การพัฒนาการรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
(Development of the formula car)

นายณฐภัทร วงศ์ศาลา รหัส 583622209

นายณัฐวัฒน์ วิญญูหัตถกิจ รหัส 583622292

นายนราวิชญ์ หล้าคำมี รหัส 583624455

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2561

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การพัฒนาการรถฟอร์มูล่า		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายณฐภัทร	วงศ์ศาลา	รหัสนิสิต 58362209
	นายณัฐวัฒน์	วิญญูหัตถกิจ	รหัสนิสิต 58362292
	นายนราวิชญ์	หล้าคำมี	รหัสนิสิต 58362445
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2561		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์**ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง**ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษา**โครงงาน**

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ

(ผศ.ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

.....กรรมการ

(ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การพัฒนาการรถฟอร์มูล่า		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายณฐภัทร	วงศ์ศาลา	รหัสนิสิต 58362209
	นายณัฐวัฒน์	วิญญูหัตถกิจ	รหัสนิสิต 58362292
	นายนราวิชญ์	หล้าคำมี	รหัสนิสิต 58362445
ที่ปรึกษาโครงงาน	ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2561		

.....

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและสร้างแบบจำลองรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ DC แบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 3 กิโลวัตต์ 72 โวลต์ 4 ลูก โดยติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 4 ล้อคำนวณการใช้พลังงานภายในของระบบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า สำหรับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโครงงานนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12 V 65 Ah จำนวน 6 ลูก น้ำหนักรวมของรถฟอร์มูล่าประมาณ 450 กิโลกรัม

จากการทดสอบใช้งานรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร พบว่า รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทางสูงสุด 30 กิโลเมตรต่อการประจุไฟหนึ่งครั้ง ที่ความเร็วเฉลี่ยในการขับขี่ 30-40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการประจุไฟหนึ่งครั้ง 24 ชั่วโมง รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำความเร็วจาก 0 จนถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ใน 10.357 วินาทีรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ใช้เวลาในการเร่งมากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ คิดเป็นร้อยละ 85 มีระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็ว 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอยู่ที่ 6.16, 10.55, 15.8 เมตรรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีระยะทางเบรกมากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ คิดเป็นร้อยละ 12.91 มีรัศมีความโค้งแคบที่สุดที่สามารถเลี้ยวได้ขณะความเร็ว 10, 15 และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอยู่ที่ 3.71, 4.29, 5.68 เมตร โดยรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีระยะทางเบรกมากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ คิดเป็นร้อยละ 46 การทดสอบแบบ Slalomความเร็วเฉลี่ยในการ Slalom 28.55 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตรความเร็วสูงสุด 57.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเวลาที่ใช้ 12.43 วินาที โดยรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีความเร็วที่ระยะ 150 เมตรด้อยว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี ร้อยละ36

Project title Development of Formula

Name	Mr. Nathaphat Wongsala	Code 58362209
	Mr. Nattawat Winyouhattakit	Code 58362292
	Mr. Narawit Lakammee	Code 58362445
Project advisor	Assist.professor Dr. Ananchai Ukaew	
Major	Mechanical Engineering	
Department	Mechanical Engineering	
Academic year	2018	

.....

Abstract

This project is to study and create Formula Electric car models, design and build Formula Electric cars. By using a DC brushless motor with 3 kW, 72 volts, 4 balls by installing 4 motors to calculate the internal power consumption of Formula Electric car systems For electric formula cars, this project uses an electric motor, a deep cycle lead acid battery of 12 V 65 Ah water, a total of 6 balls. The total weight of a Formula 450 car is based on

The test using the Formula Electric car in Naresuan University. Can run a maximum distance of 30 kilometers per charge At an average driving speed of 30-40 kilometers per hour It takes 24 hours to charge the car. The Formula Electric car can speed from 0 to 50 kilometers per hour in 10.357 seconds. The 4-wheel drive electric vehicle takes more time to accelerate than a two-wheeled Formula Electric car. Each of the 85 has the shortest braking distance at speeds of 30, 40 and 50 kilometers per hour at 6.16, 10.55, 15.8 meters. The braking distance is more than 12.91 percent. The 2-wheel drive system has the narrowest curvature radius that can turn at a speed of 10, 15 and 20 kilometers per hour at 3.71, 4.29, 5.68 meters with the turning radius of the car. Formula Electric, 4-wheel drive system with 46% more braking distance than Formula Electric 2-wheel drive vehicles. Slalom tests, average speed of slalom 28.55 kilometers per vehicle hours Speed test at a distance of 150 meters, maximum speed of 57.25 kilometers per hour, using time of 12.43 seconds by Formula Electric 4-wheel drive system. With a speed of 150 meters, which is 36 percent less than the theory.

กิตติกรรมประกาศ

การพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าประสบผลสำเร็จลงได้ด้วยดี คณะผู้ดำเนินโครงงานต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงงาน และความอนุเคราะห์ในการดำเนินตลอดโครงงาน

ขอขอบพระคุณพ่อและแม่ ที่อบรมสั่งสอนเป็นบุคคลดี สนับสนุนทางการเงินและคอยให้กำลังใจในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน สำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ขี้แนะแนวทางตลอดจนช่วยดูแลจนโครงงานนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณนิสิตป.โท ที่ช่วยสร้างและจัดหาอุปกรณ์สำคัญตลอดจนคำแนะนำของรถฟอร์มูล่า

ขอขอบพระคุณนายชัชชัย อินเขียน ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์และต่อระบบเกี่ยวกับไฟฟ้า ท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน และให้ความรู้แก่ผู้ดำเนินงาน บุคลากร และเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับคำปรึกษา แนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงงานนี้ และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงงานนี้ ผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้ดำเนินโครงงาน
นายณฐภัทร วงศ์ศาลา
นายณัฐวัฒน์ วิญญูหัตถกิจ
นายนราวิชญ์ หล้าคำมี

เมษายน 2562

สารบัญ

หน้า

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

บทที่ 1 บทนำ
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ 4
1.7 งบประมาณที่ใช้ 4

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี
2.1 กำลังขับเคลื่อน 5
2.1.1 แรงต้านการเคลื่อนที่ 5
2.1.2 แรงเฉื่อย 9
2.2 ระบบกันสะเทือน (Suspension System) 13
2.2.1 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension) 13
2.3 มอเตอร์ขับเคลื่อน 15
2.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 16
2.3.2 แบบจำลองมอเตอร์ 18

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4 การจำลองความเร่งยานยนต์ (modeling vehicle acceleration)..... 19
2.5 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก 21
2.6 การเข้าโค้งบนโค้งราบ 22
2.7 การหาจุดศูนย์กลางมวล 23
2.8 แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 24
2.8.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด..... 24
2.8.2 การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 25
2.9 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง..... 25
2.9.1 องค์ประกอบชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง..... 26
2.10 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 26
2.10.1 ดิสก์เบรก (Disk Brakes)..... 27
2.10.2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative brake)..... 27

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน
3.1 การออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า.....29
3.1.1 หลักการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า.....30
3.1.2 การหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) และน้ำหนัก ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อการออกแบบ...32
3.2 การคำนวณระยะทางในการเบรก.....35
3.3 การคำนวณรัศมีวงเลี้ยวบนถนนราบ.....36
3.4 การหาความเร็วและควำมเร่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า.....37
3.5 การคำนวณหาความเร็วสูงสุดและเวลาที่ใช้ภายในระยะทาง 150 เมตร.....43
3.6 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์.....46
3.7 วิธีการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า.....45
3.7.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง.....47
3.7.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า.....49
3.7.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ.....50
3.7.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว.....51
3.7.5 การทดสอบแบบ Slalom.....53
3.7.6 การทดสอบความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะทาง 150 เมตร.....54
3.7.7 การทดสอบหาการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่างๆ...53

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง 57

4.1.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง 57

4.1.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 58

4.1.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ 58

4.1.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว 58

4.1.5 การทดสอบแบบ Slalom 58

4.1.6 การทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตร 61

4.1.7 การใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ 61

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง 61

4.2.1 วิเคราะห์ระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 61

4.2.2 วิเคราะห์อัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 63

4.2.3 วิเคราะห์ระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 64

4.2.4 วิเคราะห์รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 66

4.2.5 วิเคราะห์การทดสอบแบบ Slalom 68

4.2.6 วิเคราะห์ความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะ 150 เมตร 68

4.2.7 วิเคราะห์หาการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่ความเร็วต่าง ๆ 69

บทที่ 5 สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงงาน 70

5.1.1 สรุปผลการทดสอบระสิทธิภาพรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 71

5.1.2 ปัญหาจากรถมอเตอร์ไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ
ที่ได้รับการแก้ไขเสร็จเรียบร้อย 73

5.1.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 73

เอกสารอ้างอิง 75

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในออกแบบและการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 77

ภาคผนวก ข. รูปการออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 81

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 3

2.1 ตารางแสดงข้อมูลอ้างอิงที่จำเป็นในการคำนวณของยานพาหนะ 7

2.2 สมการการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่างๆ 11

2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต (μ_s) และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k) 21

4.1 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง 57

4.2 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 58

4.3 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....59

4.4 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....59

4.5 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง....59

4.6 ผลการทดสอบรัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็วต่าง ๆ....60

4.7 ผลการทดสอบ Slalom.... 60

4.8 ผลการทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตร....61

4.9 ผลการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยที่ความเร็วต่าง ๆ....61

4.10 เปรียบเทียบระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า....62

4.11 การเปรียบเทียบระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า....65

4.12 เปรียบเทียบรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า....67

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แรงขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์กำลังการเคลื่อนที่ 6

2.2 แรงต้านทางชัน 9

2.3 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน 10

2.4 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ 14

2.5 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ 14

2.6 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อน..... 16

2.7 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน 17

2.8 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบดุมล้อไม่มีแปรงถ่าน 17

2.9 ภาพภายในมอเตอร์.....19

2.10 แรงเสียดทานที่กระทำกับรถจากการเบรก 21

2.11 แรงกระทำต่อรถในขณะเลี้ยวบนถนนโค้งราบ 22

2.12 การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม..... 25

2.13 การสัมผัสของผ้าเบรกกับจานโรเตอร์..... 27

2.14 Energy flow in the classic battery-powered electric vehicle, which has regenerative braking..... 28

3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน..... 29

3.2 การออกแบบคอม้า 31

3.3 ขนาดของคอม้า.....31

3.4 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหน้าด้านบน.....32

3.5 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหน้าด้านล่าง.....32

3.6 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ 33

3.7 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ 33

3.8 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ..... 34

3.9 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ..... 34

3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ 38

3.11 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ของมอเตอร์..... 39

3.12 แบบมอเตอร์ QS Motor 3000W 205 50H V3 E-car Hub Motor.....40

3.13 การสร้างสมการ Interpolation ระหว่างความเร็วกับแรงบิด ใน Matlab..... 41

3.14 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab 41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา 42
3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา.....42
3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา..... 44
3.18 มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W.....46
3.19 คอนโทรลเลอร์ KLS7245H 46
3.20 ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15.....46
3.21 เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่าง ๆ.....47
3.22 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ.....47
3.23 GPS Lap Timer LT-Q6000.....48
3.24 คลิปแอมป์มิเตอร์.....48
3.25 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง..... 49
3.26 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า..... 50
3.27 จุดเริ่มเบรก 51
3.28 การวัดระยะเบรกจากล้อหน้ากับจุดเริ่มเบรก 51
3.29 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว 52
3.30 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ 52
3.31 การทดสอบ Slalom.....53
3.32 แอปพลิเคชั่น SpeedoMeter GPS.....54
3.33 การทดสอบความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะทาง 150 เมตร.....55
3.34 การทดสอบหาการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ.....56
4.1 แผนที่แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ บริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร 57
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับเวลา.....58
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา เปรียบเทียบความเร็วระหว่างการคำนวณและ
จากการทดลอง.....63
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา.....63
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับระยะเบรก.....64
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรัศมีวงเลี้ยว.....66
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ระยะทาง 150 เมตร.....67
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาที่ระยะทาง 150 เมตร.....67
4.9 เครื่องมือวัดจูลมิเตอร์ JUNTEK.....69

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (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

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (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	

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (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	ความต้านทานของอารมาเจอร	Ω
ω	ความเร็วเชิงมุม	rad / s
A	พื้นที่หน้าตัดของรถ	m^2
E_s	แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์	V
$\emptyset$	ค่าฟลักซ์ไฟฟ้า	$N \cdot m^2 / C$
E_s	แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์	V
G	อัตราทดเกียร์	
C_d	สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ	
K_m	ค่าคงที่ของมอเตอร์	
η_{gear}	ประสิทธิภาพเกียร์	
μ	สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ล้อ	

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (แรงต้านการเคลื่อนที่)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F_{te}	แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด	N
F_r	แรงต้านการหมุนของล้อ	N
m	มวลของรถ	Kg
g	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m / s^2
θ	มุมความลาดเอียงของทางชัน	°
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	

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (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

ในปัจจุบันรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเป็นที่สนใจและมีบทบาทสำคัญในโลกยานยนต์พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าคือยานยนต์พลังงานไฟฟ้า ที่เป็นการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์เพื่อแก้ปัญหาในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ปัญหาสิ่งแวดล้อมจากเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ปล่อยมลพิษทางอากาศ ดังที่ประเทศไทยของเราได้ประสบกับปัญหาฝุ่น PM 2.5 ซึ่งหนึ่งในสาเหตุของสาเหตุการเกิดฝุ่น PM 2.5 นี้มาจากควันไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของรถยนต์ดีเซล และปัญหาทางด้านพลังงาน ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นมีแนวโน้มราคาที่สูงขึ้นและมีปริมาณที่ลดลง ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นพลังงานทางเลือกที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงให้กับยานยนต์ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่สะอาดเพราะไม่ปล่อยมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมทั้งยังเป็นพลังงานที่สามารถผลิตได้เองและมีแหล่งผลิตพลังงานที่หลากหลาย เราสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล เป็นต้น การพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้านอกจากจะนำมาแก้ปัญหาดังกล่าว ยังเป็นการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของยานยนต์พลังงานไฟฟ้าให้มากขึ้น มีสมรรถนะของยานยนต์ที่ดีขึ้น และเป็นการเพิ่มขีดความสามารถของผู้พัฒนาและเทคโนโลยีทางด้านยานยนต์พลังงานไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

การพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในขณะนี้ ยังถือเป็นช่วงเริ่มต้นของการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้ายังไม่เป็นที่แพร่หลาย จึงยังคงมีปัญหาต่าง ๆ ที่สามารถพบได้ในการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ปัญหาในการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ผ่านมา ได้แก่ ปัญหาการคลายตัวของน็อตออกจากมอเตอร์ที่ยึดติดกับคอม้า ปัญหาการควบคุมการทรงตัวและการรองรับแรงสั่นสะเทือนขณะขับขี่ ปัญหาแบตเตอรี่ลดต่ำที่ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดลดลงเมื่อรถวิ่งได้ระยะทาง 50 กิโลเมตร ปัญหาแร็คติดกับล้อแม็กซ์ที่สร้างความเสียหายให้กับขอบล้อแม็กซ์ด้านในเมื่อเข้าโค้งที่มีรัศมีน้อย ๆ หรือมีการหมุนพวงมาลัยหลายรอบ ปัญหาระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่นานเนื่องจากเครื่องชาร์จแบตเตอรี่จ่ายกระแสได้น้อย เป็นต้น ทั้งนี้ได้มีข้อเสนอแนะในการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยการใช้ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะในการขับเคลื่อนสูงขึ้น

จากปัญหาการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวมา คณะผู้จัดทำจึงได้ดำเนินโครงการพัฒนาพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเป็นแบบขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยใช้มอเตอร์แบบสวมล้อ 4 ลูก เพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับถนนและอัตราเร่ง ออกแบบและสร้างคอม้าที่ล้อคู่หน้าเพื่อแก้ปัญหาแร็คติดกับล้อแม็กซ์และทำให้สามารถสวมมอเตอร์เข้าไปในคอม้าได้ ลดความยาวของปีกนกให้สั้นลง เพื่อให้ความกว้างของล้อคู่หน้าและล้อคู่หลังเท่ากัน ออกแบบบอดี้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เพื่อลดแรงต้านอากาศและเพิ่มความสวยงามให้กับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เมื่อทำการพัฒนาตามกระบวนการต่าง ๆ แล้ว คณะผู้จัดทำได้ทำการทดสอบสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาและพัฒนารถฟอร์มูล่าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อพัฒนาสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าของรุ่นพี่ ปีการศึกษา พ.ศ. 2561 จากระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ เป็นระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ

1.2.2 เพื่อแก้ปัญหาเดิมที่มากับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ได้แก่ การคลายตัวของน็อตออกจากมอเตอร์ที่ยึดติดกับคอม้า ปัญหาการควบคุมการทรงตัวและการรองรับแรงสั่นสะเทือนขณะขับขี่ ปัญหาแบตเตอรี่ลดต่ำที่ส่งผลให้ความเร็วสูงสุดลดลงเมื่อรถวิ่งได้ระยะทาง 50 กิโลเมตร ปัญหาแร็คติดกับล้อแม็กซ์ที่สร้างความเสียหายให้กับขอบล้อแม็กซ์ด้านในเมื่อเข้าโค้งที่มีรัศมีน้อย ๆ หรือมีการหมุนพวงมาลัยหลายรอบ ปัญหาระยะเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่นานเนื่องจากเครื่องชาร์จแบตเตอรี่จ่ายกระแสได้น้อย เป็นต้น

1.2.3 เพื่อทดสอบสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 ออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ DC แบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 3 กิโลวัตต์ 72 โวลต์ 4 ลูก โดยติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 4 ล้อ

1.3.2 ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12 V 65 Ah จำนวน 6 ลูก

1.3.3 ใช้ความเร็วสูงสุด 90 km/hr

1.3.4 ทดสอบสมรรถนะภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร

1.4 ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการปฏิบัติการ	2561				2562			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2.ออกแบบชิ้นส่วนและศึกษากฎรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า								
3.ออกแบบโครงรถและ Body รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า								
4.สร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าให้ตรงตามกฎ FSAE								
5.ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ								
6.วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ								

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 รถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.5.2 สามารถแก้ปัญหาเดิมที่มากับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าได้

1.5.3 ได้ผลการทดสอบประสิทธิภาพและสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1.6 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1.6.1 ได้ความรู้ด้านการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1.6.2 ได้ทักษะด้านการสร้างและทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1.6.3 ได้นำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในงานจริง

1.7 งบประมาณที่ใช้

ชุดตัวควบคุมและมอเตอร์แบบสวมล้อ จำนวน 4 ตัว	60,000 บาท
แบตเตอรี่ Deep Cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65Ah จำนวน 6 ลูก	21,000 บาท
ล้อยางพร้อมสีแม็กซ์ จำนวน 4 ล้อ	5,500 บาท
Bodyสำหรับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า	30,000 บาท
รวม	116,500 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 กำลังขับเคลื่อน

การเคลื่อนที่ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ถ่ายทอดจากมอเตอร์ที่ล้อรถ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับพื้นถนนซึ่งทำให้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปได้ เมื่อนำแรงขับเคลื่อนมาพิจารณาพร้อมกับอัตราเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า จะได้เป็นกำลังขับเคลื่อนซึ่งเป็นพื้นฐานในการขับเคลื่อนรถได้ดังนี้

