



## รถสูตรนักศึกษาประเภทไฟฟ้า 2565

### FORMULA STUDENT ELECTRIC 2022

กฤติมา ภูระย้า

Krittima Phuraya

ชยานิษฐ์ รัตน์แก้วช่วย

Chayanid Ratkeawchuay

ทัตเทพ สุรปัญญานนท์

Thattap Surapunyanon

วรพรรณ สุขัมพรรณ

Woraphan Sukhamphan

สุทธิพงษ์ อูปวา

Sutthiphong Auppawa

อภิศักดิ์ ศรีฟ้า

Aphisak Srifa

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถสูตรนักศึกษาประเภทไฟฟ้า 2565  
FORMULA STUDENT ELECTRIC 2022



กฤติมา ภูระย้า  
Krittima Phuraya  
ชยานิษฐ์ รัตน์แก้วช่วย  
Chayanid Ratkeawchuay  
ทัตเทพ สุรปัญญานนท์  
Thattap Surapunyanon  
วรพรรณ สุขัมพรรณ  
Woraphan Sukhamphan  
สุทธิพงษ์ อูปวา  
Sutthiphong Auppawa  
อภิศักดิ์ ศรีฟ้า  
Aphisak Srifa

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล  
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## FORMULA STUDENT ELECTRIC 2022



Krittima Phuraya

Chayanid Ratkeawchuay

Thattap Surapunyanon

Woraphan Sukhamphan

Sutthiphong Auppawa

Aphisak Srifa

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN XXXX ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON 2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2022

DEPARTMENT OF ENGINEERING

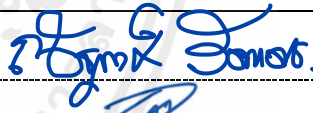


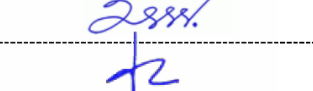
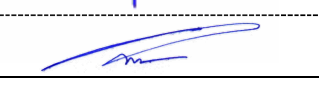

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

PRINCE OF CHUMPHON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์


หัวข้อปริญญาานิพนธ์ รดสูตรนักศึกษาประเภทไฟฟ้า 2565  
PROJECT TITLE FORMULA STUDENT ELECTRIC 2022  
ชื่อนักศึกษา นางสาวกฤติมา ภูระย้า รหัสประจำตัว 61512027  
นางสาวชญาณิชฐ์ รัตน์แก้วช่วย รหัสประจำตัว 61512032  
นายทัตเทพ สุปัญญานนท์ รหัสประจำตัว 61512041  
นางสาววรรณ สุชมพรรณ รหัสประจำตัว 61512068  
นายสุทธิพงษ์ อุปวา รหัสประจำตัว 61512078  
นายอภิศักดิ์ ศรีฟ้า รหัสประจำตัว 61512081  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล  
ปริญญาานิพนธ์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์  
ปริญญาานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตน์เดช	กรรมการสอบ		
ผศ.ดร.นารถระพี นาคะวิจนะ	กรรมการสอบ		
ผศ.ดร.บุญยภัทร ภูมิภาค	กรรมการสอบ		
ผศ.ดร.ศรีรัตน์ ช่วยบุญ	กรรมการสอบ		
ดร.อดิเรก สุริยวงศ์	กรรมการสอบ		
ผศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม		
ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล	อาจารย์ที่ปรึกษา		

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 กรกฎาคม 2565 เวลา 13.00 – 15.00 น.

สถานที่สอบ ห้องสอบออนไลน์

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ กรกฎาคม พ.ศ. 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	รถสูตรนักศึกษาประเภทไฟฟ้า 2565		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกฤติมา	ภูระย้า	รหัสประจำตัว 61512027
	นางสาวชญาณิชฐ์	รัตน์แก้วช่วย	รหัสประจำตัว 61512032
	นายพิตเทพ	สุรปัญญาพนธ์	รหัสประจำตัว 61512041
	นางสาวรพรรณ	สุขัมพรรณ	รหัสประจำตัว 61512068
	นายสุทธิพงษ์	อุปวา	รหัสประจำตัว 61512078
	นายอภิศักดิ์	ศรีฟ้า	รหัสประจำตัว 61512081
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปราโมทย์ กุศล		
ปริญญานิพนธ์			
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์		
ปริญญานิพนธ์ร่วม			

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษ ออกแบบ สร้างรถสูตรนักศึกษาประเภท รถไฟฟ้า ให้เป็นไปตามกฎการแข่งขันใน TSAE Auto Challenge Student Formula และเพื่อทำการทดสอบพารามิเตอร์เบื้องต้นของรถสูตรนักศึกษาที่แสดงให้เห็นว่ารถสามารถขับเคลื่อนได้ โดยมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ EMRAX 228 แรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง 470 V<sub>dc</sub> แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 กิโลวัตต์ ใช้กล่องควบคุมยี่ห้อ UNITEK รุ่น BAMOCAR PG-D3-400-400 RS ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟของแบตเตอรี่และควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบ Permanent Magnet Synchronous Motor และใช้แบตเตอรี่ชนิด Lithium Ion NMC แรงดันไฟฟ้า 3.7 โวลต์ ความจุ 22 แอมป์ จำนวน 96 ก้อน แรงดันไฟฟ้ารวม 355.2 โวลต์ โดยการทดสอบนั้นได้ทำการทดสอบบน Dynamometer ณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งได้ทำการเก็บค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า อุณหภูมิและความเร็วรอบมอเตอร์ โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบนั้นอยู่ในช่วงที่ 0 – 1,000 รอบต่อนาที จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบต่างๆของรถ สามารถทำงานได้ตามกฎการแข่งขันใน TSAE Auto Challenge Student Formula และสามารถขับเคลื่อนได้

**คำสำคัญ :** รถสูตรไฟฟ้านักศึกษา แบตเตอรี่ลิเทียมนิคเคิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์

<b>Project Title</b>	FORMULA STUDENT ELECTRIC 2022	
<b>Student</b>	Krittima Phuraya	<b>Student ID</b> 61512027
	Chayanid Ratkeawchuay	<b>Student ID</b> 61512032
	Thattap Surapunyanon	<b>Student ID</b> 61512041
	Woraphan Sukhamphan	<b>Student ID</b> 61512068
	Sutthiphong Auppawa	<b>Student ID</b> 61512078
	Aphisak Srifa	<b>Student ID</b> 61512081
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Mechanical Engineering	
<b>Project Advisor</b>	Ass.Prof.Dr.Pramote Kusol	
<b>Project Co-advisor</b>	Ass.Prof.Dr.Panya Dangwilaiux	

## ABSTRACT

This Bachelor's degree project presents the study and implementation of a student formula car in the electric vehicle category. To comply with the competition rules in the "TSAE Auto Challenge Student Formula" and to test the preliminary parameters of the student formula car showing that the vehicle can drive. The EMRAX 228, a permanent magnet synchronous motor, was used by the UNITEK control box to control the power supply of the battery and control the speed. The Li NMC battery of EV has, a voltage of 3.7 volts, a capacity of 22 amps, an amount of 96 pieces, and a total voltage of 355.2 volts. The experimental results were tested on a dynamometer at the engineering laboratory, a measurement that focuses on voltage, current, temperature, and motor speed. The tested motor is in the range of 0 – 1,000 rpm. The experiment showed that the various systems of the car are able to work according to the rules of the TSAE Auto Challenge Student Formula and be able to drive.

**Keywords:** Formula Student Electrical Vehicle, Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล  
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ดร.ดิษฐพร  
ตุงโสธานนท์ ผศ.ดร.ปุณยภัทร ภูมิภาค ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช ผศ.ดร.นารัตระพี นาคะวิจนะ อ.ดร.  
อดิเรก สุริยวงศ์ และ ผศ.ดร.ศรีรัตน์ ช่วยบุญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะและข้อมูลที่ทำให้เป็นประโยชน์ต่อ  
การดำเนินโครงการ ขอขอบคุณชมรมยานยนต์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง  
ที่ให้คำปรึกษาและเทคนิคต่างๆ ในการเก็บผลวิจัยรวมถึงสถานที่ในการทำงาน ขอขอบคุณภาควิชา  
วิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดม  
ศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ให้การสนับสนุนสถานที่สำหรับการดำเนินงานการทำและทดลอง

ขอขอบคุณพระคุณบิดามารดาที่สนับสนุนทุนทรัพย์ตลอดมาในการศึกษาและการ  
เป็นอยู่ เพื่อนร่วมรุ่นทุกท่านและช่างเทคนิคสาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเกษตรในการ  
ช่วยเหลือการทำงาน ตลอดจนบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่คอยให้การสนับสนุนให้กำลังใจ และ  
คำปรึกษาเสมอมา

กฤติมา ภูระย้า  
ชญาณิชฐ์ รัตน์แก้วช่วย  
ทัตเทพ สุรปัญญานนท์  
วรพรรณ สุขัมพรรณ  
สุทธิพงศ์ อุปวา  
อภิศักดิ์ ศรีฟ้า  
20 กรกฎาคม 2565

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 ประเภทของรถยนต์ไฟฟ้า	4
2.1.2 มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)	7
2.1.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า PMSM	9
2.1.4 กล้องควบคุม Controller	9
2.1.5 ระบบแบตเตอรี่	10
2.1.6 Battery Management System (BMS)	19
2.1.6.1 การประเมิน (SOH) เพื่อการตรวจสอบสุขภาพเซลล์	20
2.1.6.2 การวัดเซ็นเซอร์ (SOF)	20
2.1.6.3 การส่งข้อมูล	20
2.1.7 Arduino	21
2.1.8 หลักการระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่	23

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.9 สมการความร้อนของแบตเตอรี่	26
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและอุปกรณ์	
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ทดลอง	52
3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ	52
3.1.1.1 โครงรถ	52
3.1.1.2 TRACK (Fr) ความกว้างด้านหน้า	53
3.1.1.3 TRACK (Rr) ความกว้างด้านหลัง	53
3.1.1.4 WHEELBASE	58
3.1.1.5 ระบบช่วงล่าง	58
3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ ระบบไฟฟ้า	59
3.1.2.1 Motor Emrax 228	59
3.1.2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium Nickel Manganese Cobal)	62
3.1.2.3 กล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400-400 RS	63
3.1.2.4 ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204	66
3.1.2.5 BMS Control Unit	67
3.1.2.6 BMS (Battery Management System)	68
3.1.2.7 Cooling	70
3.1.2.8 ปลั๊ก	70
3.1.2.9 Arduino	70
3.1.2.10 SHUTDOWN CIRCUIT	73
3.2 เครื่องมือเก็บผล	74
3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการโครงการ	78
3.4 ขั้นตอนการเก็บผลการทดสอบ	82
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผล	
4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง	86
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	94

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้เขียน	100



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดการทดลองพร้อมเก็บผล	3
2.1	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ แบ่งตามวัสดุขั้วลบและขั้วบวก รวมถึงการใช้งาน	11
2.2	อุณหภูมิพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้และการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งการสร้างความร้อนที่ $SOC = 0.1$	32
ก.	ค่าการหน่วงเวลาของ Motor ที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,000 - 4,000 ms	98
ข.	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าผลการทดสอบค่าแรงดันไฟและกระแสไฟต่อความเร็วรอบ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000	98
ค.	ค่าอุณหภูมิลมยางก่อนและหลังทำการทดสอบ	99
ง.	ผลการทดสอบค่าอุณหภูมิต่อความเร็วรอบ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000	99

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle, HEV)	5
2.2	ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Vehicle, PHEV)	5
2.3	ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle, BEV)	6
2.4	ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)	7
2.5	Permanent Magnet Synchronous Motor	8
2.6	กล่องควบคุม Controller	10
2.7	แสดงการชาร์จสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	13
2.8	แสดงอุปกรณ์ในการชาร์จสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า	13
2.9	ตัวอย่างการคำนวณการชาร์จด้วยไฟ AC	14
2.10	ตัวอย่างการคำนวณการชาร์จด้วยใช้ตู้ EV Charger	14
2.11	แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต	15
2.12	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่กับปริมาณแบตเตอรี่ และกำลังชาร์จแบตเตอรี่	16
2.13	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่กับปริมาณแบตเตอรี่ และกำลังชาร์จแบตเตอรี่	17
2.14	ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่กับแรงดันเซลล์	17
2.15	Battery Management System (BMS)	20
2.16	Arduino UNO R3	21
2.17	ส่วนประกอบของ Arduino UNO R3	22
2.18	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความจุกระแสไฟฟ้าและอายุการใช้งาน กับช่วงอุณหภูมิทำงานต่างๆของแบตเตอรี่	25
2.19	การเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้กับอุณหภูมิของแบตเตอรี่	25
2.20	อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น	26
2.21	หลักการสร้างความร้อนในรูป Joule heating	28

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	ค่า Ohmic resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และ อุณหภูมิต่างๆ	29
2.23	ค่า Charge – transfer resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ	29
2.24	ค่า Diffusion resistanceขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ	30
2.25	อุณหภูมิผิวที่อัตราการปล่อยประจุที่ 0.5C 1C 2C 3C 4C และ 5C	31
2.26	การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิสูงสุดที่อัตราการปล่อยประจุ 1 C	31
2.27	รายละเอียดอุณหภูมิที่พื้นผิวและผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิดที่อัตราการปล่อยประจุ 1 C	32
2.28	พฤติกรรมของค่าความต้านทาน ที่ค่า DOD ต่างๆ	34
2.29	เครื่องมือวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Hioki-Battery Tester BT3554)	35
2.30	การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในตาม CCV	36
2.31	การเกิดขึ้นของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของแอนโธรปภายในเซลล์	37
2.32	ค่าแอนโธรปที่เปลี่ยนแปลงของ $\text{LiCoO}_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆขณะเกิดปฏิกิริยา	38
2.33	ค่าแอนโธรปที่เปลี่ยนแปลงของ $\text{LiC}_6$ ที่ความเข้มข้นต่างๆขณะเกิดปฏิกิริยา	39
2.34	สัดส่วนความร้อนระหว่างความร้อนจากแหล่งทั้งสอง	40
2.35	แบบไม่มีแผ่นระบายความร้อน และ แบบมีแผ่นระบายความร้อน	41
2.36	ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ	43
2.37	ระบบระบายความร้อนด้วยครีบบระบายความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ	43
2.38	ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ	45
2.39	ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่	46
2.40	ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น กับ แพ็คแบตเตอรี่โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็น	48
3.1	โครงสร้างหลักของรถอ้างอิงค่าตามกฎการแข่งขันตาม TSAE Auto Challenge 2022 Student Formula EV	56
3.2	ความกว้างด้านหน้า	57

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3	ความกว้างด้านหลัง	57
3.4	ช่วงระยะห่างขอล้อหน้าถึงล้อหลัง	58
3.5	ระบบช่วงล่างของรถ	58
3.6	Motor Emrax228	59
3.7	ส่วนประกอบใน Motor Emrax228	60
3.8	วงจรเชื่อมต่อ Resolver connection x7	60
3.9	วงจรเชื่อมต่อ Resolver connection	61
3.10	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium Nickel Manganese Cobal)	62
3.11	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 1 ซีรี่ส์ 16 เซลล์	62
3.12	แบตเตอรี่ลิเทียม 6 ซีรี่ส์ 96 เซลล์	63
3.13	กล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400-400 RS	63
3.14	BAMOCAR-PG-D3- D3-400-400 RS connectors	64
3.15	วงจรการเชื่อมต่อของกล่องควบคุม BAMOCAR-PG- D3-400-400 RS	65
3.16	แผงวงจร ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204	66
3.17	วงจรการเชื่อมต่อของ ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204	66
3.18	BMS Control Unit	67
3.19	วงจรการเชื่อมต่อ BMS Control Unit	67
3.20	หมายเลขการเชื่อมต่อ BMS Control Unit	68
3.21	BMS (Battery Management System)	68
3.22	วงจรการเชื่อมต่อ BMS (Battery Management System)	69
3.23	ช่องการเชื่อมต่อ BMS และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไปยังแบตเตอรี่	69
3.24	วงจรการทำงานของระบบระบายความร้อน	70
3.25	การเชื่อมต่อ Arduino	71
3.26	การเชื่อมต่อ Arduino กับอุปกรณ์แสดงค่าต่างๆ	71

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.27	โค้ดสั่งงาน Arduino	72
3.28	SHUTDOWN CIRCUIT	73
3.29	SHUTDOWN CIRCUIT (ตามกฎหมาย FSAE 2022)	74
3.30	เครื่องวัดความเร็วรอบ TESTO 465	75
3.31	BMS Control Unit	75
3.32	Dynotech	76
3.33	เกจวัดเติมลมยาง รุ่น TG-10 SUMO	77
3.34	Infrared Thermometer AZ-8868	77
3.35	นาฬิกาจับเวลา	78
3.36	แบบจำลองรถ Student Formula EV	79
3.37	แบตเตอรี่แพ็คและชุดระบายความร้อน	79
3.38	การติดตั้งกล่องคอนโทรลเลอร์	80
3.39	Student Formula EV ที่ประกอบเสร็จ	80
3.40	การทดสอบด้วย Dyno Test	81
3.41	โปรแกรม NDrive2Software ของกล่องควบคุมแสดงถึงรอบของมอเตอร์และ กระแสที่ใช้	81
3.42	การตรวจสอบระบบการทำงานต่างๆของรถ เพื่อให้มีความพร้อมสำหรับการทดสอบ เก็บผล	82
3.43	การเอารถขึ้นบน Dyno Test	82
3.44	การติดตั้งสายรัดสแต็คเกอร์ของ MERTRA B/S 5T x 12M	83
3.45	การวางบล็อกในตำแหน่งล้อ	83
3.46	การเชื่อมต่อ BMS และคอนโทรลเลอร์ เข้ากับคอมพิวเตอร์	84
3.47	การ Setting ระบบขับเคลื่อน 1 ชั่วโมงก่อนการทดสอบ	84
3.48	การทดลองและบันทึกเวลา อุณหภูมิยาง กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้	85

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟเฉลี่ยของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่	89
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่	90
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิต่อความเร็วรอบของมอเตอร์	91
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่คำนวณได้กับความเร็วรอบวัดได้จริง	92



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องด้วยในปัจจุบัน หลักสูตรวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์และขบวนการยานยนต์ลาดกระบังชุมพร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ได้มีการส่งรถแข่งเข้าร่วมแข่งขันในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula การแข่งรายการนี้จะมีการแข่งขันทางด้านความคิดสร้างสรรค์ ความสามารถในด้านต่างๆ ความรู้ ทางด้านวิศวกรรม ทักษะการแข่งขันรถ ความพร้อมของทีม แผนการตลาดของทีม รวมถึงการแสดงศักยภาพการทำงานเป็นทีมในด้านต่างๆ ที่จะถูกนำมาใช้ในการแข่งขันรถ Formula ที่เข้าร่วมการแข่งขันจัดทำโดยนักศึกษา ทั้งการออกแบบและจัดสร้างในรูปแบบรถ เช่นเดียวกับรถแข่งซึ่งต้องอ้างอิงตามกฎการออกแบบของ TSAE Formula ที่กำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ซึ่งรายการแข่งขันนี้จัดขึ้นครั้งแรกในปี 2005 และยังมีจัดการแข่งขันขึ้นทุกปี โดยในปี 2020 ทางทีมได้ส่งรถสูตรประเภทไฟฟ้า (Electric Vehicle) เข้าร่วมแข่งขัน และได้รับรางวัลรองชนะเลิศอันดับ 1 ในประเภทยานยนต์ไฟฟ้า ทางทีมประสบปัญหาในเรื่องของน้ำหนักโดยรวมของรถที่มากเกินไป อันเนื่องมาจากแบตเตอรี่ที่ใช้นั้นมีความจุของแบตเตอรี่ที่มากเกินไป ความจำเป็นในการใช้งาน ขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักที่มาก ทำให้น้ำหนักโดยรวมของรถและการใช้พื้นที่ในการติดตั้งแบตเตอรี่ในตัวรถมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนของรถและการทำเวลาในการแข่งขันไม่ดีเท่าที่ควร

จากการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาทางทีมจึงตัดสินใจเปลี่ยนโครงรถ โดยมีการออกแบบและจัดทำโครงขึ้นมาใหม่ซึ่งให้มีขนาดที่สั้นและเล็กลง ทำให้น้ำหนักในส่วนของโครงลดน้อยลง เบาลง และทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ใช้จากแบตเตอรี่ชนิดเดิมที่เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) แรงดัน 3.7 โวลต์ ความจุ 40 แอมป์ น้ำหนักแบตเตอรี่ 0.8368 กิโลกรัมต่อเซลล์ มาเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) แรงดัน 3.7 โวลต์ ความจุ 22 แอมป์ น้ำหนักแบตเตอรี่ 0.3979 กิโลกรัมต่อเซลล์ ซึ่งทำให้ภาพรวมน้ำหนักของตัวรถมีค่าน้อยลง ประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อทำการออกแบบและสร้างรถสูตรนักศึกษาประเภทไฟฟ้า ให้เป็นไปตามกฎการแข่งขัน ในรายการ TSAE Auto Challenge Student Formula

2. ทดสอบพารามิเตอร์เบื้องต้นของรถสูตรนักศึกษาที่แสดงให้เห็นว่ารถสามารถขับเคลื่อนได้

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ายี่ห้อ EMRAX รุ่น 228 ผลิตโดยบริษัท EMRAX d.o.o. แรงดันไฟฟ้า ขนาดกลาง 470 V<sub>dc</sub> แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 กิโลวัตต์ มีน้ำหนัก 12 กิโลกรัม จำนวน 1 ตัว

2. เลือกใช้คอนโทรลเลอร์ยี่ห้อ UNITEK รุ่น BAMOCAR PG D3-400-400 RS ผลิตโดยบริษัท UNITEK Industrie Elektronik GmbH ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟของแบตเตอรี่ มีน้ำหนัก 8.5 กิโลกรัม

3. เลือกใช้แบตเตอรี่ ชนิด Lithium Ion NMC จำนวน 96 ก้อน กระแสไฟฟ้าที่จ่ายทั้งหมดไม่เกิน 80 กิโลวัตต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

2. ได้รับความรู้และประสบการณ์ในด้านการออกแบบ Design ซึ่งใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ ทางด้านวิศวกรรม โดยสามารถเป็นต้นแบบเพื่อพัฒนาต่อไปในอนาคตได้

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัย และกฎการแข่งขัน

2. ทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

3. จัดทำรูปเล่มปริยฐานิพนธ์

## 1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานการออกแบบและสร้างชุดการทดลองพร้อมเก็บผล

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน											
	2564						2565					
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
1.ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัย และกฎ การแข่งขัน	←→											
2.เริ่มการออกแบบและวางแผนการ สร้างรถ							←→					
3.จัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการสร้าง							←→					
4.เริ่มประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ของรถ							←→					
5.ทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล							←→					
6.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์							←→					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายยานยนต์ไฟฟ้า รายละเอียด หลักการทำงานแบตเตอรี่ พร้อมกับมอเตอร์ในรถ รวมไปถึงระบบขับเคลื่อนแบบต่างๆของรถและโครงสร้างของรถเพื่อให้ได้สมรรถนะสูงสุดของรถ

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1.1 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้า

