



การศึกษาและพัฒนาแบตเตอรี่และระบบปิดการทำงาน  
ของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา

DEVELOPMENT OF BATTERY AND SHUTDOWN SYSTEM  
FOR STUDENT FORMULA ELECTRIC

ดานุรุจ พูลสวัสดิ์

DANURUJ POOLSAWAT

สิวะ ลิมปนะวงศานนท์

SIWA LIMPANAWONGSANON

กาญจนพัฒน์ เสาแสง

KANJANAPAT SAOSANG

ธีรวัฒน์ ชลวานิช

THEERAWAT CHONWANICH

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและพัฒนาแบตเตอรี่และระบบปิดการทำงาน  
ของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา

DEVELOPMENT OF BATTERY AND SHUTDOWN SYSTEM  
FOR STUDENT FORMULA ELECTRIC



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF BATTERY AND SHUTDOWN SYSTEM  
FOR STUDENT FORMULA ELECTRIC



A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
PRINCE OF CHUMPHON

2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนาแบตเตอรี่และระบบปิดการทำงานของรถไฟฟ้า  
สูตรนักศึกษา

PROJECT TITLE DEVELOPMENT OF BATTERY AND SHUTDOWN SYSTEM FOR  
STUDENT FORMULA ELECTRIC

ชื่อนักศึกษา นายदानุรุจ พูลสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 62201052  
นายสิวะ ติมปนะวงศานนท์ รหัสประจำตัว 62201099  
นายกาญจน์พัฒน์ เสาแสง รหัสประจำตัว 63201217  
นายธีรวัฒน์ ชลวานิช รหัสประจำตัว 63201236

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล

ปริญญาานิพนธ์ รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์

ผศ.ดร.บุญยภัทร ภูมิภาค

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ศิระ	สายสร	กรรมการสอบ	ศิระ
ผศ.ดร.ดิษฐ์พร	ตุงโสธานนท์	กรรมการสอบ	ตุงโสธานนท์
ผศ.ดร.อดิเรก	สุริยะวงศ์	กรรมการสอบ	สุริยะวงศ์
รศ.ดร.ปัญญา	แดงวิไลลักษณ์	อาจารย์ที่ปรึกษา	ปัญญา
ผศ.ดร.บุญยภัทร	ภูมิภาค	อาจารย์ที่ปรึกษา	บุญยภัทร ภูมิภาค
ผศ.ดร.ปราโมทย์	กุศล	อาจารย์ที่ปรึกษา	ปราโมทย์

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 2 มิถุนายน 2566 เวลา 13.00 – 16.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้องประชุมออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว  
  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รตนเดช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อปริญญานิพนธ์</b>	การศึกษาและพัฒนาแบตเตอรี่และระบบปิดการทำงานของรถไฟฟ้า สูตรนักศึกษา	
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นายदानุรุจ พูลสวัสดิ์	<b>รหัสประจำตัว</b> 62201052
	นายสิวะ ติมปนะวงศานนท์	<b>รหัสประจำตัว</b> 62201099
	นายกาญจน์พัฒน์ เสาแสง	<b>รหัสประจำตัว</b> 63201217
	นายธีรวัฒน์ ชลวานิช	<b>รหัสประจำตัว</b> 63201236
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมเครื่องกล	
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล	
<b>ปริญญานิพนธ์</b>	รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ ผศ.ดร.ปริญญภัทร ภูมิภาค	

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาพัฒนาแบตเตอรี่ และระบบปิดการทำงานของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแตกต่างของเวลาที่ใช้แข่งขันในสนาม Acceleration Skid pad และ Autocross เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วสูงสุดของรถในการแข่งขันสนาม Acceleration เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ การศึกษาความสัมพันธ์ของระยะทางต่อ 1 การชาร์จ ในการแข่งขันสนาม Endurance รวมถึงศึกษาและพัฒนาวงจร Shutdown Circuit ให้สอดคล้องตามกฎ TSAE โดยการออกแบบและศึกษาทางทึมเลือกใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) รุ่น EMRAX 228 MV ใช้กล่องคอนโทรลเลอร์ รุ่น BAMOCAR-PG-D3-400/400 และใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePo4) ขนาดแรงดันไฟฟ้า 255.5 โวลต์ พิกัดความจุ 31 แอมป์อว โดยการทดสอบมี 3 รูปแบบ คือ การทดสอบหาเวลาที่ดีที่สุดที่ใช้แข่งขันในสนาม Acceleration Skid pad และ Autocross และหาความเร็วสูงสุดที่ใช้แข่งขันในสนาม Acceleration โดยกำหนดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ 150 200 และ 250 แอมป์ พบว่า ในสนามทางตรง (Acceleration) เมื่อจำกัดการจ่ายกระแส 250 แอมป์ ใช้เวลาดำสุดเพียง 4.79 วินาที โดยทำความเร็วสูงสุดในระยะทาง 75 เมตร อยู่ที่ 78.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ในสนามทางโค้ง (Skid pad) เมื่อจำกัดการจ่ายกระแส 250 แอมป์ ใช้เวลาดำสุดเพียง 25.5 วินาที ในสนามแบบ 1 รอบสนาม (Autocross) การจำกัดกระแสสูงสุดที่ 250 แอมป์ทำเวลาดำสุดอยู่ที่ 95 วินาที ส่วนการทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ ในการแข่งขันสนาม Endurance พบว่า เมื่อขับขีรถโดยจำกัดการจ่ายกระแสสูงสุดไม่เกิน 250 แอมป์ สามารถขับขีได้ระยะทางสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32.5 กิโลเมตร หรือ 1.45 รอบของสนาม Endurance ต่อ 1 รอบการชาร์จ และการทดสอบความ  
ถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit พบว่า รถสามารถตัดระบบได้ทันทีเมื่อรถแข่งเกิดสถานะการณ  
ฉุกเฉิน ซึ่งตรงตามเอกสาร Inspection ตามกฎกติกา TSAE

**คำสำคัญ:** รถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePo4), Shutdown Circuit



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Project Title</b>	DEVELOPMENT OF BATTERY AND SHUTDOWN SYSTEM FOR STUDENT FORMULA ELECTRIC	
<b>Student</b>	Mr. Danuruj Poolsawat	<b>Student ID</b> 62201052
	Mr. Siwa Limpanawongsanon	<b>Student ID</b> 62201099
	Mr. Kanjanapat saosang	<b>Student ID</b> 63201217
	Mr. Theerawat Chonwanich	<b>Student ID</b> 63201236
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Mechanical Engineering	
<b>Project Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Pramote Kuson Assoc. Prof. Dr. Panya Daungwilailux Asst. Prof. Dr. Punyapat Phumipak	

## ABSTRACT

This thesis studies battery development and Shutdown Circuit of student formula electric. The objective is to study the difference in time spent competing in the Acceleration Skid pad and Autocross when limit current of battery. To study the relationship of maximum speed in the Acceleration when limit current of battery. To study the relationship of distance per charge in the Endurance race including study and develop Shutdown Circuit as required according to TSAE, by design and study, the team chooses to use Synchronous motor is EMRAX 228 MV, use controller is BAMOCAR-PG-D3-400/400 and use Lithium-ion phosphate battery (LiFePo4) voltage size 255.5 V capacity 31 Ah. There are 3 forms of testing is test to find the best time to compete on the Acceleration Skid pad and Autocross and find the maximum speed of the competition on Acceleration by determine battery limit current of 150 200 and 250 amps. Results is in Acceleration when limit current to 250 amps. It takes as low as 4.79 seconds. the maximum speed distance of 75 meters at 78.6 kilometers per hour. In Skid pad, when limit current to 250 amps takes the least time, only 25.5 seconds in a round (Autocross). The maximum current limitation at 250 amps made the minimum time to be 95 seconds. Distance test per 1 charge in Endurance competition is when driving a maximum limit current of 250 amps, it can a

maximum driving distance of 32.5 kilometers or 1.45 round of Endurance per 1 charge and test the accuracy of Shutdown Circuit is the car will off system immediately when the car has an emergency situation. which corresponds to the Inspection document according to the TSAE rules.

**Keyword:** student formula electric, Lithium-ion phosphate battery (LiFePo4),  
Shutdown Circuit



## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล  
รองศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยภัทร ภูมิภาค อาจารย์  
ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษา  
คำแนะนำ แนวคิด ความรู้ต่างๆ ตลอดจนขั้นตอนและวิธีการที่เป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์  
คณะผู้จัดทำขอขอบคุณศิษย์เก่าลาดกระบังชุมพร ที่ให้คำแนะนำความรู้ ความช่วยเหลือ และเทคนิค  
ต่างๆ เกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้า และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่  
ดำเนินการทดลองและเก็บผล

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณและเป็นที่เคารพรัก ที่คอยให้การสนับสนุนทุนทรัพย์  
ตลอดการศึกษาและคอยให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็น  
อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาที่คอยช่วยเหลือแนะนำและสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมถึง  
กำลังใจซึ่งทำให้การจัดทำปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้จัดทำหวังว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะมี  
ประโยชน์ไม่มากนักน้อยต่อผู้ที่สนใจ

दानุรุจ พูลสวัสดิ์  
สิวะ ลิมนะวงศานนท์  
กาญจนพัฒน์ เสาสแสง  
ธีรวัฒน์ ชลวานิช  
มิถุนายน 2566

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 สมมติฐานของโครงการ	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
1.7 แผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.1.1 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า	6
2.1.2 ระบบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้า	8
2.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้า	11
2.1.4 วิธีการคำนวณกำลังและแรงบิดของรถไฟฟ้าของมอเตอร์ Emrax 228	20
2.1.5 ทฤษฎีอินเวอร์เตอร์	21
2.1.6 Battery in Electric Vehicles แบตเตอรี่ในรถ EV	24
2.1.7 กฎกติกาการแข่งขัน TSAE Auto Challenge	37
Student Formula 2022-2023	
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและระบบไฟฟ้า	43
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ	43
3.1.2 ระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสุตรนักศึกษา	53
3.1.3 วงจรไฟฟ้าระบบส่งกำลัง Tractive System	60
3.2 เครื่องมือเก็บผลการทดลอง	61
3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินโครงการ	64
3.4 ขั้นตอนการเก็บผลการทดลอง	65
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	
4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	72
4.1.1 วิจารณ์ผลการทดลองการจำกัดกระแสไฟฟ้า เมื่อแข่งขันในสนาม Acceleration Skid pad และ Autocross	72
4.1.2 การทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ โดยการทดสอบในสนาม Endurance	76
4.1.3 วิจารณ์ผลการทดลองจากการตรวจสอบ วงจร Shutdown Circuit ตาม เอกสาร Inspection	77
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก เอกสารการทดสอบ Inspection	88
ภาคผนวก ข รูปชิ้นส่วนของระบบส่งกำลัง กล่องแบตเตอรี่ และตารางสี	92
สายสัญญาณ X1	
ประวัติผู้จัดทำ	106

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	คะแนนการแข่งขัน Dynamic Events	1
1.2	คะแนนการแข่งขัน Static Events	1
1.3	แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา	5
2.1	คุณลักษณะของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ	8
2.2	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท	18
2.3	การเปรียบเทียบคุณลักษณะของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท	19
2.4	การเปรียบเทียบคุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้าในการติดตั้งในแต่ละแบบ	20
2.5	โครงสร้างทางเคมีและฟังก์ชันการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต	29
2.6	ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต	30
2.7	ตารางแสดงเวลาทั่วไปที่อัตรา C ต่างๆ	35
3.1	ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิด Lithium LiFePO <sub>4</sub> Pouch Cell รุ่น A123 พิกัดความจุ 31 แอมป์อว	46
3.2	อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit	53
4.1	ตารางผลการทดสอบความเร็วสูงสุดในการวิ่งในสนาม Acceleration	72
4.2	ตารางผลทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และคะแนนของการแข่งขัน ของการวิ่งในสนาม Acceleration	73
4.3	ตารางผลทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และคะแนนของการแข่งขัน ของการวิ่งในสนาม Skid pad	74
4.4	ตารางการทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และคะแนนของการแข่งขัน ของการวิ่งในสนาม Autocross	75
4.5	ตารางการทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ	76
4.6	ตารางทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit	78
ข.1	สีสายสัญญาณ X1 (Signal wire color)	105

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา	1
2.1	ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ	6
2.2	HEV/EV Powertrain main components	9
2.3	ส่วนประกอบหลักของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า	9
2.4	EV system configuration	10
2.5	การวางระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์	11
2.6	Classification of electric motor	11
2.7	DC motors	12
2.8	Construction of Induction Motor and Permanent Magnet AC Motor	13
2.9	Induction Motor	13
2.10	Permanent-Magnet Synchronous Motor	14
2.11	ด้านใน Permanent Magnet Synchronous	15
2.12	ช่อง Slot โครงสร้างของสเตเตอร์	16
2.13	Interior Permanent Magnet IPM-Rotor	16
2.14	ส่วนประกอบไดรฟ์มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร	17
2.15	อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันพร้อมแหล่งจ่ายและโหลดไฟฟ้ากระแสตรง (PMSM)	17
2.16	อินเวอร์เตอร์ สำหรับการควบคุม มอเตอร์	22
2.17	วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM : Pulse Amplitude Modulation)	23
2.18	วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM : Pulse Width Modulation)	23
2.19	แบตเตอรี่ตะกั่วกรด	25
2.20	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	25
2.21	กราฟแสดงค่าต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิด NMC	26
2.22	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	26
2.23	กราฟแสดงค่าต่างๆของแบตเตอรี่ชนิด NCA	27
2.24	Lithium Cobalt Oxide (LCO)	27
2.25	กราฟแสดงค่าต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิด LCO	28
2.26	Lithium-ion Phosphate (LFP)	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.27	กราฟแสดงค่าต่างๆของแบตเตอรี่ชนิด LiFePO4	29
2.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในการชาร์จ	31
2.29	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จกับปริมาณแบตเตอรี่และกำลังการชาร์จ	32
2.30	กราฟแสดงการสมดุลแรงดันแต่ละเซลล์ให้แตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์	32
2.31	ตัวอย่าง Battery Management System: BMS	33
2.32	กราฟแสดงจำนวนรอบการชาร์จของแบตเตอรี่ LiFePo4 และ LiCoO2	34
2.33	กราฟแสดงเวลาคายประจุของแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่โหลดต่างๆ แสดงเป็นอัตรา C	36
2.34	SHUTDOWN SYSTEM	37
2.35	หลักการทำงาน Insulation Monitoring Device (IMD)	38
2.36	Brake system Plausibility device (BSPD)	39
2.37	หลักการทำงาน Inertia switches	40
2.38	Discharge DC-link capacitor	40
3.1	Motor EMRAX 228	43
3.2	Encoder sensor	44
3.3	กล่องควบคุมมอเตอร์ รุ่น UnitekD3 BamocarD3-400-400	44
3.4	แบตเตอรี่ชนิด Lithium LiFePO4 Pouch Cell รุ่น A123 พิกัดความจุ 31 แอมป์อว	45
3.5	การเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แบตเตอรี่แพ็ค	47
3.6	การเชื่อมต่อแบบอนุกรมระหว่างโมดูล	47
3.7	EMUS G1 Control Unit	48
3.8	Dual Range Current Sensor	48
3.9	Centralized CAN group module	49
3.10	EMUS G1 Smartphone Connectivity Module	49
3.11	ตำแหน่งการจัดวางกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค	50
3.12	โครงสร้างกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค	50
3.13	การจำลองตัวยึดกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค เมื่อมีโหลด 20 kN มากระทำ	51
3.14	การระบายความร้อนแบตเตอรี่	52
3.15	การระบายความร้อนมอเตอร์และกล่องควบคุม	52
3.16	วงจร Shutdown Circuit	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.17	วงจร Brake System Plausibility Device (BSPD)	55
3.18	วงจร Ready to Drive Sound	55
3.19	วงจร Insulation Monitoring Device (IMD)	56
3.20	วงจร Tractive System Active Light (TSAL)	57
3.21	วงจร Discharge Circuit	58
3.22	การเชื่อมต่อของกล่อง Controller	60
3.23	สีของสายสัญญาณ X1	60
3.24	โปรแกรม N Drive ของกล่องควบคุม Unitek	61
3.25	Garmin GPS	61
3.26	นาฬิกาจับเวลา (Timer)	62
3.27	มัลติมิเตอร์	62
3.28	สนาม Acceleration	63
3.29	สนาม Skid pad	63
3.30	สนาม Autocross	63
3.31	การปรับเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม N Drive และโปรแกรม EMUS CP 2.10.0 บน Dyno Test	64
3.32	การติดตั้ง GPS เพื่อวัดความเร็ว	66
3.33	การตั้งค่าจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า	66
3.34	การทดสอบขับซีร็อกในสนาม Acceleration	67
3.35	การทดสอบขับซีร็อกในสนาม Skid pad	67
3.36	การทดสอบขับซีร็อกในสนาม Autocross	68
3.37	การชาร์จแบตเตอรี่เงินเต็ม	68
3.38	การทดสอบการขับซีร็อกในสนาม Endurance	69
3.39	ทดสอบขับซีร็อกเกลือแบตเตอรี่ 15 เปอร์เซ็นต์	69
3.40	การตรวจสอบตามเอกสาร Inspection	70
4.1	กราฟแสดงเวลาที่ได้ของการวิ่งสนามทางตรง (Acceleration) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน	73
4.2	กราฟแสดงเวลาที่ได้ของการวิ่งสนามทางโค้ง (Skid pad) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน	74
4.3	กราฟแสดงเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการทดสอบสนาม (Autocross) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.4	กราฟแสดงระยะทางเฉลี่ยต่อ 1 รอบการชาร์จ	77
4.5	ตัวอย่างการทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit ของรถตามเอกสาร Inspection	77
ก.1	เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน Ts,แบตเตอรี่,Shutdown/Safely Circuits และ APPS (Inspection Electrical)	88
ก.2	เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบภายในกล่องแบตเตอรี่,และระบบชาร์จแบตเตอรี่รถ (Inspection Electrical)	89
ก.3	เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบไฟฟ้าแรงสูงภายในรถ เช่น GLVS, Tractive System Ready to Drive Sound, Insulation Monitoring Device (IMD), Discharge (Inspection Electrical)	90
ก.4	เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบไฟฟ้าแรงสูงภายในรถ เช่น Ready to Drive ,Ready to Drive Sound, Brake System Plausibility Device (BSPD) (Inspection Electrical)	91
ข.1	กล่องคอนโทรล (Motor Controller BAMOCAR-PG-D3-400/400)	93
ข.2	ส่วนประกอบของมอเตอร์ (Motor EMRAX 228 MV)	93
ข.3	มอเตอร์ EMRAX 228 MV (Motor EMRAX 228 MV)	94
ข.4	ลิมิต์ดิสลิปส่งกำลัง (Differential)	94
ข.5	ขายึดกับลิมิต์ดิสลิปส่งกำลัง (Differential Mount)	95
ข.6	โซ่ X-RING 520 (Chain X-RING 520)	95
ข.7	สเตอร์หน้า 11 ฟัน (Front Sprocket 11 teeth)	96
ข.8	สเตอร์หลัง 42 ฟัน (Rear Sprocket CBR 250F)	96
ข.9	ตัวล็อกสเตอร์หลัง (Rock Sprocket)	97
ข.10	ตัวยึดบังโซ่ (Chain Guard Attachment)	97
ข.11	ระบบบังคับเลี้ยว (Steering System)	98
ข.12	แกนพวงมาลัย (Steering Shaft)	98
ข.13	ระบบพวงมาลัย (Steering Wheel)	99
ข.14	ระบบคั่นชก (Tie Rods)	99
ข.15	กล่องแบตเตอรี่ (Accumulator)	100
ข.16	ฐานกล่อง ( Accumulator Box )	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.17	แผ่นปิดด้านหน้าฝังบน ( Top Cover )	101
ข.18	แผ่นปิดด้านหน้าฝังบ่าง ( Front Bottom Cover )	101
ข.19	แผ่นกั้น ( Section)	102
ข.20	แผ่นกั้นด้านหน้า ( Section Front )	102
ข.21	จุดยึดกล่อง ( Bucket )	103
ข.22	จุดยึดกล่องแบบมีตัวรอง ( Bucket With Boot )	103
ข.23	แผ่นปิดด้านหน้า ( Front Cover )	104
ข.24	แผ่นปิดด้านบน ( Top Cover )	104
ข.25	กล่องปลั๊ก High Volt ( HV Plug Cover )	105



# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ และวิธีการดำเนินการศึกษาและพัฒนาปรับปรุงข้อเสียในรถปีก่อนๆ เพื่อนำรถเข้าร่วมการแข่งขัน TSAE Auto Challenge Student Formula 2022-2023

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

TSAE Auto Challenge Student Formula เป็นการแข่งขันที่ดำเนินการโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2522 โดยจัดแข่งขันรถสูตรนักศึกษาประเภทเครื่องยนต์สันดาป จากนั้นจึงขยายไปสู่รถสูตรนักศึกษาประเภทยานยนต์ไฟฟ้า การแข่งขันจะจัดขึ้นทุกปี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อท้าทายนักศึกษาในการออกแบบและสร้างรถแข่งสูตรนักศึกษา การแข่งขันนี้ทำให้นักศึกษาได้รับประสบการณ์จริงและทำงานกับปัญหาจริง [1] มีกิจกรรมสองประเภทในการแข่งขันได้แก่ การแข่งขัน Dynamic Events และการแข่งขัน Static Events โดยคะแนนการแข่งขันจะแสดงดังตารางที่ 1.1 และตารางที่ 1.2 [2]

ตารางที่ 1.1 คะแนนการแข่งขัน Dynamic Events

ประเภทการแข่งขัน	คะแนน
Endurance	275
Autocross	125
Efficiency	100
Acceleration	100
Skid-Pad	75

ตารางที่ 1.2 คะแนนการแข่งขัน Static Events

ประเภทการแข่งขัน	คะแนน
Engineering Design	150
Cost Analysis	100
Business Preparation	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยคณะวิศวกรรมศาสตร์ และชุมนุมยานยนต์ลาดกระบังชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญด้านยานยนต์ จึงส่งรถเข้าร่วมการแข่งขันภายใต้ชื่อทีมว่า Terminal มาแล้วเป็นระยะเวลา 8 ปี ในปี 2020 ทางทีมได้ส่งรถสูตรประเภทรถไฟฟ้า (Electric Vehicle) เข้าร่วมการแข่งขันและได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับที่ 1 ทั้งนี้ในปี 2023 ทางทีมได้วางแผนงานในการพัฒนา และปรับปรุง Formula Student โดยศึกษาปัญหาของรถไฟฟ้าสูตรนักเรียนก่อนหน้า ซึ่งปัญหาที่พบประกอบด้วย

- 1). น้ำหนักแบตเตอรี่และขนาดแบตเตอรี่ที่เยอะเกินไป
- 2). ไม่มีการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ชัดเจน
- 3). ไม่สามารถประเมินระยะทางสูงสุดต่อ 1 การชาร์จได้
- 4). ระบบ Shutdown Circuit มีฟังก์ชันการทำงานไม่สอดคล้องกับกติกาการแข่งขัน

ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้จัดทำจึงมีการออกแบบและพัฒนาชุดแบตเตอรี่ใหม่ โดยพิจารณาการเลือกจำนวนและขนาดของเซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสม และจัดเรียงในลักษณะที่ลดน้ำหนักและเพิ่มความปลอดภัยสูงสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถไฟฟ้าสูตรนักเรียนที่ดีขึ้น และศึกษาการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า เมื่อแข่งขันในสนามที่ต่างกัน ว่ามีผลต่อเวลาของการแข่งขันหรือไม่ การศึกษาระยะทางสูงสุดต่อ 1 การชาร์จ เพื่อประเมินว่ารถสามารถวิ่งได้ระยะทางเท่าไร สามารถแข่งขันสนาม Endurance ได้หรือไม่ รวมถึงศึกษาและพัฒนาระบบ Shutdown Circuit เพื่อเพิ่มความปลอดภัยเมื่อขับซิ่ง ทั้งนี้ในการตัดสินใจเลือกใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ จะตรวจสอบก่อนว่าผ่านกฎกติกาการแข่งขันหรือไม่ และคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ราคาต้นทุนที่ไม่ควรสูงเกินไป หาซื้อง่าย และมีคุณสมบัติที่ดี เพื่อไม่ให้มีปัญหาระหว่างที่จัดสร้างต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาความแตกต่างของเวลาที่ใช้แข่งขันในสนาม Acceleration Skid pad และ Autocross เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความเร็วสูงสุดของรถในการแข่งขันสนาม Acceleration เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

1.2.3 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของระยะทางต่อ 1 การชาร์จ ในการแข่งขันสนาม Endurance

1.2.4 ศึกษาและพัฒนาระบบ Shutdown Circuit ให้ตรงตามกฎ TSAE Auto Challenge Student Formula 2022-2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมติฐานของโครงการงาน

1.3.1 การจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 250 แอมป์ เมื่อแข่งขันในสนามต่างๆ จะทำให้ขับที่รถได้เวลาที่ดียิ่งที่สุด

1.3.2 รถสามารถขับเคลื่อนได้ระยะทาง 30 กิโลเมตร เมื่อแบตเตอรี่เต็ม และสามารถแข่งขันในสนาม Endurance ได้

1.3.3 ระบบ Shutdown Circuit สามารถทำงานได้ถูกต้อง ตามกติกาของการแข่งขัน

### 1.4 ขอบเขตของโครงการงาน

1.4.1 เลือกใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) รุ่น EMRAX 228 แรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง 470 โวลต์ ให้กำลังมอเตอร์สูงสุด 100 กิโลวัตต์ และแรงบิดของมอเตอร์สูงสุด 230 นิวตันเมตร มีน้ำหนัก 12.4 กิโลกรัม

1.4.2 เลือกใช้คอนโทรลเลอร์ BAMOCAR-PG-D3-400/400 ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และควบคุมความเร็วของซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor)

1.4.3 เลือกใช้แบตเตอรี่ ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePo4) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายทั้งหมดไม่เกิน 80 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 600 โวลต์

1.4.4 เลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง. ที่รองรับกระแสไฟฟ้า 250 แอมป์

1.4.5 การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ อ้างอิงตามกฎกติกาการแข่งขัน TSAE Auto Challenge Student Formula 2022

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

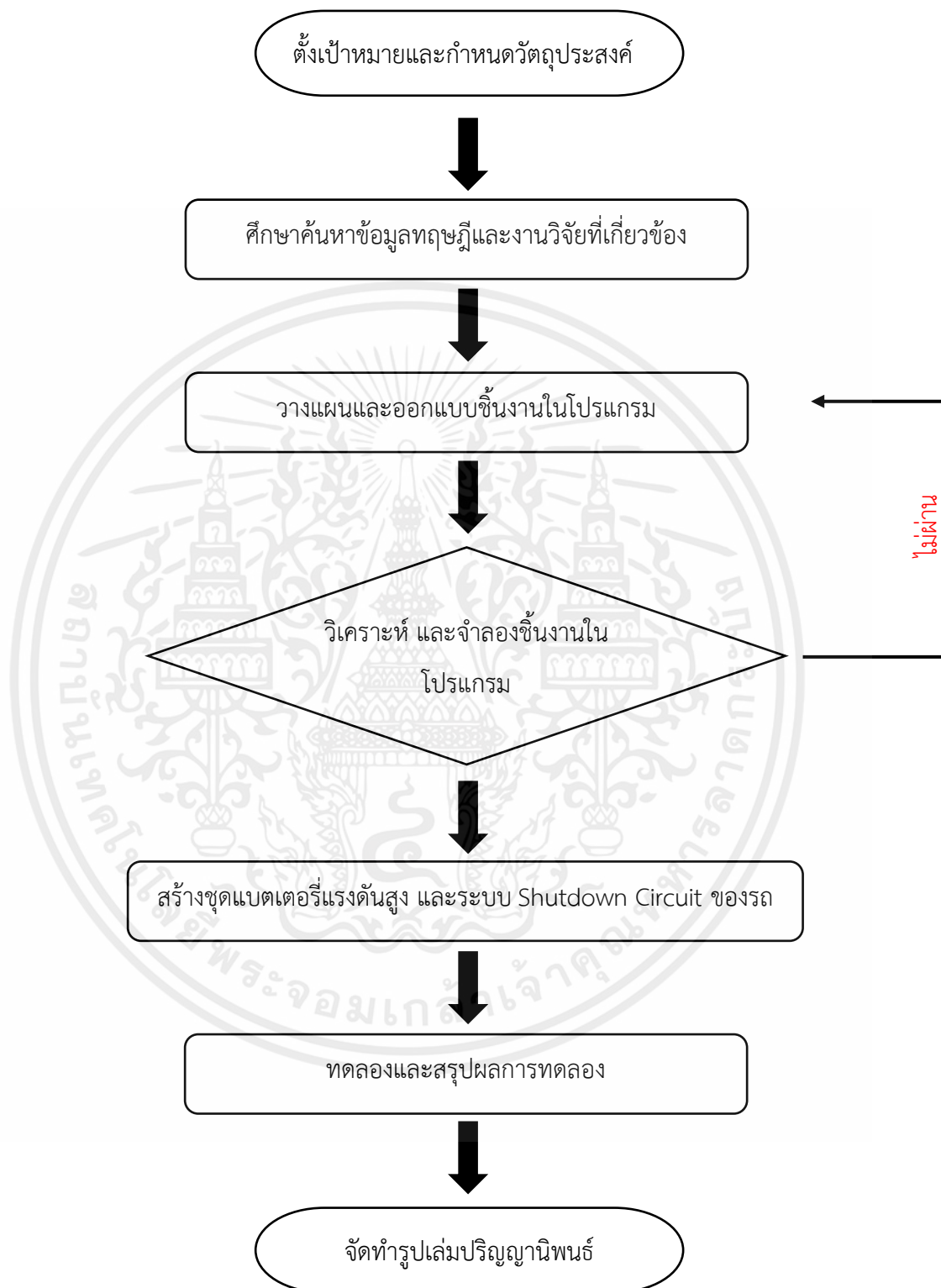
1.5.1 สามารถปรับการจำกัดกระแสไฟฟ้า เมื่อแข่งขันในสนามต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม

1.5.2 แบตเตอรี่มีกำลังงานเพียงพอ เพื่อให้รถสามารถลงแข่งขันได้ทุกสนาม

1.5.3 ระบบ Shutdown Circuit จะทำให้รถมีความปลอดภัยเมื่อขับที่ และผ่านการตรวจสอบตามกติกาของการแข่งขัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าของร  
นักศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน										
	2565					2566					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	
ศึกษาปัญหาของรถจากรุ่นก่อนหน้า	←→										
กำหนดวัตถุประสงค์และศึกษาค้นหาข้อมูลงานวิจัย	←→										
วางแผนและออกแบบชิ้นงานในโปรแกรม	←→										
วิเคราะห์และจำลองชิ้นงานในโปรแกรม	←→										
สร้างชุดแบตเตอรี่แรงดันสูงและวงจรไฟฟ้าของรถ	←→										
ทดลองและสรุปผลการทดลอง	←→										
จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์	←→										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

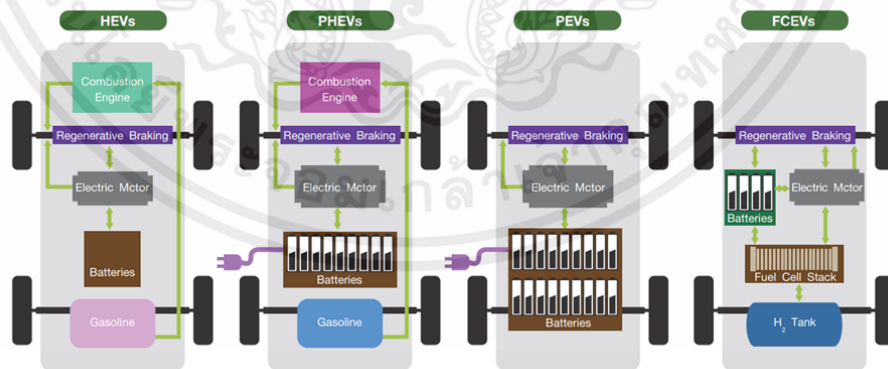
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ จะอธิบายถึงรายละเอียดส่วนประกอบของยานยนต์ไฟฟ้า ( Electric Vehicle; EV) ว่ามีลักษณะหรือมีหลักการทำงานอย่างไร เพื่อเพิ่มพูนความรู้ ความเข้าใจ ให้สมาชิกในทีม มีการอธิบายหลักทฤษฎีของมอเตอร์ อินเวอร์เตอร์ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิด และระบบไฟฟ้าต่างๆ ภายในรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและจัดสร้างรถ ให้ได้ประสิทธิภาพและสมรรถภาพของรถที่ดีตรงตามเป้าหมาย

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้า (electric vehicle; EV) หมายถึง ยานยนต์ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า ในการขับเคลื่อนโดยตรงเพียงอย่างเดียว หรือยานยนต์ที่อาศัยเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในมาใช้ร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งในส่วนของการขับเคลื่อนและผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือยานยนต์ที่ใช้เทคโนโลยีของ ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อมาเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน [3] ดังนั้นจึงสามารถได้แบ่งยานยนต์ไฟฟ้าออกเป็น 4 ประเภท แสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: ยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid electric vehicle, HEV) ประกอบด้วยเครื่องยนต์ลูกสูบเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนหลัก ซึ่งใช้เชื้อเพลิงที่บรรจุในยานยนต์และทำงานร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเพิ่มกำลังของยานยนต์ให้เคลื่อนที่ ซึ่งทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถนำพลังงานกลที่เหลือหรือไม่ใช้ประโยชน์เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเก็บในแบตเตอรี่เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าต่อไป จึงมีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ายานยนต์ปกติกำลังที่ผลิตจากเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า ทำให้อัตราเร่งของยานยนต์สูงกว่ายานยนต์ที่มีเครื่องยนต์ลูกสูบขนาดเดียวกัน

2.1.1.2 ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดปลั๊กอิน (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาต่อมาจากยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด โดยสามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้จากแหล่งพลังงานภายนอก (Plug-in) ทำให้อานยนต์สามารถใช้พลังงานพร้อมกันจาก 2 แหล่ง จึงสามารถวิ่งในระยะทางและความเร็วที่เพิ่มขึ้นด้วยพลังงานจากไฟฟ้าโดยตรง ยานยนต์ไฟฟ้าแบบ PHEV มีการออกแบบอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ แบบ Extended range EV (EREV) และแบบ Blended PHEV โดยแบบ EREV จะเน้นการทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลักก่อน แต่แบบ Blended PHEV มีการทำงานผสมผสานระหว่างเครื่องยนต์และไฟฟ้า ดังนั้น ยานยนต์ไฟฟ้าแบบ EREV สามารถวิ่งด้วยพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวนานกว่าแบบ Blended PHEV

2.1.1.3 ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery electric vehicle, BEV) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังให้ยานยนต์เคลื่อนที่ และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น ไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ ดังนั้นระยะทางการวิ่งของยานยนต์จึงขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของแบตเตอรี่ รวมทั้งน้ำหนักบรรทุก

2.1.1.4 ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell electric vehicle, FCEV) เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงจากไฮโดรเจน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าความจุพลังงานจำเพาะที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นเทคโนโลยีที่บริษัทรถยนต์เชื่อว่าเป็นคำตอบที่แท้จริงของพลังงานสะอาดในอนาคต อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตไฮโดรเจนและโครงสร้างพื้นฐาน

จากภาพรูปที่ 2.1 พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าแบบต่างๆ มีความแตกต่างกันทั้งในด้านของต้นกำลัง และคุณลักษณะของยานยนต์ไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ซึ่งความแตกต่างของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

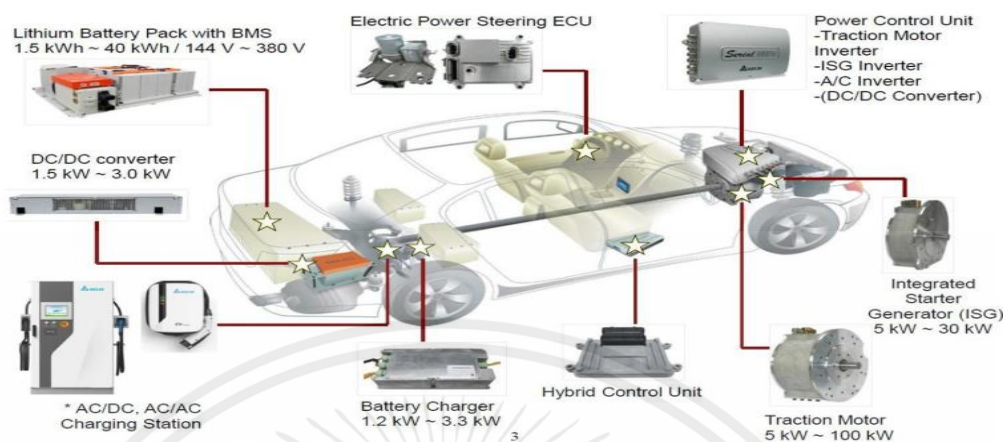
ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ [4]

รายการ/ ประเภท ยานยนต์	BEV หรือ PEV	HEV	FCEV
แหล่งพลังงาน	- แบตเตอรี่	- แบตเตอรี่/ตัวเก็บประจุ ขนาดใหญ่ - เครื่องยนต์สันดาภายใน	- เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)
ระบบขับเคลื่อน	- มอเตอร์ไฟฟ้า	- มอเตอร์ไฟฟ้า - เครื่องยนต์สันดา ภายใน	- มอเตอร์ไฟฟ้า
คุณลักษณะเด่น	- ไร้มลพิษ (Zero emission) - ระยะทางขับขี่น้อยที่สุด (Short driving range) - ราคาเริ่มต้นสูง (Higher initial costs)	- มลพิษต่ำ (Low emission) - ระยะทางขับขี่มากที่สุด (Longer range) - ระบบซับซ้อน (Complex)	- ไร้มลพิษ (Zero emission) - ราคาเริ่มต้นสูง ที่สุด (Highest initial costs) - ระยะทางขับขี่ปาน กลาง (Medium driving range)
Regenerative Braking	มี	มี	มี