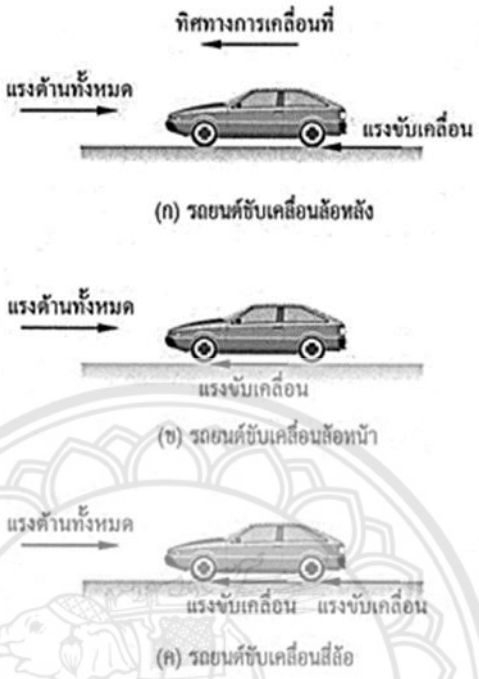
2.1.1 แรงต้านการเคลื่อนที่

การที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะสามารถเคลื่อนที่ได้จำเป็นต้องอาศัยการส่งกำลังจากมอเตอร์ซึ่งส่งผ่านระบบถ่ายทอดกำลังมาจนถึงล้อขับเคลื่อน และอาศัยความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นผิวถนนทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนในขณะถ่ายทอดกำลังของมอเตอร์ รถยนต์จึงเคลื่อนที่ได้ ในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่อยู่นั้นจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่เกิดขึ้นในทิศทางสวนกับแรงขับเคลื่อน อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันจะได้ว่า

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

จากกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันกล่าวคือ วัตถุที่หยุดนิ่งจะรักษาสภาวะหยุดนิ่งอยู่กับที่ ตราบที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ส่วนวัตถุที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ตราบที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำเช่นกัน แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนมีค่ามากกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะมีอัตราเร่งซึ่งทำให้อัตราเร็วของรถยนต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราเร็วของรถยนต์เพิ่มขึ้นนั้นแรงต้านทั้งหมดของรถยนต์ก็จะเพิ่มตามไปด้วยจนในที่สุดแรงขับเคลื่อนของรถยนต์มีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดอีกครั้งและรถยนต์ก็จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่อีกครั้งหนึ่ง แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะมีอัตราหน่วงซึ่งทำให้อัตราเร็วลดลง ในขณะที่อัตราเร็วลดลงนั้นแรง

ต้านทั้งหมดก็จะลดลงตามไปด้วย จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมดอีกครั้งและรถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ต่อไป



รูปที่ 2.1 แรงขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์กำลังการเคลื่อนที่

ที่มา : http://www.auto2drive.com

กำลังจากมอเตอร์ที่ส่งไปยังล้อขับเคลื่อนจะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เพราะมีบางส่วนสูญเสียไปในระบบถ่ายทอดกำลัง เรียกว่า การสูญเสียในการถ่ายทอด (Transmission Loss) กำลังส่วนที่เหลือที่ล้อขับเคลื่อนจะใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านต่างๆ เพื่อให้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ แรงต้านเหล่านั้นได้แก่

1) แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

2) แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

3) แรงต้านทางชัน (Gradient Resistance)

นอกจากนี้ ในขณะที่เร่งมอเตอร์ กำลังบางส่วนต้องสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของรถยนต์ เรียกว่าแรงต้านความเฉื่อย (Inertia Resistance)

2.1.1.1 แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

แรงต้านการหมุนของล้อรถนี้จัดว่าเป็นแรงต้านทานบนถนนอย่างหนึ่ง ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งในสภาพพื้นถนนที่ต่างกันจะมีแรงต้านทานการหมุนของล้อที่แตกต่างกันด้วย และแรงต้านการหมุนของล้อยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย เช่น ลักษณะโครงสร้างของขนาดของยาง 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 ตารางแสดงข้อมูลอ้างอิงที่จำเป็นในการคำนวณของยานพาหนะ

Parameter	Typical Small Car	Formula SAE Race Car
Weight	1000kg	300kg
Drag Coefficient, Cd	0.35	0.5
Frontal Area	$2m^2$	$1m^2$
Coefficient of rolling resistance, Crr	0.010	0.015
Top speed required	120km/h	100km/h
Acceleration required (0-100km/h)	10 sec	5 sec
Wheel diameter	0.6m	0.5m
Tire friction coefficient	1.0	1.5

ที่มา : DEVELOPMENT OF IN-WHEEL MOTOR SYSTEMS FOR FORMULA SAE ELECTRIC VEHICLES

จากตารางที่ 2.1 จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านการหมุนของล้อที่นำมาใช้ในการคำนวณกับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าได้กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.015

2.1.1.2 แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

แรงต้านอากาศคือแรงฉุดที่เกิดขึ้นบนผิวของรถอันเนื่องมาจากแรงดันและแรงเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า แรงต้านอากาศนั้นจะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการหมุนของล้อได้ แต่ถ้าหากรถวิ่งด้วยความเร็วสูง แรงต้านอากาศจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างมาก การออกแบบรูปทรงของตัวรถฟอร์มูล่าจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักการทางอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์ กำลังจากมอเตอร์ที่ถูกส่งไปยังล้อนั้นจะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เนื่องจากเกิดการสูญเสียในระบบถ่ายทอดกำลัง ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ตัวถังรถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีลักษณะลู่ลม เพื่อลดแรงต้านอากาศที่จะเกิดขึ้น 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)

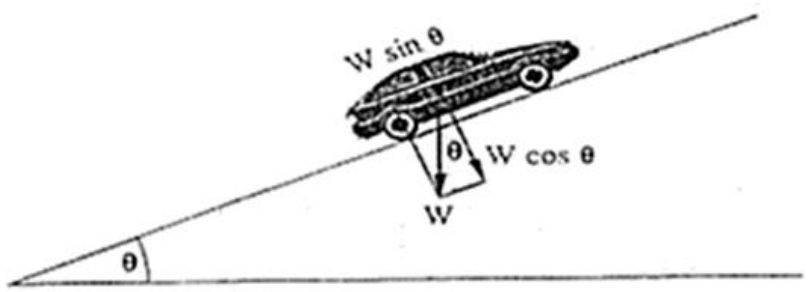
จากตารางที่ 2.1 จะได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน Drag coefficient ที่นำมาใช้ในการคำนวณหาแรงต้านอากาศของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้น ได้กำหนดให้ใช้ค่าเท่ากับ 0.5 และยังได้กำหนดค่าพื้นที่หน้าตัดของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าให้ใช้ค่าเท่ากับ 1 m^2

2.1.1.3 แรงต้านทางชัน (Gradient Resistance)

ในขณะที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าวิ่งขึ้นทางชัน กำลังจากมอเตอร์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (Gradient Resistance) ทำให้มอเตอร์ต้องทำงานหนักมากกว่าการวิ่งบนถนนในแนวระดับแต่ในทางกลับกัน ถ้ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าวิ่งลงทางลาด มอเตอร์จะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลก แรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) น้ำหนักของรถยนต์

2) ความชันของถนน



รูปที่ 2.2 แรงต้านทางชัน

ที่มา : หนังสือวิศวกรรมยานยนต์ ,ธีระยุทธ สุวรรณประธีป

น้ำหนัก w ของรถยนต์สามารถแตกออกเป็นสองแนวตามรูปที่ 2.2 ได้แก่ $W\sin\theta$ และ $W\cos\theta$ ซึ่งแรงต้านทางชันเกิดจาก $W\sin\theta$ คือ รถยนต์จะต้องเพิ่มแรงขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรง $W\sin\theta$ ดังนั้น แรงต้านทางชันคือ

$$F_d = mg\sin\theta \qquad \textbf{(2.4)}$$

โดยที่ F_d คือ แรงต้านทางชัน (N)

θ คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

เมื่อรวมแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ และแรงต้านทางชัน จะได้แรงต้านทั้งหมดของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในขณะที่กำลังวิ่งขึ้นทางชัน (ในการทดสอบสมรรถนะของ FASE นั้นไม่มีการทดสอบใดที่วิ่งบนทางชันเลย จึงไม่นำแรงต้านทางชันมาคิดคำนวณ เพราะฉะนั้นแรงต้านทั้งหมดจะมีเพียงแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ)

2.1.2 แรงเฉื่อย

แรงเฉื่อย (Inertia force) เป็นแรงอีกส่วนหนึ่งที่มีผลมากต่อแรงขับที่ต้องการจากต้นกำลังการที่ยานยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้นั้น หมายถึงการขับเคลื่อนตัวรถจากสภาวะหยุดนิ่ง รวมถึงการเร่งตัวเพื่อไปให้ได้ความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งก็หมายถึงว่าที่ค่าความเร็วใดๆ นอกจากยานยนต์จะต้องการแรงขับที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่แล้ว ยังต้องการแรงขับที่มากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เพื่อสร้างความเร่งด้วย

แรงเฉื่อยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม

2.1.2.1 แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น (Acceleration force)

ในขณะที่ยานยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วค่าหนึ่ง หากต้องการเพิ่มความเร็วของยานยนต์ จำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงให้กับยานยนต์ โดยแรงที่เพิ่มให้กับยานยนต์นี้คือแรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) สามารถแสดงได้ดังสมการ

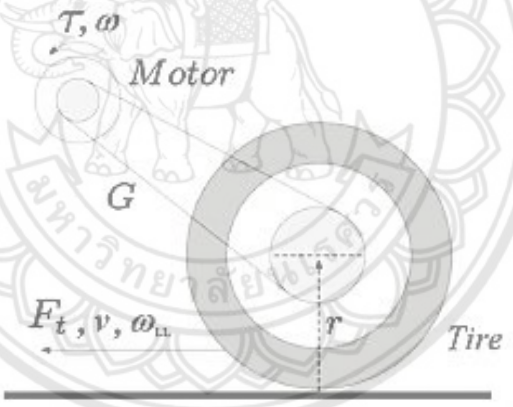
$$F_{a,l} = ma \qquad \textbf{(2.5)}$$

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

m คือ มวลของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)

a คือ ความเร่งของรถ (m/s^2)

2.1.2.2 แรงเพื่อความเร่งเชิงมุม



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน

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

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าแรงบิดของล้อเท่ากับ $T = \frac{F_{te}r}{G}$ เมื่อ r คือ รัศมีของยางและ F_{te} คือแรงที่พยายามดึงจากการส่งกำลังของมอเตอร์ ถ้า G คืออัตราทดเกียร์ของระบบมอเตอร์เชื่อมไปยังล้อ และ T คือแรงบิดของมอเตอร์แล้วจะได้สมการคือ

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

ทำการแก้สมการอีกครั้งดังนี้

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

ดังนั้น

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

ในทำนองเดียวกัน

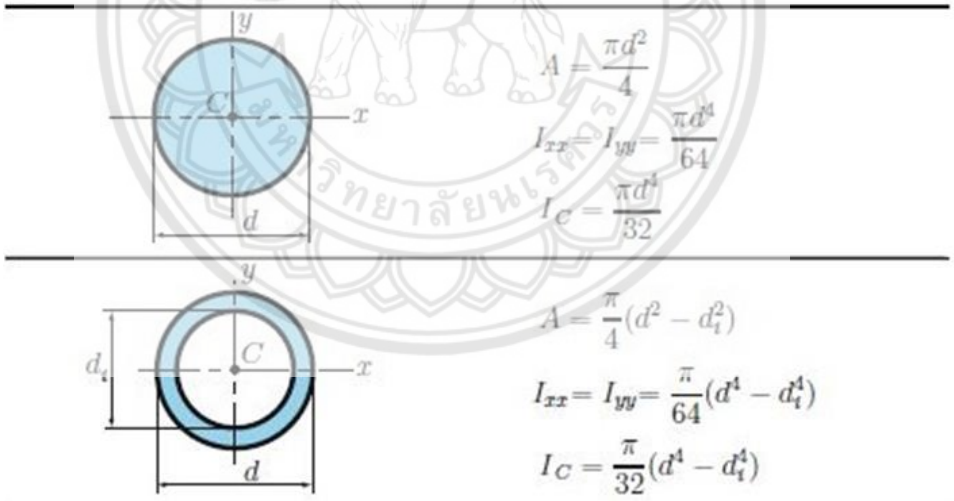
$$\dot{\omega} = G\frac{a}{r} \text{ rad / s}^2$$

แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการเร่งความเร็วเชิงมุมนี้คือ

$$T = IG\frac{a}{r} \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.2 สมการการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่างๆ

Table: Area inertia properties for some common cross sections



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

จากตารางที่ 2.2 จะได้สมการในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่าง ๆ ดังนี้

วงกลมตัน $$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (2.9)$$

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

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

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} I G \frac{a}{r} \quad (2.11)$$

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (2.12)$$

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

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

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

η_g คือ ประสิทธิภาพของระบบเกียร์

2.1.3 แรงรวมทั้งหมดจากการส่งกำลังของมอเตอร์

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

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 จึงไม่นำแรงต้านทางลาดชันมาพิจารณาในการออกแบบ

2.1.4 กำลังของมอเตอร์ (P)

คือการรวมแรงที่กระทำกับยานยนต์ทั้งหมดเพื่อที่จะหากำลังของมอเตอร์ ซึ่งเราสามารถเขียนสมการในรูปของกำลังจะได้ดังนี้

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

โดยที่ V คือ ความเร็ว (m/s)

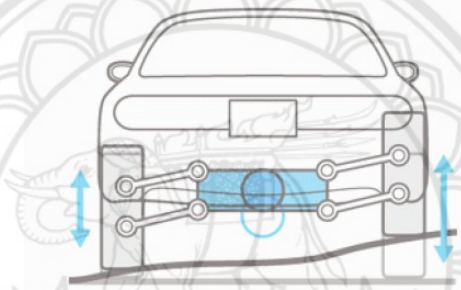
F_{te} คือ แรงรวมทั้งหมดในระบบ (N)

2.2 ระบบกันสะเทือน (Suspension System)

ระบบกันสะเทือน คือ ระบบกลไกที่วางอยู่ระหว่างตัวรถและล้อเพื่อดูดซับแรงกระแทกจากล้อรถ พร้อมทั้งรองรับโครงสร้างของตัวรถ นอกจากนี้ยังเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมรถ และสามารถควบคุมรถได้อย่างมีเสถียรภาพ โดยมีอุปกรณ์สำคัญในระบบกันสะเทือน คือ สปริง (Spring) และโช้คอัพ (Shock Absorber) ทั้งนี้ระบบกันสะเทือนนั้นเป็นกลไกสำคัญในการสร้างรถยนต์

2.2.1 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ (Independent Suspension)

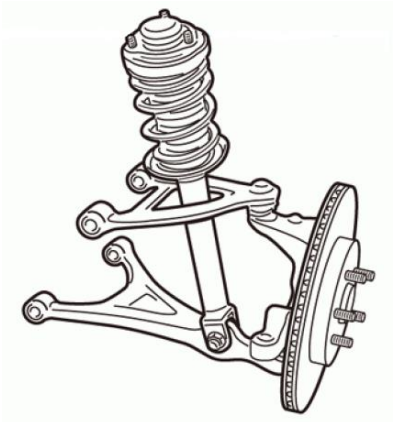
ระบบกันสะเทือนอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เป็นระบบกันสะเทือนที่ช่วยให้ล้อซ้ายและล้อขวาสามารถเคลื่อนไหวได้เป็นอิสระ เมื่อล้อใดล้อหนึ่งตกหลุมหรือกระแทกกับสิ่งกีดขวางแรงสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นจะกระทำกับล้อที่ตกหลุมนั้นเป็นส่วนใหญ่ โดยที่ล้อฝั่งตรงข้ามกันนั้นยังสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างมีเสถียรภาพ ส่งผลให้ห้องโดยสารนั้นได้รับแรงสะเทือนน้อยและมีความนุ่มนวลมากที่สุด รถที่ขับเคลื่อนล้อหน้า หรือขับเคลื่อนล้อหลัง ที่ใช้ระบบกันสะเทือนแบบอิสระจะมีข้อต่ออ่อน (Universal Joint) อยู่ระหว่างเพลาขับไปจนถึงล้อเพื่อให้ล้อสามารถเคลื่อนที่ไปตามสภาพถนนแล้วเกิดตกหลุมหรือทับสิ่งกีดขวางใด ๆ จุดศูนย์กลางของล้อจะไม่ตรงกับแกนเพลาหมุน ทำให้ข้อต่ออ่อนยังคงส่งแรงหมุนนี้ไปตามเพลาหมุนจนถึงล้อได้แม้ว่าสภาพถนนจะเป็นอย่างไรก็ตาม



รูปที่ 2.4 ระบบกันสะเทือนแบบอิสระ

ที่มา : หนังสือ The Gran Turismo Magazine Beyond the Apex

รูปแบบระบบกันสะเทือนแบบอิสระที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ (Double Wishbone)



รูปที่ 2.5 ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่

ที่มา : หนังสือ The Gran Turismo Magazine Beyond the Apex

ระบบกันสะเทือนอิสระแบบปีกนกคู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีส่วนประกอบที่ดูคล้ายกับปีกนกอยู่ 2 ชิ้น ติดตั้งอยู่ด้านบนและด้านล่างอย่างละ 1 ชิ้น ด้านหนึ่งยึดติดกับโครงรถอีกด้านหนึ่งยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวที่ติดอยู่กับดุมล้อจะเป็นการติดตั้ง ปีกนกด้านบน (Upper Control Arm) ด้านหนึ่งยึดติดกับโครงรถด้วยแกนยึดกับโครงรถอีกด้านหนึ่งยึดติดกับข้อบังคับเลี้ยวด้วยลูกหมาก (Ball Joint) และปีกนกด้านล่าง (Lower Control Arm) ซึ่งยึดติดด้วยวิธีเดียวกัน ขณะเดียวกันแกนบังคับเลี้ยวจากพวงมาลัยจะมายึดเกาะติดกับข้อบังคับเลี้ยว ในขณะที่มีการหมุนพวงมาลัยเพื่อเลี้ยวซ้ายหรือขวาแกนบังคับเลี้ยวนี้จะ ดึงและดัน ข้อบังคับเลี้ยวให้เปลี่ยนทิศทางเมื่อข้อบังคับเลี้ยวเปลี่ยนทิศทางดุมล้อที่ยึดเกาะกับแกนบังคับเลี้ยวก็จะเปลี่ยนทิศทางด้วยทำให้ล้อเปลี่ยนทิศทางไปเช่นกัน สปริงและโช้คอัพจะติดตั้งอยู่ระหว่างปีกนกด้านบนและด้านล่างเพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนในขณะที่ล้อรถตกหลุม สปริงจะดีดล้อลงและในขณะที่ขับรถข้ามสิ่งกีดขวางและโช้คอัพจะทำหน้าที่ซับแรงสั่นสะเทือนทำให้โครงรถนั้นมีความนุ่มนวลมากขึ้นเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนนั้นส่งไปยังโครงรถน้อยลง

