	932.6	1263	80.0
10	72.02	27.11	1953	16.4	926.9	1595	81.6
11	71.96	32.75	2356	21.0	919.4	2030	86.1
12	71.89	38.93	2799	25.6	910.9	2450	87.5
13	71.80	45.30	3253	30.8	902.0	2912	89.5
14	71.73	52.26	3749	36.1	893.7	3385	90.2
15	71.64	59.46	4260	41.6	884.1	3858	90.5
16	71.56	67.15	4805	47.5	873.3	4351	90.5
17	71.76	74.64	5356	53.2	868.6	4838	90.3
18	71.52	79.05	5654	69.0	704.6	5097	90.1
19	71.51	78.28	5598	75.4	627.4	4959	88.5
20	71.49	77.95	5578	80.9	569.1	4823	86.7
21	71.46	78.61	5618	87.0	527.3	4813	85.6
22	71.45	78.98	5643	93.0	489.2	4763	84.4
23	71.44	78.91	5637	99.0	449.4	4661	82.6
24	71.44	77.97	5570	105.0	407.7	4486	80.5
25	71.42	77.78	5555	111.1	374.3	4355	78.3
26	71.41	77.76	5553	117.0	344.1	4218	75.9
27	71.38	77.58	5537	122.8	315.8	4062	73.3
28	71.36	77.45	5527	128.6	290.2	3909	70.7
29	71.33	77.31	5515	133.9	268.1	3759	68.1
30	71.33	77.39	5521	138.6	248.5	3606	65.3
31	71.34	77.28	5513	142.8	231.2	3456	62.6
32	71.31	77.08	5497	146.4	214.8	3292	59.8
33	71.30	76.96	5488	150.1	200.4	3149	57.3
34	71.28	76.92	5484	153.5	187.2	3008	54.8
35	71.30	76.51	5455	155.6	174.8	2848	52.2
36	71.28	76.87	5480	158.6	163.1	2708	49.4
37	71.28	76.72	5469	161.2	152.6	2576	47.1
38	71.29	77.04	5492	163.8	142.8	2450	44.6
39	71.29	76.58	5459	165.5	132.9	2303	42.1
40	71.25	77.37	5513	167.8	124.4	2185	39.6
41	71.27	77.42	5518	169.7	115.2	2047	37.1
42	71.26	77.39	5514	171.7	106.4	1912	34.6
43	71.25	77.22	5502	174.0	97.7	1779	32.3
44	71.26	77.31	5509	175.9	89.6	1650	29.9
45	71.24	77.72	5536	175.7	81.1	1492	26.9
46	71.22	77.88	5546	177.3	73.0	1355	24.4
47	71.24	77.62	5530	178.8	63.4	1186	21.4
48	71.24	77.53	5524	182.2	52.9	1009	18.2
49	71.17	78.14	5560	169.2	16.4	290.5	5.2

รูปที่ 3.11 ตารางแสดงค่าต่างๆ ของมอเตอร์

ที่มา : www.cnqsmotor.com/upfile/Performance_Curve/3000W_205_V3_72V_956RPM.pdf

Editor - C:\Users\Admin\Desktop\V.m

V.m | Acceleration.m

```
function [T_Nm] =V( X )

V=[956.5 956.3 956.2 954.4 952.1 948.8 944.4 939.1 932.6 926.9 919.4 910.9
    902 893.7 884.1 873.3 868.6 704.6 627.4 569.1 527.8 489.2 449.4 407.7
    374.3 344.1 315.8 290.2 268.1 248.5 231.2 214.8 200.4 187.2 174.8 163.1
    152.6 142.8 132.9 124.4 115.2 106.4 97.7 89.6 81.1 73 63.4 52.9 40 30 20 0];

T=[0 0.2 0.3 0.9 2.2 4.1 6.5 9.6 12.9 16.4 21 25.6 30.8 36.1 41.6 47.5 53.2
    69 75.4 80.9 87 93 99 105 111.1 117 122.8 128.6 133.9 138.6 142.8 146.4
    150.1 153.5 155.6 158.6 161.2 163.8 165.5 167.8 169.7 171.7 174 175.9 175.7
    177.3 178.8 182.2 182.2 170 165 163];

T_Nm=interp1(V,T,X)

n=length(V)

end
```

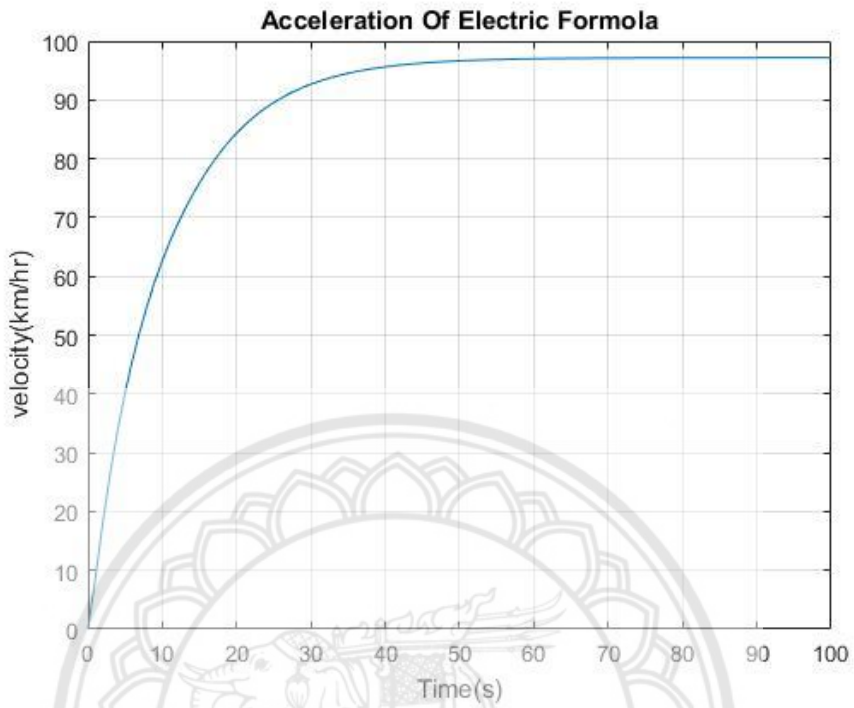
รูปที่ 3.12 การสร้างสมการ Interpolation ระหว่างความเร็วกับแรงบิด ใน Matlab

นำสมการ Interpolation ที่ได้จาก รูปที่ 3.12 ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab ดังรูปที่ 3.13