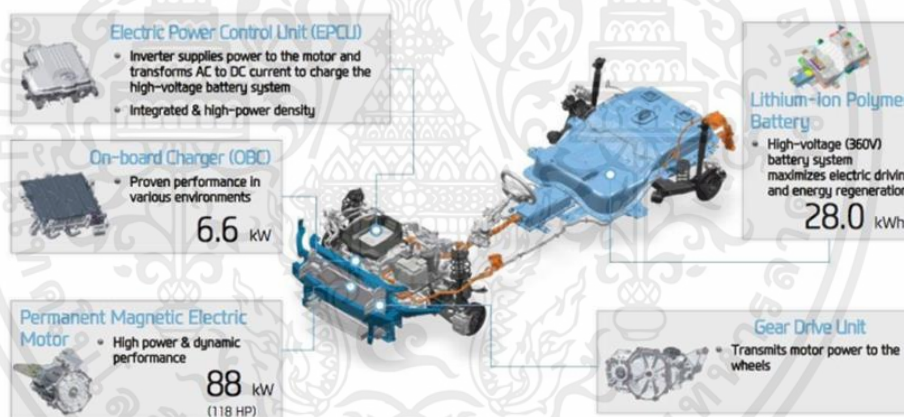
### 2.1.2 ระบบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้า

ส่วนประกอบที่สำคัญของรถยนต์ไฟฟ้าที่มีความแตกต่างจากรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในมากที่สุด [5] คือ ระบบขับเคลื่อน ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักได้แก่ มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor) พร้อมด้วยส่วนควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Traction Motor Inverter) :และระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage system) ในที่นี้หมายถึงแบตเตอรี่ (Battery) พร้อมกับหน่วยควบคุมแบตเตอรี่ (Battery management system/BMS) และอุปกรณ์ควบคุมการชาร์จประจุไฟฟ้าเพื่อเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ในกรณีที่อุปกรณ์ดังกล่าวติดตั้งไว้บนรถจะเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า On-board charger นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าหรือ DC/DC

converter ประกอบในระบบขับเคลื่อนด้วยชิ้นส่วนหลักของระบบขับเคลื่อนและระบบกักเก็บพลังงาน แสดงตามรูปที่ 2.2 และ 2.3



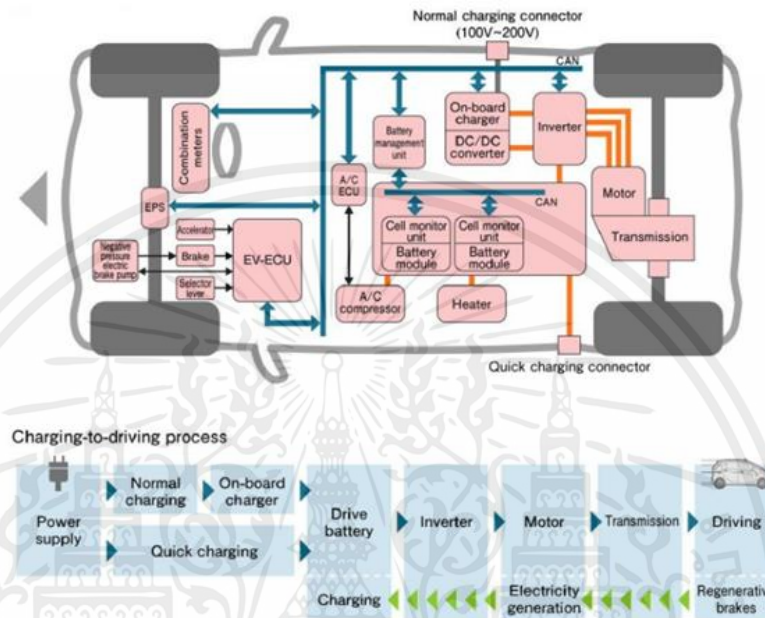
รูปที่ 2.2 HEV/EV Powertrain main components



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบหลักของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 แสดงเส้นทางการไหลเวียนพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์ไฟฟ้า พร้อมหน้าที่ของแต่ละอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง Power supply ทำหน้าที่ผ่านจ่ายประจุไฟฟ้าให้กับระบบกับเก็บพลังงาน โดยอาจจะผ่านการชาร์จแบบปกติ (Normal charging) แล้วผ่าน On-board charger ไปยัง Traction Battery หรือใช้การชาร์จแบบเร็ว (Quick charging) ตรงเข้าไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เมื่อ Motor ต้องการพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ Inverter จะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าตรงที่ได้รับจากแบตเตอรี่เป็นกระแสสลับ ในกรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าต้องการไฟฟ้ากระแสสลับ และเปลี่ยนแรงดันและความถี่กระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

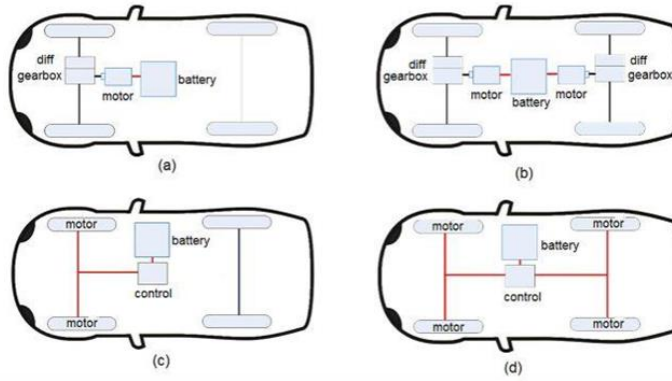
มอเตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ส่งถ่ายผ่านชุดเกียร์ (Transmission) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์ ในกรณีที่รถยนต์เบรก จะเกิดกระบวนการ Regenerative brakes ขึ้นโดยมอเตอร์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์เปลี่ยนพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้า แล้วนำไปชาร์จเก็บไว้ในแบตเตอรี่



รูปที่ 2.4 EV system configuration

การจัดวางชิ้นส่วนระบบขับเคลื่อนสามารถทำได้หลากหลายรูปแบบเช่น ตัวอย่างแสดงตามรูปที่ 2.5 รูปแบบการจัดวางชิ้นส่วนระบบขับเคลื่อนมีผลกระทบโดยตรงต่อชิ้นส่วน อุปกรณ์ และระบบอื่นๆ ของรถยนต์ไฟฟ้า รูปที่ 2.5-a) แสดงการจัดวางระบบขับเคลื่อนซึ่งประกอบไปด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 1 ตัว จะรับพลังงานจากแบตเตอรี่และสร้างแรงขับเคลื่อนผ่านชุดเกียร์ไปยังเพลาขับเคลื่อนหน้า ก่อนที่จะส่งต่อไปที่ล้อการจจัดวางในลักษณะนี้คล้ายคลึงกับการวางระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์รูปที่ 2.5-b) แสดงการจัดวางด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า 2 ตัว โดยแต่ละตัวจะส่งแรงขับไปยังเพลาที่ต่างกัน ทำให้อรถยนต์สามารถขับเคลื่อนได้ทั้ง 4 ล้อ ความแตกต่างที่เด่นชัดระหว่างระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากับระบบขับเคลื่อนอื่น คือความสามารถในการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่ดุมล้อรถ (In-Wheel Motor) โดยมอเตอร์ไฟฟ้าถ่ายทอดสร้างแรงขับเคลื่อนไปยังล้อ โดยไม่ผ่านอุปกรณ์อื่นๆ เช่น เกียร์ และเพลาขับอีกต่อไป ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.5-c) และ รูปที่ 2.5-d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

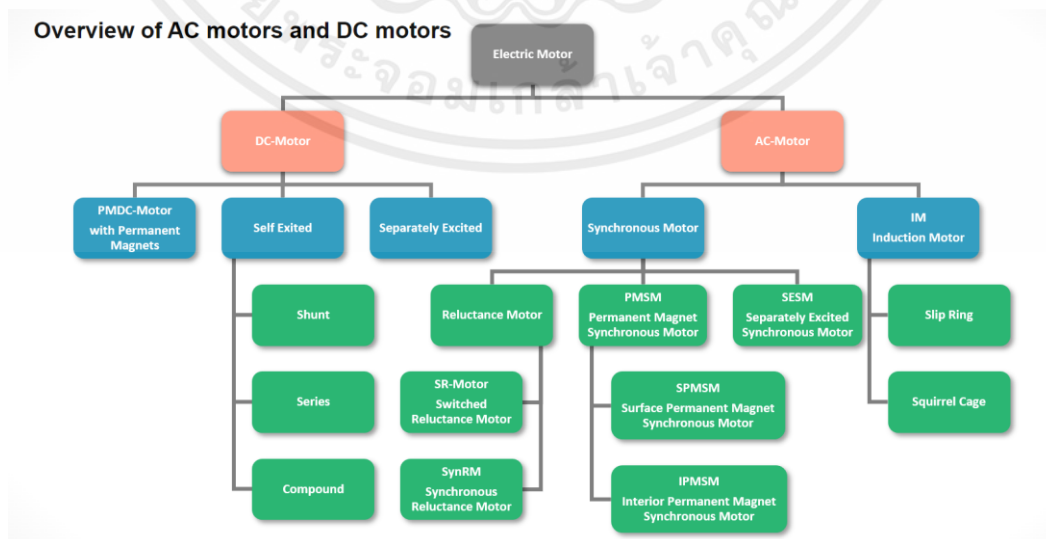


รูปที่ 2.5 การวางระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์

### 2.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลสำหรับการนำมาใช้ในระบบขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า หน้าที่หลักของมอเตอร์ขับเคลื่อนคือการสร้างแรงบิดเพื่อใช้เป็นแรงขับเคลื่อนนอกจากนั้นยังทำหน้าที่เป็นเจนเนอเรเตอร์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่รถเบรกเหตุผลสำคัญในการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ามาเป็นต้นกำหนดกำลังบนรถยนต์เนื่องจากความสามารถในการสร้างแรงบิดต่อรอบการหมุนของมอเตอร์ที่ตอบสนองความต้องการใช้พลังงานของรถยนต์ได้เป็นอย่างดี

ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้เป็นมอเตอร์ขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ตามลักษณะกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์รับมาเพื่อใช้ทำงาน ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และ มอเตอร์กระแสสลับ (AC Motor) แสดงตามรูปที่ 2.6 [1]



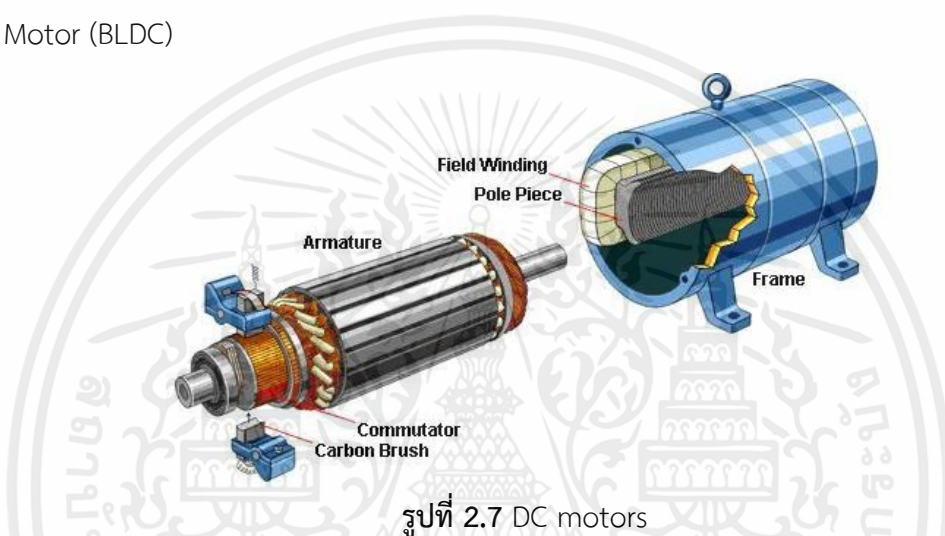
รูปที่ 2.6 Classification of electric motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่าและประสิทธิภาพที่ดีกว่า มอเตอร์ AC จึงถูกนำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าเป็นหลัก แบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้น อินเวอร์เตอร์จึงยังจำเป็นสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2.1.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

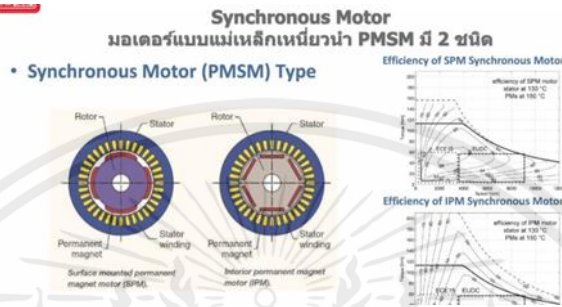
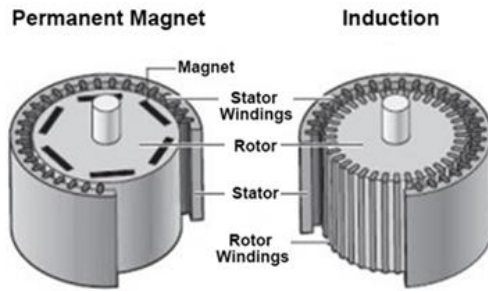
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ที่นิยมนำมาใช้เป็น Traction motor ให้กับรถยนต์ไฟฟ้าแสดงตามรูปที่ 2.7 สามารถมี 2 ประเภทได้แก่ Series wound motor และ Brushless DC Motor (BLDC)



### 2.1.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ที่ในปัจจุบันนิยมนำมาใช้เป็น Traction motor ได้แก่ Induction motor (IM) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าในประเภท Asynchronous motor ตัวอย่างเช่น Permanent magnet AC motor (PMAc) ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าในกลุ่ม Synchronous motor แสดงตามรูปที่ 2.8 ในมอเตอร์ประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor-IM) พลังงานจะถูกโอนไปยังโรเตอร์ โดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า เหมือนการกระทำของหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะคล้ายกับ หม้อแปลงที่กำลังหมุน โดยที่สเตเตอร์เป็นขดปฐมภูมิและโรเตอร์เป็นขดทุติยภูมิ มอเตอร์ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet AC Motor) ไม่ได้มีการสร้างสนามแม่เหล็ก จากขดลวดบนสเตเตอร์ แต่จะอาศัยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวรแทน ในการปฏิสัมพันธ์กับ สนามแม่เหล็กของโรเตอร์เพื่อสร้างแรงบิด

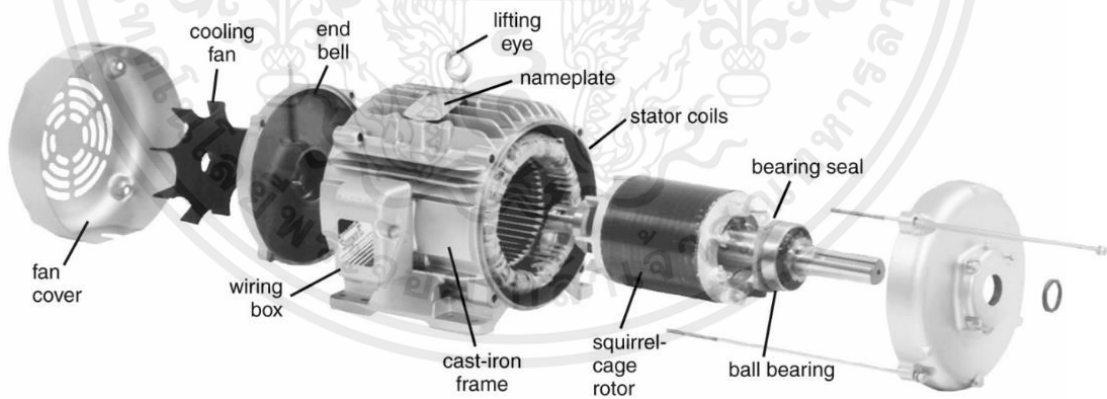
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 Construction of Induction Motor and Permanent Magnet AC Motor

2.1.3.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

1. มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ (Induction Motor; IM)

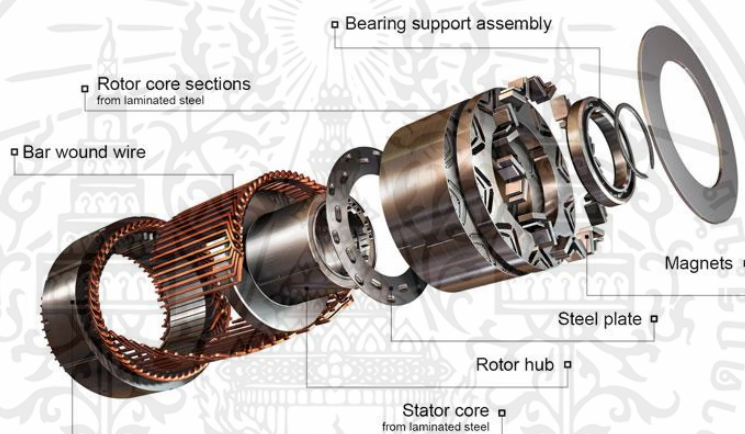


รูปที่ 2.9 Induction Motor

รูปที่ 2.9 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) โดยป้อนพลังงานไปที่ขดลวดบนสเตเตอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ จากนั้นจึงเกิดการเหนี่ยวนำไปยังโรเตอร์ ซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ มีใช้งานอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องความแข็งแรงทนทานของโครงสร้าง สามารถทำให้โรเตอร์หมุน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้โดยป้อนไฟจากแหล่งจ่ายกระแสสลับได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุม หรือจะใช้งานร่วมกับระบบควบคุม (Controller) ได้เช่นกัน ซึ่งมีการศึกษาวิธีควบคุมมอเตอร์ที่สามารถใช้ในงานอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐาน (Benchmark) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น ส่วนจุดด้อยของมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำคือ มีประสิทธิภาพต่ำ โดยเฉพาะเมื่อต้องทำงานที่ความเร็วต่ำ มีแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) มีค่าไม่สูงมาก กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในตอนเริ่มหมุนสูง มีปัญหาเรื่องการเสียหายของแฉ่งอลูมิเนียมที่ใช้ในโรเตอร์ เป็นต้น ตัวอย่างมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานยานยนต์ไฟฟ้า

## 2. มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสแบบใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Motor; PMSM)



รูปที่ 2.10 Permanent-Magnet Synchronous Motor

รูปที่ 2.10 เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้หลักการการทำงานของสนามแม่เหล็กหมุนและมีลักษณะโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ โดยป้อนกระแสไฟฟ้าสลับเข้าไปยังขดลวดของสเตเตอร์เช่นเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างกัน คือ โรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ใช้แม่เหล็กถาวรมาเป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยสร้างแรงสนามแม่เหล็ก ทำให้ความสูญเสียที่โรเตอร์ลดลง สนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ามีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น แรงบิดสูงขึ้น ซึ่งเป็นจุดเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพสูง น้ำหนักเบา ทำให้อัตราส่วนระหว่างแรงบิดต่อน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งแรงเฉื่อย (Inertia) น้อย ทำให้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการการตอบสนองอย่างทันทีทันใด (High dynamic response) สำหรับจุดด้อยของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้ คือ ต้นทุนที่ค่อนข้างแพง เนื่องจากราคาของแม่เหล็กถาวรที่สูงเนื่องจากต้องใช้แม่เหล็กที่มีคุณภาพสูง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของ

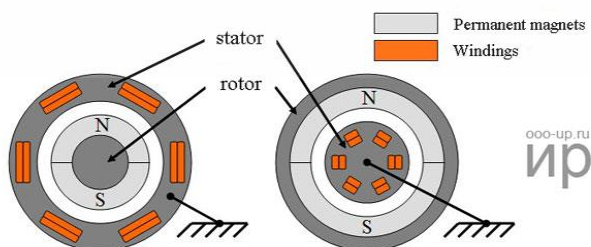
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราคาแม่เหล็กในตลาดโลกอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความเสี่ยงที่อาจจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนราคาของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยรวม อีกทั้งแม่เหล็กถาวรมีโอกาสที่จะสูญเสียคุณสมบัติของแม่เหล็ก เมื่อต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือเกิดการลัดวงจรไฟฟ้าขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าเนื่องด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ามีขนาดเล็ก, ให้แรงบิดสูง, และมีประสิทธิภาพสูง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่กระตุ้นสนามไฟฟ้าโดยใช้แม่เหล็กถาวร และมีรูปคลื่น EMF แบบไซน์กลับด้าน PMSM คือลูกผสมระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ซึ่งคุณลักษณะที่เหมือนกับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบ DC คือ โรเตอร์แม่เหล็กถาวรและการพันขดลวดบนสเตเตอร์ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของสเตเตอร์ที่มีการพันขดลวดเพื่อสร้างความหนาแน่นฟลักซ์แบบไซน์ในช่องว่างอากาศของเครื่องจักรนั้นคล้ายกับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ความหนาแน่นของพลังงานนั้นสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอัตรากระแสเท่ากัน เนื่องจากไม่มีกำลังเฉพะจากสเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

แม่เหล็กถาวรทำให้ PMSM สามารถสร้างแรงบิดจากความเร็วเป็นศูนย์ได้ ซึ่งต้องการอินเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมแบบดิจิทัลสำหรับการทำงาน PMSM มักใช้ในตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง การควบคุมมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงนั้นจะสังเกตได้จากการหมุนที่นุ่มนวลในทุกช่วงความเร็วของมอเตอร์ การควบคุมแรงบิดเต็มที่ได้จากความเร็วเป็นศูนย์ และมีอัตราเร่งและลดความเร็วได้อย่างรวดเร็ว

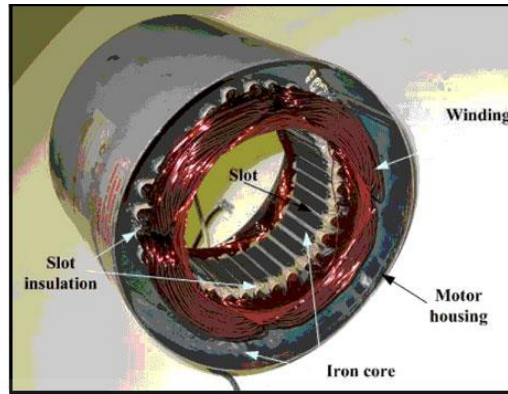
เพื่อให้สามารถควบคุม PMSM ดังที่กล่าวมาได้ จึงต้องนำเทคนิคการควบคุมเวกเตอร์มาใช้ เทคนิคการควบคุมเวกเตอร์นั้นมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการควบคุมโดยกำหนดทิศทางสนามแม่เหล็ก (Field-Oriented Control - FOC)

โดยทั่วไปโรเตอร์จะอยู่ในสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่มีโรเตอร์ภายนอก - ภายในมอเตอร์ไฟฟ้า เข้าไปตามช่อง (Slot) โครงสร้างของสเตเตอร์ของมอเตอร์ทั้งสองประเภท แสดงตามรูปที่ 2.11 และ 2.12



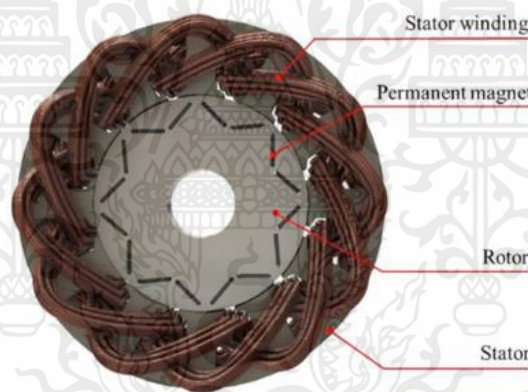
รูปที่ 2.11 ด้านใน Permanent Magnet Synchronous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ช่อง Slot โครงสร้างของสเตเตอร์

ความแตกต่างทางโครงสร้างของมอเตอร์ทั้งสองชนิดอยู่ที่โรเตอร์โดยโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร ประกอบขึ้นจาก Laminations จำนวนมากและมีการใส่แม่เหล็กถาวรเข้าไปในโรเตอร์ แสดงตามรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 Interior Permanent Magnet IPM-Rotor

ข้อเด่นของมอเตอร์ไฟฟ้าแม่เหล็กถาวร คือ สามารถสร้างแรงบิดจากความเร็วเป็นศูนย์ได้ และทำความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ได้สูง ซึ่งต้องการอินเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมแบบดิจิทัลสำหรับการทำงาน PMSM มักใช้ในตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง การควบคุมมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงนั้นจะสังเกตได้จากการหมุนที่นุ่มนวลในทุกช่วงความเร็วของมอเตอร์ การควบคุมแรงบิดเต็มที่ได้จากความเร็วเป็นศูนย์ และมีอัตราเร่งและลดความเร็วได้อย่างรวดเร็ว

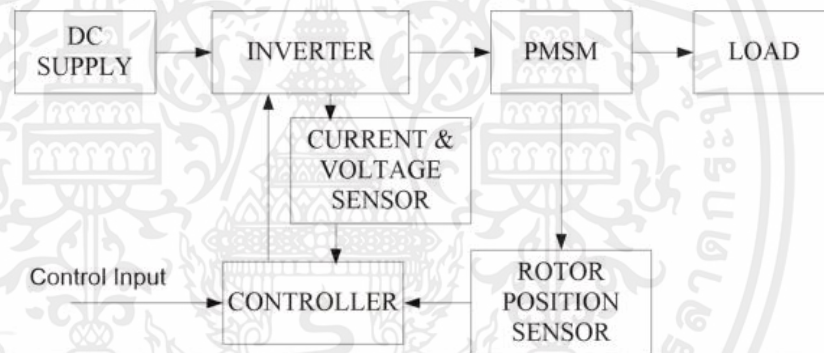
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก PMS Motor เป็นมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบสูงในกระบวนหมุน จึงก่อให้เกิดความร้อน แต่ในชุดมอเตอร์ที่ติดไปกับเครื่องเติมอากาศ จะมีการติดตั้งเครื่องระบายความร้อนของมอเตอร์ เรียกว่า พัดลมระบายความร้อน (Cooling Fan) ตัว Cooling Fan จะทำงานตลอดเวลาที่มอเตอร์ทำงาน ติดอยู่แกนเพลลาเดียวกันกับใบพัดหลัก ไม่ต้องการพลังงานจากส่วนอื่นเพิ่มเติม (External Power Supply) หรือไม่ต้องการไฟฟ้าจากแหล่งอื่น

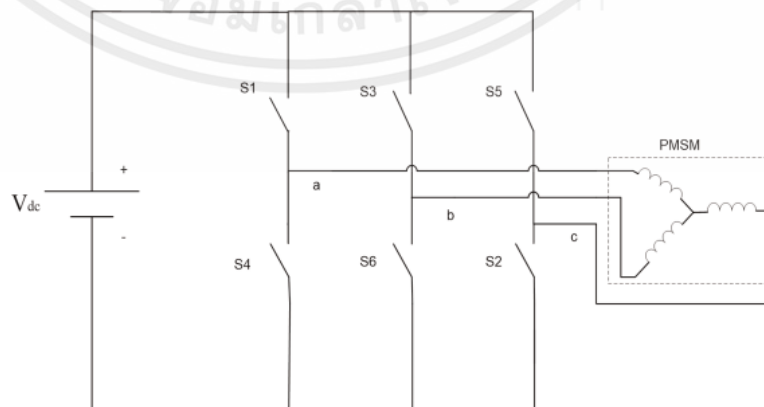
#### 2.1.3.4 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

โดยพื้นฐานแล้วมอเตอร์ได้รประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสี่ส่วน [6] เช่น PMSM อินเวอร์เตอร์ ชุดควบคุมหลัก และเซ็นเซอร์ตำแหน่ง การเชื่อมต่อระหว่างกันของส่วนประกอบแสดงในรูปที่ 2.14

อินเวอร์เตอร์ สำหรับความถี่และขนาดของตัวแปร อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดัน เป็นอุปกรณ์ที่แปลงระดับแรงดันไฟกระแสตรงที่เป็นแรงดันไฟกระแสสลับแบบแปรผัน ตามที่ระบุไว้ในฟังก์ชัน อินเวอร์เตอร์เหล่านี้มักใช้ในไดรฟ์แบบปรับความเร็วได้



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบไดรฟ์มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร



#### รูปที่ 2.15 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันพร้อมแหล่งจ่ายและโหลดไฟฟ้ากระแสตรง (PMSM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 แสดงอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันที่มีแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{dc}$  และสวิตช์หกตัว ความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามารถเปลี่ยนแปลงได้หรือคงที่ตามการใช้งาน อินเวอร์เตอร์สามเฟสประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและสวิตช์เปิด/ปิดไฟฟ้าหกตัวที่เชื่อมต่อกับ PMSM ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การเลือกสวิตช์อินเวอร์เตอร์ต้องทำอย่างระมัดระวังตามความจำเป็นของการทำงาน พิกัด และการใช้งาน มีอุปกรณ์หลายอย่างในตลาด ได้แก่ ไทริสเตอร์ ทรานซิสเตอร์สองขั้วทางแยก (BJTs) ทรานซิสเตอร์เอฟเฟกต์ฟิลด์ MOS (MOSFET) ทรานซิสเตอร์สองขั้วแบบเกทหุ้มฉนวน (IGBT) และเกทเปิดปิดไทริสเตอร์ (GTO) มีการอนุมานว่า MOSFET และ IGBT เป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อดีที่ MOS gating อนุญาตให้ได้รับพลังงานสูงและข้อได้เปรียบในการควบคุม MOSFET ถือเป็นอุปกรณ์เปิด/ปิดพลังงานสากลสำหรับการใช้งานที่ใช้พลังงานต่ำและแรงดันไฟฟ้าต่ำ ในขณะที่ IGBT ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการใช้งานมอเตอร์และการใช้งานอื่นๆ ในช่วงพลังงานต่ำและปานกลาง อุปกรณ์จ่ายไฟเมื่อใช้กับมอเตอร์ได้จำเป็นต้องมีเส้นทางกระแสของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่จัดหาโดยไดโอดคู่ขนานเมื่อปิดสวิตช์

### การเปรียบเทียบมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท

ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติและการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภทที่ได้นำเสนอไปในบทก่อนหน้านี้ ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติที่สำคัญของ Direct current motor (DC motor) Permanent Magnet motor (PMAC) และ Induction motor (IM) ในด้านต้นทุนและการบำรุงรักษา แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นมากได้ ความทนทานของมอเตอร์ การเพิ่มความเร็ว และประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมแสดงตามตารางที่ 2.2 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท

Motor			
คุณสมบัติ	DC motor	Permanent magnet motor	Induction motor
ต้นทุนและการบำรุงรักษา	ราคาปานกลาง	ราคาแพงที่สุด	ราคาถูกและบำรุงรักษาง่าย
แรงบิด	ให้แรงบิดสูงและสัมพันธ์กับกระแสไฟที่จ่าย	ขึ้นกับความสามารถในการซิงโครไนส์	สามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้งการปรับแรงดันและความถี่หรือควบคุมแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท (ต่อ)

Motor			
คุณสมบัติ	DC motor	Permanent magnet motor	Induction motor
ความทนทาน	ความทนทานต่ำ ความสึกหรอสูง	ค่อนข้างทนทาน	ความทนทานสูง
การเพิ่มความเร็วมอเตอร์	ขึ้นกับแรงดัน แบตเตอรี่	ขึ้นกับความถี่ของ กระแสไฟฟ้าสลับที่ป้อน ให้กับมอเตอร์	ขยายช่วงรอบการทำงานได้ กว้างที่สุด
ประสิทธิภาพการทำงาน	ประสิทธิภาพปาน กลาง	ประสิทธิภาพดีที่สุด	ประสิทธิภาพปานกลาง

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแต่ละประเภท

Motor control unit			
คุณสมบัติ	DC motor	Permanent magnet motor	Induction motor
ต้นทุนและการบำรุงรักษา	ราคาถูกที่สุด	ราคาแพงที่สุด	ราคาค่อนข้างสูง
วิธีการควบคุมความเร็ว	ทำได้ง่าย โดยการ ควบคุมระดับแรงดัน	ควบคุมความถี่ของ กระแสไฟฟ้าสลับ	สามารถควบคุมแรงบิดได้ทั้ง การปรับแรงดันและความถี่ หรือควบคุมแบบเวกเตอร์
การสร้างแรงบิด	ใช้กระแสไฟสูง	สร้างแรงบิดได้สูง	ต้องใช้วงจรพิเศษ
ความเร็วสูงสุด	ขึ้นกับแรงดันแบตเตอรี่	ขึ้นกับความถี่ของ กระแสไฟฟ้าสลับที่ ป้อนให้กับมอเตอร์	ขยายช่วงรอบการทำงานได้ กว้างที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้าในการติดตั้งในแต่ละแบบ

คุณสมบัติ	มอเตอร์ที่ล้อย	มอเตอร์เกิ้ลล้อย	มอเตอร์ที่เพลลา
ความยุ่งยากในการออกแบบ	มีความยุ่งยากสูงเพราะต้องออกแบบให้มอเตอร์มีแรงบิดเพียงพอสำหรับการขับเคลื่อน	สามารถใช้เฟืองเพื่อทดกำลังต่อไปยังล้อได้	ง่ายที่สุดเพราะใช้ระบบส่งกำลังเดิม
ประสิทธิภาพ	สูงที่สุดเพราะไม่มีความสูญเสียทางกล	มีความสูญเสียทางกลบ้าง	มีการสูญเสียในระบบส่งกำลัง (เพลลา เฟือง)
ความทนทาน	เป็นการเพิ่ม unsprung load ทำให้ไม่เหมาะสมไม่เรียบ	ทนทานกว่ามอเตอร์ที่ล้อย การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละล้อยทำได้ยาก	ทนทานเท่ากับระบบปัจจุบัน

### 2.1.4 วิธีการคำนวณกำลังและแรงบิดของรถยนต์ไฟฟ้าของมอเตอร์ Emrax 228 [10]

2.1.4.1 ก่อนอื่นต้องรู้ว่า RPM และแรงบิดที่ต้องการสำหรับการใช้งานของคุณ ต้องแน่ใจว่า RPM และแรงบิดที่ต้องการ (ไม่มีเกียร์) ไม่เกิน RPM และแรงบิดสูงสุดที่แสดงในตารางข้อมูลทางเทคนิคสำหรับมอเตอร์ EMRAX เฉพาะ ต้องแน่ใจด้วย เพื่อพิจารณากราฟแรงบิด/รอบต่อนาที แรงบิดยังขึ้นอยู่กับกระแสคอนโทรลเลอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องมีกระแสเฟสสูงเพียงพอเพื่อรับแรงบิดสูงเพียงพอจากมอเตอร์

2.1.4.2 ในตารางข้อมูลทางเทคนิค จะพบความเร็วโพลดเฉพาะ (RPM/1Vdc) ด้วยข้อมูลนี้ จึงสามารถคำนวณจำนวน RPM ที่จะได้รับที่แรงดันแบตเตอรี่ที่ต้องการ (Vdc) \*เป็นไปได้อาจจะได้รับ RPM ที่สูงขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็กอ่อนตัวลง (MFW) สามารถใช้สนามแม่เหล็กที่อ่อนตัวลงเมื่อแรงบิดอยู่ที่ค่าสูงสุด เมื่อสนามแม่เหล็กอ่อนตัวลง แรงบิดจะลดลงเล็กน้อย แต่ RPM จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังยังคงเท่าเดิม (ดูสมการด้านล่าง) สามารถตั้งค่าสนามแม่เหล็กอ่อนลงในซอฟต์แวร์คอนโทรลเลอร์ มอเตอร์ EMRAX มี 10 ขั้วคู่ ดังนั้นจึงแนะนำให้ลดสนามแม่เหล็กลง 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ด้วยเปอร์เซ็นต์ ที่สูงขึ้นของสนามแม่เหล็กที่อ่อนลงมอเตอร์สามารถทำงานได้เร็วขึ้นด้วยประสิทธิภาพที่ดีมาก ซึ่งลดลงเพียง 1-2 เปอร์เซ็นต์ ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ MFW จึงแนะนำ MFW ในช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น (2-3 นาทีในกรณีที่กำลังมอเตอร์เต็ม) เนื่องจากกระแสเฟสที่สูงมากระหว่างมอเตอร์และตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4.3 คำนวณพลังงานโดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$P [kW] = n [RPM] * Mt [Nm] / 9550 \quad (1)$$

ที่ RPM ที่ต่ำกว่า (การหมุนของมอเตอร์) สามารถคาดหวังกำลังของมอเตอร์ที่ลดลงด้วยแรงบิดเท่าเดิม ที่ความเร็วรอบมอเตอร์สูงขึ้น สามารถคาดหวังกำลังมอเตอร์ที่สูงขึ้นด้วยแรงบิดเท่าเดิม

โดยที่

$Mt$  คือ torque [Nm]

$P$  คือ power [kW]

$n$  คือ motor rotation [RPM]

### 2.1.4.4 ต้องคำนวณแรงบิดที่จำเป็นสำหรับยานพาหนะ (แรงบิดบนล้อ)

สูตรความเร่ง

$$a = \frac{v}{t} \quad (2)$$

แรงสำหรับการเร่ง

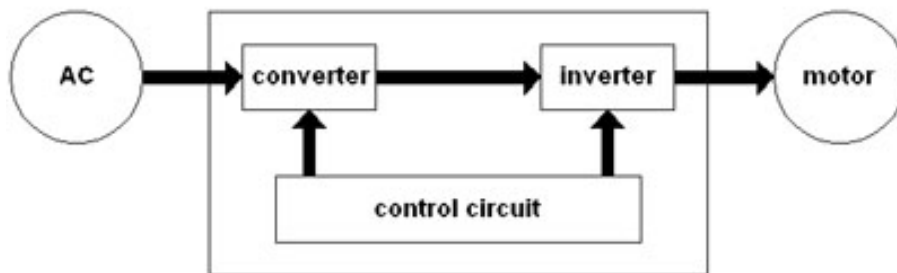
$$F = \text{น้ำหนักของรถ} * \text{ความเร่ง} \quad (3)$$

แรงบิดบนล้อ

$$Mt = 9444,5 N * \text{เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (ครึ่งหนึ่ง)} \quad (4)$$

## 2.1.5 ทฤษฎีอินเวอร์เตอร์

2.1.5.1 อินเวอร์เตอร์ คืออุปกรณ์แปลงรูปพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันและความถี่ตรงกับโหลดไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย ก่อนที่จะทำการออกแบบอินเวอร์เตอร์ [7] ในที่นี้กล่าวถึงทฤษฎีของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้เข้าใจหลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์และทฤษฎีของวงจรกรองความถี่ต่างผ่านด้านออก