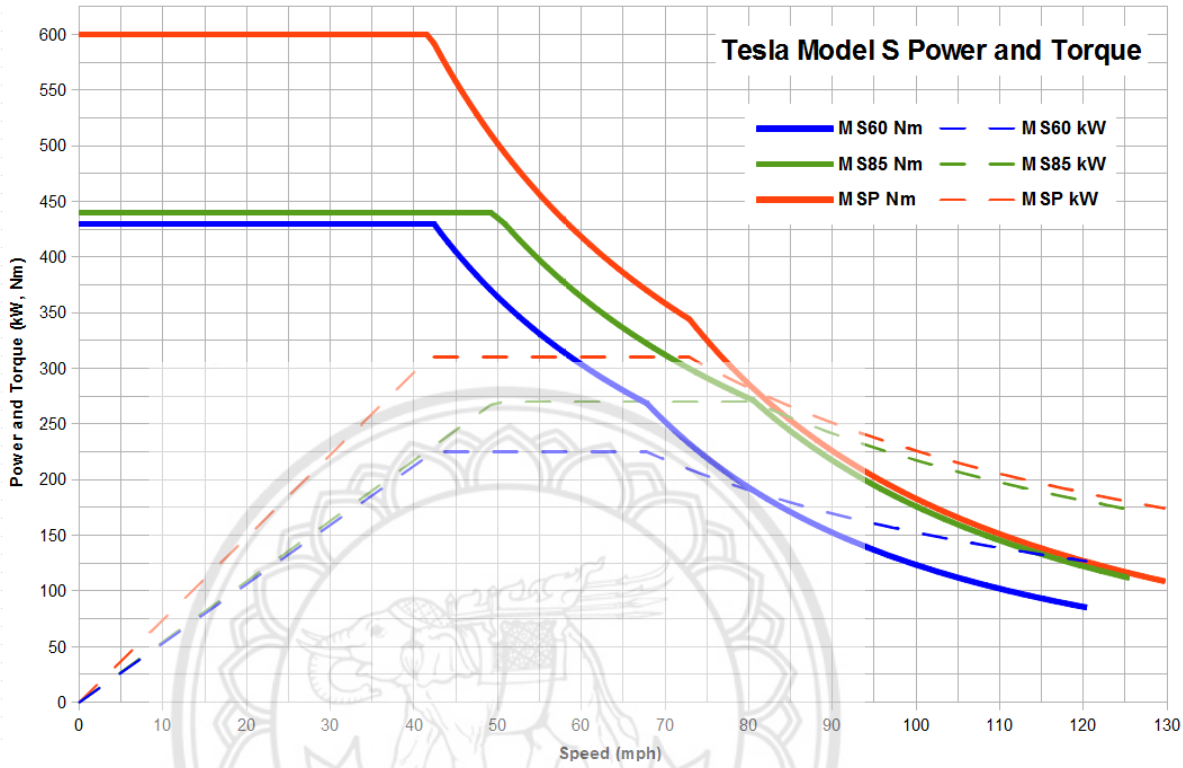
2.3 มอเตอร์ขับเคลื่อน

สำหรับการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าในด้านยานยนต์ เพื่อให้ได้สมรรถนะการขับขี่ที่ดีนั้น มอเตอร์ควรสามารถจ่ายแรงบิดและกำลังขับได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้อัตราเร่งในการออกตัวดีหรือในขณะที่ขับเคลื่อนที่ความเร็วสูง มอเตอร์จะต้องให้แรงบิดที่เพียงพอลักษณะการแปรผันระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนดังรูปที่ 2.6 เมื่อความเร็วเป็นศูนย์นั้นแรงบิดจะมีค่าสูงสุดและจะคงที่จนถึงความเร็วรอบหนึ่งที่เรียกว่าความเร็วฐานของมอเตอร์ซึ่งเป็นค่าความเร็วสำหรับการกำหนดค่ากำลังมอเตอร์ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเกินความเร็วฐาน แรงบิดจะลดลงและทำให้กำลังขับคงที โดยมอเตอร์ที่ให้แรงบิดสูงที่รอบต่ำจะทำให้การออกตัวได้ดีพร้อมกับมีความสามารถในการฉุดน้ำหนัก

มาก ๆ ได้ดี

สำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์นั้น นอกจากลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วรอบแล้ว มอเตอร์ไฟฟ้าต้องมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมอื่น ๆ เช่น มีประสิทธิภาพสูงในช่วงความเร็วรอบและช่วงแรงบิดที่กว้าง และสามารถให้การทำงานแบบ Regenerative Braking ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ยังต้องมีความทนทานต่อสภาวะการทำงานต่าง ๆ ทั้งอุณหภูมิสูง การสั่นสะเทือน และการขาดการบำรุงรักษา



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมในการขับเคลื่อน

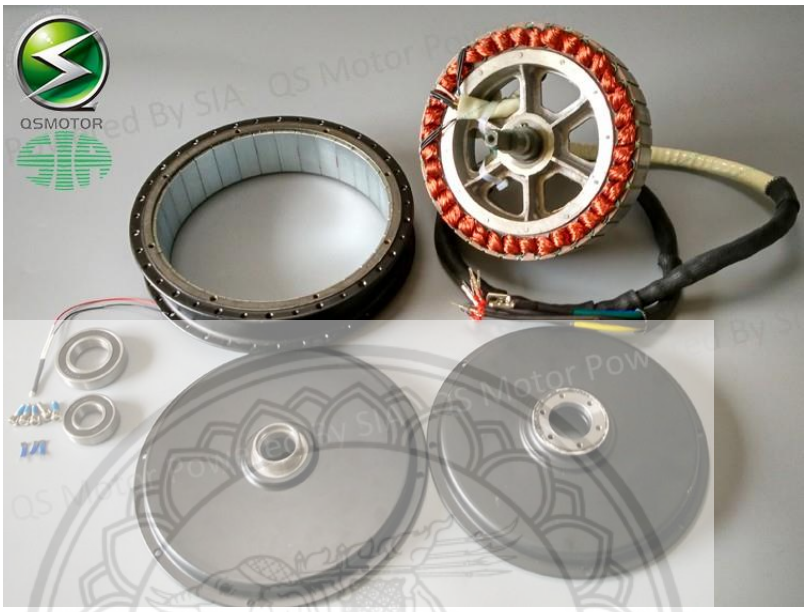
ที่มา : https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/tesla-physics.101931/

2.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกลโดยใช้กลไกของแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถสร้างออกมาได้หลากหลายรูปแบบตามชนิดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและรูปแบบของการส่งกำลัง โดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ได้แก่

มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motors) มอเตอร์ชนิดนี้จะวางโครงสร้างสลับกับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน โดยมีแกนหมุน (Rotor) เป็นแม่เหล็กถาวรแต่จะมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ที่สเตเตอร์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำมีไม่ต่ำกว่าสามชุด มอเตอร์ชนิดนี้สามารถทำงานได้โดยการจ่ายไฟเข้าไปยังขดลวดแต่ละชุดเป็นเฟสสลับกันไปเรื่อย ๆ เพื่อจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงและผลักแกนหมุนให้หมุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจจับตำแหน่งเพื่อเริ่มทำงานโดยใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก

(Hall Sensor) มอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับแรงบิดได้โดยปรับการจ่ายกระแสไฟ และปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับความถี่ในการสลับกระแสไฟของขดลวด ซึ่งสามารถเรียกการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุนตรงกับความเร็วของการหมุนของสนามแม่เหล็กว่าเป็นการทำงานแบบ Synchronous นั่นเอง แต่มอเตอร์ชนิดนี้ยังมีข้อเสีย คือ ต้องการวงจรขับดันมอเตอร์ที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.7 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

ที่มา : http://www.cnqsmotor.com

รูปแบบของมอเตอร์ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เป็นมอเตอร์แบบดุมล้อไม่มีแปรงถ่าน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ มอเตอร์ที่มีโครงสร้างการวางของตัวมอเตอร์อยู่ภายในโครงของตัวล้อรถ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 มักนิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะจักรยานไฟฟ้า โดยโครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีการต่อสายไฟจ่ายพลังงานผ่านทางแกนของล้อ ซึ่งโครงสร้างทั้งหมดของมอเตอร์จะวางสลับที่กับมอเตอร์ปกติ

รูปที่ 2.8 รูปของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบดุมล้อไม่มีแปรงถ่าน

ที่มา : www.cnqsmotor.com/en

2.3.2 แบบจำลองมอเตอร์

ในระบบยานยนต์ไฟฟ้านั้น แบบจำลองมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมการ แรงบิดมอเตอร์ ความเร็วเชิงมุม และประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยจะถูกแสดงตามลำดับดังนี้

2.3.2.1 แรงบิดมอเตอร์ (T)

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

2.3.2.2 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

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

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

2.3.2.3 ประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งที่มาสำคัญของการสูญเสียในการแปรงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้าทุกประเภทและสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักดังนี้ ความสูญเสียที่ทองแดง เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของสายและบางส่วนของพลังงานไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานไฟฟ้าผลของความร้อนกระแสไฟฟ้า เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วรอบในการหมุน โดยค่าประสิทธิ์ภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า จะใช้ค่าจากตารางที่ 2.3 สเปคของมอเตอร์ที่ผ่านการทดสอบจากโรงงานแล้ว

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

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

โดย

k_C คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทองแดง

k_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียธาตุเหล็ก

k_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทาน

C คือ การสูญเสียคงที่นำไปใช้ที่ความเร็วใดๆ (ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและแรงบิด)

รูปที่ 2.9 ภาพภายในมอเตอร์

ที่มา : http://www.cnqsmotor.com/en

2.4 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 $T = K_m \Phi I$ **(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 $$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2}{R_a}\omega \qquad \textbf{(2.21)}$$

จากสมการสม (2.14) โดยไม่คิดแรงต้านทางชัน

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

จะได้สามารถจำลองความเร่งจากสมการ

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

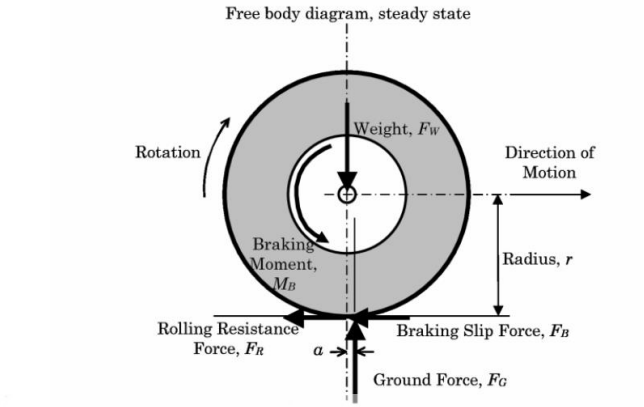
ดังนั้น สามารถจำลองความเร็วได้จากสมการ

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

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

2.5 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก



รูปที่ 2.10 แรงเสียดทานที่กระทำกับรถจากการเบรก

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

จากรูปที่ 2.10 เมื่อทำการเบรกจะส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานการเบรก F กับตัวรถซึ่งสามารถหาแรงดังกล่าวได้จากสมการ

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

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 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์เสียดทานสถิต (μ_s)และสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจลน์ (μ_k)

ผิวสัมผัส	μ_s	μ_k
ยางกับคอนกรีต (แห้ง)	1	0.80
ยางกับคอนกรีต (เปียก)	0.30	0.25
ล้อยางกับถนน (แห้ง)	0.90	0.65
ล้อยางกับถนน (เปียก)	0.70	0.55

ที่มา : โครงงานการพัฒนาออกแบบช่วงล่างรถยนต์ ปี 2560

การหาระยะทางในการเบรกหาได้จากสมการการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$s = \frac{u^2 - v^2}{2a} \quad \textbf{(2.28)}$$

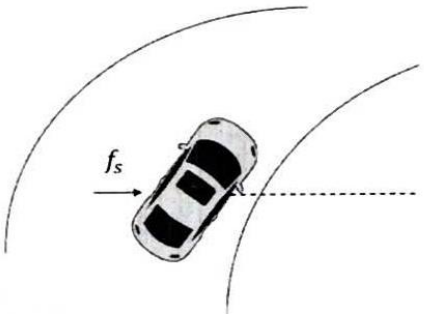
เมื่อ s คือ ระยะทางในการเบรก

v คือ ความเร็วเมื่อรถหยุดนิ่ง (มีค่า = 0)

u คือ ความเร็วเมื่อรถเริ่มทำการเบรก

a คือ ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก (หาได้จากสมการ 2.27)

2.6 การเข้าโค้งบนโค้งราบ



รูปที่ 2.11 แรงกระทำต่อรถในขณะเลี้ยวบนถนนโค้งราบ

ที่มา : หนังสือ APcen Physics

ในขณะที่รถเลี้ยวโค้งบนถนนโค้งราบ ซึ่งมีแนวทางการเคลื่อนที่ดังรูป 2.11 รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะเริ่มลื่นไถลออกนอกถนนแทนการพลิกคว่ำถ้าหากแรงเสียดทานระหว่างยางกับถนนมีค่าไม่มากพอ แรงที่ทำให้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไถลออกนอกเส้นทานี้คือแรงสู่ศูนย์กลาง F_C เมื่อพิจารณาแรงกระทำต่อรถในแนวระดับพบว่าขณะรถเลี้ยว พยายามไถลออกจากโค้ง จะมีแรงเสียดทานที่พื้นกระทำต่อล้อรถในทิศทางพุ่งเข้าในแนวผ่านศูนย์กลางความโค้ง ดังนั้น แรงเสียดทาน จะเท่ากับ แรงสู่ศูนย์กลาง

แรงเสียดทาน = แรงสู่ศูนย์กลาง

$$f_s = F_C$$

$$\mu_s N = ma_c$$

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

$$r = \frac{V^2}{\mu_s g} \qquad \textbf{(2.29)}$$

โดยที่ r คือ รัศมีความโค้งของการเลี้ยว มีหน่วยเป็น (m)

V คือ อัตราเร็วของรถที่ทำให้รถเริ่มไถล มีหน่วยเป็น (m/s)

μ_s คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้อยางกับถนน (หาได้จากตารางที่ 2.3)

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

2.7 การหาจุดศูนย์กลางมวล

จุดศูนย์ถ่วง คือ จุดรวมของแรงดึงดูดของโลก ที่กระทำวัตถุ เป็นที่รวมน้ำหนักของวัตถุทั้งก้อน จุดศูนย์กลางมวล (Center of mass)คือ จุดรวมของมวลของวัตถุทั้งก้อนวัตถุทุกชิ้นประกอบด้วยอนุภาคจานวนมากแต่กรณีที่วัตถุมีขนาดใหญ่มาก จนแต่ละส่วนของวัตถุนั้นอยู่ในสนามความโน้มถ่วงที่มีค่าต่างกัน เป็นไปได้ที่จุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์กลางมวลจะอยู่คนละจุดกัน เราอาจจะกล่าวได้ในอีกแง่หนึ่งว่า จุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ คือ จุดที่น้ำหนักรวมทั้งหมดของวัตถุได้พิจารณาว่ารวมอยู่ที่จุดนั้น หากพิจารณาเป็นแนวดิ่งเส้นตรงเราพบว่า แนวของน้ำหนักของก้อนวัตถุนั้นผ่านดิ่งลง ไม่ว่าก้อนวัตถุนั้นจะอยู่ในลักษณะใดก็ตาม จุดศูนย์กลางของความถ่วงจุดที่เราเรียกว่า จุดศูนย์ถ่วง จะทำให้วัตถุที่

วางตัวอยู่ในแบบนี้อยู่ในสภาวะสมดุล สำหรับการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้นการหาจุดศูนย์กลางมวลของรถ (CG) หาได้จากโปรแกรม SolidWorks

2.8 แบตเตอรี่ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2.8.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดมีอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักที่ต่ำมาก และอัตราส่วนพลังงานต่อปริมาณที่ต่ำ แต่มีอัตราส่วนกำลังงานต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง หมายถึงจะมีความสามารถในการจ่ายกระแสไฟกระชากที่สูง ด้วยคุณสมบัติข้างต้นรวมกับราคาที่ค่อนข้างถูก ทำให้เป็นที่น่าสนใจสำหรับการใช้งานในเครื่องยนต์ที่ต้องใช้กระแสสูงสำหรับการจุดเครื่องยนต์ดังนั้น จึงเหมาะกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วต่ำ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ จึงใช้กันอย่างแพร่หลาย ในปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจะใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วสูงหรือใช้กับรถกระบะที่มีพื้นที่พอติดตั้งแบตเตอรี่ โดยชนิดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด มีดังนี้

2.8.1.1 แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบน้ำ เป็นแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในระบบโซล่าเซลล์และระบบพลังงานทางเลือก เพราะเมื่อเปรียบเทียบกัน ต่อ Ah แล้ว เป็นชนิดแบตเตอรี่ที่คุ้มค่าต่อการลงทุนที่สุด แต่ก็เป็นแบตเตอร์รี่ที่ต้องการการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ เช่น การเติมน้ำกลั่น หรือการทำความสะอาดขั้วแบตเตอรี่ ส่วนการติดตั้ง ต้องติดตั้งในพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเท และวางในลักษณะตั้งขึ้นได้เท่านั้น

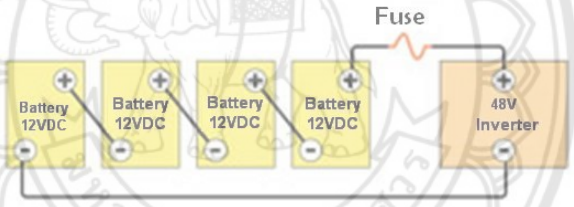
2.8.1.2 แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบแห้ง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือประเภทที่ใช้เจลเป็นวัสดุคอยดูดซับและทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกเรียกว่า แบตเตอรี่แบบเจล และแบตเตอรี่ที่อาศัยแผ่นใยสังเคราะห์ที่เรียกกันว่า Glass Mat (AGM)การแบ่งประเภทของ แบตเตอรี่ ตะกั่วกรดยังแบ่งได้อีกลักษณะหนึ่งคือ การแบ่งประเภทตามลักษณะการใช้งาน โดยจะแบ่งเป็น แบตเตอรี่ แบบใช้งานทั่วไปหรือแบบที่ใช้สำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์ แบบคายประจุลึกและแบบลูกผสม

ความแตกต่างระหว่าง แบตเตอรี่ แบบเจลและแบบ AGM คือ แบตเตอรี่ แบบเจลจะเป็น แบตเตอรี่ ที่แห้งกว่าแบบ AGM ถ้าเปลือกนอกของมันแตกจะไม่มีน้ำกรดไหลหรือซึมออกมา แต่สำหรับแบบ AGM จะซับน้ำกรดได้ประมาณ 95% ดังนั้นถ้าเปลือกของมันแตกแม้น้ำกรดจะไหลออกมา แต่ก็อาจจะมีการซึมออกมาได้บ้างเล็กน้อยในปัจจุบันจะนิยมใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ AGM มากกว่าแบบเจลแบตเตอรี่AGMมีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป เนื่องจากราคาถูกและมี

กลุ่มผู้ใช้งานกว้างขวาง โดยต้องการแบตเตอรี่เพียงเพื่อสำรองไฟฟ้าแต่ไม่เน้นเรื่องอายุการใช้งานและความแน่นอนโดยความบกพร่องของกระแสไฟฟ้าในบางครั้งจะทำให้เกิดความเสียหายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เช่น การใช้งานกับเครื่องยูพีเอสขนาดเล็ก, ระบบแสงสว่าง โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะใช้แบบAGMแบตเตอรี่ประเภทนี้ ได้รับการ พัฒนาต่อมาจากชนิดเจล ซึ่งทำให้ได้แบตเตอรี่ ที่มีคุณภาพสูง และให้พลังไฟฟ้ามากกว่า แบตเตอรี่ปกติมาก

2.8.2 การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การต่อแบตเตอรี่ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เป็นการนำแบตเตอรี่มาต่อกันแบบอนุกรม รูปแบบการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมนี้มีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่โดยการนำขั้วบวกของแบตเตอรี่ตัวหนึ่งต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่อีกตัวหนึ่ง ซึ่งการต่อแบบนี้จะได้ความจุกระแสไฟฟ้าเท่ากับแบตเตอรี่เดี่ยวตัวเดียว แต่ได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละ ตัวที่เชื่อมต่อกัน ดังแสดงใน รูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

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

2.9 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง

ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังในยานยนต์ไฟฟ้า จะทำหน้าที่ในการรับพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่แตกต่างกัน และแปรให้เป็นระดับแรงดันที่ต้องการ เนื่องจากยานยนต์ไฟฟ้านั้นมีอุปกรณ์หลายชิ้นที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่ต่างกันไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ หรือชุดประจุไฟฟ้า

