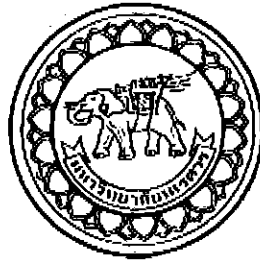


อกิันนทนาการ



สำนักหอสมุด



สามล้อไฟฟ้านำเที่ยว

Three Wheel Electric Vehicle For Tourism

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วันลงทะเบียน..... 14 ก.ย. 2560

เลขทะเบียน..... 19181851

เลขเรียกหนังสือ.....

นายธวัฒน์ สุวานนท์ รหัสหนังสือ 56362041

นายสันจิติ ตาลเพชร รหัสหนังสือ 56362287

นายสิทธิเดช ประโยชน์ดี รหัสหนังสือ 56362317

ร/ร  
ก/๑๔๗  
๕๕๕๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ปีการศึกษา 2559



## ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล

หัวข้อโครงการ : สามล้อไฟฟ้านำเที่ยว  
( Three Wheel Electric Vehicle For Tourism )

ผู้ดำเนินโครงการ : นายธนวัฒน์ สุวนานนท์ รหัส 56362041  
นายสันธิติ ตาลเพชร รหัส 56362287  
นายสิทธิเดช ประโยชน์ดี รหัส 56362317

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์)

หัวข้อโครงการงาน	: สามล้อไฟฟ้านำเที่ยว		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	: นายธนวัฒน์ สุวนานนท์	รหัส 56362041	
	: นายสันธิติ ตาลเพชร	รหัส 56362287	
	: นายสิทธิเดช ประโยชน์ดี	รหัส 56362317	
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน	: ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว		
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	: 2559		

### บทคัดย่อ

รถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยวนี้ ได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อนำเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จังหวัดสุโขทัย และมีการออกแบบให้คล้ายคลึงกับรถคอกหมู ซึ่งเป็นการอนุรักษ์รูปแบบรถที่เป็นรถขนส่งท้องถิ่นของจังหวัดสุโขทัย ซึ่งรถสามล้อไฟฟ้าที่จะสร้างขึ้นนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 1 กิโลวัตต์ 48 โวลต์ แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดแบบแห้ง ขนาด 12 โวลต์ 12 แอมป์ชั่วโมง จำนวน 4 ลูก มีน้ำหนักรวมของตัวรถ 196 กิโลกรัม และตัวรถสามารถบรรทุกทุกคนได้ทั้งหมด 3 คน รวมคนขับ โดยรถมีความเร็วสูงสุด 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จุดสำคัญที่เน้นในการสร้างรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยวนี้คือ ลดการปล่อยมลพิษทางด้านต่างๆ ใช้งานและซ่อมบำรุงง่าย

จากการทดสอบใช้งานจริงภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย พบว่า รถสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ระยะทาง 10 กิโลเมตรต่อการประจุไฟหนึ่งครั้ง ที่ความเร็วโดยประมาณ 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีผู้โดยสารสองคน สามารถทำความเร็วขณะไม่มีผู้โดยสารได้สูงสุด 31 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และขณะบรรทุกผู้โดยสารสองคนได้สูงสุด 29 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการประจุไฟหนึ่งครั้ง 4-5 ชั่วโมง มีระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วเฉลี่ย 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมงอยู่ที่ 5.4 เมตร มีรัศมีความโค้งแคบที่สุดที่สามารถเลี้ยวได้คือ 2 เมตร รถสามล้อไฟฟ้าสามารถทำความเร็วจาก 0-20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงได้ใน 16.81 วินาที

**Project Title** : Three Wheel Electric Vehicle For Tourism  
**Name** : Mr. Thanawat Suwananon Code 56362041  
Mr. Santite Tanphet Code 56362287  
Mr. Sittidet Prayotdee Code 56362317  
**Project Advisor** : Assist.professor Dr. Ananchai Ukaew  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Academic** : 2016

---

### Abstract

An electric three wheel vehicle was designed and constructed for travel in Sukhothai Historical Park , Sukhothai province. And this car was designed similar to “Khok Moo” car. That is a conservative model car as local transport of Sukhothai. This project consists of 1 KW Brushless DC electric motor , four 12 V 12 Ah lead-acid batteries. This car weight is 450 kg at no load and can carry three people with driver. Use maximum speed 30 km/hr the electric three wheel vehicle emphasized on strictness to reduce the pollution, dexterity of operation and repair.

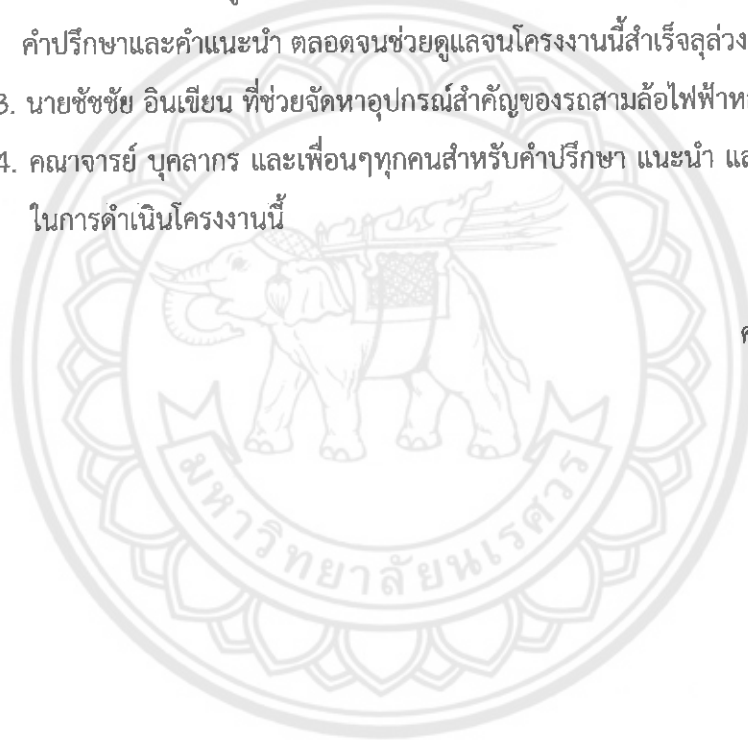
As tested in Sukhothai Historical Park, this three-wheel electric enables ride capacity 10 km per charge at velocity 15 km/hr and two passengers. The maximum velocity at no load was 31 km/hr and 29 km/hr at two passengers. The batteries take 4-5 hours to recharge. Brake range at average velocity 15 km/hr was 5.4 m. The minimum radius can ride is 2 m. Three wheel electric can take speed from 0-20 km/hr in 16.81 second.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการสามล้อไฟฟ้านำเที่ยวนี้สามารถประสบผลสำเร็จลงได้ด้วยดี คณะผู้ดำเนินโครงการ ต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำ และความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการตลอดมาจนสำเร็จ ดังนี้

1. พ่อและแม่ ที่อบรมสั่งสอนเป็นอย่างดี และสนับสนุนในทุกๆด้าน
2. ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ขอขอบพระคุณสำหรับการให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วง
3. นายชัชชัย อินเทียน ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์สำคัญของรถสามล้อไฟฟ้าหลายชิ้น
4. คณาจารย์ บุคลากร และเพื่อนๆทุกคนสำหรับคำปรึกษา แนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการนี้

คณะผู้ดำเนินโครงการ



## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ-ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ-ฅ
สารบัญสัญลักษณ์	ญ-ฒ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ	2-3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 การวิเคราะห์ SWOT	3
1.7 Technology Readiness Level (TRL)	4
1.8 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 การทบทวนวรรณกรรม	6
2.2 พื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์	6-13
2.3 การหาจุดศูนย์กลางมวล	14-16
2.4 ชุดควบคุม	16-17
2.5 มอเตอร์ขับเคลื่อน	18-20
2.6 แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า	21-23
2.7 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถสามล้อไฟฟ้า	23-24
2.8 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก	25
2.9 การเข้าโค้ง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 ออกแบบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว	28-34
3.2 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์	34-38

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดสอบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว	39-41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการทดลอง	42-44
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	44-48
4.3 ชิ้นส่วนเพิ่มเติมที่ช่วยให้การขับขี่ดีขึ้น	48-49
4.4 แบบสำรวจความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวและผู้ประกอบการ รถสามล้อ	50-51
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลโครงการ	52
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก ก	54-57
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	58



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	2-3
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของยานยนต์ประเภทต่างๆ	8
ตารางที่ 2.2 สมการการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของรูปทรงต่างๆ	12
ตารางที่ 2.3 แสดงตัวแปรของการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์	20
ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะจำเพาะของแบตเตอรี่รูปแบบต่างๆ	22
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาความเร็วสูงสุดและระยะทางสูงสุดในการขับสี่	42
ตารางที่ 4.2 การทดสอบความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้ง	42
ตารางที่ 4.3 การทดสอบเพื่อหาระยะเบรก	43
ตารางที่ 4.4 การทดสอบเพื่อหาระยะทางและเวลาในการทำความเร็ว 0-20 km/h	43
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงความเร่งในการทำความเร็วจาก 0-20 km/h	47





## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงขับเคลื่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์มีการเคลื่อนที่กับแรงต้านทั้งหมด	7
รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงต่างๆ	9
รูปที่ 2.3 แรงต้านทางชั้น	10
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน	11
รูปที่ 2.5 การหาจุดศูนย์กลางมวล	14
รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบยานยนต์ที่มีช่วงฐานล้อกว้างและมีจุดศูนย์ถ่วงต่ำ จะมีการทรงตัวดีกว่ายานยนต์ที่มีช่วงฐานล้อแคบและมีจุดศูนย์ถ่วงสูง	15
รูปที่ 2.7 เมื่อยานยนต์ทรงตัวอยู่ในตำแหน่งมุมเอียงสูงสุด	15
รูปที่ 2.8 การทำงานร่วมกันระหว่างชิ้นส่วนหลักของยานยนต์ไฟฟ้าผ่านชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง	16
รูปที่ 2.9 ระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกำลังขับที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์	18
รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	19
รูปที่ 2.12 แสดงรูปร่างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบคอล์ย	19
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่	21
รูปที่ 2.14 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่างๆ	21
รูปที่ 2.15 การสัมผัสของผ้าเบรกรูปวงแหวนเสี้ยว	24
รูปที่ 2.16 แรงกระทำกับรถในทำการเบรก	25
รูปที่ 2.17 แรงกระทำกับรถในขณะเสี้ยวโค้งบนถนนระดับ	26
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะโดยรวมของรถ	29
รูปที่ 3.2 ประกอบการคำนวณการหา CG แกน X	30
รูปที่ 3.3 ประกอบการคำนวณการหา CG แกน Y	30
รูปที่ 3.4 แสดงหลังคาและที่นั่งที่ติดตั้งในตัวรถ	31
รูปที่ 3.5 แสดงจุด CG ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์	32
รูปที่ 3.6 ประกอบการคำนวณการหามวลที่ทำให้ท้ายกระดก	33
รูปที่ 3.7 รถสามล้อปั่น(ซาเล้ง)	34
รูปที่ 3.8 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนพร้อมล้อ	35

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.9 แบตเตอรี่	35
รูปที่ 3.10 ชุดความควบคุมไฟฟ้ากำลัง	35
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ส่องสว่าง	36
รูปที่ 3.12 ดิสเบรกมอเตอร์ไซค์	36
รูปที่ 3.13 คันเร่งจักรยานไฟฟ้า	36
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ไฟฟ้า	37
รูปที่ 3.15 เหล็ก	37
รูปที่ 3.16 ไม้แปรรูป	37
รูปที่ 3.17 น็อต	38
รูปที่ 3.18 สีสำหรับทาไม้	38
รูปที่ 3.19 เบาะนั่ง	38
รูปที่ 3.20 จุลมิเตอร์	39
รูปที่ 4.1 ภาพแสดงแผนที่และวัฏจักรการขับขี่ภายในบริเวณอุทยาน ประวัติศาสตร์สุโขทัย	43
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คันเร่งกับระยะทางและ ความเร็วในการขับขี่	45
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงเลี้ยวกับความเร็วสูงสุดในการ เข้าโค้ง	46
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกและระยะทางใน การเบรก	46
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราเร่งเฉลี่ยของรถสามล้อไฟฟ้ากับจำนวนผู้โดยสาร	47
รูปที่ 4.6 ที่วางเท้าสำหรับคนขับ	48
รูปที่ 4.7 อุปกรณ์กำหนดรัศมีวงเลี้ยวสูงสุด	49
รูปที่ 4.8 ดิสเบรก	49
รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงคะแนนของรูปแบบรถสามล้อไฟฟ้า	50
รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงคะแนนของการใช้งานรถสามล้อ	50

## ลำดับสัญลักษณ์ (แรงต้านการเคลื่อนที่)

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

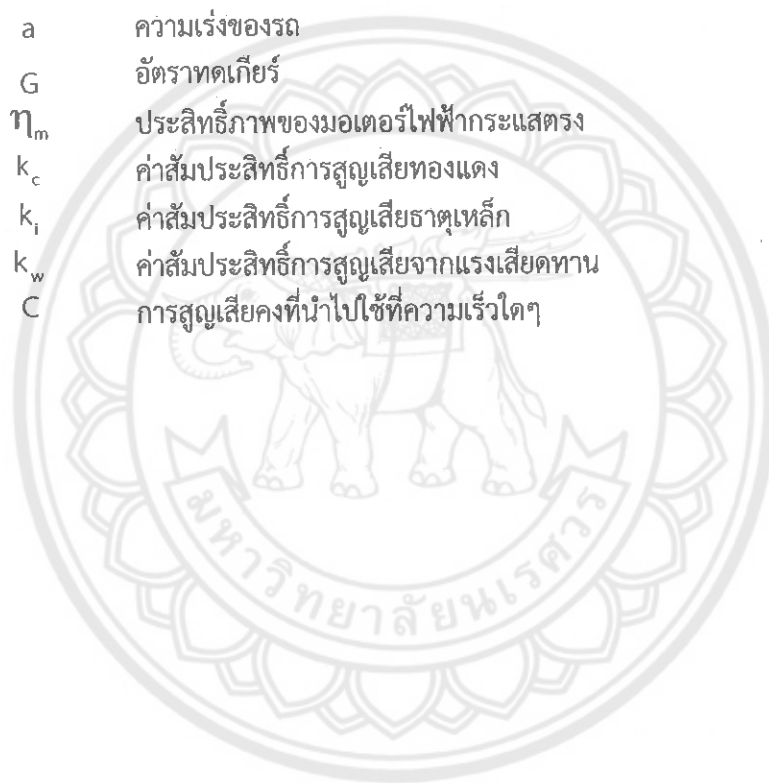
## ลำดับสัญลักษณ์ (การหาจุดศูนย์กลางมวล)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$W$	น้ำหนักรวมของรถ	kg
$W_f$	น้ำหนักส่วนเพลหน้า	kg
$x$	ระยะเพลหลังถึงเพลหน้า	cm
$y_1$	ความสูงของจุด CG จากแนวอ้างอิง	cm
$b$	ความกว้างของช่วงล้อ	cm
$H$	ความสูงของจุดศูนย์กลางถ่วงจากพื้นถนน	cm
$\phi$	มุมที่จุดศูนย์กลางถ่วงของยานยนต์ เมื่อยานยนต์อยู่ในสภาพมุมเอียงสูงสุดและยังอยู่ในสภาพที่ยังทรงตัวอยู่ได้	°
$\theta$	มุมความลาดเอียงของทางชัน	°



## ลำดับสัญลักษณ์ (มอเตอร์ขับเคลื่อน)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T	แรงบิดมอเตอร์	N·m
$F_{te}$	แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด	N
r	รัศมีวงล้อ	m
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์	rad / s
$\dot{\omega}$	ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์	rad/s <sup>2</sup>
V	ความเร็วของรถ	m / s
a	ความเร่งของรถ	m / s <sup>2</sup>
G	อัตราทดเกียร์	
$\eta_m$	ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
$k_c$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทองแดง	
$k_i$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียธาตุเหล็ก	
$k_w$	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทาน	
C	การสูญเสียคงที่นำไปใช้ที่ความเร็วใดๆ	



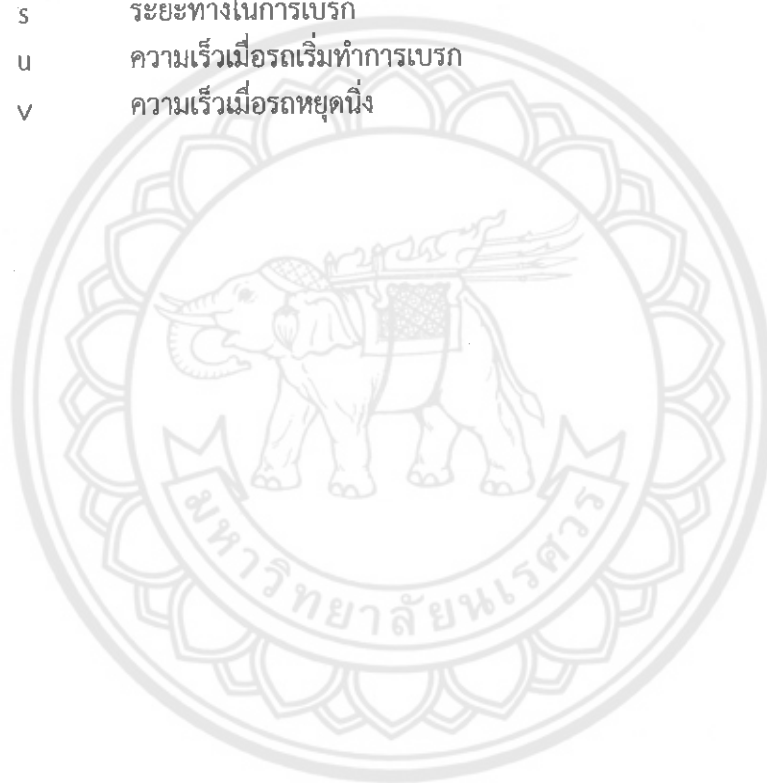
## ลำดับสัญลักษณ์ (แบตเตอรี่)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E	แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่	V
n	จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่	
DoD	การควบคุมการถ่ายประจุของแบตเตอรี่	
P	กำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่	W
V	แรงดันย่อยของแบตเตอรี่	V
I	กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่	A
R	ความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่	$\Omega$