รูปที่ 2.16 อินเวอร์เตอร์ สำหรับการควบคุม มอเตอร์

รูปที่ 2.16 อินเวอร์เตอร์ที่ทำการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับจะสามารถแบ่ง ออกได้เป็นสองกลุ่มคือ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) กับ อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่าย แรงดัน มักจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่าย กระแสจะเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน อาจจะ แบ่งเป็นสองประเภทที่นิยมนำไปใช้งานคือ อินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation Inverter : PWM Inverter) ส่วนอีกประเภทที่นิยมคืออินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave Inverter) ซึ่งโครงสร้างไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียคือขนาดของฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ จะมีค่าสูง

2.1.5.2 การสวิตซ์ ซึ่งด้วยการมอดูเลตกว้างพัลส์ (Sinusoidal Pulse Width Modulation : SPWM) ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สามารถปรับ ขนาดและความถี่ตามต้องการได้โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Control Signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) เพื่อเข้าใจการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ในรูปที่ 2.1 จะแสดงเพียงหนึ่งกิ่งของวงจรอินเวอร์เตอร์คือกิ่ง A หรือเฟส A ที่สมมติให้แรงดันไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าคงที่และกำหนดให้การสวิตซ์ทำงานแบบ พีดับเบิลยูเอ็ม

การเปลี่ยนขนาดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดัน สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM: Pulse Amplitude Modulation) แสดงตามรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation) โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.18

วิธีควบคุม	ความถี่ต่ำ (แรงดันต่ำ)	ความถี่สูง (แรงดันสูง)	จุดเด่น
วิธีควบคุม PULSE AMPLITUDE MODULATION			<ul style="list-style-type: none"> <li>- เสี่ยงมอเตอร์เบา</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- ควบคุมขนาดแรงดันที่คอนเวอร์เตอร์</li> <li>- ผลตอบซ้ำ</li> </ul>
วิธี PWM PULSE WIDTH MODULATION			<ul style="list-style-type: none"> <li>- ส่วนอินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมความถี่และแรงดันได้ทั้งหมด</li> <li>- ได้กินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์</li> </ul>
วิธี PWM ที่ให้แรงดันเป็นรูปซายน์			<ul style="list-style-type: none"> <li>- เดินมอเตอร์ได้เร็วที่ความเร็วต่ำ</li> <li>- อารมณ์ความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก</li> <li>- ได้กินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์</li> </ul>

รูปที่ 2.17 วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM : Pulse Amplitude Modulation)

วิธี PWM แบบ Sine Wave นั้นจะมีการเปิด-ปิดสวิตช์หลายๆครั้งในหนึ่งรอบ และการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบดังรูปที่ 2.29

รูปแบบการควบคุม	ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	จุดเด่น
แบบซิงโครนัส (SYNCHRONOUS)	ความถี่แคเรียร์ แปรตามความถี่ขาออก 	ความถี่ขาออก 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถควบคุมฮาร์โมนิกได้</li> <li>- แรงดันขาออกสูงสุดเกือบเท่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ</li> </ul>
แบบอะซิงโครนัส (ASYNCHRONOUS)	ความถี่แคเรียร์คงที่ ไม่สัมพันธ์กับความถี่ขาออก 	ความถี่แคเรียร์คงที่ 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เสี่ยงรบกวนจากมอเตอร์ จะเป็นเสียงเดียว ไม่น่ารำคาญ</li> </ul>
แบบผสม	ย่านความถี่ต่ำเป็น อะซิงโครนัส และ ย่านความถี่สูงเป็นซิงโครนัส 	เหมือนแบบ อะซิงโครนัส 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถควบคุมได้ดีทั้งย่านความถี่ต่ำตลอดจนถึงความถี่สูง</li> </ul>

รูปที่ 2.18 วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM : Pulse Width Modulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.6 Battery in Electric Vehicles แบตเตอรี่ในรถ EV

ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า นั้น แหล่งจ่ายพลังงาน (Energy Source) ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานในรถไฟฟ้า หลักๆ เช่น เก็บพลังงานได้เยอะ (High Energy Density) เพื่อที่จะได้ระยะทางเยอะ และจ่ายพลังงานได้รวดเร็ว (High Power Density) เพื่อที่จะเร่งรถได้เร็วและคุณสมบัติที่รองลงมาเช่น ชาร์จได้เร็ว (Fast Charging), มีอายุการใช้งานนาน (Long Lifetime), ราคาถูก (Low Price), มีประสิทธิภาพดี (High Efficiency) และมีการซ่อมบำรุงต่ำ (Low Maintenance) ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่เราอยากได้ ซึ่งแบตเตอรี่ (Battery) ก็เป็น Energy Source ชนิดหนึ่ง ที่สามารถตอบโจทย์ของความต้องการเหล่านี้ได้อย่างดี และถูกใช้ในวงการรถ EV มาเป็นเวลานาน แน่แน่นอนว่า ณ ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ได้พัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้นอย่างมาก

ในตัวแบตเตอรี่เองก็แบ่งได้ออกเป็นหลายชนิด และหลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบ ก็จะมีคุณสมบัติ ข้อดี และข้อเสีย ที่แตกต่างกันไป ดังนั้น ในบทนี้ จะพูดถึงรายละเอียดของชนิดของแบตเตอรี่ คุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละแบบ โดยดูจากตัวชี้วัดของแบตเตอรี่ที่ดี: Energy Density (สูงคือดี), Power Density (สูงคือดี), Voltage per Cell (สูงคือดี), Cost per Cycle (ต่ำคือดี), Discharge Rate (ต่ำคือดี), Charging Time (ต่ำคือดี), Lifetime (สูงคือดี) เป็นต้น [8]

ในการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2023 ได้มีการอนุญาตให้ใช้แบตเตอรี่ดังต่อไปนี้ [9]

### 2.1.6.1 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด Lead acid

แบตเตอรี่ตะกั่วกรดเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กันมายาวนาน เป็นแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟได้ชนิดที่เก่าแก่ที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ด้วยกัน แสดงตามรูปที่ 2.19 แบตเตอรี่ชนิดเติมน้ำกลั่นเป็นแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นของเหลว ทำให้ต้องมีการเติมน้ำกลั่น เพื่อไม่ให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็ว โดยอายุการใช้งานจะอยู่ที่ประมาณ 500-600 ครั้ง อายุการใช้งานไม่เกิน 3 ปี ระยะเวลาการชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด จะใช้เวลาอยู่ที่ประมาณ 8-10 ชั่วโมง. จะใช้เวลานานกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น เพราะต้องชาร์จโดยให้กระแสไฟต่ำไปเรื่อยๆ และไม่ควรถอดให้แบตเตอรี่หมดแล้วชาร์จ



รูปที่ 2.19 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด

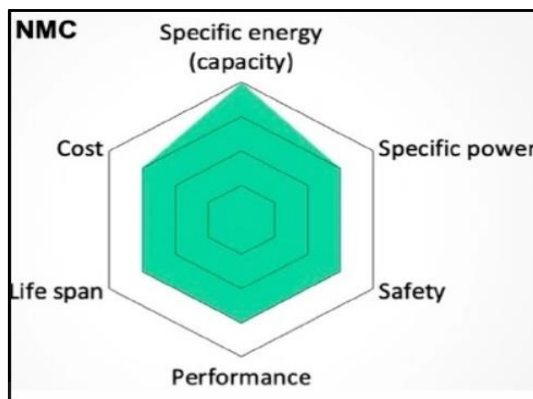
### 2.1.6.2 แบตเตอรี่ชนิด Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

แบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ หรือ NMC แสดงตามรูปที่ 2.20 ด้วยการเพิ่มนิเคิล (Ni) ซึ่งมีความจุพลังงานจำเพาะ (Specific Capacity ; Ah/kg) สูง เข้าไปในส่วนประกอบของคาร์โบรต ทำให้แบตเตอรี่ชนิด NMC มีค่าพลังงานจำเพาะสูงขึ้น ผลที่ได้คือได้เซลล์ที่มีความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าสูงถึงประมาณ 4 โวลต์ต่อเซลล์ เดิมทีเดียวแบตเตอรี่ชนิด NMC ไม่ได้มีส่วนผสมของแมงกานีส ต่อมานักวิจัยจึงได้เพิ่มแมงกานีสเข้าไปเพื่อเพิ่มความเสถียร ผลก็คือแบตเตอรี่ชนิด NMC มีทั้งความเสถียรและใช้งานได้ในงานแรงดันสูง (high voltage applications) การปรับเปลี่ยนส่วนผสมระหว่าง นิเคิล แมงกานีส และโคบอลต์ ทำให้เกิดชนิดย่อยและคุณสมบัติที่แตกต่างกันและยังคงเป็นจุดขายของผู้ผลิตแต่ละราย แสดงตามรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงค่าต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิด NMC

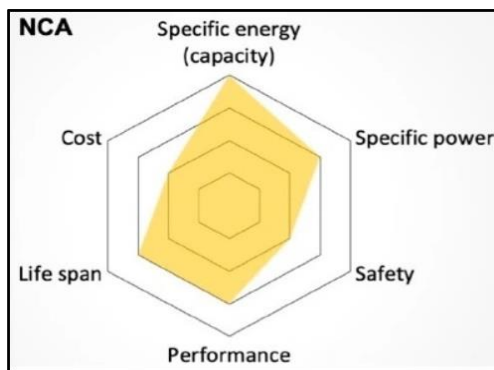
### 2.1.6.3 แบตเตอรี่ชนิด Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)

แบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ หรือ NCA แสดงตามรูปที่ 2.22 และ 2.23 มีคุณสมบัติคล้ายกับ NMC คือเก็บไฟได้มากและจ่ายไฟได้นาน แต่มีข้อเสียคือด้านความปลอดภัยยังไม่ค่อยสูงต้องมีระบบตรวจเช็คความปลอดภัยอยู่ตลอดเวลาเมื่อนำมาใช้ในรถ EV จนถึงปัจจุบันมี Tesla เพียงเจ้าเดียวที่ใช้แบตเตอรี่ NCA มีในรุ่น Model 3 และ Model S รุ่นแรก (2012)



รูปที่ 2.22 Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงค่าต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิด NCA

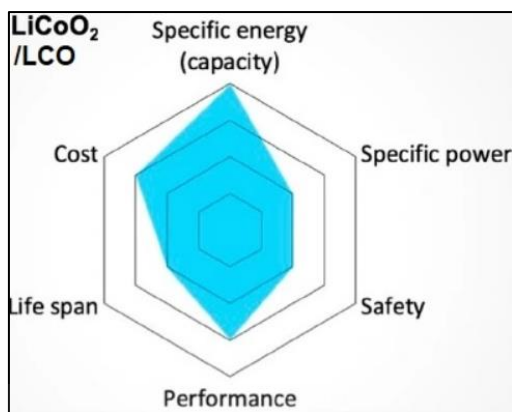
#### 2.1.6.4 แบตเตอรี่ชนิด Lithium Cobalt Oxide (LCO)

แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ หรือ LCO หรือที่บ้านเรานิยมเรียกว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แสดงตามรูปที่ 2.24 และ 2.25 (ซึ่งไม่ถูกต้องมากนัก เพราะว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นคำที่กว้าง ที่กำลังกล่าวถึงทั้งหมดล้วนเป็นลิเทียมไอออน) มีค่าพลังงานจำเพาะ (specific power) สูงแต่มีกำลังงานจำเพาะ (specific power) ต่ำ กล่าวคือสามารถจ่ายไฟได้นานแต่จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่กินไฟสูงได้ไม่ดี จึงเหมาะและมีใช้ในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรศัพท์มือถือ แหบลวด โน้ตบุ๊ก กล้องถ่ายรูป ที่ต้องการกำลังน้อยๆแต่อยู่ได้นานๆ โดยที่ แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ 1 cell มีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.7V



รูปที่ 2.24 Lithium Cobalt Oxide (LCO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 กราฟแสดงค่าต่างๆของแบตเตอรี่ชนิด LCO

#### 2.1.6.5 แบตเตอรี่ชนิด Lithium-ion Phosphate (LFP or LiFePO<sub>4</sub>)

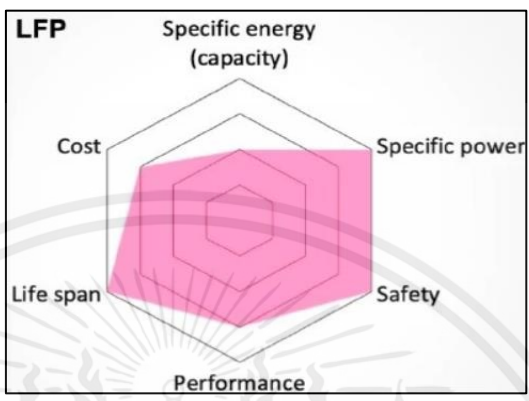
แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต หรือ LiFePO<sub>4</sub> หรือ LFP หรือเราอาจจะรู้จักกันในชื่อ LiPO หรือที่บ้านเรานิยมเรียกกันว่า แบตเตอรี่ลิโป แสดงตามรูปที่ 2.26 เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมที่มีใช้ทั่วไปและใช้ อยู่มากที่สุด ใช้ฟอสเฟตเป็นคาร์โบด ใช้กราไฟต์เป็นอาร์โนด และแบตเตอรี่ LiPO มีรอบอายุการใช้งานที่นาน ไม่ค่อยมีปัญหาด้านความร้อน มีประสิทธิภาพด้านเคมีไฟฟ้าที่ดี โดยแบตเตอรี่ LFP หรือ LiPO 1 เซลล์ มีความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.2 โวลต์ อายุการใช้งานนาน ปกติแล้ว แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตมีอายุการใช้งาน 2000 รอบหรือมากกว่า และยังปลอดภัยและทนต่อ อุณหภูมิได้สูง



รูปที่ 2.26 Lithium-ion Phosphate (LFP)

เมื่อทำการเปรียบเทียบจะพบว่าแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต LiFePO<sub>4</sub> และ แบตเตอรี่ ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ LiCoO<sub>2</sub> มีการใช้งานอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แต่แบตเตอรี่ ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ LiCoO<sub>2</sub> ราคาแพงมาก และไม่ปลอดภัย เมื่อมันมีความจุสูงขึ้น แบตเตอรี่ ลิเทียมไอออนฟอสเฟต LiFePO<sub>4</sub> เป็น ตัวเลือกที่ดีที่สุดในปัจจุบันนี้ ตลาดแบตเตอรี่ตระกูลลิเทียม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนมีความนิยม เนื่องจากมีความจุสูงและ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น คอมพิวเตอร์ แล็บท็อป เครื่องมือกล รถวีลแชร์ไฟฟ้า รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า แม้แต่รถบัสไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต  $\text{LiFePO}_4$  มีความปลอดภัยเทียบเท่า แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด แต่ความแรงเทียบเท่าแบบตะกั่วกรด ลิเทียมไอออน แสดงตามรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 กราฟแสดงค่าต่างๆ ของแบตเตอรี่ชนิด  $\text{LiFePO}_4$

แบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นที่นิยมใช้กันในยานยนต์ประเภทไฟฟ้าหรือยานยนต์ประเภท Hybrid เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแต่จะมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันออกไปและชนิดของขั้ว Anode และ Cathode ที่ต่างกัน รวมถึงการใช้งานแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีและฟังก์ชันการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต

ชนิดแบตเตอรี่	ขั้ว Cathode	ขั้ว Anode	ฟังก์ชันการใช้งาน
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	แกรไฟต์	อุปกรณ์ทางการแพทย์, ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบสำรองไฟ
Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	แกรไฟต์	อุปกรณ์ทางการแพทย์, ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า, ระบบสำรองไฟ
Lithium Cobalt Oxide (LCO)	Lithium Cobalt Oxide (LCO)	แกรไฟต์	แบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ใช้กำลังมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีและฟังก์ชันการใช้งานของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน  
ฟอสเฟต(ต่อ)

ชนิดแบตเตอรี่	ขั้ว Cathode	ขั้ว Anode	ฟังก์ชันการใช้งาน
Lithium-ion Phosphate (LiFePO4)	Lithium-ion Phosphate (LiFePO4)	แกรไฟต์	อุปกรณ์ทางการแพทย์, ระบบส่งกำลังในยานยนต์ ไฟฟ้า,ระบบสำรองไฟ

จากตารางข้างต้นจะเห็นถึงความแตกต่างของแบตเตอรี่แต่ละชนิด แต่จะมีฟังก์ชันการใช้งานที่คล้ายคลึงกัน แต่แบตเตอรี่แต่ละชนิดล้วนมีข้อดี-ข้อเสียที่ต่างกัน ดังตารางที่ 2.6

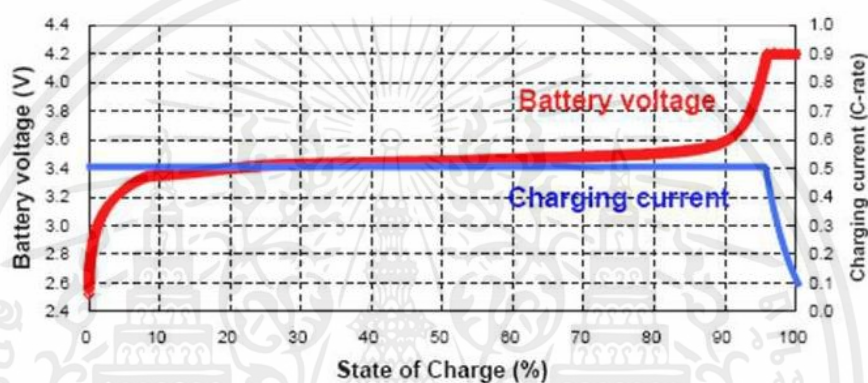
ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต

ชนิดแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีค่าพลังงานจำเพาะสูง</li> <li>● สามารถจ่ายกระแสได้มาก</li> <li>● ชาร์จเร็ว</li> <li>● มีอายุการใช้งานนาน</li> <li>● ปลอดภัย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีต้นทุนการผลิตสูง</li> </ul>
Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีค่าพลังงานจำเพาะสูง</li> <li>● สามารถจ่ายกระแสได้มาก</li> <li>● ชาร์จเร็ว</li> <li>● มีอายุการใช้งานนาน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ความปลอดภัยต่ำกว่าชนิดอื่น</li> <li>● ราคาสูง</li> </ul>
Lithium Cobalt Oxide (LCO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ คือมีค่าพลังงานจำเพาะสูง สามารถจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่กินไฟต่ำได้นาน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีอายุการใช้งานสั้น ประมาณ 500-1000 ครั้ง</li> <li>● วัสดุดิบ โคบอลต์ มีราคาค่อนข้างสูง</li> <li>● ทนความร้อนได้ต่ำจึงมีปัญหาเรื่องความปลอดภัยอยู่พอสมควร</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

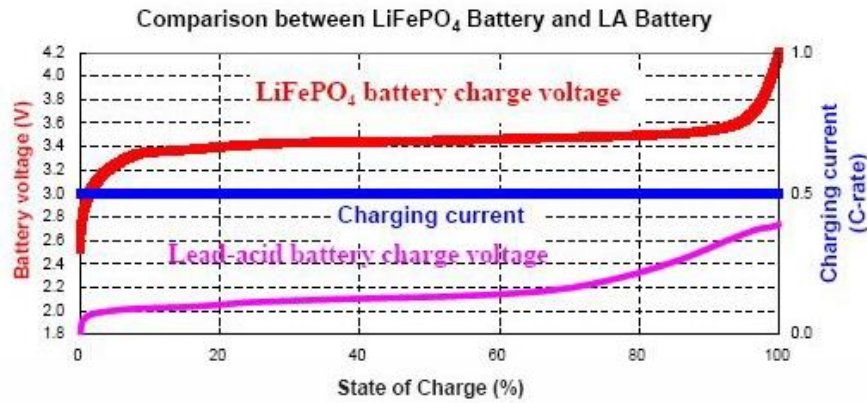
### 2.1.6.6 การชาร์จไว

ในระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO<sub>2</sub>) ต้องชาร์จสองขั้นตอนการชาร์จ แสดงตามรูปที่ 2.28 ขั้นตอนแรก เป็นการชาร์จกระแสคงที่ (Constant Current: CC) เพื่อให้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของจุดชาร์จ (Stage of Charge : SOC) ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สอง เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไปถึง 4.2 โวลต์ เป็นขีดจำกัดบนแรงดันของการชาร์จก็จะเริ่มชาร์จที่แรงดันคงที่จนกว่ากระแสจะลดลง ใช้เวลาอีกประมาณ 2 ชั่วโมง แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต LiFePO<sub>4</sub> สามารถใช้เพียงหนึ่งขั้นตอน เมื่อ Constant Current : CC ไปถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ของ SOC หรือการชาร์จทั้ง CC+CV เพื่อให้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ SOC เวลาทั้งหมดประมาณ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสในการชาร์จ

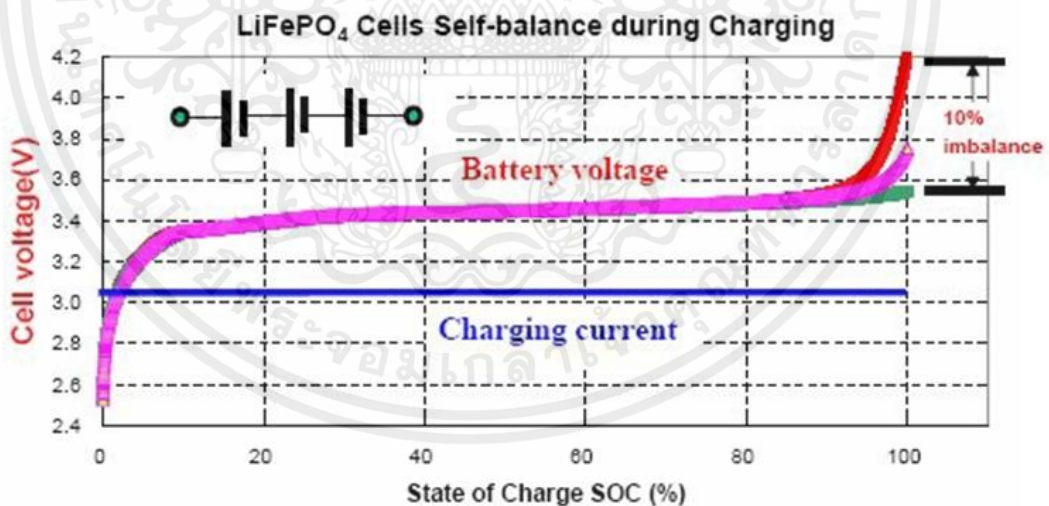
2.1.6.7 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จกับปริมาณแบตเตอรี่และกำลังการชาร์จ แสดงตามรูปที่ 2.29 มีการป้องกันการโอเวอร์ชาร์จสูง (Over Charge) และปลอดภัยกว่า แบตเตอรี่ LiCoO<sub>2</sub> มีการป้องกันการชาร์จที่แคบมาก ประมาณ 0.1 โวลต์ ที่แรงดันชาร์จ 4.2 โวลต์ และต้องพิจารณาถึงขีดจำกัดควบคุมของการชาร์จแรงดันด้วย ถ้าชาร์จเกิน 4.3 โวลต์ อาจทำให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลงได้ อาจเป็นเหตุให้เกิดไฟไหม้หรือเกิดการระเบิด แต่แบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> สามารถโอเวอร์ชาร์จได้ถึง 30 โวลต์ โดยไม่มีวงจรป้องกันเหมาะกับการใช้งานในกระแสที่สูง และความจุสูง แบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> มีความปลอดภัยและความทนต่อการโอเวอร์ชาร์จคล้ายกับการตอบสนองของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด



รูปที่ 2.29 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จกับปริมาณแบตเตอรี่และกำลังการชาร์จ

#### 2.1.6.8 สมดุลด้วยตัวเอง

เซลล์ของแบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> จะถูกต่ออนุกรมและจัดให้สมดุลระหว่างกระบวนการชาร์จ เนื่องจากมีความเผื่อต่อการโอเวอร์ชาร์จสูง จึงเป็นข้อแตกต่างจากแบตเตอรี่ตะกั่วกรด คุณลักษณะการสมดุลตัวเองสามารถยอมให้ความแตกต่างระหว่างเซลล์สำหรับทั้งแรงดันและความจุของแบตเตอรี่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ แสดงตามรูปที่ 2.30



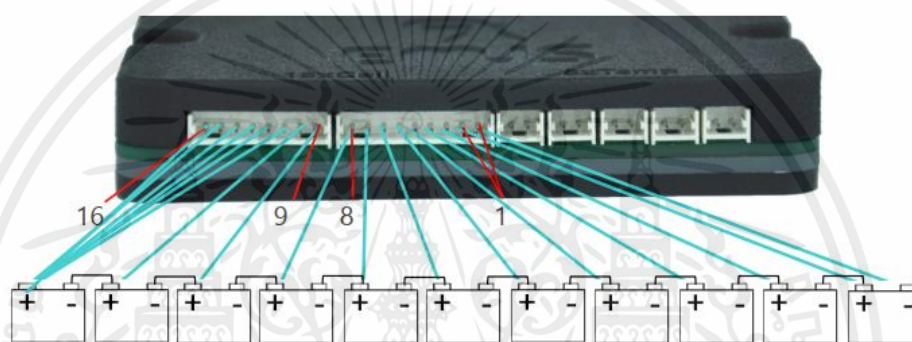
รูปที่ 2.30 กราฟแสดงการสมดุลแรงดันแต่ละเซลล์ให้แตกต่างไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.6.9 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ในการเมื่อโอเวอร์ชาร์จและชุดสมดุลของแบตเตอรี่ LiFePo4 ส่วนมากจะมีชุดป้องกันแบตเตอรี่และวงจรที่ราคาแพง เนื่องจากใช้การชาร์จเพียงหนึ่งขั้นตอน อาจใช้แหล่งจ่ายไฟแบบทั่วไปเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ LiFePo4 แทนการใช้ชาร์จเจอร์แบบ Li-ion

Battery Management System (BMS) หรือ ระบบการจัดการแบตเตอรี่ ทำหน้าที่หลักๆในการ Maintain balance cell battery เพื่ออัดไฟให้เต็มมากที่สุด และยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ โดยการวัดสถานะการชาร์จ (SOC) สถานะสุขภาพของเซลล์ (SOH) รวมถึงการตรวจสอบเซ็นเซอร์ต่างๆ (SOF) แสดงตามรูปที่ 2.31.



รูปที่ 2.31 ตัวอย่าง Battery Management System: BMS

BMS จะทำการตรวจสอบขั้นพื้นฐาน คือ การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ อุณหภูมิของเซลล์ การวัดกระแสความต้านทานต่อเซลล์ เพื่อแก้ไขปัญหาหรือการจัดการให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยฟังก์ชันการทำงานโดยทั่วไปของ BMS ดังนี้

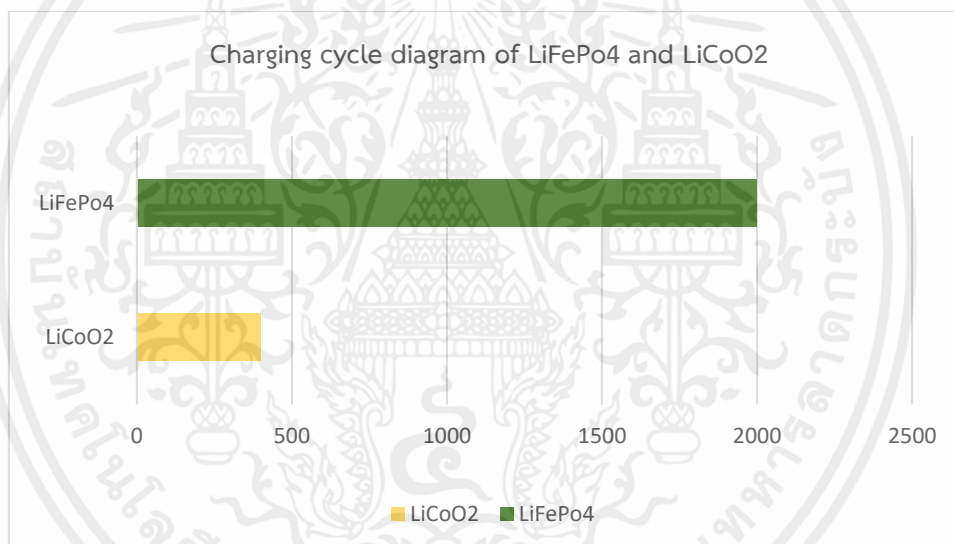
- ป้องกันการชาร์จประจุไฟเกิน (Overcharge Protection)
- ป้องกันการใช้งานต่ำกว่าจุดใช้งานของแบตเตอรี่ (Over-discharge Protection)
- ป้องกันกระแสไฟเกิน (Overcurrent Protection)
- ป้องกันแบตเตอรี่ไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนด (Overheat Protection, NTC)
- ป้องกันการลัดวงจร (Short Circuit Protection)
- ตรวจวัดอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ (Temperature sensing)
- ตรวจวัดระดับแรงดัน และบาลานซ์เซลล์ (Cell monitoring & balancing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีการสื่อสารร่วมกับอุปกรณ์ที่ต่อพ่วง (Communication interface)
- มีระบบจัดการพลังงานให้เพิ่มประสิทธิภาพให้กับแพ็คเกจเตอรี่ (Performance Optimization)
- มีระบบตรวจสอบตัวเอง (Health monitoring and Diagnostic)
- สามารถแสดงสถานะของระดับพลังงานได้ (Power Gauge)

#### 2.1.6.10 อายุการใช้งาน

เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่  $\text{LiCoO}_2$  จะมีอายุการใช้งานเพียง 400 ครั้ง ในขณะที่ แบตเตอรี่  $\text{LiFePO}_4$  ที่มีอายุการชาร์จมากถึง 2000 ครั้ง แสดงตามรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 กราฟแสดงจำนวนรอบการชาร์จของแบตเตอรี่  $\text{LiFePO}_4$  และ  $\text{LiCoO}_2$

#### 2.1.6.11 สมรรถนะในอุณหภูมิสูง

ข้อเสียของการแบตเตอรี่  $\text{LiCoO}_2$  คือประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งแบตเตอรี่  $\text{LiFePO}_4$  ทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทฤษฎีทั้งหมดเป็นข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ทางกลุ่มเลือกใช้แบตเตอรี่  $\text{LiFePO}_4$  ซึ่งมีข้อดีในด้านต่างๆ ทั้ง การชาร์จไว มีการเผื่อต่อการชาร์จที่สูง มีสมรรถนะที่ปลอดภัยกว่า มีสมดุลในตัวเอง มีระบบจัดการแบตเตอรี่ มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน และมีสมรรถนะ อุณหภูมิสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.6.12 C-rate

อัตราการชาร์จและการคายประจุของแบตเตอรี่ถูกควบคุมโดยอัตรา C โดยทั่วไปความจุของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 1C หมายความว่าแบตเตอรี่ที่ชาร์จเต็มที่มีความจุ 1 แอมป์อว ควรให้ 1 แอมป์ เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง การคายประจุแบตเตอรี่แบบเดียวกันที่ 0.5C ควรให้ 500 มิลลิแอมป์ เป็นเวลาสองชั่วโมง และที่ 2C จะให้ 2 แอมป์ เป็นเวลา 30 นาที การสูญเสียจากการคายประจุเร็วจะลดเวลาการคายประจุ และการสูญเสียเหล่านี้ยังส่งผลต่อเวลาในการชาร์จอีกด้วย อัตรา C ที่ 1C เรียกอีกอย่างว่าการปล่อยหนึ่งชั่วโมง 0.5C หรือ C/2 คือการคายประจุสองชั่วโมง และ 0.2C หรือ C/5 คือการคายประจุ 5 ชั่วโมง แบตเตอรี่ประสิทธิภาพสูงบางรุ่นสามารถชาร์จและคายประจุได้สูงกว่า 1C โดยมีความเค้นปานกลาง แสดงตามตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงเวลาทั่วไปที่อัตรา C ต่างๆ

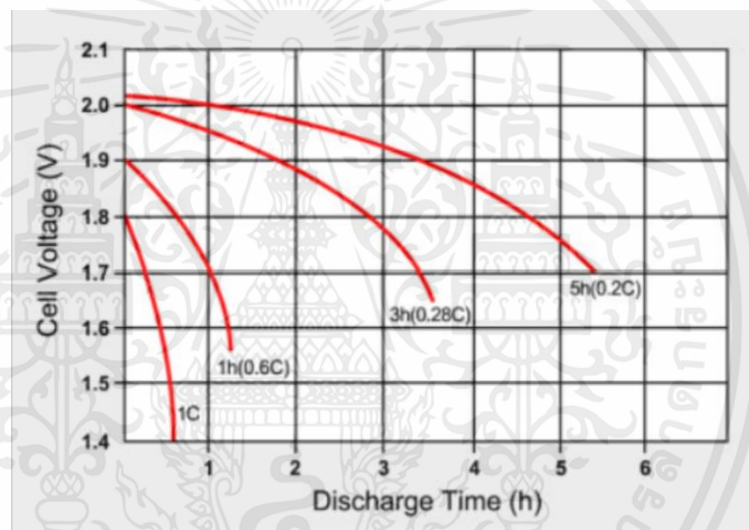
C-RATE	TIME
5C	12 min
2C	30 min
1C	1 h
0.5C or C/2	2 h
0.2C or C/5	5 h
0.1C or C/10	10 h
0.05C or C/20	20 h

สามารถวัดความจุของแบตเตอรี่หรือปริมาณพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถเก็บได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบตเตอรี่ เครื่องวิเคราะห์จะปล่อยประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสที่ปรับเทียบแล้วในขณะที่ทำการวัดเวลาจนกว่าจะถึงจุดสิ้นสุดของแรงดันการคายประจุ สำหรับกรดตะกั่ว ค่าสิ้นสุดการคายประจุโดยทั่วไปคือ 1.75 โวลต์ต่อเซลล์ สำหรับ NiCd/NiMH 1.0 โวลต์ต่อเซลล์ และสำหรับ Li-ion 3.0 โวลต์ต่อเซลล์

หากแบตเตอรี่ 1 แอมป์อว ให้ 1 แอมป์ เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง เครื่องวิเคราะห์ที่แสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกัดที่ระบุจะแสดงเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ หากการคายประจุเป็นเวลา 30 นาทีก่อนที่จะถึงแรงดันไฟดับที่สิ้นสุดการคายประจุ แสดงว่าแบตเตอรี่มีความจุ 50 เปอร์เซ็นต์ แบตเตอรี่ใหม่บางครั้งมีการประเมินเกินจริงและสามารถผลิตความจุได้มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์; ส่วนอื่นๆ ถูกประเมินค่าต่ำไปและไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แม้หลังจากลองร่อนพื้นแล้วก็ตาม เมื่อปล่อยประจุแบตเตอรี่

ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบตเตอรี่ที่สามารถใช้อัตรา C ที่แตกต่างกัน อัตรา C ที่สูงขึ้นจะทำให้การอ่านค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความจุลดลงและในทางกลับกัน การคายประจุแบตเตอรี่ 1 แอมป์อว ที่อัตรา 2C ที่เร็วขึ้นหรือ 2 แอมป์ จะทำให้แบตเตอรี่มีความจุเต็มภายใน 30 นาที ผลรวมควรเท่ากันเนื่องจากปริมาณพลังงานที่เท่ากันจะถูกจ่ายออกไปในเวลาอันสั้น ในความเป็นจริง การสูญเสียภายในเปลี่ยนพลังงานบางส่วนให้กลายเป็นความร้อน และลดความจุผลลัพธ์ลงเหลือประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่านั้น การคายประจุแบตเตอรี่ก่อนเดียวกันที่ 0.5C หรือ 500 มิลลิแอมป์ นานกว่า 2 ชั่วโมง มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความจุให้สูงกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้อ่านค่าความจุได้ดีพอสมควร ผู้ผลิตมักจะให้คะแนนแบตเตอรี่อัลคาไลน์และตะกั่วกรดที่ 0.05C ต่ำมาก หรือคายประจุ 20 ชั่วโมง แม้ในอัตราการคายประจุที่ช้านี้ กรดตะกั่วก็แทบจะไม่มีควมจุถึง 100 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากแบตเตอรี่มีการประเมินค่าสูงเกินไป ผู้ผลิตจัดเตรียมการชดเชยกำลังการผลิตเพื่อปรับความคลาดเคลื่อนหากมีการระบายออกในอัตรา C ที่สูงกว่าที่ระบุแสดงตามรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงเวลาคายประจุของแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่โหลดต่างๆ แสดงเป็นอัตรา C

แบตเตอรี่ขนาดเล็กจะได้รับการจัดอันดับที่อัตราการคายประจุ 1C เนื่องจากพฤติกรรมเฉื่อยชา กรดตะกั่วจึงถูกจัดอันดับไว้ที่ 0.2C (5h) และ 0.05C (20h) ในขณะที่แบตเตอรี่ที่มีตะกั่วและนิกเกิลสามารถคายประจุได้ในอัตราที่สูง วงจรป้องกันจะป้องกันไม่ให้เซลล์พลังงาน Li-ion คายประจุเกิน 1C เซลล์ไฟฟ้าที่มีวัสดุแอคทีฟนิกเกิล แมงกานีส และ/หรือฟอสเฟตสามารถทนต่ออัตราการคายประจุได้สูงถึง 10 องศาเซลเซียส และเกณฑ์ปัจจุบันจะถูกตั้งค่าให้สูงขึ้นตามลำดับแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ใช้วิธีการชาร์จแรงดันคงที่ในปัจจุบัน (CCCV) กระแสไฟฟ้าที่มีการควบคุมจะเพิ่มแรงดันที่ช้าจนกว่าจะถึงขีดจำกัดแรงดันประจุด้านบน ซึ่ง ณ จุดนั้นกระแสจะลดลงเนื่องจากความอิ่มตัว เวลาในการชาร์จคือ 12–16 ชั่วโมง และสูงสุด 36–48 ชั่วโมงสำหรับแบตเตอรี่แบบอยู่กับที่ขนาดใหญ่ ด้วยกระแสการชาร์จที่สูงขึ้นและวิธีการชาร์จแบบหลายขั้นตอน เวลาในการชาร์จจึงลดลงเหลือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