โดยพื้นฐานแล้วยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) หมายถึง ยานยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แต่ยานยนต์ไฟฟ้าก็ได้หลายรูปแบบขึ้นกับว่าจะมีการผสมผสานการทำงานจากชุดขับเคลื่อนและหรือแหล่งเก็บกักพลังงานอื่นด้วยหรือไม่ แหล่งเก็บกักพลังงานโดยพื้นฐานก็หมายถึงแบตเตอรี่แต่ก็สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บกักพลังงานไฟฟ้าอื่นก็ได้ เช่น Supercapacitor ในขณะที่การขับเคลื่อนล้อ โดยพื้นฐานก็จะขับเคลื่อนมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าแต่อย่างเดียว แต่ก็สามารถผสมผสานแรงขับจากมอเตอร์และจากเครื่องยนต์ได้ หากจะจำแนกอย่างง่ายแล้วยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [7] ดังนี้

##### 1. ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle HEV)

ประกอบด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน พร้อมมีมอเตอร์ไฟฟ้าเสริมกำลังขับเคลื่อนและสนับสนุนการเบรกแบบผันกลับ (Regenerative braking) เพื่อเก็บสำรองพลังงานในรูปพลังงานไฟฟ้า จึงเป็นการผสมผสานระหว่างเครื่องยนต์กับมอเตอร์ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งทำให้ระบบขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่ายานยนต์ปกติ กำลังที่ผลิตจากเครื่องยนต์และมอเตอร์ไฟฟ้า ทำให้อัตราเร่งของยานยนต์สูงกว่ายานยนต์ที่มีเครื่องยนต์ขนาดเดียวกัน โดยอาจใช้เครื่องยนต์รูปแบบพิเศษ เช่น เครื่องยนต์แบบ Atkinson เพื่อเน้นประสิทธิภาพการทำงานหรือใช้วัสดุน้ำหนักเบา (Lightweight materials) ร่วมด้วยเพื่อลดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอีกต่อหนึ่ง ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดในตลาดมีอยู่หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น รูปแบบ Full Hybrid ที่สามารถมีกำลังขับทางไฟฟ้าได้ถึง 100 เพอร์เซ็นต์ในขณะที่รูปแบบ Mild Hybrid หมายถึง ชุดส่งกำลังแบบไฮบริดที่มีสัดส่วนกำลังขับโดยเครื่องยนต์ไม่เกิน 40 เพอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

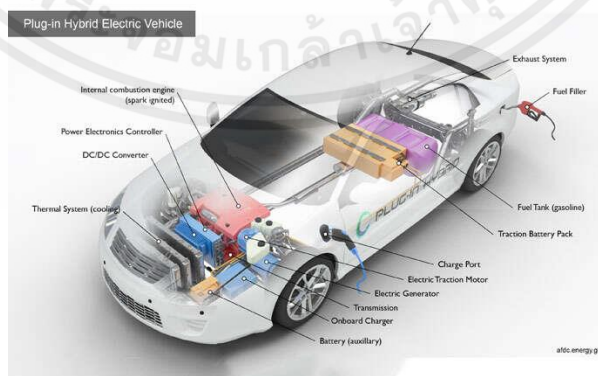


รูปที่ 2.1 ตัวอย่างยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle HEV)

[7]

## 2. ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle PHEV)

ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่พัฒนาต่อมาจากยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด โดยสามารถประจุพลังงานไฟฟ้าได้จากแหล่งภายนอก (Plug-in) ทำให้ยานยนต์สามารถใช้พลังงานพร้อมกันจาก 2 แหล่ง ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ามีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ขึ้นจากแบบไฮบริดธรรมดา จึงสามารถวิ่งในระยะทางที่ใช้พลังงานจากไฟฟ้าโดยตรงเพิ่มขึ้นยานยนต์ไฟฟ้าแบบ PHEV มีการออกแบบอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่รูปแบบ Extended Range EV หรือ (E-REV) ที่เน้นการทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก และรูปแบบ Blended PHEV ที่มีการทำงานผสมผสานระหว่างเครื่องยนต์และไฟฟ้า ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้าแบบ EREV สามารถวิ่งด้วยพลังงานไฟฟ้าอย่างเดียวมากกว่าแบบ Blended PHEV



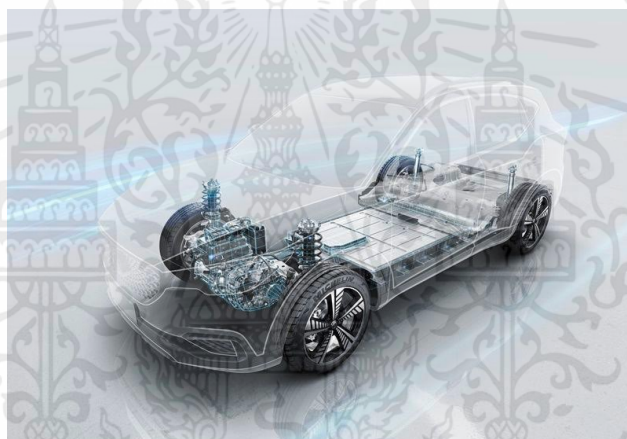
รูปที่ 2.2 ยานยนต์ไฟฟ้าปลั๊กอินไฮบริด (Plug-in Hybrid Electric Vehicle PHEV)

[7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle BEV)

ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังให้ยานยนต์เคลื่อนที่ และใช้พลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่เท่านั้น ตามรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่ามีความเรียบง่ายในการจัดวางอุปกรณ์มากไม่มีเครื่องยนต์อื่นในยานยนต์ ดังนั้นระยะทางการวิ่งของยานยนต์จึงขึ้นอยู่กับการออกแบบขนาดและชนิดของแบตเตอรี่รวมทั้งน้ำหนักบรรทุก อย่างไรก็ตามในปัจจุบันบริษัทรถยนต์ได้มีการผลิตและจำหน่ายยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ขึ้นในประเทศพัฒนาแล้ว เช่น ญี่ปุ่น ยุโรป และสหรัฐอเมริกาเป็นต้นทั้งนี้เพราะเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ที่ดีขึ้นและราคาที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่มีความเป็นไปได้มากขึ้น



รูปที่ 2.3 ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle BEV)

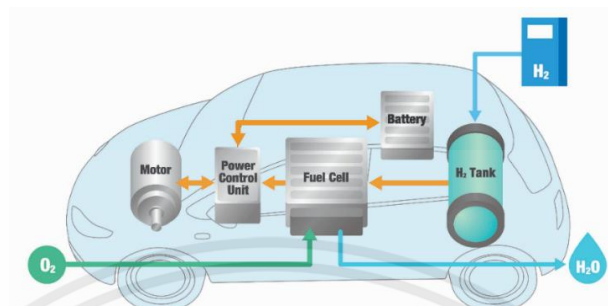
[7]

### 4. ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV)

ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่มีชุดเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell stack) ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยใช้แหล่งพลังงานคือแก๊สไฮโดรเจนที่บรรจุในถัง (Fuel tank) ตามรูปที่ 2.4 โดยการขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric traction motor) ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงมีข้อดีหลายๆ ประการข้อดีที่สำคัญที่สุด คือ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และความจุพลังงานจำเพาะที่สูงกว่าแบตเตอรี่ที่มีอยู่ ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจึงเป็นเทคโนโลยีที่บริษัทรถยนต์เชื่อว่าเป็นคำตอบของพลังงานสะอาดในอนาคต อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการผลิตไฮโดรเจน ในปัจจุบันเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบดั้งเดิมที่ยังมีราคาแพงและโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการขนถ่ายและการจัดเก็บไฮโดรเจนที่ต้องใช้ต้นทุนสูง

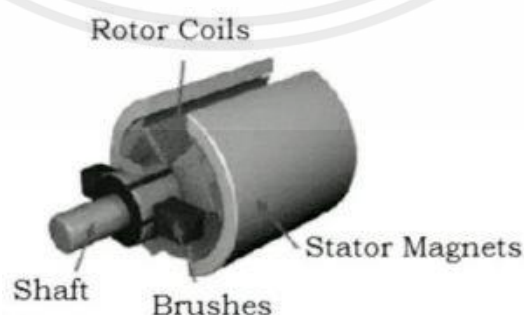


รูปที่ 2.4 ยานยนต์ไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV)

[7]

### 2.1.2 มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM)

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร หรือ Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่กระตุ้นสนามไฟฟ้าโดยใช้แม่เหล็กถาวร และมีรูปคลื่น EMF แบบไซน์กลับด้าน PMSM คือลูกผสมระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำและมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ซึ่งคุณลักษณะที่เหมือนกับมอเตอร์ไร้แปรงถ่านแบบ DC คือ โรเตอร์แม่เหล็กถาวรและการพันขดลวดบนสเตเตอร์ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างของสเตเตอร์ที่มีการพันขดลวดเพื่อสร้างความหนาแน่นฟลักซ์แบบไซน์ในช่องว่างอากาศของเครื่องจักรนั้นคล้ายกับมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ความหนาแน่นของพลังงานนั้นสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีอัตรากระแสเท่ากัน เนื่องจากไม่มีกำลังเฉพาจากสเตเตอร์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Permanent Magnet Synchronous Motor

[แหล่งที่มา: <https://th.jf-para.de.pt>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กถาวรทำให้ PMSM สามารถสร้างแรงบิดจากความเร็วเป็นศูนย์ได้ ซึ่งต้องการอินเวอร์เตอร์ชนิดควบคุมแบบดิจิทัลสำหรับการทำงาน PMSM มักใช้ในตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง การควบคุมมอเตอร์ประสิทธิภาพสูงนั้นจะสังเกตได้จากการหมุนที่นุ่มนวลในทุกช่วงความเร็วของมอเตอร์ การควบคุมแรงบิดเต็มที่จากความเร็วเป็นศูนย์ และมีอัตราเร่งและลดความเร็วได้อย่างรวดเร็ว

หลักการการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร คล้ายกับมอเตอร์ซิงโครนัส ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กหมุนที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าด้วยความเร็วซิงโครนัส เมื่อขดลวดสเตเตอร์ได้รับพลังงานโดยให้แหล่งจ่าย 3 เฟสสนามแม่เหล็กหมุนจะถูกสร้างขึ้นระหว่างช่องว่างของอากาศ สิ่งนี้ก่อให้เกิดแรงบิดเมื่อเสาสนามโรเตอร์จับสนามแม่เหล็กหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสและโรเตอร์จะหมุนอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมอเตอร์เหล่านี้ไม่ใช่มอเตอร์สตาร์ทด้วยตนเองจึงจำเป็นต้องจัดหาแหล่งจ่ายไฟความถี่ตัวแปร

การทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรนั้นง่ายรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับมอเตอร์ทั่วไป การทำงานของ PMSM ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กหมุนของสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กคงที่ของโรเตอร์ แม่เหล็กถาวรใช้เป็นโรเตอร์เพื่อสร้างฟลักซ์แม่เหล็กคงที่ทำงานและถือด้วยความเร็วซิงโครนัส มอเตอร์ประเภทนี้คล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

กลุ่มเฟสเซอร์เกิดขึ้นจากการรวมขดลวดของสเตเตอร์เข้าด้วยกัน กลุ่มเฟสเซอร์เหล่านี้รวมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันเช่นสตาร์ทเดลต้าเฟสคู่และเฟสเดียว เพื่อลดแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกขดลวดควรพันกันไม่นาน

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟสให้กับสเตเตอร์มันจะสร้างสนามแม่เหล็กหมุนและสนามแม่เหล็กคงที่ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ โรเตอร์นี้ทำงานแบบซิงโครนัสด้วยความเร็วซิงโครนัส การทำงานทั้งหมดของ PMSM ขึ้นอยู่กับช่องว่างของอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ไม่มีภาระ

หากช่องว่างอากาศมีขนาดใหญ่การสูญเสียการหมุนของมอเตอร์จะลดลง เสาสนามที่สร้างโดยแม่เหล็กถาวรมีความสำคัญ มอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรไม่ใช่มอเตอร์สตาร์ทเอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมความถี่ตัวแปรของสเตเตอร์ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

### 2.1.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า PMSM

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร ส่วนใหญ่มักจะนำไปใช้ในยานยนต์ในงานขับเคลื่อนแบบเซอร์โว ได้แก่ งานควบคุมตำแหน่ง และงานควบคุมความเร็ว โดยเป็นงานขนาดไม่เกิน 1 MW โดยปัจจุบันตัวมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรได้มีการนำมาใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า(EV) มากขึ้น ทั้งผสมผสานระหว่างไฟฟ้ากับน้ำมัน และแบบไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยการใช้อัตราซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรนั้น จำเป็นต้องมีการควบคุมมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือรักษาประสิทธิภาพในการใช้งานของตัวมอเตอร์ให้ยืดระยะเวลาการใช้งานของตัวมอเตอร์ให้นานมากขึ้น โดยเทคนิคในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีได้หลายวิธี เช่น

- Four quadrant operation.
- Operation with and without mechanical motion sensor.
- Fast flux and torque response.
- Available maximum output torque in wide range of speed operation region.
- Constant switching frequency.
- Uni – polar voltage PWM.
- Low flux and torque ripples.
- Robustness to parameters variation.

### 2.1.4 กล้องควบคุม Controller

Controller หรือ กล้องควบคุม คือ อุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งของรถไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ควบคุมและสั่งการระบบพลังงานจากแบตเตอรี่ เพื่อควบคุมการทำงานส่งจ่ายไฟฟ้าให้รถไฟฟ้าขับเคลื่อนได้อย่างราบรื่น เปรียบเสมือน“สมองกล”ของรถไฟฟ้า หรือกล่อง ECU ในรถยนต์ที่เราคุ้นเคยกันดีเพราะ Controller คือ ศูนย์กลางของการทำงานที่สามารถปรับแต่งค่าต่างๆของ Controller เพื่อให้สามารถส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานรถไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่ได้ รวมไปถึงควบคุมความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้า การบริหารกำลังไฟฟ้าในแต่ละสถานการณ์ของการขับขี่ เรียกว่า Controller มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบการทำงานของรถไฟฟ้าเลยทีเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กล่องควบคุม Controller

[แหล่งที่มา: คู่มือ Controller รุ่น 2021/V2 บริษัท UNITEK Industrie Elektronik GmbH]

Controller หรือตัวควบคุมมอเตอร์ ในการเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการประมวลผลและเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่เลือกใช้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมมอเตอร์จะถูกปรับให้เหมาะกับมอเตอร์แต่ละชนิดของมอเตอร์ที่ได้เลือกใช้งานที่เลือกใช้มอเตอร์ก็ต้องเลือกตัวควบคุมมอเตอร์ให้เข้ากันด้วยตัวควบคุมมอเตอร์ที่ทางทีมได้เลือกใช้ คือ UNITEK รุ่น BAMOCAR PG D3-400-400 RS (รูปที่ 2.6) ผลิตโดย UNITEK Industrie Elektronik GmbH ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมกับ Motor Emrax 228 ตัวควบคุม Bamocar เป็นตัวควบคุมที่มีน้ำหนักเบา เพียงแค่ 8.5 กิโลกรัม และมีการระบายความร้อนด้วยของเหลวเนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าที่สูงและมีความร้อนสะสม จำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อน

### 2.1.5 ระบบแบตเตอรี่

ในการขับเคลื่อนไฟฟ้า หรือ Electric Vehicle (EV) แหล่งจ่ายพลังงานหรือ Energy Source ต้องมีคุณสมบัติที่เกื้อหนุนการขับเคลื่อนหลักๆ เช่น เก็บพลังงานได้เยอะ (High Energy Density) เพื่อที่จะได้ระยะทางที่เยอะและการจ่ายพลังงานได้รวดเร็ว (High Power Density) เพื่อที่จะเร่งรถได้เร็วและคุณสมบัติที่รองลงมา เช่น ชาร์จได้เร็ว (Fast Charging) มีอายุการใช้งานนาน (Long Lifetime) มีประสิทธิภาพที่ดี (High Efficiency) ราคาถูก (Low Price) และมีการซ่อมบำรุงต่ำ (Low Maintenance) สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่เราอยากได้ ซึ่งแบตเตอรี่ (Battery) [14] ก็เป็น Energy Source ชนิดหนึ่งที่สามารถตอบโจทย์ของความต้องการเหล่านี้ได้อย่างดี และถูกใช้ในวงการรถ EV มาเป็นเวลานาน ณ ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ได้พัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ข้างต้นอย่างมาก ในตัวแบตเตอรี่เองสามารถแบ่งได้ออกเป็นหลายชนิดและหลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบก็จะมีคุณสมบัติข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในบทความนี้พูดถึงรายละเอียดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของแบตเตอรี่คุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละแบบชนิดของแบตเตอรี่ (ที่ Common) ตัวชี้วัดของแบตเตอรี่ที่ดี Energy Density (สูงคือดี) Power Density (สูงคือดี) Voltage per Cell (สูงคือดี) Cost per Cycle (ต่ำคือดี) Discharge Rate (ต่ำคือดี) Charging Time (ต่ำคือดี) Lifetime (สูงคือดี) เป็นต้น สำหรับในโครงการเลือกใช้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่กำลังถูกพูดถึงมากในปัจจุบัน จากกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะและระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มี แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นส่วนประกอบสำคัญ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีหลากหลายประเภท โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติได้แบ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนตามวัสดุขั้วลบและขั้วบวก รวมถึงการใช้งาน ออกเป็น 6 ประเภท ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ แบ่งตามวัสดุขั้วลบและขั้วบวก รวมถึงการใช้งาน

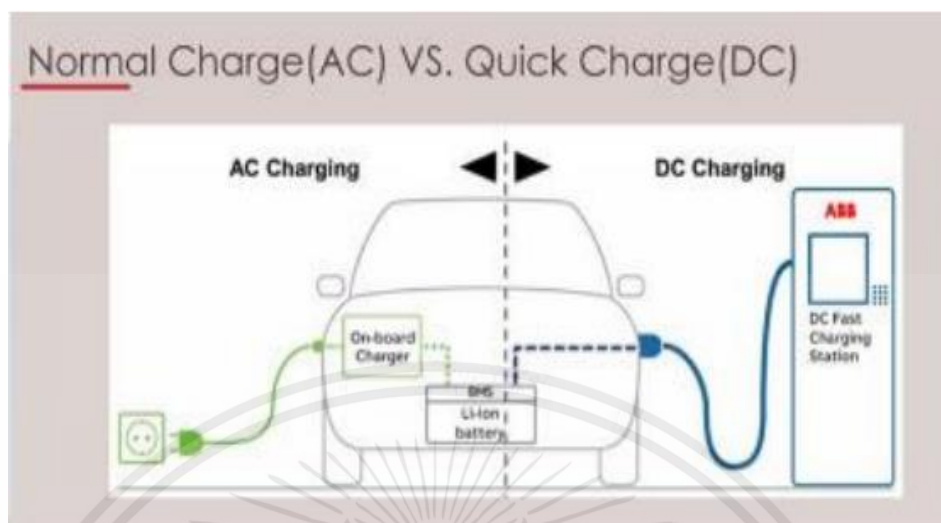
ประเภทที่	วัสดุขั้วบวก	วัสดุขั้วลบ	การใช้งาน
1	Lithium Cobalt Oxide (LiCoO <sub>2</sub> LCO)	แกรไฟต์	โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แล็ปท็อป กล้องดิจิทัล
2	Lithium Manganese Oxide (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> LMO)	แกรไฟต์	เครื่องมือไฟฟ้า (power tools) อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า
3	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (Li(Ni Mn Co)O <sub>2</sub> NMC NCM)	แกรไฟต์	จักรยานไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ รับส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า (มักใช้ในรถไฮบริด) ระบบสำรองไฟฟ้า
4	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (Li(Ni,Co,Al)O <sub>2</sub> NCA)	แกรไฟต์	อุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า (เช่น ที่พบใน Tesla Model S) ระบบสำรองไฟฟ้า
5	Lithium Iron Phosphate (LiFePO <sub>4</sub> LFP)	แกรไฟต์	ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้าหรือแทนแบตเตอรี่กรดตะกั่วในรถยนต์ (Start-Lighting-Ignition battery) ระบบที่ต้องการกระแสและทนทานสูง
6	แกรไฟต์ หรือ LMO	Lithium Titanate (Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> LTO)	ระบบสำรองไฟฟ้า ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า (Mitsubishi i-MiEV Honda Fit EV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นของพลังงานสูง แรงดันไฟฟ้าคงที่สูง และอัตราการคายประจุต่ำ ทำให้สามารถกักเก็บพลังงานได้มากขึ้น แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้ก็คือ ต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง รวมถึงอาจเกิดการลุกไหม้และระเบิดได้ระหว่างการใช้งานจากการที่แบตเตอรี่ลัดวงจร ผู้ใช้งานจึงควรทำตามเงื่อนไขการใช้งานด้วยความระมัดระวัง

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) เป็นเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Technology) สำคัญที่ในการพัฒนาพลังงานทดแทน เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนมีการเก็บและปล่อยพลังงานได้อย่างรวดเร็วและจุพลังงานได้มากเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแบตเตอรี่ ทั้งนี้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) ถูกจัดเป็นระบบสำรองพลังงานไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Energy Storage) ตัวอย่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy Storage) เช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply UPS) เป็นต้น

ตัวอย่าง เทคโนโลยีชาร์จเร็ว (Quick Charge หรือ Fast Charge) สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า Plug-in Hybrid เทรนด์รถยนต์ไฟฟ้ากำลังได้รับความนิยมในหลายประเทศทั่วโลก โดยหนึ่งในประเภทรถยนต์ไฟฟ้าที่ได้รับความนิยม คือ Plug-in Hybrid หรือ PHEV ที่มีระบบการทำงานคล้ายกับรถยนต์แบบ Hybrid แต่จะมีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่กว่าสามารถใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนรถได้ระยะ 20-50 กิโลเมตร สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า Plug-in Hybrid นั้นจะชาร์จกับไฟบ้านผ่านสาย Adapter ปกติต้องใช้เวลาในการชาร์จไฟให้เต็ม 6-8 ชั่วโมง ปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีชาร์จเร็ว (Quick Charger) เข้ามา ทำให้เราสามารถชาร์จไฟแบตเตอรี่ได้ในระยะเวลาเร็วมากขึ้น แต่ Quick Charger จะเป็นการชาร์จโดยใช้ตู้ EV Charger (สถานีชาร์จรถไฟฟ้า) ดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 เนื่องจากต้องแปลงจากไฟฟ้าธรรมดา (AC) ให้เป็น DC แล้วจ่ายไฟ DC เข้าที่แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้สมาคมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานของหัวชาร์จในไทยว่าจะใช้เป็นแบบ Type 2 และ ตัวอย่าง Quick Charger สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า Plug-in Hybrid เช่น รถยนต์ไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 24 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้ตู้ EV Charger แบบ Quick Charger ที่มีกำลังชาร์จอยู่ที่ 50 กิโลวัตต์โดยทำให้การชาร์จแบตเตอรี่ใช้เวลา เพียง 20-90 นาที



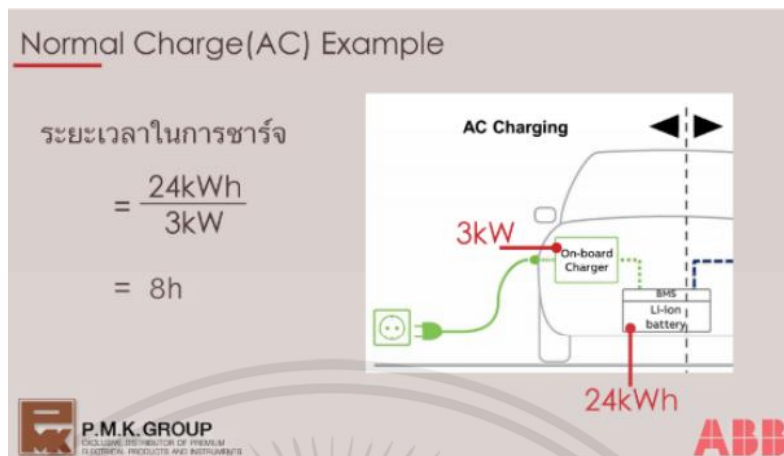
รูปที่ 2.7 แสดงการชาร์จสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า [แหล่งที่มา : <https://www.pmk.co.th>]