## ลำดับสัญลักษณ์ (การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	แรงเสียดทานการเบรก	N
$\mu$	สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน	
$m_R$	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	$m/s$



## ลำดับสัญลักษณ์ (การเข้าโค้ง)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$F_c$	แรงที่ทำให้ทรงตัวได้	N
$W$	น้ำหนักของรถ	N
$m$	น้ำหนักของรถ	kg
$t$	ระยะห่างล้อข้างซ้ายกับล้อข้างขวา	m
$v$	ความเร็วของรถที่ทำให้รถเริ่มพลิกคว่ำ	m/s
$r$	รัศมีความโค้งของการเลี้ยว	m
$h$	ความสูงของจุดศูนย์กลางมวลจากพื้นถนน	m
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s <sup>2</sup>





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบัน การใช้พลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบโลกยานยนต์ เนื่องจากปัญหาภาวะต่างๆ การรณรงค์การลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่เป็นน้ำมัน ราคา น้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น ประกอบกับส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้านั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนน้อยกว่า ส่วนประกอบของการใช้เครื่องยนต์แบบสันดาป และยังสามารปรับเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้าได้ง่ายกว่า เนื่องจากผู้พัฒนาอ้างอิงชิ้นส่วนมาตรฐาน ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้โดยการผลิตจำนวนมาก

ผู้ดำเนินโครงการจึงอยากนำเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้านี้มาประยุกต์ใช้กับรถสามล้อไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับการท่องเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จังหวัดสุโขทัย เพื่อเป็นการลดปัญหาภาวะต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น และโดยทางอ้อมเป็นการลดปัญหาการสิ้นเปลืองซึ่งเป็นสาเหตุทำให้โบราณสถานเสียหาย และลดมลพิษทางเสียงเพื่อไม่ให้เสียงเป็นการรบกวนนักท่องเที่ยว ประกอบกับภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัยในระยะหลังได้มีการรณรงค์ไม่ให้รถที่มี 4 ล้อขึ้นไปเข้ามาภายในบริเวณอุทยานฯ ลดการใช้เครื่องยนต์สันดาปเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์หรือการท่องเที่ยวแบบคาร์บอนต่ำดังนั้นรถสามล้อนำเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์ฯ จึงได้รับผลกระทบไปด้วยเนื่องจากใช้เครื่องยนต์สันดาปเช่นกัน จึงทำให้เป็นการขาดรายได้ และผู้ดำเนินโครงการมีความคิดที่จะออกแบบรูปลักษณะของรถสามล้อไฟฟ้าให้มีความคล้ายคลึงกับรถโดยสารสองแถว (รถคอกหมู) ซึ่งเป็นรถโดยสารท้องถิ่นเพื่อดึงดูดนักท่องเที่ยว ฉะนั้นการใช้รถสามล้อไฟฟ้านี้จึงเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งร่วมกับการรณรงค์ลดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีสำหรับใช้ออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อประยุกต์ใช้กับรถสามล้อแทนการใช้เครื่องยนต์
- 2) ออกแบบและสร้างรถสามล้อไฟฟ้าสำหรับนำเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จังหวัดสุโขทัย และเป็นการอนุรักษ์รูปแบบรถคอกหมูที่เป็นรถโดยสารท้องถิ่น
- 3) ทดสอบการใช้งานและเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองรถสามล้อไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1) ออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพของรถสามล้อไฟฟ้า โดยใช้มอเตอร์ DC แบบไม่มีแปรงถ่าน ขนาด 1 กิโลวัตต์ 48 โวลต์
- 2) ใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดแบบแห้ง ขนาด (12V12AH) จำนวน 4 ลูก
- 3) ใช้ความเร็วสูงสุด 30 Km/hr
- 3) สามารถบรรทุกผู้โดยสารได้สองคนและคนขับอีกหนึ่งคน ไม่รวมน้ำหนักรถ
- 4) ทำการทดสอบภาคสนามบริเวณภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการปฏิบัติการ	2558				2559			
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง								
2.คำนวณและออกแบบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว								
3.จัดซื้อวัสดุและอุปกรณ์								
4.สร้างรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว								
5.ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ								

6.วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ								
7.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์								

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รถสามล้อไฟฟ้าในการขนส่งเพื่อการนำเที่ยวในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย
2. เผยแพร่ความรู้การพัฒนาสามล้อไฟฟ้าที่เป็นประโยชน์ได้

### 1.6 การวิเคราะห์ SWOT

#### จุดแข็ง (Strengths)

1. รถสามล้อนำเที่ยวใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนซึ่งเป็นพลังงานสะอาด
2. มีความเป็นเอกลักษณ์โดยมีลักษณะคล้ายกับรถคอกหมู ซึ่งเป็นจุดสนใจของนักท่องเที่ยว
3. สร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการ

#### จุดอ่อน (Weaknesses)

1. ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่นานกว่า เมื่อเทียบกับการเติมน้ำมันของสามล้อเครื่องยนต์
2. ระยะทางในการวิ่งต่อการประจุไฟ1ครั้งมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับสามล้อเครื่องยนต์

#### โอกาส (Opportunities)

1. ติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกภายในรถ เช่น ที่วี พัดลม ระบบนำทาง
2. ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในส่วนของหลังคา

#### อุปสรรค (Threats)

1. งบประมาณในการดำเนินโครงการมีอย่างจำกัด
2. ต้องมีการให้ความรู้ให้ผู้ประกอบการสามล้อนำเที่ยวเข้าใจในวิธีการใช้งานและการ

#### บำรุงรักษารถสามล้อไฟฟ้า

3. ในการสร้างให้ถึงระดับการใช้งานได้ดีใช้เวลานาน
4. ความรู้ของผู้จัดทำโครงการยังไม่เพียงพอ

## 1.7 Technology Readiness Level (TRL)

TRL คือ การบ่งชี้ระดับความพร้อมและเสถียรภาพของเทคโนโลยีตามบริบทการใช้งาน ตั้งแต่เป็นวัตถุดิบ องค์ประกอบสำคัญ อุปกรณ์ และกระบวนการทำงานทั้งระบบก่อนที่จะมีการบูรณาการเทคโนโลยีเป็นระบบ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

TRL 1: หลักการพื้นฐานได้รับการพิจารณาและมีการรายงาน (Basic principles observed and reported)

TRL 2: มีการสร้างแนวคิดด้านเทคโนโลยี และ/หรือ การประยุกต์ใช้ (Technology concept and/or application formulated)

TRL 3: มีการทดลองและวิเคราะห์หน้าที่หลัก และ/หรือ มีการพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิด (Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept)

TRL 4: การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (breadboard) ในสถานะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ (Component and/or breadboard validation in laboratory environment)

TRL 5: การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (breadboard) ในสถานะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง (Component and/or breadboard validation in relevant environment)

TRL 6: การทดสอบแบบจำลองของระบบหรือระบบย่อย หรือต้นแบบในสถานะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจเป็นภาคพื้นดินหรืออวกาศ (System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space))

TRL 7: การทดสอบต้นแบบระบบในสถานะแวดล้อมอวกาศ (System prototype demonstration in a space environment)

TRL 8: ระบบจริงเสร็จสมบูรณ์และมีคุณสมบัติผ่านการทดสอบและสาธิตบนภาคพื้นดินหรือในอวกาศ (Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space))

TRL 9: ระบบจริงได้รับการพิสูจน์ โดยภารกิจสำเร็จ (Actual system “flight proven” through successful mission operations)

TRL ปัจจุบัน หมายถึง ระดับ TRL ของโครงการ ณ วันที่เริ่มต้นโครงการ

- TRL อยู่ในระดับ TRL1

TRL ที่คาดหวัง หมายถึง ระดับ TRL ของโครงการ เมื่อโครงการสิ้นสุด

- TRL ที่คาดหวังเมื่อโครงการเสร็จสิ้น คือ TRL9

## 1.8 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

### 1.8.1 หมวดวัสดุ

รถสามล้อ	14,000	บาท
ชุดมอเตอร์ (48VDC 1000W 450RPM)	15,000	บาท
แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบแห้ง (12V 12Ah) 4 ลูก	3,880	บาท
ไม้แปรรูป	3,600	บาท
เหล็ก	2,000	บาท
สีทาไม้,เหล็ก	1,200	บาท
อุปกรณ์ระบบเบรก	2,400	บาท
เบาะนั่ง	1,200	บาท
อุปกรณ์,เครื่องมือสำหรับการสร้างรถ	2,000	บาท

### 1.8.2 หมวดค่าใช้สอย

จัดทำรูปเล่ม	500	บาท
อุปกรณ์ทั่วไป	200	บาท
รวม	45,980	บาท



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรม

ผศ.ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว และ ดร. ภาณุ พุทธวงศ์[1] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการประกอบรถยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงจากรถกระบะเก่า โดยได้มีการจำลองสมรรถภาพรถยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง เพื่อทำนายระยะทางการประจุไฟฟ้าในแต่ละครั้ง และเพื่อหาว่าแรงบิดและความเร็วรอบเพียงพอต่อการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าหรือไม่ ซึ่งใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโปรแกรมจำลองสมรรถนะ โดยผู้จัดทำได้นำโปรแกรมมาจำลองสมรรถภาพของรถสามล้อไฟฟ้า

กิตติคุณ สุอรุณ, วัชระ เชื้อวงษ์ดี และ โอฬาร วงศาโรจนะกุล[2] ทำการพัฒนาชุดต้นแบบมอเตอร์ช่วยขับเพื่อติดตั้งในจักรยาน โดยทำการคำนวณหาแรงขับเคลื่อน (Tractive Effort) เพื่อเลือกใช้มอเตอร์ที่จะนำมาเป็นตัวขับเคลื่อน และ ทำการทดสอบเบื้องต้น โดยได้นำวิธีการคำนวณหาแรงต่างๆ มาใช้คำนวณหาแรงทั้งหมดที่ใช้ในการขับเคลื่อน เพื่อหากำลังของมอเตอร์ที่จะใช้ในการสร้างรถสามล้อไฟฟ้า

#### 2.2 พื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์

การจะให้รถยนต์มีการเคลื่อนที่ได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ถ่ายทอดมาจากต้นกำลังจนถึงล้อของรถ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อรถกับพื้นถนนซึ่งทำให้รถเคลื่อนที่ไปได้ เมื่อนำแรงขับเคลื่อนทั้งหมดมาพิจารณา จะได้เป็นกำลังขับเคลื่อนซึ่งเป็นพื้นฐานการขับเคลื่อนยานยนต์ได้ดังนี้

##### 2.2.1 แรงต้านการเคลื่อนที่

รถยนต์จะเกิดการเคลื่อนที่ได้ต้องอาศัยกำลังจากเครื่องยนต์และส่งผ่านระบบถ่ายเทกำลังมาจนถึงล้อขับเคลื่อน โดยอาศัยความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นผิวถนนทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนในขณะที่ถ่ายเทกำลัง จึงเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะเดียวกันกับที่รถยนต์เกิดการเคลื่อนที่จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ขึ้นด้วย ซึ่งจะเกิดแรงต้านในทิศทางที่สวนทางกับแรงขับเคลื่อน เช่น ถ้ารถยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ที่ 90 km/h อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันจะได้ว่า

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

กล่าวคือ วัตถุจะรักษาสภาพอยู่นิ่งหรือสภาวะการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นตรง นอกจากมีแรงลัพธ์ซึ่งมีค่าไม่เป็นศูนย์มากระทำ คือ ถ้าวัตถุอยู่นิ่งก็ยังคงอยู่นิ่งเหมือนเดิมหรือถ้าวัตถุเกิดการเคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ความเร็วคงที่ หรือความเร่งจะเป็นศูนย์ ซึ่งจะเรียกว่า วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลสถิต (static equilibrium) และอีกกรณีหลังจะเรียกว่า วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลจลน์ (kinetic equilibrium)

แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนมีค่ามากกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น หรือมีอัตราเร่ง จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดของการเคลื่อนที่อีกครั้ง แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยความหน่วงหรือมีอัตราเร็วลดลง ในขณะที่อัตราเร็วลดลงนั้น แรงต้านทั้งหมดก็จะลดลงตามไปด้วย จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมดอีกครั้งและรถยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ต่อไป



รูปที่ 2.1 แรงขับเคลื่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่ยานต์มีการเคลื่อนที่ที่กับแรงต้านทั้งหมด (ที่มา <http://www.auto2drive.com>)

กำลังจากเครื่องยนต์ที่ส่งไปยังล้อขับเคลื่อนจะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เพราะมีบางส่วนสูญเสียไปในระบบถ่ายทอดกำลัง เรียกว่าการสูญเสียในการถ่ายทอด (transmission loss) กำลังส่วนที่เหลือที่ล้อขับเคลื่อนจะใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านต่างๆ เพื่อให้รถยนต์เคลื่อนที่ได้ แรงต้านเหล่านั้นได้แก่

1. แรงต้านการหมุนของล้อ (rolling resistance)
2. แรงต้านอากาศ (air resistance)
3. แรงต้านทางชัน (gradient resistance)

นอกจากนี้ ในขณะที่แรงเครื่องยนต์ กำลังบางส่วนต้องสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของรถยนต์ เรียกว่าแรงต้านความเฉื่อย (inertia resistance) แต่ในกรณีนี้จะไม่กล่าวถึงเนื่องจากความแรงของรถสามล้อไฟฟ้าเพื่อการนำเที่ยวมีค่าน้อย ไม่ต้องการอัตราเร่งมาก

### 1. แรงต้านทานการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

แรงต้านทานการหมุนของล้อรถนี้จัดว่าเป็นแรงต้านทานบนถนนอย่างหนึ่ง แรงต้านทานการหมุนนี้เกิดขึ้นจากปัจจัยหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น ลักษณะโครงสร้างของขนาดของยาง (ยางกลวงหรือยางตัน) ลักษณะของพื้นผิวจราจร ลักษณะของดอกยางและสภาพของดอกยาง ความดันของลมในยาง ความเร็วของตัวรถ ความผิดปกติของล้อ น้ำหนักของรถ โดยแรงต้านทานการหมุนของล้อนี้หาได้จาก

$$F_r = f_r w_r = f_r m g \cos \theta \quad (2.2)$$

โดยที่  $F_r$  คือ แรงต้านทานการหมุนของล้อ (N)  
 $f_r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  
 $m$  คือ มวลของรถ (Kg)  
 $g$  คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก  $m/s^2$   
 $\theta$  คือ มุมความลาดเอียงของทางขึ้น

จะเห็นได้ว่า แรงต้านทานการหมุนของล้อมีผลเนื่องมาจากล้อได้รับแรงกระแทกซึ่งเป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวถนนและหน้ายาง เป็นต้น และจากเหตุนี้แรงต้านทานจะขึ้นอยู่กับสภาพของถนน น้ำหนักรถ และในกรณีนี้มีการคำนึงถึงความลาดชันของพื้นถนนด้วย

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลจำเพาะของยานยนต์ประเภทต่างๆ

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

จากตารางข้างต้นเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านทานการหมุนของล้อจะขึ้นอยู่กับประเภทของยานยนต์ โดยที่รถสามล้อไฟฟ้าที่ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบไว้ นั้น จะประกอบด้วยล้อของจักรยานยนต์ 2 ล้อ คือ ส่วนของล้อหน้า และประกอบด้วยล้อของจักรยาน 1 ล้อ คือ ส่วนของล้อหลัง โดยผู้จัดทำได้ทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านทานการหมุน โดยการใช่วิธีการหาค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านทานการหมุนของจักรยานยนต์ 2 ล้อ และของจักรยาน 1 ล้อ ซึ่งได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงการต้านทานการหมุนของล้อ เท่ากับ  $(0.014+0.014+0.0044)/3 = 0.0108$



## 2. แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

รถทุกชนิดเมื่อวิ่งบนถนนนั้น เมื่อสัมผัสกับพื้นถนนในขณะที่ล้อมีการหมุน เพื่อวิ่งไปข้างหน้า จะเกิดแรงต้านทานการหมุนเกิดขึ้น หรือแรงเสียดทาน และอีกอย่างคือแรงต้านทานจากตัวรถ เนื่องจากรถต้องวิ่งแหวกอากาศออกไปซึ่งที่ความเร็วต่ำ แรงต้านทานจากลมจะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถไปเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการหมุนได้ แต่ถ้าหากวิ่งด้วยความเร็วสูงๆ แรงต้านทานจากลมจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง แรงต้านทานภายนอกตัวรถที่รับลมจะต้องพยายามไม่ให้เกิดการหมุนวน ยิ่งถ้ากระแสอากาศที่ไหลเกิดเป็นเกลียวหมุนขึ้น จะทำให้มีแรงต้านทานมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้ตัวถังรถยนต์มีลักษณะลู่ลม เพื่อลดแรงต้านทานที่จะเกิดขึ้น โดยจากการทดลอง

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

โดยที่	$F_d$	คือ แรงต้านจากอากาศ (N)
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดรถ ( $\text{m}^2$ )
	$C_d$	คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)
	V	คือ ความเร็วของรถ (m / s)