2.9.1 องค์ประกอบชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง

2.9.1.1 ตัวรับรู้

ตัวรับรู้ ทำหน้าที่หลักในการดูสถานะของมอเตอร์ในกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า หรือดูสถานะของแบตเตอรี่ในกรณีชุดควบคุมไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่ เมื่อรับรู้สถานะปัจจุบันแล้วตัวรับรู้ก็จะส่งข้อมูลสถานะให้ชุดควบคุมตัดสินใจสั่งงาน

ตัวรับรู้ทางกลเป็นอุปกรณ์ที่พบมากในการควบคุมมอเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้การตอบสนองตามที่ต้องการ ชุดควบคุมไฟฟ้ามีความจำเป็นที่จะต้องรู้สถานะทางกลของมอเตอร์ เพื่อที่จะสามารถปรับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการทำงาน

2.9.1.2 ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง

ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการปรับกระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบที่ต้องการ ถ้าเป็นวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ความเร็วรอบของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับแรงดัน ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง จะทำการจ่ายไฟฟ้ากำลังให้มีระดับแรงดันที่แตกต่างกันตามแต่ได้รับคำสั่งจากส่วนควบคุม ในกรณีที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังจะทำการจ่ายไฟฟ้ากำลังกลับขั้ว

2.9.1.3 ส่วนควบคุม

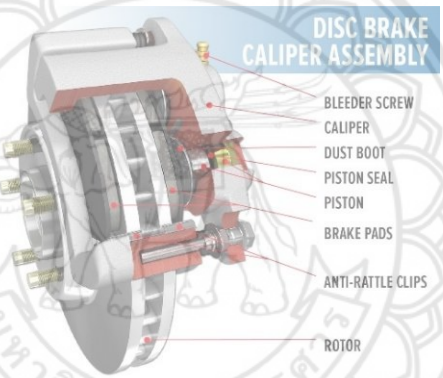
ส่วนควบคุมทำหน้าที่ในการนำความต้องการของผู้ใช้งาน เช่น ความเร็ว อัตราเร่ง มาประมวลผลเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้ แล้วตัดสินใจสั่งงานส่วนขยายไฟฟ้ากำลังให้สร้างรูปแบบของไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมออกมาเพื่อส่งไปยังอุปกรณ์ปลายทาง ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์หรือชุดแบตเตอรี่

2.10 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

เบรกเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หน่วงความเร็วในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่และทำให้รถหยุดหรือสามารถทำให้รถสามารถหยุดนิ่งบนพื้นเอียงได้ ซึ่งเบรกนั้นนับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่เป็นอย่างมาก โดยระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า คือ ดิสก์เบรก

2.10.1 ดิสก์เบรก (Disk Brakes)

ดิสก์เบรก (Disk Brakes) เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งในระบบห้ามล้อของรถยนต์ ซึ่งทำหน้าที่ในการลดความเร็วและทำให้รถหยุดได้ทันที โดยดิสก์เบรกจะประกอบด้วยจานโรเตอร์หรือจานเบรกที่ทำจากเหล็กหล่อและติดตั้งให้หมุนเคลื่อนที่ไปพร้อมกับล้อรถยนต์ โดยที่โรเตอร์จะหมุนอยู่ระหว่างผ้าเบรกทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และถูกผลักด้วยแรงดันของลูกสูบซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันของไฮดรอลิกในขณะเหยียบเบรกทำให้เกิดความฝืดในการหน่วงความเร็วหรือหยุดรถได้ โดยเบรกชนิดนี้จะยอมให้เกิดการสึกหรอที่ผ้าเบรก โดยที่รักษาความดันบนผิวสัมผัสของผ้าเบรกให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งเบรกประเภทนี้มีข้อดี คือ มีพื้นผิวเปิดที่สัมผัสกับบรรยากาศได้มาก ทำให้มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

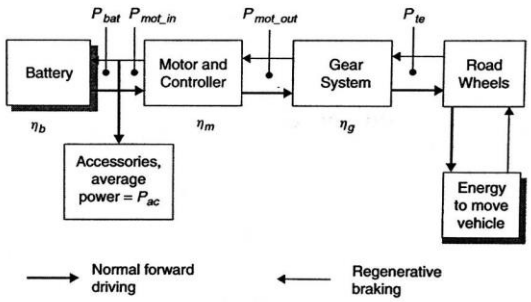


รูปที่ 2.13 การสัมผัสของผ้าเบรกกับโรเตอร์

ที่มา : https://www.lesschwab.com/article/complete-guide-to-disc-brakes-and-drum-brakes.html

2.10.2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative brake)

รถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อรถเบรก มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งไฟฟ้ากลับไปยังแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่ที่ได้ในช่วงทำการเบรก ดังแสดงดังรูปที่ 2.14

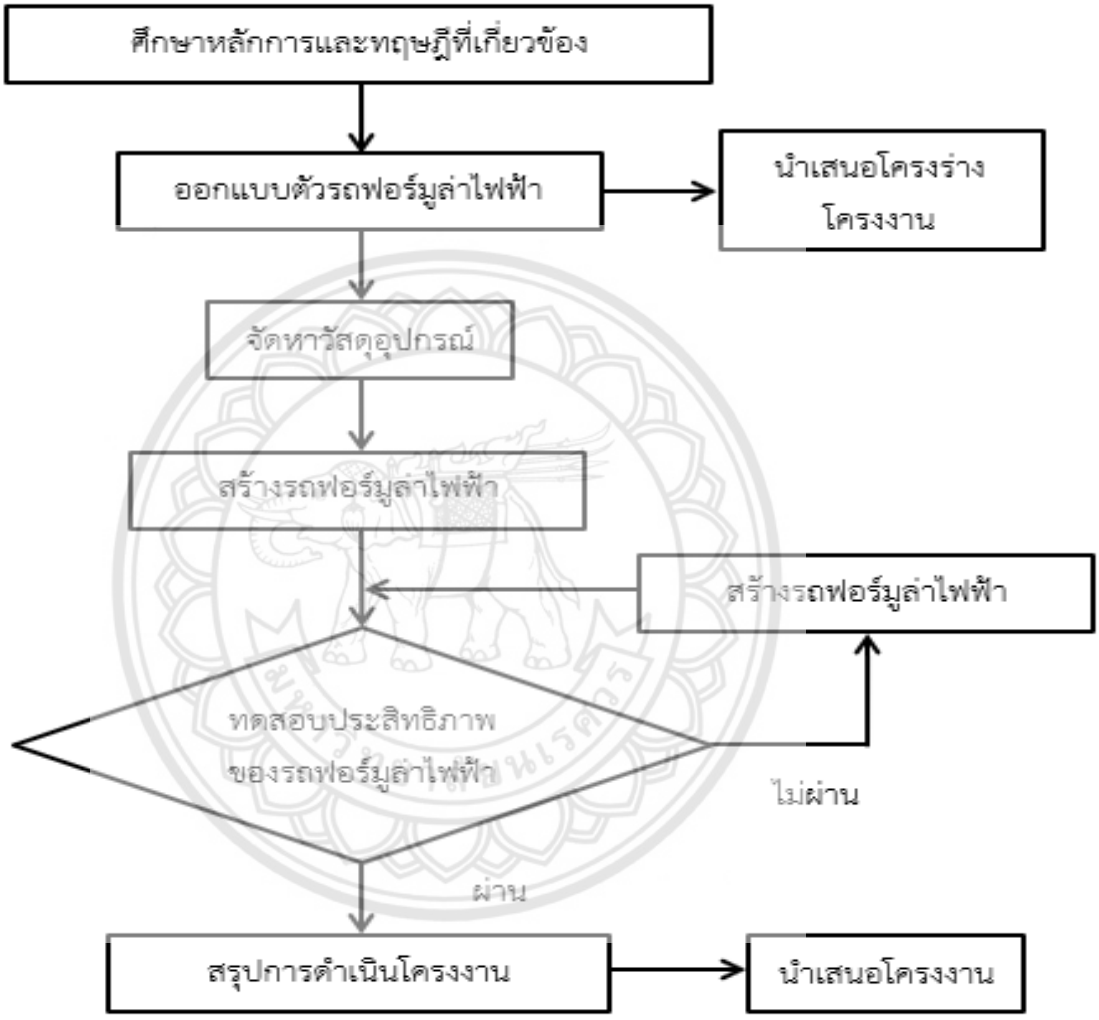


รูปที่ 2.14 Energy flow in the classic battery-powered electric vehicle, which has regenerative braking

ที่มา : หนังสือ Electric Vehicle Technology Explained

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีดำเนินงาน

การดำเนินโครงงานตามแผนผังแสดงในรูปที่ 3.1 เริ่มจาก ศึกษาหลักการการออกแบบและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการออกแบบชิ้นส่วนคอม้า ชิ้นส่วนปีกนกสำหรับล้อหน้า แล้วนำเสนอโครงร่างโครงงาน จะทำการจัดหาและสั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในประกอบสร้างและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพภายในมหาวิทยาลัยนเรศวรแล้วสรุปผลการดำเนินโครงการ

3.1 ออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

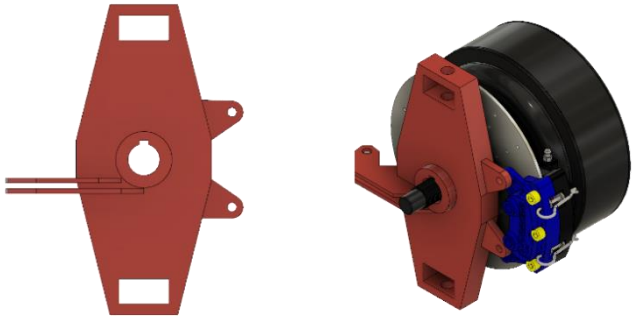
ในการออกแบบรถฟอร์มูล่านี้ จะทำการออกแบบโดยการออกแบบตัวรถในโปรแกรม Fusion360 ก่อน จากนั้นทำการสร้างรถฟอร์มูล่าขึ้นโดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดกับล้อรถ โดยจะนำชิ้นส่วนต่างๆ ที่มีอยู่แล้วและยังสามารถใช้ได้อยู่มาประกอบ และใช้ชิ้นส่วนอื่นๆ ที่มีจำหน่ายตามร้านค้าทั่วไปหรือร้านค้าออนไลน์มาใช้ร่วมกันเพื่อสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างชิ้นส่วนขึ้นมาเองนั้นมีต้นทุนสูงและมีความยุ่งยากในการสร้างอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้ชิ้นส่วนประยุกต์ที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว การจัดหาชิ้นส่วนสำรองและอุปกรณ์ซ่อมบำรุงสามารถจัดหาได้สะดวก และมีราคาที่ไม่สูงมาก เช่น ดิสก์เบรก ปั๊มเบรก เบาะ พวงมาลัย เป็นต้น

ส่วนชิ้นส่วนที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น ชิ้นส่วนคอม้า ปีกนก จะทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมอเตอร์แบบสวมล้อและประกอบเข้ากับชิ้นส่วนอื่นได้ ทั้งยังมีความแข็งแรงน้ำหนักเบาและมีต้นทุนในการผลิตไม่สูงมากในการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยมีจุดประสงค์ในการออกแบบคือ

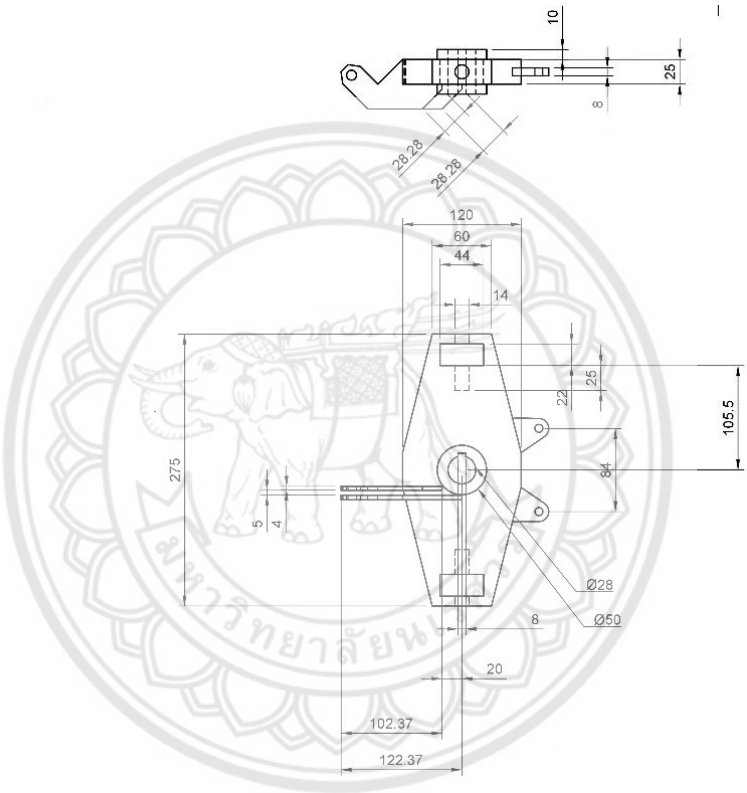
1) ออกแบบสร้างชิ้นส่วนสำหรับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า 1 ที่นั่ง
2) ใช้ระบบเบรกแบบดิสก์เบรกทั้ง 4 ล้อ
3) ติดตั้งมอเตอร์แบบสวมล้อ (Hub motor) ทั้ง 4 ล้อ
4) ใช้แบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด (12V 65AH) จำนวน 6 ลูก

3.1.1 การออกแบบชิ้นส่วนของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

3.1.1.1 การออกแบบคอม้าด้านหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่3.3 การกำหนดขนาดของคอม้านั้นขึ้นอยู่กับขนาดของปีกนก ดิสก์เบรก ปั๊มเบรก ลูกหมาก และมอเตอร์ ความหนาของคอม้าอ้างอิงจากเป็นเหล็กที่สามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด

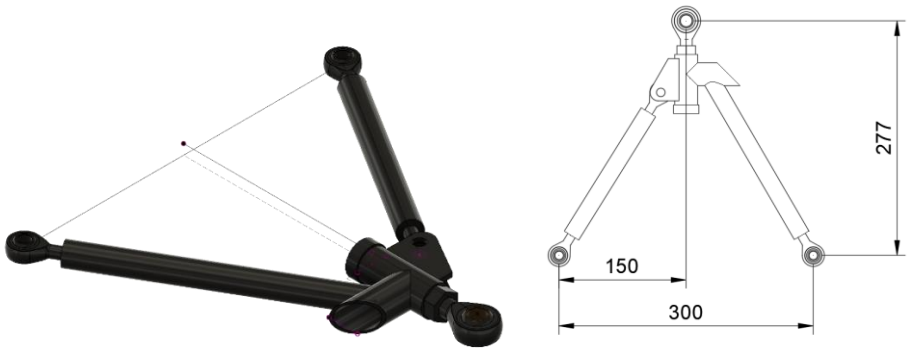


รูปที่ 3.2 การออกแบบคอม้า

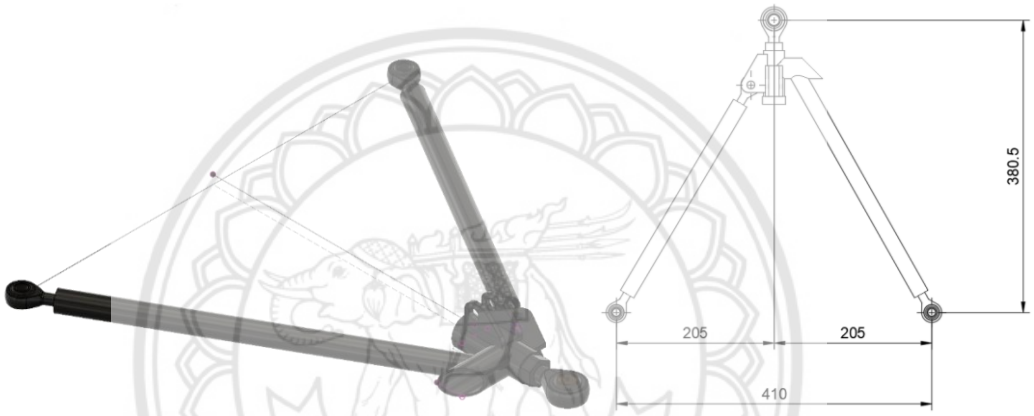


รูปที่ 3.3 ขนาดของคอม้า

3.1.1.2 การออกแบบปีกนกด้านหน้า เป็นการดัดแปลงปีกนกของโครงเดิม โดยได้มีการดัดแปลงปีกนกนั้นมีความกว้างของปีกนกนั้นมีขนาดเล็กลง การกำหนดขนาดสำหรับปีกนกล้อหน้านั้นขึ้นอยู่กับขนาดของโครงตัวรถ ลูกหมาก โช้คอัพ และจุดศูนย์ถ่วง (CG) ของรถ ซึ่งการออกแบบปีกนกด้านบนและด้านล่างนั้นมีความแตกต่างกันเนื่องจากโครงสร้างของตัวรถที่มีความกว้างไม่เท่ากัน จึงได้ทำการออกแบบให้มีความกว้างที่ออกมาจากจุดกึ่งกลางของตัวรถเท่ากันทั้งด้านบนดังรูปที่ 3.4 และด้านล่าง ส่วนปีกนกด้านล่างนั้นได้มีส่วนที่ใช้ในการยึดจับตัวเพลาส่งแรงไปยังโช้คอัพดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหน้าด้านบน



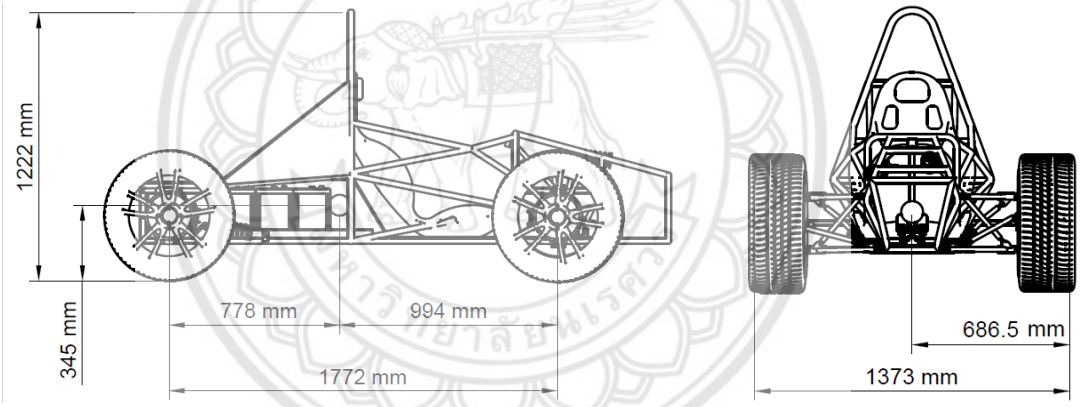
รูปที่ 3.5 การออกแบบปีกนกสำหรับล้อหน้าด้านล่าง

3.1.2 การหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) และน้ำหนัก ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเพื่อการออกแบบ

ในการออกแบบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจะต้องมีการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) และน้ำหนักของตัวรถ เพื่อความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของตัวรถ ให้อยู่ในสภาพที่สมดุลในขณะเคลื่อนที่และหยุดนิ่ง ซึ่งในการคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง (CG) จะคำนวณจากโปรแกรม Autodesk Fusion 360 โดยจะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