รูปที่ 2.8 แสดงอุปกรณ์ในการชาร์จสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า [แหล่งที่มา : <https://www.pmk.co.th>]

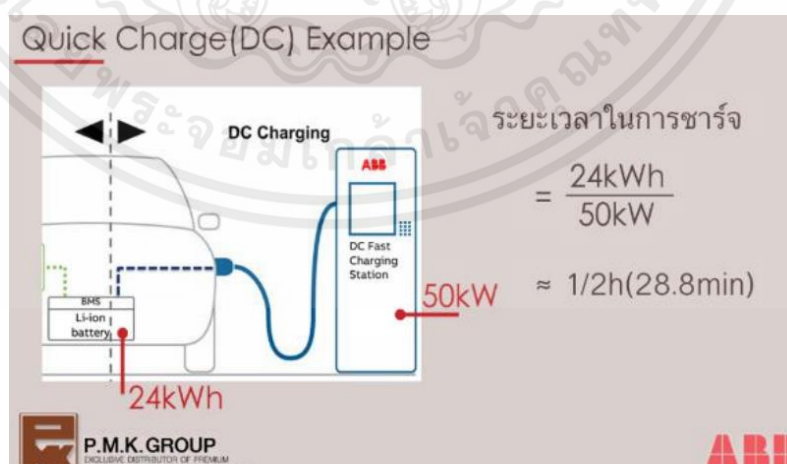
Normal Charge เป็นการชาร์จด้วยไฟ AC โดยชาร์จผ่าน On Board Charger ที่อยู่ในตัวรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงไฟ AC ไปเป็นไฟ DC ขนาดของตัว On Board Charger จะขึ้นอยู่กับยี่ห้อรถยนต์ ซึ่งขนาดของ On Board Charger จะมีผลต่อระยะเวลาในการชาร์จไฟของแบตเตอรี่รถยนต์ ยกตัวอย่างเช่น รถยนต์ไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 24 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และมี On Board Charger ขนาด 3 กิโลวัตต์ระยะเวลาในการชาร์จจะอยู่ที่ 8 ชั่วโมงการคำนวณ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการคำนวณการชาร์จด้วยไฟ AC [แหล่งที่มา : <https://www.pmk.co.th>]

Quick Charge จะเป็นการชาร์จโดยใช้ตู้ EV Charger (สถานีชาร์จรถไฟฟ้า) ที่แปลงไฟ AC ไปเป็นไฟ DC แล้วจ่ายไฟ DC เข้าที่แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จจะน้อยกว่าแบบ Normal Charger หัวชาร์จ (SOCKET) ของตู้ EV Charger จะมีทั้งแบบที่เป็น AC และ แบบ DC ประเภทของหัวชาร์จจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานของผู้ผลิตรถยนต์ ยกตัวอย่างเช่นรถยนต์ไฟฟ้าที่มีแบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 24 กิโลวัตต์/ชั่วโมง โดยใช้ตู้ EV Charger แบบ Quick Charge ที่มีกำลังชาร์จอยู่ที่ 50 กิโลวัตต์ระยะเวลาในการชาร์จจะอยู่ที่ไม่เกิน 1/2 ชั่วโมงการคำนวณดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการคำนวณการชาร์จด้วยโดยใช้ตู้ EV Charger  
[แหล่งที่มา: <https://www.pmk.co.th>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน Li-ion (polymer) และแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ LiCoO<sub>2</sub> มีการใช้งานอย่างมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แต่แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ LiCoO<sub>2</sub> ราคาแพงมาก และไม่ปลอดภัยเมื่อมันมีความจุสูงขึ้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต LiCoO<sub>2</sub> เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในปัจจุบันนี้ ตลาดแบตเตอรี่ตระกูลลิเทียมไอออนมีความนิยม เนื่องจากมีความจุสูงและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น คอมพิวเตอร์แล็ปท็อป เครื่องมือกล รถวีลแชร์ไฟฟ้า รถจักรยานไฟฟ้า รถไฟฟ้า แม่น้ำรถบัสน้ำไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต LiCoO<sub>2</sub> มีความปลอดภัยเทียบเท่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด แต่ความแรงเทียบเท่าแบบตระกูลลิเทียมไอออน ข้อดีของลิเทียมไอออน Li-ion (polymer) ที่เป็นชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต LiCoO<sub>2</sub> ดังรูปที่ 2.11

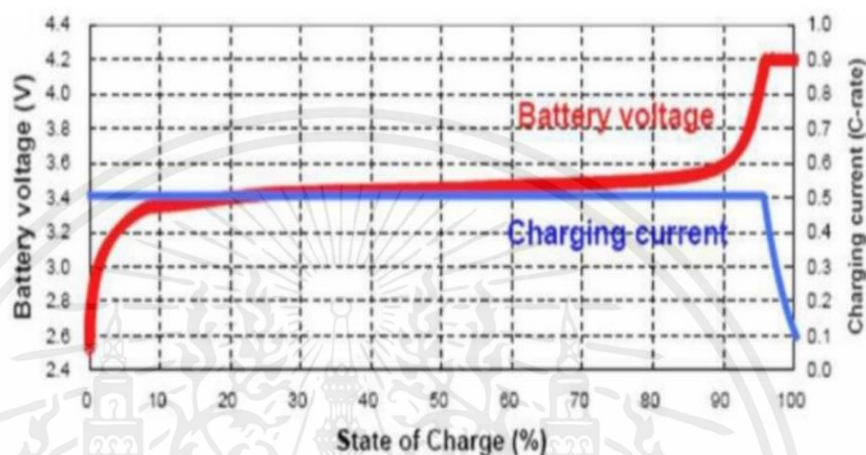


รูปที่ 2.11 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต

### 1. ชาร์จไว

ระหว่างกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ Li-ion แบบดั้งเดิมประกอบด้วยลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ LiCoO<sub>2</sub> ต้องการชาร์จสองขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือการใช้กระแสคงที่ (Constant Current CC) เพื่อให้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของจุดชาร์จ (Stage of Charge SOC) ขั้นตอนที่สองเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไปถึง 4.2 โวลต์ดังรูปที่ 2.12 เป็นขีดจำกัดบนแรงดันของการชาร์จก็จะเริ่มชาร์จที่แรงดันคงที่จนกว่ากระแสจะลดลงเรื่อยๆ ในขั้นตอนที่ (60 เปอร์เซ็นต์ SOC) ใช้เวลาประมาณ

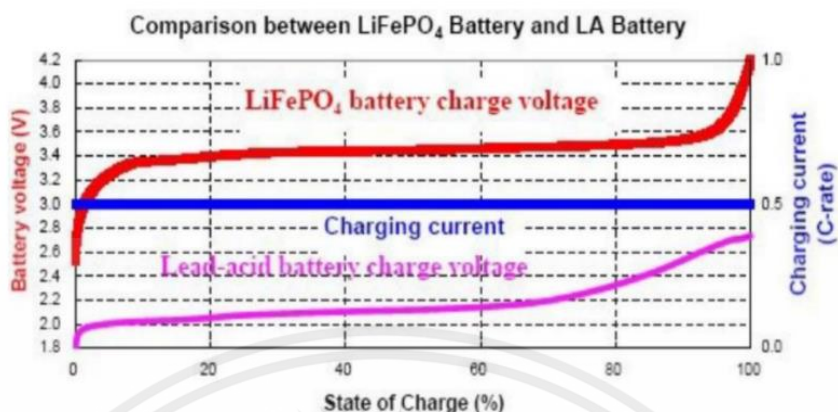
2 ชั่วโมงและในขั้นตอนที่ 2 (40 เปอร์เซ็นต์SOC) ใช้เวลาอีกประมาณ 2 ชั่วโมง แต่แบตเตอรี่รี LiFePo4 สามารถใช้ แค่ 1 ขั้นตอน เมื่อ CC ไปถึง 95 เปอร์เซ็นต์ ของ SOC หรืออาจชาร์จทั้ง CC+CV เพื่อให้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ SOC เวลาทั้งหมดประมาณสองชั่วโมง



รูปที่ 2.12 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่กับปริมาณแบตเตอรี่และกำลังการชาร์จแบตเตอรี่ [แหล่งที่มา: <http://blog.ebikr.com>]

## 2. การเพื่อการชาร์จมากเกินไป (over charge) สูงและสมรรถนะที่ปลอดภัยกว่า

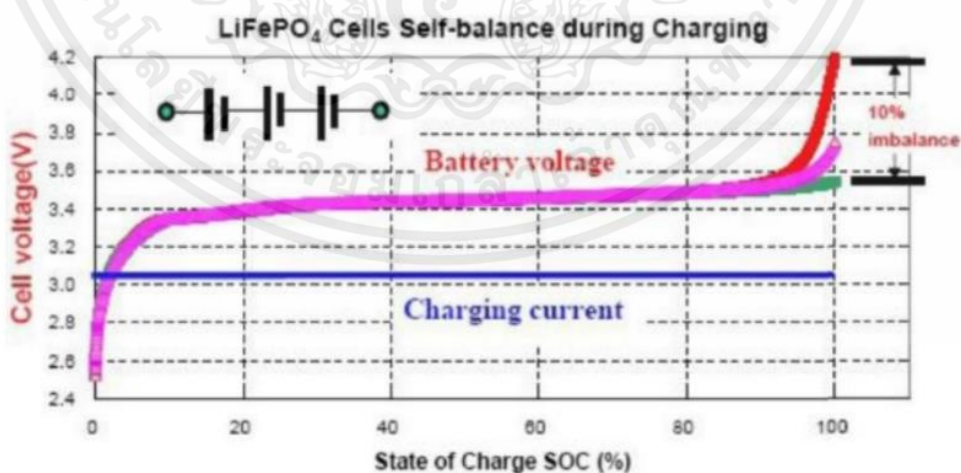
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีการเพื่อการโอเวอร์ชาร์จแคบมาก ประมาณ 0.1 โวลต์ ดังรูปที่ 2.13 ที่แรงดันชาร์จ 4.2 โวลต์และต้องพิจารณาขีดจำกัดควบคุมบนของการชาร์จแรงดันด้วย ถ้าชาร์จเกิน 4.3 โวลต์อาจทำให้แบตเตอรี่ประสิทธิภาพตกได้และอาจเป็นเหตุให้ไฟไหม้และระเบิดได้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีการเพื่อการโอเวอร์ชาร์จกว้างมากกว่าเป็น 0.7 โวลต์ที่แรงดันชาร์จเป็น 3.4 โวลต์ ความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีวัดจาก DSC หลังจากโอเวอร์ชาร์จเป็น 90 จูลต่อกรัม สำหรับลิเทียมไอออนและ 1600 จูลต่อกรัม ของ LiCoO<sub>2</sub> ยิ่งมีการคายความร้อนมากเท่าไร จะเกิดพลังงานจะสะสมในแบตเตอรี่ในทางสิ้นเปลือง อาจทำให้ไฟไหม้และระเบิดได้แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถโอเวอร์ชาร์จได้ถึง 30 โวลต์ โดยไม่ต้องมีวงจรป้องกันเหมาะสมกับการใช้งานที่กระแสวิงๆ ความจุสูงๆ ในกราฟแสดงถึงความปลอดภัยและความทนต่อการโอเวอร์ชาร์จของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน กราฟมีลักษณะคล้ายการตอบสนองของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด



รูปที่ 2.13 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการชาร์จแบตเตอรี่กับปริมาณแบตเตอรี่และกำลังการชาร์จแบตเตอรี่ [แหล่งที่มา: <http://blog.ebikr.com>]

### 3. สมดุลด้วยตัวเอง

เซลล์ของลิเทียมไอออนจะถูกต่ออนุกรมและจัดให้สมดุลระหว่างกระบวนการชาร์จ เนื่องจากมีความเผื่อต่อการโอเวอร์ชาร์จสูง นี่คือข้อแตกต่างจากแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด คุณลักษณะการสมดุลตัวเองสามารถยอมให้ความแตกต่างระหว่างเซลล์สำหรับทั้งแรงดันและความจุของแบตเตอรี่ไม่เกิน 10% ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างสถานการณ์ชาร์จแบตเตอรี่กับแรงดันเซลล์

[แหล่งที่มา: <http://blog.ebikr.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ระบบจัดการแบตเตอรี่และแบตเตอรี่ชาร์จเจอร์

การเพื่อโอเวอร์ชาร์จและชุดสมดุลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนส่วนมากจะมีชุดป้องกันแบตเตอรี่และวงจรที่มีราคาไม่แพง ใช้การชาร์จเพียงหนึ่งขั้นตอนอาจใช้แหล่งจ่ายไฟแบบทั่วไป เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแทนที่จะเป็นชาร์จเจอร์แบบ Li-ion

#### 5. อายุการใช้งานที่ยืนยาว

เมื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่  $\text{LiCoO}_2$  มีอายุการชาร์จเพียง 400 ครั้ง แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนอายุการชาร์จถึง 2000 ครั้ง

#### 6. สมรรถนะอุณหภูมิสูง

ข้อเสียของการแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 60 องศาเซลเซียส แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทำงานได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการนำความร้อนของลิเทียมไอออนที่สูงกว่าทฤษฎีทั้งหมดเป็นข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ทางกลุ่มเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งมีข้อดีในด้านต่างๆ ทั้งการชาร์จไว มีการเผื่อต่อการชาร์จสูง มีสมรรถนะที่ปลอดภัยกว่า มีสมดุลในตัวเอง มีระบบจัดการแบตเตอรี่ มีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนาน และสุดท้ายคือ มีสมรรถนะอุณหภูมิสูง

สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ เป็นแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟโดยมีวิวัฒนาการมาจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและแบตเตอรี่ลิเทียมโลหะ โดยแบตเตอรี่นั้นนำเทคโนโลยีโพลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์แทนการไฟฟ้าเหลวโพลิเมอร์กึ่งของแข็งโดยมีศักดิ์การนำไฟฟ้าสูง จึงจะสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของแบตเตอรี่เหล่านี้ให้สูงขึ้น โดยแบตเตอรี่ให้พลังงานมากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมอื่นๆ และมักถูกนำมาใช้กับประเภทงานที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนัก เช่น โทรศัพท์มือถือ และยานพาหนะไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

#### ข้อดีแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์

- ความหนาแน่นพลังงานสูงเมื่อเทียบกับมวลของสูงกว่าแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมโดยสูงกว่า 4-5 เท่า และสูงกว่าแหล่งพลังงานไฮโดรดีโกละนิกเกิล 3-4 เท่า
- การรักษาแรงดันไฟฟ้าภายในระหว่างการทำงาน หรือ มีขีดจำกัดในการทำงาน
- แบตเตอรี่มีคุณภาพสูงสุดในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อเสียแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์

- อันตรายจากไฟไหม้ในกรณีที่มีการบรรจุมากเกินไปโดยมีความร้อนสูงจากแบตเตอรี่มากเกินไป แบตเตอรี่เหล่านี้จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ป้องกันอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งจะตรวจสอบกระแสการชาร์จและอุณหภูมิรวมถึงอัลกอริทึมการชาร์จแบบพิเศษ
- อายุแบตเตอรี่ที่มากขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของอายุในระหว่างการจัดเก็บและการดำเนินงานในระยะยาว (เชื่อว่าแบตเตอรี่จะสูญเสียความจุสูงสุดถึง 20% ในแต่ละปี)
- แบตเตอรี่มีความล้มเหลวในระหว่างการปล่อยลิเทียม (ต่ำกว่า 3 โวลต์)
- แบตเตอรี่มีขีดจำกัดในด้านความร้อนไม่สูงกว่า 60 องศาและการบรรจุเกิน 4.2 โวลต์ (ด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 4.5 โวลต์สามารถระเบิดได้)
- บอบบางไม่ค่อยแข็งแรง

### 2.1.6 Battery Management System (BMS)

Battery Management System (BMS) ในแบตเตอรี่ คือ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ใดๆ ที่ใช้ในการจัดการแบตเตอรี่แบบชาร์จได้ (แบตเตอรี่แบบแพ็ค) ซึ่งมีหลายขนาดขึ้นอยู่กับจำนวนอนุกรม แบตเตอรี่ที่จะใช้งานคล้ายกับวงจรป้องกันแบตเตอรี่ PCB Protected แบบเซลล์เดียว แต่ถ้าพูดถึงวงจร BMS จะหมายถึงการต่อแบตเตอรี่หลายก้อน แบตเตอรี่แบบแพ็ค ซึ่งจะมีฟังก์ชันการทำงานที่มากกว่า วงจรป้องกัน PCB Protected อย่างวงจรป้องกัน PCB Protected จะทำหน้าที่สำคัญๆ 3 อย่าง ได้แก่ คอยป้องกันการใช้งานที่กระแสเกิน (Over Current Protection) ป้องกันแรงดันการชาร์จไฟเกิน (Over Charge Voltage Protection) และป้องกันการใช้ไฟในระดับโวลต์ที่ต่ำกว่ากำหนด (Under Discharge Voltage Protection) แต่วงจร BMS อาจจะมีเพิ่มขึ้นจาก 3 ฟังก์ชันบนตัวอย่าง เช่น เพิ่มฟังก์ชัน Over Temperature Under-Temperature Short Circuit Protection Ground fault or leakage current detection และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับผู้ผลิต หรือบางรุ่นจะมีวงจร Balancing ในวงจร BMS ซึ่งจะทำหน้าที่คอยควบคุมกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลเข้า (Charge) หรือไหลออกจากแบตเตอรี่ (Discharge) ให้แรงดันของแบตเตอรี่แต่ละก้อนเท่ากันอยู่เสมอ เพื่อไม่ให้มีก้อนหนึ่ง BMS จะทำการตรวจสอบขั้นพื้นฐาน โดยการตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์อุณหภูมิของเซลล์การวัดกระแสความต้านทานต่อเซลล์ เพื่อแก้ไขจัดการกับปัญหาให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ BMS จะมีประสิทธิภาพในการตรวจจับความผิดปกติของความจุที่หายไป ซึ่งจะประเมินจากแรงดันและความต้านทานภายใน จาก 100 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์แม้ว่าความจุจะลดลงเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงดัน BMS จะตรวจสอบต่อความผิดปกติและความต่างศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างเซลล์ที่เกิดจากความไม่สมดุลของเซลล์และการเปลี่ยนแปลงความต้านทานภายใน จะคำนวณ Coulomb counting ในการควบคุมการเปิด/ปิด ความสมดุลในการชาร์จ (SOC) จะทำงาน แปรผันตามความเสื่อมลงของแบตเตอรี่

### 1. การประเมิน (SoH) เพื่อการตรวจสอบสุขภาพเซลล์

1. Internal resistance / impedance/conductance
2. Capacity
3. Voltage
4. Self-discharge
5. Ability to accept a charge
6. Number of charge – discharge cycles

### 2. การวัดเซ็นเซอร์ (SOF)

วิธีการทำงานของ BMS คือ สังเกตข้อบกพร่องและตรวจสอบจากเซ็นเซอร์เซลล์ที่หลักๆ เช่น การวัดกระแสในการต่อวงจรใช้งานมีการประมวลผลจาก ECU เพื่อตรวจสอบไม่ให้ง่ายเกินกว่าความจุของแบตเตอรี่ สามารถปล่อยได้โดยการตัด/ต่อ ไปที่ภาคจ่ายไฟ มอสเฟส หรือคอนแทกเตอร์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสียหายต่อวงจรและเซลล์ การวัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันอุณหภูมิเกินค่ามาตรฐานของแบตเตอรี่ ถ้าเกินจะสั่งหยุดการทำงานทันที

3. การส่งข้อมูลเมื่อ ECU ประมวลผลหรือปรับแก้ไข ก็ส่งข้อมูลต่างๆ ไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่อ เช่น เครื่องชาร์จ เพื่อตัด/ต่อในการชาร์จ ECU ของรถ เพื่อบอกถึงสถานะในการทำงานสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเปิด/ปิด วงจรทางไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อป้องกันความปลอดภัย โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Battery Management System (BMS) [แหล่งที่มา : [https:// www.gtm.co.th](https://www.gtm.co.th)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.7 Arduino

Arduino คือ โครงการที่นำชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่างๆ มาใช้ร่วมกันใน ภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะ คือมีการเขียนไลบรารีของ Arduino (รูปที่ 2.16) ขึ้นมา เพื่อให้การสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกัน สามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้โดยตัวโครงการได้ออก บอร์ดทดลองมาหลายรูปแบบ เพื่อใช้งานกับ IDE ของตนเอง สาเหตุหลักที่ทำให้ Arduino เป็นนิยมมากเป็นเพราะซอฟต์แวร์ที่ใช้งานร่วมกันสามารถโหลดได้ฟรีและตัวบอร์ดทดลองยังถูกแจก แปรณ



รูปที่ 2.16 Arduino UNO R3 [แหล่งที่มา : [https:// www.ai-corporation.net](https://www.ai-corporation.net)]

### 1. ส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware)

บอร์ด Arduino เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) เป็นชิ้นส่วนหลักถูกนำมาประกอบร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน โดยบอร์ด Arduino เองก็มีหลายรุ่นให้เลือกใช้ โดยในแต่ละรุ่นอาจมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดของบอร์ดหรือสเปค เช่น จำนวนของขารับส่งสัญญาณ แรงดันไฟที่ใช้ประสิทธิภาพของ MCU เป็นต้น

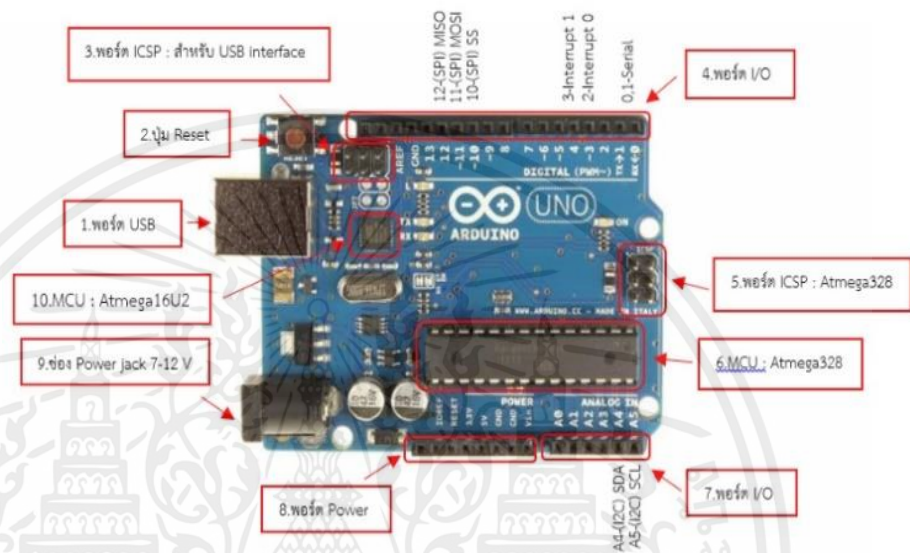
### 2. รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino

1. เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE
2. หลังจากเขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่น บอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port
3. กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้น กดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง Done uploading และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที

### 3. Layout & Pin out Arduino Board โดยมีส่วนประกอบดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของ Arduino UNO R3

[แหล่งที่มา: [https:// www.mindphp.com](https://www.mindphp.com)]