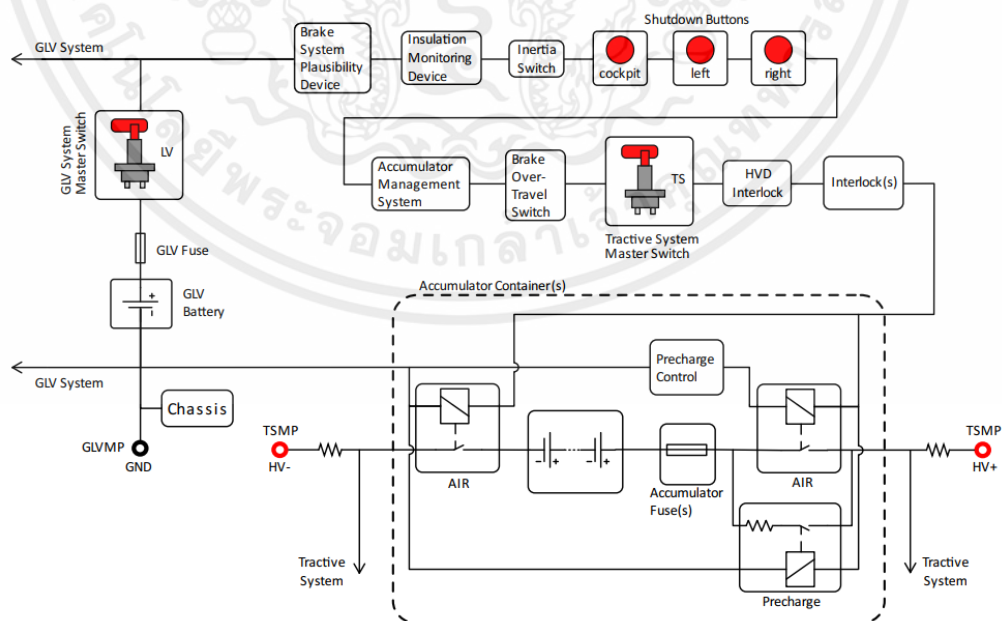
8-10 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามไม่มีค่าใช้จ่ายเต็มจำนวน กรดตะกั่วจะซบเซาและไม่สามารถชาร์จได้เร็วเท่ากับระบบแบตเตอรี่อื่นๆ

## 2.1.7 กฎกติกายานยนต์ไฟฟ้าของการแข่งขัน TSAE Auto Challenge Student Formula (TSAE) 2022-2023

### 2.1.7.1 SHUTDOWN SYSTEM

วงจร SHUTDOWN SYSTEM ประกอบด้วยส่วนประกอบต่อไปนี้ [2] แสดงดังรูปที่ 2.34

- Accumulator Management System (AMS)
- Insulation Monitoring Device (IMD)
- Brake System Plausibility Device (BSPD)
- Interlocks (as required)
- Master Switches (GLVMS, TSMS)
- Shutdown Buttons
- Brake Over Travel Switch (BOTS)
- Inertia Switch



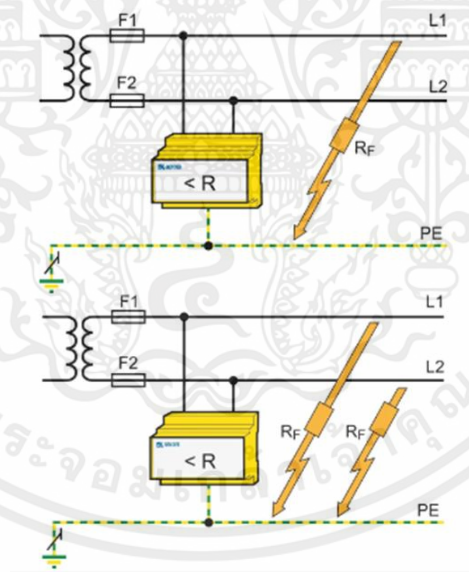
รูปที่ 2.34 SHUTDOWN SYSTEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7.2 การทำงานของ Insulation Monitoring Device (IMD)

เครื่องทดสอบความเป็นฉนวน Insulation Tester หรือ เมกะโอห์มมิเตอร์ [11] มีหลักการทดสอบคล้ายกับการตรวจสอบหาจุดรั่วของท่อประปา คือ เราจะอัดแรงดันน้ำสูงๆ เข้าไปในท่อเพื่อหาจุดรั่ว เครื่องทดสอบความเป็นฉนวนก็เช่นกันหากจะหาว่าอุปกรณ์มีไฟรั่วหรือไม่ ก็จะทำให้การป้อนแรงดันสูงๆ เข้าไป ซึ่งเครื่องทดสอบความเป็นฉนวนก็จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันนี้เข้าไปในวงจรเพื่อหาจุดรั่วไหลของกระแส และนอกจากนั้นในการทดสอบความต้านทานฉนวนยังสามารถทดสอบการเกิดอาร์กของไฟฟ้าได้เช่นกัน โดยหลักการทดสอบฉนวน มีดังต่อไปนี้

หลักการทำงานอุปกรณ์ตรวจสอบความเป็นฉนวนเชื่อมต่อระหว่างตัวนำที่มีไฟฟ้าและสายดินและวางทับแรงดันไฟฟ้าการวัด  $U_m$  ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดของฉนวน  $R_F$  ของฉนวนจะปิดวงจรการวัดระหว่างระบบและสายดิน สร้างกระแสการวัด  $I_m$  ที่เป็นสัดส่วนกับความผิดปกติของฉนวน กระแสการวัดนี้สร้างแรงดันตกที่สอดคล้องกันที่ความต้านทานการวัด  $R_m$  ซึ่งประเมินโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หากแรงดันตกคร่อมเกินค่าเฉพาะที่เทียบเท่ากับค่าความต้านทานของฉนวนที่ต่ำกว่า สัญญาณจะถูกส่งออก แสดงตามรูปที่ 2.35



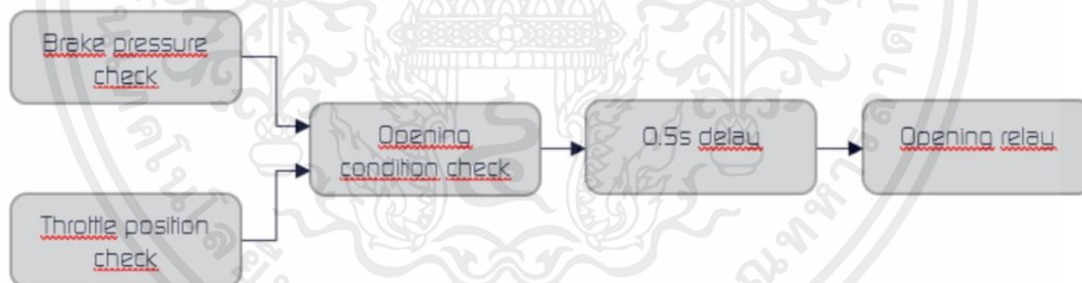
รูปที่ 2.35 หลักการทำงาน Insulation Monitoring Device (IMD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7.3 Brake system Plausibility device (BSPD)

BSPD คือ อุปกรณ์ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของระบบเบรกแสดงดังรูปที่ 2.36 [12] เป็นอุปกรณ์ความปลอดภัยแบบสแตนด์โวลท์ที่ไม่สามารถตั้งโปรแกรมได้ ซึ่งรวมเข้ากับระบบควบคุมคันเร่งแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อตรวจสอบและความผิดปกติในสภาพการขับขี่ที่ไม่ปลอดภัย จุดประสงค์หลักคือเพื่อตรวจหาข้อผิดพลาดในการเดินสาย โดยตรวจสอบให้แน่ใจว่าเซ็นเซอร์ทั้งหมดทำงานภายในช่วงการทำงานปกติ นอกจากนี้ BSPD จะทำงานผิดพลาดเมื่อทั้งคันเร่งและเบรกทำงาน (> 25 เปอร์เซ็นต์) นานกว่า 1 วินาที วิธีเดียวที่จะรีเซ็ตระบบเมื่อเกิดข้อผิดพลาด BSPD คือเปิดวงจรรถ BSPD เป็นวงจรแบบสแตนด์โวลท์ที่ไม่สามารถตั้งโปรแกรมได้จุดมุ่งหมายของ BSPD คือการเปิดใช้งาน (เปิด) วงจรปิด(วงจรนิรภัย) เมื่อตรงตามเงื่อนไขสองข้อพร้อมกัน 3 ข้อ ได้แก่ 1).กำลังส่งไปยังมอเตอร์  $\geq 5$  กิโลวัตต์ 2) การเบรกอย่างหนัก 3) วงจรปิดจะทำงานถ้าเงื่อนไขทั้งสองคงอยู่นานกว่า 500 มิลลิวินาที และ BSPD จะรีเซ็ตตัวเองหลังจาก 10 วินาที

โดยเซ็นเซอร์ DC Current ใช้เพื่อวัดพลังงานที่ส่งมาไปยังมอเตอร์และสำหรับวัดแรงดันในสายเบรกเซ็นเซอร์แรงดันเบรกใช้สำหรับอัตราที่เหมาะสม ทั้งหมดเซ็นเซอร์ที่ใช้เป็น Automotive grade วงจรรวมที่ใช้ในแผงวงจรยังเป็นเกรดยานยนต์พิกัดของเซ็นเซอร์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับกระแส แรงดัน ขีดจำกัดอุณหภูมิและความดันของระบบ

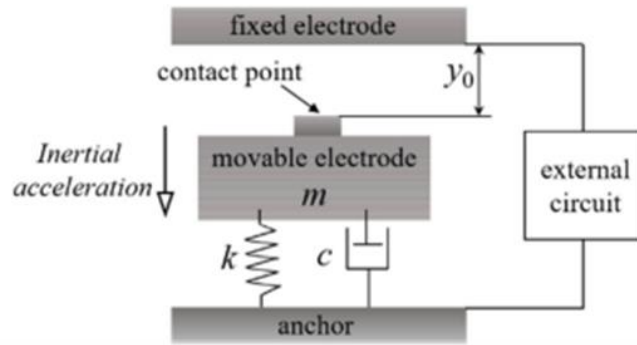


รูปที่ 2.36 Brake system Plausibility device (BSPD)

### 2.1.7.4 หลักการทำงาน Inertia switches

สวิตช์ความเฉื่อยหรือที่เรียกว่าสวิตช์เร่งความเร็ว [13] แสดงตามรูปที่ 2.37 โดยทั่วไปจะเปิดชุดหน้าสัมผัสสวิตช์ในกรณีที่เกิดการชนหรือเหตุการณ์อื่นๆ ที่สร้างแรง g อย่างรุนแรง หรือที่เรียกว่าสวิตช์เร่งความเร็ว โดยทั่วไปจะเปิดชุดหน้าสัมผัสสวิตช์ในกรณีที่เกิดการชนหรือเหตุการณ์อื่นๆ ที่สร้างแรง g อย่างรุนแรง หลักการทำงานทั่วไปคือการใช้มวลเป็นองค์ประกอบในการตรวจจับ การเร่งความเร็วที่สูงเพียงพอจะรบกวนมวลในลักษณะที่เปิดหน้าสัมผัสสวิตช์ผ่านการทำงานของ การเชื่อมโยงเชิงกล

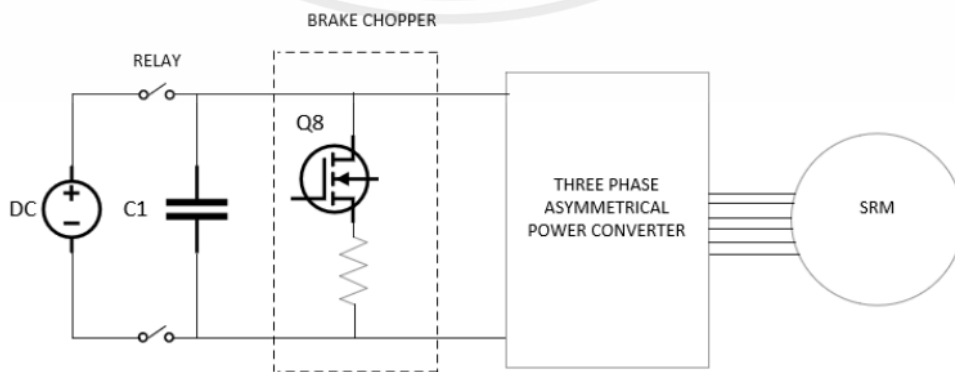
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 หลักการทำงาน Inertia switches

2.1.7.5 Discharge DC-link capacitor

ไดร์ SRM ที่มีมอเตอร์ถูกป้อนโดยตัวแปลงอสมมาตรสามเฟส แสดงตามรูปที่ 2.38 วงจรดิสชาร์จแบบแอคทีฟประกอบด้วยตัวต้านทานและมอสเฟต (ตัวสับเบรก) ซึ่งต่อขนานกับตัวเก็บประจุดีซีลิงค์ ในกรณีที่มีการปิดกัญเจอร์ล แบตเตอรี่จะถูกตัดการเชื่อมต่อจากตัวแปลงไฟโดยรีเลย์เพื่อระงับแหล่งที่มาและเพื่อป้องกันแบตเตอรี่ด้วย ในเหตุการณ์การปิดกัญเจอร์ลหรือในสถานการณ์ที่รถกำลังวิ่งและเกิดการชน จะไม่สามารถหยุดมอเตอร์ได้ทันที เฟลารอเตอร์ของเครื่องจักรไฟฟ้าจะถูกแยกออกจากกลไกเกียร์ แต่จะยังคงอยู่ในสภาพการทำงานเนื่องจากความเฉื่อยทางกล สิ่งนี้อาจส่งผลต่อการคายประจุของตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับความเร็วที่เครื่องกำลังทำงาน เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบของ EMF ของมอเตอร์ต่อการคายประจุของตัวเก็บประจุ วิธีง่ายๆ คือทำให้สวิตช์ IGBT ทั้งหมดในคอนเวอร์เตอร์สั้นลง วิธีการนี้ป้องกันการไหลของกระแสจากเครื่องไฟฟ้าไปยังตัวเก็บประจุโดยการทำให้ขั้วของสเตเตอร์สั้นลง ปัญหาหลักของวิธีนี้คือกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ไหลภายในเครื่องอาจทำให้เครื่องไฟฟ้าเสียหายอย่างไม่สามารถกู้คืนได้ (Nutan and Choudhury et al.,2016) การเพิ่มชุดสับเบรกขนานกับตัวเก็บประจุดีซีลิงค์จะลดแรงดันบัส DC ซึ่งแสดงไว้ในขอบเขตนี้ [14]



รูปที่ 2.38 Discharge DC-link capacitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุดีซีลิงค์สามารถคายประจุผ่านตัวต้านทานซึ่งมีอยู่ในชุดสับเมื่อเปิด MOSFET เมื่อใดก็ตามที่แรงดันบัส DC ลดลงต่ำกว่า EMF ของเครื่อง กระแสจะไหลผ่านไดโอด อินเวอร์เตอร์และชาร์จตัวเก็บประจุดีซีลิงค์ ดังนั้นตัวต้านทานจะต้องดูดซับพลังงานที่เก็บไว้ในตัวเก็บประจุไม่เพียง แต่ยังรวมถึงพลังงานกลที่เหลืออยู่ในเครื่องด้วย เป็นผลให้ตัวต้านทานที่ใช้ในชุดสับ มักจะมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บประจุไม่สามารถคายประจุจนหมดได้ เนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ลดลงช้ากว่าแรงดันบัส DC มาก

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mario Volaric [15] ศึกษาการออกแบบมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรสำหรับการแข่งขัน Formula Student โครงการมอเตอร์รวมถึงการวิเคราะห์แม่เหล็กไฟฟ้า ความร้อน เครื่องกล การวิเคราะห์ของจลนศาสตร์ในการปฏิบัติงาน และการวิเคราะห์วัฏจักรของไดรฟ์ภายใน Motor-CAD

Manu Dubey [16] ศึกษาการจำลองรถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Scilab ของ Formula Student มุ่งเน้นไปที่การกำหนดพารามิเตอร์ทางเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการออกแบบรถยนต์ไฟฟ้า และ Scilab การจำลองแบบไดนามิกของยานพาหนะไฟฟ้าการศึกษาเปรียบเทียบส่วนประกอบต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ Optimum Lap เพื่อบันทึกความเร็ว เวลารอบ แรงบิด และการใช้พลังงาน ข้อมูลนี้ดีมากขึ้นของรถยนต์ในขั้นต้น การจำลองรอบของยานพาหนะจะดำเนินการตามมอเตอร์ต่างๆ

Yidan Xu, [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ Li-ion ตามตัวกรอง Kalman คู่แบบปรับได้ในบทความนี้ผู้เขียนได้ประมาณค่าสถานะการชาร์จแบตเตอรี่ (SOC) อย่างแม่นยำมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มอายุการใช้งานและความปลอดภัย ในการศึกษา นี้อิงตามแบบจำลองวงจรสมมูลลำดับเศษส่วนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน วิธีการประมาณ SOC โดยใช้ตัวกรองคาลมานคู่ (DKF) และตัวกรองคาลมานคู่ขยาย (DEKF) ได้รับการจำลองและเปรียบเทียบ ในแง่ของความแม่นยำของแบบจำลองและ SOC ความแม่นยำในการประมาณ จากนั้น เมื่อรวมข้อดีของอัลกอริทึม DKF และ DEKF เข้าด้วยกัน จึง เสนออัลกอริทึมการประมาณค่า SOC

Eunji Kwak [18] ได้ศึกษาลักษณะการตอบสนองเชิงกลของแบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> ภายใต้สภาพการทำงานที่แตกต่างกัน ในบทความนี้ได้เขียนเกี่ยวกับการตอบสนองเชิงกลของแบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> ขนาด 10 แอมป์อว ที่ได้รับการตรวจสอบภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน การบวมของเซลล์ถูกวัดที่อัตรา C และอุณหภูมิที่แตกต่างกันภายใต้สภาวะที่ปราศจากข้อจำกัด และวัดแรงที่ ความดันเริ่มต้นและอัตรา C ที่ต่างกันภายใต้สภาวะที่มีข้อจำกัด การทดลองเหล่านี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ

ลักษณะทางกลของแบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบและการควบคุม พฤติกรรมเชิงกลที่สังเกตเห็นนั้นมีลักษณะเฉพาะ: แบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> จะพองตัวที่สถานะการชาร์จปานกลาง (SOCs) และหดตัวที่ SOC ต่ำและสูงระหว่างการคายประจุ

Weihan Li [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับดิจิทัลแบบคู่สำหรับระบบแบตเตอรี่:ระบบการจัดการแบตเตอรี่แบบคลาวด์สถานะการชาร์จออนไลน์และการประเมินสถานะสุขภาพ ในบทความนี้ได้กล่าวเกี่ยวกับการจัดการแบตเตอรี่มีความสำคัญต่อการเพิ่มความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือ และประสิทธิภาพของระบบแบตเตอรี่ บทความนี้นำเสนอระบบการจัดการแบตเตอรี่บนคลาวด์สำหรับระบบแบตเตอรี่เพื่อปรับปรุงพลังงานคำนวณและความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลด้วยการประมวลผลแบบคลาวด์ด้วย Internet of Things ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ทั้งหมดจะถูกวัดและส่งไปยังคลาวด์อย่างราบรื่น สร้างแพลตฟอร์มสำหรับระบบแบตเตอรี่

Orhan Kalkan [20] ได้ศึกษาการทดลองและการวิจัยเชิงตัวเลขเกี่ยวกับการทำความเข้าใจของแบตเตอรี่ LiFePO<sub>4</sub> โดยการพาความร้อนตามธรรมชาติ ในการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแบตเตอรี่ชนิดถุก LiFePO<sub>4</sub> (LFP) ในช่วงอัตราคายประจุ 1C-5C ที่อุณหภูมิแวดล้อม 23 องศาเซลเซียส และสภาวะการพาความร้อนตามธรรมชาติ ได้รับการตรวจสอบเชิงทดลองและเชิงตัวเลข การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามเวลาของแบตเตอรี่จะถูกถ่ายภาพด้วยกล้องตรวจจับความร้อนสำหรับการคายประจุแต่ละครั้ง และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ต่ำสุด และเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่

Jialin Lianga [21] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของค่าการลดทอนความจุของเซลล์ LiFePO<sub>4</sub> ภายใต้อัตรากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จากบทวิจัยความเข้าใจเกี่ยวกับความจุที่ลดลงของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจะเพิ่มความทนทานของรถยนต์ไฟฟ้า

D.C Meena [22] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์ Brake System Plausibility Device ของ Formula นั้นเร็วและดีการเร่งความเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันแบบล้อต่อล้อและการแข่งรถลากหรือโสดไพนอันตรายอื่น ๆ วงจรความปลอดภัยที่แข็งแกร่ง ระบบเบรกอุปกรณ์ตรวจสอบความถูกต้อง (BSPD)

## บทที่ 3

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้ จะอธิบายถึงชิ้นส่วนวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในรถไฟฟาสูตรนักศึกษา กระบวนการ ออกแบบ และการจำลองชุดแบตเตอรี่แพ็คในโปรแกรม Solid work ว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ รวมถึงอธิบายอุปกรณ์ไฟฟ้า และระบบ Shutdown Circuit อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ วิธีดำเนินโครงการ และวิธีการทดสอบต่างๆ

### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและระบบไฟฟ้า

#### 3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ

ด้วยข้อจำกัดในการออกแบบของทีม คือ ทีมต้องออกแบบและเลือกใช้งานวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือที่ต้องสอดคล้องกับกฎการแข่งขัน ซึ่งอธิบายรายละเอียดวัสดุ อุปกรณ์ ได้ดังนี้

##### 3.1.1.1 มอเตอร์แม่เหล็กถาวร (Synchronous motor) รุ่น EMRAX 228



รูปที่ 3.1 Motor EMRAX 228

มอเตอร์ที่ทางทีมเลือกใช้เป็นซิงโครนัสมอเตอร์แม่เหล็กถาวร รุ่น EMRAX 228 มีขั้วแม่เหล็ก 10 คู่ ติดอยู่กับโรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งสามารถสร้างกำลังได้สูง แม้อินความเร็วรอบที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากมีแรงบิดสูง ช่วยให้สามารถขับเคลื่อนแบบไม่มีเกียร์โดยไม่ต้องใช้ชุดเกียร์แบบ step-down ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียกำลัง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความซับซ้อน และการบำรุงรักษา ในกรณีที่ต้องการการหมุนเอาต์พุตที่ต่ำกว่า สามารถใช้ไดรฟ์ลดขนาดได้ ซึ่งช่วยให้แรงบิดสูงขึ้น (กำลังเท่าเดิม) ภายในมอเตอร์จะติดตั้ง Encoder sensor เพื่อตรวจจับทิศทาง ตำแหน่ง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ EMRAX และจะส่งสัญญาณย้อนกลับให้กับอินเวอร์เตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Encoder sensor

อย่างไรก็ตาม มอเตอร์ตัวนี้มีขนาดที่เบากว่า Motor ที่ใช้ในโรงงานทั่วไป เพราะทางบริษัทผู้ผลิตได้สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการแข่งขันโดยเฉพาะ โดยมอเตอร์มีน้ำหนักที่เบาเพียงแค่ 12.4 กิโลกรัม และสามารถสร้างแรงมาได้ถึง 134 แรงม้า แรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 500 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) ในพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 6500 วัตต์ต่ออนาที ทอร์คสูงสุดอยู่ที่ 109 กิโลวัตต์ แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 230 นิวตันเมตร ทำให้มอเตอร์รุ่นนี้จึงเหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาใช้สำหรับการแข่งขัน TSAE

### 3.1.1.2 กล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400-400



รูปที่ 3.3 กล่องควบคุมมอเตอร์ รุ่น UnitekD3 BamocarD3-400-400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่องควบคุมมอเตอร์ สำหรับการพิจารณาเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการเปลี่ยนแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) รวมถึงความเหมาะสมเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่เลือกใช้ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว กล่องควบคุมมอเตอร์จะถูกปรับให้เหมาะกับมอเตอร์แต่ละชนิด ดังนั้นตัวควบคุมมอเตอร์ที่ทางทีมได้เลือกใช้ คือ กล่องควบคุมมอเตอร์ รุ่น UnitekD3 BamocarD3-400-400 ดังรูปที่ 3.3 ผลิตโดยบริษัท Unitek Industrie Elektronik ซึ่งกล่องควบคุมมอเตอร์รุ่นนี้มีคุณสมบัติเพื่อควบคุมมอเตอร์ซิงโครนัส EC และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบอะซิงโครนัสในยานพาหนะโดยเฉพาะ สามารถใช้ได้ด้วยโปรแกรม N Drive.3 โดยในโปรแกรมมีการแสดงรอบมอเตอร์ กระแสไฟฟ้า และพารามิเตอร์ต่างๆ นอกจากนี้กล่องควบคุมมอเตอร์ยังข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา เพียงแค่ 8.5 กิโลกรัม มีระดับการป้องกันน้ำ IP65 และมีการระบายความร้อนด้วยของเหลว ซึ่งเหมาะสมที่จะนำมาทำรถไฟฟ้าสุตรนักศึกษา

### 3.1.1.3 เซลล์แบตเตอรี่

เพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพสูงสุดจากชุดแบตเตอรี่ ทีมทุ่มเทเวลาจำนวนมากให้การตรวจสอบตัวเลือกเซลล์แบตเตอรี่ให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ พิจารณาทั้งเกณฑ์การบรรจุและข้อมูลประสิทธิภาพ แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ความจุ การคายประจุสูงสุด ซึ่งทีมได้ข้อสรุปที่จะเลือกใช้แบตเตอรี่ชนิด Lithium LiFePO4 Pouch Cell รุ่น A123 พิกัดความจุ 31 แอมป์อว โดยข้อมูลแบตเตอรี่ทั้งหมดแสดงตามรูปที่ 3.4 และตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 แบตเตอรี่ชนิด Lithium LiFePO4 Pouch Cell รุ่น A123 พิกัดความจุ 31 แอมป์อว

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ชนิด Lithium LiFePO<sub>4</sub> Pouch Cell รุ่น A123 พิกัด ความจุ 31 แอมป์อวา

Item	Specification
Nominal capacity	31Ah
Minimum capacity	31.0Ah
Charge cut-off voltage	3.65 V
Nominal voltage	3.2 V
Charging method	CC-CV (first constant current then constant voltage)
Maximum continuous charge current	93 A (3.0C 60s)
Maximum continuous discharge current	248.0 A (8.0C 60s)
Maximum Pulse Charge Current	155A (5C 10s)
Maximum Pulse Discharge Current	372A (12C 10s)
Discharge Cut-off Voltage	2.0 V
1C/1C Cycle Life (RT)	After 3000 cycles remaining capacity ≥ 80%
Cell Weight	≤ 0.610 Kg
Operating Temperature	Charge: -20 ~ 55 °C, Discharge: -30 ~ 55 °C

ระบบชุดแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมด 70 เซลล์ ที่มี 5 โมดูลๆ ละ 14 เซลล์เชื่อมต่อแบบอนุกรม โดยเชื่อมต่อแบบเลเซอร์บนขั้วเซลล์ ขั้วเซลล์ทั้งหมดจะห่อหุ้มด้วยเทปเคปตอน เพื่อเป็นฉนวนกันไฟฟ้าและความร้อนแสดงตามรูปที่ 3.5 และระหว่างโมดูลเซลล์มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม โดยใช้ปลั๊กโมดูลเชื่อมต่อ แสดงตามรูปที่ 3.6 รวมแรงดันไฟฟ้าชุดแบตเตอรี่ 255.5 โวลต์ โดยแต่ละส่วนมี 1 โมดูล ส่วนของแบตเตอรี่แต่ละส่วนมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและความจุพลังงาน 51.1 โวลต์ และ 5.7 เมกะจูล ตามลำดับ ส่วนของชุดแบตเตอรี่แพ็คเกจถูกแยกออกจากกันโดยผนังภายในที่เป็นเหล็กและตัวแบตเตอรี่เองถูกแยกออกจากกันโดยแผ่นฉนวนที่ไม่นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แบตเตอรี่แพ็ค



รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อแบบอนุกรมระหว่างโมดูล

#### 3.1.1.4. ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System; BMS)

ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าอาจแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและรุ่นที่ออกแบบ ปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจของทีม คือ BMS มีลักษณะของระบบเครือข่ายแบบรวมศูนย์หรือไม่ การใช้ BMS เดียว จะมีประโยชน์เนื่องจาก แต่ละโมดูลจะประมวลผลข้อมูลก่อนที่จะส่งไปยัง BMS นอกจากนี้จะพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น มันสามารถสื่อสารผ่าน CAN ได้หรือไม่ จำนวนเซลล์ที่สามารถตรวจสอบทั้งแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิได้หรือไม่ โดย BMS ที่ทีมเลือกใช้ คือ EMUS G1 BMS ซึ่งออกแบบมาเฉพาะสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฮบริด รองรับชุดเซลล์แบตเตอรี่ 16 เซลล์ สูงสุด 512 เซลล์ และสามารถใช้งานกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ที่หลากหลาย ทีมจะใช้ EMUS G1 BMS ควบคุมแบตเตอรี่ทั้งหมด ซึ่งการควบคุมประกอบด้วย การบาลานซ์เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมด ให้มีแรงดันเท่ากัน การควบคุมเปิด-ปิด AIR เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้อินเวอร์เตอร์ การควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ทั้งหมด และการตรวจสอบข้อผิดพลาดต่างๆ และ ปิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่เมื่อเกิดผิดพลาดต่างๆ ซึ่งส่วนประกอบหลักของ EMUS G1 BMS ที่ทีมใช้มีได้แก่

1. EMUS G1 Control Unit (หรือเรียกง่ายๆ ว่า Control Unit) เป็นตัวควบคุมหลักที่ดำเนินการฟังก์ชันหลักทั้งหมดของการจัดการแบตเตอรี่โดยอัตโนมัติ มันโต้ตอบกับส่วนประกอบต่างๆ ทั้งหมดในระบบโดยใช้อินพุตที่หลากหลาย แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 EMUS G1 Control Unit

2. EMUS G1 Dual Range Current Sensor เป็นอุปกรณ์วัดกระแสแบบ แอนะล็อกแบบบัสบาร์ ซึ่งออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบการจัดการแบตเตอรี่ EMUS G1 มีช่องการวัดแยกสองช่องที่มีความไวต่างกัน ซึ่งช่วยให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำโดยไม่ลดทอนช่วงของค่าที่วัดได้ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Dual Range Current Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. EMUS Centralized CAN Cell Group Module โมดูลกลุ่มเซลล์ CAN แบบรวมศูนย์ของ EMUS (หรือที่เรียกว่า CCGM) เป็นอะแดปเตอร์การสื่อสารเซลล์ชั้นสูงสำหรับการเชื่อมต่อตัวควบคุมหลักและชุดแบตเตอรี่ที่มีเซลล์ลิเธียมสูงสุด 16 เซลล์ ซึ่งช่วยให้ระบบการจัดการแบตเตอรี่ของ Emus ประหยัดพื้นที่โดยลดความจำเป็นในการมีโมดูลเซลล์เป็น CCGM แต่ละตัว ตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์โดยตรง แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 Centralized CAN group module

4. Smartphone Connectivity Module โมดูลการเชื่อมต่อสมาร์ทโฟน EMUS G1 เป็นอะแดปเตอร์สื่อสารไร้สายที่เชื่อมต่อกับชุดควบคุมผ่านสายอินเทอร์เฟซ RS232 และเปิดใช้งานอุปกรณ์ภายนอกเพื่อเชื่อมต่อกับชุดควบคุม EMUS G1 ผ่านโปรโตคอล BT สำหรับการตรวจสอบ การกำหนดค่า การวินิจฉัย ฯลฯ แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 EMUS G1 Smartphone Connectivity Module

### 3.1.1.5 กล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค

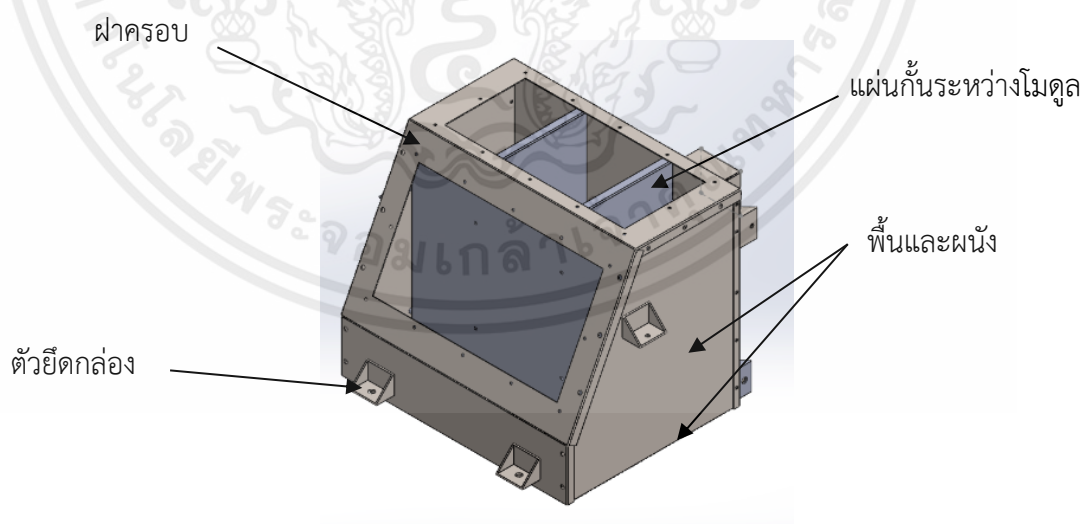
ภายในในรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา ชุดแบตเตอรี่แพ็คจะติดตั้งด้านหลังคนขับ และไฟวอลล์ ซึ่งอยู่ระหว่างโครงสร้างเมนฮับด้านหลังคนขับขยายไปจนสุดทางด้านหลังของซัพพอร์ตบาร์ซึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้กล่องชุดแบตเตอรี่แพ็คสั่นสะเทือนในระหว่างแข่งขัน แสดงตามรูปที่ 3.11 กล่องชุดแบตเตอรี่แพ็คจะถูกยึดอย่างแน่นหนากับสเปซเฟรมท่อด้านหลัง โดยเชื่อมยึดด้วยตัวยึดทั้งหมด 10 อัน แต่ละอันมีระห่างมากกว่า 50 มิลลิเมตร ใช้สลักเกลียวเหล็กขนาด M8 เข้าไปยึด

ฐานยึดต้องสามารถต้านทานแรง 20 กิโลนิวตัน ในทุกทิศทาง ซึ่งมีรายละเอียดอยู่ในเอกสาร Structural Equivalency Spreadsheet (SES)



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งการจัดวางกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค

โครงสร้างกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค ประกอบด้วย 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นพื้นและผนังด้านหน้า ด้านข้าง ด้านหลัง ทำขึ้นจากเหล็กแผ่น SS400 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ส่วนที่สองเป็นแผ่นกั้นระหว่างโมดูลที่แบ่งแยกเซลล์ ทำขึ้นจากเหล็กแผ่น SS400 ความหนา 1.5 มิลลิเมตร ส่วนที่สามเป็นฝาครอบ ทำขึ้นจากเหล็กแผ่น SS400 ความหนา 1 มิลลิเมตร ส่วนที่สี่เป็นตัวยึดกล่องแบตเตอรี่เข้ากับโครงสร้างรถ ทำขึ้นจากเหล็กฉาก ความหนา 3 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.12

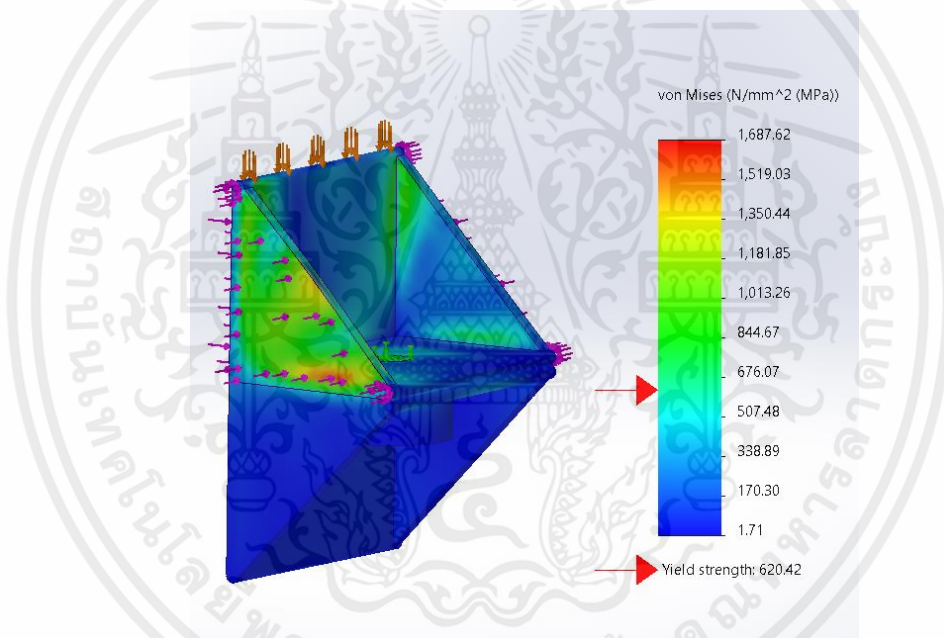


รูปที่ 3.12 โครงสร้างกล่องใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองตัวยึดกลองใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค ส่วนประกอบโครงสร้างของตัวยึดกลองใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค จำเป็นต้องทนต่อแรงจำนวนมาก เพื่อตรวจสอบว่ารถของเราสามารถทนต่อแรงที่กำหนดได้ ชิ้นส่วนต่างๆ จะถูกสร้างแบบจำลองด้วยของแข็งและต้องรับน้ำหนักบรรทุกตามที่กำหนด การจำลองในโปรแกรม Solid work ทำให้ทีมของเราสามารถทดสอบและทำซ้ำการออกแบบได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาในการทดสอบ