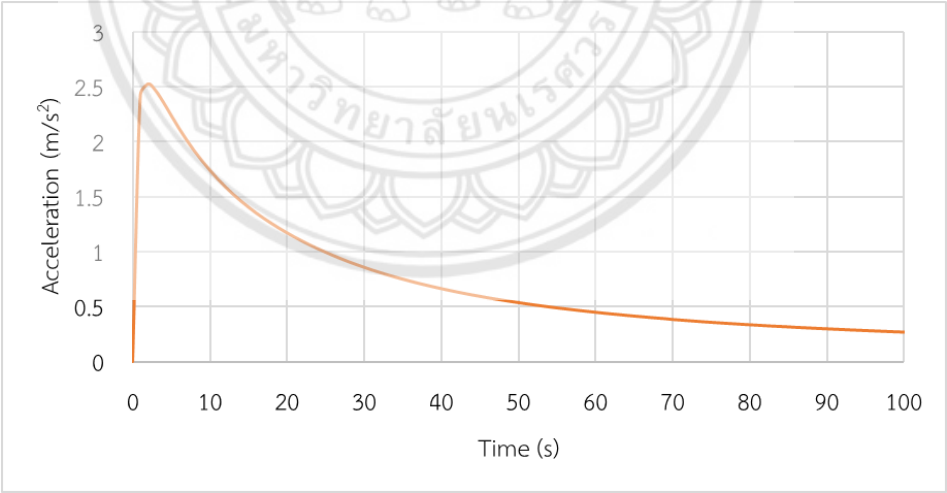
V.m | Acceleration.m

```
t=linspace(0,1000,1001);
vel=zeros(1,1001);
d=zeros(1,1001);
T=zeros(1,1001);
dT=1;

for n=1:400
    W(n)=vel(n)*(1/0.3)*(60/6.28);
    T(n)=2*V(W(n));
    vel(n+1)=vel(n)+(dT*(((0.98/(0.3*420))*T(n))-(0.012*400*9.81/420)-(0.6*0.7*1/420)*vel(n)^2));
    d(n+1)=d(n)+vel(n);
end;

vel=vel*3.6;
figure(1)
plot(t,vel);
axis([0 100 0 100]);
xlabel('Time(s)');
ylabel('velocity(km/hr)');
title('Acceleration Of Electric Formola');
grid on
```

รูปที่ 3.13 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากรูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา และรูปที่ 3.15 จะเห็นได้ว่าค่าที่ความเร็ว 60 km/h ทำเวลาอยู่ที่ 9 วินาที มีความเร่ง 1.85 m/s^2 และทำความเร็วสูงสุดได้ 98 km/h

3.5 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์

1) โครงและชิ้นส่วนประกอบของรถฟอร์มูล่า

รูปที่ 3.16 โครงและชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าที่จะนำไปพัฒนาและออกแบบเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2) มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W

รูปที่ 3.17 มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W

3) คอนโทรลเลอร์ KLS7245H

รูปที่ 3.18 คอนโทรลเลอร์ KLS7245H

4) คันเร่ง

รูปที่ 3.19 คันเร่ง

5) แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ รุ่น EB65 ขนาด 12V 65AH

รูปที่ 3.20 แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ รุ่น EB65 ขนาด 12V 65AH

6) ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15

รูปที่ 3.21 ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15

7) ชุดคอถอดและพวงมาลัย

รูปที่ 3.22 ชุดคอถอดและพวงมาลัย

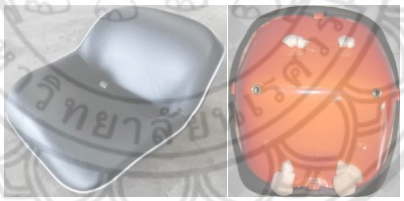
8) ปั๊มเบรก Brombo 4 Pot ขนาดเล็ก และจานดิสเบรค SPARK-115 i (3รู)

รูปที่ 3.23 ปั๊มเบรก Brombo 4 Pot ขนาดเล็ก และจานดิสเบรค SPARK-115 i (3รู)

9) ลูกหมากตาเหลือก ROD END

รูปที่ 3.24 ลูกหมากตาเหลือก ROD END

10) เบาะนั่ง

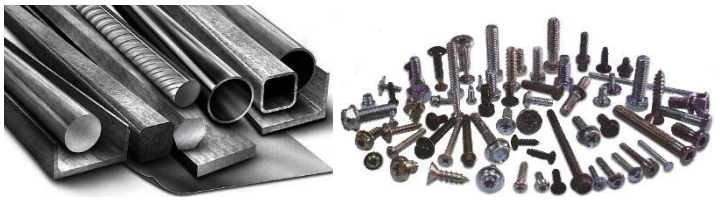


รูปที่ 3.25 เบาะนั่ง

11) สีสเปรย์

รูปที่ 3.26 สีสเปรย์

12) เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่างๆ

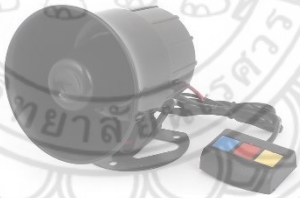


รูปที่ 3.27 เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่างๆ

13) เข็มขัดนิรภัย

รูปที่ 3.28 เข็มขัดนิรภัย

14) แตรรถเสียงไซเรน



รูปที่ 3.29 แตรรถเสียงไซเรน

15) อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

รูปที่ 3.30 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

3.6 วิธีการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบข้อมูลต่างๆ ของรถไฟฟ้าในสภาพใช้งานจริงเปรียบเทียบกับข้อมูลตามทฤษฎี เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาต่อไป และผลการทดสอบนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าอีกด้วย ในการทดสอบจริงต้องมีการดัดแปลงให้เข้ากับความจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถถือเป็นมาตรฐานที่จะใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลได้ เนื่องจากรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าได้สร้างขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์สวมล้อ สำหรับการศึกษาพัฒนาระบบช่วงล่างและระบบขับเคลื่อนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบประสิทธิภาพ สมรรถนะ และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าดังนี้

3.5.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

การทดสอบเพื่อหาระยะทางที่สูงที่สุดที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
2) แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH จำนวน 6 ลูก
3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.32
4) จูลมิเตอร์ JUNTEK ดังแสดงในรูปที่ 3.31

รูปที่ 3.31 จูลมิเตอร์ JUNTEK

รูปที่ 3.32 GPS Lap Timer LT-Q6000

วิธีทดสอบ

ทำการทดสอบการปล่อยกระแสของแบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH จำนวน 6 ลูก ที่ต่ออนุกรมกัน โดยการทดสอบหาระยะทางที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าวิ่งได้ไกลที่สุดที่แบตเตอรี่ชาร์จเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.33 โดยใช้เครื่อง GPS Lap Timer ในการวัดระยะทาง และหาการใช้พลังงานต่อ 1 กิโลเมตร โดยใช้จูลมิเตอร์

รูปที่ 3.33 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

3.5.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าพร้อมคนขับ

2) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.32

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ ดังแสดงในรูป 3.34 ที่เหมาะสมกับการทดสอบ

2) กำหนดจุดออกตัวและจุดหยุดรถที่ปลอดภัย

3) ทำการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเร่งความเร็วจาก 0 จนถึง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา

4) ทำการทดสอบซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.34 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

3.5.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ

การทดสอบนี้เพื่อหาระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าพร้อมคนขับ

2) ตลับเมตร

3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.32

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ เหมาะสมกับการทดสอบ

2) กำหนดความเร็วที่จะเริ่มทำการเบรกที่ 30, 40, และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) กำหนดจุดที่จะเริ่มเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.35 แล้วเริ่มเบรกเมื่อส่วนล้อหน้าของรถถึงจุดที่กำหนดไว้ เมื่อรถเบรกจนหยุดนิ่งจะวัดระยะทางตั้งแต่จุดที่กำหนดไว้ถึงล้อหน้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.36 แล้วบันทึกค่า

4) ทำการทดลองที่ความเร็วต่างๆ ตามข้อที่ 2) จนครบ

รูปที่ 3.35 จุดเริ่มเบรก

รูปที่ 3.36 การวัดระยะเบรกจากล้อหน้ากับจุดเริ่มเบรก

3.5.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

การทดสอบเพื่อหารัศมีวงเลี้ยวและความเร็วต่างๆ ในการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในขณะที่ขับขี่เข้าทางโค้ง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าพร้อมคนขับ