1. USB Port: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และ จ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button เป็นปุ่ม Reset ใช้กด เมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Comport บน Atmega16U2
4. I/O Port Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx Rx Serial Pin3 5 6 9 10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็นช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. Power Port ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V +5V GND Vin
9. Power Jack รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U

### 2.1.8 หลักการระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่

ระบบระบายของความร้อนให้แก่แพ็คแบตเตอรี่ [15] ในรถยนต์ขึ้นอยู่กับรูปทรงของแบตเตอรี่ชนิดของแบตเตอรี่ อัตราการจ่ายไฟและอัตราประจุรวมถึงขนาดของแบตเตอรี่และพื้นที่ในการแพ็คแบตเตอรี่โดยหลักๆ การระบายความร้อนจะเป็นการใช้ประโยชน์จากการนำความร้อน (Conductive Heat Transfer) การพาความร้อน (Convective Heat Transfer) และการดูดซับความร้อนในรูปแบบความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) รวมถึงรูปแบบความร้อนแฝง (Latent Heat) โดยทั้งสี่ความร้อนที่กล่าวมาสามารถดูดซับความร้อนจากแพ็คแบตเตอรี่ได้ดังสมการที่ 2.1 โดยที่ผลกระทบของการแผ่รังสีมีค่าน้อยมาก เนื่องจาก

$$Q_{battery} - Q_{conduction} - Q_{convection} - Q_{sensible} - Q_{latent} = 0 \quad (2.1)$$

$Q_{battery}$  คือ ความร้อนเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าขณะใช้งานแบตเตอรี่ ทั้งขณะจ่ายไฟฟ้าและอัดประจุไฟฟ้า โดยความร้อนส่วนนี้ประกอบด้วยความร้อนสี่ส่วน คือ ความร้อนเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (Resistance Loss/Ohmic Loss) ความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนตัวของไอออน (Ion Transport Loss) ความร้อนเนื่องปฏิกิริยาทางเคมี (Reaction Rate Loss) ความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy Heat)

$Q_{sensible}$  คือ ความร้อนที่ทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่สถานะของสารไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าค่าความจุความร้อนของวัสดุและมีปริมาณมวลที่สูง จะทำให้วัสดุหรือแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย โดยบางเทคนิคการระบายความร้อนได้ใช้เทคนิคนี้ เพื่อรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เช่น การนำเจล ของแข็งหรือของเหลว ล้อมรอบแบตเตอรี่ไว้ เพื่อดูดซับความร้อนไว้

$Q_{latent}$  คือ ความร้อนที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่น ระบบปรับอากาศภายในบ้านหรือรถยนต์ (Air Conditioner System) ท่อนำความร้อน (Heat Pipe) และอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q_{conduction}$  คือ ความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากตัวแพ็คแบตเตอรี่ โดยผ่านตัววัสดุ นำความร้อนไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ โดยความสามารถในการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อนของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิ

$Q_{convection}$  คือ ความร้อนที่ถูกระบายออกหรือถูกพัดพาออกจากตัวแบตเตอรี่โดยมีสารพาความร้อน เคลื่อนที่จะขึ้นอยู่กับค่าการพาความร้อนปริมาณสารพาความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิ

### 1. ความร้อนในเซลล์แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

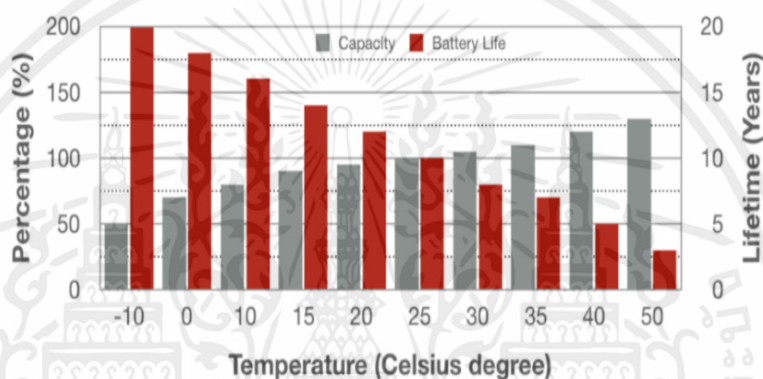
แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนนั้นอาจจะมีความปลอดภัยสูง แต่ในบางครั้งก็อาจจะมีอันตรายได้ด้วยเช่นกัน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนอาจเกิดความร้อนสูงได้จากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากการอัดหรือปล่อยประจุแบตเตอรี่ ซึ่งโดยปกติแล้วนั้นจะเกิดความร้อนขึ้นอยู่แล้ว แต่ถ้ามหากแบตเตอรี่หรือเครื่องประจุแบตเตอรี่ (Charger) นั้น มีความผิดปกติก็อาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟไหม้ได้ ก็คือกรณีที่แบตเตอรี่ได้รับการอัดประจุที่เกินกว่าที่จะรับได้ (Overcharge) ซึ่งอาจเกิดในกรณีที่เครื่องประจุแบตเตอรี่มีความบกพร่อง ทำให้ไม่สามารถหยุดการอัดประจุได้แม้ว่าแบตเตอรี่จะเต็มแล้วหรือแบตเตอรี่เสื่อมสภาพทำให้ประสิทธิภาพในการรับประจุลดน้อยลง สาเหตุอีกประการ คือการที่มีการใช้งานแบตเตอรี่อย่างหนัก เช่น การอัดประจุหรือปล่อยประจุด้วยกระแสที่สูงเป็นเวลานานๆ หากมีการใช้ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือแบตเตอรี่ไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีนั้น ยิ่งส่งผลทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้ได้ และหากแบตเตอรี่มีอุณหภูมิภายในถึง 60 องศาเซลเซียส จะทำให้เริ่มมีความร้อนสูงเกิดขึ้นที่ขั้วลบของแบตเตอรี่ สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สต่างๆ ที่อาจติดไฟได้อาจมีเกิดความร้อนขึ้นด้วย ซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่อง จนในที่สุดอาจเกิดไฟลุกไหม้หรือระเบิดได้ เหตุการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเกิดความร้อนต่อเนื่องแบบกู่ไม่กลับ (Thermal Runaway) ในบางกรณีอุณหภูมิอาจเพิ่มสูงถึง 900 องศาเซลเซียสได้

### 2. ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

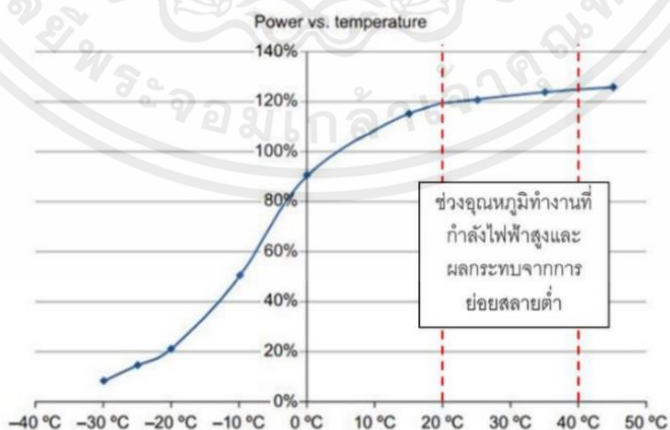
การอัดประจุหรือการปล่อยประจุพลังงานจากแบตเตอรี่จะมีความร้อนเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเสมอ ซึ่งอุณหภูมิจะส่งผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงความจุกระแสไฟฟ้าหรือสมรรถนะจะเพิ่มขึ้น แต่รอบอายุการใช้งานลดลง ในทางกลับกันที่อุณหภูมิต่ำความจุกระแสไฟฟ้าหรือสมรรถนะจะลดลง แต่รอบอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 20–40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงอุณหภูมินี้มีความใกล้เคียงกับความจุกะแสไฟฟ้าสูงสุดและส่งผลกระทบต่อ การย่อยสลายหรือเสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และกราฟรูปที่ 2.20 ดังนั้นถ้าเซลล์แบตเตอรี่ ที่นำมาประกอบหรือทำการแพ็คแบตเตอรี่มีคุณภาพที่ต่างกัน จะส่งผลให้สมรรถนะและอายุการใช้งาน ของแต่ละแบตเตอรี่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ถ้าระบบการระบายความร้อนให้กับแพ็คแบตเตอรี่ ยัง ต้องคำนึงเรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์โดยความแตกต่างของอุณหภูมิใน แต่ละเซลล์ที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส

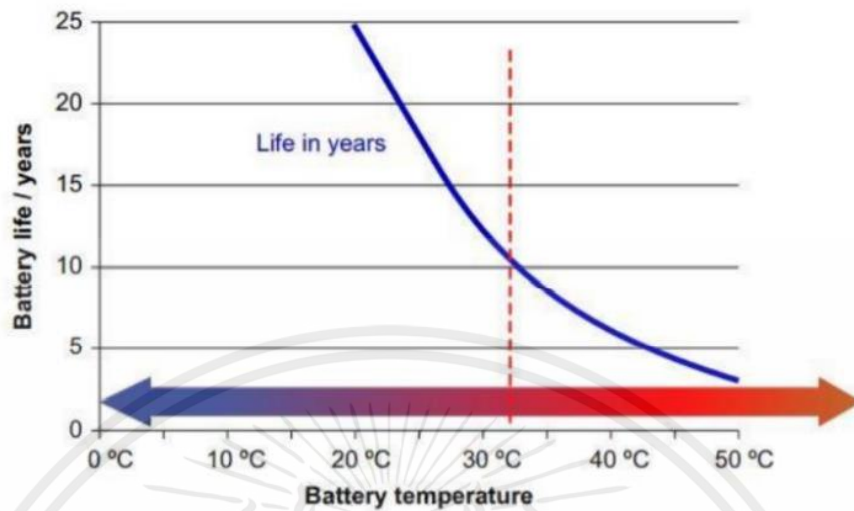


รูปที่ 2.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความจุกะแสไฟฟ้าและอายุการใช้งานกับช่วงอุณหภูมิทำงานต่างๆ ของแบตเตอรี่ [15]



รูปที่ 2.19 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น

[15]

### 2.1.9 สมการความร้อนของแบตเตอรี่

สมการความร้อน (Heat Equation) เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์การนำความร้อน เพื่อทราบการกระจายอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังสมการที่ 2.2

$$P_b C_{pb} k_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q_{battery} \quad (2.2)$$

โดยที่

$Q_{battery}$  คือ การสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ (วัตต์)

$P_b$  คือ ความหนาแน่นของแบตเตอรี่ (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสาม)

$k_b$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแบตเตอรี่ (วัตต์ต่อเมตร

เคลวิน)

$C_{pb}$  คือ ความจุความร้อนของแบตเตอรี่ (วัตต์ต่อกิโลกรัมเคลวิน)

$t$  คือ อุณหภูมิ(เคลวิน) อุณหภูมิของแบตเตอรี่ถูกกำหนดโดยการ

สร้างความร้อนภายในเซลล์ของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Q_{battery}$  แหล่งที่มาของการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ส่วนใหญ่ ประกอบด้วยสองส่วนดังแสดงใน สมการที่ 2.3

$$Q_{battery} = Q_{joule} - Q_{entropy} \quad (2.3)$$

โดยที่

$Q_{joule}$  คือ ผลของการสร้างความร้อนในรูป Joule heating

(วัตต์)

$Q_{entropy}$  คือ ผลของการสร้างความร้อนในรูปปฏิกิริยาเคมีที่

Entropy change (วัตต์)

การสร้างความร้อนในรูป Entropy change คือ ปฏิกิริยาความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากผลของกระบวนการ Concentration polarization และ Charge transfer polarization สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$Q_{entropy} = -T\Delta S \frac{I}{nF} \quad (2.4)$$

โดยที่

$T$  คือ อุณหภูมิ(เคลวิน)

$\Delta S$  คือ เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไป (จูลต่อเคลวิน)

$n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอน (โมล)

$F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 คูลอมบ์ต่อโมล)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (แอมป์)

การสร้างความร้อนในรูป Joule heating ดังรูปที่ 2.21 เกิดจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้า ผ่านความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ เนื่องจากผลของกระบวนการ Internal ohmic resistance ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$Q_{joule} = I R_{int} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (A)

$R_{int}$  คือ ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ ( $\Omega$ )



รูปที่ 2.21 หลักการการสร้างความร้อนในรูป Joule heating

การสูญเสียพลังงานในระหว่างการแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เป็นผลมาจาก 3 ปัจจัย คือ กระบวนการ Concentration polarization กับกระบวนการ Charge transfer polarization ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีและกระบวนการ Internal ohmic resistance ที่เกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของส่วนประกอบภายในเซลล์ แบตเตอรี่โดยผลรวมของความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่ จากสามปัจจัยแสดงดังสมการที่ 2.6

$$R_{int} = R_{ohm} + R_{ch} + R_d \quad (2.6)$$

โดยที่

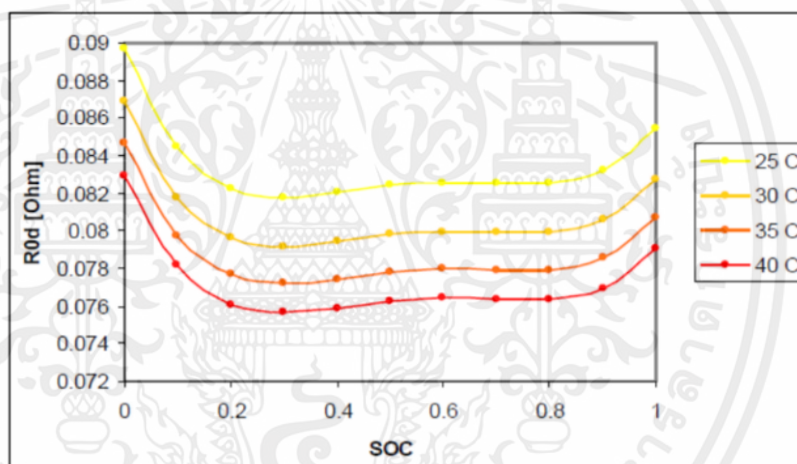
$R_{int}$  คือ ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ (โอห์ม)

$R_{ohm}$  คือ (Ohmic resistance) ความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรด และส่วนประกอบอื่นๆ ของแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายใน (โอห์ม)

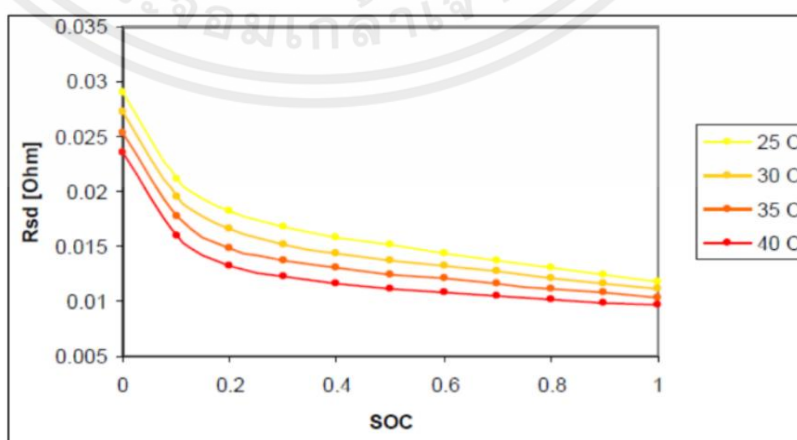
$R_{ch}$  คือ (Charge – transfer resistance) ความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับ activation reactions เนื่องจากในระหว่างกระบวนการไอออนลิเทียมจะแทรกตัวที่อินเตอร์เฟซระหว่าง อิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)

$R_d$  คือ (Diffusion resistance) ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออน ภายในอิเล็กโทรไลต์(โอห์ม)

ค่าความต้านทานภายในทั้งสามเทอมจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น SOC และ อุณหภูมิ จากรูปที่ 2.22 รูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.24 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในทั้งสามเทอมที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ

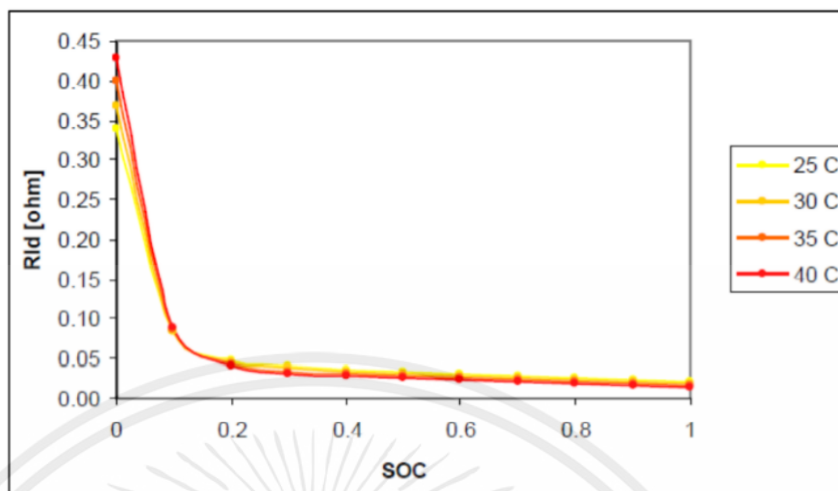


รูปที่ 2.22 ค่า Ohmic resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.23 ค่า Charge – transfer resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

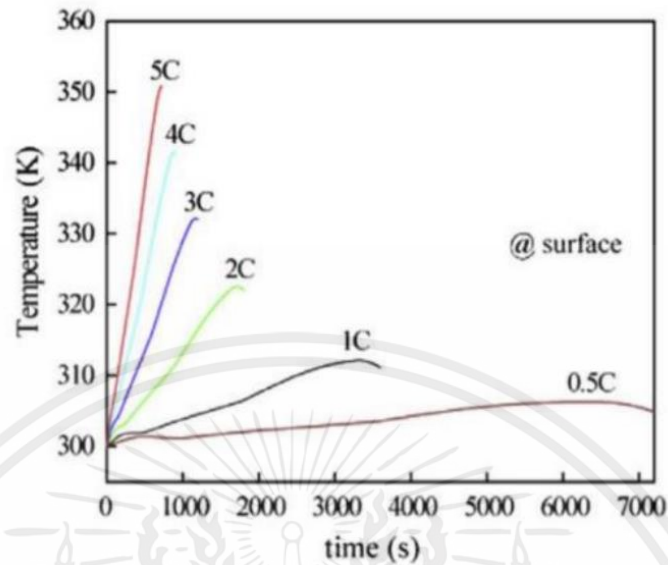


รูปที่ 2.24 ค่า Diffusion resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ

ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่จะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูง ยกเว้นในเทอมของ Diffusion resistance และที่ SOC ตั้งแต่ 0–0.1 จะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในทั้ง 3 เทอมไม่ได้เป็นค่าคงที่ โดยค่า Ohmic resistance จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนในเทอม Joule heating ส่วนค่า Charge-transfer resistance และ ค่า Diffusion resistance จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนในเทอม Entropy change

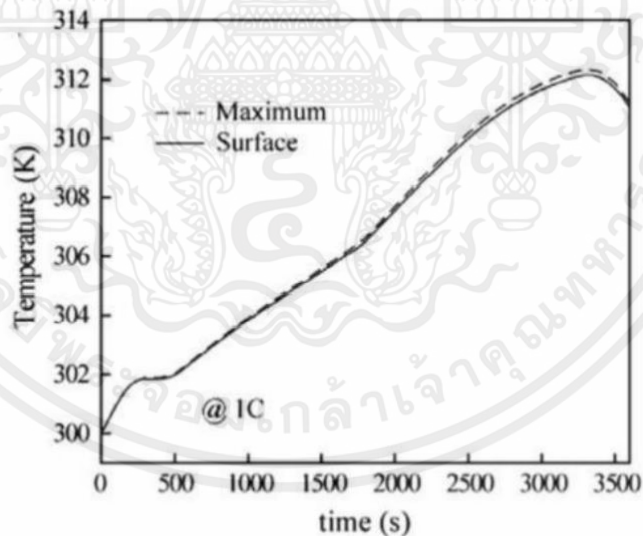
#### 1. พฤติกรรมความร้อนของแบตเตอรี่

Jeon และคณะ [14] ได้ทำศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนทรงกระบอก 18,650 ประเภท LCO ด้วยความจุไฟฟ้า 1.5 แอมป์ต่อชั่วโมง และได้ใช้แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ช่วยแก้ปัญหาสมการการอนุรักษ์พลังงาน โดยพิจารณาจากเทอมการสร้างความร้อน (heat generation) ทั้งในรูปแบบ Joule heating และ Entropy change ที่อัตราการปล่อยประจุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 จะเห็นได้ว่า ยิ่ง C-rate สูง อุณหภูมิพื้นผิวของเซลล์แบตเตอรี่ยิ่งสูงตามไปด้วย จากรูป ที่ 2.26 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับอุณหภูมิพื้นผิวที่ 1 องศาเซลเซียส มีพฤติกรรมคล้ายๆ กัน และแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลาผลจากการสร้างความร้อนจะมีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 2.25 อุณหภูมิผิวที่อัตราการปล่อยประจุที่ 0.5C 1C 2C 3C 4C และ 5C

[14]



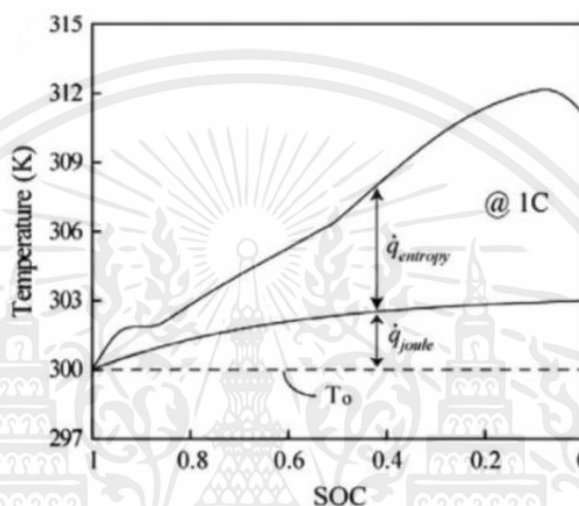
รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิสูงสุดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C

[14]

ซึ่งพฤติกรรมอุณหภูมิที่พื้นผิวเซลล์แบตเตอรี่เป็นผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิด  
 ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ที่อัตราการปล่อยประจุ 1C จะเห็นได้ผลของการสร้างความร้อนในรูป Entropy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

change จะส่งผลต่อพฤติกรรมอุณหภูมิจากเซลล์มากกว่าในรูป Joule heating ที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้ง และเข้าสู่ค่าอุณหภูมิจึงที่ค่าหนึ่งโดยตารางที่ 2.2 คือผลของอุณหภูมิจึงที่ค่าการผันแปรและการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งความร้อนที่ SOC = 0.1 ยิ่ง C-rate สูง ผลของ Joule heating ยิ่งสูงตาม แต่ผลของ Entropy change ลดลง



รูปที่ 2.27 รายละเอียดอุณหภูมิจึงที่ค่าการผันแปรและผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C

[14]

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิจึงที่ค่าการผันแปรและการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งการสร้างความร้อนที่ SOC = 0.1