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปร่างต่างๆ

จะเห็นได้ว่าแรงต้านอากาศแปรผันกับความเร็วกำลังสอง ซึ่งหมายความว่า ความเร็วของตัวรถมีผลต่อแรงต้านอากาศโดยตรง และแรงต้านอากาศยังมีผลเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของตัวรถอีกด้วย และที่สำคัญอีกหนึ่งค่าคือสัมประสิทธิ์ความต้านทานหรือ  $C_d$  ซึ่งรถสามล้อนำเข้ามีพื้นที่หน้าตัดเป็น

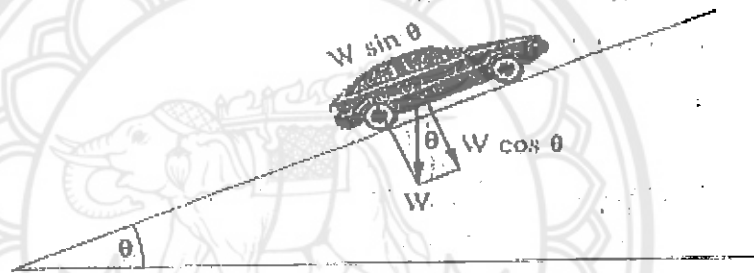
แบบ Long Cylinder มีค่าเท่ากับ 0.82 แต่เนื่องจากรถสามล้อไฟฟ้ามีพื้นที่หน้าตัดโปรง ซึ่งอากาศที่ผ่านสามารถไหลผ่านได้ จึงพิจารณาให้ค่า  $C_d$  ของรถสามล้อไฟฟ้าเท่ากับ 0.7

### 3. แรงต้านทางชัน (gradient resistance)

ในขณะที่รถยนต์วิ่งขึ้นทางชัน กำลังจากเครื่องยนต์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (gradient resistance) ทำให้เครื่องยนต์ต้องทำงานหนักขึ้นมากกว่าการวิ่งบนถนนระดับแต่ในทางกลับกัน ถ้ารถยนต์วิ่งลงทางลาด เครื่องยนต์จะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1) น้ำหนักของรถยนต์
- 2) ความชันของถนน



รูปที่ 2.3 แรงต้านทางชัน

ที่มา (หนังสือวิศวกรรมยานยนต์ ,ธีระยุทธ สุวรรณประณีป)

น้ำหนัก  $w$  ของรถยนต์สามารถแตกออกเป็นสองแนวตามรูปที่ 2.3  $W \sin \theta$  และ  $W \cos \theta$  ซึ่งแรงต้านทางชันเกิดจาก  $W \sin \theta$  คือ รถยนต์จะต้องเพิ่มแรงขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรง  $W \sin \theta$  ดังนั้น แรงต้านทางชันคือ

$$F_d = mg \sin \theta \quad (2.4)$$

โดยที่  $F_d$  คือ แรงต้านทางชัน (N)  
 $\theta$  คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน

เมื่อรวมแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ และแรงต้านทางชัน จะได้แรงต้านทั้งหมดของรถยนต์ในขณะที่กำลังวิ่งขึ้นทางชัน (ถ้ารถยนต์วิ่งบนถนนระดับ แรงต้านทั้งหมดจะมีเพียงแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ)

### 2.2.2 แรงเฉื่อย

จากที่ได้กล่าวมาถึงแรงต้านการเคลื่อนที่ครบถ้วนแล้ว แรงอีกส่วนหนึ่งที่มีผลได้มากต่อแรงขับที่จะต้องการจากต้นกำลัง ได้แก่ แรงเฉื่อย (Inertia force) โดยการที่ยานยนต์จะขับเคลื่อนได้ หมายถึงการออกตัวจากหยุดนิ่ง รวมทั้งการเร่งตัวเพื่อไปสู่ความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งก็หมายถึงว่าที่ความเร็วหนึ่งๆ นอกจากยานยนต์จะต้องการแรงขับที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่แล้ว ยังต้องการแรงขับที่เกินจากแรงต้านการเคลื่อนที่เพื่อสร้างความเร่งด้วย

แรงเฉื่อยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม

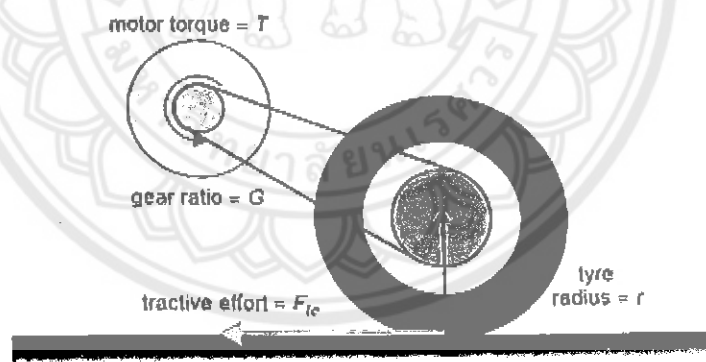
#### 1. แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น (Acceleration force)

โดยปกติยานยนต์เคลื่อนที่ที่ความเร็วค่าหนึ่งๆ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของยานยนต์ เราจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงให้กับยานยนต์ โดยแรงที่เพิ่มให้กับยานยนต์นี้คือแรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) สามารถแสดงได้ดังสมการ

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

โดยที่  $F_{a,l}$  คือ แรงเฉื่อยจากความเร่งเชิงเส้น (N)  
 $m$  คือ มวลของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (kg)  
 $a$  คือ ความเร่งของรถ ( $m/s^2$ )

#### 2. แรงเพื่อความเร่งเชิงมุม



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อมอเตอร์ไปยังล้อขับเคลื่อน

จากรูปที่ 2.4 เห็นได้ชัดเจนว่าแรงบิดของล้อเท่ากับ  $T = \frac{F_{te} r}{G}$  เมื่อ  $r$  คือรัศมีของยางและ

$F_{te}$  คือแรงที่พยายามดึงจากการส่งกำลังของมอเตอร์ ถ้า  $G$  คืออัตราทดเกียร์ของระบบมอเตอร์เชื่อมไปยังล้อ และ  $T$  คือแรงบิดของมอเตอร์แล้วจะได้สมการคือ

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

ทำการแก้สมการอีกครั้งดังนี้

ความเร็วเชิงมุมเพลลา

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

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

Cross-section shape	Moment of inertia of area
Circle 	$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi r^4}{4}$
Hollow circle 	$I = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64}$ Thin wall $I \approx \frac{\pi}{8} t \cdot d_m^3$

วงกลมตัน

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

วงกลมกลวง

$$I = \frac{\pi(d^4 - d_1^4)}{64} \quad (2.10)$$

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

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

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

ในสมการที่ (2.12) ผ่านมาเราได้สันนิษฐานว่าระบบเกียร์มีประสิทธิภาพ 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)  
 $\eta_g$  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 แรงที่นำมาใช้ในการออกแบบขดลวดสามล้อไฟฟ้านั้นมีเพียงแรงต้านการกลิ้ง และแรงต้านทานจากอากาศเท่านั้น เนื่องจากรถวิ่งด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่และแรงอื่น ๆ มีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณาในการออกแบบ

### 2.2.3 กำลังของมอเตอร์ (P)

คือการรวมแรงที่กระทำกับจักรยานทั้งหมดเพื่อนที่จะหา กำลังของมอเตอร์ ซึ่งเราสามารถเขียนสมการในรูปของกำลังจะได้ดังนี้

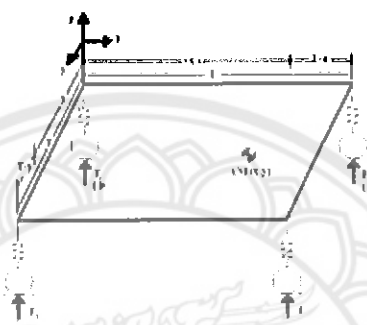
$$P = F_{te} \cdot V \quad (W) \quad (2.15)$$

$V$  = ความเร็ว (m/s)

$F_{te}$  = แรงรวมทั้งหมดในระบบ (N)

## 2.3 การหาจุดศูนย์กลางมวล

สำหรับการออกแบบรถสามล้อไฟฟ้านั้น จะต้องมีการออกแบบใหม่ทั้งหมดเนื่องจากมีล้อที่รับน้ำหนักเพียงสามล้อ โดยจะทำให้จุดศูนย์กลางมวลของตัวรถเปลี่ยนไป การรักษาสถิตของรถขณะขับเคลื่อนก็ต้องเปลี่ยนไป รวมถึงสมรรถนะในการขับขี่และการเลี้ยวด้วย ดังนั้นการหาจุดศูนย์กลางมวลของรถ (CG) หาได้จาก



รูปที่ 2.5 การหาจุดศูนย์กลางมวล

$$\sum M_x = (F_2 + F_3)(L - x) - (F_1 + F_4)x = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum M_y = (F_1 + F_2)y - (F_3 + F_4)(T - y) = 0 \quad (2.17)$$

ทำการแก้สมการเพื่อหา  $x$  และ  $y$

$$(F_2 + F_3)L - (F_2 + F_3)x - (F_1 + F_4)x = 0$$

$$(F_1 + F_2)y - (F_3 + F_4)T + (F_3 + F_4)y = 0$$

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)x = (F_2 + F_3)L$$

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)y = (F_3 + F_4)T$$

จะได้

$$x = \frac{(F_2 + F_3)L}{(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)} \quad (2.18)$$

$$y = \frac{(F_3 + F_4)T}{(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)} \quad (2.19)$$

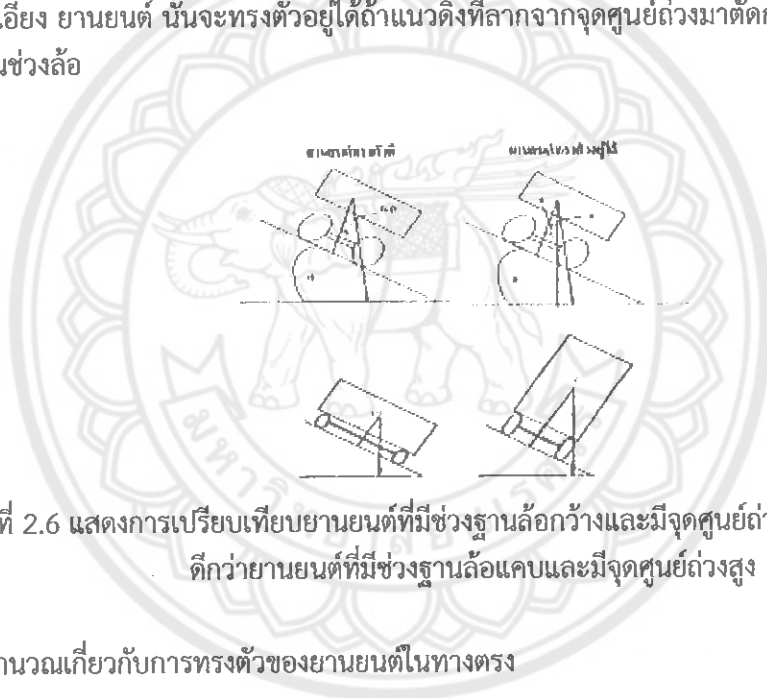
สำหรับในแนวตั้ง

$$\sum My = 0 ; W_f (b \cos \theta) - W \cos \theta (x) - W \sin \theta (y_1) = 0 \quad (2.20)$$

- โดยที่ W คือ น้ำหนักรวมของรถ
- $W_f$  คือ น้ำหนักส่วนเพลหน้า
- x คือ ระยะเพลหลังถึงเพลหน้า
- $y_1$  คือ ความสูงของจุดCGจากแนวอ้างอิง

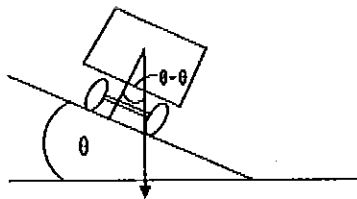
**2.3.1 การทรงตัวในทางตรงของรถ**

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของยานยนต์และความกว้างของช่วงล้อ สิ่งที่สำคัญสำหรับการพิจารณาถึงการทรงตัวของยานยนต์ในทางตรง กล่าวคือ เมื่อยานยนต์อยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่อยู่ในทางตรงที่มีความเอียง ยานยนต์ นั้นจะทรงตัวอยู่ได้ถ้าแนวตั้งที่ลากจากจุดศูนย์ถ่วงมาตัดกับแนวของพื้นถนนอยู่ในช่วงล้อ



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบยานยนต์ที่มีช่วงฐานล้อกว้างและมีจุดศูนย์ถ่วงต่ำจะมีการทรงตัวดีกว่ายานยนต์ที่มีช่วงฐานล้อแคบและมีจุดศูนย์ถ่วงสูง

การคำนวณเกี่ยวกับการทรงตัวของยานยนต์ในทางตรง



รูปที่ 2.7 เมื่อยานยนต์ทรงตัวอยู่ในตำแหน่งมุมเอียงสูงสุด

เส้นดิ่งที่ลากจากจุดศูนย์ถ่วงจะตัดกับแนวพื้นถนน ที่จุดสัมผัส ที่ล้อพอดีจึงยึดเอาตำแหน่งดังกล่าวนี้เป็นหลักเพื่อ พิจารณาว่า ยานยนต์จะสามารถทรงตัวได้หรือไม่ดังนี้

$$\tan\phi = \frac{b/2}{h} \quad (2.21)$$

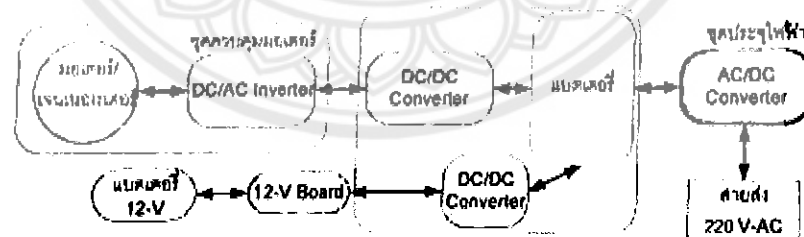
โดย  $b$  คือ ความกว้างของช่วงล้อ  
 $H$  คือ ความสูงของจุดศูนย์ถ่วงจากพื้นถนน  
 $\phi$  คือ มุมที่จุดศูนย์ถ่วงของยานยนต์ เมื่อยานยนต์อยู่ในสภาพมุมเอียงสูงสุดและยังอยู่ในสภาพที่ยังทรงตัวอยู่ได้  
 $\theta$  คือ มุมเอียงของถนน

ดังนั้น จึงสรุปถึงสภาพการสมดุลของยานยนต์ได้ดังนี้

1. ถ้า  $\phi > \theta$  หรือมุมที่จุดศูนย์ถ่วงมากกว่ามุมเอียงของถนน ยานยนต์จะทรงตัวอยู่ได้
2. ถ้า  $\phi = \theta$  หรือมุมที่จุดศูนย์ถ่วงเท่ากับมุมเอียงของถนน ยานยนต์จะทรงตัวอยู่ได้พอดี
3. ถ้า  $\phi < \theta$  หรือมุมที่จุดศูนย์ถ่วงน้อยกว่ามุมเอียงของถนน ยานยนต์จะเสียการทรงตัว

## 2.4 ชุดควบคุม

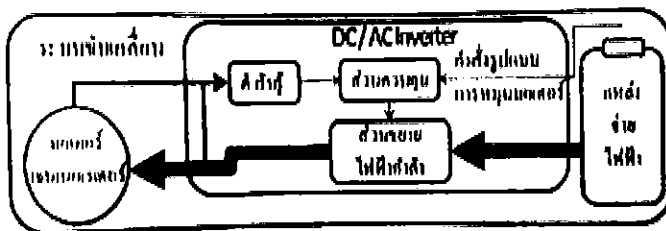
ในส่วนของยานยนต์ไฟฟ้านั้น ส่วนหนึ่งของการทำงานหลักคือการรับพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่หลากหลายแตกต่างกัน และแปรให้เป็นระดับแรงดันที่ต้องการ รูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าจากชิ้นส่วนหลักของยานยนต์ไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ หรือชุดประจุไฟฟ้า (charger) ต่างส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในระดับแรงดันที่ต่างกัน และอุปกรณ์ที่นั่นคือชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.8 การทำงานร่วมกันระหว่างชิ้นส่วนหลักของยานยนต์ไฟฟ้าผ่านชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง (ที่มา ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ , กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์)



### 2.4.1 องค์ประกอบชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 2.9 ระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า

#### 1. ตัวรับรู้

ตัวรับรู้ (sensor) ทำหน้าที่หลักในการดูสถานะของมอเตอร์ในกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า หรือดูสถานะของแบตเตอรี่ในกรณีชุดควบคุมไฟฟ้าสำหรับประจุแบตเตอรี่ เมื่อรับรู้สถานะปัจจุบันแล้วตัวรับรู้ก็จะส่งข้อมูลสถานะให้ชุดควบคุมตัดสินใจสั่งงาน

ตัวรับรู้ทางกลเป็นอุปกรณ์ที่พบมากในการควบคุมมอเตอร์ ในการควบคุมมอเตอร์ให้ได้รับการตอบสนองตามที่ต้องการ ชุดควบคุมไฟฟ้ามีความจำเป็นที่จะต้องรู้สถานะทางกลของมอเตอร์ เพื่อที่จะสามารถปรับแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการทำงาน ณ ตอนนั้นค่าทางกลที่สำคัญได้แก่ ความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือตำแหน่งของแกนมอเตอร์