2) ตลับเมตร

3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.32

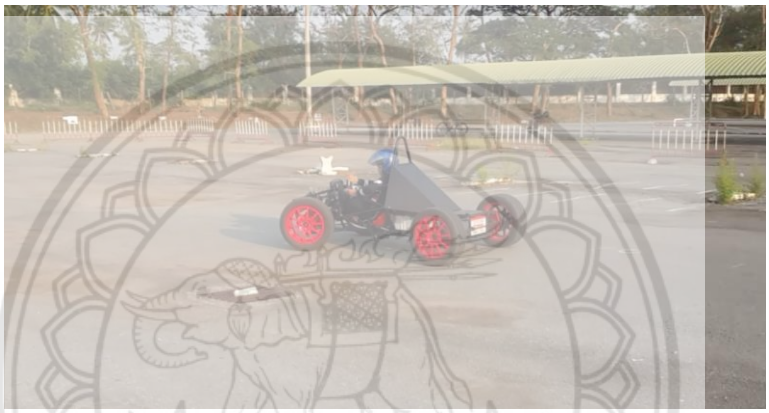
วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบที่กว้างและพื้นเรียบเหมาะสมกับการทดสอบ

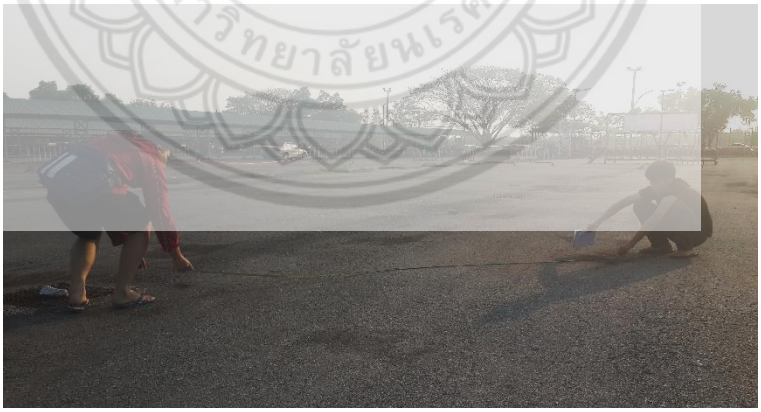
2) ทดสอบโดยใช้รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดขณะทำการเลี้ยวซ้ายสุดและขวาสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ที่ความเร็ว 10, 15, และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ ซึ่งอยู่บนพื้นที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.38 แล้วบันทึกค่า

4) ทำการทดลองที่ความเร็วต่างๆตามข้อที่ 2) จนครบ



รูปที่ 3.37 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว



รูปที่ 3.38 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ

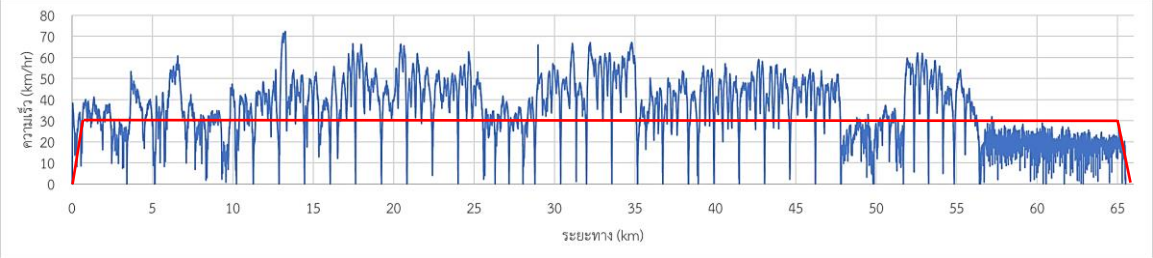
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

การทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้งและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยทดสอบที่การใช้ความเร็วเฉลี่ยที่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สถานที่ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ได้ผลการทดลอง ดังนี้

รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ บริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงวัฏจักรการขับขี่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

ความเร็วเฉลี่ย (km/hr)	ความเร็วสูงสุด (km/hr)	ระยะทางสูงสุด (km)	เวลาที่ใช้ในการวิ่ง (hr)	เวลาที่ใช้ในการชาร์จ (hr)
30	72	67	2.5	24

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อพลังงานที่ใช้ในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

พลังงานที่ใช้/กิโลเมตร (kW-hr)	ค่าไฟที่ใช้/กิโลเมตร (บาท)	พลังงานที่ใช้ทั้งหมด (kW-hr)	ค่าไฟที่ใช้ทั้งหมด (บาท)
0.056	0.224	3.719	14.876

4.1.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

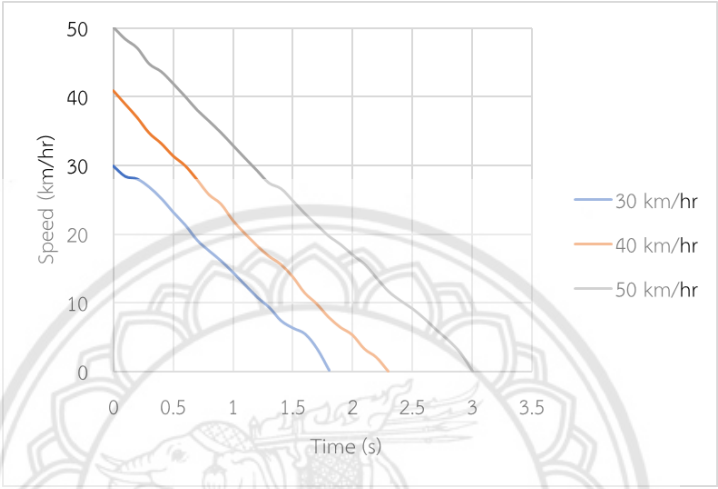
การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยการทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

ครั้งที่	เวลา (s)	ระยะทาง (m)	ความเร่ง (m/s^2)
1	8.201	83.111	2.032
2	8.088	81.823	2.060
3	8.232	81.158	2.025
เฉลี่ย	8.174	82.031	2.039

4.1.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ

การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ การทดสอบนี้เพื่อหาระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับเวลา

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ

ความเร็ว (km/hr)	เวลาเบรกจนรถหยุดนิ่ง (s)	ระยะเบรกจนรถหยุดนิ่ง (m)
30	1.8	4.6
40	2.3	8.9
50	3.0	18.3

4.1.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว ในการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ขณะที่ขับขี่เข้าทางโค้งที่ความเร็ว 10, 15, และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบรัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็วต่างๆ

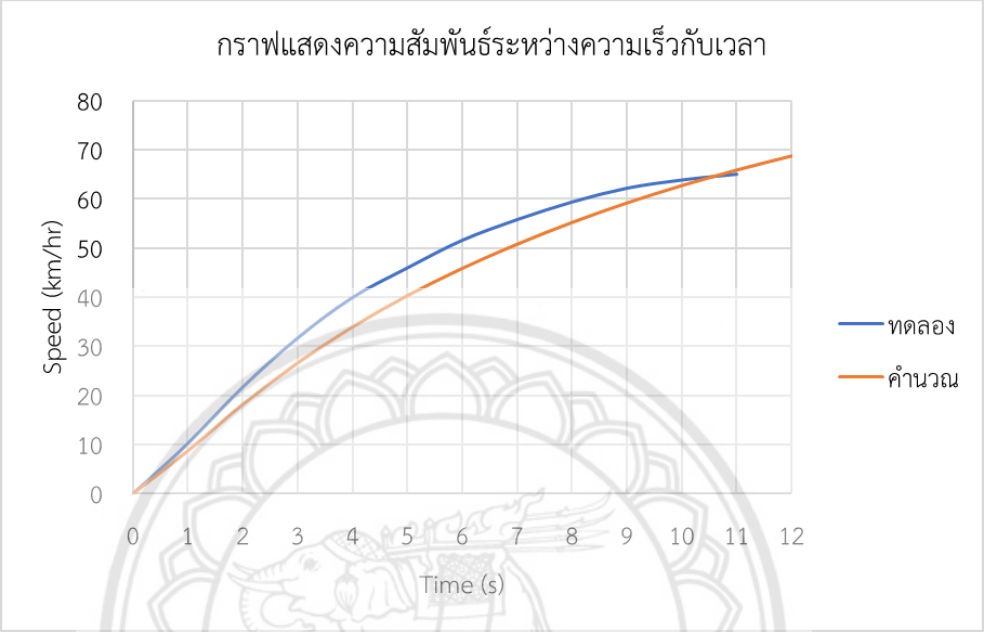
ความเร็วขณะเข้าโค้ง (km/hr)	รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดที่วัดได้ (m)
10	2
15	3.5
20	4.5