อัตราการปล่อยประจุ	เซลล์ลิเทียมไอออนชนิด LCO		
	T [°C]	q <sub>Joule</sub> [%]	q <sub>Entropy</sub> [%]
0.5	33.3	12.8	87.2
1	39.3	24.1	75.9
2	49.4	40.4	59.6
3	58.5	51.0	49.0
4	67.3	58.8	41.8
5	75.8	62.8	37.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีข้างต้นการปล่อยประจุด้วยกระแสสูงเป็นเวลานาน โดยหากมีการใช้งานในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือแบตเตอรี่ไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีนั้น จะส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้ได้สูง หากแบตเตอรี่มีอุณหภูมิภายในถึง 60 องศาเซลเซียส จะทำให้มีการเกิดความร้อนสูงขึ้นที่บริเวณขั้วลบของแบตเตอรี่ สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สต่างๆ ที่อาจติดไฟได้ และการที่ความร้อนขึ้นนั้นจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่อง จนในที่สุดอาจเกิดไฟลุกไหม้หรือระเบิดได้ นั่นคือ การเกิดความร้อนต่อเนื่องซึ่งบางกรณีอุณหภูมิอาจเพิ่มสูงถึง 900 องศาเซลเซียสได้ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างแบบจำลองความรันททางคณิตศาสตร์ของเซลล์แบตเตอรี่มาเพื่อออกแบบระบบแบตเตอรี่ได้ถูกต้องจากสมการความร้อนของแบตเตอรี่

## 2. การสร้างแบบจำลองความรันททางคณิตศาสตร์ของเซลล์แบตเตอรี่

จะขึ้นอยู่กับการใช้งานของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (C-rate) ความร้อนที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่เป็นประเด็นที่สำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่กับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อที่จะเข้าใจถึงขีดจำกัดความสามารถในการใช้งาน การใช้แบบจำลองความรันททางคณิตศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบใช้งานรูปแบบต่างๆ

ความร้อนที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่เกิดจากสองปัจจัยหลักคือความร้อนจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของเซลล์แบตเตอรี่ (Joule heating) และความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี(Entropy heat) ซึ่งสัดส่วนในการเกิดความร้อนทั้งสอง

- ความร้อนจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของแบตเตอรี่เซลล์ (Joule heating)

การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานจะทำให้เกิดความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนดังสมการที่ 2.7 อุปกรณ์ไฟฟ้าล้วนมีความต้านทานภายในจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือสารเคมีเช่นเดียวกันกับเซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความร้อนและสะสมอยู่ในตัวเซลล์

$$Q_{joule} = I^2 R_{int} \quad (2.7)$$

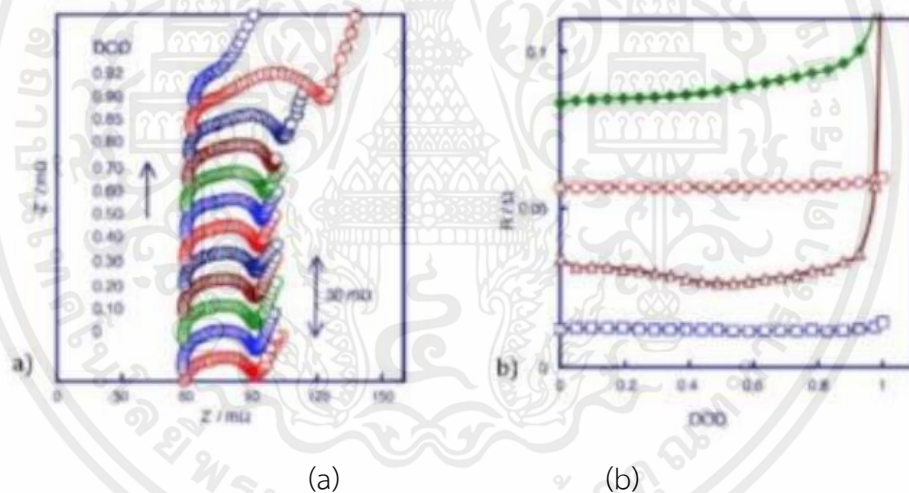
สำหรับแบตเตอรี่ความต้านทานภายใน (Internal resistance  $R_{int}$ ) จะได้รับอิทธิพลจากสามปัจจัยคือ ความต้านทานโอห์มมิก (Ohmic resistance  $R_{ohm}$ ) ที่เกิดจากตัววัสดุที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรด (Electrodes) รวมไปถึงข้อต่อ (Connection points) ต่างๆ ความต้านทานจากความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (Diffusion resistance  $R_d$ ) และความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transfer resistance  $R_{ch}$ ) สรุปเป็น สมการได้ดังสมการที่ 2.8

$$R_{int} = R_{ohm} + R_{ch} + R_d \quad (2.8)$$

ความต้านทานทั้งสามดังกล่าวมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.28 ความต้านทานโอห์มมิกและความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเซลล์แบตเตอรี่มีการใช้งานจนถึงขีดจำกัด หรือ Depth of discharge (DoD) มีค่าใกล้ถึงค่าที่กำหนดไว้ ยกเว้น ความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของประจุที่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ค่าความต้านทานภายในรวมที่ DoD สูงจะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.28 พฤติกรรมของค่าความต้านทานที่ค่า DoD ต่างๆ

[14]

รูป a เป็นผลของการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของแบตเตอรี่ที่ระดับแบตเตอรี่ (DOD) ปริมาณต่างๆ รูป b แสดงให้เห็นการจำแนกของความต้านทานแต่ละประเภท โดยที่วงกลมแสดงถึงความต้านทาน อันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์อิเล็กโทรดและส่วนประกอบอื่นๆ ของแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายใน ( $R_{ohm}$ ) สีเหลี่ยมแสดงถึงความต้านทานเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ( $R_d$ ) สามเหลี่ยม แสดงถึงความต้านทานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับ activation reactions เนื่องจากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่าง กระบวนการไอออนลิเทียม จะแทรกตัวที่อินเตอร์เฟซระหว่างอิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ ( $R_{ch}$ ) และ ขั้วทลามาตแสดงถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_{int}$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานรวมของทั้งสามพจน์ข้างต้น

จากข้อมูลจะกล่าวจะเห็นว่าความต้านทานของแบตเตอรี่ภายในมีค่าไม่คงที่ เมื่อถูกใช้งานจนแรงดันไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายใน จะเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ซึ่งความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_{int}$ ) จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของการแพร่และการแลกเปลี่ยนของประจุในส่วนของความต้านทานที่เกิดจากวัสดุ นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับคุณสมบัติ ของวัสดุซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะใช้งานแบตเตอรี่นั้นมีค่าไม่สูงมาก (ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส) จึงทำให้ค่าความต้านทานในส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยด้วยเหตุนี้ การวัดค่าความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ด้วยเครื่องมือที่ค่า DoD ต่างๆ หากพบว่าค่าของความต้านทาน ภายในมีค่าสูงขึ้นจะสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าค่าดังกล่าวมีเป็นค่าความต้านทานรวมที่รวมผลของความต้านทานทั้งสามตัวเอาไว้แล้ว เครื่องมือในการใช้วัดแบตเตอรี่คือ Hioki (BATTERY TESTER BT3554) แสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งจะถูกใช้วัดความต้านทานของแบตเตอรี่ที่ขั้วของแบตเตอรี่ ทั้งสองขณะไม่มีการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้า



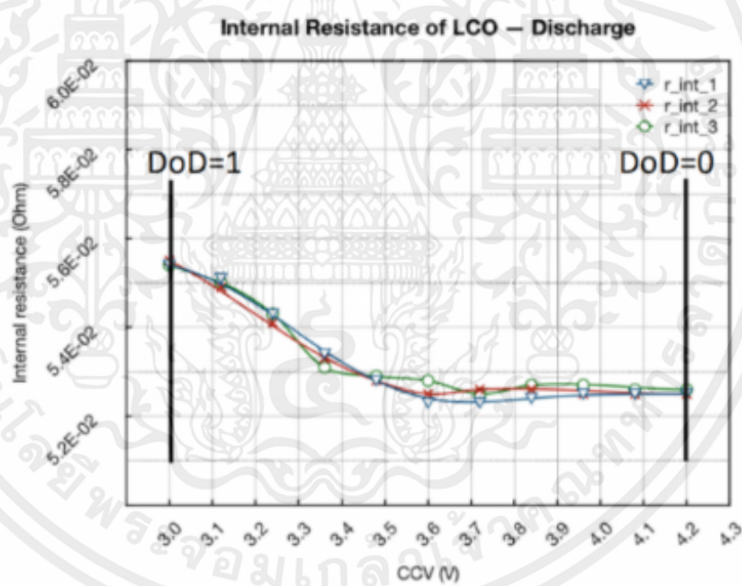
รูปที่ 2.29 เครื่องมือวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Hioki – BATTERY TESTER BT3554)

[14]

จากการทดลองวัดความต้านทานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภท โคบอลต์ออกไซด์ (LCO) ยี่ห้อทोरียามา (Toriyama©) ที่มีความต้านทาน 52.9 มิลลิโอห์มที่มีการใช้งาน ผ่านการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1 คูลอมป์ได้ผลของความต้านทานภายในที่มีการเปลี่ยนแปลงดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 2.30 จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อเทียบกับ CCV พบว่าที่ค่า DoD สูงขึ้น ความต้านทานภายในก็จะสูงขึ้นตาม อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ Hioki นั้นจะทำการวัดความต้านทานโดยใช้สัญญาณความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ซึ่งจะทำให้สามารถวัดความต้านทานได้เพียงแต่ความต้านทานจากวัสดุ ( $R_{ohm}$ ) และความต้านทานจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ( $R_D$ ) เท่านั้น แต่ความต้านทานจากการแลกเปลี่ยนของประจุที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยาเคมีจะปรากฏ เมื่อความถี่ของเครื่องมือวัดมีความถี่ในช่วงที่ต่ำ 1 เฮิร์ตจึงทำให้ไม่สามารถวัดได้ โดยปกติต้องใช้ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ในการวัดเพื่อให้ได้ค่าของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งหมดทุกค่า ดังนั้นเพื่อที่จะสร้างแบบจำลองทางความร้อนจึงต้องใช้เทคนิคการจำลอง (Simulation) เข้าช่วย เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนที่เกิดจากเซลล์แบตเตอรี่ในปริมาณที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในตาม CCV

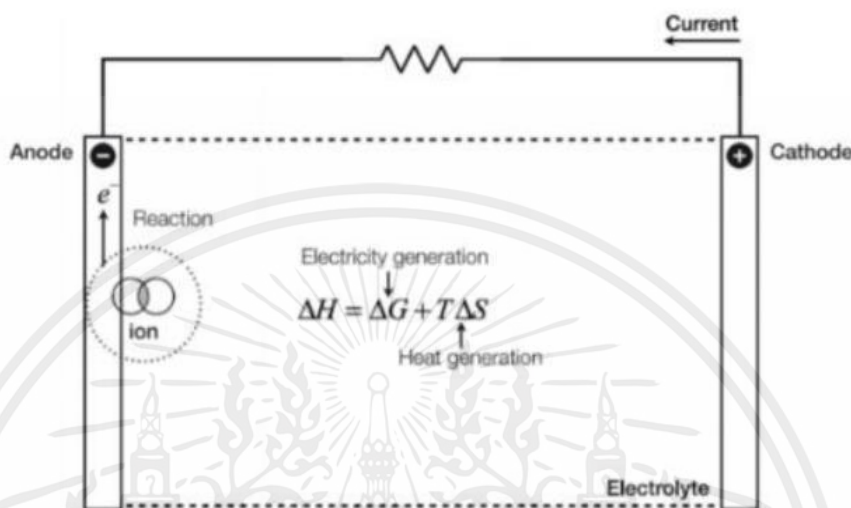
[14]

- ความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy Change)

นอกเหนือจากความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสแล้ว ความร้อนบางส่วน ยังเกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์แบตเตอรี่อีกด้วย อย่างที่ทราบกันดีว่ากระแสไฟฟ้าใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบตเตอรี่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันทางเคมีของสารที่อยู่ภายในอิเล็กโทรไลต์ พลังงานที่เกิดขึ้น นอกจากจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแล้วยังก่อให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกันดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การเกิดขึ้นของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีภายในเซลล์แบตเตอรี่

[14]

เมื่อปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นจะทำให้เกิดพลังงานขึ้นซึ่งส่วนหนึ่งจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีภายในอิเล็กโทรไลต์ซึ่งก่อให้เกิดความร้อน พลังงานที่ถูกแบ่งทั้งสองส่วนจะถูกเรียกว่าพลังงานอิสระหรือพลังงานอิสระกิบป์ (Gibb's Free Energy  $\Delta G$ ) ซึ่งสามารถมองอีกมุมมองหนึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (Voltage drop) ดังสมการ 2.9

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.9)$$

โดยที่

$$\Delta G = -nFV \quad (2.10)$$

จะได้ว่า

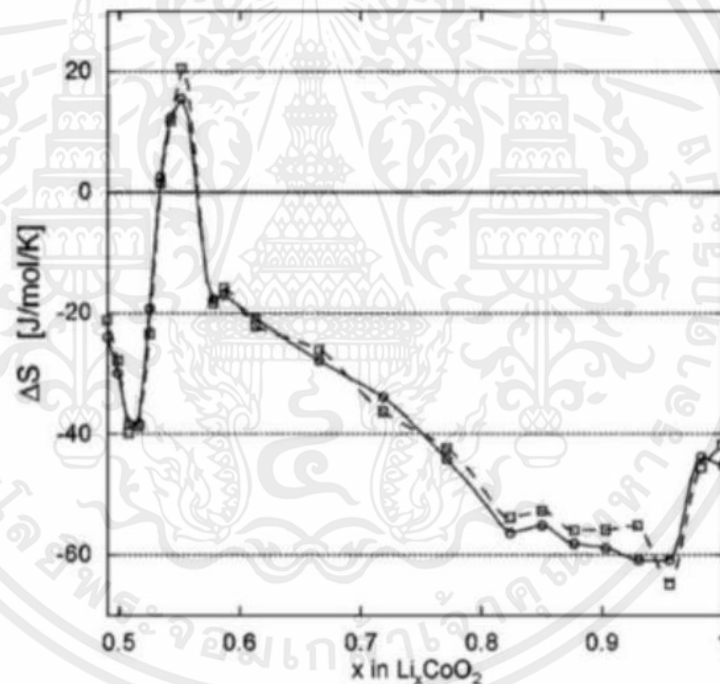
$$V = -T\Delta S \frac{1}{nF} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจึงสามารถหาได้จากการที่กระแสที่ถูกสร้างขึ้นไหลผ่านแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจาก สมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11 สามารถเขียนรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.12

$$Q_{entropy} = iV = -T\Delta S \frac{1}{nF} \quad (2.12)$$

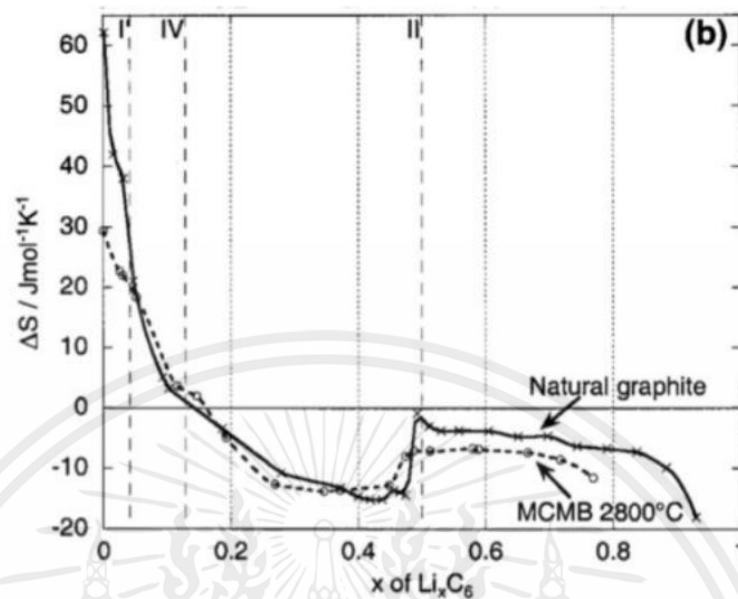
อย่างไรก็ตามการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือและวิธีการบางอย่าง เพื่อทำการทดลองวัดค่าดังกล่าวว่าแต่เซลล์แบตเตอรี่ประเภทโคบอลต์ออกไซด์ได้เคยมีการทดลองแล้วดังกราฟที่ 2.32 และกราฟที่ 2.33



รูปที่ 2.32 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ LiCoO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา

[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ  $\text{Li}_x\text{C}_6$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา

[14]

จากรูปทั้งสองจะสามารถนำค่ามาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองความร้อนอันเกิดจากการเปลี่ยนของเอนโทรปี

- ผลรวมของความร้อนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์

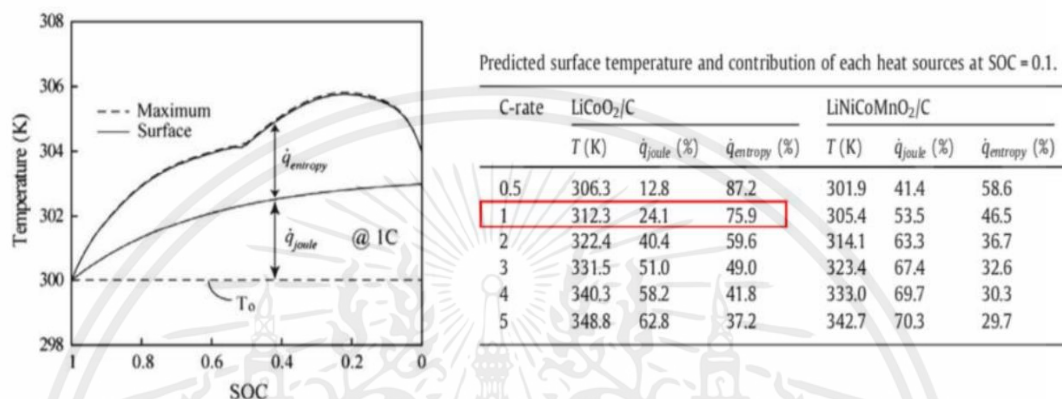
จากการศึกษาผลของความร้อนทั้งสองเราสามารถสรุปได้ว่าจะเขียนผลรวมของความร้อนทั้งสอง สามารถเขียนรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.13

$$Q_{\text{battery}} = I^2 R_{\text{int}} T \Delta S \frac{1}{nF} \quad (2.13)$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่ากระแสที่ถูกปล่อยจากแบตเตอรี่ส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นหากความร้อนไม่สูง มากนัก ค่าของความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีจะส่งผล ต่อความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าอธิบายได้จากสมการที่ 2.13 ที่พจน์ของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับกระแสแต่ความร้อนจากการสูญเสียจากความต้านทานจะมีสัดส่วนกับ กำลังสองกระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมา เช่นเดียวกันที่กระแสสูงขึ้นความร้อนจากการสูญเสียจากความต้านทานจะมีผลสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงจากเอนโทรปีดังรูปที่ 2.34 ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการปล่อยกระแส 1C ความร้อน ทั้งสองจะมีอัตราส่วนเป็นร้อยละ 24.1 ต่อ 75.9 ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงควรระมัดระวังในการใช้ แหล่งความร้อนให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด



รูปที่ 2.34 สัดส่วนความร้อนระหว่างความร้อนจากแหล่งทั้งสอง

[14]

ผลรวมของความร้อนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองนั้น ทางกลุ่มจะระมัดระวังในการใช้แหล่งความร้อนให้ถูกต้อง เพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียง ความจริงมากที่สุด จะขึ้นอยู่กับการใช้งานของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เพราะความร้อนที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่เป็นจุดที่สำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่กับอุปกรณ์อื่นเพื่อที่จะเข้าใจถึงขีดจำกัดความสามารถในการใช้งานและนำไปเข้าสู่ระบบแพ็คแบตเตอรี่ได้อย่างปลอดภัย

### 3. ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คแบตเตอรี่

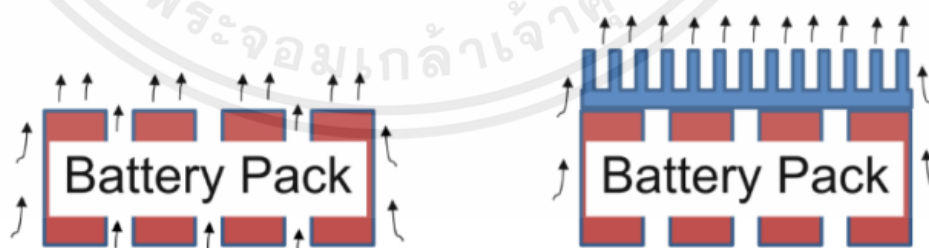
ปัจจุบันมีระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คแบตเตอรี่เกิดขึ้นหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศในแต่ละพื้นที่ เช่น ในประเทศเมืองหนาวระบบระบายความร้อนนอกจากจะทำหน้าที่ระบายความร้อนแล้ว ในฤดูหนาวระบบต้องมีหน้าที่ให้ความร้อนกับแพ็คแบตเตอรี่ เพื่อให้แบตเตอรี่อยู่ภายใต้อุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสมในช่วง 15–40 องศาเซลเซียส แต่สำหรับประเทศไทยแล้วอุณหภูมิปกติของอากาศ โดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 30–40 องศาเซลเซียส ดังนั้นระบบจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการแค่ระบบระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าบางภูมิภาคของประเทศไทยในช่วงฤดูหนาวอุณหภูมิจะต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียสแต่ระบบให้ความร้อนกับแพ็คแบตเตอรี่นั้นไม่ค่อยมีความจำเป็นมาก เนื่องจากแพ็คแบตเตอรี่สามารถใช้ความร้อนจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากตัวมันเองทำให้ตัวมันเองร้อนได้ ในช่วงเริ่มต้นระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คแบตเตอรี่ มีทั้งระบบแบบไม่ต้องการใช้พลังงาน (Passive Cooling System) และแบบต้องการใช้พลังงาน (Active Cooling System) ซึ่งแต่ละแบบจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ขึ้นอยู่ลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่

- ระบบที่ไม่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Passive cooling system)

แนวคิดในการออกแบบระบบระบายความร้อนนี้จะไม่มีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการทำงาน โดยที่การระบายความร้อนของแบตเตอรี่นั้นจะเน้นการออกแบบเชิงเรขาคณิต เพื่อนำความร้อนออกจากแบตเตอรี่โดยกระบวนการนำความร้อน (Heat Conduction) และการพาความร้อนแบบอิสระ (Natural Heat Convection) เป็นหลักประสิทธิภาพการพาความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามขนาดพื้นที่สัมผัสของแบตเตอรี่กับอากาศ อย่างไรก็ตามความสามารถในการระบายความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนก็สามารถทำได้สูงสุดตามขนาดพื้นที่ผิวของแบตเตอรี่ ซึ่งอาจจะเพียงพอในการใช้งานที่มีความร้อนเกิดขึ้นในปริมาณไม่สูงมากนัก แต่ถ้าแบตเตอรี่มีการใช้งานโดยการปล่อยประจุในอัตราที่สูงมาก (High C-rate discharge) เกิดความร้อนในปริมาณมาก อาทิเช่น การใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า วิธีการดังกล่าวจะไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.35 แบบไม่มีแผ่นระบายความร้อนและแบบมีแผ่นระบายความร้อน

[14]