3.1.2.1 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับ

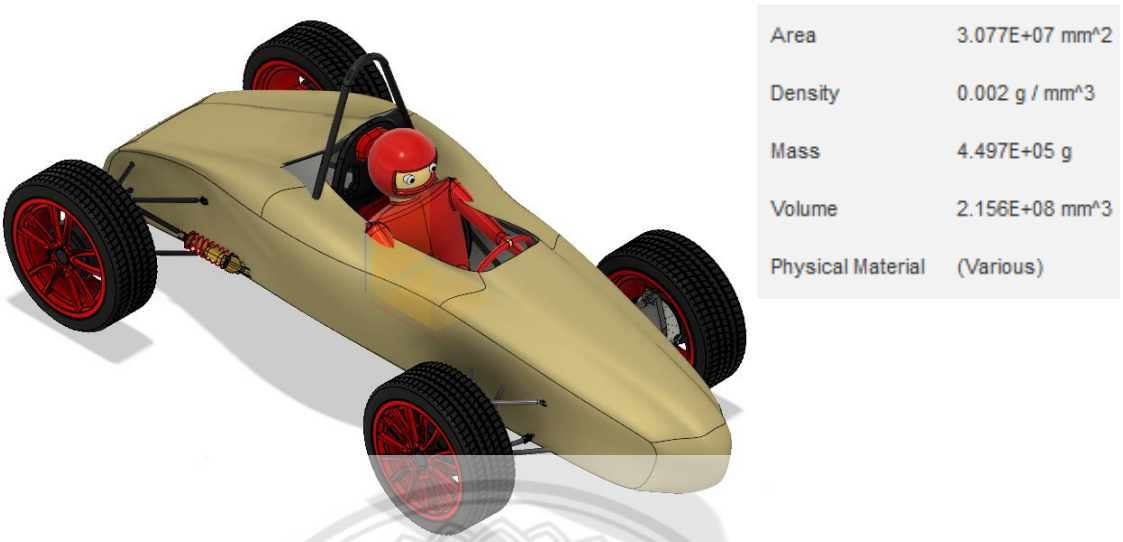
รูปที่ 3.6 การหาจุดศูนย์ถ่วงและน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ



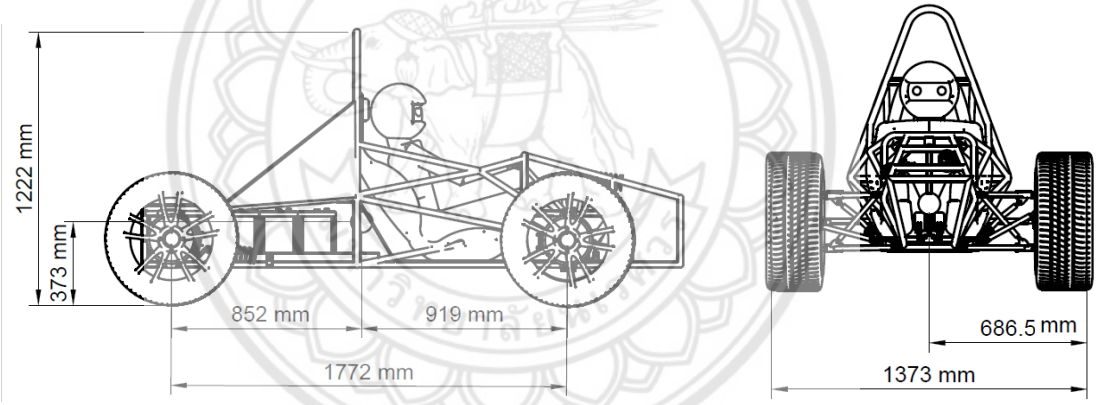
รูปที่ 3.7 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับ

จากรูปที่ 3.6 ใช้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงโดยอ้างอิงจากจุด Origin ของแบบ 3 มิติ โดยการออกแบบระยะห่างของล้อดังนี้ ล้อหน้ามีระยะห่างจากล้อหลัง 1772 mm และระยะห่างล้อซ้ายกับล้อขวาสูงสุด 1373 mm แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะไร้คนขับอยู่ที่ตำแหน่งเยื้องไปทางด้านหน้า ห่างจากกึ่งกลางระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังพอสมควร สูงจากพื้น 345 mm กึ่งกลางระหว่างล้อซ้ายกับล้อขวา ห่างจากล้อหน้า 994 mm และห่างจากล้อหลัง 778 mm ดังรูปที่ 3.7 และมีน้ำหนักของรถขณะไร้คนขับ 370 กิโลกรัม

3.1.2.2 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ



รูปที่ 3.8 การหาจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ



รูปที่ 3.9 แสดงจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับ

จากรูปที่ 3.8 ใช้โปรแกรมคำนวณหาตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงโดยอ้างอิงจากจุด Origin ของแบบ 3 มิติ โดยการออกแบบระยะห่างของล้อดังนี้ ล้อหน้ามีระยะห่างจากล้อหลัง 1772 mm และระยะห่างล้อซ้ายกับล้อขวาสูงสุด 1373 mm แสดงให้เห็นว่าจุดศูนย์ถ่วงของรถขณะมีคนขับอยู่ที่ตำแหน่งเยื้องไปทางด้านหลัง ห่างจากกึ่งกลางระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังไม่มากนัก สูงจากพื้น 373 mm กึ่งกลางระหว่างล้อซ้ายกับล้อขวา ห่างจากล้อหน้า 919 mm และห่างจากล้อหลัง 852 mm ดังรูปที่ 3.9 และมีน้ำหนักของรถขณะมีคนขับ 450 กิโลกรัม

3.2 การคำนวณระยะทางในการเบรก

การคำนวณระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าบนพื้นคอนกรีตที่ความเร็วในการเบรก 30, 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นคอนกรีตแห้งเป็นแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_K = 0.65$ (ตารางที่ 2.4) โดยน้ำหนักรวมของรถรวมคนขับเท่ากับ 540 กิโลกรัม และทำการเบรกทั้ง 4 ล้อ

จากสมการ $F = ma$

$$\mu_k m_R g = ma$$
$$0.65 \times 450 \times 9.81 = 450a$$
$$a = 6.376 \text{ m/s}^2$$

จะได้ความเร่งในการเบรกเท่ากับ 6.376 m/s^2

3.2.1 ระยะเบรกที่ความเร็ว 30 km/h

$$s = \frac{u^2 - V^2}{2a}$$
$$s = \frac{\left(\frac{30}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.376)}$$
$$s = 5.446 \text{ m}$$

3.2.2 ระยะเบรกที่ความเร็ว 40 km/h

$$s = \frac{u^2 - V^2}{2a}$$
$$s = \frac{\left(\frac{40}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.376)}$$
$$s = 9.681 \text{ m}$$

3.2.3 ระยะเบรกที่ความเร็ว 50 km/h

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

$$s = \frac{\left(\frac{50}{3.6}\right)^2 - 0^2}{2(6.376)}$$

$$s = 15.127 \text{ m}$$

3.3 การคำนวณรัศมีวงเลี้ยวบนถนนราบ

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

3.3.1 รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 10 km/h

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

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

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

3.3.2 รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 15 km/h

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

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

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

3.3.3 รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 20 km/h

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

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

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

3.4 การหาความเร็วและความเร่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การจำลองการหาความเร็วและความเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เพื่อหาสมรรถนะภาพของตัวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในทางทฤษฎี

ตัวแปรที่ใช้

Gear ratio	เท่ากับ 1 (เพราะไม่มีอัตราทดเกียร์)
r	เท่ากับ 0.3 m (รัศมีล้อ)
η_{gear}	เท่ากับ 0.98% (เนื่องจากไม่มีเกียร์)
f_r	เท่ากับ 0.015 (จากตารางที่ 2.1)
m	เท่ากับ 540 kg (มวลของรถ)
$m_{5\%}$	เท่ากับ 27 (มวล 5% โดยประมาณ เกิดจากการหมุนของชิ้นส่วนของรถ)
C_d	เท่ากับ 0.5 (จากตารางที่ 2.1)
A	เท่ากับ 1 m^2 (จากการประมาณพื้นที่หน้าตัดของรถ)

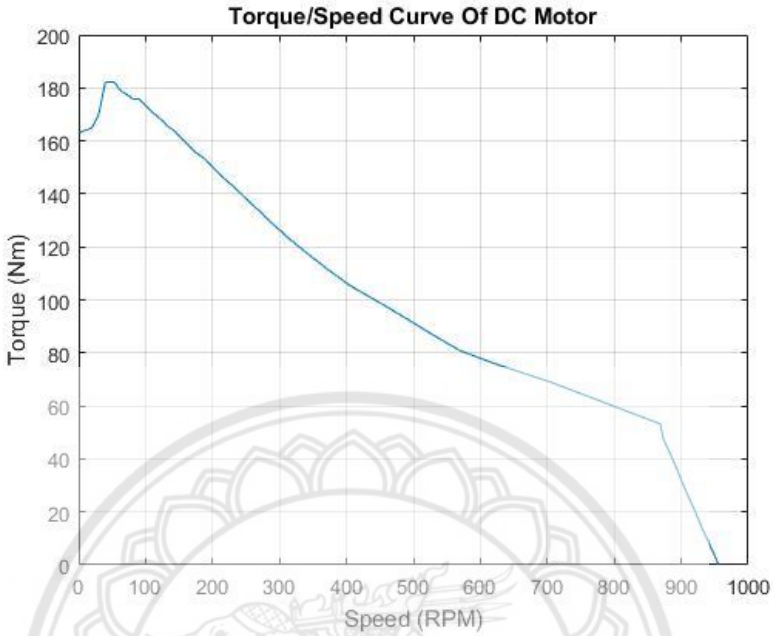
จากสมการที่ (2.23)

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

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) จากตาราง ในรูปที่ 3.11 ลงใน Matlab เพื่อนำไปแทนค่า T ในสมการ (3.1)

โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.10

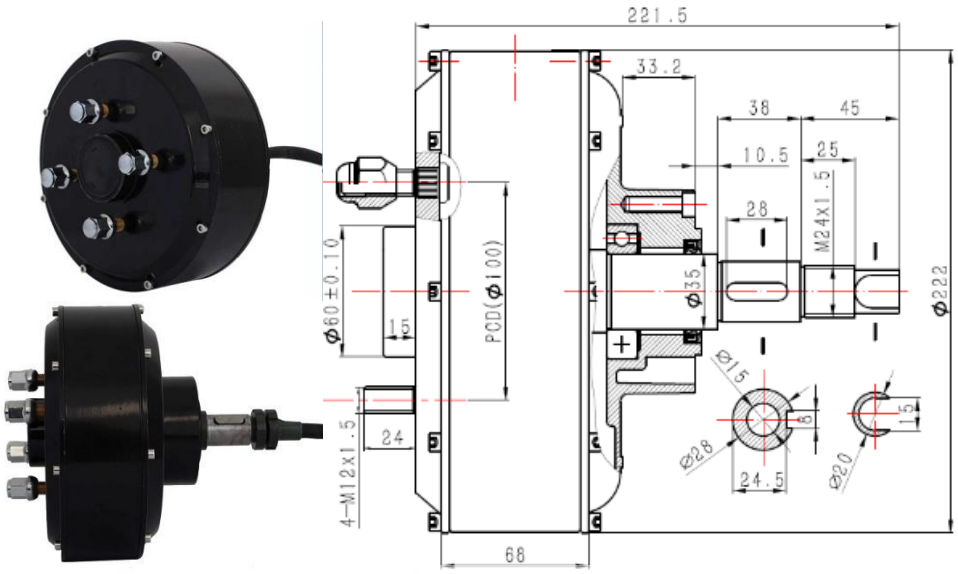


รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

	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	77.75	5558	80.9	569.1	4823	86.7
21	71.46	78.61	5618	87.0	527.8	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 ตารางแสดงค่าต่าง ๆ ของมอเตอร์

ที่มา : www.cnqsmotor.com/upfile/Performance_Curve/



รูปที่ 3.12 แบบมอเตอร์ 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 3.2 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

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 3.13 การสร้างสมการ Interpolation ระหว่างความเร็วกับแรงบิด ใน Matlab

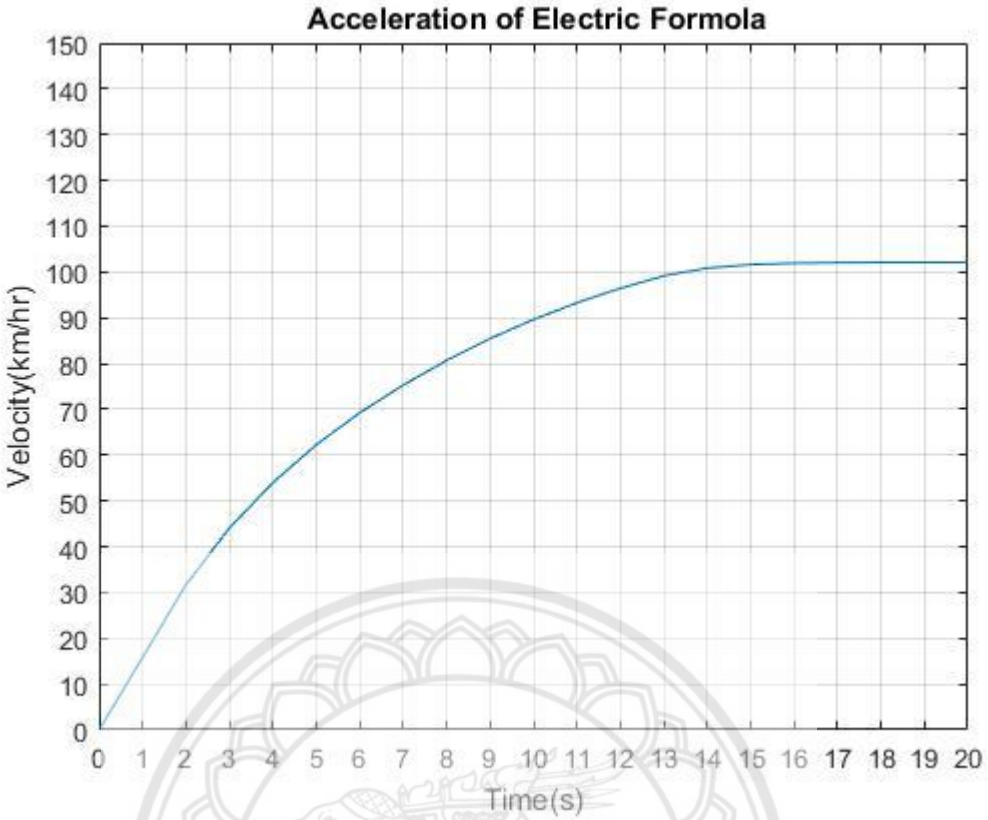
นำสมการ Interpolation ที่ได้จาก รูปที่ 3.13 ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab ดังรูปที่ 3.14

N.m | Acceleration.m

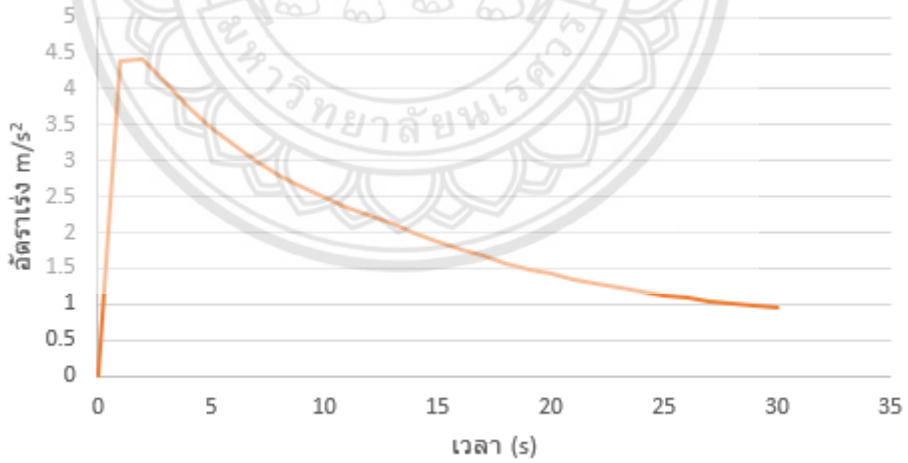
```
t=linspace(0,1000,1001);
vel=zeros(1,1001);
d=zeros(1,1001);
T=zeros(1,1001);
dT=1;
for n=1:450
    W(n)=vel(n)*(1/0.3)*(60/6.28);
    T(n)=4*N(W(n));
    vel(n+1) = vel(n)+(dT*(((1/(0.3*472.5))*T(n))-(0.012*450*9.81/472.5)-(0.6*0.5*0.72/472.5)*vel(n)^2));
    d(n+1)=d(n)+ vel(n);

end;
vel=vel*3.6;
figure(1)
plot(t,vel);
axis([0 20 0 150]);
xlabel('Time(s)');
ylabel('Velocity(km/hr)');
title(' Acceleration of Electric Formola');
grid on
set (gca, 'YTick', 0:10:150)
set (gca, 'XTick', 0:1:20)
```

รูปที่ 3.14 สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา ใน Matlab



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากรูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา และรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่า ค่าที่ความเร็ว 50 km/h ทำเวลาอยู่ที่ 3.5 วินาที มีความเร่ง 1.85 m/s^2 และทำความเร็วสูงสุดได้ 102 km/h

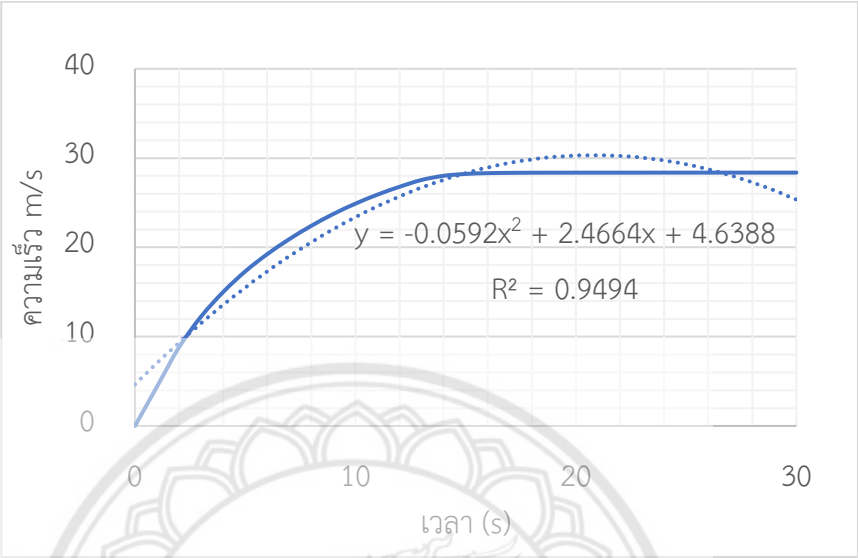
3.5 การคำนวณหาความเร็วสูงสุดและเวลาที่ใช้ภายในระยะทาง 150 เมตร

การคำนวณหาความเร็วสูงสุดและเวลาที่ใช้ภายในระยะทาง 150 เมตร เพื่อหาสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าทางทฤษฎีโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการคิดในรูปที่ 3.14 เพื่อใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลที่ได้จากคำนวณในโปรแกรม MATLAB

ความเร็วหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง				ความเร็วหน่วยเมตรต่อวินาที			
t (s)	V (km/hr)	t (s)	V (km/hr)	t (s)	V (m/s)	t (s)	V (m/s)
0	0	16	101.924	0	0	16	28.3123
1	15.8239	17	102.043	1	4.39554	17	28.34532
2	31.7138	18	102.093	2	8.8094	18	28.35919
3	44.095	19	102.115	3	12.2486	19	28.36522
4	53.985	20	102.124	4	14.9958	20	28.36784
5	62.2949	21	102.128	5	17.3041	21	28.36898
6	69.252	22	102.13	6	19.2367	22	28.36948
7	75.3094	23	102.131	7	20.9193	23	28.3697
8	80.6915	24	102.131	8	22.4143	24	28.36979
9	85.461	25	102.131	9	23.7392	25	28.36983
10	89.6302	26	102.131	10	24.8973	26	28.36985
11	93.2653	27	102.131	11	25.907	27	28.36986
12	96.4279	28	102.131	12	26.7855	28	28.36986
13	99.1739	29	102.132	13	27.5483	29	28.36986
14	100.851	30	102.132	14	28.0142	30	28.36986
15	101.617			15	28.227		