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

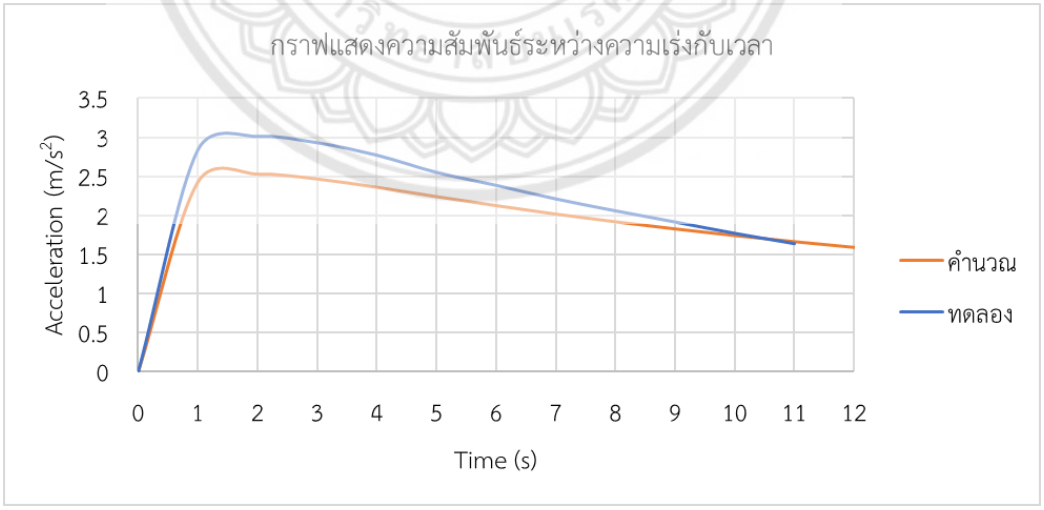
4.2.1 วิเคราะห์ระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

จากการทดลองเพื่อหาระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าของรถที่น้ำหนักรวมคนขับเท่ากับ 400 kg มีความเร็วเฉลี่ยที่ 30 km/hr และความเร็วสูงสุดที่การขับขี่สำหรับการทดสอบในครั้งนี้ 72 km/h จากการคำนวณสามารถทำความเร็วได้มากกว่านี้เนื่องจากไม่มีระยะทางยาวที่ปลอดภัยให้ทดสอบ และได้ระยะทางสูงสุดของรถ เท่ากับ 67 km เนื่องจากต้องหยุดเพื่อกลับรถจึงต้องเร่งออกตัวบ่อยทำให้ทำระยะทางได้น้อย จากรูปที่ 4.2 เมื่อขับขี่ได้ 57 km จะสามารถทำความเร็วสูงสุดได้เพียง 25 km/hr เนื่องจากแบตเตอรี่ใกล้จะหมดทำให้ส่งกำลังได้ไม่เต็มที่ พลังงานที่ใช้ทั้งหมด 3.719 หน่วย หรือใช้พลังงาน 0.056 หน่วยต่อ 1 kg สำหรับการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง จะเห็นได้ว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานอยู่ที่ 0.224 บาท/kg

4.2.2 วิเคราะห์อัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



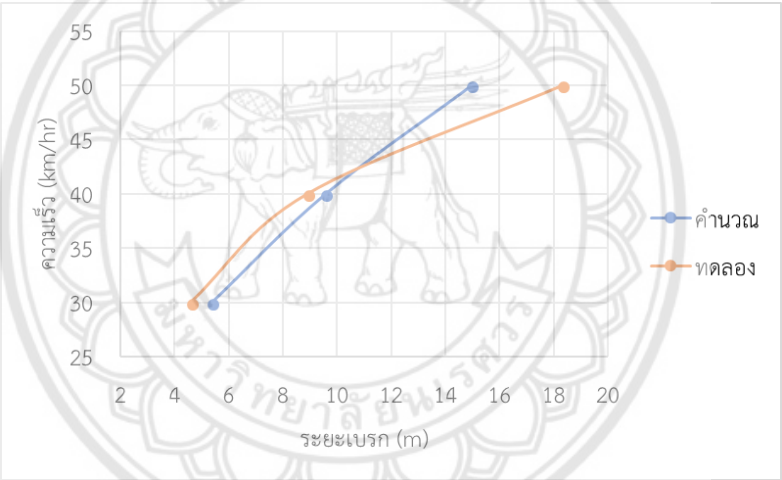
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา เปรียบเทียบความเร็วระหว่างการคำนวณและจากการทดลอง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากผลการทดลองเพื่อหาอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ที่น้ำหนักของรถรวมคนขับเท่ากับ 400 กิโลกรัม จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าใช้ความเร็วที่ 0-60 km/hr เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบและจากการคำนวณ พบว่า จากการทดสอบทำเวลาที่ 8.2 วินาที ความเร่งเฉลี่ยเท่ากับ 2.039 m/s^2 ซึ่งมีค่ามากกว่าการคำนวณจำลองความเร่ง ที่คำนวณทำเวลาได้ 9 วินาที มีความเร่ง 1.852 m/s^2 สาเหตุเกิดจากค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณมีค่าแตกต่างจากค่าจริงในการทดลอง เช่น น้ำหนักของรถเป็นค่าประมาณจากโปรแกรม ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างล้อยางกับพื้นถนนซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี ดังสมการที่ (2.22)

4.2.3 วิเคราะห์ระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับระยะเบรก

- ที่ ความเร็ว 30 km/hr ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 5.382 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 4.6 m