ยกตัวอย่างความร้อนที่ถูกระบายโดยการพาของแบตเตอรี่ถูกกำหนดด้วยพื้นที่ของแบตเตอรี่ที่สัมผัสอากาศแบบไม่ใช้พลังงาน รูปที่ 2.35 แสดงถึงความร้อนที่ถูกพาออกไปโดยอากาศ โดยมีปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อน คือ อุณหภูมิของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และพื้นที่ที่สัมผัสอากาศ เนื่องจากการที่ไม่มีการใช้พลังงานเข้ามาในระบบ ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศและอัตราการไหลของอากาศได้ ดังนั้น วิธีการเดียวที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนี้ คือ การเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การติดครีบ (fin) บนด้านที่สัมผัสอากาศของแบตเตอรี่ เพิ่มพื้นที่สัมผัสให้มากกว่าพื้นที่ของตัวแบตเตอรี่เองเนื่องจากครีบเล็กๆ ที่ยื่น ออกมาจากผิวช่วยให้การสัมผัสอากาศมีพื้นที่มากขึ้น ตามหลักการพาความร้อนแล้วครีบจะทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

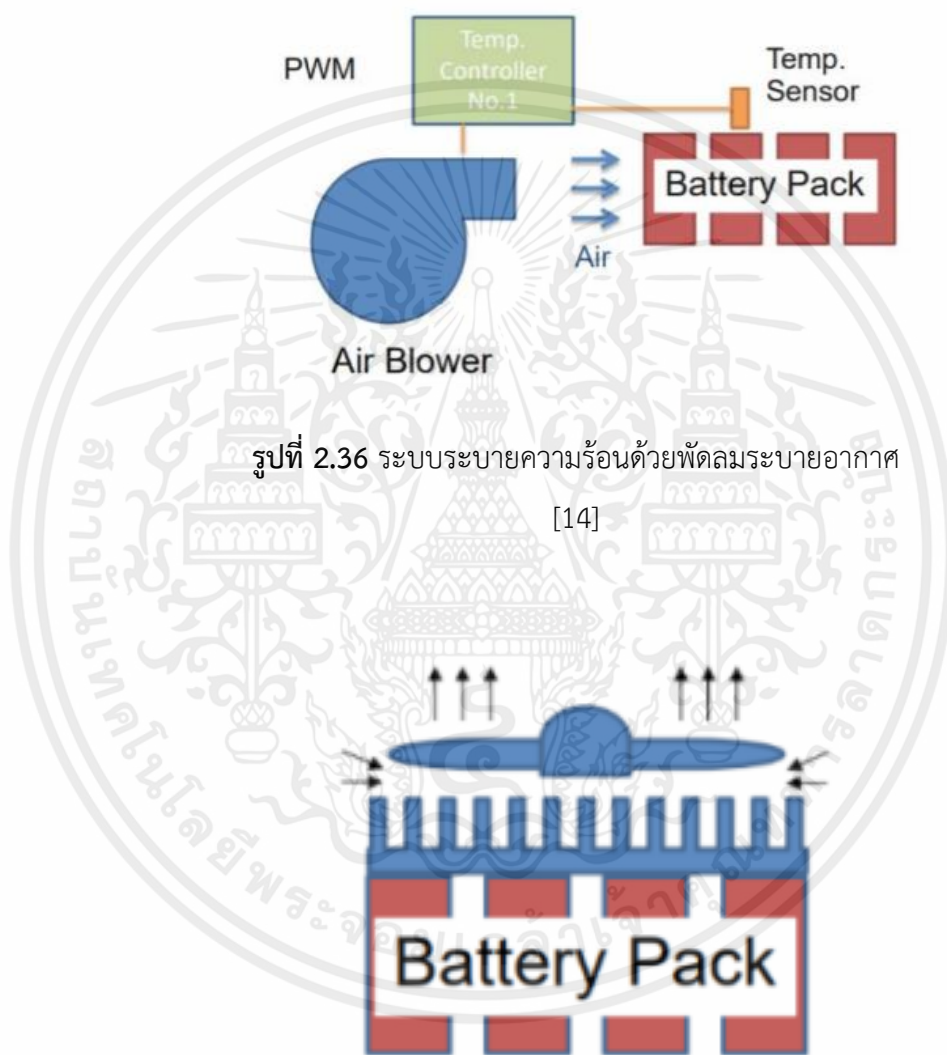
#### - ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

แนวความคิดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพื่อใช้จัดการดูแลเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นถือเป็นเรื่องที่เหมาะสมผลในการทำงานของแบตเตอรี่ที่ทำให้เกิดความร้อนสูง การใช้อุปกรณ์เสริม เพื่อระบายความร้อนจึงมีความสำคัญเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ด้วยอุปกรณ์เพิ่มเติมทำให้ระบบ การระบายความร้อนวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่ดีกว่าเนื่องจากวิธีการจัดการความร้อนที่ผสมผสานทั้งการออกแบบในเชิงเรขาคณิตและกลศาสตร์ของไหลเข้าด้วยกันทำให้สามารถใช้กระบวนการพาความร้อน (Heat Convection) ได้ดียิ่งขึ้น ผ่านตัวกลางการพาความร้อนที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ เป็นต้น ระบบการจัดการความร้อนนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงแต่ก็มีข้อเสียที่ต้องใช้พลังงานในแบตเตอรี่บางส่วนมาขับเคลื่อนระบบให้ทำงานเช่นกัน อีกทั้งอุปกรณ์เสริมที่เพิ่มขึ้นยังลดพื้นที่ใช้สอยในการออกแบบของระบบแบตเตอรี่แพ็คเกจอีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการออกแบบที่มากขึ้น ทำให้เกิดมุมมองและการออกแบบใหม่ๆที่พัฒนาเทคโนโลยีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย

#### 1) ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ

ในระบบที่ใช้พลังงานจะมีเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น การใช้พัดลมระบายอากาศ (Air blower) ควบคุมโดยระบบ Pulse Width Modulation (PWM) ที่จะทำงานเมื่ออุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่ถูกวัดโดยเซ็นเซอร์ขึ้นถึงค่าที่ถูกตั้งไว้ ดังรูปที่ 2.65 จะช่วยให้เกิดการไหลวนของอากาศและมีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น อากาศที่ไหลเร็วขึ้นช่วยให้การพาความร้อนของอากาศเกิดขึ้นได้ในปริมาณที่มากขึ้นเช่นกันด้วย หลักการดังกล่าว ความ

สามารถในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ รูปที่ 2.36 แสดงการผสมรวมเทคนิคที่ใช้ในระบบที่ไม่ใช้พลังงาน โดยการติดครี (Fin) รูปที่ 2.37 เพื่อเป็นอีกหนึ่งตัวช่วยที่ทำให้ระบบระบายความร้อนทำงานได้ดีขึ้นอีกระดับหนึ่ง



รูปที่ 2.36 ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ

[14]

รูปที่ 2.37 ระบบระบายความร้อนด้วยครีระบายความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ

[14]

อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังมีข้อเสียในอีกหลายแง่มุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาในระบบ รวมไปถึงการหาอากาศที่สะอาดมาหมุนเวียนในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นต้น ปัจจัยเรื่องอากาศสะอาดเป็นหนึ่งในประเด็นที่สำคัญอย่างยิ่งของระบบการหมุนเวียนที่ใช้ อากาศ เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ในบางกรณีอากาศ ภายนอกถูกเจือปนด้วยสิ่งแปลกปลอม อาทิเช่น ฝุ่น หรือความชื้น เป็นต้น ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านั้น ล้วนไม่เป็นมิตรกับแบตเตอรี่ที่อาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วหรือก่อให้เกิดอันตรายอันเกิด จากไฟฟ้าลัดวงจรก็เป็นได้

## 2) ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นดังรูปที่ 2.38 นี้ จะใช้ของเหลว คือ น้ำไหลผ่านช่องต่างๆที่จัดทำขึ้น ภายในตัวแพ็คแบตเตอรี่เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการ ทำงานของแบตเตอรี่ออกไปภายนอก ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของแพ็คแบตเตอรี่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น ประกอบด้วยอุปกรณ์และหน้าที่สำคัญดังนี้

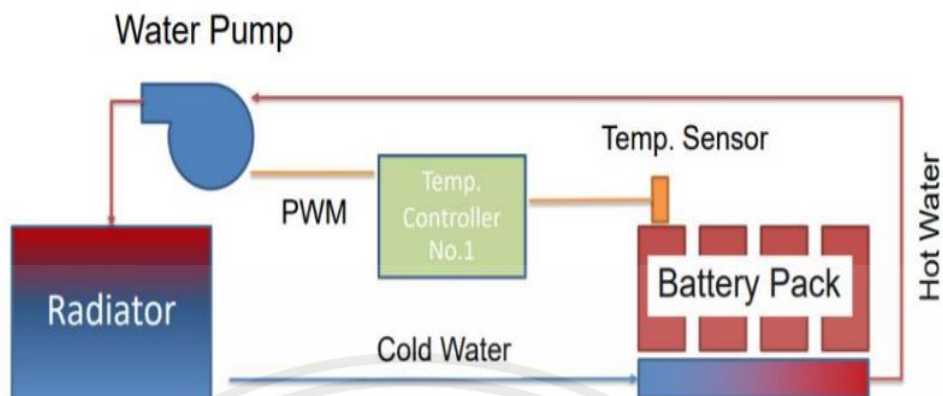
หม้อน้ำ (Radiator) ซึ่งจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากน้ำไปสู่ อากาศ โดยรอบและจะเป็นแหล่งเก็บน้ำให้มีปริมาณเพียงพอที่จะใช้หมุนเวียนในระบบ

ปั้มน้ำ (Water pump) จะทำหน้าที่บังคับให้น้ำหมุนเวียนในระบบ ด้วย ปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจะทำงานตามที่ชุดควบคุมอุณหภูมิกำหนด

ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ทำหน้าที่เปรียบเทียบผลที่รับมาจากตัววัดอุณหภูมิกับค่าที่กำหนดไว้หากเกินก็จะสั่งให้ปั้มน้ำทำงาน ซึ่งเมื่อปั้มน้ำทำงาน น้ำ จะไหลเข้าสู่ระบบระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในแพ็คแบตเตอรี่ลดลงอยู่ในช่วงที่ต้องการ ได้

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) จะติดอยู่กับผิวด้านข้าง ของแบตเตอรี่จะคอยตรวจจับวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ขณะแบตเตอรี่ถูกใช้งานและส่งให้ชุดควบคุม อุณหภูมิเพื่อประมวลผลต่อไป

จุดเด่นของระบบนี้ คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิแบตเตอรี่ได้ดีกว่าระบบ ระบายความร้อนด้วยอากาศ รวมถึงการใช้แผ่นรีบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีค่าความจุทาง ความร้อนสูงกว่าอากาศ ระบบนี้สามารถเพิ่มสมรรถนะการระบายความร้อนโดยการเพิ่มอัตราการไหล แต่จุดด้อยของระบบนี้ คือ จะถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิภายนอกที่ใช้ระบายความร้อนจากหม้อน้ำออก



รูปที่ 2.38 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ

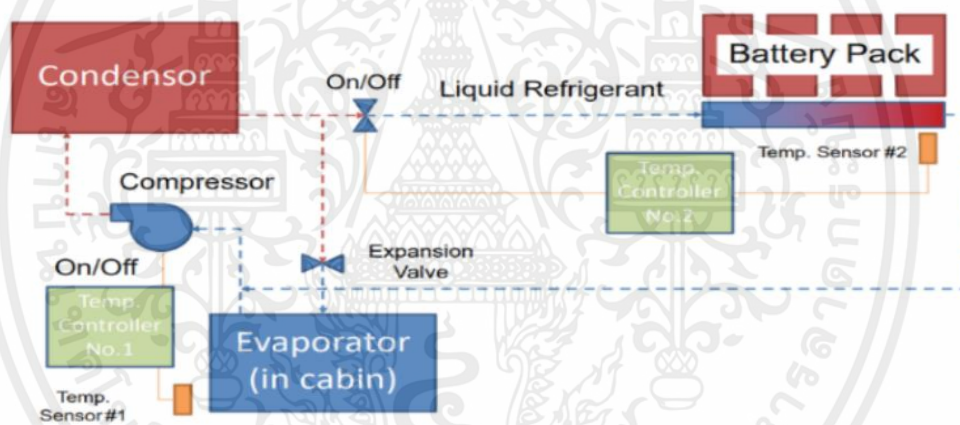
[14]

### 3) ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.39 ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น โดยปกติแล้วเป็นระบบที่ใช้ในการทำความเย็นในห้องโดยสารของรถยนต์ (Cabin) แต่ในเทคโนโลยีปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ระบบนี้ร่วมกับการระบายความร้อนของแพ็คแบตเตอรี่ ซึ่งจะอาศัยสารหล่อเย็นที่ได้ขึ้นไปทำการระบายความร้อนของแพ็คแบตเตอรี่และระบายความร้อนในห้องโดยสารของรถยนต์ โดยส่วนประกอบหลักของระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นนี้คือ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอยล์ร้อน (Condenser) คอยล์เย็น (Evaporator) วาล์วขยายตัว (Expansion valve) โดยหลักการทำงานของระบบนี้เริ่มจากคอมเพรสเซอร์เริ่มทำงาน จะดูดสารทำความเย็นที่ความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ ที่สถานะเป็นไอเข้ามาอัดความดันทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นไอที่มีความดันสูง อุณหภูมิสูง จะถูกส่งไปตามท่อไปที่คอนเดนเซอร์ ซึ่งคอนเดนเซอร์จะมีหน้าที่ระบายความร้อนของไอออกด้วยพัดลม จากนั้นไอจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ซึ่งของเหลวที่ออกมาจากคอนเดนเซอร์จะไหลแยกออกเป็นสองทางก่อนผ่านวาล์วขยาย เพื่อลดความดันทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นพร้อมที่ดูดซับความร้อนได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ ทางแรกไหลไปที่แพ็คแบตเตอรี่ ทางที่สองไหลไปที่คอยล์เย็นภายในห้องโดยสารในส่วนที่ไหลไปทางแพ็คแบตเตอรี่นั้น เมื่อของเหลวที่ไหลผ่านแพ็คแบตเตอรี่จะคายความร้อนทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นเดือดจากสถานะของเหลวกลายเป็นไอ โดยหลักการถ่ายเทความร้อนความร้อนแฝง ทำให้แพ็คแบตเตอรี่นั้นมีอุณหภูมิลดลง ในขณะที่ของเหลวส่วนที่ไหลไปที่คอยล์เย็นภายในห้องโดยสารนั้นการจะถูกทำให้เดือดกลายเป็นไอเช่นเดียวกัน โดยดูดซับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากห้องโดยสารซึ่งมีพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของ อากาศในห้องโดยสารของรถยนต์ หลังจากนั้นสารทำความเย็นที่ได้รับความร้อนและกลายเป็นไอก็จะไหล กลับไปที่คอมเพรสเซอร์อีกครั้งอันเป็นการทำงานครบวงจร ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิ คอมเพรสเซอร์สามารถถูกควบคุมความเร็วรอบในการสร้างอัตราการไหลของสารทำความเย็นสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจาก ระบบปรับอากาศของยานยนต์ไฟฟ้ามีมอเตอร์ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ต่างหาก นอกจากนั้นยังสามารถติดตั้งวาล์วปิดเปิด เพื่อช่วยในการควบคุมอุณหภูมิแบบแยกส่วนสำหรับคอยล์เย็น ในห้องโดยสาร และแพ็คแบตเตอรี่ ข้อดีของระบบระบายความร้อนนี้ คือ สามารถใช้อุปกรณ์ร่วมกับชุดเดียวกับระบบปรับอากาศในรถยนต์มาใช้ระบายความร้อนของแพ็คแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้ลดต้นทุนของแพ็คแบตเตอรี่



รูปที่ 2.39 ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่

[14]

#### 4) ระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

โดยใช้ระบบปรับอากาศ ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่ โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็นตามรูปที่ 2.40 จะเป็นระบบระบายความร้อนที่มีความซับซ้อนที่สุด โดยจะเป็นระบบระบายความร้อนที่ใช้หลักการเดียวกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำและระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น โดยระบบนี้จะใช้ของเหลวซึ่งเป็นน้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวแพ็คแบตเตอรี่ โดยน้ำไหลผ่านช่องต่างๆ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดทำขึ้นภายในตัวแพ็คแบตเตอรี่ เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการทำงานของแบตเตอรี่ออกไปภายนอกซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของแพ็คแบตเตอรี่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคล้ายกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ แต่เนื่องจากการอาศัยการระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนออกจากแพ็คแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงจะต้องมีการใช้สารทำความเย็นจากระบบปรับอากาศเข้ามาช่วย ทำให้น้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนนั้นมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าภายนอกและเพื่อให้สามารถนำความร้อนออกจากแบตเตอรี่แพ็คได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่ โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็นประกอบด้วยอุปกรณ์และหน้าที่สำคัญดังนี้

คอมเพรสเซอร์ (Compressor) อยู่นอกห้องโดยสารของรถยนต์จะทำหน้าที่เพิ่มความดันของสารหล่อเย็นให้มีความดันสูงขึ้น โดยการเพิ่มความดันของสารหล่อเย็นนั้นจะทำให้สาร หล่อเย็นนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

คอนเดนเซอร์ (Condenser) จะมีทำหน้าที่ระบายความร้อนของสารหล่อเย็น ให้มีอุณหภูมิที่ต่ำลง และเปลี่ยนสถานะจากไอไปเป็นของเหลวโดยสารหล่อเย็นที่เป็นของเหลวจะถูกแบ่งเป็นสองทาง คือ ทางที่ไประบายความร้อนในห้องโดยสาร (Cabin) และทางที่ไปทำความเย็นให้กับน้ำที่จะถูกไหลผ่านแพ็คแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำงานตามที่ชุดควบคุมอุณหภูมิกำหนด

วาล์วขยายตัว (Expansion valve) จะทำหน้าที่ในลดความดันของสารหล่อเย็น และเปลี่ยนสถานะของสารหล่อเย็น เมื่อสารหล่อเย็นมีความดันที่ต่ำลงและเปลี่ยนสถานะเป็นไอ จะทำให้สารหล่อเย็นมีอุณหภูมิที่ลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์

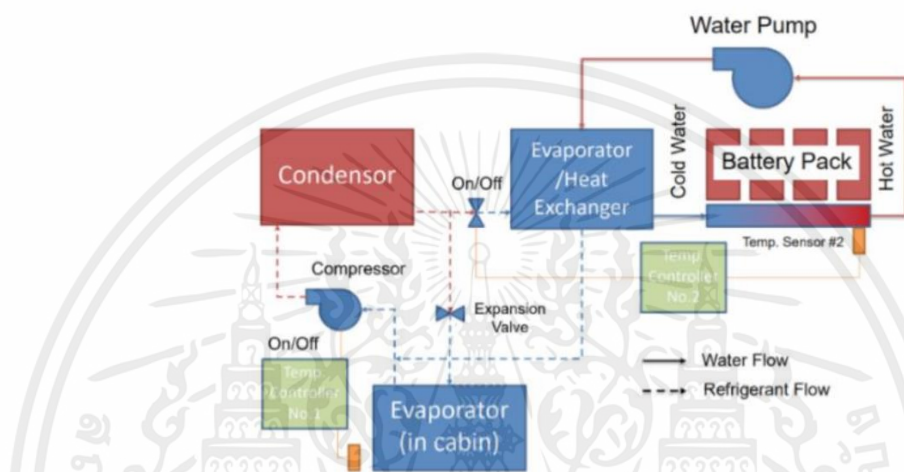
คอยล์เย็น/อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Evaporator / Heat Exchanger) จะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนกับน้ำโดยจะทำให้น้ำร้อนที่ไหลออกมาจากแพ็คแบตเตอรี่มีอุณหภูมิที่ต่ำลง

ปั๊มน้ำ (Water Pump) จะทำหน้าที่บังคับโดยให้น้ำหมุนเวียนในระบบแพ็ค แบตเตอรี่ด้วยปริมาณที่เหมาะสม

ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) จะติดอยู่กับตัวผิวด้านข้างของ แบตเตอรี่จะคอยตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้นขณะแบตเตอรี่ถูกใช้งานและส่งให้ชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อประมวลผลต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คแบตเตอรี่แบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำจะใช้น้ำไหลผ่านช่องต่างๆ ในตัวแพ็คแบตเตอรี่เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิด จากการทำงานของแบตเตอรี่ออกไปภายนอก ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของแพ็คแบตเตอรี่อยู่ในช่วงที่ เหมาะสมโดยจะประยุกต์มาปรับใช้กับการแพ็คแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่เลือกใช้



รูปที่ 2.40 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็น

[14]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nijmeijer [1] ได้ศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแข่งสูตรไฟฟ้าสำหรับนักเรียน บทความนี้จะอธิบายถึงการออกแบบระบบควบคุมแรงดึงในสูตรนักศึกษาไฟฟ้าพาหนะ ในหลายๆ แอปพลิเคชันการแข่งขันเหยียบคันเร่งนั้นควบคุมได้ยาก สำหรับผู้ขับขี่ที่มีประสบการณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแรงบิดขนาดใหญ่จากการหยุดนิ่ง Driveline 3-DOF รูปแบบที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองยานพาหนะ 7-DOF และแบบจำลองที่ไม่ใช่เชิงเส้นโดยใช้พารามิเตอร์ 10 ตัวแบบจำลองของระบบขับเคลื่อนและยานนั้นผ่านการตรวจสอบจากการตรวจวัดแบบจำลองเหล่านี้ใช้ในการออกแบบการลากที่เหมาะสม ระบบควบคุมระบบนี้ประกอบด้วยส่วนวงเปิด ซึ่งใช้การเร่งตามยาวและด้านข้าง เพื่อคำนวณค่าจำกัด แรงบิดผ่านทางคันขับ ที่ให้การประมาณค่าแรงเสียดทาน ส่วนพีดีแบ็คของตัวควบคุมจะควบคุม อัตราสลิปของล้อหลัง ระบบควบคุมการยึดเกาะถนนจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกในโมเดลรถและหลังจากนั้นในยานพาหนะสูตรนักศึกษาไฟฟ้า ทำการเปรียบเทียบระหว่างยานพาหนะที่มีและไม่มีแรงดูด ควบคุม ยานพาหนะที่มีระบบควบคุมการยึดเกาะถนนจะทำงานได้ดีขึ้นอย่างมากในแง่ของการเร่ง ความเร็วตามยาวและแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการขับเคลื่อนที่ดีขึ้นในแง่ของการเร่งความเร็ว ด้านข้างยานพาหนะไฟฟ้ากำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษเป็นประเด็นที่สำคัญกว่า วันนี้ยานพาหนะไฟฟ้าจำนวนมากใช้มอเตอร์บอร์ดที่เชื่อมต่อกับล้อผ่าน เพลาขับและแบบคงที่การลดทอน มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถส่งแรงบิดสูงจากหยุดนิ่งและมักจะมีโอกาสที่จะส่งแรงบิดสูงสุดที่สูงมากในช่วงเวลาสั้นๆ สิ่งนี้สามารถนำไปสู่ปัญหาการฉุดลากและอันตรายสถานการณ์ โดยเฉพาะที่ความเร็วสูงงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบระบบควบคุมแรงดูด เพื่อเพิ่มแรงดูดของระบบไฟฟ้าหลังรถสูตรนักศึกษาที่ขับเคลื่อนด้วยล้อด้วยมอเตอร์กลางหนึ่งตัว น้ำหนักรถเปล่าคือ ประมาณ 245 กิโลกรัม และมอเตอร์สามารถผลิต 85 กิโลวัตต์ ซึ่งส่งผลให้ 1200 นิวตันเมตร บนเพลา หลังระบบ V.A. Kalmakov ได้ศึกษาการพัฒนาการออกแบบการออกแบบแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า สำหรับ นักเรียนFormula Student Electric เป็นส่วนหนึ่งของการแข่งขันระหว่างมหาวิทยาลัย Formula Student ที่มุ่งเน้นการออกแบบและการประดิษฐ์ของรถแข่งไฟฟ้าโดยนักเรียน การแข่งขันครั้งนี้ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีใหม่และการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยเชิงปฏิบัติเพื่อมอบสมรรถนะยานพาหนะที่ดีที่สุด รถแข่งทุกคันจะต้องตอบสนองของกฎและผ่านการตรวจสอบทางเทคนิคก่อนเข้าร่วมในการแข่งขัน การมีส่วนร่วมและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการชนะในการประกวดดังกล่าวช่วยเร่งการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเพิ่มสถานะของมหาวิทยาลัยอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นมหาวิทยาลัยมีความสนใจในการสร้างทีมที่ประสบความสำเร็จหนึ่งในองค์ประกอบหลักของรถแข่ง คือ ชุดแบตเตอรี่ แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ พร้อมระบบควบคุม แรกเริ่ม พารามิเตอร์สำหรับการพัฒนานำมาจากกฎของสูตรนักเรียนปี 2558-2559 ซึ่งมีการปรับปรุงทุก 2 ปี