การวัดตำแหน่งของแกนมอเตอร์ทำได้หลายวิธี เช่น การวัดด้วยสัญญาณบนแกน วิธีนี้จะทำ สัญญาณบนแกนของมอเตอร์ จากนั้นจะมีตัวรับรู้เพื่อตรวจจับสัญญาณนั้นๆ เมื่อมอเตอร์หมุน จุดที่ สัญญาณนั้นผ่านตัวรับรู้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขึ้น ทำให้ทราบได้ถึงตำแหน่งของแกน มอเตอร์

#### 2. ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง

ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังเป็นเสมือนร่างกายของชุดควบคุมไฟฟ้า โดยเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับ กระแสไฟฟ้า เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าในรูปแบบที่ต้องการ

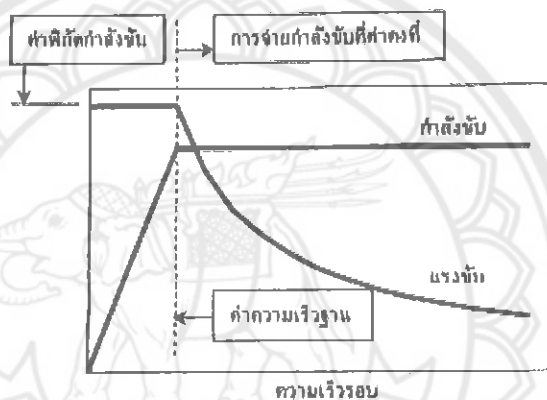
ถ้าเป็นวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ความเร็วรอบของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับแรงดัน ส่วนขยายไฟฟ้ากำลัง จะทำการจ่ายไฟฟ้ากำลังให้มีระดับแรงดันที่แตกต่างกัน ตามแต่ได้รับคำสั่งจาก ส่วนควบคุม ในกรณีที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง ส่วนขยายไฟฟ้ากำลังจะทำการจ่ายไฟฟ้า กำลังกลับซ้ำ

#### 3. ส่วนควบคุม

ส่วนควบคุมเป็นเหมือนสมองของชุดควบคุมไฟฟ้า ส่วนควบคุมเป็นส่วนที่นำความต้องการ ของผู้ใช้งาน เช่น ความเร็ว อัตราเร่ง มาประมวลผลเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากตัวรับรู้ แล้ว ตัดสินใจสั่งงานส่วนขยายไฟฟ้ากำลังให้สร้างรูปแบบของไฟฟ้ากำลังที่เหมาะสมออกมาเพื่อส่งไปยัง อุปกรณ์ปลายทาง ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์หรือชุดแบตเตอรี่

## 2.5 มอเตอร์ขับเคลื่อน

สำหรับการใช้งานในยานยนต์นั้น เพื่อสมรรถนะการขับเคลื่อน มอเตอร์ต้องสามารถจ่ายทั้งแรงบิดและกำลังขับได้อย่างเหมาะสม เพื่ออัตราเร่งในการออกตัว มอเตอร์ต้องให้แรงบิดเพียงพอ ในขณะที่การขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงนั้น มอเตอร์ต้องให้กำลังขับที่เพียงพอ ลักษณะการแปรผันระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 2.12 โดยเมื่อทำการออกตัว (ที่ความเร็วเป็นศูนย์) นั้นแรงบิดมอเตอร์จะมีค่าสูงสุดและจะมีค่าประมาณคงที่ไปถึงความเร็วรอบหนึ่ง ที่เรียกว่าความเร็วฐาน (base speed) ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นค่าความเร็วอ้างอิงสำหรับกำหนดค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเกินความเร็วฐาน แรงบิดจะลดต่ำลงและให้กำลังขับที่คงที่โดยมอเตอร์ที่ให้แรงบิดสูงที่รอบต่ำหมายถึงการออกตัวและการขึ้นทางชันที่ดี



รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของแรงบิดและกำลังขับที่เหมาะสมสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ (ที่มา ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ , กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์)

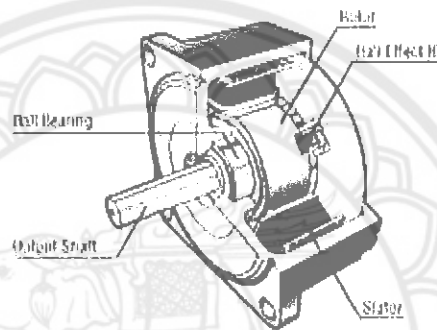
สำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์นั้น นอกจากลักษณะของแรงบิดต่อความเร็วรอบแล้ว มอเตอร์ไฟฟ้าต้องมีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมอื่นๆ เช่น มีประสิทธิภาพสูงในช่วงความเร็วรอบและช่วงแรงบิดที่กว้าง และให้การทำงานแบบ regenerative braking ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังต้องมีความทนทานต่อสภาวะการทำงานต่างๆ ทั้งอุณหภูมิสูง การสั่นสะเทือน และการขาดการบำรุงรักษา

### 2.5.1 มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถสามล้อไฟฟ้า

มอเตอร์ เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนทางกลโดยใช้กลไกของแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถสร้างออกมาได้หลากหลายรูปแบบตามชนิดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและโครงสร้างการส่งกำลัง โดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถสามล้อไฟฟ้า คือ

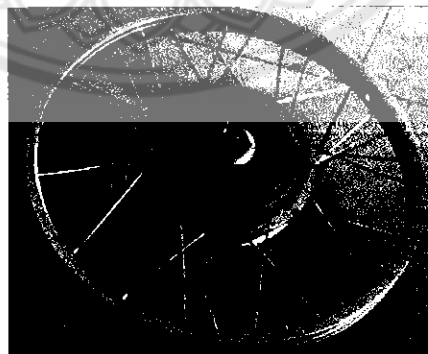
### มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC motors)

มอเตอร์ชนิดนี้จะวางโครงสร้างสลับกับมอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน โดยมีแกนหมุน (rotor) เป็นแม่เหล็กถาวรแต่ขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ที่สเตเตอร์ โดยขดลวดเหนี่ยวนำมีไม่ต่ำกว่าสามชุด มอเตอร์ชนิดนี้สามารถทำงานได้โดยการจ่ายไฟเข้าไปยังขดลวดแต่ละชุดเป็นเฟสสลับกันไปเรื่อยๆ เพื่อจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กดึงและผลักแกนหมุนให้หมุนอย่างต่อเนื่อง โดยมีการตรวจจับตำแหน่งเพื่อเริ่มทำงานโดยใช้ตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (hall sensor) มอเตอร์ชนิดนี้สามารถปรับแรงบิดได้โดยการจ่ายกระแสไฟ และปรับความเร็วรอบได้โดยการปรับความถี่ในการสลับกระแสไฟของขดลวด ซึ่งสามารถเรียกการทำงานของมอเตอร์ที่มีความเร็วในการหมุนตรงกับความเร็วของการหมุนของสนามแม่เหล็กกว่าเป็นการทำงานแบบ Synchronous นั่นเอง แต่มอเตอร์ชนิดนี้ก็มีข้อเสียคือต้องการวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

รูปแบบของมอเตอร์ที่ใช้ในสามล้อไฟฟ้า มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านแบบดุมล้อ คือ มอเตอร์ที่มีโครงสร้างของมอเตอร์ที่มีการวางตัวมอเตอร์อยู่ในโครงของตัวล้อ มักจะนิยมใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะจักรยานไฟฟ้า โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีการต่อสายไฟจ่ายพลังงานผ่านทางแกนของล้อ โครงสร้างทั้งหมดของ มอเตอร์จะวางตัวสลับที่กับมอเตอร์ปกติ



รูปที่ 2.12 แสดงรูปร่างของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดุมล้อ

### 2.5.2 แบบจำลองมอเตอร์

ในระบบยานยนต์ไฟฟ้านั้น แบบจำลองมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สมการแรงบิดมอเตอร์ ความเร็วเชิงมุม และประสิทธิภาพของมอเตอร์ โดยจะถูกแสดงไว้ในสมการที่ 2.25 ตามลำดับดังนี้

1.แรงบิดมอเตอร์ (T)

$$T = F_{te} r \text{ N.m} \quad (2.22)$$

2.ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

$$\text{ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์} \quad \omega = G \frac{v}{r} \text{ rad / s} \quad (2.23)$$

$$\text{ความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์} \quad \dot{\omega} = G \frac{a}{r} \text{ rad / s}^2 \quad (2.24)$$

3.ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งที่มาสำคัญของการสูญเสียในการแปลงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้าทุกประเภทและสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักดังนี้ ความสูญเสียที่ทองแดง เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของสายและบางส่วนของพลังงานไฟฟ้าจะกลายเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานไฟฟ้าผลของความร้อนกระแสไฟฟ้า เป็นสัดส่วนกับกำลังสองของความเร็วรอบในการหมุน

$$\eta_m = \frac{\text{output power}}{\text{input power}} = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i + k_w + C} \quad (2.25)$$

โดย

$k_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียทองแดง

$k_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียธาตุเหล็ก

$k_w$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากแรงเสียดทาน

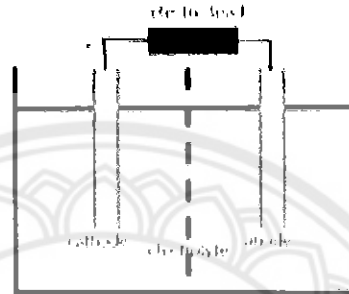
$C$  คือ การสูญเสียคงที่นำไปใช้ที่ความเร็วใดๆ (ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและแรงบิด)

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวแปรของการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์

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

## 2.6 แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้าในการเก็บพลังงาน ส่วนประกอบที่สำคัญของแบตเตอรี่ (รูปที่ 2.15) ประกอบด้วยขั้วแบตเตอรี่ (ขั้วแคโทด ขั้วแอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) แบตเตอรี่จะเป็นทั้งเซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ในขณะที่ใช้งาน และเซลล์อิเล็กโทรไลติก (electrolytic cell) ในขณะที่ประจุไฟฟ้า ในขณะที่ใช้งานกระแสไฟฟ้าจะไหลจากขั้วแคโทดผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าไปสู่ขั้วแอโนด



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่

การวัดสมรรถนะของแบตเตอรี่จะวัดกันในหลายมิติ มิติที่สำคัญได้แก่ กำลังจำเพาะ (specific power, W/kg) อายุการใช้งาน (service life) อัตราการเก็บและคายประจุ (charge and discharge rate) ราคาและความปลอดภัย (safety) อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ขึ้นกับความจุ (capacity, Ah) และจำนวนรอบที่สามารถเก็บประจุ (charge cycles) ซึ่งค่าความจุจะขึ้นกับค่าของพลังงานจำเพาะ (specific energy, Wh/kg) หรือค่าความหนาแน่นพลังงาน (energy density, Wh/l) องค์ประกอบในการพิจารณาสมรรถนะของแบตเตอรี่จึงเขียนได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 สมรรถนะแบตเตอรี่ในมิติต่างๆ

ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะจำเพาะของแบตเตอรี่รูปแบบต่างๆ

สมบัติ	ประเภทของแบตเตอรี่		
	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
ความจุพลังงาน (Wh/kg)	30-40	75-100	110-175
พลังงานต่อปริมาตร (Wh/L)	54-95	200-300	250-360
กำลังจำเพาะ (W/kg)	600-800	1000-1500	1500-3000
แรงดันต่อหน่วย (v)	2.1	1.2	3.2-3.6
ราคา (บาท/kWh)	3400-5100	17000-27200	17000-34000
อายุวัฏจักรการใช้งาน (ที่ระดับการคายประจุ 80%)	300-800	>1000	>2000
เวลาประจุไฟ (ชั่วโมง)	8	1	2-3

(ที่มา ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ , กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์)

### 2.6.1 แบบจำลองของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

#### 1.แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

พฤติกรรมพลวัตของแบตเตอรี่จะมีผลกระทบต่ออย่างมากกับประสิทธิภาพของยานยนต์ไฟฟ้า โดยจะมีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (E) แบตเตอรี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถ คำนวณการเสื่อมของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

#### แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นทางเลือกของแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานต่อน้ำหนักต่ำ แต่ก็ยังมีราคาเริ่มต้นที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับหน่วยพลังงานด้วย ดังนั้น จึงเหมาะกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วต่ำ ทั้งนี้ก็ด้วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ในตัวรถ ตัวอย่างการใช้งานก็เช่น รถกอล์ฟไฟฟ้า รถยกไฟฟ้า(forklift) หรือรถโดยสารที่ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กที่นิยมใช้กันอยู่ค่อนข้างกว้างขวาง ในปัจจุบัน แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดจะมีใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำงานที่ความเร็วสูงก็เฉพาะกับรถกระบะที่มีพื้นที่พอดีติดตั้งแบตเตอรี่

$$E = n \cdot (2.15 - \text{DoD} \cdot [2.15 - 2.00]) \quad (2.26)$$

โดย

n คือ จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

DoD คือ การควบคุมการถ่ายประจุของแบตเตอรี่ (0 to 1)

## 2. การจำลองการใช้งานของแบตเตอรี่

ขั้นตอนแรกคือการหาสมการสำหรับ กระแสจากแบตเตอรี่ ( I ) เมื่อถูกใช้งานที่กำลังไฟฟ้า P(w) โดยสมการมีดังนี้

$$P = V \times I \quad (2.27)$$

ดังนั้น 
$$P = V \times I = (E - IR) \times I = EI - RI^2 \quad (2.28)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่คือ

$$I_B = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP_{bat}}}{2R} \quad (2.29)$$

เมื่อทำการเบรกมอเตอร์จะรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative braking)

จาก 
$$V = E + IR \quad (2.30)$$

ดังนั้น 
$$P = V \times I = (E + IR) \times I = EI + RI^2 \quad (2.31)$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่ที่ได้ในช่วงเบรก

$$I_B = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP_{bat}}}{2R} \quad (2.32)$$

โดย

P คือ กำลังไฟฟ้า (w)

E คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (v)

V คือ แรงดันย่อยของแบตเตอรี่ (v)

R คือ ค่าความต้านทานภายในเซลล์ ( $\Omega$ )

## 2.7 ระบบห้ามล้อที่ใช้ในรถสามล้อไฟฟ้า

เบรกเป็นกลไกทางกลศาสตร์ในการเปลี่ยนประเภทของพลังงาน เมื่อรถวิ่งด้วยความเร็ว รถจะเกิดพลังงานจลน์ เมื่อคุณกำเบรก จะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรกจะเกิดพลังงานความร้อนโดยผ่านความเสียดทาน การระบายความร้อนของเบรกที่กระจายความร้อนแล้ว และยานพาหนะช้าลง กฎแรกของเทอร์โมไดนามิกส์เรียกว่ากฎของการอนุรักษ์พลังงาน ในกรณีนี้พลังงานจลน์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

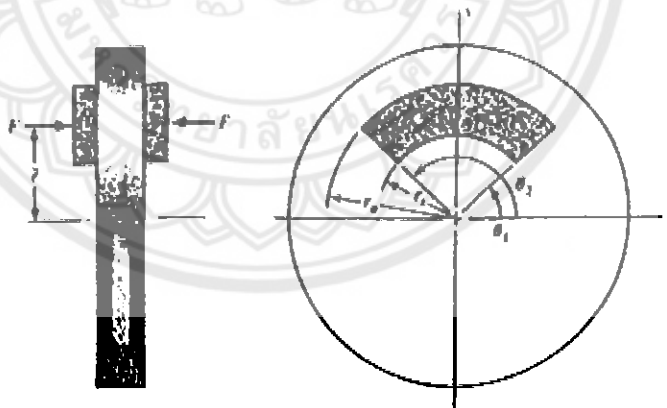
### 2.7.1 ดิสก์เบรก (Disk Brakes)

ผ้าเบรกจะถูกกดให้ประกบเข้ากับแผ่นดิสก์เบรกด้วยการกระทำของคาลิเปอร์เมื่อลูกสูบได้รับความดันจากน้ำมันไฮดรอลิกส์ เบรกชนิดนี้จะยอมให้เกิดการสึกหลอที่ผ้าเบรก โดยรักษาความดันบนพื้นผิวสัมผัสของผ้าเบรกให้คงที่ เบรกประเภทนี้จะมีข้อดีคือ มีพื้นผิวเปิดที่สัมผัสกับบรรยากาศได้มากขึ้น ทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการหล่อเย็นไปในตัว

พิกัด  $r$  จะมีตำแหน่งอยู่ ณ จุดที่แนวแรงกระทำ  $F$  ตัดกับแกน  $y$  ถ้า  $p$  คือความดันของการสัมผัส แรงกระทำ  $F$  และโมเมนต์ของแรงเสียดทาน  $T$  จะหาได้จากสมการ

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_r^r p r dr d\theta = (\theta_2 - \theta_1) \int_r^r p r dr \quad (2.33)$$

$$T = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_r^r f p r^2 dr d\theta = (\theta_2 - \theta_1) f \int_r^r p r^2 dr \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.15 การสัมผัสของผ้าเบรกวงแหวนเดี่ยว  
(ที่มา Mechanical Engineering Design 2 , Joseph E. Shigley)

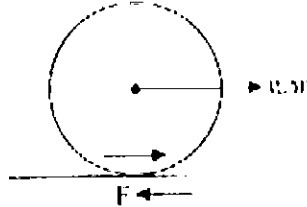
### 2.7.2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative brake)

รถที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อรถเบรก มอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งไฟฟ้ากลับไปยังแบตเตอรี่ โดยกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากแบตเตอรี่ที่ได้ในช่วงทำการเบรก จะแสดงในสมการที่ (2.32)





## 2.8 การหาความเร่งและระยะทางในการเบรก



รูปที่ 2.16 แรงกระทำกับรถในทำการเบรก

(ที่มา <https://sites.google.com/site/siteanan/raeng-seiyd-than>)