ฐานยึดจำเป็นต้องทนต่อ 20 กิโลนิวตัน ในทุกทิศทาง และเนื่องจากน้ำหนักของชุดแบตเตอรี่แพ็ค จึงจำเป็นต้องมีฐานยึดอย่างน้อย 10 ตัว ซึ่งในกฎยังระบุด้วยว่าสำหรับส่วนประกอบเหล็กที่รับแรงได้น้อยกว่า 300 เมกะปาสคาล และ 365 เมกะปาสคาล ถือว่าไม่ผ่านที่ตำแหน่งการเชื่อม และไม่ผ่านในตัวของชิ้นส่วน ตามลำดับ ดังนั้นต้องออกแบบให้รับแรงมากกว่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การจำลองตัวยึดกลองใส่ชุดแบตเตอรี่แพ็ค เมื่อมีโหลด 20 กิโลนิวตัน มากกระทำ

### 3.1.1.6 ระบบระบายความร้อนมอเตอร์ กล่องควบคุม และแบตเตอรี่

จากการเข้าร่วมการแข่งขันของรุ่นก่อนๆ พบว่า ภายในสนามแข่งขันมี อุณหภูมิสูงถึง 40 องศาเซลเซียส ทำให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลงมาก ดังนั้นทีมจึงออกแบบ ระบบระบายความร้อนมอเตอร์ กล่องควบคุม และแบตเตอรี่ด้วยน้ำผสมน้ำแข็ง ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิได้ดีในระหว่างที่แข่งขัน โดยแผนผังการทำงานของระบบระบายความร้อนมอเตอร์ กล่องควบคุม และ แบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 3.14 และ 3.15

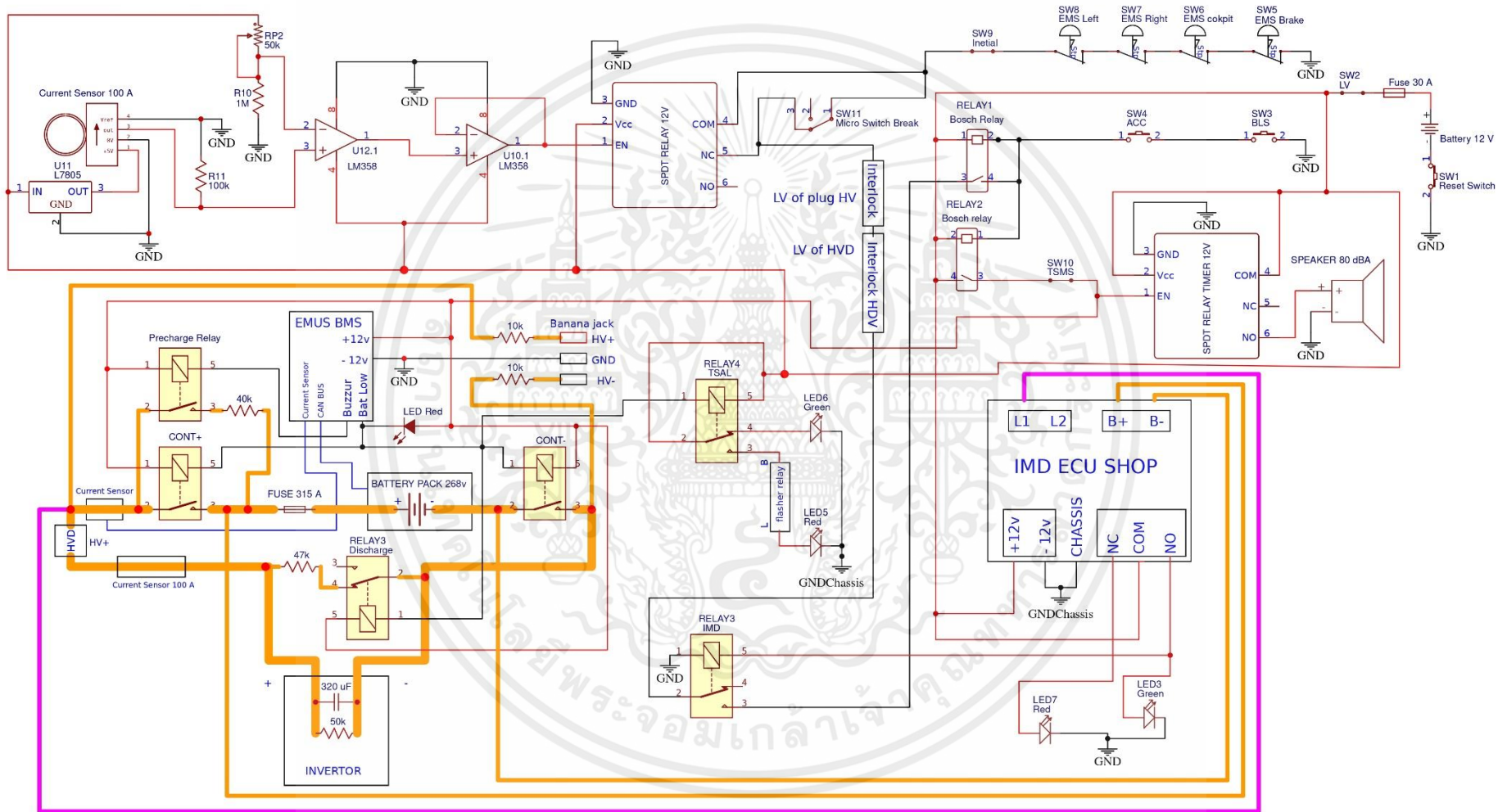


รูปที่ 3.14 การระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่

รูปที่ 3.15 การระบบระบายความร้อน มอเตอร์และกล่องควบคุม

### 3.1.2 ระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา

Shutdown Circuit เป็นวงจรตัดระบบฉุกเฉิน ซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากของ ระบบความปลอดภัยในรถแข่ง โดยวัตถุประสงค์เพื่อเปิดใช้งานและปิดการทำงานของระบบภายใน รถแข่ง และตัดระบบไฟฟ้าในขณะที่เกิดเหตุฉุกเฉินและต้องติดตั้งอุปกรณ์ให้ครบตามที่กฎได้กำหนด ไว้ เพื่อป้องกันการเกิดอันตรายของผู้ขับขี่ ทีมได้ออกแบบวงจรและเลือกใช้อุปกรณ์วงจรใน Shutdown Circuit โดยรวม แสดงตามรูปที่ 3.16 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.16 วงจร Shutdown Circuit

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>1. แหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 V ที่มิได้แพ็คแบตเตอรี่ขึ้นเอง โดยเลือกใช้งาน แบตเตอรี่ NMC พิกัดความจุ 40 แอมป์อว เชื่อมต่อแบบอนุกรม จำนวน 4 เซลล์ ซึ่งทีมได้ติดตั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้ในพื้นที่ที่ปลอดภัย และมีวัสดุปกปิดไว้เป็นอย่างดี</p>
	<p>2. Master Switches จะแบ่งเป็น 2 สวิตช์ ได้แก่ Grounded Low Voltage Master Switch (GLVMS) เป็นสวิตช์เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้า 12 โวลต์ ซึ่งเมื่อเปิดสวิตช์แล้ว ระบบไฟแสดงสถานะ TSAL จะแสดง เป็นสีเขียว และ Tractive System Master Switch (TSMS) เป็น สวิตช์เปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง เช่น contactor BMS เป็นต้น</p>
	<p>3. Brake Over Travel Switch (BOTS) เป็นสวิตช์ฉุกเฉินแบบกดตั้ง จะทำงานเมื่อมีสถานการณ์เบรกแตก หรือเบรกใช้งานไม่ได้ โดยสวิตช์ นี้จะติดตั้งหลังแป้นเบรก</p>
	<p>4. Shutdown Buttons เป็นสวิตช์ฉุกเฉินแบบกดหมุนที่ให้ บุคคลภายนอกกด เมื่อกรณีสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยสวิตช์จะติดตั้งไว้ 3 จุด ประกอบด้วยด้านซ้าย และด้านขวาในระดับศีรษะของนักขับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสวิตช์ไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร และภายใน ห้องนักขับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสวิตช์ไม่น้อยกว่า 22 มิลลิเมตร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit (ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>5. Inertia Switch เป็นสวิตช์ความเฉื่อยที่ใช้ตัดการทำงานของระบบเมื่อรถเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง หรือรถเกิดอุบัติเหตุ โดยสวิตช์นี้จะติดตั้งใกล้กับห้องนักขับ</p>
	<p>6. Brake System Plausibility Device (BSPD) เป็นวงจรตรวจสอบความน่าเชื่อถือของระบบเบรก ตามกฎข้อที่ (EV.8.7) BSPD ที่มิได้ออกแบบวงจรนี้ขึ้นเอง โดยใช้ Hall Effect Sensor D-C1T 100 แอมป์ ตรวจสอบการจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างชุดแบตเตอรี่กับอินเวอร์เตอร์ ซึ่งคำนวณกระแสไฟฟ้าตามแรงดันไฟฟ้า 255.5 โวลต์ เทียบกับการจ่ายพลังงานไฟฟ้า 5 กิโลวัตต์ จะได้กระแสไฟฟ้าที่ 19.5 แอมป์ ดังนั้นเมื่อเหยียบเบรกและเหยียบคันเร่งโดยมีกระแสไฟฟ้ามากกว่า 19.5 แอมป์ พร้อมกัน จะทำให้มีการตัดระบบไฟฟ้าทันที เพื่อป้องกันอันตรายขณะขับขี่ยานพาหนะแสดงตามรูปที่ 3.17</p>  <p style="text-align: center;"><b>รูปที่ 3.17</b> วงจร Brake System Plausibility Device BSPD</p>
	<p>7. Ready to Drive Sound เป็นอุปกรณ์ส่งเสียงเตือนเมื่อระบบพร้อมขับ ซึ่งที่มิได้ออกแบบนี้ขึ้นเอง แสดงตามรูปที่ 3.18 โดยจะทำงานเมื่อนักขับกดสตาร์ท ถ้าโพงจะส่งเสียงดังไม่น้อยกว่า 80 เดซิเบล เป็นระยะเวลาไม่เกิน 3 วินาที และรถจะต้องไม่มีเสียงอื่นที่คล้ายกับเสียง Ready to Drive</p>  <p style="text-align: center;"><b>รูปที่ 3.18</b> วงจร Ready to Drive Sound</p>


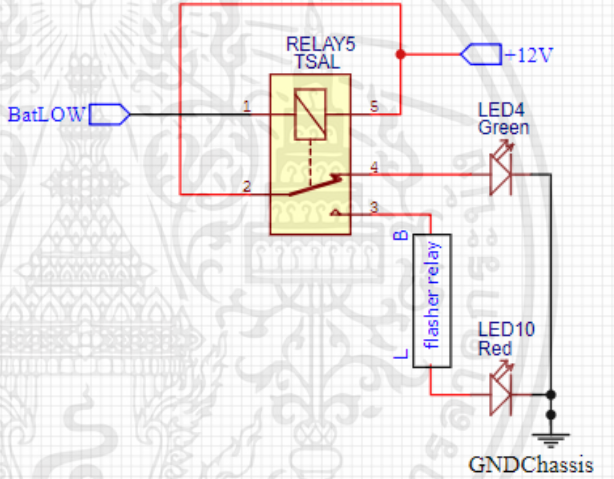

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit (ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>8. Insulation Monitoring Device (IMD) เป็นอุปกรณ์ใช้ตรวจสอบกระแสไฟฟ้ารั่ว และความผิดปกติของฉนวนเมื่อเกิดการผิดปกติ เช่น เมื่อมีฉนวนชำรุด หรือสายไฟฟ้าแรงสูงสัมผัสกับโครงสร้างระบบจะส่งสัญญาณเตือนและสั่งตัดระบบไฟฟ้าทันที จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟจ่ายเข้ามอเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายแก่ผู้ขับขี่ ยานพาหนะ ตามกฎข้อที่ (EV.8.6) IMD ทางทีมเลือกใช้งานเครื่องตรวจสอบไฟฟ้ารั่วของบริษัท ECU=SHOP การทำงานของ IMD จะทำงานเมื่อแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 60 โวลต์ แสดงตามรูปที่ 3.19</p>  <p>รูปที่ 3.19 วงจร Insulation Monitoring Device (IMD)</p>


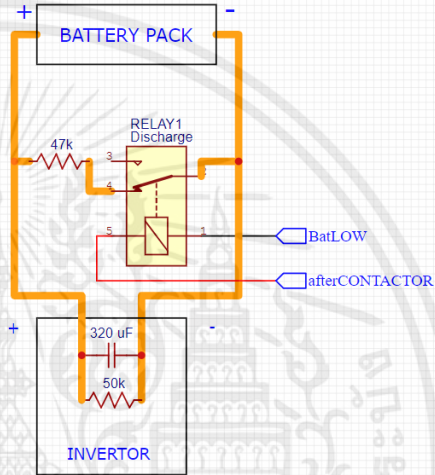


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit (ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>9. Tractive System Active Light (TSAL) เป็นไฟแสดงสถานะของรถ แสดงวงจรตามรูปที่ 3.20 แบ่งเป็น 2 สถานะ ได้แก่</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. สถานะที่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากชุดแบตเตอรี่ มากกว่า 60 โวลต์ ตามกฎข้อที่ (EV.6.9.3) TSAL จะต้องแสดงไฟสีแดง กระพริบที่มีความถี่ระหว่าง 2 เฮิร์ต ถึง 5 เฮิร์ต</li> <li>2. สถานะที่ไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากชุดแบตเตอรี่ ตามกฎข้อที่ (EV.6.9.4) TSAL จะต้องแสดงไฟสีเขียว แบบติดค้าง</li> </ol>  <p>รูปที่ 3.20 วงจร Tractive System Active Light (TSAL)</p>
	<p>10. Tractive System Measuring Points (TSMP) เป็นจุดตรวจวัดระบบไฟฟ้าของรถ แบ่งเป็น 2 จุด ได้แก่</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. จุดเชื่อมต่อกับสายจ่ายไฟของตัวควบคุมมอเตอร์กับอินเวอร์เตอร์ขั้วบวก (HV+) และขั้วลบ (HV-) โดยต่อผ่านตัวต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ทั้งสองจุด ตามกฎข้อที่ (EV.6.8.4) TSMP</li> <li>2. จุดเชื่อมต่อกับโครงรถ (ground)</li> </ol> <p>จุดตรวจวัดต้องเป็นบานาน่าแจ็กแบบติดแทน และต้องมีตัวเรือนป้องกันที่ไม่นำไฟฟ้า ซึ่งสามารถเปิด-ปิด ได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือ.</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit (ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>11. Discharge Circuit เป็นวงจรคายประจุไฟฟ้าให้น้อยกว่า 60 โวลต์ ภายในเวลา 5 วินาที ตามกฎข้อที่ (EV.6.6.3) Discharge Circuits ทำงานโดยการสลับตัวต้านทานภายนอก 47 กิโลโอห์ม ระหว่าง HV+ และ HV- ผ่านรีเลย์หลังจากถอดแหล่งจ่ายไฟ HV แสดงตามรูปที่ 3.21 <u>สิ่งสำคัญ</u> จะต้องไม่ปิดรีเลย์ในขณะที่แหล่งจ่ายไฟ HV ยังเชื่อมต่ออยู่</p>  <p>รูปที่ 3.21 วงจร Discharge Circuit</p>
	<p>12. Accelerator Pedal Position Sensor (APPS) เป็นเซ็นเซอร์ตำแหน่งคันเร่ง ตามกฎข้อที่ (EV.5.5) APPS ซึ่งจำเป็นต้องมี 2 ตัว ในการส่งสัญญาณให้กล่องควบคุมมอเตอร์ และห้ามใช้คันเร่งไฟฟ้า ซึ่งทีมได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ตำแหน่งคันเร่งแบบมีสายดึง</p>
	<p>13. Fuse เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสไฟฟ้าเกิน โดยติดตั้งห่างจาก ขั้วบวกของแบตเตอรี่ 60 เซนติเมตร. และต้องมีวัสดุปกปิดอย่างมิดชิด เพื่อป้องกันอันตรายจากการตัดของฟิวส์เมื่อกระแสไฟฟ้าเกิน โดยทีมเลือกใช้ฟิวส์ชนิด Low voltage รุ่น 660GH-315UL สามารถรองรับกระแสไฟได้ 315 แอมป์</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

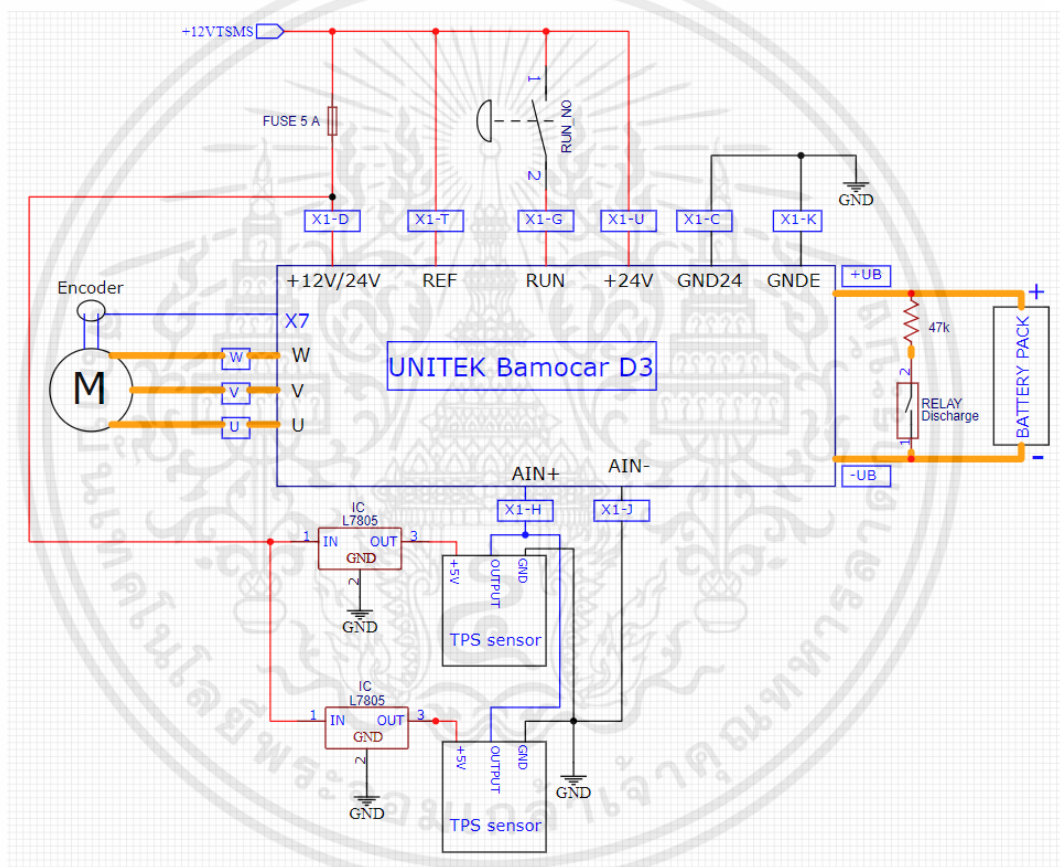
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Shutdown Circuit (ต่อ)

รูปภาพ	รายละเอียด
	<p>14. Accumulator Isolation Relays (AIRs) เป็นอุปกรณ์เปิด-ปิดการจ่ายไฟฟ้าแรงสูงทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งติดตั้งอยู่ภายในกล่องแบตเตอรี่ โดยทีมเลือกใช้ AIR ชนิด EVC 250 Main Contactor รองรับแรงดัน 450 โวลต์ (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง)</p>
	<p>15. Precharge relay เป็นอุปกรณ์จ่ายกระแสแสงสว่างก่อนปิด AIR ซึ่งการเปิด-ปิดของ Precharge relay จะต้องถูกควบคุมโดย BMS ในเวลาสองเท่าในการชาร์จถึง 90 เปอร์เซ็นต์ หรือ เวลาในการชาร์จถึง 90 เปอร์เซ็นต์ บวก 500 มิลลิวินาที โดยทีมเลือกใช้ Precharge relay ชนิด Mini K HV precharge Relay รองรับแรงดัน 400 โวลต์ และเชื่อมต่อเข้ากับตัวต้านทาน 40 โอห์ม</p>
	<p>16. Maintenance Plugs เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างโมดูลแบตเตอรี่ ซึ่งต้องถอดได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องมือช่วย ทีมเลือกใช้ Maintenance Plugs รุ่น Amphenol, SLP Plug EV Connector และ HVSL1200 EV Connector ที่มี Interlock ในตัว</p>
	<p>17. HIGH VOLTAGE DISCONNECT (HVD) อุปกรณ์นี้จะต่ออยู่ระหว่างขั้วบวกของแบตเตอรี่แรงดันสูงกับกล่อง Controller เมื่อเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน บุคคลที่สามารถมาดึงอุปกรณ์นี้ได้ คือคนที่อยู่ภายนอกตัวรถเท่านั้น และจะต้องมีความรู้และความเข้าใจในอุปกรณ์ชิ้นนี้ และสามารถเข้ามาดึงตัว (HVD) ออกเพื่อตัดการจ่ายไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งต้องตัดการเชื่อมต่ออย่างน้อยหนึ่งขั้วตามกฎ ข้อที่ (EV4.7.1) HVD</p>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 วงจรไฟฟ้าระบบส่งกำลัง Tractive System

ในวงจรนี้จะเป็นส่วนของการเชื่อมต่อของกล่องควบคุมเข้ากับมอเตอร์ ซึ่งทางทีมได้ใช้สายสัญญาณสองส่วนคือ สายสัญญาณ X1 เป็นสายเชื่อมต่อของระบบควบคุมทั้งคันที่ส่งผลให้ Motor ทำงาน เช่น การเชื่อมต่อคันเร่ง การเชื่อมต่อ BMS เพื่อเป็นตัวสั่งให้มอเตอร์ทำงาน FRG/RUN และสายสัญญาณ X7 จะเป็นการเชื่อมต่อของสัญญาณ Resolver connection X7 เพื่อรับข้อมูลย้อนกลับจาก Encoder Sensor ซึ่งการทำงานจะจับตามรอบของมอเตอร์แล้วจะส่งสัญญาณกลับมาที่กล่องควบคุม เพื่อสั่งให้จ่ายกระแสไฟเพิ่มเข้าไปที่มอเตอร์ ที่สำคัญถ้าสายใดสายหนึ่งหลุดมอเตอร์จะไม่สามารถการทำงาน แสดงตามรูปที่ 3.22 และ 3.23



รูปที่ 3.22 การเชื่อมต่อของกล่อง Controller

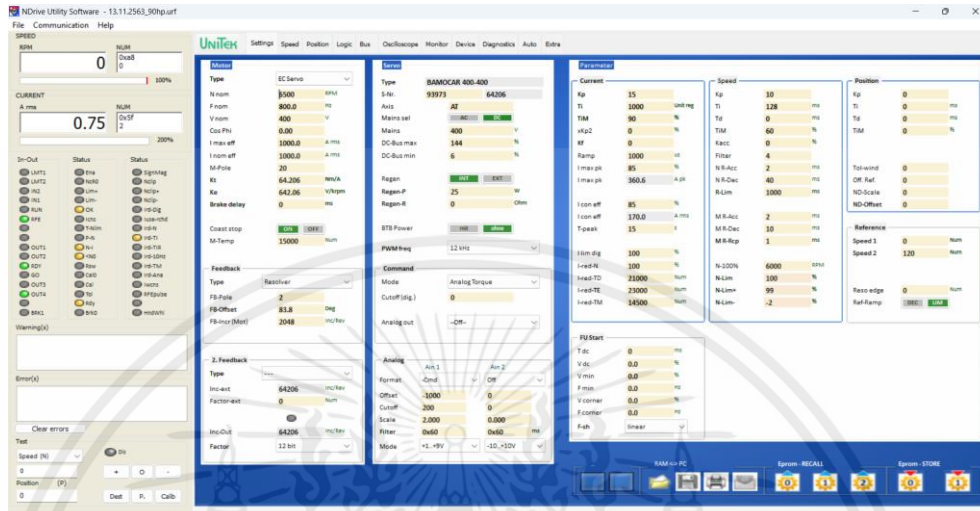
	X1-D		X1-U		X1-H
	X1-T		X1-C		X1-J
	X1-G		X1-K		

รูปที่ 3.23 สีของสายสัญญาณ X1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 เครื่องมือเก็บผลการทดลอง

3.2.1 โปรแกรม N Drive เป็นซอฟต์แวร์ของกล่องควบคุม Unitek แสดงตามรูปที่ 3.24 โดยใช้สำหรับปรับเซตพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้มอเตอร์ส่งกำลังทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.24 โปรแกรม N Drive V3.03.62 ของกล่องควบคุม Unitek

3.2.2 Garmin GPS เป็นเครื่องมือที่ใช้วัด ความเร็ว ระยะทาง เวลา โดยเชื่อมต่อกับ ดาวเทียมและสมาร์ตโฟนเพื่อดูค่าตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บค่าต่างๆ ได้ แสดงตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 Garmin GPS V7.17.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.3 นาฬิกาจับเวลา (Timer)** เป็นเครื่องมือใช้สำหรับจับเวลาในระหว่างทำกิจกรรมต่างๆ เป็นระยะเวลาสั้นๆ เช่น การแข่งขันกีฬา การทดลองในห้องปฏิบัติการ การทำข้อสอบ หรือใช้กับเครื่องจักรต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม แสดงตามรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 นาฬิกาจับเวลา รุ่น FASTIME

**3.2.4 มัลติมิเตอร์** เป็นเครื่องมือวัดที่สามารถวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้หลายอย่าง สามารถวัดได้ทั้งกระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับ เช่น วัดแรงดันไฟฟ้า ความต้านทาน และกระแสไฟฟ้า แสดงตามรูปที่ 3.27 มัลติมิเตอร์บางชนิดสามารถวัดคุณสมบัติเพิ่มเติมได้ เช่น อุณหภูมิและความจุ



รูปที่ 3.27 มัลติมิเตอร์รุ่น UNI-T UT204+

**3.2.5 สนามแข่งขัน** ทีมได้จำลองสนามแข่งขันตามมาตรฐานของ TSAE ซึ่งประกอบไปด้วย 4 สนาม ได้แก่

1. Acceleration เป็นสนามทดสอบความเร็วของรถแข่ง มีระยะทางตรงยาว 75 เมตร แสดงตามรูปที่ 3.28
2. Skid pad เป็นสนามทดสอบความสามารถในการเข้าโค้งของรถแข่ง โดยลักษณะสนามจะเป็นเลข 8 รถแข่งจะวิ่งวนฝั่งละ 2 รอบ แสดงตามรูปที่ 3.29

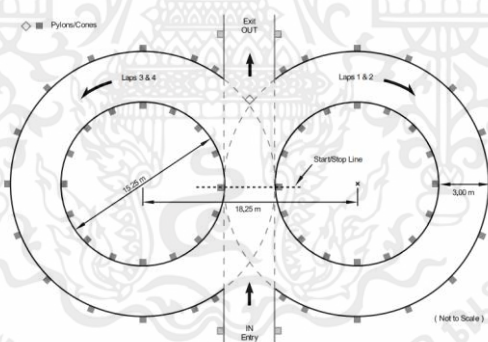
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Autocross เป็นสนามแข่งขันแบบ 1 รอบสนาม โดยจะมีทั้งทางตรง ทางโค้ง และทางซิกแซก แสดงตามรูปที่ 3.30

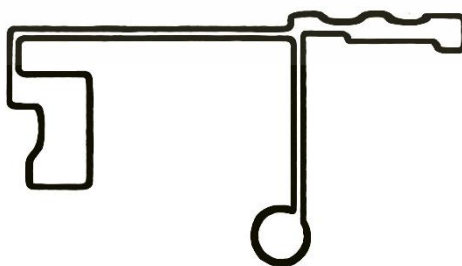
4. Endurance เป็นสนามแข่งขันความอดทน หรือความทนทานของรถ โดยขับที่แบบ 22 รอบสนาม ซึ่งจะมีทั้งทางตรง ทางโค้ง และทางซิกแซก แสดงตามรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.28 สนาม Acceleration



รูปที่ 3.29 สนาม Skid pad



รูปที่ 3.30 สนาม Autocross และสนาม Endurance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

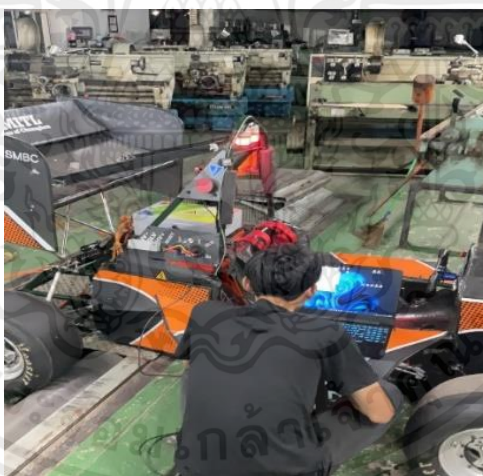
### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินโครงการ

3.3.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า เช่น ระบบแบตเตอรี่ ระบบมอเตอร์ รวมถึงวงจรไฟฟ้าภายในยานยนต์ไฟฟ้า โดยเอาแต่ละระบบมาแยกชิ้นส่วนศึกษาและปรับเปลี่ยนเพื่อแก้ไขปัญหาที่พบในการแข่งขันครั้งก่อนให้เหมาะสมและตรงกับกฎการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2023 Student Formula EV

3.3.2 ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ โดยนำข้อมูลที่ศึกษาในข้างต้นมาเป็นหลักในการออกแบบและคำนึงถึงกฎการแข่งขัน พร้อมทำแบบจำลองด้วยโปรแกรม Solid work เพื่อทดสอบว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่

3.3.3 สร้างชิ้นส่วนต่างๆ ตามแบบ แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกัน พร้อมติดตั้งวงจรไฟฟ้าทั้งหมด

3.3.4 ปรับเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบการจัดการแบตเตอรี่และกล่องควบคุมบน Dyno Test แสดงตามรูปที่ 3.31 เพื่อให้มอเตอร์สามารถส่งกำลังอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 3.31 การปรับเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในโปรแกรม N Drive และโปรแกรม EMUS CP 2.10.0 Dyno Test

3.3.5 ตรวจสอบระบบการทำงานต่างๆ ของรถแข่งทั้งหมด รวมถึงตรวจสอบ Inspection อีกครั้ง เพื่อดูว่าชิ้นส่วนทุกอย่างผ่านกฎกติกาหรือไม่ เพื่อให้มีความพร้อมสำหรับการทดสอบเก็บผล ซึ่งเป็นการทดสอบในลักษณะเสมือนการแข่งขันจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4. ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.4.1 การทดสอบการจำกัดกระแสไฟฟ้า ของการแข่งขันในสนาม Acceleration, Skid pad และ Autocross

3.4.1.1 ติดตั้ง GPS เพื่อวัดความเร็ว และตั้งค่าจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า 150 แอมป์ ในโปรแกรม N Drive แสดงตามรูปที่ 3.32 และ 3.33

3.4.1.2 นำรถทำการทดสอบการขับชี่ในสนาม Acceleration พร้อมบันทึกเวลา และความเร็วของ การขับชี่ โดยการทดสอบ 4 ชี่ แสดงตามรูปที่ 3.34

3.4.1.3 ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อที่ 3.4.1.1 ถึง 3.4.1.2 โดยตั้งค่าจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า 200 แอมป์ และ 250 แอมป์ ในโปรแกรม N Drive

3.4.1.4 ทำการทดสอบการขับชี่ซ้ำในหัวข้อที่ 3.4.1.1 และ 3.4.1.3 ในสนาม Skid-pad และ Autocross พร้อมบันทึกเวลา ของการขับชี่ โดยการทดสอบ 4 ชี่ แสดงตามรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36

#### 3.4.2 การเก็บผลระยะทางต่อ 1 การชาร์จ โดยการขับชี่ในสนาม Endurance

3.4.2.1 ติดตั้ง GPS เพื่อวัดระยะทาง และชาร์จแบตเตอรี่จนเต็ม แสดงตามรูปที่ 3.32 และ 3.37

3.4.2.2 ทดสอบการขับชี่ในสนาม Endurance พร้อมบันทึกระยะทาง และจำนวนรอบของการขับชี่ แสดงตามรูปที่ 3.38

3.4.2.3 ทดสอบขับชี่จนเหลือแบตเตอรี่ 15 เปอร์เซ็นต์ (แรงดันไฟฟ้าลดลงถึง 220 โวลต์) แสดงตามรูปที่ 3.39 และทำซ้ำ 3 ครั้ง ต่อการชาร์จ 1 ครั้ง



รูปที่ 3.32 การติดตั้ง GPS เพื่อวัดความเร็ว



รูปที่ 3.33 การตั้งค่าจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 การทดสอบขับซิ่งรถในสนาม Acceleration



รูปที่ 3.35 การทดสอบขับซิ่งรถในสนาม Skid-pad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.36 การทดสอบขับซิ่งรถในสนาม Autocross



รูปที่ 3.37 การชาร์จแบตเตอรี่จิ้นเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 การทดสอบการขับขี่ในสนาม Endurance



รูปที่ 3.39 ทดสอบขั้วจันเหลือแบตเตอรี่ 15 เปอร์เซ็นต์

3.4.2 การเก็บผลระบบ Shutdown Circuit โดยทดสอบตามเอกสาร Inspection ของกฎการแข่งขัน TSAE แสดงตามรูปที่ 3.40 โดยตรวจสอบทั้งหมด 32 ส่วน ซึ่งประกอบด้วย การเลือกใช้ งานอุปกรณ์ไฟฟ้า การทำงานของวงจรสตาร์ท วงจร BSPD วงจร Ready to Drive Sound วงจร IMD วงจร TSAL และวงจรคายประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.40 การตรวจสอบตามเอกสาร Inspection

### 3.4.3.1 การทดสอบวงจรสตาร์ท

3.4.3.1.1 ทำการเปิดสวิตช์ขับเคลื่อนประกอบด้วย TS และ GLV จะขึ้นไฟแสดงสถานะเป็นสีเขียว จากนั้นกดปุ่ม Start โดยไม่เหยียบแป้นเบรก แล้วสังเกตการเปลี่ยนสถานะของหลอดไฟ

3.4.3.1.2 ทำการปิดสวิตช์ แล้วทำการเริ่มทดสอบใหม่ตามหัวข้อ 3.4.3.1.1 โดยทำการเหยียบแป้นเบรกพร้อมกับกดปุ่ม Start แล้วสังเกตจากไฟแสดงสถานะที่เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง

3.4.3.1.3 ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้งแล้วทำการจดบันทึกผล

### 3.4.3.2 การทดสอบวงจรBSPD

3.4.3.2.1 ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อ 3.4.3.1.2 ไฟแสดงสถานะจะต้องเปลี่ยนเป็นสีแดง แล้วกดปุ่ม Run เพื่อเริ่มการทดสอบ โดยเหยียบคันเร่งที่ 25 เปอร์เซ็นต์ จึงทำการเหยียบเบรก แล้วสังเกตการเปลี่ยนสีของไฟแสดงสถานะจะต้องเปลี่ยนเป็นสีเขียว.