Nicola Bianchi [2] ได้ศึกษาการออกแบบมอเตอร์ไฟฟ้างานวิจัยนี้ยืนยันความเป็นไปได้ของมอเตอร์เฟอโรไรต์ IPM ประสิทธิภาพสูงสำหรับสูตร SAE EV ข้อมูลเฉพาะของมอเตอร์ ได้รับการประเมินตามความต้องการด้านประสิทธิภาพของการแข่งขันและได้รับการพิจารณาอัตราส่วนเกียร์สองเพื่อให้ได้ ขนาดที่ลดลงบนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของสเตอร์ที่แตกต่างกันมอเตอร์ ISDW IPM สองตัวที่มีช่องและเสาจำนวนเท่ากันได้รับการออกแบบได้รับการปรับให้เหมาะสมที่สุดในแง่ของแรงบิดระลอกและการเปรียบเทียบในที่สุดการเปรียบเทียบเพิ่มเติมได้ดำเนินการกับเครื่อง SPM หายากขนาดเท่ากันสองเครื่อง หนึ่งเครื่องที่มีการเคลื่อนที่สเตอร์เดียวกันและจำนวนของเสาในขณะที่เครื่องที่

สองนั้นมาพร้อมกับ FSCW ผลลัพธ์เน้นว่าการออกแบบ IPM ที่เสนอนั้นแสดงถึงแรงบิดที่ดีที่สุดและ  
 แนวโน้มความเร็วสำหรับแอปพลิเคชัน แม้ว่าเครื่อง SPM ที่เสนอจะแสดงความหนาแน่นแรงบิดสูงสุด  
 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการกำหนดค่า FSCW ประสิทธิภาพของระบบเครื่องกลไฟฟ้าในช่วง  
 ความเร็วฐานจะไม่เหมาะสมแม้ว่าจะเป็นพื้นที่ FW สั้น เพื่อตอบสนองความต้องการแรงบิดที่ความเร็ว  
 ในการทำงานสูงการลดจำนวนตัวนำจะพิสูจน์ให้เห็นว่า นี่เป็นข้อเสียเปรียบที่สำคัญเพราะจะทำให้เกิด  
 การเพิ่มขึ้นของเฟส ปัจจุบันทำให้จำเป็นต้องมีการปรับขนาดของระบบจ่ายไฟ (อินเวอร์เตอร์และ  
 ESS) ด้วยเหตุผลเหล่านี้การวิจัยนี้เน้นว่าการออกแบบ IPM ที่เสนอนั้นเป็นสิ่งที่ดีที่สุดในวิธีการแก้ปัญหา  
 ที่เหมาะสมเพราะรวมประสิทธิภาพสูงในช่วง ความเร็วที่กว้างเข้ากับการลดต้นทุนเนื่องจากการใช้  
 แม่เหล็กฟรีที่หายาก

Shray Chandra [3] ได้ศึกษาระบบความปลอดภัยของยานพาหนะไฟฟ้าสำหรับการแข่งรถ  
 สูตร การพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าสูตรมีความท้าทายของตัวเองที่เกี่ยวข้องกับมันบางที่สิ่งที่ซับซ้อนกรณี  
 เป็นมาตรการความปลอดภัยที่เหมาะสมที่จะต้องมีในสถานที่ เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นอยู่ที่ดีของคนขับรถ  
 สูตรต้องทำงานได้ดี เพื่อให้ได้ความเร็วสูงมากในกรอบเวลาที่เล็กมากๆ และยังคงยึดติดตามการทำงาน  
 ของส่วนประกอบทั้งหมดอย่างเหมาะสม ซึ่งอาจเป็นความท้าทายในขณะที่ชิ้นส่วนเครื่องกลมี  
 มาตรฐานและมาตรการความปลอดภัยของตัวเองชิ้นส่วนไฟฟ้าและการออกแบบความปลอดภัยควร  
 ปฏิบัติตามกฎหมายที่เข้มงวดของ FSAE บทความนี้กล่าวถึงวิธีการที่เป็นนวัตกรรมซึ่งระบบความปลอดภัย  
 ของรถยนต์ไฟฟ้าสูตร ปลอดภัยสูงได้รับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการตั้งโปรแกรมหน่วย  
 ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (ECU) โดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่แตกต่างกันและในเวลาเดียวกัน

Mark Allison [4] ได้ศึกษาการออกแบบรถพลังงานไฟฟ้ารูปแบบใหม่รถแข่งไฟฟ้าที่นั่น  
 เดียว ในปี 2014 SAE นำเสนอการแข่งขันสูตรไฟฟ้า งานวิจัยนี้โครงการเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ  
 เทคโนโลยี สำหรับแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนสำหรับการใช้งานยานยนต์เสนอโดยสูตรไฟฟ้าของ  
 มหาวิทยาลัยซานตาคลารา ร่า(SCUFE) ทีม ในบทความนี้การออกแบบแบตเตอรี่ใหม่และรวมการ  
 ประเมินรวมถึงเซลล์แบตเตอรี่ การเชื่อมต่อ ตัวเซลล์ระบบความปลอดภัยและระบบควบคุมแบตเตอรี่  
 การเชื่อมต่อของเซลล์ที่เสนอจะช่วยเพิ่ม การนำไฟฟ้าผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสของแท็บเซลล์ในขณะที่  
 อนุญาตการกำจัดอย่างรวดเร็วของแต่ละเซลล์ใน กรณีของเซลล์ความล้มเหลว โครงสร้างของชุดตัว  
 บรรจุจะประกอบด้วยของแผงโพลีคาร์บอเนต แผงการ เชื่อมต่อจะเป็นติดตั้งระหว่างฝาปิดผนังกับ  
 ผนังเพื่อป้องกันไม่ให้แพ็คถูกเปิดเมื่อคอนแทกเตอร์มีส่วนร่วม ในการป้องกันความเสี่ยงจากการสัมผัส  
 กับไฟฟ้าแรงสูง การออกแบบที่นำเสนอช่วยให้แพ็คจะเป็นนำออก จากรถโดยสิ้นเชิงเพื่อความสะดวก  
 การถอดประกอบและการขนส่ง การเชื่อมต่อภายนอกจะประกอบด้วย ปลั๊กขนาดใหญ่หนึ่งอันสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายไฟเช่นเช่นเดียวกับการประกอบปลั๊กขนาดเล็กสำหรับแบตเตอรี่ระบบ การจัดการ (BMS) และ เซ็นเซอร์อื่นๆ ที่จำเป็นและการเชื่อมต่อ สถานะแรงดันไฟฟ้าของเซลล์จะถูก ตรวจสอบผ่าน BMS การทดสอบประสิทธิภาพที่แสดงให้เห็นว่าพลังงานจะหายไปผ่านการเชื่อมต่อจะถูก นำเสนอ นอกจากนี้ความจุแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและการจัดเก็บเซลล์กำลังการผลิตจะถูกวิเคราะห์และหารือ คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบในอนาคตก็จะเป็นนำเสนอในแง่ของผลลัพธ์เบื้องต้นในประสิทธิภาพ กับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

Marcos Luz Junior [5] ได้ศึกษาการออกแบบจลนศาสตร์และการวิเคราะห์องค์ประกอบ จำกัดของระบบช่วงล่างสำหรับสี่ล้อขับเคลื่อนพวงมาลัยไฟฟ้าสำหรับนักเรียน มหาวิทยาลัยนอตติงแฮมได้ลงทุนไปแล้วพัฒนาระบบขับเคลื่อนสี่ล้อ (4WD) เครื่องแรกยานพาหนะในสหราชอาณาจักร เพื่อเข้าสู่อุปกรณ์การแข่งขัน Formula นักศึกษา (FS) ชั้น 1 ในเดือนกรกฎาคม 2561 เหตุการณ์ต้องการการออกแบบ การผลิตและการทดสอบของรถแข่งสไตล์สูตร เพื่อแข่งขันในแบบคงที่และแบบไดนามิกสถานการณ์ ต่อต้านมหาวิทยาลัยทั่วโลกทีมแข่งประกอบด้วยวิศวกร 30 คนทั้งรายบุคคลและในทีมย่อยในหลาย ส่วนของรถยนต์เช่นแชสซี-คอนโทรลแอโรไดนามิก ระบบช่วงล่างการรวมกันของระบบส่งกำลังและ แรงบิด ทำงานในการเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับทีมย่อยเหล่านี้ ช่วยให้มั่นใจได้แนวทางการรวมองค์ ประกอบและการปฏิบัติตามการออกแบบด้วยการเพิ่มขึ้นของรายการรถยนต์ไฟฟ้ามากกว่าปีมันกลายเป็นความยากที่จะได้รับความก้าวหน้าจุดเริ่มต้นในการแข่งขัน ดังนั้นจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีฮับสี่ตัว (8 กิโลกรัม) สร้างแรงบิดทันที 170 นิวตันเมตรด้วย 8:1 ระบบส่งกำลังเกี่ยวข้องกับความนี้เกี่ยวข้องกับจลน ศาสตร์การออกแบบและ FEA ของช่วงล่างสำหรับยานพาหนะเช่นนี้ เพื่อบรรลุการออกแบบที่น่าเชื่อถือและแข่งขันได้ในขณะที่ปฏิบัติตามด้วยกฎ FS ที่ครอบคลุมก่อนทดสอบสามารถเริ่มมีความทน ทาน และความน่าเชื่อถือของระบบช่วงล่างที่จำเป็น ถึงบรรลุนี้มีการศึกษาความไวเพื่อให้แน่ใจว่าระบบกัน สะเทือนจัดการในลักษณะที่คาดหวังและแข่งขันได้ในขณะที่รองรับและถ่ายโอนภาระล้อถนนนี้ลด ปริมาณของการทดสอบในชีวิตจริงและลดต้นทุนการปฏิบัติที่ดี ในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยใน ขณะเดียวกันก็เติมเต็มความหลากหลายของวัตถุประสงค์เพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ประสิทธิภาพ จะช่วยให้สมจริงการวิเคราะห์การระงับผ่านการใช้ประโยชน์ของ Creo3.0 FEA และ Kinematics ที่ เหมาะสม ในทางกลับกันจะให้บริการสามวัตถุประสงค์: ประการแรกเพื่อรวบรวมประโยชน์ระงับข้อมูล Kinematic สำหรับทีมซึ่งจะถูกนำมาใช้ในแบบจำลองของยานพาหนะประการที่สองเพื่อรับรอง การออกแบบระบบกันสะเทือนตามระเบียบ FS 2018 ซึ่งครอบคลุม ข้อกำหนดและการออกแบบเพื่อ ความปลอดภัยหลายประการพารามิเตอร์และประการที่สามจัดเตรียมวิธีการของกระบวนการออกแบบและการวิเคราะห์ทั้งหมด สำหรับทั้งอนาคตทีมและมหาวิทยาลัยทั่วโลก โดยประยุกต์ความรู้ทาง วิศวกรรมในการแก้ปัญหาในชีวิตจริงในสาขาใหม่ที่ทันสมัยและได้รับประสบการณ์ด้านยานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

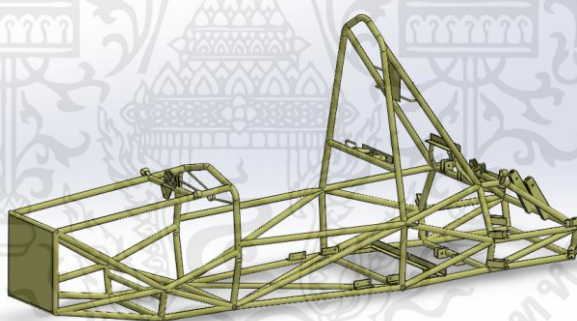
### วิธีการดำเนินงานและอุปกรณ์

ในบทนี้จะอธิบายถึงชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้กับตัวรถว่ามีหน้าที่ และส่งผลอย่างไรกับตัวรถ ซึ่งนอกจากประสิทธิภาพของตัวรถ และอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพ จะส่งผลดีในหลายๆ ส่วน เช่น สมรรถนะที่ดีขึ้นในการขับขี่ ความสามารถในการทำความเร็วที่ดีขึ้น เป็นต้น โดยการใช้อุปกรณ์เพื่อทดสอบจะมีประสิทธิภาพเพียงใดขึ้นอยู่กับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับอุปกรณ์นั้นๆ และรวมไปถึงขั้นตอนและวิธีการทดสอบต่างๆ

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและโปรแกรมที่ใช้ทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ

###### 3.1.1.1 โครงรถ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างหลักของรถอ้างอิงค่าตามกฎการแข่งขันตาม TSEA Auto Challenge 2022 Student Formula EV

ในปัจจุบันทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย จัดการแข่งขันรายการ TSAE Auto Challenge 2022-2023 Student Formula โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อการพัฒนาทักษะทางด้านวิศวกรรมยานยนต์ให้นักศึกษาสถาบันต่างๆ ซึ่งจะมีการแข่งขัน ปีละ 1 ครั้ง ครั้งแรกจัด ขึ้นในปี 2005 เป็นการแข่งขันในรูปแบบยานยนต์ประหยัดพลังงาน จากนั้นจึงเปลี่ยนมาเป็นการแข่งแบบฟอร์มูล่า ในปี 2007 และได้ปรับเปลี่ยนมาใช้กฎกติกาสากลในปี 2008 มาตรฐานความปลอดภัย ในการแข่งขัน Bullet Auto Challenge เป็นรายการที่เน้นความปลอดภัย โดยมีกฎกติกาที่เคร่งครัด ระบุไว้ชัดเจน ทั้งในส่วนของการออกแบบดังรูปที่ 3.1 และอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยสำหรับนักแข่งที่ต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้มาตรฐาน FIA เช่น หมวกกันน็อกหรือเซฟตี้เบลต์ โดยในวันแข่งขันหากรถจากสถาบันใดไม่ผ่านการ  
สภาพจากคณะกรรมการ จะไม่สามารถนำรถลงแข่งได้

### 3.1.1.2 TRACK (Fr) ความกว้างด้านหน้า (รูปที่ 3.2) อยู่ที่ 1,350 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 ความกว้างด้านหน้า

### 3.1.1.3 TRACK (Rr) ความกว้างด้านหลัง (รูปที่ 3.3) อยู่ที่ 1,220 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 ความกว้างด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.4 WHEELBASE ช่วงระยะห่างของล้อหน้าถึงล้อหลัง (รูปที่ 3.4) อยู่ที่ 1,525 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 ช่วงระยะห่างของล้อหน้าถึงล้อหลัง

3.1.1.5 ระบบช่วงล่าง ชิ้นส่วนประกอบของระบบช่วงล่างดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบช่วงล่างของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วัสดุ อุปกรณ์ ระบบไฟฟ้า

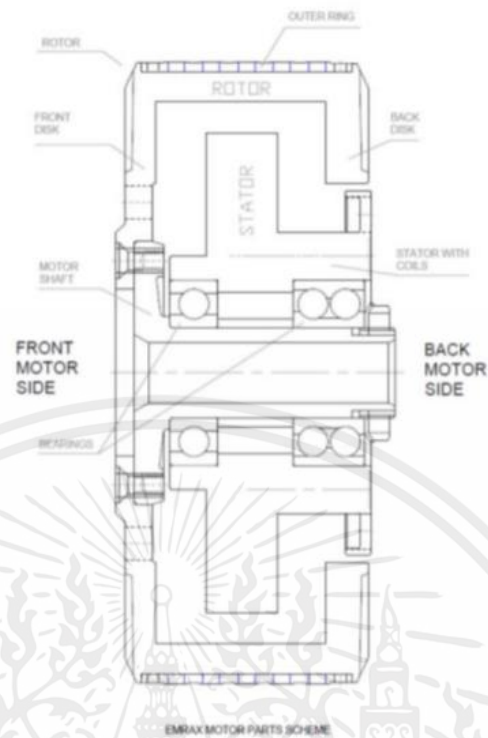
#### 3.1.2.1 Motor Emrax 228

มอเตอร์ที่ทางทีมเลือกใช้เป็นมอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งทำมาจากเหล็กแผ่นบางและมีการเจาะช่องด้านนอก ดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 เพื่อวาง Bar โดยทั่วไป Bar จะทำด้วยทองแดงหรืออลูมิเนียมการพันขดลวด (Electric Vehicle) Winding) เข้าไปใน Bar ของโรเตอร์ จำเป็นต้องให้ได้จำนวน Pole เท่ากับจำนวนของ Pole ในส่วนด้านท้ายของ Squirrel Cage Rotor จะประกอบด้วยแหวนโลหะโดยส่วนใหญ่มักจะทำจากทองแดง มอเตอร์ตัวนี้มีขนาดที่เบากว่า Motor โรงงานทั่วไป เพราะทางบริษัทนั้นได้จัดทำขึ้นมาเพื่อใช้ในการแข่งขัน โดยเฉพาะซึ่งมีน้ำหนักที่เบาเพียงแค่ 12 กิโลกรัม และสามารถสร้างแรงมาได้ถึง 134 แรงม้า แรงดันไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 500 V<sub>dc</sub> (แรงดันไฟฟ้า กระแสตรง) ในพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ 6500 รอบต่อนาที ทอร์คสูงสุดอยู่ที่ 109 กิโลวัตต์แรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 230 นิวตันเมตร



รูปที่ 3.6 Motor Emrax 228 [แหล่งที่มา: <https://emrax.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบใน Motor Emrax228 [แหล่งที่มา: <https://emrax.com>]

X7 plug		GO TO	Title
C		GO TO	SIN1
O		GO TO	SIN2
M		GO TO	COS1
E		GO TO	COS2
K		GO TO	REF1
G		GO TO	REF2
H		GO TO	temp signal
L		GO TO	temp GND

Feedback encoder connector X7  
Connector female device



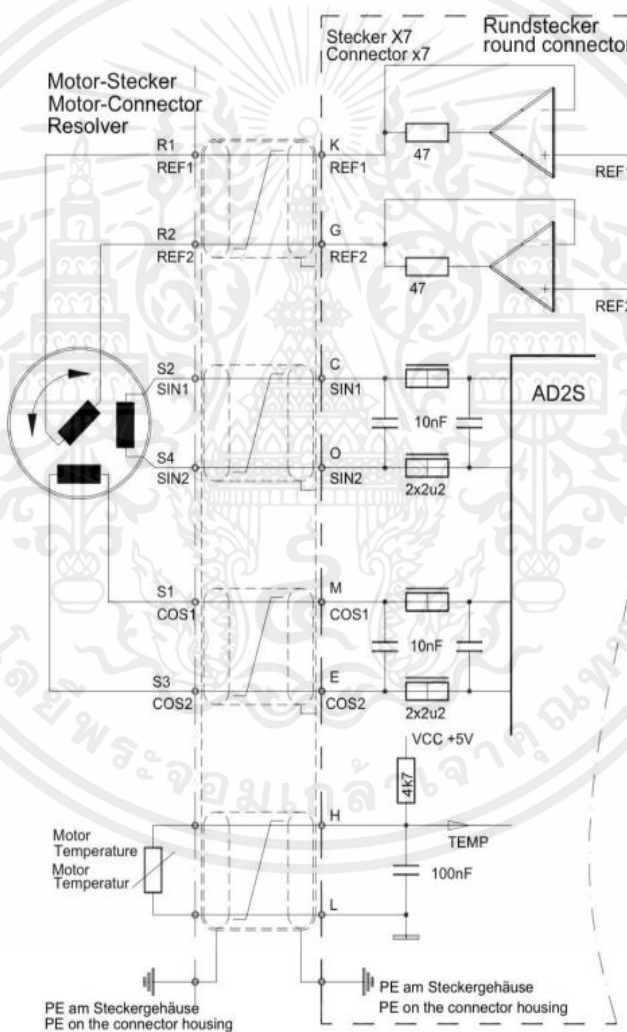
Connector plug  
Binder 99-5661-15-19

รูปที่ 3.8 วงจรเชื่อมต่อ Resolver connection X7

[แหล่งที่มา: <https://emrax.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

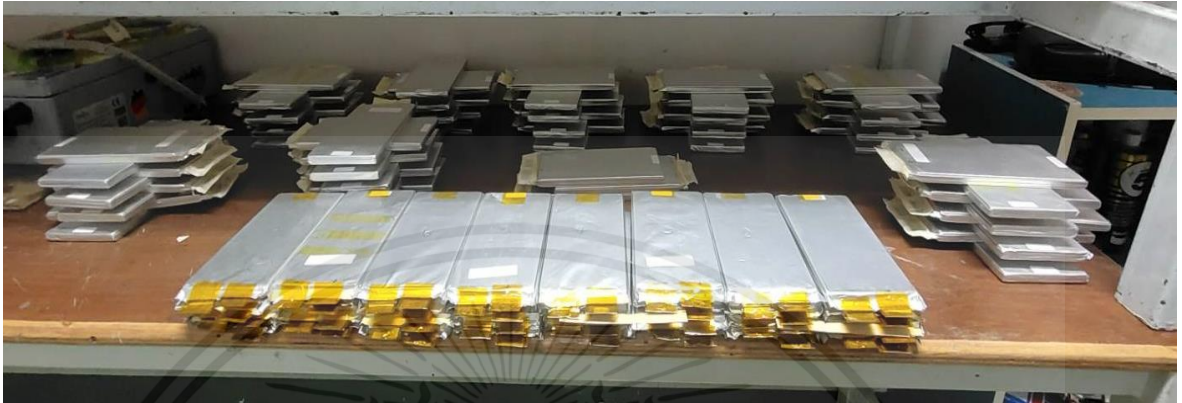
วงจรเชื่อมต่อ Resolver connection X7 จะเป็นวงจรการเชื่อมต่อการส่งสัญญาณของรอบมอเตอร์ไปที่กล่อง Controller เพื่อให้กล่องนั้นได้ส่งแรงดันไฟฟ้าสูงสุดกลับมาที่มอเตอร์ มอเตอร์นี้ค่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจะควบคุมไปกับการหมุนของมอเตอร์ ถ้ารอบหมดเข้าแรงดันไฟฟ้าก็จะส่งไปน้อย ถ้าหมดเร็วแรงดันไฟฟ้าก็จะจ่ายได้เต็มที่ ถ้าเกิดมีสายใดสายหนึ่งหลุดมอเตอร์ก็จะไม่ทำงานทันที ควรระวังสายสัญญาณให้ดีเพราะเป็นสายที่เล็ก และทำให้ขาดง่าย ถ้าเปลี่ยนต้องเปลี่ยนยกชุด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูง การเชื่อมต่อให้ดูรูปภาพที่ 3.8 และ 3.9 ประกอบ