จากภาพ 2.16 เมื่อรถทำการเบรกจะทำให้ล้อหยุดหมุนส่งผลให้เกิดแรงเสียดทานการเบรก  $F$  สามารถหาแรงดังกล่าวได้จาก

$$F = \mu m_R g \quad (2.35)$$

และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$F = m_{total} a \quad (2.36)$$

นำสมการ (2.35) มาเท่ากับ (2.36)

จะได้

$$\mu m_R g = m_{total} a$$

จัดรูปสมการ

$$a = \frac{\mu m_R g}{m_{total}} \quad (2.37)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน  
 $m_R$  คือ มวลที่กดลงบนล้อที่ทำการเบรก  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก  
 $m_{total}$  คือ มวลทั้งหมดของรถ  
 $a$  คือ ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก

การหาระยะทางในการเบรกหาได้จากสมการการเคลื่อนที่

$$s = \frac{u^2 - v^2}{2a} \quad (2.38)$$

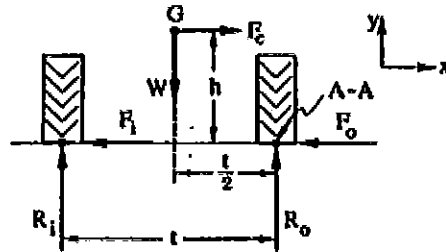
เมื่อ  $s$  คือ ระยะทางในการเบรก

$v$  คือ ความเร็วเมื่อรถหยุดนิ่ง (มีค่า = 0)

$u$  คือ ความเร็วเมื่อรถเริ่มทำการเบรก

$a$  คือ ความเร่งของรถเมื่อทำการเบรก (หาได้จากสมการ 2.37)

## 2.9 การเข้าโค้ง



รูปที่ 2.17 แรงกระทำกับรถในขณะเลี้ยวโค้งบนถนนระดับ  
(ที่มา วิศวกรรมยานยนต์ , รศ.ธีรยุทธ สุวรรณประทีป)

เมื่อรถเลี้ยวโค้งบนถนนระดับ อาจเกิดการพลิกคว่ำหรือลื่นไถลออกนอกถนนได้ การพลิกคว่ำหรือลื่นไถล มีผลมาจากแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นในขณะเลี้ยวโค้งนั่นเอง รถจะถูกกระทำด้วยแรงดังรูปที่ 2.19 เมื่อพิจารณาการพลิกคว่ำรอบแกน A-A แรงที่ทำให้คว่ำคือแรงหนีศูนย์กลาง  $F_c$  แรงที่ทำให้ทรงตัวได้คือน้ำหนักของรถ  $W$  ดังนั้น เมื่อพิจารณาโมเมนต์รอบแกน A-A และรถเริ่มจะพลิกคว่ำ จะได้

โมเมนต์พลิกคว่ำ = โมเมนต์ทรงตัว

$$F_c = W \frac{t}{2}$$

$$\frac{mv^2}{r} (h) = mg \left( \frac{t}{2} \right)$$

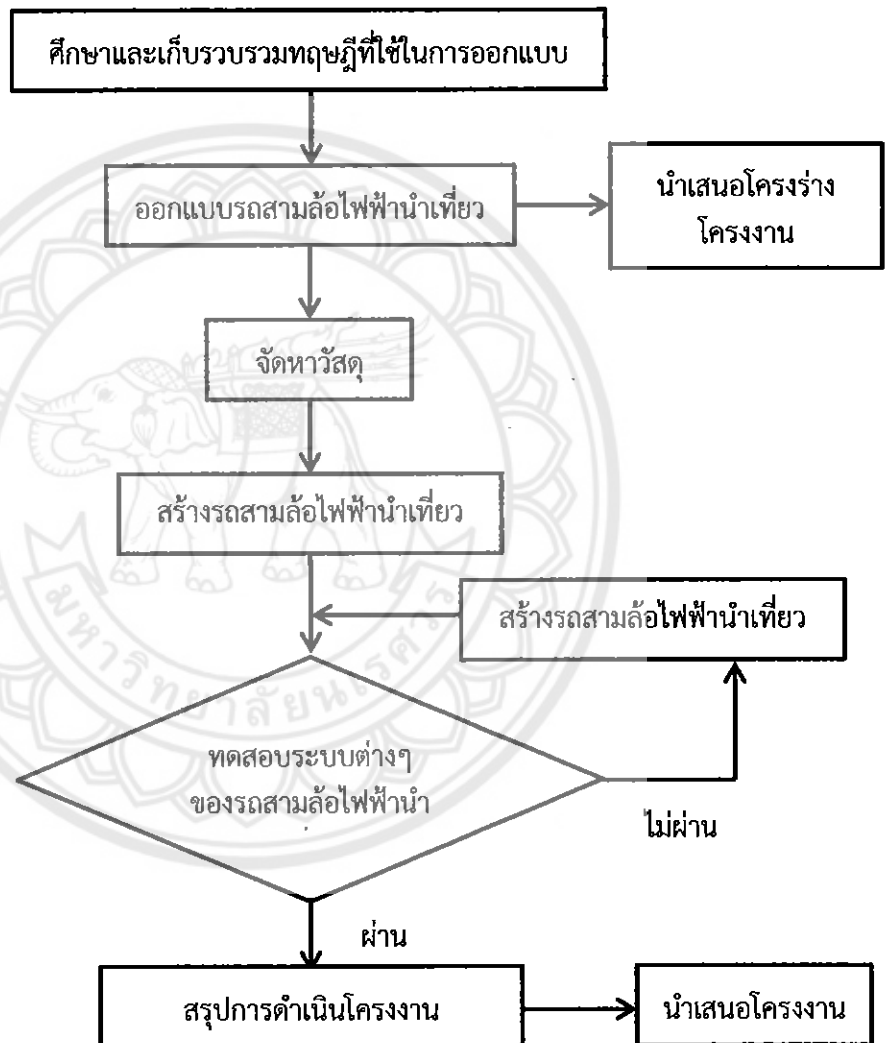
$$v^2 = \frac{grt}{2h}$$

$$v = \sqrt{\frac{grt}{2h}}$$

(2.39)

- เมื่อ  $v$  คือ อัตราเร็วของรถที่ทำให้รถเริ่มพลิกคว่ำ มีหน่วยเป็น m/s  
 $r$  คือ รัศมีความโค้งของการเลี้ยว มีหน่วยเป็น m  
 $t$  คือ ระยะห่างล้อข้างซ้ายกับล้อข้างขวา มีหน่วยเป็น m  
 $h$  คือ ความสูงของจุดศูนย์กลางมวล G จากพื้นถนน มีหน่วยเป็น m

บทที่ 3  
วิธีการดำเนินงาน



### 3.1 ออกแบบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว

ในการออกแบบรถสามล้อไฟฟ้านี้ จะทำการออกแบบเหมือนกับการออกแบบรถไฟฟ้าทั่วไป แต่ในที่นี้จะตัดแปลงบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับการเป็นสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว และเพื่อที่จะบรรลุตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ

- 1.สามารถบรรทุกคนได้ 3 คน รวมคนขับ
- 2.ออกแบบรถไฟฟ้าให้ออกมาคล้ายๆกับรถสองแถว (รถคอกหมู) มากที่สุด

#### 3.1.1.การออกแบบกำลังขับเคลื่อน

การออกแบบกำลังขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าเป็นการหาแรงต้านของการเคลื่อนที่ทั้งหมดของรถสามล้อไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อนำแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดนี้ไปออกแบบเพื่อหากำลังของมอเตอร์ โดยเงื่อนไขที่กำหนดคือ

- 1.น้ำหนักรวมทั้งหมดของรถ (Total Weight) 450 กิโลกรัม
- 2.ความเร็วสูงสุดที่น้ำหนัก 450 กิโลกรัม 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง
- 3.ไม่มีการขึ้นทางชัน
- 4.รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่

แรงต้านการเคลื่อนที่มีทั้งหมด 2 ชนิด คือ

1. แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance,  $F_r$ )

$$\text{จากสมการ } F_r = f_r w_r = f_r mg$$

$$\text{โดย } f_r = 0.0108$$

$$m = 450 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{ดังนั้น } F_r = 0.0108 \times 450 \times 9.81 = 47.67 \text{ N}$$

2. แรงต้านอากาศ (Air Resistance,  $F_a$ )

$$\text{จากสมการ } F_a = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2$$

$$\text{โดย } \rho = 1.28 \text{ Kg/m}^3 \text{ (อากาศที่อุณหภูมิ } 40^\circ \text{C)}$$

$$A = 1.8 \text{ m}^2 \text{ (พื้นที่หน้าตัดของรถจากการออกแบบ)}$$

$$C_d = 0.7$$

$$V = 30 \text{ km/hr} = 8.33 \text{ m/s}$$

$$\text{ดังนั้น } F_a = \frac{1}{2} \times 1.28 \times 1.8 \times 0.7 \times 8.33^2 = 55.96 \text{ N}$$

หากำลังมอเตอร์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ ที่ความเร็ว 30 km/hr

$$\text{จากสมการ } P = FV$$

$$\text{ดังนั้น } P = (47.67 + 55.96) \times 8.33 = 863.24 \text{ W}$$

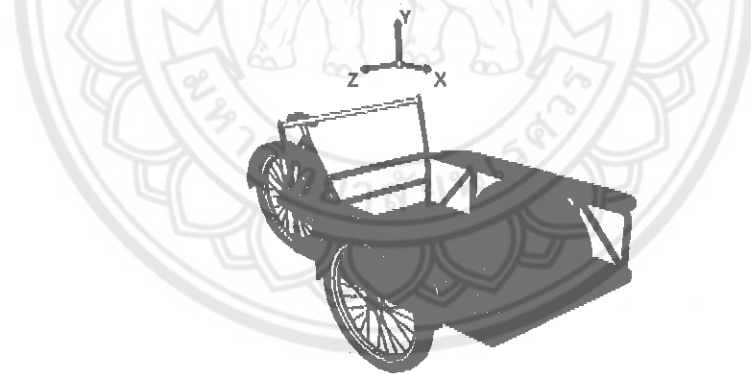
จากการคำนวณ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1000W ซึ่งเพียงพอต่อการขับเคลื่อนรถสามล้อไฟฟ้าที่ความเร็ว 30 km/hr

### 3.1.2 การหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของรถเพื่อการออกแบบ

ในการออกแบบรถสามล้อไฟฟ้าจะต้องมีการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของตัวรถ เพื่อความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ในตำแหน่งต่างๆของรถ เพื่อให้รถอยู่ในสภาพที่สมดุลในขณะที่เคลื่อนที่และจอดหยุดนิ่ง ซึ่งในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

#### 1. การหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของรถสามล้อเปล่า

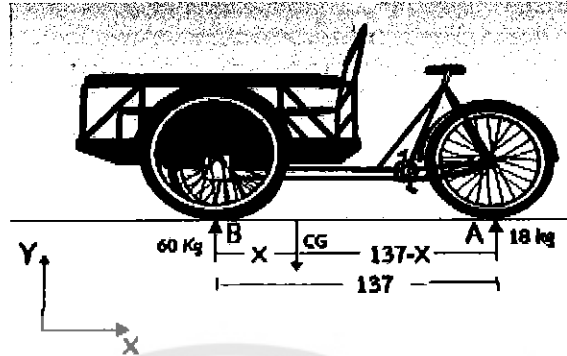
ผู้ทำการทดลองได้ชั่งน้ำหนักรถและคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG) โดยใช้วิธีการชั่งน้ำหนักของรถ โดยการนำตราชั่งทั้งหมดสามตัวมาวางไว้ใต้ล้อทั้งหมดสามล้อ ได้ค่าน้ำหนักเปล่าเท่ากับ 78 กิโลกรัม และหาน้ำหนักที่ล้อแต่ละล้อกระทำกับตราชั่งเพื่อหาน้ำหนักรวมของรถและเพื่อหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของรถ ซึ่งจะอ้างอิงจากตำแหน่งของเพลาล้อ โดยเพลาล้อจะสูงจากพื้น 35cm



รูป 3.1 แสดงลักษณะโดยรวมของรถ

สังเกตได้ว่า ในแนวแกน Z รถมีการสมมาตรทั้งซ้ายและขวา นั้นหมายความว่าจุดศูนย์กลางมวล(CG)ในแนวแกน Z จะอยู่ตรงกึ่งกลางรถพอดี ผู้จัดทำจึงคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)เพียงสองแนวแกน คือ แนวแกน X และแนวแกน Y

-การคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ในแนวแกน X



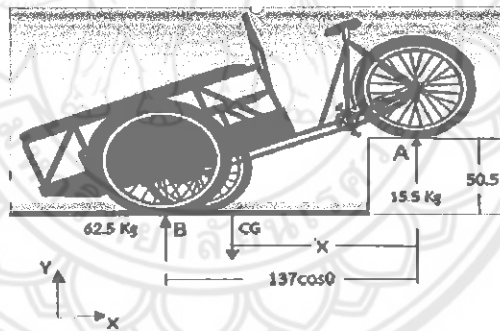
รูป 3.2 ประกอบการคำนวณการหา CG แกน X

$$X = (18 \times 137) / 78$$

$$X = 31.62 \text{ cm}$$

จะเห็นว่า จุดCGจะอยู่ห่างจากเพลาล้อหน้าไปทางด้านหลัง 31.62 cm

-การคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ในแนวแกน Y



รูป 3.3 ประกอบการคำนวณการหา CG แกน Y

หามุมเอียง ;  $\theta = \sin^{-1}(50.5/137) = 21.63^\circ$

จากสมการ

$$\sum My = 0; Fa(b \cos \theta) - W \cos \theta(x) - W \sin \theta(y_1) = 0$$

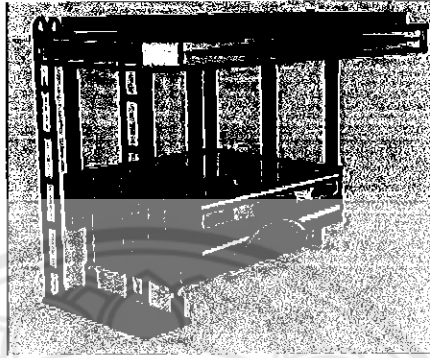
$$y_1 = \frac{62.5(137 \cos 21.63^\circ) - 78 \cos 21.63^\circ(137 - 31.62)}{78 \sin 21.63^\circ}$$

$$y_1 = 11.45 \text{ cm}$$

เพราะฉะนั้น จุด CG อยู่ห่างจากเพลาล้อหน้าไปทางด้านหลัง 31.62 cm และอยู่สูงจากเพลาล้อ 11.45 cm

## 2. การหาจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของไม้ที่ใช้นำมาตักแต่ง

ผู้ทำการทดลองได้นำไม้มาตักแต่งรถสามล้อให้ออกมาคล้ายๆกับรถคอกหมู ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำมาจากไม้ ผู้ทำการทดลองจึงประมาณน้ำหนักของไม้ที่ใช้ทั้งหมดประมาณ 70 kg ซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นหลังคา 35kg และส่วนที่เป็นที่นั่ง 35kg



รูป 3.4 แสดงหลังคาและที่นั่งที่ติดตั้งในตัวรถ

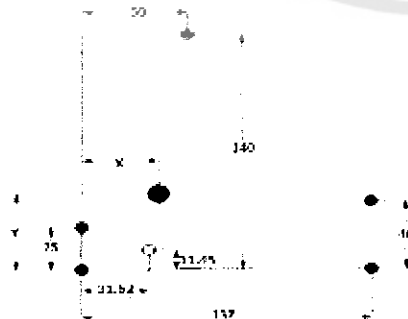
ในส่วนที่เป็นหลังคามีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 1.05m ยาว 2.4m ซึ่งสมมาตรทั้งสองแนวแกนจุดศูนย์กลางมวลของหลังคาจึงอยู่ที่กึ่งกลางพอดี

ในส่วนของที่นั่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม กว้าง 1.05m ยาว 0.98m สูง 0.55m ซึ่งมีลักษณะเกือบสมมาตรทั้งสามแนวแกน เพื่อง่ายต่อการประมาณผู้ทำการทดลองจึงสมมติให้ส่วนของที่นั่งสมมาตรทั้งสามแนวแกน จุดศูนย์กลางมวลของที่นั่งจึงอยู่ที่กึ่งกลางพอดี

## 3. ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่

ผู้ทำการทดลองจะทำการติดตั้งแบตเตอรี่ไว้ด้านหลังของคนขับ เพื่อที่จะถ่วงน้ำหนักของรถสามล้อไม่ให้น้ำหนักลงด้านหน้าจนเกินไป และเพื่อเป็นการถ่วงน้ำหนักไม่ให้ท้ายรถยกลอยขึ้น

เมื่อนำจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของทั้ง3ส่วนมารวมอยู่ด้วยกัน



จุดสีดำ คือ ตำแหน่งของเพลาล้อหน้าและล้อหลัง

จุดสีแดง คือจุด CG ของที่นั่ง มีมวล 35kg

จุดสีเหลือง คือจุด CG ของตัวรถ มีมวล 78kg

จุดสีเขียว คือจุด CG ของหลังคา มีมวล 35kg

จุดสีน้ำเงิน คือจุด CG ของแบตเตอรี่ มีมวล 11.2kg

จุดสีน้ำตาล คือจุด CG ของรถเมื่อประกอบชิ้นส่วน

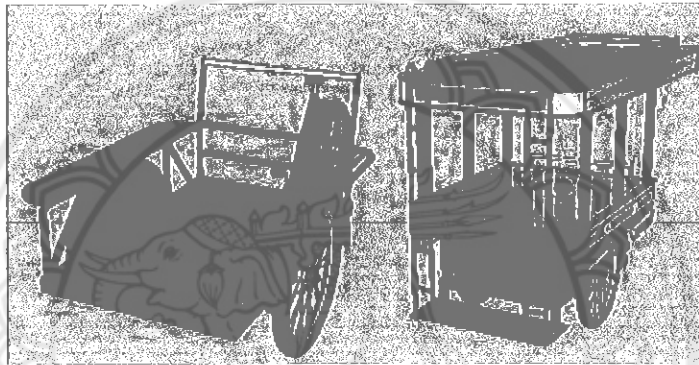
แนวแกน X ;

$$X = ((31.62 \times 78) + (50 \times 35) + (137 \times 11.2)) / (35 + 78 + 35 + 11.2) = 36.12 \text{ cm}$$