3.4.3.2.2 ทำการปิดสวิตช์ แล้วเริ่มทำการทดสอบใหม่ตามหัวข้อ 3.4.3.2.1 โดยเหยียบคันเร่งต่ำกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ แล้วทำการเหยียบเบรกแล้วสังเกตสีของไฟแสดงสถานะจะต้องยังคงเป็นสีแดง

3.4.3.2.3 ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง แล้วทำการจดบันทึกผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3.3 การทดสอบวงจร Ready to Drive Sound

3.4.3.3.1 ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อ 3.4.3.1.2 เมื่อกดปุ่ม Start แล้ว Ready to Drive Sound จะต้องทำงานไม่เกิน 3 วินาที

3.4.3.3.2 ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำ แล้วทำการจดบันทึกผล

### 3.4.3.4 การทดสอบวงจร IMD

3.4.3.4.1 ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อ 3.4.3.1.2 เมื่อไฟสถานะเป็นสีแดง ให้ทำการลัดวงจรขั้ว HV- และขั้ว GLV แล้วเริ่มจับเวลา IMD จะต้องตัดการทำงานจะต้องไม่เกิน 30 วินาที ไฟแสดงสถานะต้องเปลี่ยนเป็นสีเขียว

3.4.3.4.2 ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ซ้ำแล้วทำการจดบันทึกผล

3.4.3.4.3 ทำการทดสอบซ้ำในหัวข้อ 3.4.3.1.2 เมื่อไฟสถานะเป็นสีแดง ให้ทำการลัดวงจรขั้ว HV+ และขั้ว GLV แล้วเริ่มจับเวลา IMD จะต้องตัดการทำงานจะต้องไม่เกิน 30 วินาที ไฟแสดงสถานะต้องเปลี่ยนเป็นสีเขียว

3.4.3.4.4 ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำแล้วทำการจดบันทึกผล

### 3.4.3.5 การทดสอบวงจร TSAL

3.4.3.5.1 ทำการเปิดสวิตช์ขับเคลื่อนประกอบด้วย TS และ GLV ไฟแสดงสถานะจะต้องเป็นสีเขียว และเมื่อเหยียบเบรกพร้อมกดปุ่มสตาร์ท ไฟแสดงสถานะจะต้องเปลี่ยนเป็นสีแดง

3.4.3.5.2 ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำแล้วทำการจดบันทึกผล

### 3.4.3.6 การทดสอบวงจรคายประจุไฟฟ้า

3.4.3.6.1 ทำการกดสวิตช์ฉุกเฉิน แล้วนำมัลติมิเตอร์มาวัดที่ขั้ว HV- และ HV+ จะต้องคายประจุไฟฟ้าออกจากระบบจนเหลือต่ำกว่า 60 โวลต์ ภายใน 5 วินาที

3.4.3.6.2 ทำการทดสอบจำนวน 3 ซ้ำแล้วทำการจดบันทึกผล

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

เตรียมอุปกรณ์การทดลอง และสร้างสนามทดสอบ Acceleration, Skid pad, Autocross จากนั้นปรับเซตค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามค่าที่กำหนด เพื่อทำการทดสอบ โดยการทดสอบแบ่งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 การทดสอบหาเวลาที่ตีดีที่สุด และความเร็ว เมื่อมีการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 150 200 และ 250 แอมป์ โดยวิ่งแข่งขันในสนาม 3 สนาม ได้แก่ สนามทางตรง (Acceleration) สนามทางโค้ง (Skid pad) สนาม Autocross โดยจะมีทั้งทางตรง ทางโค้ง และทางซิกแซกแบบ 1 รอบสนาม รูปแบบที่ 2 การทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ โดยการขับขี่ในสนาม Endurance รูปแบบที่ 3 การทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit ของรถตามเอกสาร inspection ตามกฎการแข่งขัน TSAE

#### 4.1 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1.1 การทดลองการจำกัดกระแสไฟฟ้า เมื่อแข่งขันในสนาม Acceleration, Skid-pad และ Autocross

4.1.1.1 ผลการทดสอบรถในสนามทางตรง (Acceleration) แสดงตามตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางผลการทดสอบความเร็วสูงสุดในการทดสอบในสนาม Acceleration

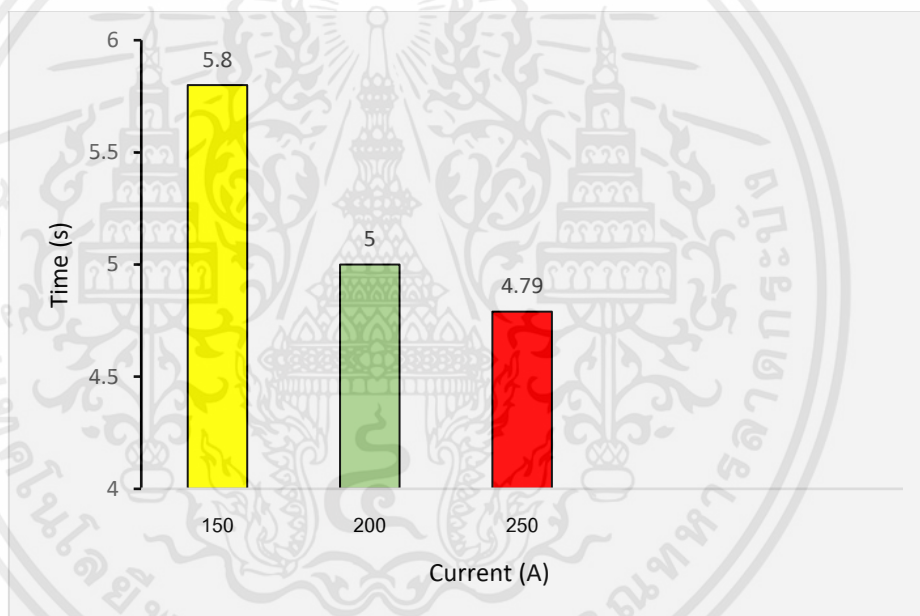
Max speed Laps time	Limit Inverter Current [A]		
	150 A	200 A	250 A
Max speed Laps time 1 [km/h]	75	76.6	77.5
Max speed Laps time 2 [km/h]	75.8	77.8	78.1
Max speed Laps time 3 [km/h]	76.5	77.2	78.5
Max speed Laps time 4 [km/h]	76.2	77.4	78.6
Average speed [km/h]	75.8	77.25	78.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางผลทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในการทดสอบสนาม

Acceleration

ตารางแสดงผลการทดลอง การแข่งขัน Acceleration เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า			
Laps time	Limit Inverter Current [A]		
	150 A	200 A	250 A
Laps time 1 [s]	5.8	4.99	4.79
Laps time 2 [s]	5.79	4.98	4.81
Laps time 3 [s]	5.86	5.06	4.92
Laps time 4 [s]	5.77	4.98	4.87
Average laps time [s]	5.8	5	4.79



รูปที่ 4.1 แสดงเวลาเฉลี่ยของการทดสอบสนามทางตรง (Acceleration) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน

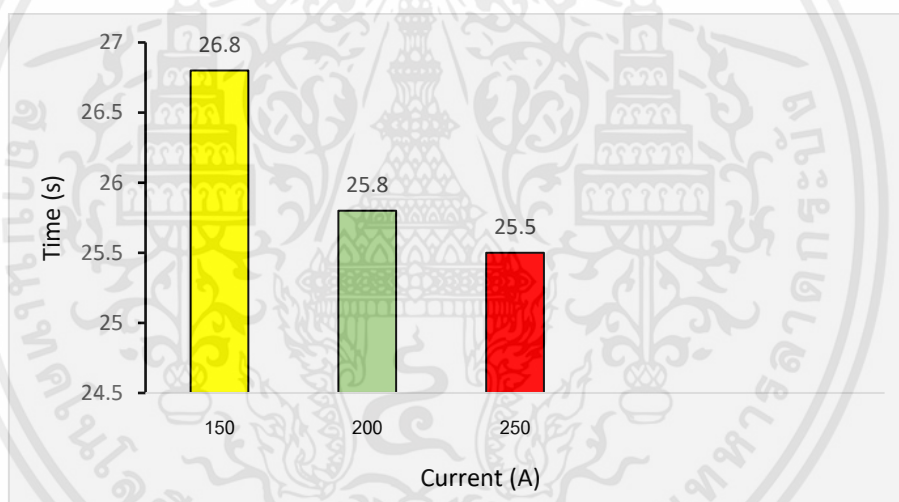
จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าการจำกัดกระแส 250 แอมป์ เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 4.79 วินาที ที่การจำกัดกระแส 200 แอมป์ เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 5 วินาที ที่การจำกัดกระแส 150 แอมป์ เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 5.8 วินาที เนื่องจากที่การจำกัดกระแส 250 แอมป์ มอเตอร์สามารถดึงกระแสได้สูงที่สุดทำให้ได้อัตราเร่งไปจนถึงความเร็วสูงสุดได้เร็วกว่า 150 แอมป์ และ 200 แอมป์ ทั้งนี้การจำกัดกระแสสูงสุดไม่ควรเกินความสามารถในการปล่อยกระแสสูงสุดของอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1.2 ผลการทดลองขับขี่รถในสนามทางโค้ง (Skid-pad)

**ตารางที่ 4.3** ตารางผลทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของเบตเตอร์และคะแนนของการแข่งขันของการวิ่งในสนาม Skid-pad

Laps time	Limit Inverter Current [A]		
	150 A	200 A	250 A
Laps time 1 [s]	27.07	26.1	25.55
Laps time 2 [s]	26.43	25.72	25.5
Laps time 3 [s]	27.03	25.6	25.59
Laps time 4 [s]	26.5	25.77	25.54
Average laps time [s]	26.8	25.8	25.5



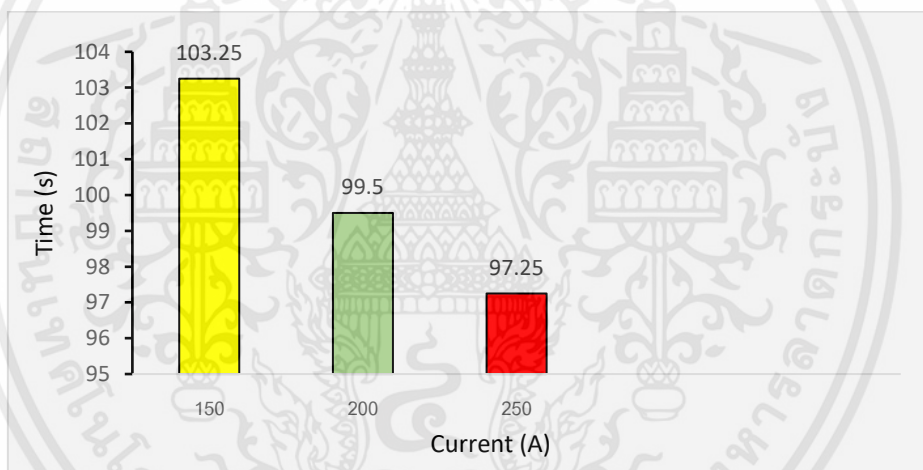
**รูปที่ 4.2** แสดงเวลาที่ได้ของการวิ่งสนามทางโค้ง (Skid pad) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าการจำกัดกระแส 250 แอมป์ ได้เวลาเฉลี่ย 25.5 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับการจำกัดกระแส 200 แอมป์ ที่เวลาเฉลี่ย 25.8 วินาที เนื่องจากพฤติกรรมการขับขี่ที่ใช้ อัตราเร่งและการควบคุมการเข้าโค้งของรถมากกว่าการขับขี่ที่ความเร็วสูงสุด แต่เมื่อเปรียบเทียบการ จำกัดกระแสที่ 150 แอมป์ จะเห็นได้ว่าใช้เวลาเฉลี่ย 26.8 วินาที ซึ่งมากที่สุดเนื่องจากอัตราเร่งที่ช้ากว่า ดังนั้นควรเลือกใช้การจำกัดกระแสสูงสุดที่ 250 แอมป์ ดีที่สุด

#### 4.1.1.3 การขับขี่รถในสนามแบบ 1 รอบสนาม (Autocross)

ตารางที่ 4.4 ตารางการทดสอบการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และคะแนนของการแข่งขันของการวิ่งในสนาม Autocross

Laps time	Limit Inverter Current [A]		
	150 A	200 A	250 A
Laps time 1 [s]	101	99	99
Laps time 2 [s]	105	100	95
Laps time 3 [s]	103	101	98
Laps time 4 [s]	104	98	97
Average laps time [s]	101	98	95



รูปที่ 4.3 แสดงเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการทดสอบสนาม (Autocross) เมื่อจำกัดกระแสที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการจำกัดกระแสที่ 250 แอมป์ ใช้เวลา 97.25 วินาที ซึ่งน้อยที่สุดเนื่องจากสนาม Autocross เป็นสนามที่ทดสอบทั้งการควบคุมรถในการเข้าโค้งและยังมีส่วนของสนามที่เป็นทางตรงจึงทำให้การจำกัดกระแสที่ 250 แอมป์ ทำเวลาได้ดีที่สุดเนื่องจากอัตราเร่งในส่วนทางตรงของสนามสามารถทำได้ดี ในการจำกัดกระแสที่ 200 แอมป์ ใช้เวลาในการทดสอบ 99.5 วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกับ 250 แอมป์ และที่การจำกัดกระแสที่ 150 แอมป์ ใช้เวลา 103.25 วินาที จึงควรเลือกใช้การลิมิตกระแสสูงสุดที่ 250 แอมป์ ดีที่สุด

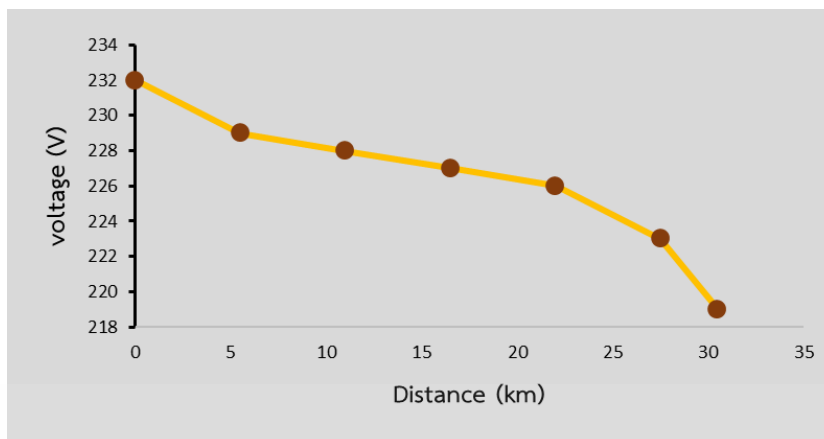
#### 4.1.2 การทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ โดยการทดสอบในสนาม Endurance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การทดสอบระยะทางต่อ 1 การชาร์จ

Laps	Voltage drops (V)	Distance (Km)
Laps 1	232	0
	229	5.5
	228	5.5
	227	5.5
	226	5.5
	223	5.5
	220	3
<b>Total distance per Laps 1</b>		<b>30.5</b>
Laps 2	232	0
	230	5.5
	228	5.5
	226	5.5
	224	5.5
	222	5.5
	220	1
<b>Total distance per Laps 2</b>		<b>28.5</b>
Laps 3	232	0
	230	5.5
	228	5.5
	227	5.5
	225	5.5
	223	5.5
	220	5
<b>Total distance per Laps 3</b>		<b>32.5</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงระยะทางเฉลี่ยต่อ 1 รอบการชาร์จ

จากรูปที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่แพ็คที่ 232 โวลต์ และตัดการทำงานเมื่อแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 220 โวลต์ ในการขับซีสนาม Endurance ที่กำหนดรอบการแข่งขันที่ 22 รอบ หรือประมาณ 22 กิโลเมตร ในช่วงการทดสอบที่ 0 ถึง 5.5 กิโลเมตร มีการลดของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้กราฟมีความชัน แต่ในช่วงการทดสอบที่ 5.5 ถึง 25 กิโลเมตร มีความเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเล็กน้อยทำให้กราฟในช่วงนี้ราบ และช่วง 25 ถึง 30.5 กิโลเมตร มีการลดลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วทำให้กราฟมีลักษณะชัน เมื่อใกล้ถึงขีดความสามารถของแบตเตอรี่ ดังนั้นสรุปได้ว่าแบตเตอรี่แพ็คนี้เพียงพอต่อการแข่งขันและยังสามารถวิ่งได้เฉลี่ย 30.5 กิโลเมตร ต่อ 1 รอบการชาร์จ

#### 4.1.3 การทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit ตามเอกสาร Inspection



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit ของรถตาม

เอกสาร Inspection (ดูเอกสาร Inspection ที่ตรวจแล้ว ได้ที่ภาคผนวก ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ทดสอบความถูกต้องของวงจร Shutdown Circuit

ตารางแสดงความถูกต้องในระบบ Shutdown circuit						
ลำดับที่	การทดลอง	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ผลการทดสอบ	หมายเหตุ
1	Start circuit					อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 6.5
1.1	การเหยียบแป้นเบรกพร้อมกับกดปุ่ม Start (เปิดการทำงาน)	✓	✓	✓	ผ่าน	
1.2	กดปุ่ม Start โดยไม่เหยียบแป้นเบรก (ไม่เปิดการทำงาน)	✓	✓	✓	ผ่าน	
2	วงจร Ready to drive sound	✓	✓	✓	ผ่าน	อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 10.5
3	วงจร Tractive System Active Light (TSAL)	✓	✓	✓	ผ่าน	อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 6.9
4	วงจร Brake System Plausibility Device (BSPD)					อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 8.7
4.1	เหยียบคันเร่งที่ 25 เปอร์เซ็นต์ (ต้องตัดการทำงาน)	✓	✓	✓	ผ่าน	
4.2	เหยียบคันเร่งต่ำกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ (ไม่ตัดการทำงาน)	✓	✓	✓	ผ่าน	
5	วงจร Insulation Monitoring Device (IMD)					อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 8.6
5.1	ขั้ว HV+ และ GND Chassis	2.48 (s)	2.45 (s)	2.50 (s)	ผ่าน (เฉลี่ย 2.47)	
5.2	ขั้ว HV- และ GND Chassis	2.63 (s)	2.55 (s)	2.68 (s)	ผ่าน (เฉลี่ย 2.62)	
6	วงจร Discharge circuit	2.43 (s)	2.62 (s)	2.54 (s)	ผ่าน (เฉลี่ย 2.53)	อ้างอิงมาจากกฎข้อ EV 6.6

จากผลการตรวจสอบ วงจร Shutdown Circuit ตามเอกสาร Inspection อธิบายได้ดังนี้

4.1.3.1. ผลการทดลองระบบสตาร์ท พบว่า เมื่อเหยียบเบรกและกดปุ่มสตาร์ทพร้อมกันระบบขับเคลื่อนจะทำงานได้ ซึ่งถ้าหากไม่เหยียบเบรกและกดปุ่มสตาร์ทพร้อมกันระบบขับเคลื่อนจะไม่ทำงาน

4.1.3.2 ผลการทดลองวงจร BSPD พบว่า เมื่อนักขับเหยียบคันเร่งมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ และเหยียบเบรกพร้อมกัน วงจร BSPD จะการทำงานและรถจะ Shutdown ทันที แต่หากเหยียบคันเร่งน้อยกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ และเหยียบเบรกพร้อมกัน รถสามารถเคลื่อนที่ได้ปกติ

4.1.3.3.เมื่อนักขับสตาร์ทรถ วงจร Ready to Drive Sound จะทำงาน ซึ่งรถมีเสียงแตรดังขึ้น เป็นเวลา 3 วินาที และจะดังขึ้นครั้งเดียวเมื่อนักขับสตาร์ทรถเท่านั้น

4.1.3.4. เมื่อมีเหตุการณ์ที่สายไฟ HV เสียหายชำรุด แล้วไปสัมผัสกับโครงรถ วงจร IMD จะตัดระบบทันที ซึ่งจากการทดลองวงจร IMD เมื่อ short circuit สายไฟขั้วบวก HV+ กับโครงรถ พบว่า ระบบ IMD จะตัดระบบภายในเวลาเฉลี่ย 2.47 วินาที และเมื่อ short circuit สายไฟขั้วลบ HV- กับโครงรถ พบว่า ระบบ IMD จะตัดระบบภายในเวลาเฉลี่ย 2.62 วินาที

4.1.3.5 ผลการทดลองวงจร TSAL เมื่อเปิดสวิตช์ GLV ไฟสถานะจะแสดงไฟสีเขียว ซึ่งเมื่อนักขับสตาร์ทรถไฟสถานะจะแสดงไฟสีแดงกระพริบพร้อมกับการเปิด Main Contactor จ่ายกระแสไฟฟ้า

4.1.3.6 ผลการทดลองวงจรคายประจุไฟฟ้า Discharge Circuit พบว่า เมื่อนักขับกดสวิตช์ฉุกเฉิน หรือ รถเกิดอาการ Shutdown ตัวเองอัตโนมัติ จะมีการคายประจุไฟฟ้าตกค้างออกจากอินเวอร์เตอร์ ให้มีแรงดันต่ำกว่า 60 โวลต์ ภายในเวลาเฉลี่ย 2.53 วินาที

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความแตกต่างของเวลาที่ใช้แข่งขันในสนาม Acceleration Skid pad และ Autocross เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ความสัมพันธ์ของความเร็วสูงสุดของรถในการแข่งขันสนาม Acceleration เมื่อจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ การศึกษาความสัมพันธ์ของระยะทางต่อ 1 การชาร์จ ในการแข่งขันสนาม Endurance และศึกษาและพัฒนาระบบ Shutdown Circuit ให้ตรงตามกฎ TSAE Auto Challenge Student Formula (TSAE) 2022-2023 โดยเลือกใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) รุ่น EMRAX 228 แรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง 470 โวลต์ ให้กำลังมอเตอร์สูงสุด 100 กิโลวัตต์ และแรงบิดของมอเตอร์สูงสุด 230 นิวตันเมตร มีน้ำหนัก 12.4 กิโลกรัม ควบคุมการจ่ายกระแสไฟของแบตเตอรี่และควบคุมความเร็วของซิงโครนัสมอเตอร์ (Synchronous motor) ด้วยคอนโทรลเลอร์ BAMOCAR-PG-D3-400/400 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (LiFePo4) 240 โวลต์ 31 แอมป์อว การออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ อ้างอิงตามกฎกติกาการแข่งขัน TSAE Auto Challenge Student Formula 2022

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ในการทดลองพบว่าในสนามทางตรง (Acceleration) เมื่อจำกัดการจ่ายกระแส 250 แอมป์ ใช้เวลาต่ำสุดเพียง 4.79 วินาที โดยทำความเร็วสูงสุดในระยะทาง 75 เมตร อยู่ที่ 78.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะเห็นได้ว่าอัตราเร่งจะเพิ่มตามกระแสสูงสุดที่จ่ายทำให้ใช้เวลาในช่วงออกตัวจนถึงความเร็วสูงสุดได้ในเวลาที่ต่ำกว่าการจำกัดกระแสสูงสุดที่ 150 แอมป์ และ 200 แอมป์

5.1.2 ในการทดลองพบว่าในสนามทางโค้ง (Skid pad) เมื่อจำกัดการจ่ายกระแส 250 แอมป์ ใช้เวลาต่ำสุดเพียง 25.5 วินาที เนื่องจากพฤติกรรมการขับซี้ในสนามทางโค้ง (Skid pad) จะเน้นในการควบคุมความเร็วและใช้อัตราเร่งในการทำความเร็วขณะเข้าโค้ง โดยจากสรุปผลการวิจัยที่ 5.1.1 การจำกัดกระแสที่ 250 แอมป์ มีอัตราเร่งที่ดีที่สุดจากการทดสอบในสนามทางตรง (Acceleration)

5.1.3 ในการทดลองพบว่าในสนามแบบ 1 รอบสนาม (Autocross) ที่เป็นการทดสอบรวมทั้งสนามทางตรง (Acceleration) และ สนามทางโค้ง (Skid pad) การจำกัดกระแสสูงสุดที่ 250 แอมป์ ทำเวลาต่ำสุดอยู่ที่ 95 วินาที เนื่องจากให้อัตราเร่งที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับการจำกัดกระแสที่ 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมป์ ใช้เวลาอยู่ที่ 101 วินาที และการจำกัดกระแสที่ 200 แอมป์ ใช้เวลาอยู่ที่ 98 วินาที ซึ่งความต่างของเวลาจะเห็นได้ชัดในช่วงทางตรงของสนาม

5.1.4 ในการทดลองพบว่าระยะทางต่อ 1 การชาร์จ โดยการขับขี่ในสนาม Endurance แบตเตอรี่แพ็ค 232V 31Ah จำกัดการจ่ายกระแสสูงสุดไม่เกิน 250 แอมป์ ที่ใช้ในการทดสอบเพียงพอต่อการนำไปใช้แข่งขันในสนาม Endurance ที่กำหนดการแข่งขันที่ 22 รอบ ของสนาม Autocross และยังสามารถทำระยะทางสูงสุดต่อ 1 รอบการชาร์จ ถึง 32.5 กิโลเมตร หรือ 32 รอบของสนาม Autocross

5.1.5 ในการทดลองระบบ Shutdown Circuit พบว่า วงจรที่ทีมออกแบบ ได้แก่ วงจรสตาร์ท วงจร BSPD วงจร Ready to Drive Sound วงจร IMD วงจร TSAL วงจร APPS และวงจรคายประจุไฟฟ้า สามารถตัดระบบได้ทันทีเมื่อรถแข่งเกิดสถานะการฉุดฉีก รวมถึงการเลือกใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดตรงตามเอกสาร Inspection ตามกฎกติกา TSAE.

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์มีผลกับความเร็วสูงสุดของรถหากต้องการเพิ่มความเร็วสูงสุดสามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่แพ็ค โดยไม่เกินขีดความสามารถของคอนโทรลเลอร์ BAMOCAR-PG-D3-400/400

5.2.1 การจ่ายกระแสสูงสุดควรศึกษาจากข้อมูลของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้อย่างละเอียดเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องมาจากการจ่ายกระแสที่สูงเกินความสามารถในการจ่ายกระแสของแบตเตอรี่

5.2.3 การเลือกใช้นิตของแบตเตอรี่ควรเป็นไปตามที่การแข่งขันกำหนด โดยกำหนดไว้ในการประชุมก่อนการแข่งขันในแต่ละปี

5.2.4 ระบบ Shutdown Circuit ควรออกแบบให้ใช้แหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ ทั้งหมด เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟ 12 โวลต์ มีแรงดันไม่พอเพียงที่จะเปิดใช้งาน Main Contactor และกล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400/400

5.2.5 อุปกรณ์ในเส้นทางไฟฟ้าแรงดันสูง เช่น ฟิวส์ (Fuse) ควรติดตั้งห่างจากขั้วบวกของแบตเตอรี่มากกว่า 60 เซนติเมตร และควรมีวัสดุครอบอย่างหนาแน่น เพื่อลดการเกิดไฟไหม้ลุกลามเนื่องจากฟิวส์ขาด รวมถึงอุปกรณ์ตัดไฟฟ้าแรงสูง HVD ควรติดตั้งในตำแหน่งที่เข้าถึงได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 ตำแหน่งเซ็นเซอร์อุณหภูมิแบตเตอรี่ ควรติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิที่ขั้วลบของเซลล์แบตเตอรี่ และกันด้วยเทปฉนวนระหว่างเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิกับขั้วเซลล์ และควรติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ อย่างน้อย 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อชุดโมดูล

5.2.7 ควรเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความดันน้ำมันเบรกในวงจร BSPD แทนการใช้ Micro switch เพื่อลดความผิดพลาดการทำงานของวงจร BSPD

5.2.8 ควรใช้แผ่นเบก้าไลท์สำหรับยึดติดอุปกรณ์ไฟฟ้า แทนการใช้แผ่นอคริลิก เพื่อป้องกันการหลอมละลายเมื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความร้อน

5.2.9 จุดตรวจ Tractive System Measuring Points (TSMP) ทั้ง HV+ และ HV- และ GND จะต้องใช้บานาน่าแจ็ค แบบมีฉนวนหุ้ม เพื่อป้องกันอันตรายเมื่อตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ที่สำคัญจะสามารถวัดแรงดันไฟฟ้าได้เมื่อเปิด Main Contactor แล้วเท่านั้น

5.2.10 วงจร Discharge circuit ควรติดตั้งในกล่องฟิวส์ เพื่อป้องกันการเกิดไฟลุกไหม้เมื่อวงจรทำงานความผิดพลาด ที่สำคัญจะต้องไม่ปิดรีเลย์ในขณะที่แหล่งจ่ายไฟ HV ยังเชื่อมต่ออยู่

5.2.11 ควรเลือกใช้เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ทั้งชุดภายในครั้งเดียว เพื่อป้องกันการเกิดความร้อนของ BMS เมื่อ BMS บาลานซ์แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่

## เอกสารอ้างอิง

- [1] SAE Thailand. (2565) “TSAE Automotive Handbook and Directory 2021-2022” TSAE Steering Thailand’s Automotive Industry to Ever Higher Standards Color Separation and Printing by: Phongwarin Printing Ltd. หน้า 22
- [2] SAE International. (2021) “Formula SAE® Rules 2022.” Accessed 20 August. 2021 Available from [Formula SAE \(fsaonline.com\)](https://www.fsaonline.com)
- [3] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2558). [ออนไลน์]. รายงานการวิจัย เรื่อง การศึกษาการพัฒนาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 3 มกราคม 2566 หน้า 7-8
- [4] ว่าที่ร.ต.ดร. ชัยยศ ดำรงกิจโกศล อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2558) รายงานการวิจัย เรื่อง ยานยนต์ไฟฟ้า ELECTRIC VEHICLE สืบค้นเมื่อ 11 พฤศจิกายน 2565 หน้า 10
- [5] สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ (2561) รายงานฉบับสมบูรณ์ เรื่อง โครงการศึกษาวิจัยถอดแบบชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้ศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าปี พ.ศ.2561 บทที่2 หน้า 1-4
- [6] Adhavan Balashanmugham and Mockaisamy Maheswaran (2019) “Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives” Accessed 7 August. 2022 Available from Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives | Intech Open
- [7] A.P. (2012) **Motor inverter** Accessed 7 August. 2022 Available from [https://www.ap-machinery.com/inverter.html?fbclid=IwAR2O2KyP5i\\_X989](https://www.ap-machinery.com/inverter.html?fbclid=IwAR2O2KyP5i_X989)
- [8] Noppadon, B. (2562). บทความ เรื่อง แบตเตอรี่ลิเธียมมีกี่ชนิด [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2565
- [9] John Warner. (2015). “The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design” [E-Book] Chapter 7 and 9

- [10] EMRAX (2018). “**Technical Data and Manual for EMRAX Motors / Generators**”  
Version 5.1 / August 2018 Accessed 20 August 2022 Available from  
<https://emrax.com/>
- [11] BENDER (2022) คู่มือ “**Insulation monitoring devices**” Accessed 20 September  
2022. Available from [Insulation monitoring: The concept \(bender-apac.com\)](https://www.bender-apac.com/insulation-monitoring-the-concept)
- [12] MAD Formula Team (2021). “**BSPD for Formula Student**” Accessed 29  
September 2022. Available from <https://www.instructables.com/BSPD->
- [13] Liu, M., et al. (2022) “**Research Progress of MEMS Inertial Switches**” หน้า 2
- [14] Deepak G (2020). “**ACTIVE DISCHARGE OF DC LINK CAPACITOR IN SRM DRIVE FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION**” International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2020
- [15] Mario Volaric (2020) “**Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Formula Student competition**” University of Zagreb (UNIZG), Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER)
- [16] Manu Dubey (2020) “**Simulation of Electric Vehicle using Scilab for Formula Student Application**” School of Mechanical Engineering, Vellore Institute of Technology
- [17] Yidan Xua (2019) “**State of charge estimation for lithium-ion batteries based on adaptive dual Kalman filter**” Chongqing University
- [18] Eunji Kwaka (2020) “**Characterization of the mechanical responses of a LiFePO<sub>4</sub> battery under different operating conditions**”
- [19] Weihan Li (2020) “**Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation**” RWTH Aachen University
- [20] Orhan Kalkan (2020) “**Experimental and numerical investigation of the LiFePO<sub>4</sub> battery cooling by natural convection**” Erzincan Binali Yildirim University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] Jialin Lianga (2022) “Numerical analysis of capacity fading for a LiFePO<sub>4</sub> battery under different current rates and ambient temperatures” South China University of Technology
- [22] D.C Meena (2023) “Development of Brake System Plausibility Device of an FSAE Race Car” Delhi Technological University



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

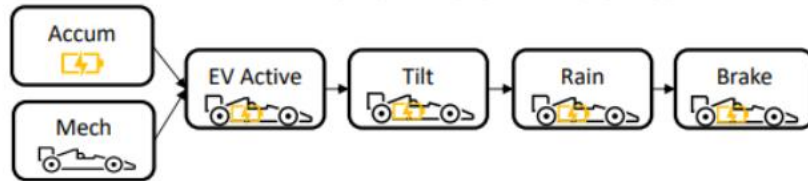
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**IMPORTANT**

PRESENT THE VEHICLE FOR INSPECTION IN THE FOLLOWING ORDER:




THIS FORM MUST STAY WITH THE CAR UNTIL THAT SPECIFIC PART OF INSPECTION HAS BEEN COMPLETED  
NOTE - IF THERE IS A CONFLICT BETWEEN THIS FORM AND THE RULES, THE RULES PREVAIL

ACCUMULATOR INSPECTION			
UNIVERSITY:		INSPECTOR(s):	
ESF Accepted		✓ YES <input type="checkbox"/> NO	
DESIGN			
TSMF	TSMF body protection resistor value.	Io [kΩ]	
TS Fusing	All wiring protected by overcurrent protection with current rating <= ampacity of wire.	Visible check of documentation	✓
	All overcurrent protection in TS must have DC voltage rating >= max TS voltage	Visible check of documentation	✓
	Precharge and discharge circuits must not be fused.	Visible check of documentation	✓
Accumulator	Maintenance plugs must separate the internal cell stacks. Cell stacks must have a voltage less than 120VDC and a maximum energy of 6MJ. The separation has to affect both poles of the stack.	Per Stack: Max Voltage: 255.5 [V] Max Energy: 5.7 [MJ]	✓
	AMS must monitor the temperature of at least 20% of the cells	Visible check	
	Temperature sensor must be in direct contact with negative terminal or <10mm away on the bus bar	Visible check	✓
Shutdown/Safety Circuits	Shutdown buttons directly carry current of AIRs and precharge relay	Visible check of documentation	✓
	IMD, BMS, and BSPD have independent relays or transistors to open the shutdown circuit.	Visible check of documentation	✓
	An interlock line opens the AIRs whenever the HVD is removed.	Visible check	✓
APPS	Must have at least two sensors not sharing supply or signal lines.	Visible check	✓
	The transfer functions of the two sensors must not cross.	Visible check	✓

รูปที่ ก.1 เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน Ts, แบตเตอรี่, Shutdown/Safety Circuits และ APPS (Inspection Electrical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Car \_\_\_\_\_ **2022 Electrical Inspection Form** Page 2

ACCUMULATOR			
HV warning stickers	Accumulator housing must be labeled with "High Voltage" and 	Visible check	✓
Separation on self-developed PCBs	GLV and TS circuits have at least the spacing specified in EV.7.5.7.	Visible check	
HV Path	Bolted connections in the high current path must have a positive locking mechanism. <b>Lock washers and thread locking compound are NOT allowed.</b>	Visible check	✓
	Soldering is not allowed in the high current path.	Visible check	
Internals	The poles of the accumulator stack(s) and cells must be insulated against the inner wall of the accumulator container if the container is made of electrically conductive material.	Visible check	✓
	Every accumulator container must contain at least one fuse in the high current path.	Visible check	✓
	No always energized TS wires leaving accumulator container (All TS wires leaving accumulator disconnected by an AIR).	Visible check	✓
	Branch circuits are fused within 600mm of source.	Visible check	✓
	Fuse and AIRs must be separated from the rest of the enclosure by an electrically insulating fireproof material.	Visible check	✓
Maintenance Plugs	Maintenance plugs can be removed without tools.	Visible check	✓
	Surfaces of the maintenance plugs must be non-conductive except as required to make the electrical connection.	Visible check	✓
	Maintenance plugs cannot be incorrectly installed.	Visible check	✓
Internals - Cell stacks	Each stack has to be electrically insulated by the use of suitable materials towards other stacks in the container and on top of the stack. <b>Air is not a suitable insulation material in this case.</b>	Visible check	✓
	The contained cell stacks must be separated by an insulating and fire resistant (according to UL94-V0, FAR25 or equivalent) barrier.	Visible check	✓
Indicator Light	Each container must have an indicator showing that voltages greater than 60V DC are present outside of the container. <b>Indicator must function with accumulator removed from vehicle.</b>	Visible check	✓
Accumulator Container Connectors	All Tractive System connectors outside of an enclosure must include an interlock.	Visible check	
Spare accumulator(s)	Must have the same size, weight and type	Visible check	
Chargers	Charger connector must incorporate an interlock such that the connectors only become live if is correctly connected.	Visible check	
	HV charging leads must be orange.	Visible check	
Energy Meter	Energy Meter Installed (if located in accumulator) Energy Meter provided (if not in accumulator)	Visible check	
<b>!!TEST AT HIGH VOLTAGE!!</b> <b>Pack removed on charging cart</b>			
Accumulator Indicator	Accumulator Indicator indicates if voltage above 60VDC is present outside of the container.	Visible check	✓
Charging	Emergency stop button on charger stops charging	TS voltage must decrease below 60VDC in 5 sec	✓
	IMD must open shutdown circuit in 30 seconds when isolation fault is present.		
	1. Activate Tractive System 2. Connect IMD test box between TSMP and GLVS Ground. 3. IMD must trip in 30 seconds and TS voltage must decrease below 60VDC in 5 sec.	Perform Test	✓
	When charging, the AMS must be live and must be able to turn off the charger in the event that a fault is detected.	Set vehicle to charge. Team must demonstrate AMS is active.	✓

รูปที่ ก.2 เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบภายในกล่องแบตเตอรี่,และระบบชาร์จแบตเตอรี่รถ (Inspection Electrical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Car Evo2 **2022 Electrical Inspection Form** Page 3

DEMONSTRATION			
CAR MUST BE JACKED UP WITH DRIVEN WHEELS REMOVED.			
UNIVERSITY:		INSPECTOR(s):	
Energy Meter	Energy meter installed in vehicle	Confirm with team	
Measurements			
GLVS ground	Measure GLVS grd for conductive surface <100mm from a TS component, must be < 300 mOhm.	66 mΩ	
Discharge Circuit and Body Protection Resistors	1. Measure resistance between TSMP HV- and TSMP HV+ Vmax < 200V => 10k + discharge 200V < Vmax < 400V => 20k + discharge 400V < Vmax < 600V => 30k + discharge	47 kΩ	
!!TEST AT HIGH VOLTAGE!!			
Insulation Measurement Test	Measure isolation between TSMP and chassis ground. Choose next voltage level above TS voltage (250V or 500V) R iso >= 500 * TS Voltage + BPR	HV+ 180 MΩ	
		HV- 180 MΩ	
Ready-To-Drive Mode	Additional actions required to enter Ready-To-Drive 1. Energize the TS 2. Press Accelerator pedal	Verify motors DO NOT SPIN.	✓
Tractive System Active Light	The TSAL must be solid green when GLV turned on and the voltage outside of accumulator container is less than 60V DC.	Visible check	✓
	The TSAL must be flashing red when GLV turned on and the voltage outside of accumulator container exceeds 60V DC.	Visible check	✓
	The TSAL must be red and clearly visible even in bright sunlight.	Visible check	✓
IMD Test	IMD must open shutdown circuit in 30 seconds when isolation fault is present. 1. Activate Tractive System 2. Connect IMD test box between TSMP and GLVS Ground. 3. IMD must trip in 30 seconds and TS voltage must decrease below 60VDC in 5 sec.	Test HV+ 2.87 S	✓
		Test HV- 2.98 S	✓
IMD	IMD indicator light inside the cockpit must be marked with "IMD", must be RED, and must be visible in bright sunlight.	Visible check	✓
IMD or BMS Error disables TS	The tractive system may not automatically return to active state after the IMD test resistor was removed or a BMS error disabled it. The driver must not be able to reactive the tractive-system.	Demonstrated by the team	✓
master switches, shutdown buttons and brake-over-travel-switch and interlocks	All switches on --> TS Master switch off		✓
	All switches on --> GLV Master switch off	TS voltage must decrease below 60VDC in 5 sec 2.19 S	✓
	All switches on --> left shutdown button off		✓
	All switches on --> right shutdown button off		✓
	All switches on --> Cockpit shutdown button off	Allow team to set pace of tests to prevent overheating precharge / discharge resistors.	✓
Inertia switch	All switches on --> brake-over-travel-switch off		✓
	All switches on --> Open Interlock(s) of outboard wheel motor (if applicable)		✓
Inertia switch	Unmount inertia switch. Activate TS and measure HV voltage. Shake the switch and check if TS is shutdown.	TS voltage must decrease below 60VDC in 5 sec	✓

รูปที่ ก.3 เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบไฟฟ้าแรงสูงภายในรถ เช่น GLVS,Tractive System Ready to Drive Sound, Insulation Monitoring Device (IMD) ,Discharge (Inspection Electrical)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Car Evo2 2022 Electrical Inspection Form Page 4