นำข้อมูลที่ได้จากตารางไปแทนค่าจะได้กราฟเพื่อหาสมการความเร็วและนำสมการนั้นไปอินทิเกรท เพื่อให้ได้เวลาที่ใช้ในระยะทาง 150 เมตร ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

จะได้สมการความเร็ว $V = -0.0592t^2 + 2.4664t + 4.6388$ **(3.4)**

จากนั้นนำสมการที่ 3.4 ไปอินทิเกรทเพื่อให้เป็นสมการระยะทาง

จะได้

$$x = \int_{t=0}^{t} v\,dt = \int_{t=0}^{t} \left(-0.0592t^2+2.4664t+4.6388\right) dt$$

$$x = \int_{t=0}^{t} (-0.0592t^2)dt + \int_{t=0}^{t} (2.4664t)dt + \int_{t=0}^{t} (4.6388)dt$$

$$x = \frac{(-0.0592)t^3}{3} + \frac{(2.4664)t^2}{2} + 4.6388t$$

ดังนั้นจะได้ $x = -0.01973t^3 + 1.2332t^2 + 4.6388t$ **(3.5)**

จากนั้นนำสมการที่ 3.5 ไปแทนค่าเวลาเพื่อหาระยะทางจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลที่ได้จากการแทนค่าในสมการที่ 3.5

ระยะทางเทียบกับเวลา (วินาที)			
t (s)	x (m)	t (s)	x (m)
0	0	16	309.1059
1	5.85227	17	338.3209
2	14.05256	18	367.9898
3	24.48249	19	397.9943
4	37.02368	20	428.216
5	51.55775	21	458.5365
6	67.96632	22	488.8374
7	86.13101	23	519.0003
8	105.9334	24	548.9069
9	127.2552	25	578.4388
10	149.978	26	607.4775
11	173.9834	27	635.9048
12	199.153	28	663.6022
13	225.3684	29	690.4514
14	252.5113	30	716.334
15	280.4633		

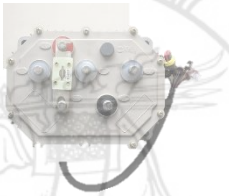
จากการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่า ที่ระยะทาง 150 เมตร รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำความเร็วได้ 89.63 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 24.9 เมตรต่อวินาที และใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 10 วินาที

3.6 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์

1) มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W

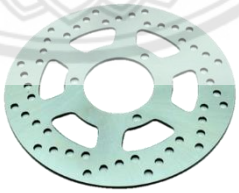
รูปที่ 3.18 มอเตอร์ขับเคลื่อน Hub Motor 3000W

2) คอนโทรลเลอร์ KLS7245H



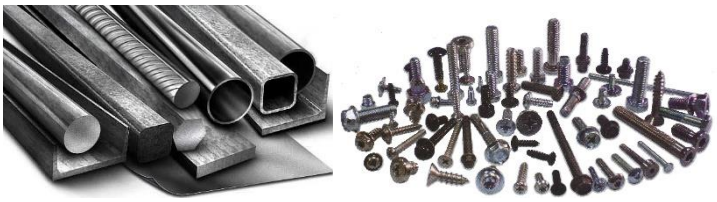
รูปที่ 3.19 คอนโทรลเลอร์ KLS7245H

3) จานดิสเบรค SPARK-115 i (3รู)



รูปที่ 3.20 ล้อแม็กซ์และยางขนาด 195/55 R15

4) เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่างๆ



รูปที่ 3.21 เหล็กและน็อตสำหรับยึดจุดต่างๆ

5) อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

รูปที่ 3.22 อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

3.7 วิธีการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

การทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบข้อมูลสมรรถนะต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าในสภาพใช้งานจริงเปรียบเทียบกับข้อมูลตามทฤษฎี เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาต่อไป และผลการทดสอบนี้แสดงถึงสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าอีกด้วย ในการทดสอบจริงต้องมีการดัดแปลงให้เข้ากับความจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถถือเป็นมาตรฐานที่จะใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลได้ เนื่องจากรถฟอร์มูล่าฟ้าได้สร้างขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์แบบสวมล้อ สำหรับการศึกษาพัฒนาสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบสมรรถนะของตัวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ย ดังนี้

3.7.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

การทดสอบเพื่อหาระยะทางที่สูงที่สุดที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
2) แบตเตอรี่ Deep Cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH จำนวน 6 ลูก
3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.23
4) คลิปแอมป์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.24

รูปที่ 3.23 GPS Lap Timer LT-Q6000

รูปที่ 3.24 คลิปแอมป์มิเตอร์

วิธีทดสอบ

ทำการทดสอบการปล่อยกระแสของแบตเตอรี่ Deep cycle ตะกั่วกรดแบบน้ำ ขนาด 12V 65AH จำนวน 6 ลูก ที่ต่ออนุกรมกัน โดยการทดสอบหาระยะทางที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าวิ่งได้ไกลที่สุดที่แบตเตอรี่ชาร์จเต็ม ดังแสดงในรูปที่ 3.24 โดยใช้เครื่อง GPS Lap Timer ในการวัดระยะทาง และหาการใช้พลังงานต่อ 1 กิโลเมตร โดยใช้คลิปแอมป์ในการวัดค่าแล้วนำมาใช้ในการคำนวณ

รูปที่ 3.25 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

3.7.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

1) การทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

2) การทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) การทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.23

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ ดังแสดงในรูป 3.25 ที่เหมาะสมกับการทดสอบ

2) กำหนดจุดออกตัวและจุดหยุดรถที่ปลอดภัย

3) ทำการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเร่งความเร็วจาก 0 จนถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา

4) ทำการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเร่งความเร็วจาก 0 จนถึง 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา

5) ทำการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเร่งความเร็วจาก 0 จนถึง 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา

6) ทำการทดสอบซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.26 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

3.7.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ

การทดสอบนี้เพื่อหาระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2) ตลับเมตร

3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.23

4) กรวยจราจร

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ เหมาะสมกับการทดสอบ

2) กำหนดความเร็วที่จะเริ่มทำการเบรกที่ 30, 40, และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) กำหนดจุดที่จะเริ่มเบรก ดังแสดงในรูปที่ 3.25 แล้วเริ่มเบรกเมื่อส่วนล้อหน้าของรถถึงจุดที่กำหนดไว้ เมื่อรถเบรกจนหยุดนิ่งจะวัดระยะทางตั้งแต่จุดที่กำหนดไว้ถึงล้อหน้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.27 แล้วบันทึกค่า

4) ทำการทดลองที่ความเร็วต่างๆ ตามข้อที่ 2) จนครบ และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.27 จุดเริ่มเบรก

รูปที่ 3.28 การวัดระยะเบรกจากล้อหน้ากับจุดเริ่มเบรก

3.7.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

การทดสอบเพื่อหารัศมีวงเลี้ยวและความเร็วต่างๆ ในการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในขณะที่ขับขี่เข้าทางโค้ง

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

2) ตลับเมตร

3) GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.23

4) กรวยจราจร

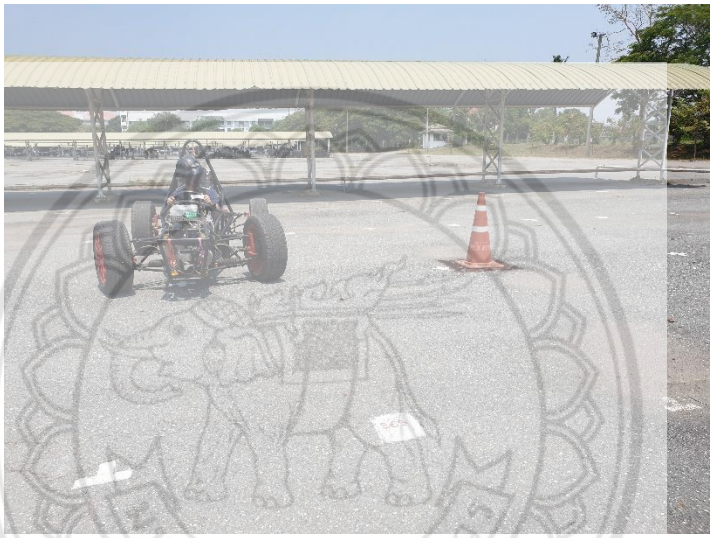
วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบที่กว้างและพื้นเรียบเหมาะสมกับการทดสอบ

2) ทดสอบโดยใช้รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดขณะทำการเลี้ยวซ้ายสุดและขวาสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ที่ความเร็ว 10, 15, และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ ซึ่งอยู่บนพื้นที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.30 แล้วบันทึกค่า

4) ทำการทดลองที่ความเร็วต่างๆ ตามข้อที่ 2) จนครบ



รูปที่ 3.29 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

รูปที่ 3.30 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการกลิ้งของล้อ

3.7.5 การทดสอบแบบ Slalom

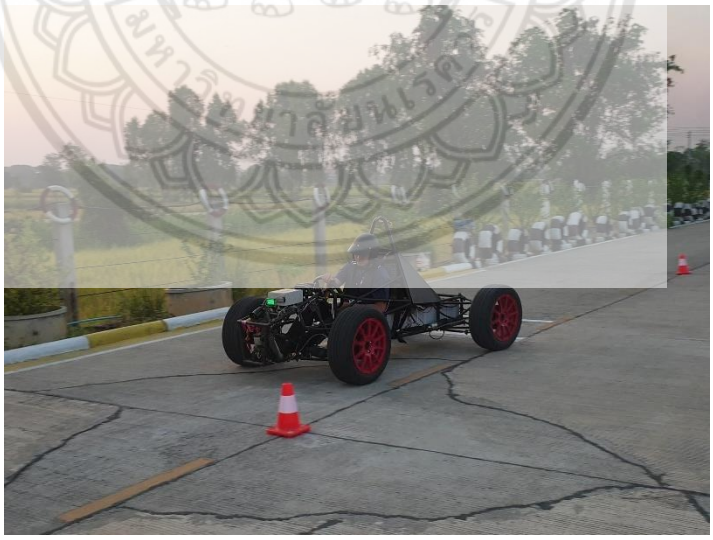
เป็นการทดสอบเพื่อวัดความเร็วสูงสุดในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและแรง G lateral สูงสุดที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำได้ โดยจะใช้กรวยจราจร 7 อัน วางห่างกัน 6 ช่วง ช่วงละ 10 เมตร

อุปกรณ์

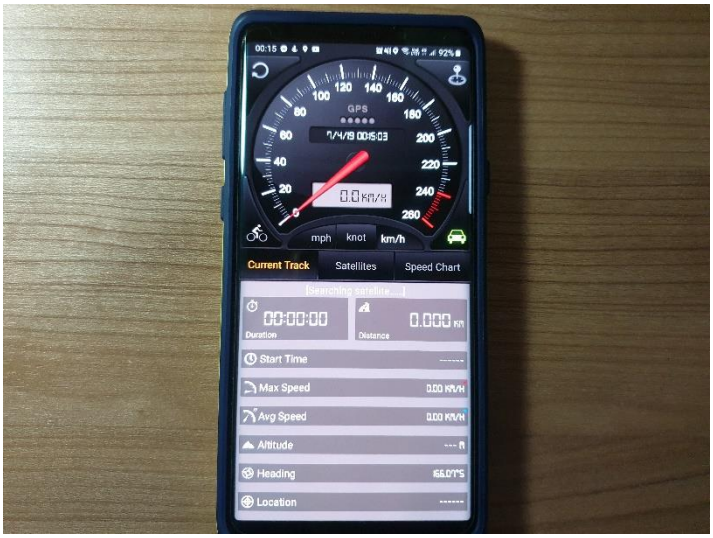
1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
2) กรวยจราจร
3) โทรศัพท์มือถือ ใช้แอพพลิเคชั่น SpeedoMeter GPS ดังแสดงในรูปที่ 3.23
4) นาฬิกาจับเวลา

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่กว้างและพื้นเรียบเหมาะสมกับการทดสอบ
2) เตรียมกรวยจราจร 7 อัน โดยวางให้ห่างกัน 6 ช่วง ช่วงละ 10 เมตร
3) ทดสอบรถโดยจับเวลาในการขับซิกแซกจนครบทุกกรวยแล้ววนกลับ
4) ทดสอบซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง



รูปที่ 3.31 การทดสอบ Slalom



รูปที่ 3.32 แอปพลิเคชั่น SpeedoMeter GPS

3.7.6 การทดสอบความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะทาง 150 เมตร

เป็นการทดสอบหาอัตราเร่งและความเร็วด้วยระยะทางที่กำหนดไว้ เพื่อให้ทราบถึงสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
2) โทรศัพท์มือถือ ใช้แอพพลิเคชั่น Speedo Meter ดังแสดงในรูปที่ 3.32

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางเพียงพอและมีความเรียบ เหมาะสมในการทดสอบ
2) กำหนดจุดที่เริ่มเบรกเมื่อถึงระยะทาง 150 เมตร ที่ได้กำหนดไว้
3) เหยียบคันเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าให้สุดจนถึงจุดสิ้นสุด
4) ทำการทดสอบซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.33 การทดสอบความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะทาง 150 เมตร

3.7.7 การทดสอบหาการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ

เป็นการทดสอบหาพลังงานเฉลี่ยที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าใช้ในการขับที่ความเร็วต่าง ๆ เพื่อเทียบกับค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายในการใช้งาน โดยระยะทางที่ใช้ทดสอบคือ 1 กิโลเมตร

อุปกรณ์

1) รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า
2) โทรศัพท์มือถือ
3) คลิปแอมป์มิเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.24

วิธีทดสอบ

1) เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ ที่เหมาะสมกับการทดสอบ
2) ทำการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยใช้ความเร็วคงที่ที่ความเร็ว 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3) ทำการทดสอบซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผลการทดลอง

รูปที่ 3.34 การทดสอบหาการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 การทดสอบระยะทางการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

การทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้งและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยทดสอบที่การใช้ความเร็วเฉลี่ยที่ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สถานที่ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ได้ผลการทดลอง ดังนี้

รูปที่ 4.1 แผนที่แสดงสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ บริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	ระยะทางสูงสุด (km)	เวลาที่ใช้ในการวิ่ง (h)	เวลาที่ใช้ในการชาร์จ (h)
30-40	57	30	1.5	24

4.1.2 การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

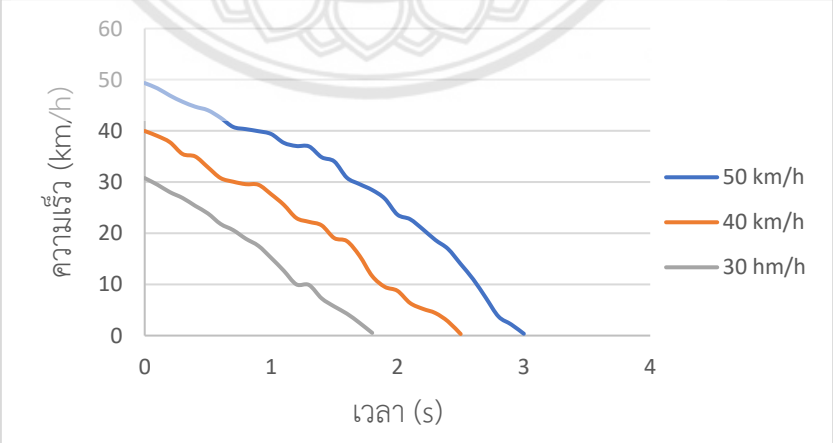
1) การทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยการทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

ครั้งที่	เวลา (s)	ระยะทาง (m)	ความเร่ง (m/s^2)
1	10.471	91.54	1.326
2	10.393	95.4	1.336
3	10.948	94.57	1.269
4	9.888	84.55	1.405
5	10.086	83.56	1.377
เฉลี่ย	10.357	89.92	1.343

4.1.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่าง ๆ

การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่าง ๆ การทดสอบนี้เพื่อหาระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วต่างๆ เพื่อความปลอดภัยในการขับขี่



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับเวลา

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ความเร็ว (km/h)	ครั้งที่	เวลาเบรกจนรถหยุดนิ่ง (s)	ระยะเบรกจนรถหยุดนิ่ง (m)
30	1	1.8	6.20
	2	1.9	6.5
	3	1.7	6
	4	1.7	5.8
	5	1.9	6.3
เฉลี่ย		1.9	6.16

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ความเร็ว (km/h)	ครั้งที่	เวลาเบรกจนรถหยุดนิ่ง (s)	ระยะเบรกจนรถหยุดนิ่ง (m)
40	1	2.4	10
	2	2.6	11
	3	2.5	10.5
	4	2.5	10.5
	5	2.5	10.75
เฉลี่ย		2.5	10.55

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ความเร็ว (km/h)	ครั้งที่	เวลาเบรกจนรถหยุดนิ่ง (s)	ระยะเบรกจนรถหยุดนิ่ง (m)
50	1	2.9	15.6
	2	2.8	15.8
	3	3	16.1
	4	2.8	15.8
	5	2.9	15.7
เฉลี่ย		2.9	15.8

4.1.4 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว ในการขับขี่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ขณะที่ขับขี่เข้าทางโค้งที่ความเร็ว 10, 15, และ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบรัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็วต่าง ๆ

ความเร็วขณะเข้าโค้ง (km/h)	รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดที่วัดได้ (m)
10	3.71
15	4.29
20	5.68

4.1.5 การทดสอบแบบ Slalom

เป็นการทดสอบเพื่อวัดความเร็วสูงสุดในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ค่า G lateral และเวลาที่ใช้ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำได้ โดยจะใช้กรวยจราจร 7 อัน วางห่างกัน 6 ช่วง ช่วงละ 10 เมตร

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบ Slalom

จำนวนครั้งที่ทดสอบ	ความเร็วเฉลี่ยในการ Slalom (km/h)	เวลาที่ใช้ (s)
1	28.75	10
2	27.66	10.98
3	28.54	10.3
4	29.05	9.59
5	28.76	10.19
เฉลี่ย	28.55	10.21

4.1.6 การทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตร

เป็นการทดสอบหาอัตราเร่งและความเร็วสูงสุดที่ระยะ 150 เมตร

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตร

จำนวนครั้งที่ทดสอบ	ความเร็วสูงสุด (km/h)	เวลาที่ใช้ (s)	ความเร่ง (m/s^2)
1	57.47	12.25	1.3
2	57.32	12.43	1.28
3	56.95	12.61	1.25
เฉลี่ย	57.25	12.43	1.28

4.1.7 การใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วต่าง ๆ

การทดสอบการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็ว 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 4.9 ผลการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยที่ความเร็วต่าง ๆ

ความเร็วที่ทดสอบ (km/h)	พลังงานที่ใช้/ชั่วโมง (kW-h)	ค่าไฟที่ใช้/กิโลเมตร (บาท)
20	1.55	0.25
30	3	0.33
40	5.33	0.43

หมายเหตุ อ้างอิงค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง หน่วยละ 3.2484 บาทต่อหน่วย

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 วิเคราะห์ระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

จากการทดลองเพื่อหาระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยที่มีน้ำหนักรวมกับผู้ขับเป็น 450 kg ความเร็วเฉลี่ยที่ 30 km/h และความเร็วสูงสุดสำหรับการขับขี่ใน