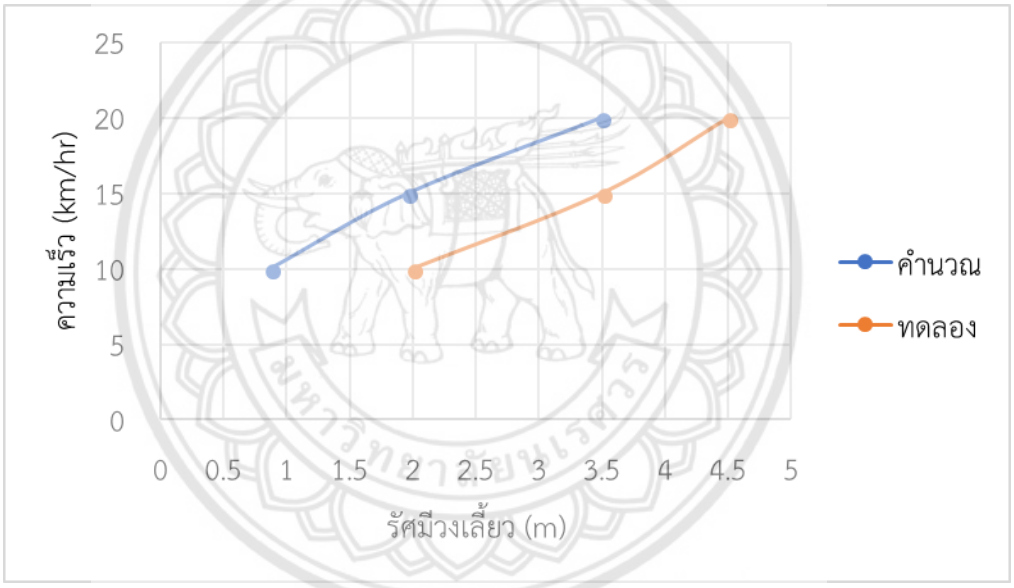
- ที่ความเร็ว 40 km/hr ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 9.569 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 8.9 m

- ที่ความเร็ว 50 km/hr ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 14.951 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 18.3m

จากผลการทดลองเห็นได้ว่า ความเร็วในขณะก่อนการเบรกมีผลต่อระยะทางในการเบรก เมื่อความเร็วในขณะก่อนการเบรกเพิ่มขึ้น ระยะเบรกก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และ จากรูปที่ 4.6

เมื่อนำค่าการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณจะเห็นว่าระยะทางในการเบรกจริงมีค่ามากกว่าจากการคำนวณที่ความเร็ว 50 km/hr เนื่องจาก ดิสก์เบรกที่ใช้เป็นดิสก์เบรกของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างจานดิสก์เบรกกับผ้าเบรกมีน้อยประสิทธิภาพในการเบรกที่ความเร็วสูงจึงลดลง และ สภาพถนนของที่ใช้ในการทดสอบเป็นพื้นคอนกรีตที่ไม่ค่อยสะอาด ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าความหน่วงในการเบรกมีค่าน้อยลงตามดังสมการ (2.26) ความหน่วงที่ลดลงนี้มีผลให้รถเคลื่อนที่ไปด้านหน้ามากขึ้นดังสมการ (2.27)

4.2.4 วิเคราะห์รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรัศมีวงเลี้ยว

- ที่ความเร็ว 10 km/hr รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 0.874 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 2 m

- ที่ความเร็ว 15 km/hr รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 1.966 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 3.5m

- ที่ความเร็ว 20 km/hr รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 3.496 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 4.5m

จากผลการทดลอง จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าความเร็วในการเข้าโค้งที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อรัศมีวงเลี้ยว เนื่องจากขณะที่รถเข้าโค้งจะมีแรงสู่ศูนย์กลางกระทำกับตัวรถให้เกิดการลื่นไถล เมื่อความเร็วของรถเพิ่มมากขึ้นจนทำให้แรงเสียดทานระหว่างยางกับถนนคอนกรีตมีค่าไม่มากพอจึงทำให้เกิดการลื่นไถล และรัศมีโค้งมีค่ามากขึ้น เมื่อนำค่าการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณจะเห็นว่า รัศมีวงเลี้ยวจริงมีค่ามากกว่ารัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เนื่องจาก ทดสอบบนถนนคอนกรีตที่ไม่ค่อยสะอาดอาจมีดินทรายขนาดเล็ก ทำให้ให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าของแรงเสียดทานมีค่าน้อยลงจนมีค่าไม่มากพอที่จะต้านแรงสู่ศูนย์กลางทำให้รถมีรัศมีวงเลี้ยวเพิ่มขึ้นดังสมการ (2.28)

บทที่ 5
สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงงาน

โครงงานนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีสำหรับใช้พัฒนาออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจากโครงของรถฟอร์มูล่าขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ ซึ่งเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสร้างขึ้นเพื่อเป็นรถต้นแบบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์สวมล้อ ใช้สำหรับการศึกษาและพัฒนาระบบช่วงล่างและระบบขับเคลื่อนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า และนำรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไปทดสอบประสิทธิภาพสมรรถนะภาคสนามภายในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าหรือการประหยัดพลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าและอื่นๆ

จากการศึกษาทฤษฎียานยนต์ไฟฟ้า เพื่อหาองค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งในการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า และทำการออกแบบสร้างชิ้นส่วนที่จะสามารถนำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้ง เช่น มอเตอร์ แบตเตอรี่ เป็นต้น สำหรับการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในครั้งนี้ และจำลองประสิทธิภาพสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ได้แก่ การใช้พลังงาน อัตราเร่ง ระยะเบรก และรัศมีวงเลี้ยว แล้วจึงนำไปทดสอบภาคสนามภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร

5.1.1 สรุปผลการทดสอบระสิทธิภาพรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1) การใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจากตารางที่ 4.2 เท่ากับ 0.056 กิโลวัตต์/ชั่วโมง คิดเป็นเงิน 0.224 บาท/กิโลเมตร

2) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีความเร่งเท่ากับ 2.039 เมตร/วินาที^{2} (ที่ 0 ถึง 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง)

3) ระยะเบรกรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็ว 30, 40, 50 กิโลเมตร/ชั่วโมง เท่ากับ 4.6, 8.9, 18.3 เมตร ตามลำดับ

4) รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็ว 10, 15, 20 กิโลเมตร/ชั่วโมง เท่ากับ 2, 3.5 , 4.5 เมตร ตามลำดับ ดังนั้นรัศมีวงเลี้ยวขึ้นอยู่กับความเร็วในการเข้าโค้ง ทำให้เห็นว่าการเข้าโค้งด้วยความเร็วมากๆ จะมีรัศมีวงเลี้ยวจะมีระยะมากขึ้นเช่นกัน

5.1.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) หลังจากใช้งานรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไปได้สักพักทำให้น็อตที่ยึดมอเตอร์เกิดการคายตัวออกจากเพลามอเตอร์ที่ยึดติดกับคอม้าเนื่องจากเป็นน็อตเฉพาะตัวที่ติดมากับมอเตอร์ทำให้ประกอบได้ยาก แก้ปัญหาด้วยขันน็อตให้แน่นก่อนทำการขับขี่ทุกครั้ง และการสังเกตการคายตัวของน็อต ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนน็อตยึดมอเตอร์เป็นน็อตหกเหลี่ยมและลองด้วยแหวนสปริง

2) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีปัญหาในเรื่องการควบคุมการทรงตัวและการรับแรงสั่นสะเทือน เนื่องจาก ระบบบังคับเลี้ยวและระบบช่วงล่าง ที่ผ่านการใช้งานมานานแล้ว ทำให้การควบคุมรถได้ยาก และคนขับได้รับแรงสั่นสะเทือนเป็นอย่างมาก ข้อเสนอแนะคือ แก้ไขระบบช่วงล่าง เปลี่ยนอะไหล่ที่เก่าๆ เช่น โช๊คอัพ ลูกหมาก เป็นต้น

3) จากการทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง เมื่อขับขี่ได้ระยะทาง 50 กิโลเมตร ทำให้แบตเตอรี่ต่ำ ส่งผลให้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าทำความเร็วสูงสุดได้ต่ำลง ข้อเสนอแนะเมื่อหน้าจอแสดงผลแสดงแบตเตอรี่ต่ำ ควรชาร์จแบตเตอรี่ทันที เพื่อการขับขี่ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