แนวแกน Y ;

$$Y = ((25 \times 35) + (11.45 \times 78) + (140 \times 35) + (40 \times 11.2)) / (35 + 78 + 35 + 11.2) = 44.70 \text{ cm}$$

สังเกตได้ว่า เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปภายในรถสามล้อ จุดศูนย์กลางมวล(CG)ของรถจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจุดศูนย์กลางมวล(CG)ของรถจุดใหม่อยู่ในตำแหน่งสูงกว่าเพลารถ 44.7cm และอยู่ห่างจากเพลาล้อหน้าไปทางด้านหลัง 36.12cm ซึ่งอยู่ห่างจากจุดCG เดิมไปทางด้านหลัง 4.5 cm และสูงจากตำแหน่งเดิม 33.25 cm



รูป 3.5 แสดงจุด CG ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อนำจุดCGเดิมและจุดใหม่มาพิจารณาการเอียงของรถ ดังนี้  
ระยะห่างของล้อ เท่ากับ 100 cm

เพลาล้ออยู่สูงจากพื้น 35 cm

**จุดเดิม**

$$\theta = \tan^{-1}(b/2h)$$

$$\theta = \tan^{-1}(100 / 2 \times 44.45)$$

$$\theta = 48.36^\circ$$

**จุดใหม่**

$$\theta = \tan^{-1}(b/2h)$$

$$\theta = \tan^{-1}(100 / 2 \times 77.7)$$

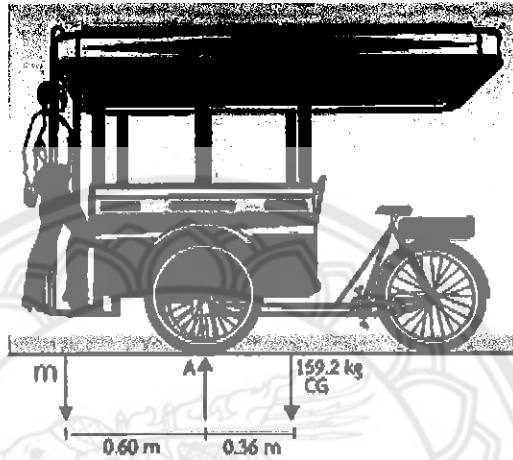
$$\theta = 32.76^\circ$$

จากการคำนวณ รถสามล้อเปล่าสามารถเอียงได้  $48.36^\circ$  และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์สามารถเอียงได้  $32.76^\circ$



สังเกตได้ว่า เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปภายในรถสามล้อทำให้รถเอียงได้น้อยลงกว่าเดิม  $15.6^\circ$  เนื่องจากจุด CG ของรถอยู่สูงจากตำแหน่งเดิม

เมื่อได้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (CG) จุดใหม่ ก็จะนำมาคำนวณเพื่อหาว่า เมื่อรถจอดอยู่นิ่งๆ โดยไม่มีคนขับ หากผู้โดยสารเหยียบก้าวขึ้นทางด้านหน้าของรถ ท้ายรถจะยกลอยขึ้นหรือไม่ โดยสมมติว่า ผู้โดยสาร(ชาวต่างชาติ)มีน้ำหนัก 85kg



รูป 3.6 ประกอบการคำนวณการหามวลที่ทำให้ท้ายรถยก

$$\sum M_A = 0 ; (0.60m) - (159.2 \times 0.36) = 0$$

$$m = 95.76 \text{ kg}$$

จะเห็นว่า จากการคำนวณสามารถรับมวลได้ถึง 95kg ท้ายรถจึงจะยกลอยขึ้น แต่ผู้โดยสาร (ชาวต่างชาติ) มีน้ำหนัก 85kg จึงสรุปว่าท้ายรถจะไม่ยกลอยขึ้นเมื่อเหยียบก้าวขึ้นทางด้านหน้าของรถ

### 3.1.3 การคำนวณระยะทางในการเบรก

คำนวณระยะทางเบรกบนพื้นคอนกรีตที่ความเร็วในการเบรก 10,15 และ 20 กิโลเมตรต่อ ชั่วโมงโดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นเป็นแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\mu_k = 0.8$  (<http://www.vcharkarn.com/lesson/1120>) โดยน้ำหนักรวมของรถรวมคนขับเท่ากับ 245 กิโลกรัม และล้อที่เบรกมีเพียงล้อเดียวคือล้อหลัง โดยน้ำหนักที่ตกลงที่ล้อหลังมีค่าเท่ากับ 90.72 กิโลกรัม

จากสมการ

$$f = ma$$

จะได้ว่า

$$\mu m_r g = m_{\text{total}} a$$

$$0.8 \times 90.72 \times 9.81 = 245 a$$

เพราะฉะนั้นความเร่งในการเบรก

$$a = 2.91 \text{ m/s}^2$$

ระยะเบรกที่ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หาได้จาก

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

$$= \frac{10^2 - 0^2}{2 \times 2.91}$$

$$= \frac{3.6}{2 \times 2.91}$$

$$s = 1.32\text{m}$$

ระยะเบรกที่ความเร็ว 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หาได้จาก

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

$$= \frac{15^2 - 0^2}{2 \times 2.91}$$

$$= \frac{3.6}{2 \times 2.91}$$

$$s = 2.98\text{m}$$

ระยะเบรกที่ความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หาได้จาก

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

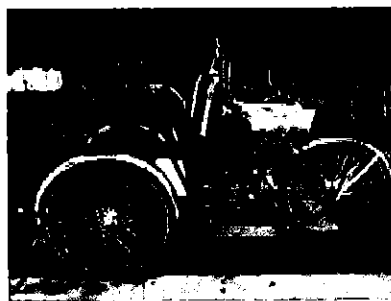
$$= \frac{20^2 - 0^2}{2 \times 2.91}$$

$$= \frac{3.6}{2 \times 2.91}$$

$$s = 5.30\text{m}$$

### 3.2 การจัดหาวัสดุอุปกรณ์

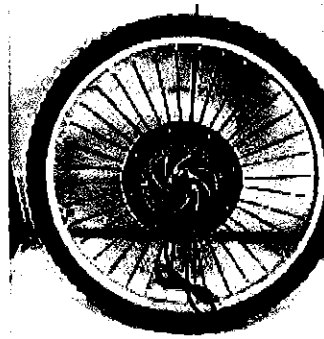
#### 1. รถสามล้อปั่น(ชาเล้ง)



รูปที่ 3.7 รถสามล้อปั่น(ชาเล้ง)

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=ชาเล้งจักรยาน&biw>)

## 2.มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนพร้อมล้อ



รูปที่ 3.8 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนพร้อมล้อ

## 3.แบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 แบตเตอรี่

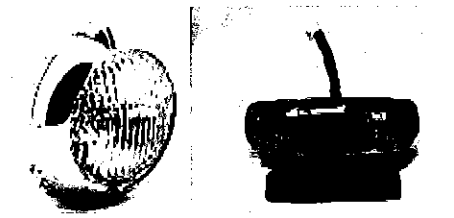
(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=แบตเตอรี่&biw>)

## 4.ชุดความควบคุมไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 3.10 ชุดความควบคุมไฟฟ้ากำลัง

## 5. อุปกรณ์ส่องสว่าง



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ส่องสว่าง

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=หลอดไฟรถ&biw>)

## 6. ดิสเบรก



รูปที่ 3.12 ดิสเบรกมอเตอร์ไซด์

(ที่มา [www.google.co.th/search?q=ดิสเบรก+มอเตอร์ไซด์&source](http://www.google.co.th/search?q=ดิสเบรก+มอเตอร์ไซด์&source))

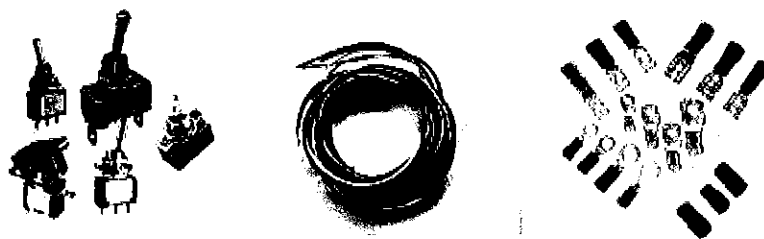
## 7. ชุดคันเร่งไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 คันเร่งจักรยานไฟฟ้า

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=คันเร่งจักรยาน&biw>)

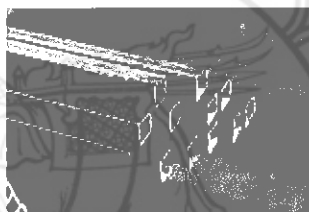
## 8. อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ไฟฟ้า

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=อุปกรณ์ไฟฟ้า&biw>)

## 9. เหล็ก



รูปที่ 3.15 เหล็ก

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=เหล็ก&biw>)

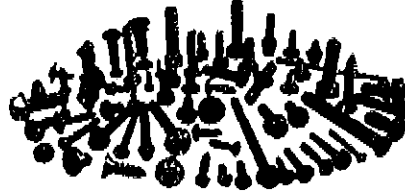
## 10. แผ่นไม้สำหรับตกแต่ง



รูปที่ 3.16 ไม้แปรรูป

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=ไม้&biw>)

## 11. นี้อตสำหรับยึดจุดต่างๆ



รูปที่ 3.17 นี้อต

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=นี้อต&biw>)

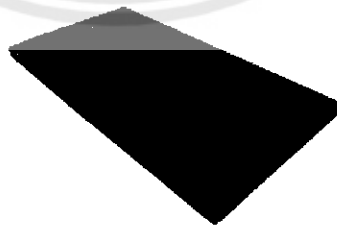
## 12. สีสำหรับทาไม้และเหล็ก



รูปที่ 3.18 สีสำหรับทาไม้

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=สีทาไม้&biw>)

## .เบาะสำหรับนั่ง



รูปที่ 3.19 เบาะนั่ง

(ที่มา <https://www.google.co.th/search?q=เบาะนั่ง&biw>)

### 3.3 การทดสอบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยว

การทดสอบรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยวที่สร้างขึ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบข้อมูลต่างๆ ของรถไฟฟ้าในสภาพใช้งานจริงเปรียบเทียบกับข้อมูลตามทฤษฎี เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาต่อไป และผลการทดสอบนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะของรถสามล้อไฟฟ้านำเที่ยวอีกด้วย ในการทดสอบจริงต้องมีการดัดแปลงให้เข้ากับสภาพจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถถือเป็นมาตรฐานที่จะใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลได้ เนื่องจากรถสามล้อไฟฟ้าได้สร้างขึ้นมาเพื่อการขนส่งผู้โดยสารเพื่อการท่องเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ดังนั้นในการทดสอบจึงต้องมีความเกี่ยวข้องกับการบรรทุกผู้โดยสารด้วย ดังนี้

#### 3.3.1 ทดสอบระยะทางในการวิ่งต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง

การทดสอบเพื่อหาระยะทางที่สูงที่สุดที่รถสามล้อไฟฟ้าสามารถวิ่งได้ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง ที่เปอร์เซ็นต์การบิดคันเร่งที่แตกต่างกัน

##### อุปกรณ์

1. รถสามล้อไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดแบบแห้ง ขนาด (12V12AH) จำนวน 4 ลูก
3. จูลมิเตอร์
4. GPS



รูปที่ 3.20 จูลมิเตอร์

##### วิธีทดสอบ

ทำการทดสอบการปล่อยกระแสของแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดแบบแห้งขนาด 12 โวลต์ 12 แอมป์ชั่วโมง (12V12AH) จำนวน 4 ลูก ต่ออนุกรมกัน โดยการทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์การบิดคันเร่ง โดยจะแบ่งออกเป็นบิดคันเร่ง 100% , 50% และ 50%แบบช่วยปั่น ทดสอบโดยใช้เครื่องจูลมิเตอร์ในการวัดค่าการปล่อยพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 3.20 ทดสอบเพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่แบตเตอรี่ชาร์จเต็มโดยใช้เครื่อง Global Positioning System (GPS)

### 3.3.2 การทดสอบรัศมีวงเลี้ยว

การทดสอบเพื่อหารัศมีวงเลี้ยวและความเร็วสูงสุดที่ปลอดภัยในการขับขี่และโดยสารรถสามล้อไฟฟ้าในขณะที่ขับขี่ทางโค้ง

#### อุปกรณ์

1. รถสามล้อไฟฟ้าพร้อมคนขับ
2. ตลับเมตร
3. GPS
4. ซอล์ก
5. โครงเหล็กกันพลิกคว่ำ

#### วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบที่กว้างและพื้นเรียบเหมาะสำหรับการทดสอบ
2. นำซอล์กไปวาดรัศมีวงเลี้ยวบนพื้นที่ทดสอบ โดยมีรัศมีการเลี้ยว 2,3,4,5 และ 6 เมตร
3. ขับสามล้อไฟฟ้า ทำการเลี้ยวเป็นวงกลมตามเส้นรัศมีวงเลี้ยวต่างๆ เพื่อหาความเร็วสูงสุด

จนรถเกิดการพลิกคว่ำ

### 3.3.3 การทดสอบหาระยะเบรกที่ความเร็วต่างๆ

การทดสอบนี้เพื่อหาระยะเบรกที่สั้นที่สุดที่ความเร็วต่างๆเพื่อความปลอดภัยในการขับขี่

#### อุปกรณ์

1. รถสามล้อไฟฟ้าพร้อมคนขับ
2. ตลับเมตร
3. GPS
4. ซอล์ก

#### วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบเพื่อความสะดวกและเหมาะสม
2. กำหนดความเร็วที่จะเริ่มทำการเบรกที่ 10 , 15 , 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3. กำหนดเส้นที่จะเริ่มทำการเบรกโดยใช้ซอล์กขีดเส้นไว้แล้วเริ่มเบรกเมื่อสวนล้อหลังของรถถึงเส้นที่ขีดไว้ เมื่อรถเบรกจนหยุดนิ่งจะวัดระยะทางตั้งแต่เส้นที่ขีดไว้ถึงล้อหลังรถสามล้อไฟฟ้า
4. ทำการทดสอบที่ความเร็วต่างๆตามข้อที่ 2. จนครบ



### 3.3.4 การทดสอบอัตราเร่งของรถสามล้อไฟฟ้าที่น้ำหนักต่างๆ

การทดสอบจะทดสอบอัตราเร่งของรถที่ความเร็ว 0 จนถึง 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยจะมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกและจับเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็ว

#### อุปกรณ์

1. รถสามล้อไฟฟ้าพร้อมคนขับ
2. นาฬิกาจับเวลา
3. GPS

#### วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบที่มีระยะทางยาวและเรียบ
2. ทำการขับขี่รถสามล้อไฟฟ้าโดยเร่งความเร็ว จนถึง 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา
3. ทำการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกที่ 80,140,200 และ 260 กิโลกรัม และทำตามข้อที่ 2.