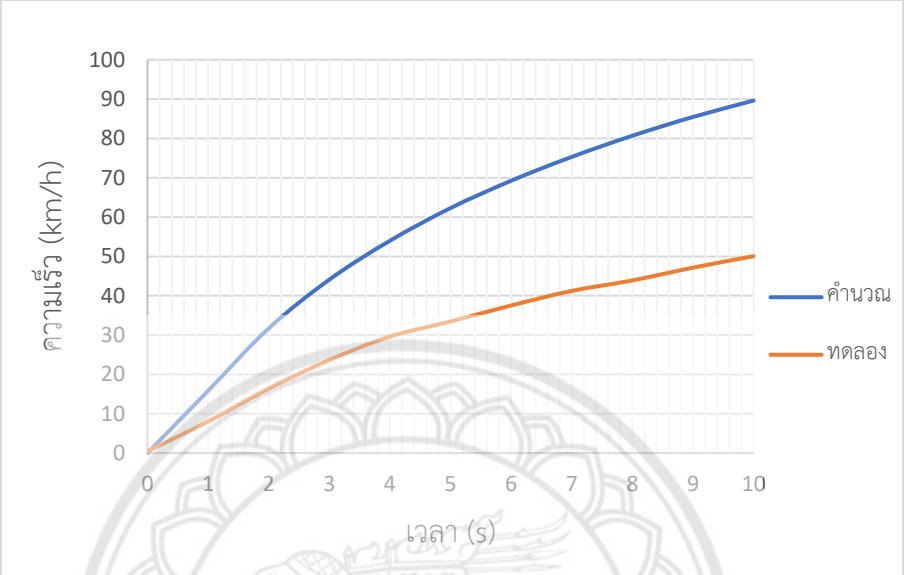
การทดสอบครั้งนี้คือ 57 km/h ซึ่งจากการคำนวณสามารถทำความเร็วได้มากกว่านี้แต่มีสาเหตุที่ไม่สามารถทำได้เนื่องจากแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอสำหรับมอเตอร์ทั้ง 4 ลูก ทำให้ไม่สามารถทำความเร็วสูงมากกว่านี้ได้ และระยะทางสูงสุดที่สามารถทำได้ คือ 30 km ซึ่งน้อยกว่าจากการคำนวณที่ได้ 310 km เนื่องจากต้องหยุดรถเพื่อกลับรถทำให้ต้องเร่งออกตัวบ่อยเป็นสาเหตุให้ได้ระยะทางที่น้อยและแบตเตอรี่ที่เริ่มเสื่อมสภาพจากที่มีอายุรอบการใช้งานมาก โดยในช่วงระยะหลังจาก 25 km เป็นต้นไป จะไม่สามารถทำความเร็วได้มากกว่า 25 km/h ทั้งนี้ข้อมูลการทดสอบสามารถนำมาเปรียบเทียบกับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้ารุ่นก่อนหน้านี้ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.10 ต่อไปนี้

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบระยะทางสูงสุดและการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

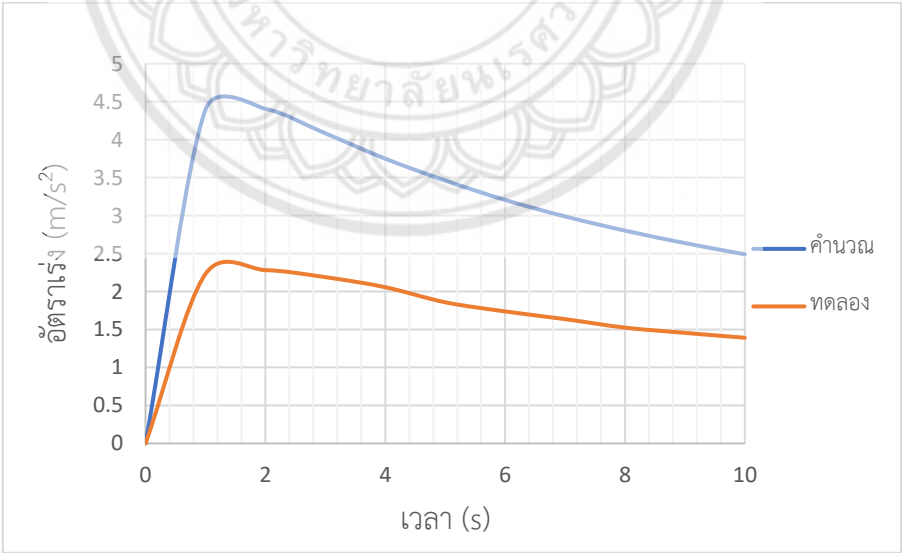
ข้อมูล / **ระบบขับเคลื่อน**	ความเร็วเฉลี่ย (km/h)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	ระยะทางสูงสุด (km)	เวลาที่ใช้ในการวิ่ง (h)	**เวลาที่ใช้ในการชาร์จ (h)**
รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง	30-40	72	67	2.5	24
รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าขับเคลื่อน 4 ล้อ	30-40	57	30	1.5	24

จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 พบว่าระยะทางในการวิ่งในระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีระยะทางที่น้อยกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง โดยสามารถทำได้เพียง 30 กิโลเมตร หรือสามารถขับขี่ได้ระยะทางที่น้อยกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 55 เนื่องจากการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มากขึ้นเป็น 4 ลูก ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้น ส่งผลให้ระยะทางในการขับขี่นั้นลดลงนั้นลดลงพร้อมทั้งแบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการจ่ายพลังงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

4.2.2 วิเคราะห์อัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา เปรียบเทียบความเร็วระหว่างการคำนวณและจากการทดลอง



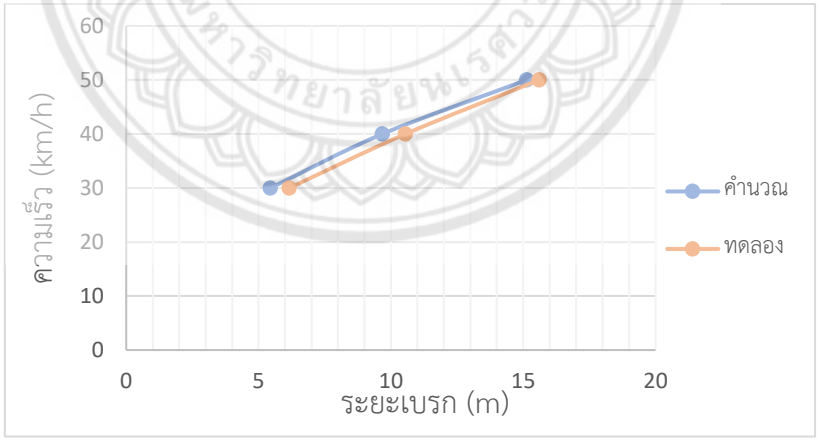
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากผลการทดลองเพื่อหาอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ที่น้ำหนักของรถรวมคนขับเท่ากับ 450 กิโลกรัม จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าใช้ความเร็วที่ 0-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เปรียบเทียบระหว่างการทดสอบและจากการคำนวณ พบว่า จากการทดสอบทำเวลาที่ 10.357 วินาที ความเร่งเฉลี่ยเท่ากับ 1.343 m/s^2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการคำนวณจำลองอัตราเร่งที่คำนวณ ทำเวลาได้ 3.45 วินาที มีความเร่ง 4.1 m/s^2 สาเหตุเกิดจากแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ทั้ง 4 ลูก ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพที่สามารถทำได้จึงเป็นสาเหตุให้ค่าที่ได้จากการทดลองนั้นแตกต่างจากค่าที่ได้จากการคำนวณมาก ทั้งยังมีสาเหตุจากค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณมีค่าแตกต่างจากค่าจริงในการทดลอง เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุดอากาศและค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างล้อยางกับพื้นถนนซึ่งเป็นค่าทางทฤษฎี ดังสมการที่ (2.22)

จากการทดลองพบว่าอัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีค่าที่มากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง โดยอัตราเร่ง 0-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ สามารถทำได้ 10.357 วินาที แต่อัตราเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง สามารถทำเวลาได้ 5.6 วินาที ซึ่งมีอัตราเร่งที่ดีกว่าฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ หรือรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ใช้เวลาในการเร่งมากกว่า รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 85

4.2.3 วิเคราะห์ระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกกับระยะเบรก

- ที่ ความเร็ว 30 km/h ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 5.446 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 6.16 m

- ที่ความเร็ว 40 km/h ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 9.681 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 10.55 m

- ที่ความเร็ว 50 km/h ระยะเบรกจากการคำนวณเท่ากับ 15.127 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 15.8 m

จากผลการทดลองพบว่า ความเร็วในขณะก่อนการเบรกมีผลต่อระยะทางในการเบรก เมื่อความเร็วในขณะก่อนการเบรกเพิ่มขึ้น ระยะเบรกก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจากรูปที่ 4.5 เมื่อนำค่าการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณจะพบว่าระยะทางในการเบรกจริงจะมีระยะทางมากกว่าจากการคำนวณที่ความเร็ว 30 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากดิสก์เบรกที่ใช้เป็นดิสก์เบรกของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างจานดิสก์เบรกกับผ้าเบรกมีน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเบรกที่ความเร็วสูงลดลงเนื่องจากเกิดความร้อนสูงทำให้เบรกเกิดการอาการ Fade และสภาพของถนนที่ใช้ในการทดสอบเป็นพื้นยางมะตอยที่ไม่ค่อยสะอาด ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าความหน่วงในการเบรกมีค่าน้อยลงตามดังสมการ (2.26) ความหน่วงที่ลดลงนี้มีผลให้รถเคลื่อนที่ไปด้านหน้ามากขึ้นดังสมการ (2.27)

จากการพัฒนาเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าเป็นระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นสามารถเปรียบเทียบสมรรถนะในการเบรกกับระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ ได้ดังตารางต่อไปนี้

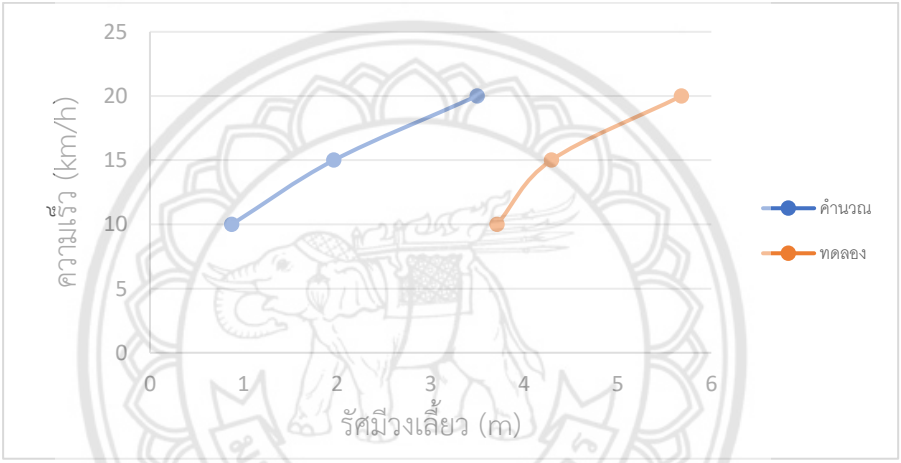
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบระยะทางในการเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อน	ความเร็ว 30 km/h		ความเร็ว 40 km/h		ความเร็ว 50 km/h	
	เวลาในการเบรก (s)	ระยะเบรก (m)	เวลาในการเบรก (s)	ระยะเบรก (m)	เวลาในการเบรก (s)	ระยะเบรก (m)
ระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง	1.8	4.6	2.3	8.9	3	18.3
ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ	1.9	6.16	2.5	10.55	2.9	15.8

จากตาราง 4.11 พบว่าระยะเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีความสามารถในการเบรกด้อยกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ในช่วงความเร็ว 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แต่ในความเร็วที่ กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีความสามารถในการเบรกที่ดีกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง เนื่องจากรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบ

ขับเคลื่อน 4 ล้อ มีจุดศูนย์ถ่วงที่ดีกว่าทำให้การเบรกอย่างกระทันหันที่ความเร็วสูงทำให้ล้อของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไม่เกิดการไถลและได้ระยะทางที่ดีกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ เนื่องจากในการทดสอบเบรกที่ความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลังนั้นเกิดการไถลทำให้ระยะเบรกนั้นมีค่ามากกว่าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยระยะทางเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อนั้นมีระยะทางเบรกโดยรวม มากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 12.91

4.2.4 วิเคราะห์รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับรัศมีวงเลี้ยว

- ที่ความเร็ว 10 km/h รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 0.874 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 3.71 m

- ที่ความเร็ว 15 km/h รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 1.966 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 4.29 m

- ที่ความเร็ว 20 km/h รัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ เท่ากับ 3.496 m รัศมีวงเลี้ยวจากการทดลอง เท่ากับ 5.68 m

จากผลการทดลอง จากรูปที่ 4.6 สังเกตุได้ว่าความเร็วในการเข้าโค้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า เนื่องจากขณะที่รถเข้าโค้งจะมีแรงสู่ศูนย์กลางกระทำกับตัวรถให้เกิดการลื่นไถล เมื่อความเร็วของรถเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างยางกับถนนคอนกรีตมี

ค่าไม่มากพอจึงทำให้เกิดการลื่นไถลและรัศมีโค้งมีค่าที่มากขึ้น เมื่อนำค่าการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณนั้นพบว่า รัศมีวงเลี้ยวในการทดลองจะมีค่ามากกว่ารัศมีวงเลี้ยวจากการคำนวณ สาเหตุนั้นมาจากการทดสอบบนถนนที่ไม่ค่อยสะอาดทำให้มีละอองทรายอยู่บนพื้นผิวถนนทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าของแรงเสียดทานมีค่าน้อยลงจนมีค่าไม่มากพอที่จะต้านแรงสู่ศูนย์กลางทำให้รถมีรัศมีวงเลี้ยวเพิ่มขึ้นดังสมการ (2.28)

จากผลการทดลองสามารถเปรียบเทียบรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระหว่างระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง และระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ได้ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

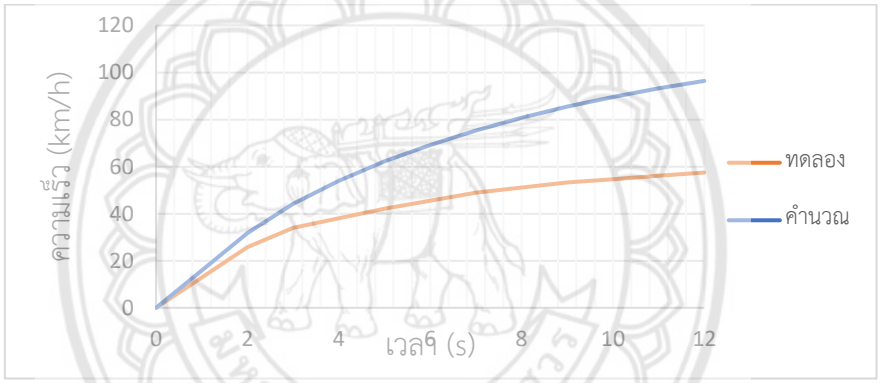
ระบบขับเคลื่อน	รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 10 km/h (m)	รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 15 km/h (m)	รัศมีวงเลี้ยวที่ความเร็ว 20 km/h (m)
ระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง	2	3.5	4.5
ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ	3.71	4.29	5.68

จากตารางที่ 4.12 พบว่ารัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าในระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีค่าที่มากกว่าเนื่องจากน้ำหนักของตัวรถที่มากทำให้มีแรงสู่ศูนย์กลางกระทำกับตัวรถมากกว่าและน้ำหนักที่กดลงล้อคู่หน้ามีค่ามากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ทำให้เกิดการไถลและอาการดื้อโค้ง (Understeer) มากกว่าที่ความเร็วเดียวกันจึงต้องเพิ่มรัศมีในการเข้าโค้งเพื่อให้เกิดอาการไถลที่น้อยที่สุด โดยรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีรัศมีที่กว้างกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ คิดเป็นร้อยละ 46

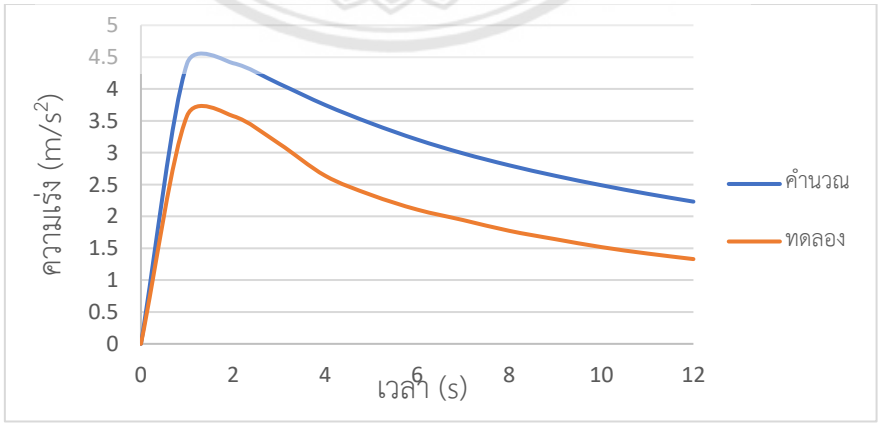
4.2.5 วิเคราะห์การทดสอบแบบ Slalom

จากผลการทดสอบรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยให้วิ่งแบบ Slalom โดยสามารถทำความเร็วเฉลี่ย 28.55 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลา 10.21 วินาที ซึ่งการทดสอบแบบ Slalom นั้นเป็นการหาสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าว่าสามารถทำแรง G lateral สูงสุดในการเข้าโค้งได้เท่าใด แต่เนื่องจากการทดสอบเกิดข้อผิดพลาดขึ้นจากการที่ใช้อุปกรณ์ในการใช้หาค่า G lateral ทำให้ไม่สามารถทราบค่าได้ว่ารถมีสมรรถนะในด้านการเข้าโค้งโดยมีค่า G lateral ได้สูงสุดเท่าใด

4.2.6 วิเคราะห์ความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะ 150 เมตร



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาที่ระยะทาง 150 เมตร



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลาที่ระยะทาง 150 เมตร

จากผลการทดลองเพื่อหาความเร็วและเวลาที่ใช้ในการทดสอบความเร็วที่ระยะ 150 เมตร รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำความเร็วสูงสุด 57.25 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลาทั้งหมด

12.43 วินาที โดยค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 89.63 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 10 วินาที จากผลการทดลองนั้นรถมีสมรรถนะที่ด้อยจากการคำนวณ โดยดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 จะพบว่าในช่วง 0-2 วินาทีแรก ในการทดลองรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าสามารถทำความเร็วและความเร่งได้ใกล้เคียงกับการคำนวณ แต่หลังจาก 2 วินาทีเป็นต้นไป ความเร็วและความเร่งที่ได้จากการทดลองได้ลดลงแตกต่างจากการคำนวณ เนื่องจากแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟได้เพียงพอต่อความต้องการใช้พลังงานส่งผลให้ความเร็วและความเร่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้นลดลง โดยรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อมีความเร็วที่ระยะ 150 เมตร ด้อยกว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี คิดเป็นร้อยละ 36 และใช้เวลามากกว่าคิดเป็นร้อยละ 24

4.2.7 วิเคราะห์หาการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยที่ความเร็วต่าง ๆ

- ที่ที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย 1.55 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และค่าไฟฟ้า 0.25 บาทต่อกิโลเมตร

- ที่ที่ความเร็ว 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย 3 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และค่าไฟฟ้า 0.33 บาทต่อกิโลเมตร

- ที่ที่ความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีการใช้พลังงานโดยเฉลี่ย 5.33 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และค่าไฟฟ้า 0.43 บาทต่อกิโลเมตร

จากผลการทดลองพบว่า ยิ่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าใช้ความเร็วสูงขึ้นการใช้พลังงานของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยระยะทางที่ใช้ในการทดสอบคือ 1 กิโลเมตร