4) ระบบบังคับเลี้ยวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าหรือแร็ค เมื่อทำการเข้าโค้งที่มีรัศมีมากๆ หรือมีการหมุนพวงมาลัยหลายรอบ จะทำให้แร็คติดกับล้อแม็กซ์ เกิดความเสียหาย แก้ไขโดยสังเกตดูว่า หมุนพวงมาลัยกี่รอบทำให้แร็คติดกับล้อแม็กซ์ ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนเป็นแร็คไฟฟ้าและย้ายตำแหน่งจุดยึดแร็คกับคอม้าให้เหมาะสม

5) เวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่นาน เนื่องจากเครื่องชาร์จจ่ายกระแสน้อย ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนเครื่องชาร์จที่จ่ายกระแสได้สูงๆจะทำให้ชาร์จแบตเตอรี่ได้เร็วขึ้น

6) การใช้ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ จะมีแรงฉุดหรือการขับเคลื่อนจะมีประสิทธิภาพสูง สมรรถนะการขับเคลื่อนสูง มีแรงบิดมาก สามารถกระจายน้ำหนักรถแต่ละล้อได้เท่าๆ กันจึงทาให้เกาะถนนได้ดี

บรรณานุกรม

กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์, อังคีร์ ศรีภคากร. (2556). **ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ.** (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

คงศิลป์ แสงเพชรไพบูรณ์, เฉลิมชาติ เมฆเมืองทอง, นวพล เถาทอง. (2554). **การประยุกต์ออกแบบสร้างประกอบรถสูตรนักศึกษา เฉพาะระบบเครื่องยนต์ ระบบส่งกาลัง และระบบบังคับเลี้ยว.** วิทยานิพนธ์. วศ.บ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่.

ชานาญวิช สุขเวช, ภวัต รัตนวิชัย, วิศวกร คณะ. (2554). **ออกแบบและสร้างรถบั๊กกี้.** วิทยานิพนธ์. วศ.บ., มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, เชียงใหม่.

ธีระยุทธ สุวรรณประธีป. (2559). **หนังสือวิศวกรรมยานยนต์.** (พิมพ์ครั้งที่ 15). กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.

ธนวัฒน์ สุวนานนท์, สัณฐิติ ตาลเพชร, สิทธิเดช ประโยชน์ดี. (2559). **สามล้อไฟฟ้านำเที่ยว.** วิทยานิพนธ์. วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

บรรเลง ศรนิล. (2559). **คู่มือตารางเทคนิคยานยนต์.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ประสานพงษ์ หาเรือนชีพ. (2556). **งานเครื่องล่างรถยนต์.** กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

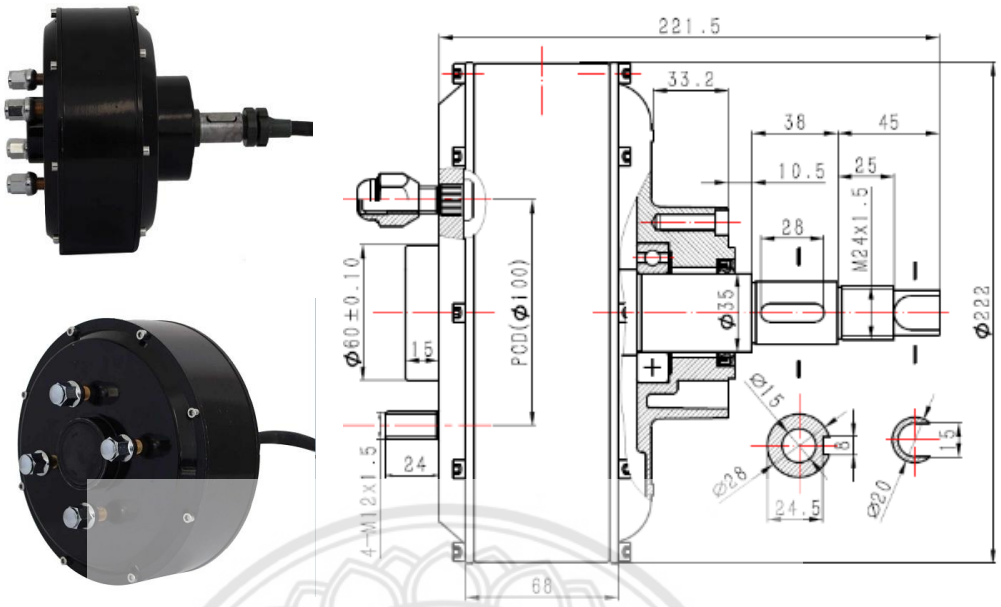
Auto2drvie. (29 ธันวาคม 2556). **รวมเรื่องรถยนต์ รถจักรยานยนต์ พาหนะอื่นๆ.** สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2561, จาก http://www.auto2drive.com/.

James Larminie, John Lowry. (2003). **Electric Vehicle Technology Explained.** England: John Wiley & Sons Ltd.

KLCBright. (5 กุมภาพันธ์ 2558). **แบตเตอรี่ deep cycle คืออะไร.** สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2561, จาก http://www.klcbright.com/batterydeepcycleis.php.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลที่ใช้ในออกแบบและการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



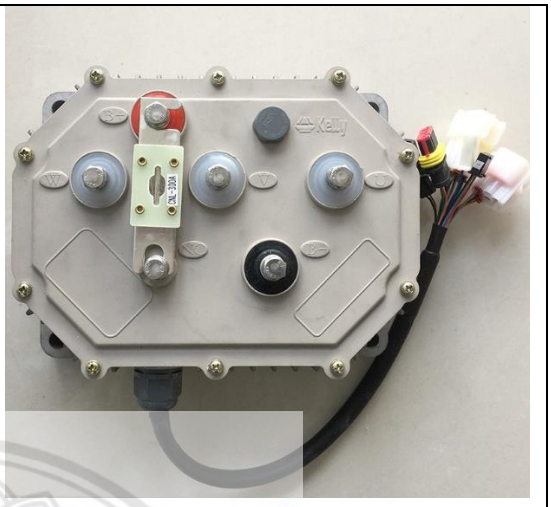
รูปที่ ก.1แบบมอเตอร์ QS Motor 3000W 205 50H V3 E-car Hub Motor
(ที่มา: http://www.qs-motor.com/product/qs205-3000w-single-shaft-electric-car-hub-motor-v3-type/)

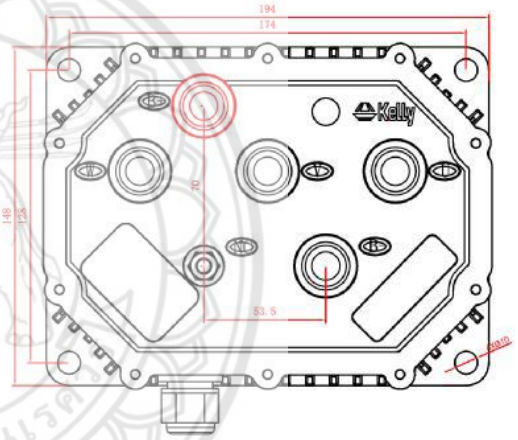
ตารางที่ ก.1 Motor Specification (www.qs-motor.com)