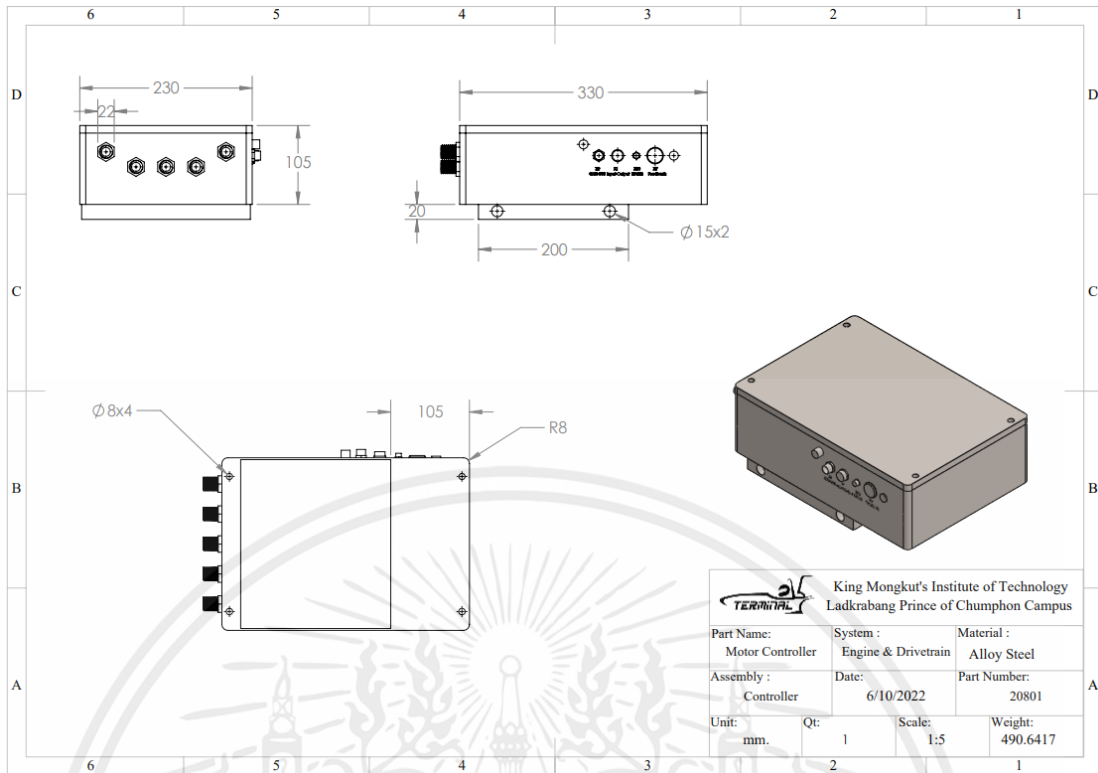
Ready-To-Drive Mode	Additional actions are required to set the car to ready-to-drive mode 1. Enable TS 2. Press brake and start button 3. Press Accelerator, <b>motors SHOULD spin</b> 4. Press shutdown button 5. Release shutdown button and enable TS 6. Press Accelerator, <b>motors SHOULD NOT spin</b> 7. Press brake and start button 8. Press Accelerator, <b>motors SHOULD spin</b>	The team must demonstrate how the car is set to Ready-To-Drive mode by the driver (pressing the brake pedal is mandatory)	✓
Ready-To-Drive-Sound Test	The car must make a characteristic sound, once but not continuous, for at least 1 second and a maximum of 3 seconds when it is ready to drive. The sound level must be a minimum of 80dBA, fast weighting, in a radius of 2m around the car. The used sound must be easily recognizable.	Check for Ready-To-Drive sound when team starts vehicle.	✓
APPS / Brake Pedal Plausibility Check	Torque production must stop when accelerator and brake pedal are pressed simultaneously 1. Press accelerator to show that axle turns. 2. With accelerator > 25%, press brake pedal. <b>Axle must stop</b> 3. Keeping accelerator >25%, release brake pedal. <b>Axle must remain stopped.</b> 4. Slowly release accelerator, <b>axle may turn again once &lt; 5% pedal position.</b>	Team demonstration per procedure	✓
APPS Implausibility Check	Torque production must stop if APPS are implausible. 1. Press accelerator to show that axle turns. 2. Unplug all but 1 APPS. 3. Press accelerator, <b>axle must not turn.</b>	Team demonstration per procedure	✓
Brake System Plausibility Device	A standalone non-programmable circuit must open the AIRs when braking hard and a positive current is delivered from the motor controller. The current limit must be set at a 5kW at the nominal battery voltage. The action of opening the AIRs must occur if the implausibility is persistent for more than 0.5 sec.	The team must provide a test. The sensor must be included in the test.	✓
	The BSPD may not be reset by a driver accessible control.	Check that the driver controls do not reset the BSPD	✓
Energy Meter	Energy Meter functional. Download data from active tests.	Data verified	✓
<b>!! Test at High Voltages Completed !!</b>			
<b>TRACTIVE SYSTEM HAS TO BE SHUT-OFF!</b>			
APPROVED BY:		DATE/TIME:	

รูปที่ ก.4 เอกสารตรวจระบบไฟฟ้าในส่วน ระบบไฟฟ้าแรงสูงภายในรถ เช่น Ready to Drive ,Ready to Drive Sound, Brake System Plausibility Device (BSPD) (Inspection Electrical)

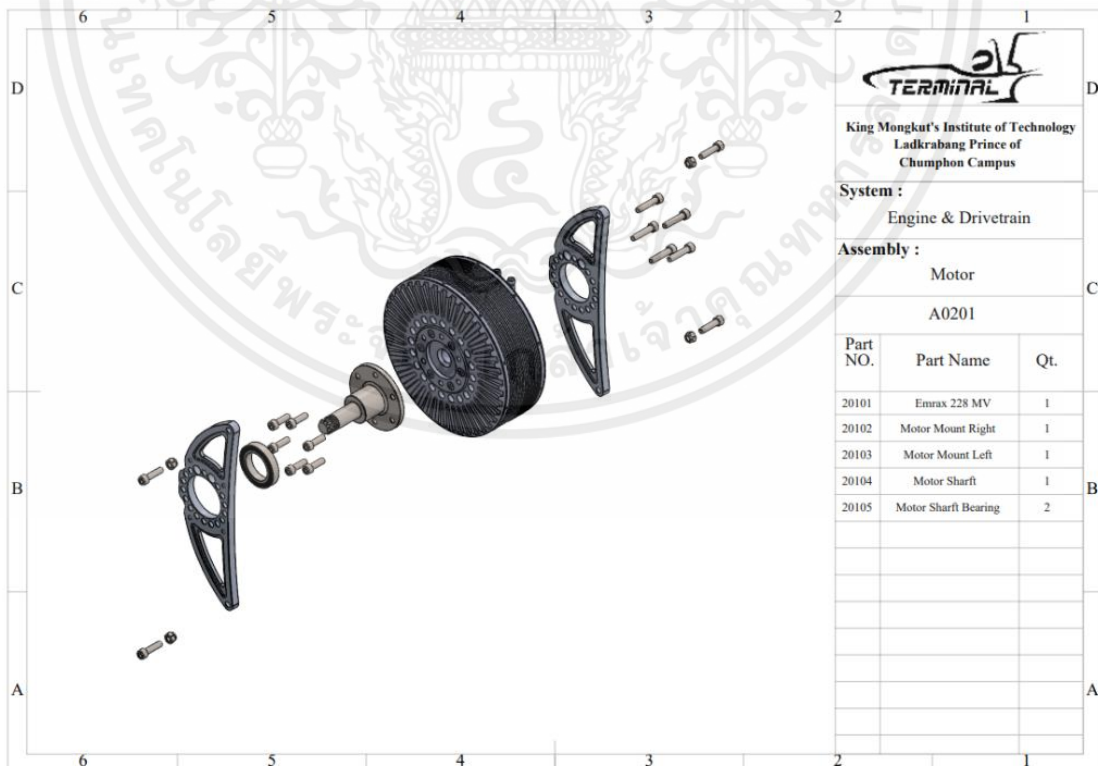
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

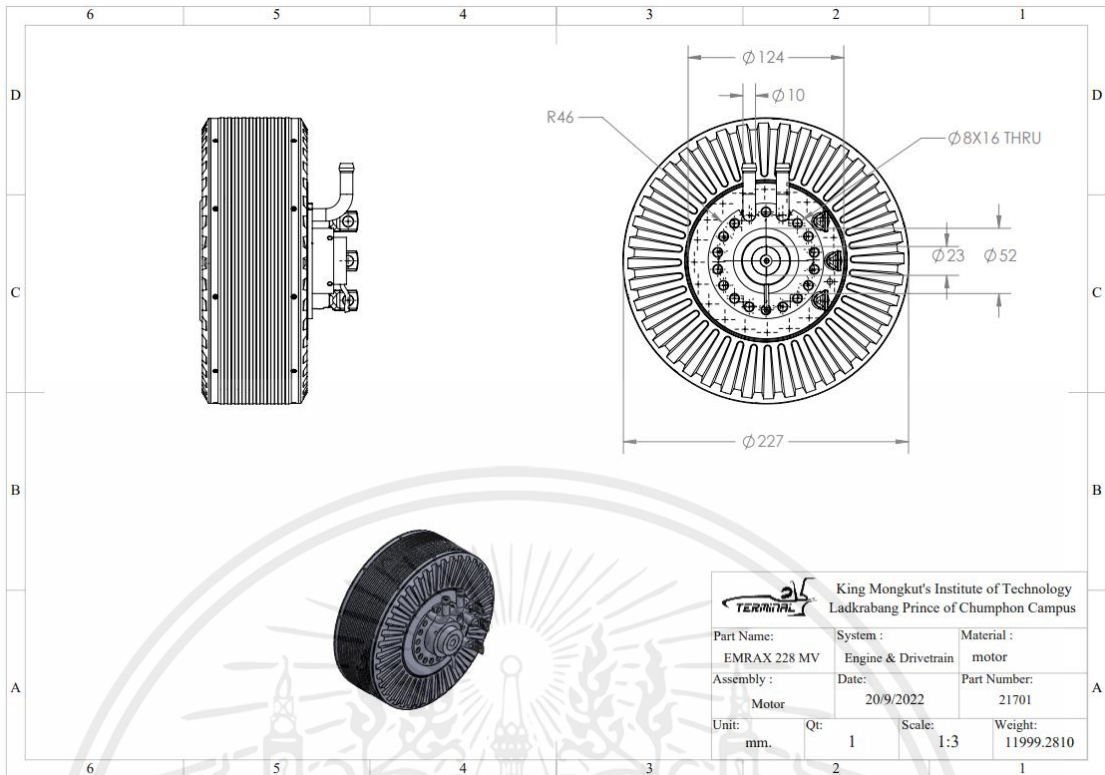


รูปที่ ข.1 กล่องคอนโทรล (Motor Controller BAMOCAR-PG-D3-400/400)

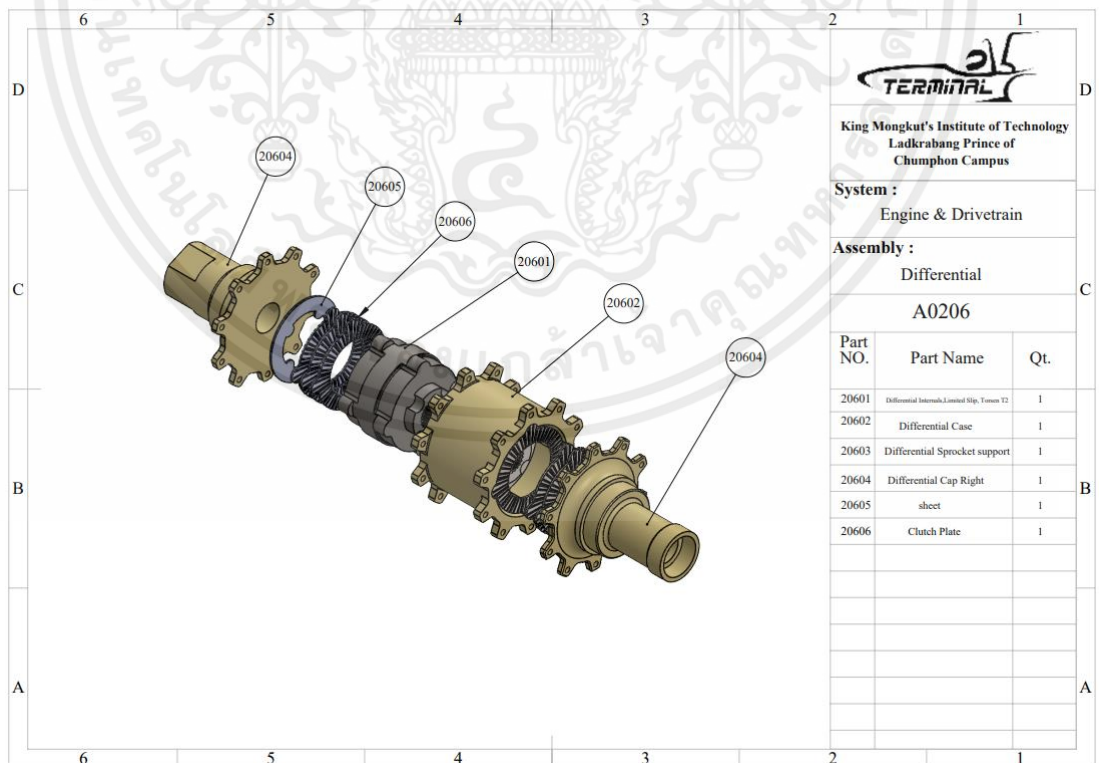


รูปที่ ข.2 ส่วนประกอบของของมอเตอร์ (Motor EMRAX 228 MV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

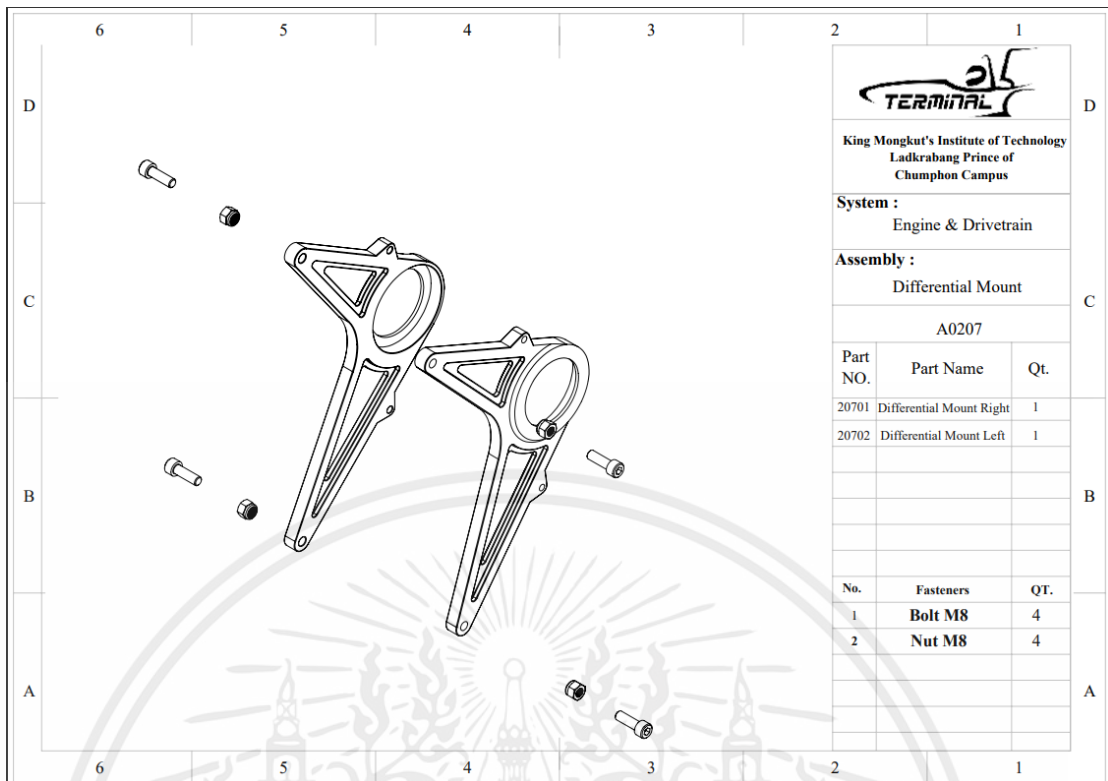


รูปที่ ข.3 มอเตอร์ EMRAX 228 MV (Motor EMRAX 228 MV)

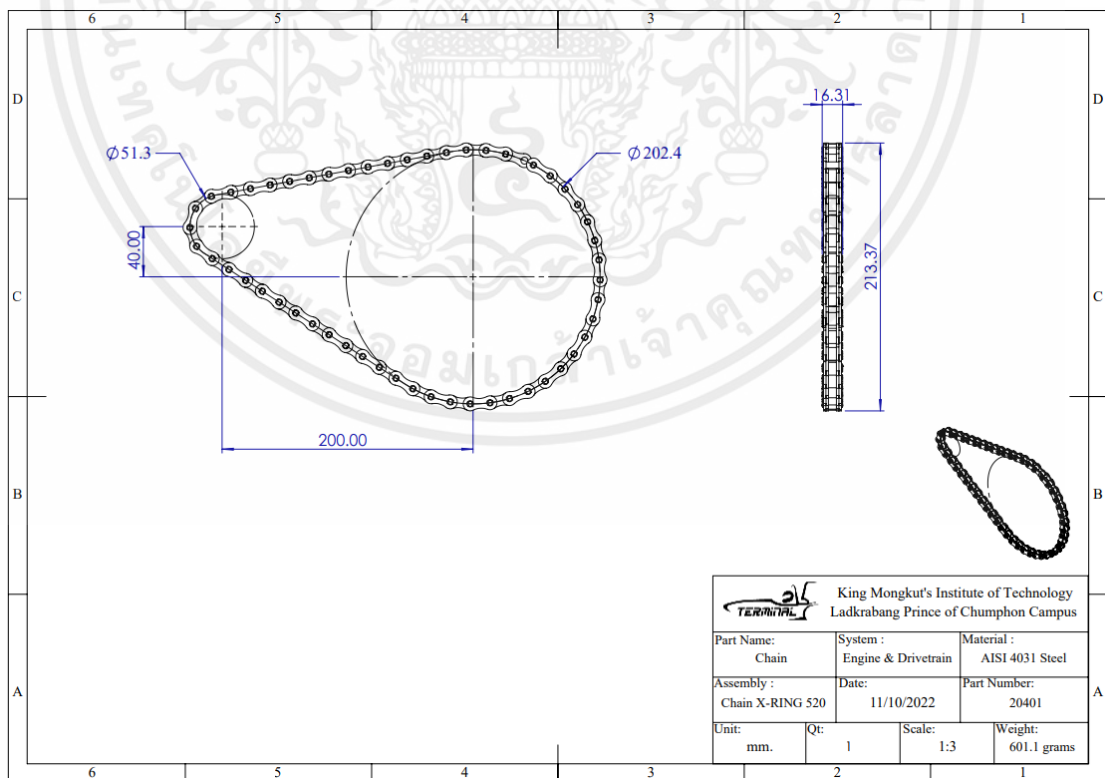


รูปที่ ข.4 ลิ้มเต็ดสลีปส่งกำลัง (Differential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

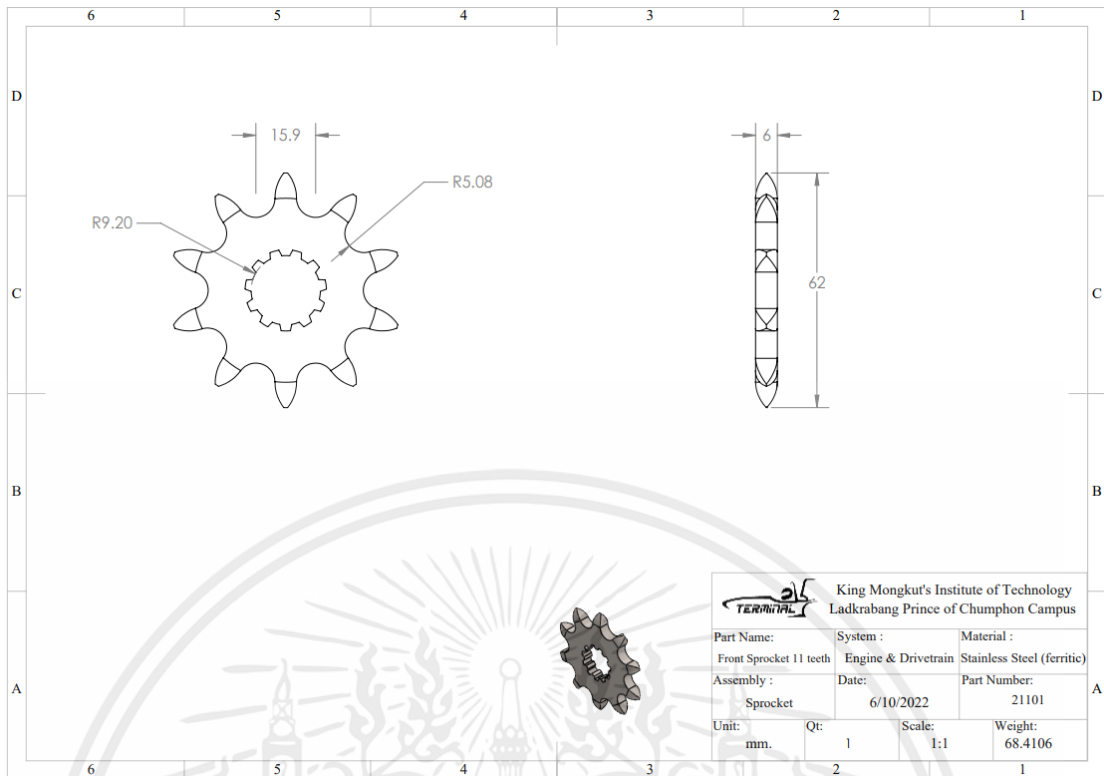


รูปที่ ข.5 ขายึดกับลิ้มิเต็ดสลีปส่งกำลัง (Differential Mount)

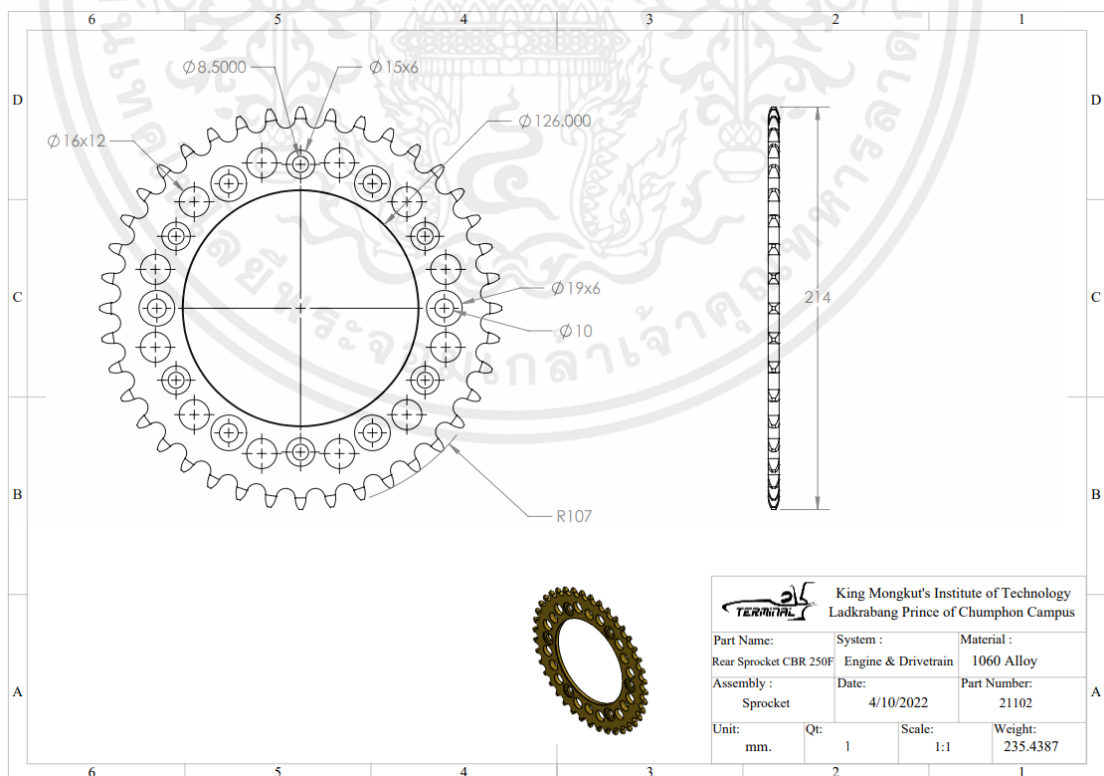


รูปที่ ข.6 โซ่ X-RING 520 (Chain X-RING 520)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

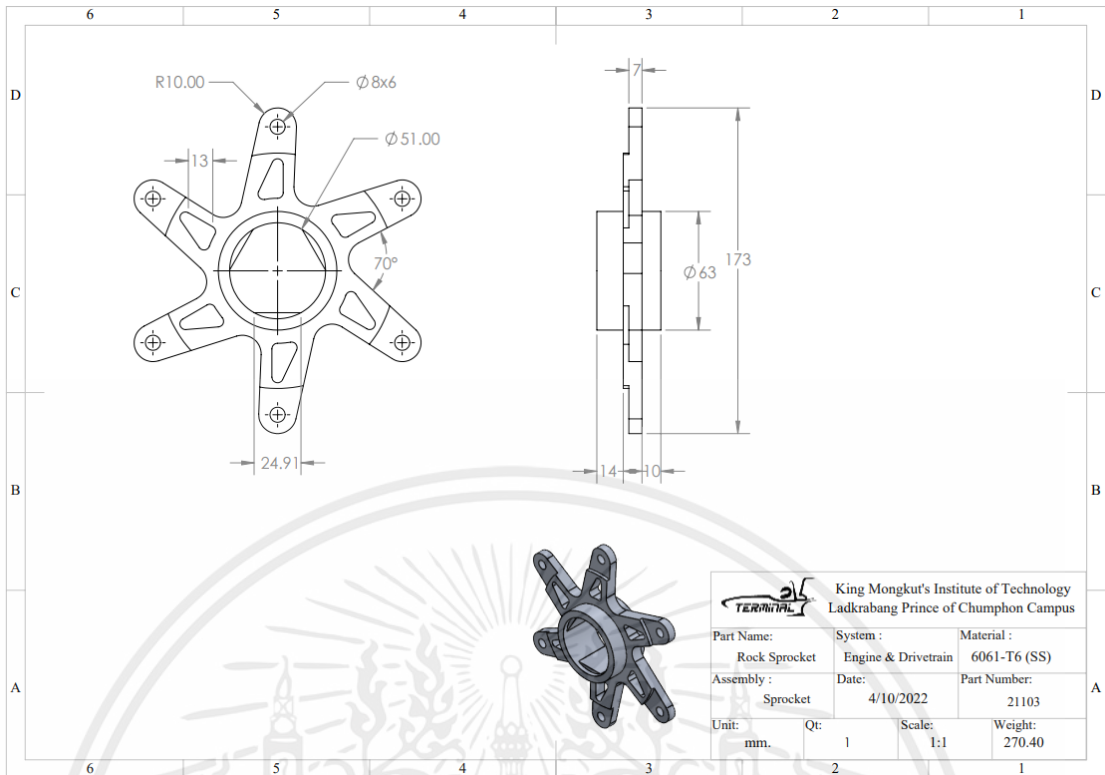


รูปที่ ข.7 สเตอร์หน้า 11 ฟัน (Front Sprocket 11 teeth)

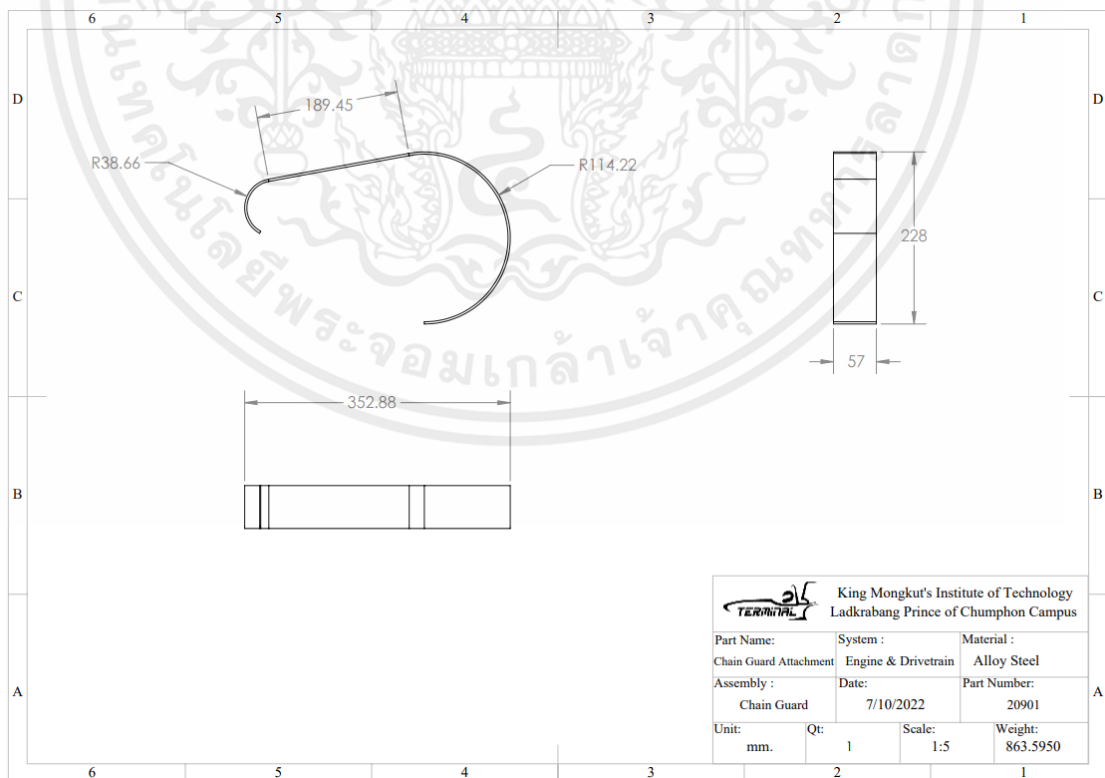


รูปที่ ข.8 สเตอร์หลัง 42 ฟัน (Rear Sprocket CBR 250F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

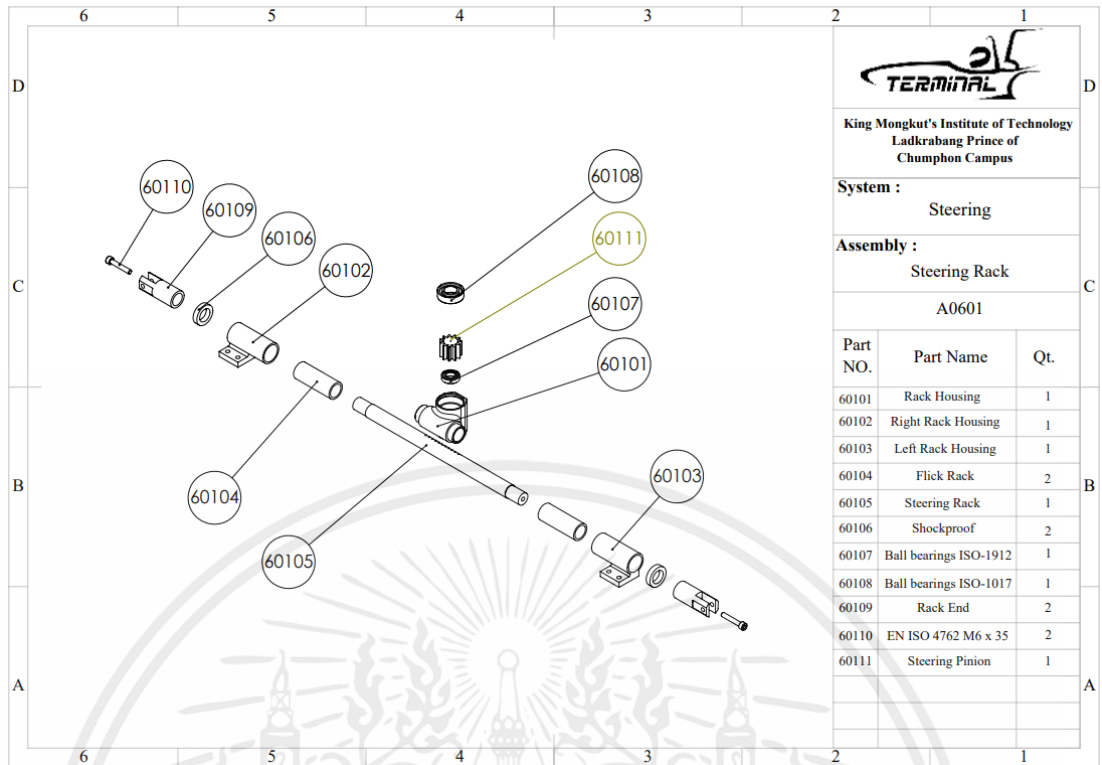


รูปที่ ข.9 ตัวล้อคสเตอร์หลัง (Rock Sprocket)

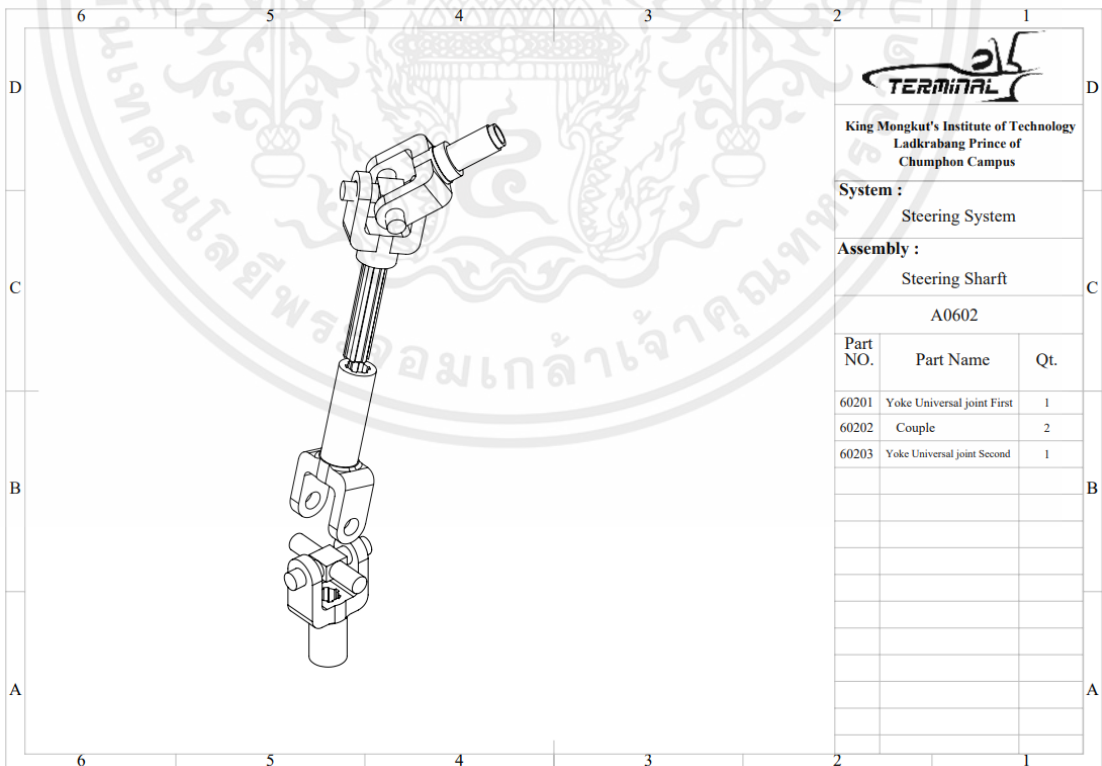


รูปที่ ข.10 ตัวยึดบังโซ่ (Chain Guard Attachment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

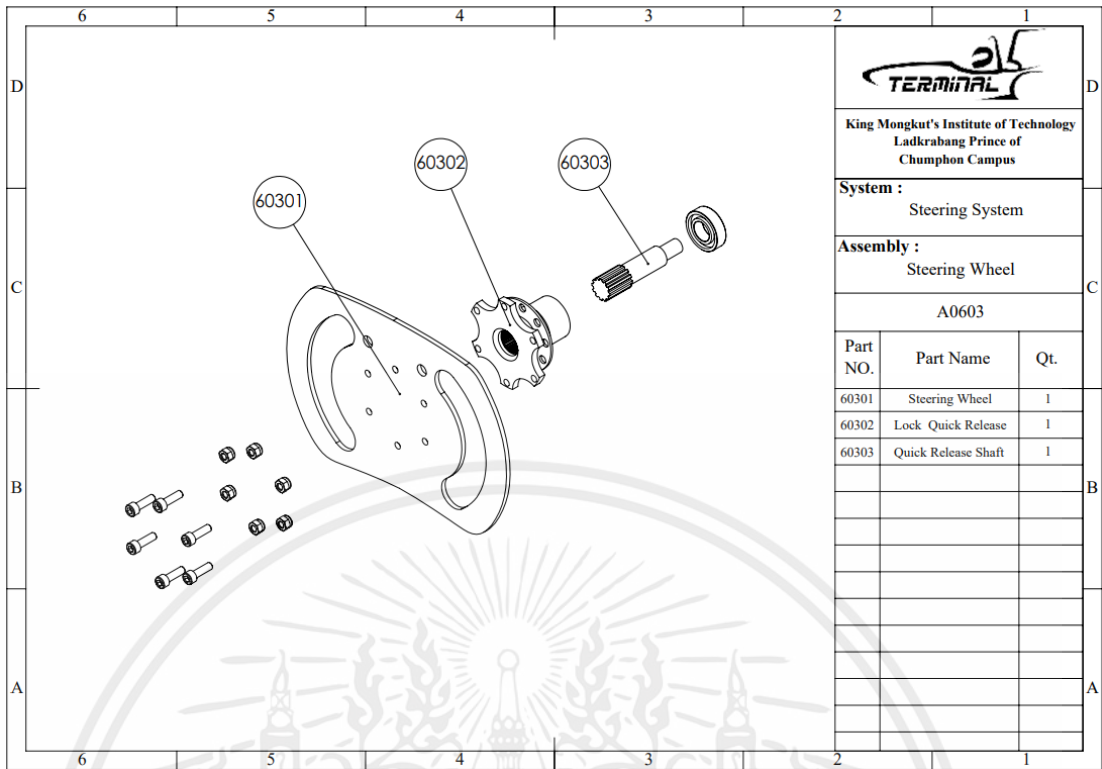


รูปที่ ข.11 ระบบบังคับเลี้ยว (Steering System)