สาเหตุที่ไม่สามารถหาพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในการวิ่งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้งนั้น เกิดจากเครื่องมือวัดจูลมิเตอร์ JUNTEK ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ได้รับกระแสไฟฟ้าเกินที่เครื่องรับได้ทำให้เครื่องจูลมิเตอร์เสียหายไม่สามารถวัดพลังงานที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าใช้งานทั้งหมดได้

รูปที่ 4.9 เครื่องมือวัดจูลมิเตอร์ JUNTEK

บทที่ 5

สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงงาน

โครงงานนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีสำหรับใช้พัฒนาออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าจากรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง เปลี่ยนเป็นระบบขับเคลื่อนเป็นรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบสวมล้อ ใช้สำหรับศึกษาและพัฒนาสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าและนำรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไปทดสอบสมรรถนะภายในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพและสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าแบบระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง และระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ

จากการศึกษาทฤษฎียานยนต์ไฟฟ้า เพื่อหาองค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งในการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้า และทำการออกแบบสร้างชิ้นส่วนที่จะสามารถนำอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้ง เช่น มอเตอร์ ชุดควบคุมมอเตอร์ แบตเตอรี่ เป็นต้น สำหรับการพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าครั้งนี้และจำลองประสิทธิภาพสมรรถนะของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ได้แก่ การใช้พลังงาน อัตราเร่ง ระยะเบรก รัศมีวงเลี้ยว และความเร็วสูงสุดที่ 150 เมตร จากนั้นจึงนำรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไปทดสอบภาคสนามภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะรวมทุกการทดสอบนั้น พบว่ายังไม่สามารถพัฒนารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าให้มีสมรรถนะดีขึ้นได้ เนื่องจากปัญหาหลักที่เกิดขึ้น คือ แบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของมอเตอร์ไฟฟ้าจึงทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ ทำให้ยังไม่สามารถแสดงสมรรถนะที่แท้จริงของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าได้ในโครงงานนี้ จึงต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อให้รถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ในการทดสอบ

5.1.1 สรุปผลการทดสอบสมรรถนะรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

5.1.1.1 ระยะทางสูงสุดที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ สามารถขับขี่ได้ต่อการประจุไฟฟ้า 1 ครั้ง มีระยะทางขับขี่ที่น้อยกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 หรือสามารถขับขี่ได้ระยะทางที่น้อยกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 55 ซึ่งในการทดลองนั้นมีปัจจัยที่ทำให้ไม่สามารถทำระยะทางขับขี่ที่ใกล้เคียงกับรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ได้เนื่องจากมีการใช้พลังงานจากมอเตอร์ที่มากขึ้น และแบตเตอรี่นั้นเริ่มเสื่อมสภาพเนื่องจากมีอายุและรอบการใช้งานที่มาก พร้อมกับพลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน ทำให้ระยะทางที่ได้นั้นน้อยกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ

5.1.1.2 รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ใช้ระยะเวลาในการเร่ง 0-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีอัตราเร่งที่ด้อยกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ โดยใช้เวลาในการเร่งมากกว่า รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 85 ทั้งนี้สาเหตุที่รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีอัตราเร่งที่ด้อยกว่ารถไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง และการคำนวณทางทฤษฎี นั้นเกิดจากการที่แบตเตอรี่ไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของมอเตอร์ 4 ลูก ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

5.1.1.3 ระยะเบรกรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ทำได้ด้อยกว่าระยะเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ที่ความเร็ว 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากตัวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ ที่มีน้ำหนักมากกว่า แต่ในช่วงความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง รถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีระยะเบรกที่น้อยกว่า โดยที่ความเร็วสูงนั้นมีระยะเบรกที่น้อยกว่าเนื่องจากรถฟอร์มูล่าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีจุดศูนย์ถ่วงที่ดีกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ทำให้การกระจายน้ำหนักหน้าหลังนั้นดีขึ้น ส่งผลให้ไม่เกิดการไถลของตัวรถในขณะที่เบรกด้วยความเร็วสูง โดยระยะทางเบรกของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อนั้นมีระยะทางเบรกโดยรวมที่มากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง คิดเป็นร้อยละ 12.91

จากการคำนวณระยะเบรกทางทฤษฎีที่ความเร็ว 30 40 และ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง คือ 5.446 9.681 และ 15.127 เมตร ซึ่งจากการทดลองนั้นมีระยะทางที่มากกว่า สาเหตุที่ทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนนั้นเกิดจากเนื่องจากดิสก์เบรกที่ใช้เป็นดิสก์เบรกของรถจักรยานยนต์ขนาดเล็กทำให้พื้นผิวสัมผัสระหว่างจานดิสก์เบรกกับผ้าเบรกมีน้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเบรกที่ความเร็วสูงลดลงเนื่องจากเกิดความร้อนสูงทำให้เบรกเกิดการอาการ Fade และสภาพของถนนที่ใช้ในการทดสอบเป็น

พื้นยางมะตอยที่ไม่ค่อยสะอาด ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าน้อยลง ส่งผลให้ค่าความหน่วงในการเบรกมีค่าน้อยลง

5.1.1.4 รัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยมีรัศมีวงเลี้ยวมากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง และมากกว่าทางทฤษฎี โดยรัศมีวงเลี้ยวของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ นั้นมีรัศมีที่กว้างกว่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ คิดเป็นร้อยละ 46 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้รถฟอร์มูล่าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ มีรัศมีวงเลี้ยวที่มากกว่ารถฟอร์มูล่าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ และทางทฤษฎี เนื่องจากน้ำหนักของตัวรถที่มากทำให้มีแรงสู่ศูนย์กลางกระทำกับตัวรถมากกว่าและน้ำหนักที่กดลงล้อคู่หน้ามีค่ามากกว่ารถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ทำให้เกิดการไถลและอาการดื้อโค้ง (Understeer) มากกว่าที่ความเร็วเดียวกันจึงต้องเพิ่มรัศมีในการเข้าโค้งเพื่อให้เกิดอาการไถลที่น้อย เมื่อความเร็วของรถเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างยางกับถนนคอนกรีตมีค่าไม่มากพอจึงทำให้เกิดการลื่นไถลและรัศมีโค้งมีค่าที่มากขึ้น และสภาพถนนที่เศษละอองทรายทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง

5.1.1.5 การทดสอบแบบ Slalom สามารถทำความเร็วเฉลี่ยได้ 28.55 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลา 10.21 วินาที ซึ่งการทดลองนี้เกิดข้อผิดพลาดในการทดลองเนื่องจากต้องการค่า G lateral สูงสุดของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่สามารถทำได้ เพื่อหาความสามารถในการเข้าโค้งของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้เครื่องวัด GPS Lap Timer LT-Q6000 ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าที่สมบูรณ์

5.1.1.6 ความเร็วของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ระยะทาง 150 เมตร สามารถทำความเร็วที่น้อยกว่าและใช้เวลาที่มากกว่าทางทฤษฎี โดยรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 4 ล้อมีความเร็วที่ระยะ 150 เมตร ด้อยกว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี คิดเป็นร้อยละ 36 และใช้เวลามากกว่าคิดเป็นร้อยละ 24 สาเหตุที่ทำให้การทดลองรถฟอร์มูล่าไฟฟ้านั้นมีค่าที่ด้อยกว่าทางทฤษฎีมากนั้นเกิดจากการที่แบตเตอรี่ไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของมอเตอร์ 4 ลูก ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

5.1.1.7 การใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าที่ความเร็วเฉลี่ย 20 30 และ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ระยะทาง 1 กิโลเมตร

- ความเร็วเฉลี่ย 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 1.55 kWh และค่าไฟฟ้า 0.25 บาทต่อกิโลเมตร

- ความเร็วเฉลี่ย 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 3 kWh และค่าไฟฟ้า 0.33 บาทต่อกิโลเมตร

- ความเร็วเฉลี่ย 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้า 5.33 kWh และค่าไฟฟ้า 0.43 บาทต่อกิโลเมตร

5.1.2 ปัญหาจากรถมอเตอร์ไฟฟ้าระบบขับเคลื่อน 2 ล้อ ที่ได้รับการแก้ไขเสร็จเรียบร้อย

5.1.2.1 ปัญหาการคายตัวของน็อตยึดเพลามอเตอร์คลายตัว โดยแก้ไขปัญหาด้วยการเปลี่ยนไปใช้น็อตยึด 6 เหลี่ยมและรองด้วยแหวนรองสปริง

5.1.2.2 ปัญหาระบบบังคับเลี้ยวรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าหรือแร็คพวงมาลัย เมื่อทำการเข้าค้างที่มีรัศมีแคบมาก ๆ หรือมีการหมุนพวงมาลัยหลายรอบ จะทำให้แร็คติดกับล้อแม็กซ์ เกิดความเสียหาย โดยแก้ไขปัญหาด้วยการออกแบบคอม้าคู่หน้าของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดการชนกันระหว่างล้อแม็กซ์และแร็คพวงมาลัย

5.1.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.1.3.1 รอฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีปัญหาเรื่องมอเตอร์ทางด้านหน้าล้อขวา เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลข้ามเฟสทำให้ในช่วงที่ชะลอคันเร่งในความเร็วสูง มอเตอร์ทางด้านหน้าล้อขวาจะหน่วงความเร็วกระทันหันส่งผลให้พวงมาลัยหมุนไปทางขวาอย่างทันที สามารถแก้ปัญหาเฉพาะหน้าได้โดยจับพวงมาลัยให้แน่นในตอนที่ชะลอความเร็วช่วงความเร็วสูง โดยวิธีแก้ที่ถาวร คือ ทำการซ่อมแซมมอเตอร์ไม่ให้เกิดการข้ามเฟสหรือเปลี่ยนมอเตอร์ลูกใหม่

5.1.3.2 รถฟอร์มูล่าไฟฟ้ามีปัญหาในเรื่องการควบคุมการทรงตัวและการรับแรงสั่นสะเทือน เนื่องจาก ระบบบังคับเลี้ยวและระบบช่วงล่าง ที่ผ่านการใช้งานมานานแล้ว ทำให้การควบคุมรถได้ยาก และคนขับได้รับแรงสั่นสะเทือนเป็นอย่างมาก ข้อเสนอแนะคือ แก้ไขระบบช่วงล่าง เปลี่ยนอะไหล่ที่เก่า เช่น โช๊คอัพ ลูกหมาก เป็นต้น

5.1.3.3 แบตเตอรี่ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกระแสไฟได้เพียงพอกับการใช้งาน เนื่องจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบน้ำ มีประสิทธิภาพในการจ่ายกระแสไฟฟ้าได้น้อยทำให้เวลาออกตัวที่ต้องการใช้ความเร็วสูงความเร่งของรถจะลดลงอย่างรวดเร็ว ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นแบบ Lithium ion ที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงได้และยังมีน้ำหนักที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบน้ำ

5.1.3.4 ระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่มีเวลานาน เนื่องจากเครื่องชาร์จสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้น้อย ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนเครื่องชาร์จที่จ่ายกระแสได้สูงกว่าเดิมจึงจะทำให้เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ลดลง

5.1.3.5 ปั๊มเบรกมีน้ำมันเบรกซึมออกมาทำให้ก่อนวิ่งรถฟอร์มูล่าไฟฟ้าต้องเช็คระดับน้ำมันเบรกให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้เสมอ เพื่อป้องกันอันตรายในการขับขี่ ข้อเสนอแนะคือ เปลี่ยนซีลปั๊มเบรกใหม่เพื่อไม่ให้น้ำมันเบรกซึมหรือทำการเปลี่ยนปั๊มเบรกใหม่

5.1.3.6 ปัญหาระยะเบรกของรถที่มากนั้นมาจากใช้จานเบรกของรถจักรยานยนต์และปั๊มเบรกของรถจักรยานยนต์ทำให้มีแรงเบรกน้อยส่งผลให้ระยะทางเบรกมากขึ้น ข้อเสนอแนะคือ ใช้จานเบรกที่มีความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากขึ้น และใช้ปั๊มเบรกที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น

5.1.3.7 ทำการทดสอบความต้องการสูงสุดของกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการต่อ 1 ลูก เพื่อให้สามารถคำนวณความจุแบตเตอรี่ที่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการในการใช้งาน

5.1.3.8 การพัฒนาต่อยอดโครงงานในอนาคตทำได้โดยการหาขนาดของแบตเตอรี่เพื่อนำไปคำนวณหากำลังของมอเตอร์ขับเคลื่อนสูงสุดในแต่ละตัว

เอกสารอ้างอิง

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.

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

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

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

ศุภวิทย์ อิศรนาเวศ, นายสุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน, สุริยา เขตประทุม. (2560). **การพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า.** วิทยานิพนธ์. วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

Auto2drvie. (29 ธันวาคม 2556). **รวมเรื่องรถยนต์ รถจักรยานยนต์ พาหนะอื่น ๆ.** สืบค้นเมื่อ 16 มีนาคม 2562, จาก http://www.auto2drive.com/.

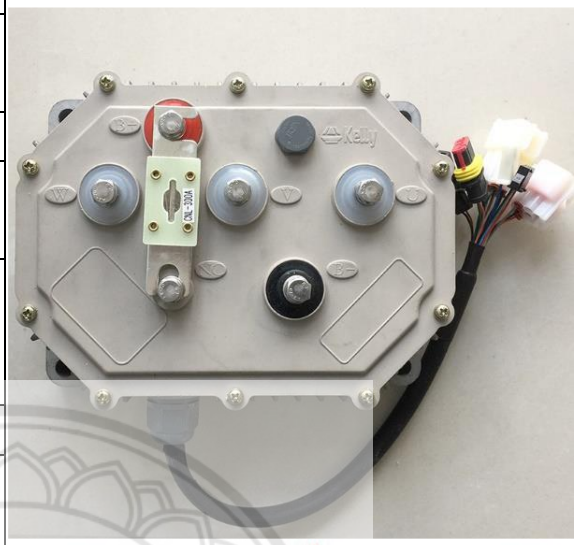
James Larminie, John Lowry. (2003). **Electric Vehicle Technology Explained.** England: John Wiley & Sons Ltd.

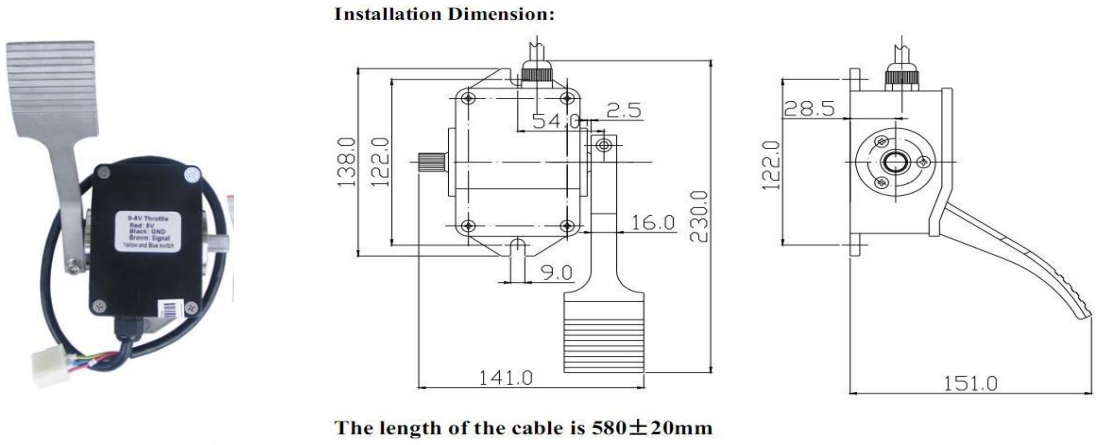
KLCBright. (5 กุมภาพันธ์ 2558). **แบตเตอรี่ deep cycle คืออะไร.** สืบค้นเมื่อ 10 มีนาคม 2561, จากhttp://www.klcbright.com/batterydeepcycleis.php.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลที่ใช้ในออกแบบและการสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

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.	

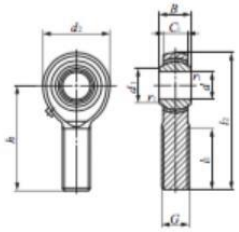


รูปที่ ก.2 คันเร่ง KELLY 0-5K THROTTLE PEDAL
(ที่มา: http://kellycontroller.com/kelly-5k-throttle-pedal-p-1131.html)

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		Durable Polypropyrene				
2.1 Case and cover material						
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.
	Temperature	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

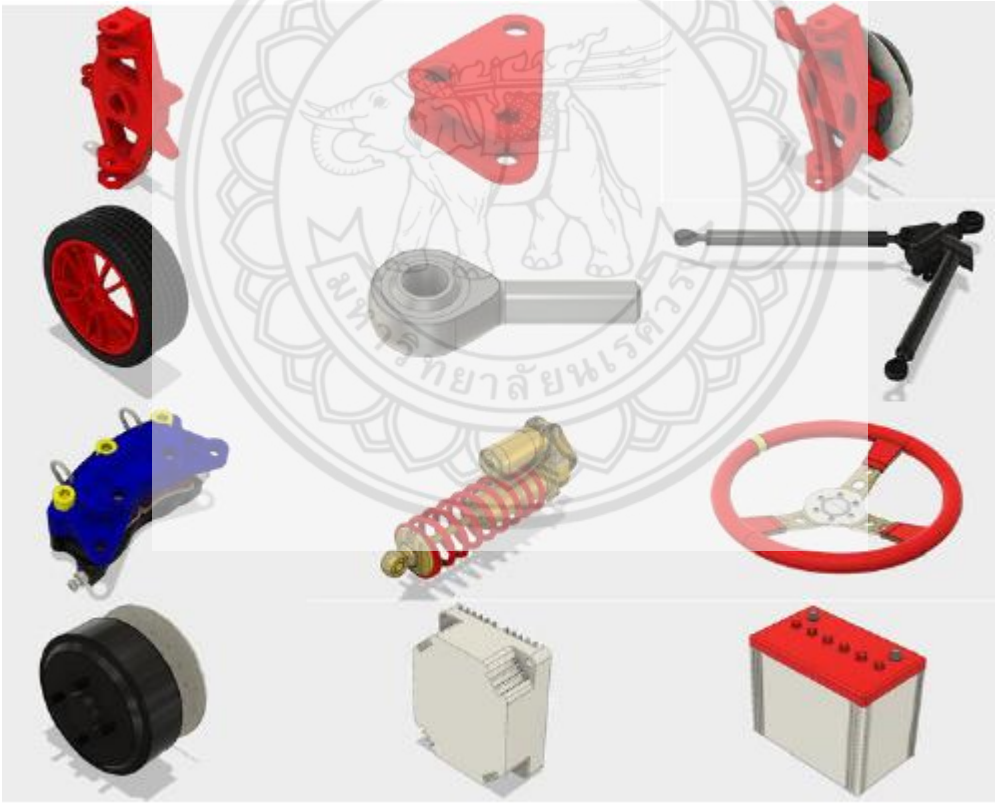
Identification number	Mass (Ref.)	Boundary dimensions mm											Dynamic load capacity	Static load capacity
	g	d	Thread G	d_2	C_1	B	d_1	l_2	h	l_1	$r_{1s\min}$ (1)	Ball dia. mm (inch)	C_d N	C_s N
POS 3	5.0	3	M 3×0.5	12	4.5	6	5.2	33	27	15	0.2	7.938 (5/16)	1 750	1 220
POS 4	8.1	4	M 4×0.7	14	5.3	7	6.5	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.
รูปการณ์ออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.1 โมเดล 3 มิติ ของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า



รูปที่ ข.2 โมเดล 3 มิติ ชิ้นส่วนต่าง ๆของรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า

รูปที่ ข.3 บรรยากาศการประกอบมอเตอร์เข้ากับดุมล้อ

รูปที่ ข.4 รูปขณะทำการทดลองรถฟอร์มูล่าไฟฟ้า