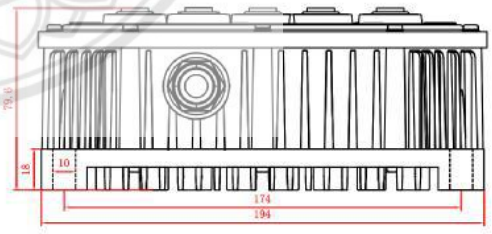
1. Motor Type: BLDC Hub Motor with Permanent Magnet	13. Max Efficiency: 90%
2. Motor design: Single axle out without rim	14. Continious current:45A
3. PCD for rim installation: 4 x100mm	15. Max current:80A (Peak 100A in short time)
4. CB:60MM	16. Brake type: Disc brake
5. Magnet Height: 50MM	17. Winding Core material: Aluminium
6. No. of Pole Pairs: 16pairs	18. Cross Section of Phase wire: 10 mm2
7. Rated Power: 3000W	19. Hall sensor phasing angle: 120 degree
8. Peak Power: 6000W	20. Temperature Sensor: Optional
9. Rated Voltage: 72V (48-96V Can be optional)	21. Max. Working Temperature: 70 degree, Peak 120 degree
10. Speed: 70km/h (30-75km/h can be customized)	22. Waterproof Grade: IP54
11. Max No-load RPM: 1000RPM	23. N.W./ G.W. : 15kgs / 16kgs
12. Max Torque: 180N.M	24. Package Size: 34*34*33CM

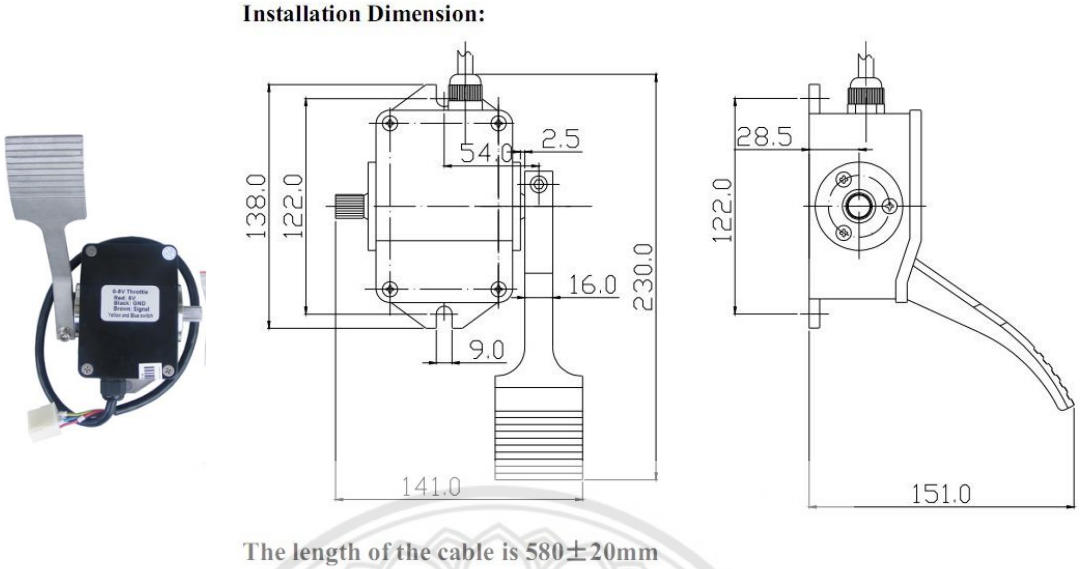
ตารางที่ ก.2 Kelly KLS-H Brushless Motor Controller (kellycontroller.com)

Specifications:
Frequency of Operation: 10KHz or 20kHz.
Standby Battery Current: < 0.5mA.
5V or 12V Sensor Supply Current: 40mA.
Controller supply voltage range: PWR, 18V to 90V for controllers rated equal or lower than 72V.
Supply Current, PWR, 30mA Typical.
Configurable battery voltage range, B+. Max operating range: 18V to 1.25*Nominal Voltage.
Standard Throttle Input: 0-5 Volts (3-wire resistive pot), 1-4 Volts (hall active throttle).
Throttle Input: 0-5 Volts. Can use 3-wire pot to produce 0-5V signal.
Main Contactor Coil Driver<2A.
Full Power Operating Temperature Range: 0℃ to 70℃ (MOSFET temperature).
Operating Temperature Range: -40℃ to 100℃ (MOSFET temperature).
Motor Current Limit, 30 seconds: 350A, depending on the model.
Motor Current Limit, continuous: 140A, depending on the model.
Max Battery Current: Configurable.









รูปที่ ก.2 คันเร่ง KELLY 0-5K THROTTLE PEDAL

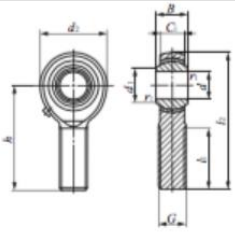
(ที่มา: http://kellycontroller.com/kelly-5k-throttle-pedal-p-1131.html)

Model		EB 65 YUASA	EB 85 YUASA	EB 130 YUASA	EB 150 YUASA	EB 200 YUASA
1.General Performance						
1.1 Battery Capacity Discharge Condition						
Current	Amp(20HR)	3.25	4.25	6.5	7.5	10
	Amp(5HR)	10	13	20	14	32
	Final voltage	10.5V(1.75V/cll)				
Result	Ah(20HR)	62	81	130	150	200
	Ah(5HR)	50	65	100	120	160
1.2 Float charge		base on charger				
1.3 Equalized Voltage		14.4V				
1.4 Nominal Open Circuit Voltage		12.8V				
1.5 Operation Tempareture		Up to 70°C discharge Up to 60°C charge 30 ~ 35°C (recommended operation)				
1.6 Charging Current		12.5 Amp(MAX)	15 Amp(MAX)	25 Amp(MAX)	30 Amp(MAX)	40 Amp(MAX)
1.7 QA System (Standard)		QS9000 ISO9002				
2.Specification : Battery Charateristic						
2.1 Case and cover material		Durable Polypropyrene				
2.2 Terminal post	Standard:	Taper				
	Option:	L type				
2.3 Vents cap	Standard:	Individual pressure relief type				
	Option:	With spark arresting and flash back explosion form external ignition source.				
2.4 Electrolyte	Specific Gravity	Dilute Sulfuric Acid 1.280+0.010 at 20°C				
2.5 Separator	Material	Synthetic pulp with glassmat				
	Structure	Three Layer structure(Sandwitch)				
2.6 Plate Grid Alloy		Lead + Antimony				
2.7 Number of cell per unit		6 cells				
2.8 overall Dimension	unit:mm	Standdard(MAX)	Standdard(MAX)	Standdard(MAX)	Standdard(MAX)	Standdard(MAX)
	L	(260)280	303(305)	407(409)	(502)512	(505)522
	W	(171)173	170(173)	171(173)	(180)220	(220)222
	H	(198)200	200(202)	209(212)	(210)236	(210)185
	TH	(222)225	241(243)	241(243)	(255)257	(255)270
2.9 Approx. Weight	with Electrolyte	20 Kg.	24.8 Kg.	35.2 Kg.	40.5 Kg.	56 Kg.
2.10 Aprox. Electrolyte Volume	liter/unit					
3.Charateristic of Life Cycle						
3.1 Discharge/charge condition (80% DOD)	Discharge	13.3 (A)x3h.	17.4 (A)x3h.	26.7 (A)x3h.	32 (A)x3h.	42.6 (A)x3h.
	charge(120%)	13.3 (A)x3.6h.	17.4 (A)x3.6h.	26.7 (A)x3.6h.	32 (A)x3.6h.	42.6 (A)x3.6h.
	Tempareture	30~40°C				
3.2 Capacity test condition	Amp(5HR)	10	13	20	24	32
	Final voltage	10.5V(1.75V/cell)				
	Test	Each 25 Cycle				
	End of test	Below 80% of rated capacity				
3.3 Result	Cycle	510				