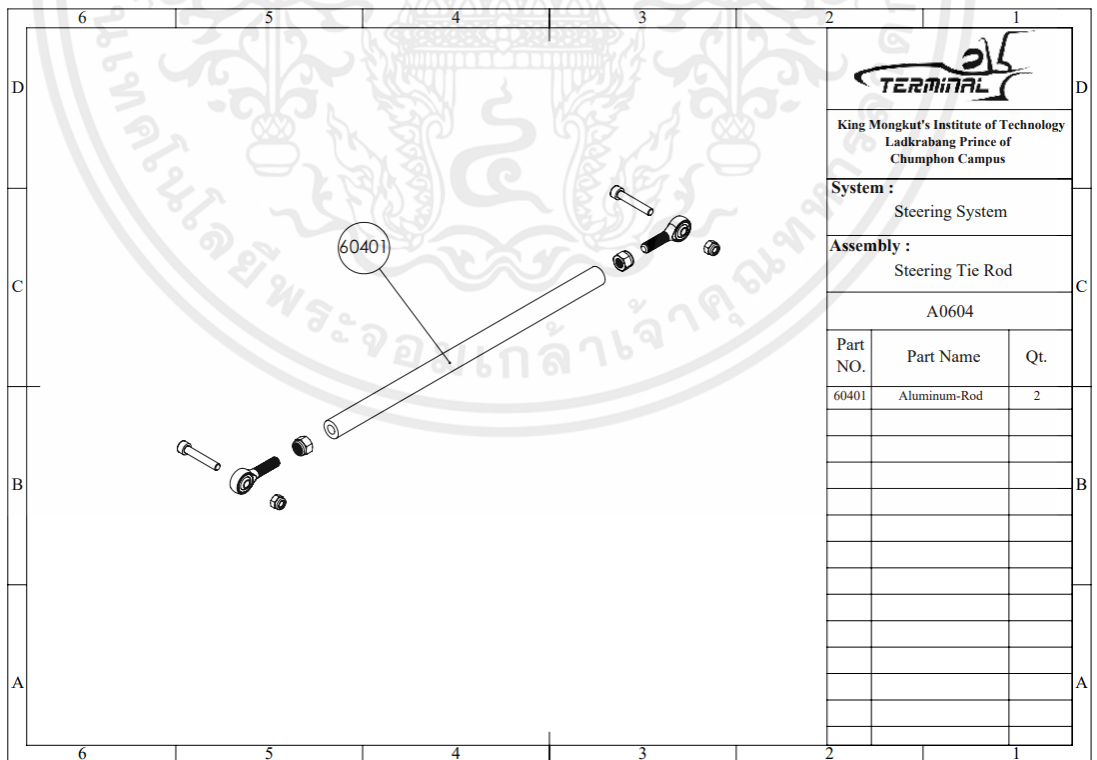


รูปที่ ข.12 แกนพวงมาลัย (Steering Shaft)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

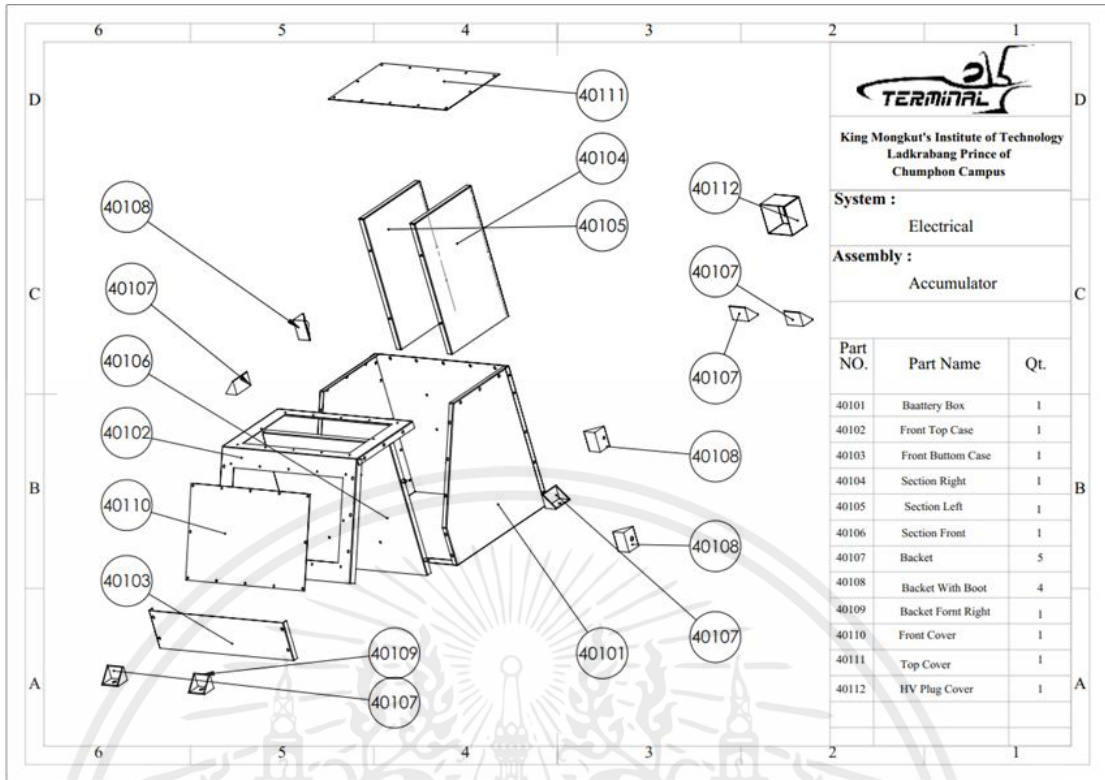


รูปที่ ข.13 ระบบพวงมาลัย (Steering Wheel)

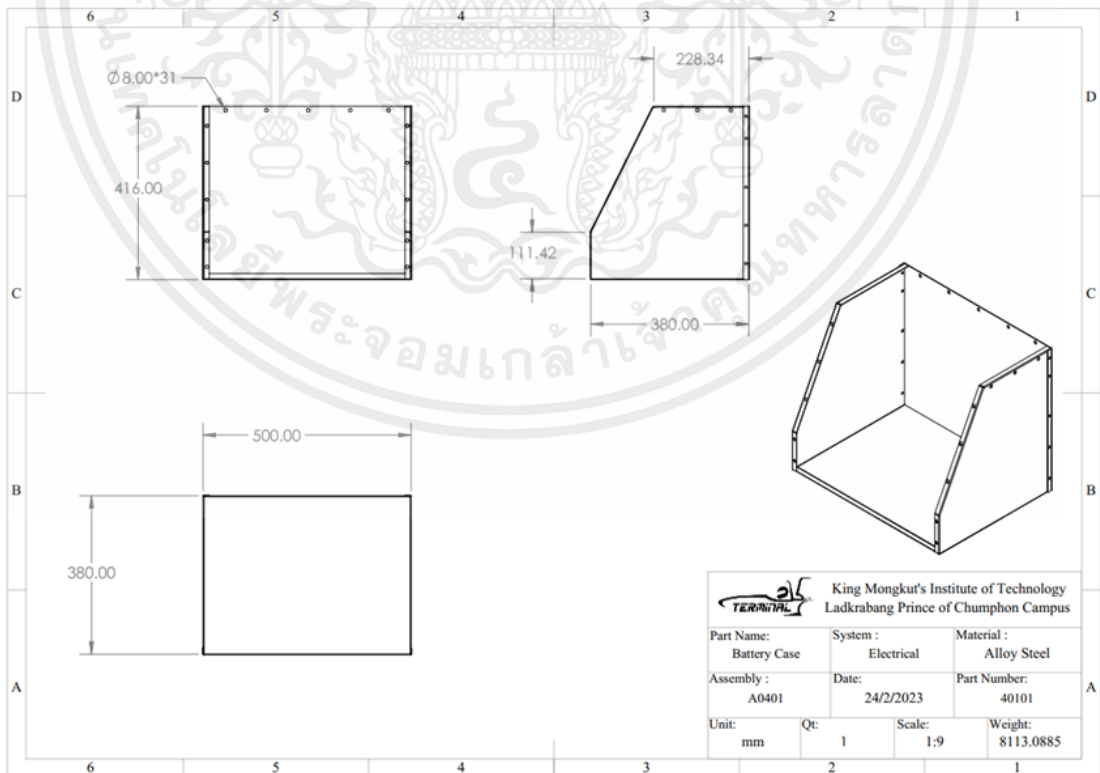


รูปที่ ข.14 ระบบคันชัก (Tie Rods)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

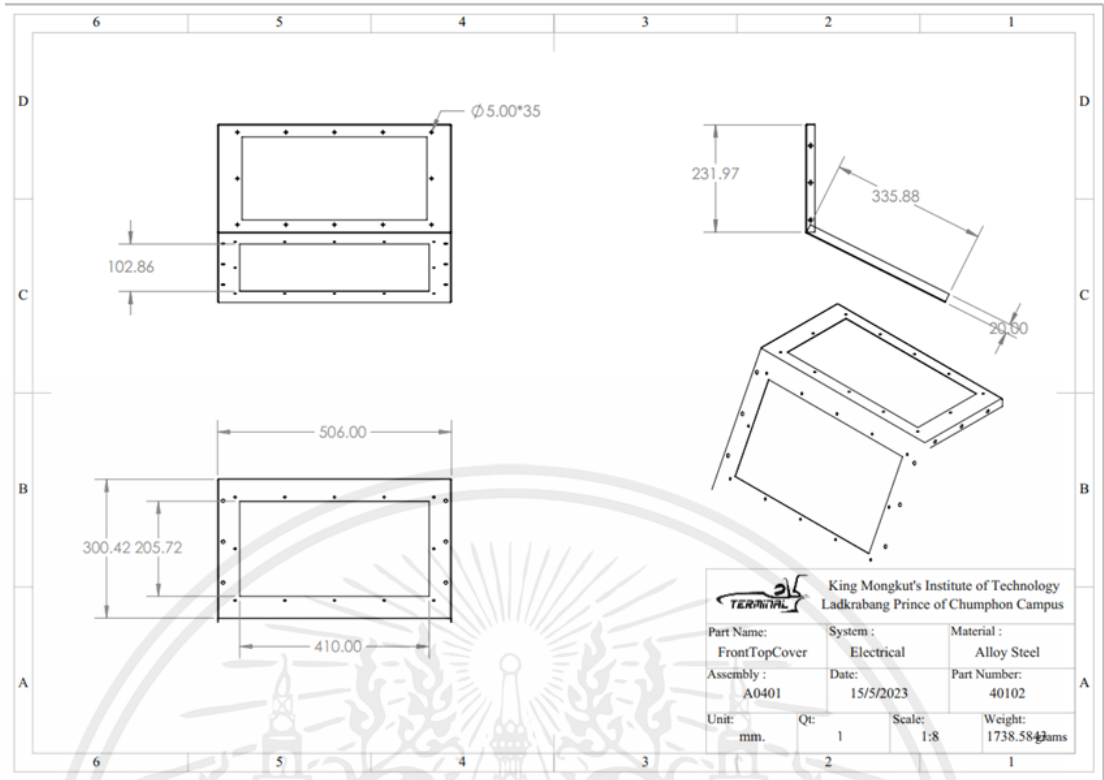


รูปที่ ข.15 กล่องแบตเตอรี่ (Accumulator)

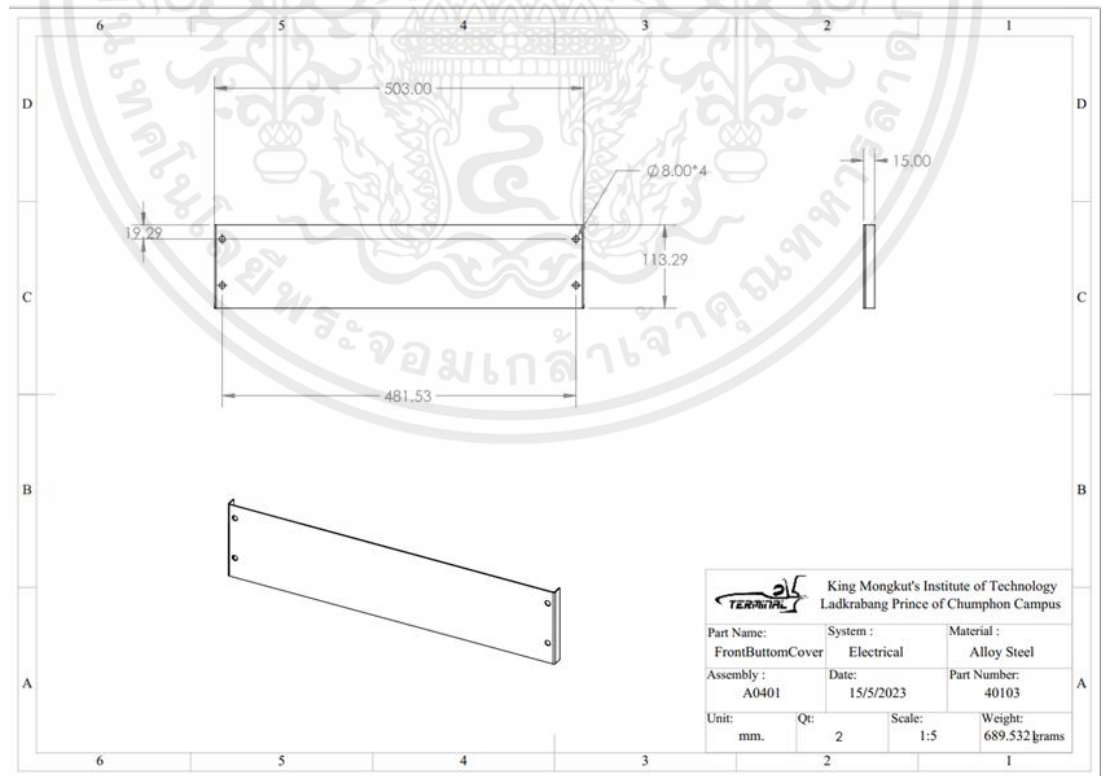


รูปที่ ข.16 ฐานกล่อง (Accumulator Box)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

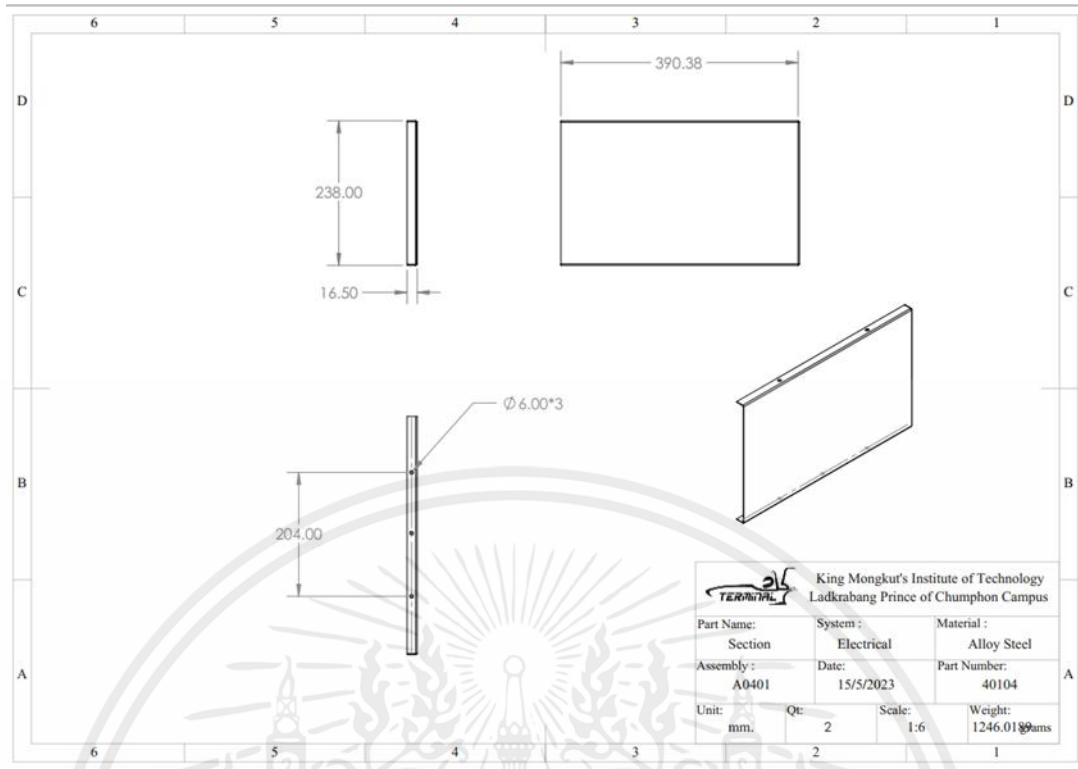


รูปที่ ข.17 แผ่นปิดด้านบนฝังบน (Top Cover)

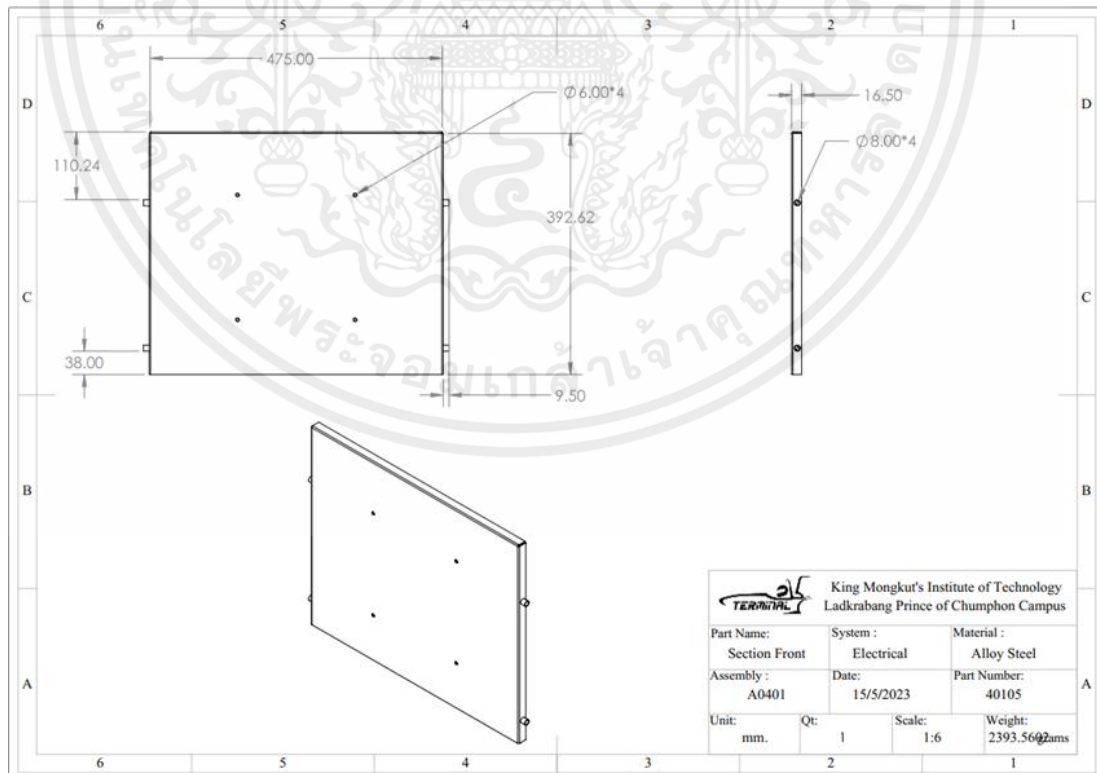


รูปที่ ข.18 แผ่นปิดด้านล่างฝังบน (Front Bottom Cover)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

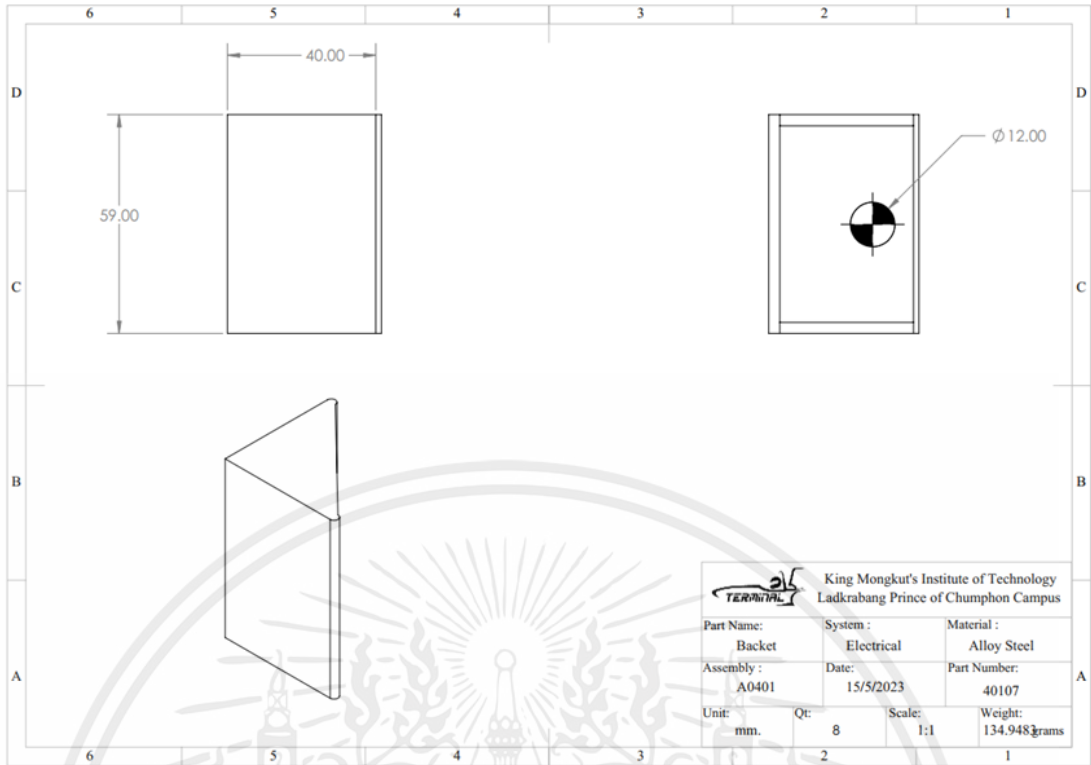


รูปที่ ข.19 แผ่นกั้น (Section)

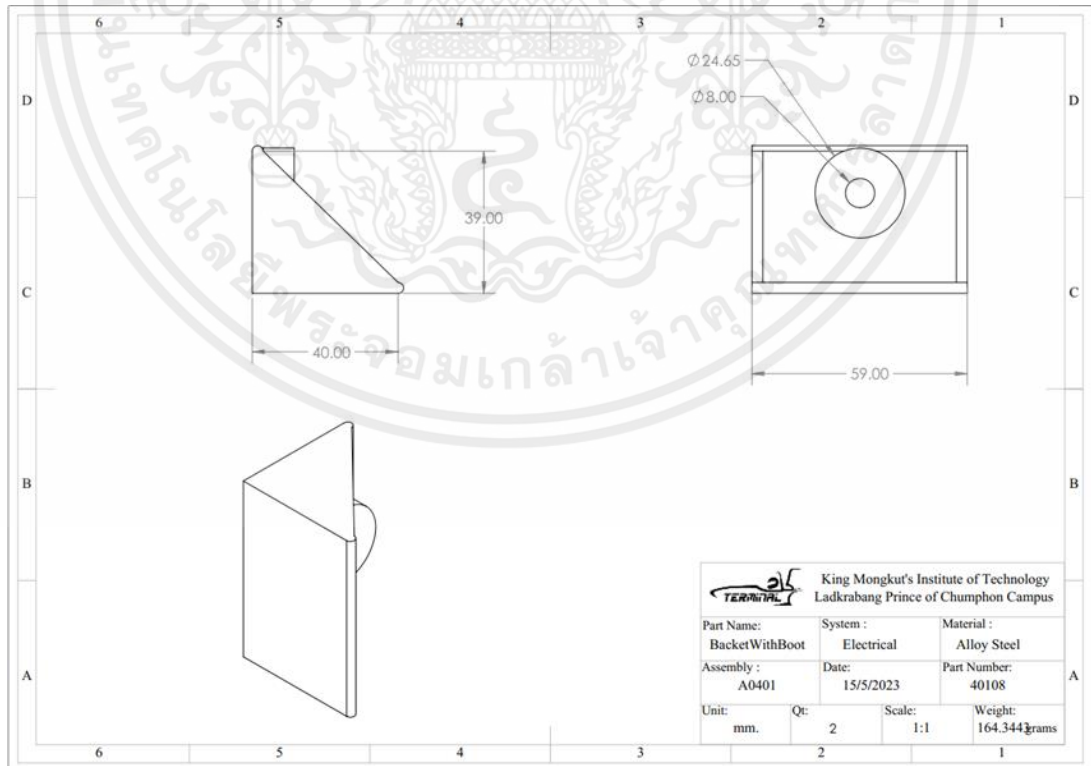


รูปที่ ข.20 แผ่นกั้นด้านหน้า (Section Front)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

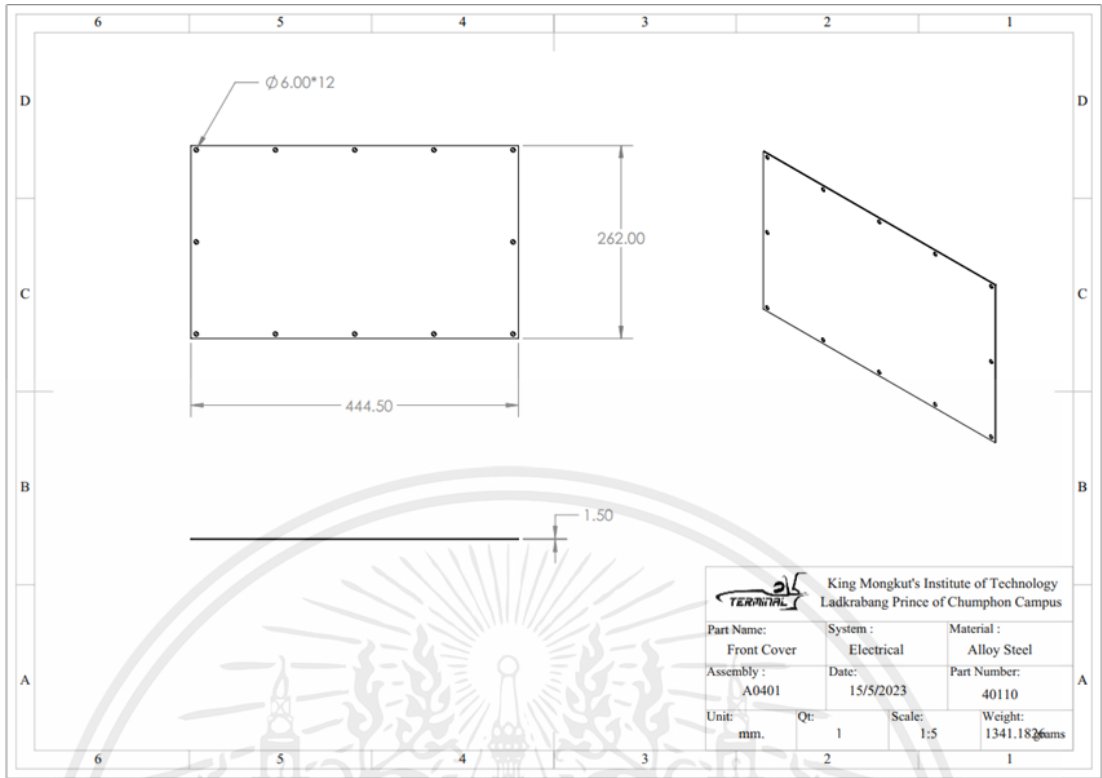


รูปที่ ข.21 จุดยึดกล่อง (Bucket)

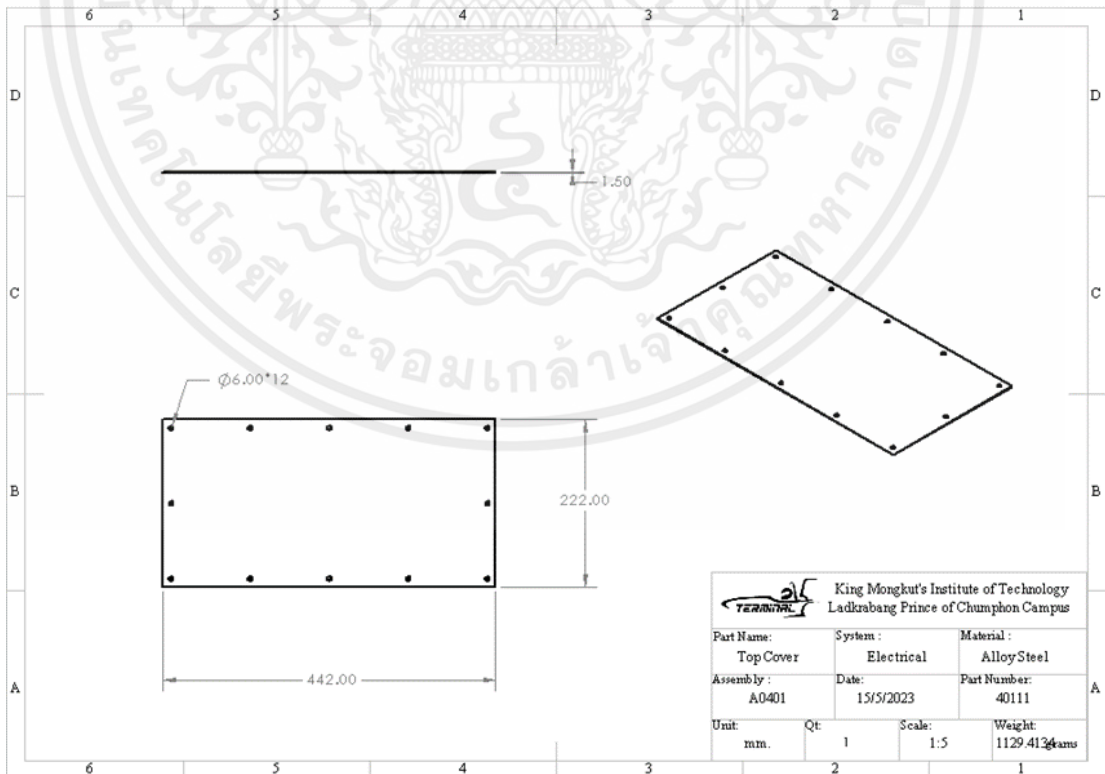


รูปที่ ข.22 จุดยึดกล่องแบบมีตัวรอง (Bucket With Boot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

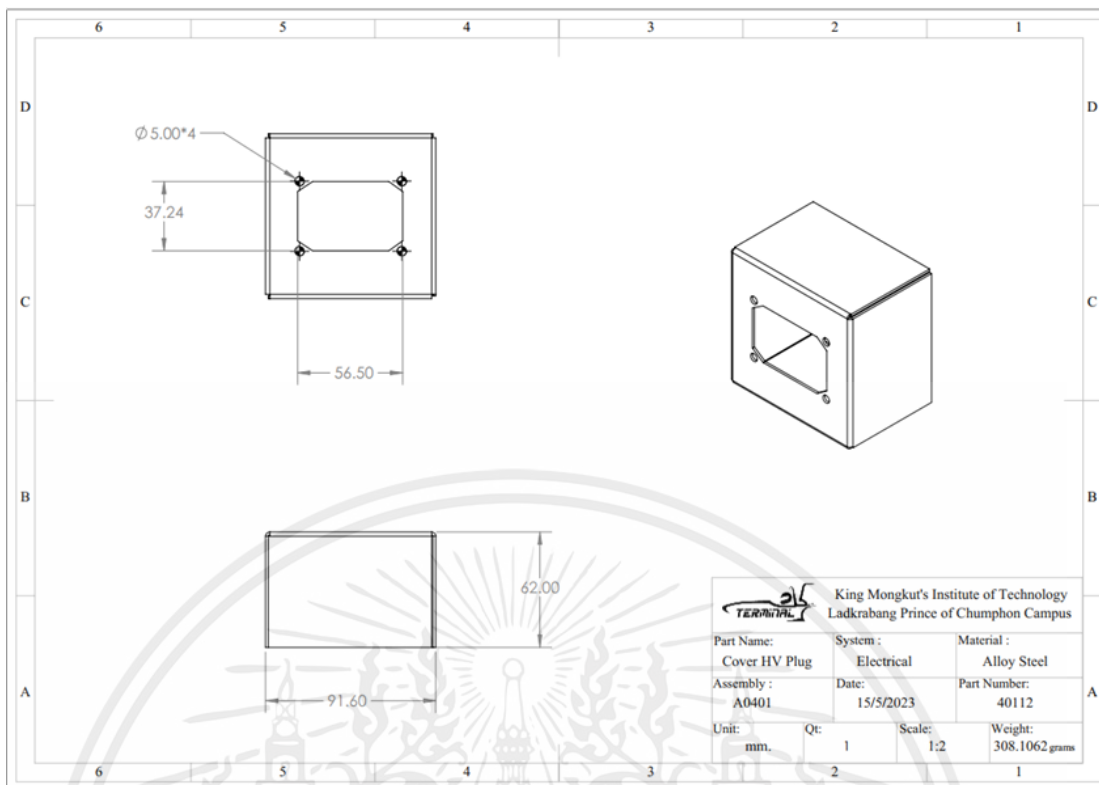


รูปที่ ข.23 แผ่นปิดด้านหน้า (Front Cover)



รูปที่ ข.24 แผ่นปิดด้านบน (Top Cover)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.25 กล่องปลั๊ก High Volt (HV Plug Cover)

Connector X1 Control inputs/outputs			
A	brown	BTB	Ready for operation
B	red	BTB	
C	pink	GND24	Auxiliary voltage 0
D	Yellow	+24 V	Auxiliary voltage +
E	Green	END1/LMT1	Limit switch 1
F	Blue	END2/LMT2	Limit switch 2
G	Violet	FRG/RUN	Release
H	orange	AIN1+	Analogue input1
J	White	AIN1-	
K	Black	GNDE	Logic Zero
L	brown- black	DIN1	Digital input1
M	-yellow - black	DIN2	Digital input2
N	Green- black	DOUT1	Digi output1
O	Red- black	DOUT2	Digi-output2
P	Pink- black	AIN2+	Analogue input2
R	Orange- black	AIN2-	
S	Violet- black	DOUT3	Digi output3
T	white- black	RFE	Rotary field release
U	Blue- white	+24 V	Auxiliary voltage+

ตารางที่ ข.1 สีสายสัญญาณ X1 (Signal wire color)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายดานุรุจ พูลสวัสดิ์  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2543  
 ภูมิลำเนา จังหวัดนครศรีธรรมราช  
 ที่อยู่ 93/9 หมู่ 5 ตำบลนาทราย อำเภอเมือง  
 จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280  
 E-mail 62201052@kmitl.ac.th.

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนวัดบ้านตาล ปีการศึกษา 2555
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนเมืองนครศรีธรรมราช ปีการศึกษา 2561
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

### ผลงานและกิจกรรม

- นักศึกษาฝึกงานการรถไฟแห่งประเทศไทย ที่โรงรถจักรหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula 2019 - 2020
- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula 2022 - 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายสิวะ ลิมนะวงศานนท์  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2544  
 ภูมิลำเนา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 ที่อยู่ 29/3 หมู่.3 ตำบลห้วยยาง อำเภอทับสะแก  
 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 E-mail 62201099@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนอรุณ  
 วิทยา ปีการศึกษา 2558
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน  
 ประจวบวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
 (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จาก  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

### ผลงานและกิจกรรม

- นักศึกษาฝึกงานบริษัท แอปคอน รีนิวเอเบิล เอ็นเนอร์ยี  
 จำกัด ที่โรงไฟฟ้าห้วยยาง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ใน  
 รายการ TSAE Auto Challenge Student Formula  
 2019 - 2020
- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ใน  
 รายการ TSAE Auto Challenge Student Formula  
 2022 - 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นายกาญจน์พัฒน์ เสาสแสง  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 14 เมษายน พ.ศ. 2543  
 ภูมิลำเนา จังหวัดสงขลา  
 ที่อยู่ 482 ถนน.สาครมงคล 2 ตำบลหาดใหญ่  
 อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110  
 E-mail 63201217@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนพลวิทยา
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนพลวิทยา
- สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างกลโรงงานและระดับอนุปริญญา (ปวส.) สาขา ช่างเทคนิคการผลิต
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

### ผลงานและกิจกรรม

- นักศึกษาฝึกงานที่ บริษัท ผลิตภัณฑ์ฟ้าไทยอมรฟู้ด จำกัด จังหวัด สงขลา
- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula 2022 - 2023
- เข้าร่วมการแข่งขันโครงการ EV Hackathon: Future EV Mobility Creative Contest for Sustainability 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นาย ธีรวัฒน์ ชลวานิช  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2543  
 ภูมิลำเนา จังหวัด ชลบุรี  
 ที่อยู่ 29/3 หมู่ 4 ตำบล นาป่า อำเภอบึง เมือง  
 จังหวัดชลบุรี 20000  
 E-mail 63201236@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนนาป่ามโนรมย์ จังหวัดชลบุรี
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนบ้านสวน (จันทอนุสรณ์) จังหวัดชลบุรี
- สำเร็จการศึกษาระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) จาก วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อี.เทค) จังหวัดชลบุรี
- สำเร็จการศึกษาระดับ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) จาก วิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออก (อี.เทค) จังหวัดชลบุรี
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2565 จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

### ผลงานและกิจกรรม

- นักศึกษาฝึกงานตรวจสภาพรถโดยสาร สถานีขนส่งผู้โดยสาร จังหวัดชลบุรี
- ฝ่ายประชาสัมพันธ์และพิธีกร สโมสรนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
- ได้รับคัดเลือกเป็นผู้อัญเชิญพระมหามงกุฎในงานพิธีระดับ เข็มและเนคไทแก่นักศึกษาใหม่ในปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เข้าร่วมการแข่งขันกับทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula 2022 - 2023
- เข้าร่วมการแข่งขันโครงการ EV Hackathon: Future EV Mobility Creative Contest for Sustainability 2022



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้