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลอง

1.การทดสอบการขับขี่เพื่อหาความเร็วสูงสุดและระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง โดยทดสอบที่การใช้คันเร่ง 100%,50% และ 50%แบบช่วยป็น ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการขับขี่เพื่อหาความเร็วสูงสุดและระยะทางสูงสุดในการขับขี่

% คันเร่ง	ความเร็ว	ระยะทางสูงสุด
100%	32 km/hr	9.6 km
50%	20 km/hr	12.5 km
50% แบบช่วยป็น	20 km/hr	15.6 km

2.การทดสอบความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งรัศมี 2,3,4,5 และ 6เมตร ตามลำดับ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.2 การทดสอบความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้ง

รัศมีวงเลี้ยว (m)	ความเร็วที่เลี้ยวจนรถพลิกคว่ำ (km/h)
2	6
3	8
4	10
5	12
6	13

3.การทดสอบเพื่อหาระยะเบรกที่ความเร็ว 10,15และ20km/hr ตามลำดับ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.3 การทดสอบเพื่อหาระยะเบรก

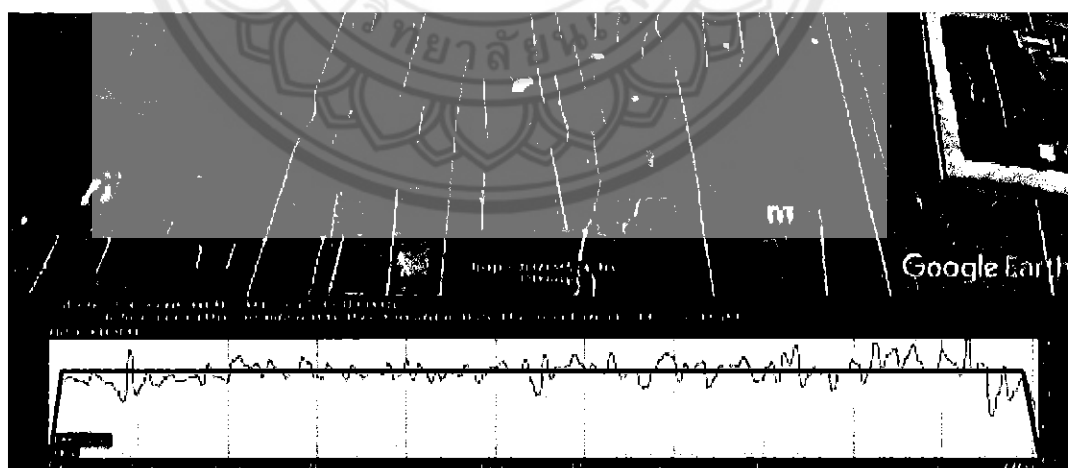
ความเร็ว (km/h)	ระยะทางจนรถหยุดนิ่ง (m)
10	2.10
15	5.40
20	9.80

4.ทดสอบสมรรถนะของรถเพื่อหาระยะทางและเวลาที่ใช้ในการทำความเร็วจาก 0-20 km/h

ตารางที่ 4.4 การทดสอบสมรรถนะของรถเพื่อหาระยะทางและเวลาที่ใช้ในการทำความเร็วจาก 0-20 km/h

ค่าที่วัด	จำนวนผู้โดยสาร			
	0	1	2	3
เวลาที่ใช้ (s)	16.81	19.32	26.46	35.18
ระยะทาง (m)	56	64	90	149

5.แผนที่และวัฏจักรการขับขี่ภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงแผนที่และวัฏจักรการขับขี่ภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย

จากการนำไปทดสอบใช้งานในบริเวณอุทยานฯ จะได้เส้นทางในการขับขี่ท่องเที่ยวภายในบริเวณอุทยานฯ ดังรูป 4.1 และวัฏจักรการขับขี่ของระยะทางเทียบกับความเร็วในการขับขี่ โดยใช้เครื่องมือ GPS ในการระบุตำแหน่งและวัดความเร็วในการขับขี่

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

### 4.2.1 วิเคราะห์ความเร็วสูงสุดของรถ

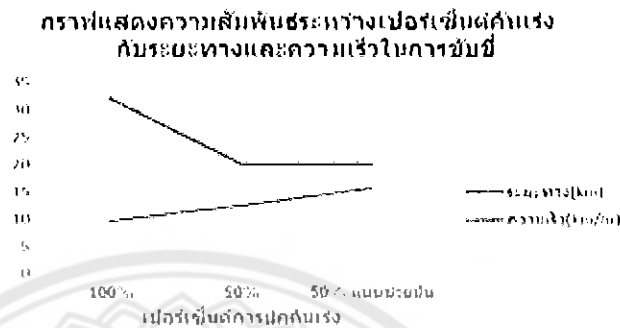
จากการทดลองเพื่อหาความเร็วสูงสุดของรถที่น้ำหนักรวมของรถเท่ากับ 450 กิโลกรัม ได้ความเร็วสูงสุดของรถ เท่ากับ 26km/hr ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้คือ 30km/hr สาเหตุเกิดจากค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณมีค่าแตกต่างจากค่าจริง เช่น พื้นที่หน้าตัดของรถมีขนาดใหญ่กว่าที่ประมาณไว้ ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ มีค่าไม่ตรงตามที่ประมาณไว้ และอีกประการหนึ่งคือมอเตอร์ที่เราเลือกใช้มีประสิทธิภาพไม่ถึง 100% จึงทำให้กำลังของมอเตอร์ที่ได้ออกมา มีค่าไม่ถึง 1000w ซึ่งมีส่วนทำให้รถทำความเร็วได้ไม่ถึง 30km/hr

### 4.2.2 น้ำหนักของรถและจุดศูนย์กลางมวลของรถเปล่าเทียบกับการประมาณ

จากการประมาณน้ำหนักและจุดศูนย์กลางมวลของรถข้างต้นในบทที่ 3 น้ำหนักของรถเท่ากับ 159.2kg และจุดศูนย์กลางมวลของรถอยู่ในตำแหน่งสูงกว่าเพลาหน้า 44.7cm และอยู่ห่างจากเพลาล้อหน้าไปทางด้านหลัง 36.12cm และเมื่อประกอบรถเสร็จสมบูรณ์ก็ได้ทำการหาน้ำหนักและจุดศูนย์กลางมวลของรถใหม่อีกครั้ง โดยน้ำหนักรถเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์ เท่ากับ 196kg และจุดศูนย์กลางมวลของรถอยู่ในตำแหน่งสูงกว่าเพลาหน้า 59.27cm และอยู่ห่างจากเพลาล้อหน้าไปทางด้านหลัง 37.74cm เห็นว่าในแนวระดับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลแตกต่างจากที่ประมาณไว้เพียง 1.62cm ซึ่งถือว่าการคลาดเคลื่อนน้อยมาก แต่ในแนวตั้งจุดศูนย์กลางมวลอยู่สูงจากตำแหน่งเดิมมาก ซึ่งอยู่สูงจากตำแหน่งเดิม 14.57cm ซึ่งสาเหตุเกิดจากการเพิ่มส่วนประกอบและเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างให้แข็งแรงกว่าเดิม น้ำหนักของรถจึงมากขึ้น และน้ำหนักในส่วนของหลังคา มีค่ามากกว่าที่ประมาณไว้ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ทำหลังคาโดยวัสดุชิ้นใหม่ที่เลือกมามีน้ำหนักมากกว่าวัสดุเดิม แต่มีความแข็งแรงและความสวยงามมากกว่าวัสดุเดิม และหากมีการเพิ่มผู้โดยสารจุดศูนย์กลางมวลมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นจากตำแหน่งเดิม และมีแนวโน้มที่จะขยับมาทางด้านหลังของตัวรถ

#### 4.2.3 วิเคราะห์การทดลองการใช้งานและสมรรถนะของรถ

1.การทดสอบการขับขี่เพื่อหาความเร็วสูงสุดและระยะทางสูงสุดในการขับขี่ต่อการประจุไฟฟ้าหนึ่งครั้ง โดยทดสอบที่การใช้คันเร่ง 100% , 50% และ 50%แบบช่วยปั่น ดังนี้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คันเร่งกับระยะทางและความเร็วในการขับขี่

-ที่ระดับเปอร์เซ็นต์คันเร่ง 100% รถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด 32km/hr ได้ระยะทางสูงสุด

9.6km

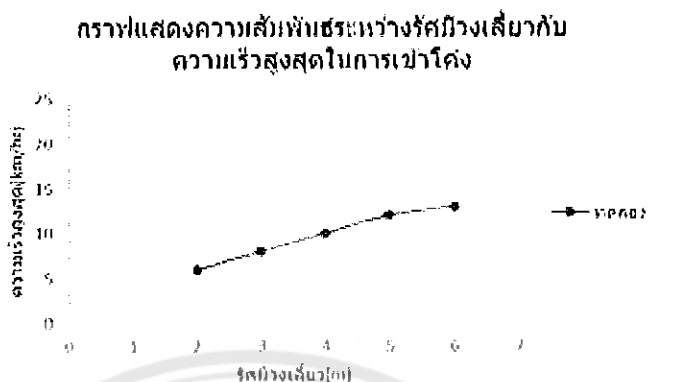
-ที่ระดับเปอร์เซ็นต์คันเร่ง 50% รถวิ่งด้วยความเร็ว 20km/hr ได้ระยะทางสูงสุด 12.5km

-ที่ระดับเปอร์เซ็นต์คันเร่ง 50% แบบช่วยปั่น รถวิ่งด้วยความเร็ว 20km/hr ได้ระยะทางสูงสุด 15.6 km

-จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ระดับเปอร์เซ็นต์การบิดคันเร่งมีผลต่อความเร็วและระยะทางในการขับขี่ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การบิดคันเร่งยิ่งมากทำให้กำลังที่จ่ายให้กับมอเตอร์มากตามไปด้วย เมื่อกำลังที่จ่ายให้มอเตอร์มีค่ามาก ความเร็วในการขับขี่ของรถก็มีแนวโน้มมากขึ้นตามไปด้วย ดังสมการ (2.15) แต่ระยะทางในการขับขี่มีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากว่ากำลังที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีค่ามาก แบตเตอรี่จึงจ่ายกระแสไฟฟ้ามากขึ้น อายุการใช้งานต่อการประจุไฟฟ้าจึงจะมีค่าน้อยลง ดังสมการ(2.27) เป็นผลให้รถสามล้อไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อยลง แต่ถ้าหากว่ามีการช่วยปั่นในขณะที่ขับขี่ ระยะทางในการขับขี่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังที่ใช้จากมอเตอร์มีค่าลดลง ทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง เป็นผลให้รถสามล้อไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่มากขึ้นตามไปด้วย

หากมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุก (load) ความเร็วและระยะทางในการขับขี่มีแนวโน้มที่จะลดลง เพราะต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น

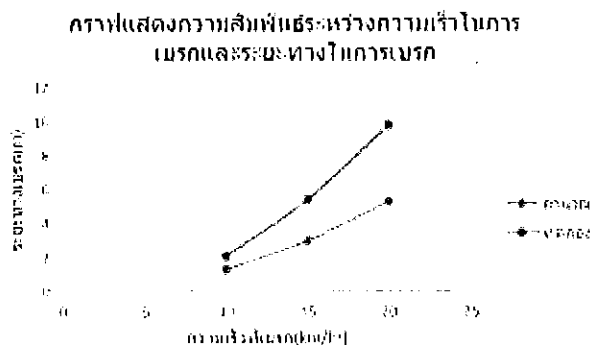
2.การทดสอบความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งรัศมี 2,3,4,5 และ 6เมตร ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีวงเลี้ยวกับความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้ง

- รัศมีวงเลี้ยว 2m ความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งจากการทดลอง เท่ากับ 6.00 km/hr
  - รัศมีวงเลี้ยว 3m ความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งจากการทดลอง เท่ากับ 8.00 km/hr
  - รัศมีวงเลี้ยว 4m ความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งจากการทดลอง เท่ากับ 10.00 km/hr
  - รัศมีวงเลี้ยว 5m ความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งจากการทดลอง เท่ากับ 12.00 km/hr
  - รัศมีวงเลี้ยว 6m ความเร็วสูงสุดในการเข้าโค้งจากการทดลอง เท่ากับ 13.00 km/hr
- จากผลการทดลองเห็นได้ว่า รัศมีโค้งมีผลต่อความเร็วในการเข้าโค้ง เนื่องจากในขณะที่รถเข้าโค้งจะมีแรงหนีศูนย์กลางกระทำกับตัวรถทำให้รถหลุดโค้งหรือพลิกคว่ำ เมื่อรัศมีวงเลี้ยวมีค่ามากขึ้น ความเร็วในการเข้าโค้งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าหากมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก (ผู้โดยสาร) ความเร็วในการเข้าโค้งมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากว่าจุดศูนย์กลางมวลของรถมีแนวโน้มที่จะอยู่สูงขึ้นจากตำแหน่งเดิม

3. การทดสอบเพื่อหาระยะเบรกที่ความเร็ว 10,15 และ 20 km/hr ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการเบรกและระยะทางในการเบรก

-ที่ความเร็ว 10 km/hr จากการคำนวณใช้ระยะเบรก เท่ากับ 1.32m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 2.10m

-ที่ความเร็ว 20 km/hr จากการคำนวณใช้ระยะเบรก เท่ากับ 2.98 m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 5.40m

-ที่ความเร็ว 30 km/hr จากการคำนวณใช้ระยะเบรก เท่ากับ 5.30m จากการทดลองใช้ระยะเบรก 9.80m

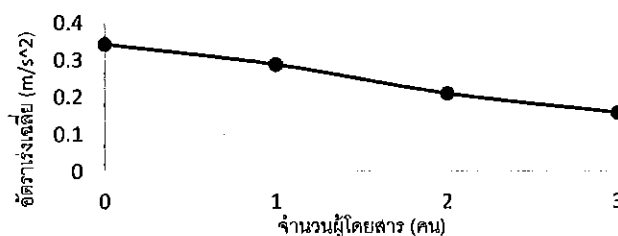
-จากผลการทดลองเห็นได้ว่า ความเร็วในขณะก่อนการเบรกมีผลต่อระยะทางในการเบรก เมื่อความเร็วในขณะก่อนการเบรกเพิ่มขึ้น ระยะเบรกก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อนำค่าการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าการคำนวณ(จากบทที่ 3) จะเห็นว่า ระยะทางในการเบรกจริงมีค่ามากกว่าจากการคำนวณ เนื่องจากว่าในขณะที่รถเบรกจุดศูนย์กลางมวลของรถจะขยับไปทางด้านหน้าของรถ ทำให้น้ำหนักที่กดลงล้อหลังมีค่าน้อยลง จึงทำให้แรงเบรกมีค่าน้อยลง และอีกประการหนึ่งคือพื้นที่ในการทดสอบนั้นเป็นพื้นคอนกรีตที่ไม่ค่อยสะอาดซึ่งอาจมีฝุ่นหรือดินอยู่บนผิวคอนกรีต จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นมีค่าน้อยลง หากมีการเพิ่มความเร็วน้ำหนักบรรทุก ระยะเบรกก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังสมการ (2.37),(2.38)

#### 4.ทดสอบสมรรถนะของรถเพื่อหาระยะทางและเวลาที่ใช้ในการทำความเร็วจาก 0-20 km/hr

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงความเร่งในการทำความเร็วจาก 0-20 km/h

ค่าที่วัด	จำนวนผู้โดยสาร			
	0	1	2	3
เวลาที่ใช้ (s)	16.81	19.32	26.46	35.18
ระยะทาง (m)	56	64	90	149
ความเร่งเฉลี่ย ( $m/s^2$ )	0.343	0.288	0.210	0.158

กราฟแสดงอัตราเร่งเฉลี่ยของรถสามล้อไฟฟ้ากับจำนวนผู้โดยสาร



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราเร่งเฉลี่ยของรถสามล้อไฟฟ้ากับจำนวนผู้โดยสาร

จากผลการทดลองเห็นได้ว่า จำนวนของผู้โดยสารมีผลต่ออัตราเร่งของรถ และเมื่อมีการเพิ่มจำนวนผู้โดยสาร อัตราเร่งของรถมีแนวโน้มลดลง ระยะทางและเวลาที่ใช้ก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ เมื่อมีจำนวนผู้โดยสารมาก มวลของรถก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้มีแรงต้านเนื่องจากความเร่งในการเคลื่อนที่ของรถมากขึ้นและแรงต้านการหมุนของล้อมากขึ้นอีกด้วย อัตราเร่งของรถจึงมีค่าน้อยลงทำให้การทำความเร็วจาก 0-20 km/hr ใช้ระยะทางและเวลามากขึ้น หากมีผู้โดยสารจำนวนน้อยลง จะทำให้อัตราเร่งของรถมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้การทำความเร็วจาก 0-20 km/hr ใช้ระยะทางและเวลาลดลง ซึ่งเป็นไปตามสมการ (2.2),(2.5)

#### 4.3 ชิ้นส่วนเพิ่มเติมที่ช่วยให้การขับเคลื่อนดีขึ้น

##### 1. ที่วางเท้า



รูปที่ 4.6 ที่วางเท้าสำหรับคนขับ

รถสามล้อเดิมเป็นสามล้อปั่น จึงไม่มีที่วางเท้า ผู้จัดทำจึงติดตั้งที่วางเท้าเพิ่มเติมขึ้นมาสำหรับไว้วางเท้า เพื่อให้ทำนุในการขับเคลื่อน โดยผู้ขับขี่จะไม่เหน็ดเหนื่อยในขณะขับขี่ และอีกประการหนึ่งคือช่วยควบคุมการทรงตัวของรถ กล่าวคือ เมื่อรถเข้าโค้งจะช่วยถ่ายน้ำหนักของรถให้รถเข้าโค้งได้ดีขึ้น เช่น เมื่อรถเข้าโค้งซ้าย คนขับก็จะลงน้ำหนักที่เท้าซ้ายมากกว่าเท้าขวา ทำให้จุดศูนย์กลางมวลของรถขยับไปทางด้านซ้ายทำให้สามารถเข้าโค้งได้ดีขึ้น(ทำให้ค่า  $t$  ในสมการ 2.39 เปลี่ยนแปลง) และในทางตรงก็สามารถใช้เท้าช่วยประคองให้รถวิ่งตรงได้ดีขึ้น



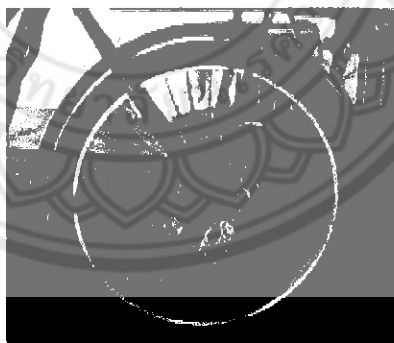
## 2. อุปกรณ์กำหนดรัศมีวงเลี้ยวสูงสุด



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์กำหนดรัศมีวงเลี้ยวสูงสุด

เนื่องจากว่ารถสามล้อเดิม ในขณะที่รถจอดหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ช้าๆแล้วเลี้ยวในรัศมีวงเลี้ยวที่แคบที่สุดขณะที่มีผู้โดยสารจะทำให้รถพลิกคว่ำได้ง่ายมาก ซึ่งสาเหตุเกิดจากว่าจุดศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนด้านหน้าอยู่ที่ตำแหน่งทางด้านหลังเพลาล้อหน้า ทำให้ขณะที่เลี้ยวจุดศูนย์กลางของส่วนด้านหน้าก็จะเคลื่อนตามไปด้วย เช่น ในขณะที่เลี้ยวซ้าย จุดศูนย์กลางมวลด้านหน้าก็จะเคลื่อนมาทางด้านขวา ส่งผลให้น้ำหนักที่กดลงล้อหน้าด้านซ้ายมีค่าน้อยมาก จึงทำให้ล้อด้านซ้ายลอยขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดการพลิกคว่ำ ผู้จัดทำจึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์กันวงเลี้ยวขึ้นมา เพื่อให้รัศมีวงเลี้ยวที่ไม่แคบเกินไป และมีโอกาสที่จะเกิดการพลิกคว่ำน้อยลง ซึ่งจากการทดสอบการใช้งาน อุปกรณ์ชิ้นนี้ช่วยในการขับขี่ขณะที่เข้าโค้งในวงเลี้ยวที่รัศมีน้อยๆได้ดีกว่ารถเดิม