รูปที่ ก.3 แบตเตอรี่ YUASA Deep Cycle EB65

(ที่มา: www.winwinuni.com/images/column_1335758543/EB130%20%28Yuasa%29.pdf)

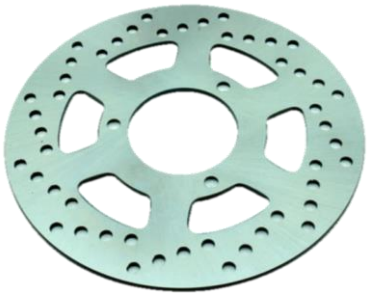
ตารางที่ ก.3 ลูกหมากตาเหลือก ROD END



POS

Identification number	Mass (Ref.)	Boundary dimensions mm										Dynamic load capacity	Static load capacity
	g	d	Thread G	d_2	C_1	B	d_1	l_2	h	l_1	(1) $r_{1s\,min}$ Ball dia. mm (inch)	C_d N	C_s N
POS 3	5.0	3	M 3×0.5	12	4.5	6	5.2	33	27	15	0.2	7.938 (5/16)	1 750	1 220
POS 4	8.1	4	M 4×0.7	14	5.3	7	6.5	37	30	17	0.2	9.525 (3/8)	2 480	2 060
POS 5	12.5	5	M 5×0.8	16	6	8	7.7	41	33	20	0.2	11.112 (7/16)	3 270	3 340
POS 6	19	6	M 6×1	18	6.75	9	9	45	36	22	0.2	12.700 (1/2)	4 200	4 730
POS 8	32	8	M 8×1.25	22	9	12	10.4	53	42	25	0.2	15.875 (5/8)	7 010	8 640
POS 10	54	10	M10×1.5	26	10.5	14	12.9	61	48	29	0.2	19.050 (3/4)	9 810	13 300
POS 12	85	12	M12×1.75	30	12	16	15.4	69	54	33	0.2	22.225 (7/8)	13 100	16 900
POS 14	126	14	M14×2	34	13.5	19	16.9	77	60	36	0.2	25.400 (1)	16 800	20 900

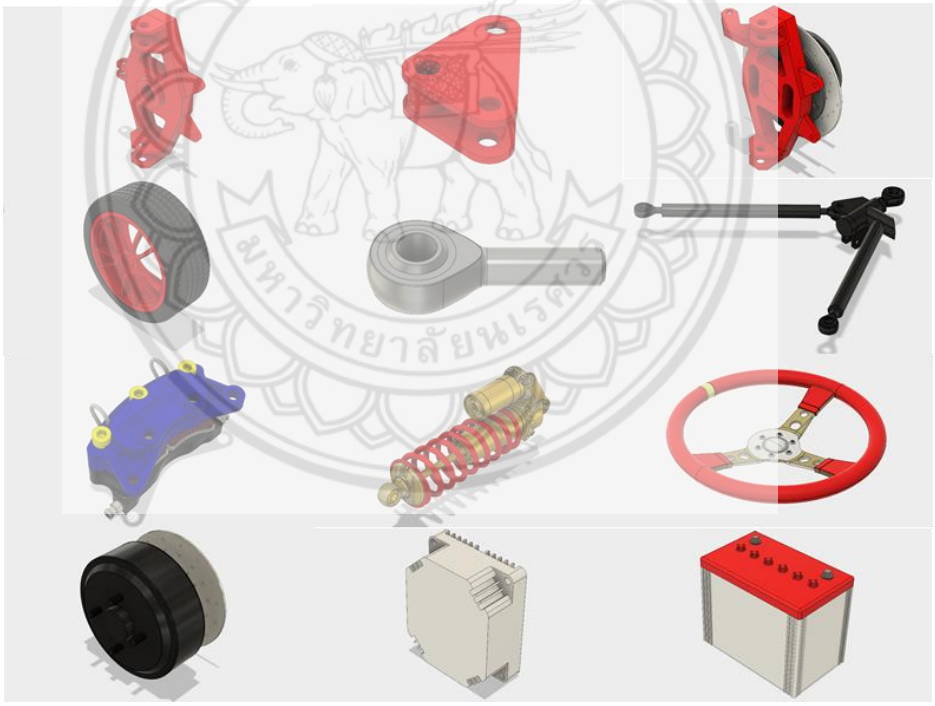
รูปที่ ก.4 ปั้มดิสเบรค Brombo 4 Pot เล็ก



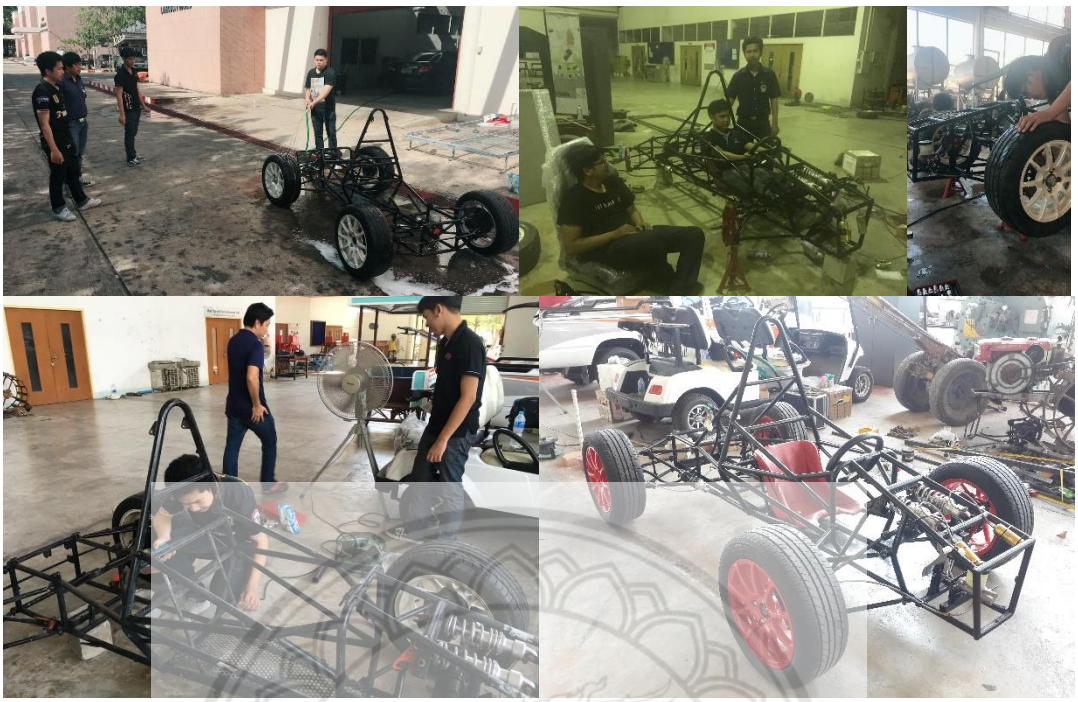
รูปที่ ก.4 จานดิสเบรค SPARK-115 i (3รู)

ภาคผนวก ข.
รูปการออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.1 โมเดล 3 มิติ ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ ข.2 โมเดล 3 มิติ ชิ้นส่วนต่างๆของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ ข3. บรรยากาศการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.4 บรรยากาศการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.5 มุมมองในด้านต่างๆของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.6 ฟอร์มูล่าไฟฟ้า