## 3. ดิสเบรก

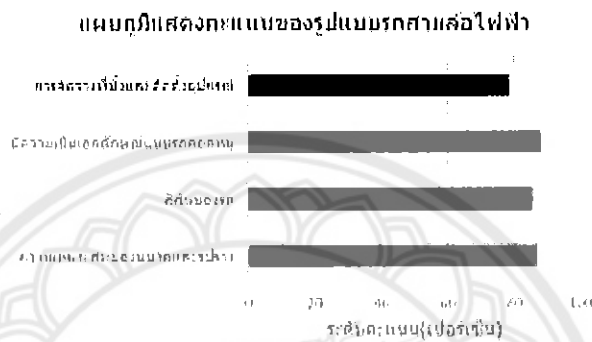


รูปที่ 4.8 ดิสเบรก

จากการทดลองการขับขี่ เบรกเดิมของรถสามล้อ(ดรัมเบรก)ไม่สามารถเบรกรถให้หยุดได้ในระยะที่ต้องการ เนื่องจากว่าตัวรถสามล้อมีน้ำหนักมาก และแรงเบรกก็ไม่เพียงพอต่อการเบรก ผู้จัดทำจึงได้เปลี่ยนมาใช้ดิสเบรก เนื่องจากว่าดิสเบรกมีแรงเบรกมากกว่าเบรกเดิม และจากการใช้งานในการขับขี่ ดิสเบรกสามารถเบรกรถให้หยุดในระยะที่สั้นกว่าที่สั้นกว่าเบรกเดิม และสามารถหยุดรถในระยะที่ปลอดภัยได้

#### 4.4 แบบสำรวจความพึงพอใจของนักท่องเที่ยวและผู้ประกอบการรถสามล้อจำนวน 14 คน

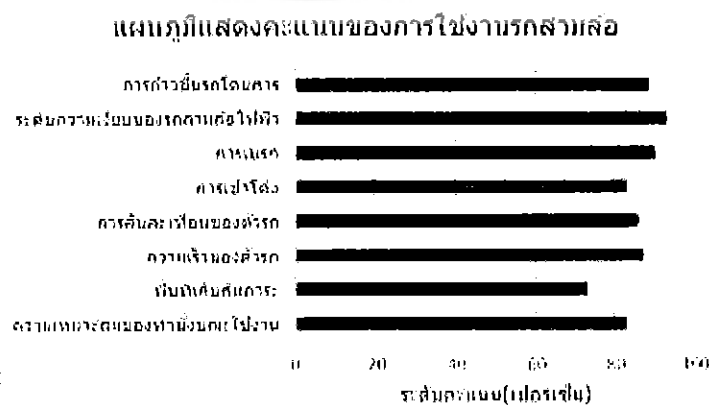
##### 1.รูปแบบรถสามล้อไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแสดงคะแนนของรูปแบบรถสามล้อไฟฟ้า

จากแบบสำรวจความพึงพอใจ ในด้านรูปแบบรถสามล้อไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าผู้ทำแบบประเมินให้คะแนนในด้านการออกแบบให้มีความเป็นเอกลักษณ์แบบรถคอกหมูมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าผู้คนให้ความสนใจในรูปลักษณ์ที่เป็นเอกลักษณ์นี้ และส่วนที่มีคะแนนน้อยที่สุดคือการจัดวางที่นั่งและติดตั้งอุปกรณ์ เนื่องมาจากมีที่นั่งเพียง 2 ที่นั่งเท่านั้นและยังขาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการนำเที่ยว เช่น ไมโครโฟน ลำโพง จอแสดงภาพ

##### 2.การใช้งานรถสามล้อ



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแสดงคะแนนของการใช้งานรถสามล้อ

จากแบบสำรวจความพึงพอใจในด้านการใช้งานรถสามล้อ จะเห็นได้ว่าผู้ทำแบบประเมินให้คะแนนในด้านระดับความเจ็บของรถสามล้อไฟฟ้ามากที่สุด เนื่องจากใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนแทนเครื่องยนต์จึงให้เสียงที่เงียบกว่า ในด้านที่มีคะแนนน้อยที่สุดคือพื้นที่เก็บสัมภาระ ที่ไม่เพียงพอ และในด้านความปลอดภัยการให้คะแนน ด้านการเบรก ยังมีคะแนนความพึงพอใจที่สูงอีกด้วย

จากแบบสำรวจความพึงพอใจในด้านรูปแบบรถสามล้อไฟฟ้า และด้านการใช้งานรถสามล้อไฟฟ้า ผู้จัดทำสามารถนำข้อคิดเห็นจากแบบสำรวจ และการจากการสอบถามจากผู้โดยสารและผู้ประกอบการ สามารถนำมาเป็นแนวทางการแก้ปัญหา ปรับปรุงและพัฒนาให้มีความเหมาะสมสำหรับเป็นรถไฟฟ้านำเที่ยวในอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย



## บทที่ 5

### สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลโครงการ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาทฤษฎีสำหรับใช้ออกแบบยานยนต์ไฟฟ้า และศึกษารูปลักษณะของรถคอกหมูที่ใช้ขนส่งผู้โดยสารเพื่อทำการออกแบบและสร้างรถสามล้อไฟฟ้าที่มีเอกลักษณ์เช่นเดียวกับรถคอกหมู ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยสร้างขึ้นเพื่อการท่องเที่ยวภายในบริเวณอุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย จังหวัดสุโขทัย ซึ่งมีการรณรงค์ห้ามรถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเข้าบริเวณอุทยานฯ และนำรถสามล้อไฟฟ้าไปทดสอบภาคสนามภายในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร ต่อจากนั้นจึงนำไปทดสอบใช้งานจริงภายในบริเวณอุทยานฯ

จากการศึกษาทฤษฎียานยนต์ไฟฟ้า เพื่อหาองค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งในรถสามล้อให้กลายเป็นรถสามล้อไฟฟ้า และทำการออกแบบตัวรถสามล้อไฟฟ้าเพื่อใช้คำนวณแรงต้านต่างๆที่มีต่อตัวรถเพื่อนำไปเลือกขนาดของมอเตอร์และได้ผลคือใช้มอเตอร์ขนาด 1 kW จากนั้นจึงทำการสร้างรถสามล้อไฟฟ้าแล้วจึงนำไปทดสอบภาคสนามภายในมหาวิทยาลัยนเรศวร จากการสังเกตพบว่า รถสามล้อไฟฟ้ามีปัญหาในเรื่องการควบคุมการทรงตัว และการหยุดรถ ผู้จัดทำจึงได้ทำการแก้ไขในเรื่องการทรงตัวของรถโดยทำการติดตั้งที่วางเท้าและอุปกรณ์กำหนดวงเลี้ยวสูงสุดเพื่อแก้ปัญหาการเลี้ยวและการทรงตัว เมื่อนำไปทดสอบและเก็บข้อมูลอีกครั้ง พบว่าสามารถควบคุมรถได้ดีขึ้น และแก้ไขปัญหาการหยุดรถไม่อยู่โดยตัดแปลงใส่ดิสก์เบรกที่ล้อหลังแทนการใส่ดรัมเบรก พบว่าสามารถหยุดรถได้ในระยะที่สั้นและปลอดภัย

เมื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาจึงนำไปทดสอบและเก็บข้อมูล ที่อุทยานประวัติศาสตร์สุโขทัย ผลที่ได้คือสามารถขับขึ้นในบริเวณภายในอุทยานฯ ได้ระยะทาง 10 กิโลเมตรซึ่งเท่ากับสามารถขับขึ้นได้ 2-3 รอบภายในอุทยานฯ ที่ความเร็วเฉลี่ย 15 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และสามารถเข้าโค้งและเบรกได้อย่างปลอดภัยยิ่งขึ้น นักท่องเที่ยวและผู้ประกอบการให้ความสนใจและพึงพอใจในรถสามล้อไฟฟ้าจากการทดลองนั่งและขับ การนำเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับรถสามล้อเดิม และเป็นการส่งเสริมการท่องเที่ยวแบบคาร์บอนต่ำตามนโยบายของอุทยานฯ อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ยังต้องมีส่วนที่พัฒนาเพิ่มเติม เช่น การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์บริเวณหลังคา เพื่อนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ภายในรถ การติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวกแก่การท่องเที่ยว เช่น GPS ที่วิหุ่่ง พัดลม และการเพิ่มขนาดแบตเตอรี่ให้มีความจุมากขึ้น เพื่อให้รถสามารถวิ่งได้ระยะทางที่ไกลขึ้น


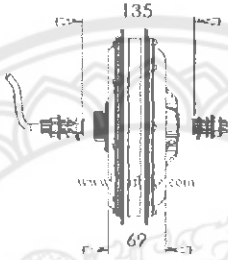
### บรรณานุกรม

1. ผศ.ดร. อนันต์ชัย อยู่แก้ว และ ดร. ภาณุ พุทธวงศ์. รถยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงจากรถกระบะเก่า
2. กิตติคุณ สุอรุณ, วีชระ เชื้อวงษ์ดี และ โอปาร วงศาโรจนะกุล. ชุดต้นแบบมอเตอร์ช่วยขับเพื่อติดตั้งในจักรยาน
3. ชีระยุทธ สุวรรณประณีป. หนังสือวิศวกรรมยานยนต์
4. กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์, อังคีร์ ศรีภคการ. ยานยนต์ไฟฟ้า พื้นฐานการทำงานและการออกแบบ.  
กรุงเทพ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2556
5. Joseph E. Shigley. Mechanical Engineering Design 2
6. <http://www.auto2drive.com>



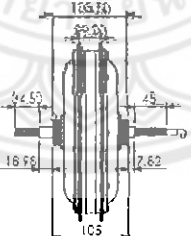
ภาคผนวก ก  
รายละเอียดข้อมูลอ้างอิงต่างๆ

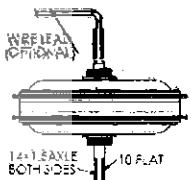
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลมอเตอร์[www.servovision.com]

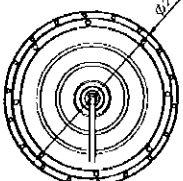
		Detail:
		Motortype: brushless gearless dc motor Voltage: 48V Power: 1000W Efficiency: ≥ 82 RPM: 451 Mechanical brake: Disk Cable location: :shaft end , RIGHT Cable length: 110cm / 43" Noise: < 60 db Surface: Black painted Net weight: 6.76 kg Gross weight: 7.36 kg (after packing )


รูปที่ ก.1 แบบมอเตอร์[www.servovision.com]

SPEC	Motor Type	48V, 1000W, 48rpm
	Motor Efficiency	≥ 82%
	Construction Only	1000W Real Wheel
	Construction Only	10A, 6.76kg
Motor Leads	Standard 110cm (Optional)	





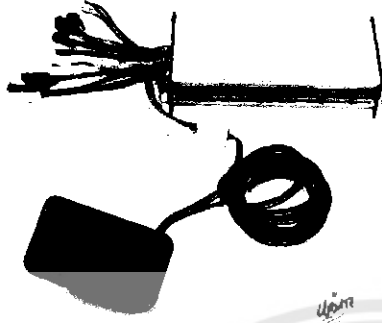





NOTE:  
1. ALL DIMENSIONS NOT SHOWN ARE THAT THE MANUFACTURER'S DISCRETION.  
2. ANY CHANGES MADE IN MATERIAL OR DIMENSIONS MUST BE APPROVED BY GOLDEN MOTOR.

REV:	BY: TOM	DATE: 30/09/08
GOLDEN MOTOR		
CHANGENON, KANGKAM P.O., CHANNA, 81000		
TYPE: (ROW) WHEEL	POWER: 1000W	VOLTAGE: 48V
TYPE OF II ELECTRIC BICYCLE		
48V/1000W REAL WHEEL MOTOR		
DATE:	TITLE:	

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลชุดควบคุม[www.servovision.com]

	Detail:
	Suitable for Electric for electric bike & scooter
	Rate Voltage : 48 Volts
	Rate Power : 1000 W
	min Voltage : DC 40 ± 0.5 V
	Casing material : aluminium
	Maximum Current : 26 ± 1 Amps
	Thermal : aluminum shell and the substrate
	3 phase 120° brushless motor
	Operating Conditions : -20~45 °C
	Waterproof design
Size : 171 mm L × 82 mm W × 42 mm H(48V)	
Weight : 0.66KGS(48V)	

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลชุดคันเร่ง[www.servovision.com]

	Detail:
	Hall voltage : 0 ~ 5 V
	Cable length : 1800 mm / 70"
	Red Switch: can control forward / backward, cruise, front & rear lights.
	Three LED : 48 V DC( Green, yellow and red leds)
	Materia l: ABS + PVC
	Color : black
	Used for : electric bike, scooter, tricycle.
	Package Content : 48 V twist throttle
	Net Weight : 0.3 kg / 0.66 lbs
	Package Size : 20.5cm L × 15.5cm W × 6.5cm H

ตารางที่ ก.3 ตารางค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

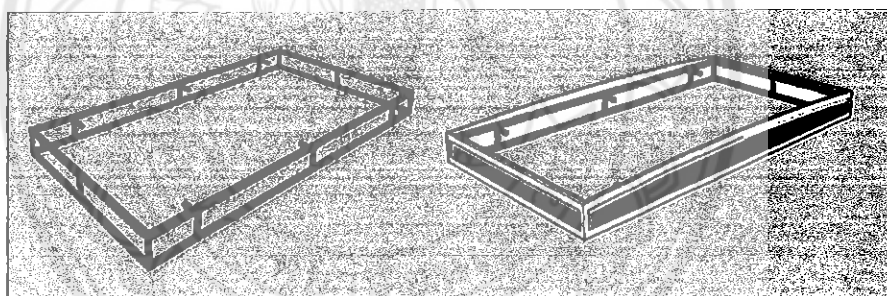
[<http://www.vcharkarn.com/lesson/1120>]

ผิวสัมผัส	$\mu_s$	$\mu_k$
ไม้กับไม้	0.70	0.40
เหล็กกล้ากับเหล็กกล้า	0.74	0.57
อะลูมิเนียมกับเหล็กกล้า	0.61	0.47
ทองแดงกับเหล็กกล้า	0.53	0.36
ทองเหลืองกับเหล็กกล้า	0.51	0.44
แก้วกับแก้ว	0.94	0.40
ทองแดงกับแก้ว	0.68	0.53
ยางกับคอนกรีตแห้ง	1.00	0.80
ยางกับคอนกรีตเปียก	0.30	0.25

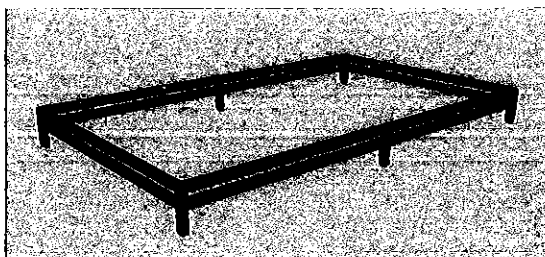
รูปที่ ก.2 แบบสามล้อไฟฟ้าส่วนที่นั่ง



รูปที่ ก.3 แบบสามล้อไฟฟ้าส่วนหลังคา

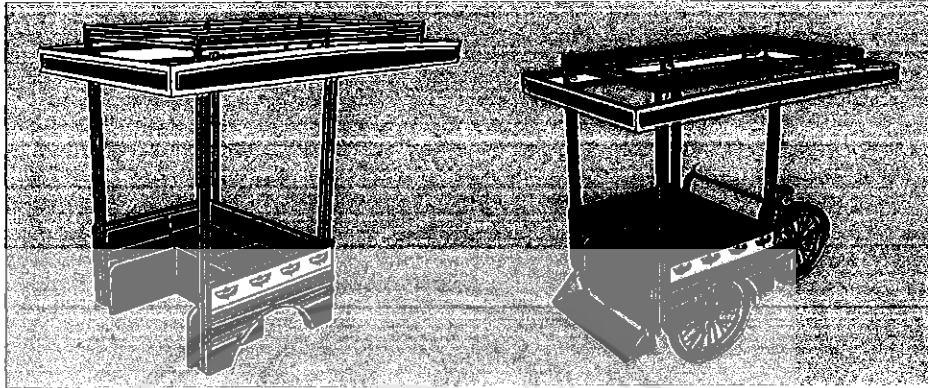


รูปที่ ก.4 แบบสามล้อไฟฟ้าส่วนคอกบนหลังคา





รูปที่ ก.5 แบบประกอบสามล้อไฟฟ้า



## ประวัติผู้ดำเนินงาน



ชื่อ นายธนวัฒน์ สุวานานนท์

ภูมิลำเนา 83 ม.2 ต.บ้านกร่าง อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางมูลนากภูมิวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [thanawatsuwa@gmail.com](mailto:thanawatsuwa@gmail.com)



ชื่อ นายสันติ ตาลเพชร

ภูมิลำเนา 9/4 ถนน มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [santite.9@gmail.com](mailto:santite.9@gmail.com)



ชื่อ นายสิทธิเดช ประโยชน์ดี

ภูมิลำเนา 11 ม.1 ต.ลำประดา อ.บางมูลนาก จ.พิจิตร

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบางมูลนากภูมิวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail: [prayotdee0.aon@gmail.com](mailto:prayotdee0.aon@gmail.com)