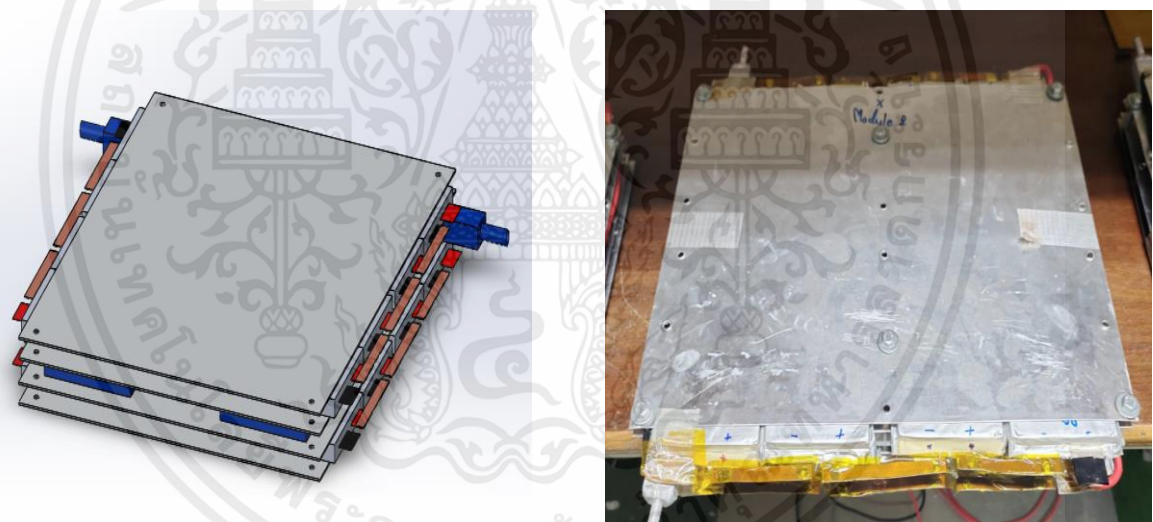
รูปที่ 3.9 วงจรเชื่อมต่อ Resolver connection [แหล่งที่มา: <https://emrax.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium Nickel Manganese Cobal)



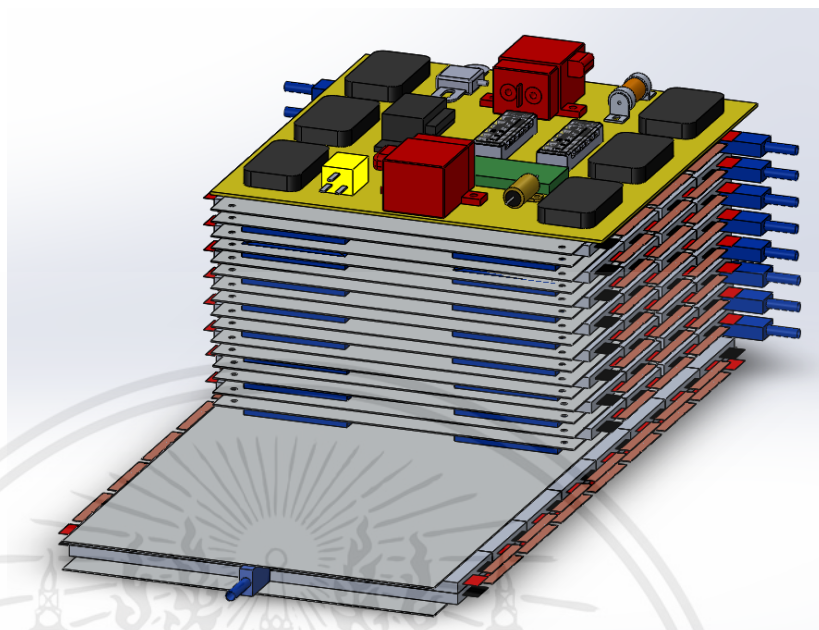
รูปที่ 3.10 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium Nickel Manganese Cobal)



รูปที่ 3.11 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 1 ซีรี่ส์ 16 เซลล์

แบตเตอรี่ที่ทางทีมเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน แมงกานีส-โคบอลท์-ออกไซด์ ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีข้อดีในด้านต่างๆ มีความหนาแน่นของพลังงานสูง สามารถปล่อยกระแสไฟฟ้าได้ดี น้ำหนักเบา และมีความปลอดภัยสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 6 ซีรี่ส์ 96 เซลล์

การแพ็คแบตเตอรี่ทางทีมได้ใช้แบตเตอรี่ จำนวน 96 เซลล์ 1 เซลล์ดังรูปที่ 3.12 มีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 3.7 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 22 แอมป์ นำมาต่ออนุกรมกัน 16 เซลล์เรียกว่า 1 ซีรี่ส์ ดังรูปที่ 3.11 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 59.2 โวลต์ ต่ออนุกรมกันทั้งหมดจำนวน 6 ซีรี่ส์ จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 355.2 โวลต์ ค่าพลังงาน 7.8144 กิโลวัตต์ชั่วโมง

#### 3.1.2.3 กล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400-400 RS



รูปที่ 3.13 กล่องควบคุม BAMOCAR-PG-D3-400-400 RS

[แหล่งที่มา: คู่มือ Controller รุ่น 2021/V2 บริษัท UNITEK Industrie Elektronik GmbH]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Controller หรือ ตัวควบคุมมอเตอร์ ในการเลือกใช้ จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการประมวลผลและเชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่เลือกใช้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมมอเตอร์จะถูกปรับให้เหมาะสมกับมอเตอร์แต่ละชนิดของมอเตอร์ที่ได้เลือกใช้ การที่เลือกใช้มอเตอร์ก็ต้องเลือกควบคุมมอเตอร์ให้เข้ากันด้วย ตัวควบคุมมอเตอร์ที่ทางทีมได้เลือกใช้ คือ UNITEK รุ่น BAMOCAR PG D3-400-400 RS Motor control ดังรูปที่ 3.13 ผลิตโดย Unitek Industrie Elektronik ซึ่ง Motor Emrax 228 ตัวควบคุม Bamocar เป็นตัวควบคุมที่มีน้ำหนักเบา เพียงแค่ 8.5 กิโลกรัม และมีการระบายความร้อนด้วยของเหลวเนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าที่สูงและมีความรู้ความร้อนสะสมจำเป็นต้องมีระบบความร้อน



รูปที่ 3.14 BAMOCAR PG D3-400-400 RS Connectors

[แหล่งที่มา: คู่มือ Controller รุ่น 2021/V2 บริษัท UNITEK Industrie Elektronik GmbH]

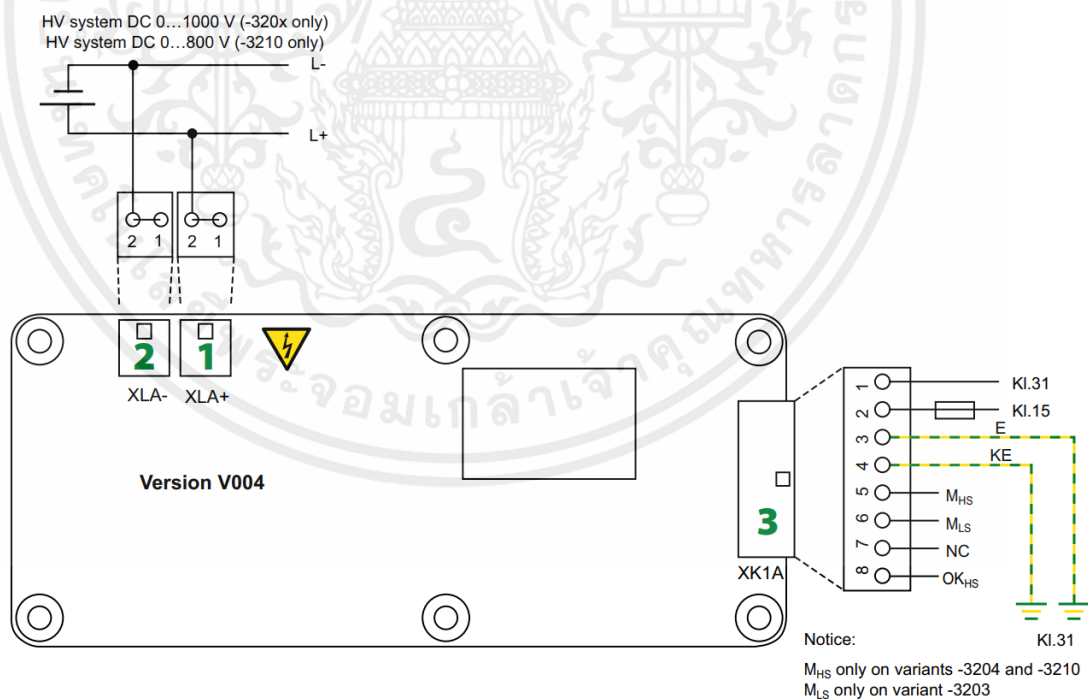
ในส่วนนี้จะเป็นส่วนของการเชื่อมต่อของกล่อง Controller ในส่วนซึ่งแต่ละส่วนจะแสดงตามรูปที่ 3.14 ซึ่งทางทีมได้แต่สายสัญญาณออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของ X1 คือ การเชื่อมต่อของระบบควบคุมทั้งคันที่ส่งผลให้ Motor ทำงาน เช่นการเชื่อมต่อ คันเร่ง ไฟแสดงสถานะ ตัวสั่งให้มอเตอร์ทำงาน FRG/RUN และ X7 จะเป็นการเชื่อมต่อสัญญาณ Resolver connection X7 แสดงตามรูปที่ 3.14 และ 3.15 การทำงานจะจับตามรอบของมอเตอร์แล้วจะส่งสัญญาณกลับมาที่กล่อง Controller เพื่อสั่งให้จ่ายกระแสไฟเพิ่มเข้าไปที่มอเตอร์ ถ้าสายใดสายหนึ่งหลุดมอเตอร์จะหยุดการทำงาน



## 3.1.2.4 ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204



รูปที่ 3.16 แผงวงจร ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204

[แหล่งที่มา: <https://www.directindustry.com>]

รูปที่ 3.17 วงจรการเชื่อมต่อของ ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204

[แหล่งที่มา: <https://www.directindustry.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรการเชื่อมต่อของ ISOMETER ® iso-F1 IR155-3203 / -3204 ดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 เพื่อตรวจสอบเช็คกระแสไฟฟ้า และความผิดปกติของฉนวนเมื่อเกิดการผิดปกติ เช่น ฉนวนชำรุดจะส่งสัญญาณและสั่งตัดระบบไฟฟ้า จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายเข้ามอเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายแก่ผู้ขับขี่ยานพาหนะ

### 3.1.2.5 BMS Control Unit



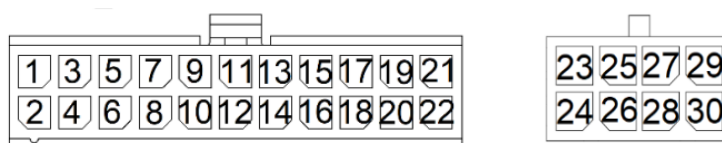
รูปที่ 3.18 BMS Control Unit [แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net>]

BMS Control Unit คือ ชุดควบคุมการแสดงผลประมวลผลข้อมูลสถานะของ BMS ในขณะการทำงานดังรูปที่ 3.18 และยังสามารถปรับค่าการทำงานของ BMS ได้ เพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

GROUND	+12V
CELL RX-	CELL RX+
CELL TX-	CELL TX+
GROUND	USB PWR
USB D-	USB D+
DISP. RX	DISP. TX
BAT. LOW	HEATER
CHG. IND	BUZZER
FAST CHG	CHARGER
AC SENSE	IGN. IN
CAN-	CAN+
SOC OUT	SPEED IN
GROUND	+5V OUT
INPUT 3	INPUT 4
INPUT 1	INPUT 2

รูปที่ 3.19 วงจรการเชื่อมต่อ BMS Control Unit [แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.20** หมายเลขการเชื่อมต่อ BMS Control Unit

[แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net>]

หมายเลขแสดงตำแหน่งช่องการเชื่อมต่อสายสัญญาณจาก BMS และช่องสัญญาณอุปกรณ์เพิ่มเติมตามความต้องการที่เลือกใช้ดังตัวอย่างรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20

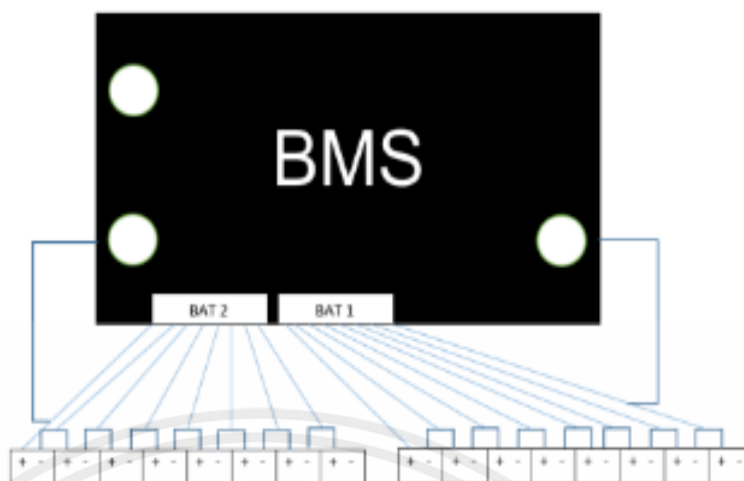
### 3.1.2.6 BMS (Battery Management System)



**รูปที่ 3.21** BMS (Battery Management System)

[แหล่งที่มา: <https://www.gtm.co.th>]

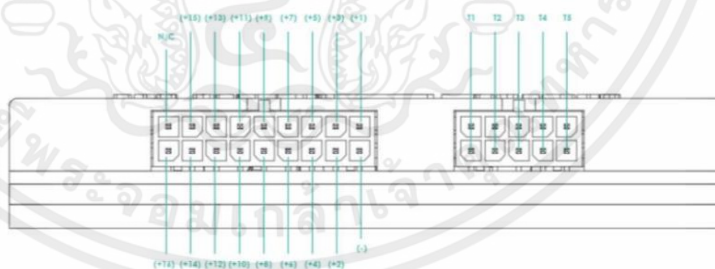
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 วงจรการเชื่อมต่อ BMS (Battery Management System)

[แหล่งที่มา: <https://www.gtm.co.th>]

BMS (Battery Management System) จะทำการตรวจสอบขั้นพื้นฐาน คือ การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิของเซลล์ การวัดความต้านทานต่อเซลล์เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า ในขณะใช้งานและขณะชาร์จแบตเตอรี่ดังรูปที่ 3.21 เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ BMS หนึ่งตัวสามารถตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่ได้ทั้งหมด 16 เซลล์ ดังรูปที่ 3.22 ทางทีมได้ใช้ BMS รุ่น Emus จำนวนทั้งหมดจำนวน 6 ตัว เพื่อให้สามารถ ตรวจสอบเซลล์แบตเตอรี่ได้อย่างครอบคลุม



รูปที่ 3.23 ช่องการเชื่อมต่อ BMS และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิไปยังแบตเตอรี่

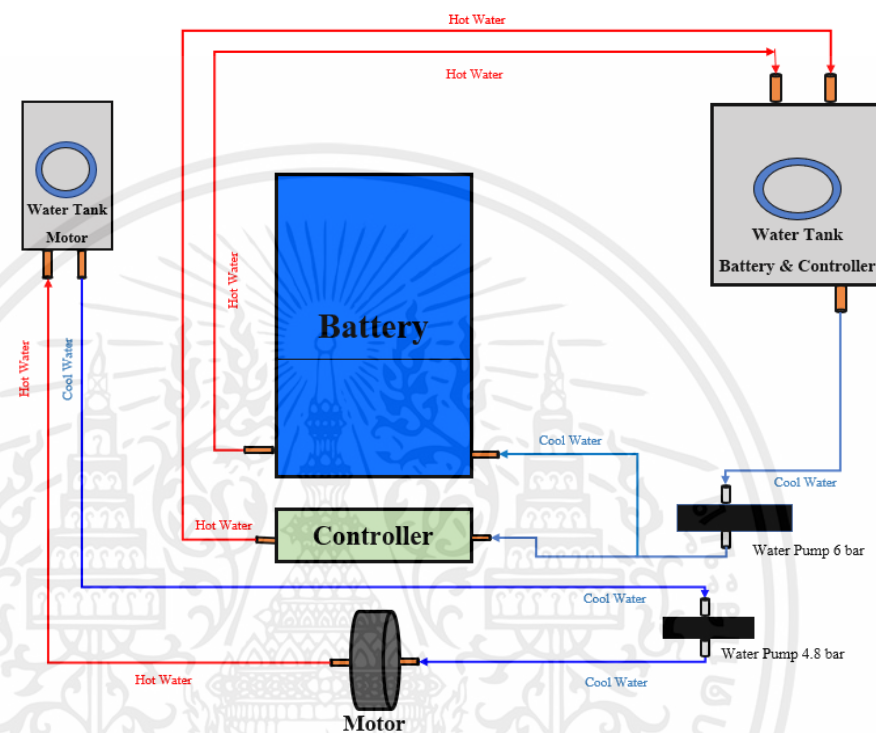
[แหล่งที่มา: <https://www.gtm.co.th>]

การเชื่อมต่อ BMS และแบตเตอรี่จะทำการเชื่อมสายเส้นที่หนึ่ง(-)ไปยังขั้วลบของแบตเตอรี่ จากนั้นทำการเชื่อมสายเส้นที่สอง (+1) ไปยังขั้วบวก (+2) ต่อจนเส้นสุดท้ายคือ n/c เมื่อต้องการจะเริ่ม BMS ตัวที่สองก็นำสาย (-) มาต่อตรงขั้วลบก่อนสุดท้าย เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ สามารถเลือกติดตั้งได้ตามที่ต้องการวัด BMS หนึ่งตัวสามารถวัดอุณหภูมิได้ 5 จุดดังรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.7 Cooling

ระบบ Cooling เพื่อลดอุณหภูมิในระบบทำงานของแบตเตอรี่ คอลโทรลเลอร์และมอเตอร์ โดยใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน มีแผนผังการวางวงจรตามรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 วงจรการทำงานของระบบระบายความร้อน

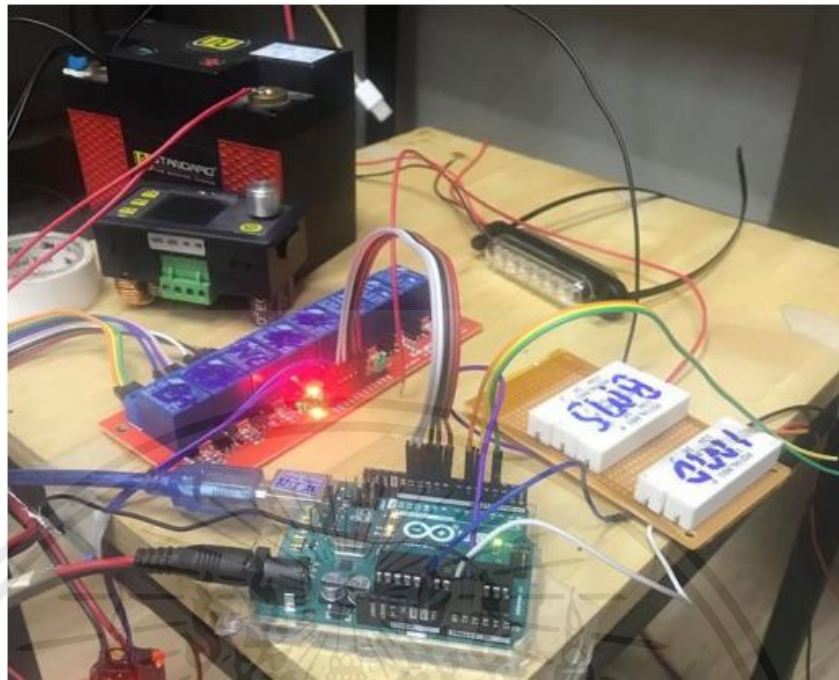
### 3.1.2.8 ปลั๊ก

เป็นจุดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าระบบแบตเตอรี่รวมถึงการรับพลังงานจากการชาร์จและจ่ายพลังงาน

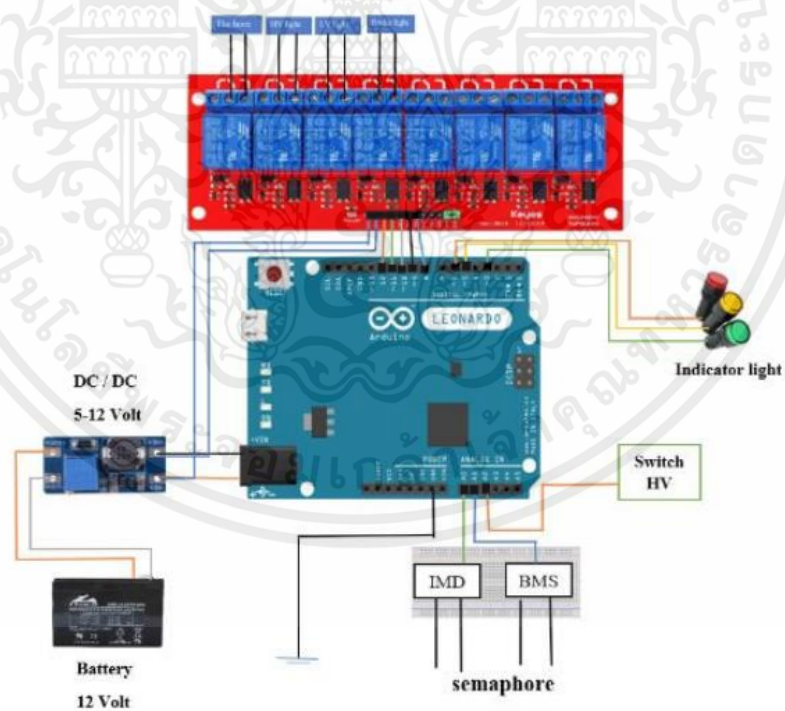
### 3.1.2.9 Arduino

เพื่อควบคุมระบบไฟฟ้าต่างๆ ภายในรถโดยบอกสถานะการทำงานของ IMD และ BMS สัญญาณไฟบอกสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้าภายในรถโดยดีเลย์และตัวต้านทานรวมด้วยดังรูป 3.25 และรูปที่ 3.26 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์ เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าเลี้ยงระบบในการทำงานทั้งหมดและมีโค้ดคำสั่งดังรูปที่ 3.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 การเชื่อมต่อ Arduino



รูปที่ 3.26 การเชื่อมต่อ Arduino กับอุปกรณ์แสดงค่าต่างๆ

[แหล่งที่มา: <https://www.cybertice.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int IMD = A0;
int BMS = A1;
int SW = A2;
int LEDimdF = 3;
int LEDbmsS = 4;

float Hz = 5;
float Duty = 50;
float SOFF = 0;

void setup() {
  pinMode(LEDimdF, OUTPUT);
  pinMode(LEDbmsS, OUTPUT);
  pinMode(R2, OUTPUT);
  //delay(2000);
  VIMD = analogRead(IMD) / 102.3;
  //if (VIMD <= 8.2) {
  digitalWrite(R1, 1);
  digitalWrite(R2, 1);
  digitalWrite(R3, 1);
  OnIMD = 1;
  OnBMS = 1;
  //}
  digitalWrite(R4, 1);
  Serial.begin(9600);
  delay(3000);
  digitalWrite(R3, 0);
}

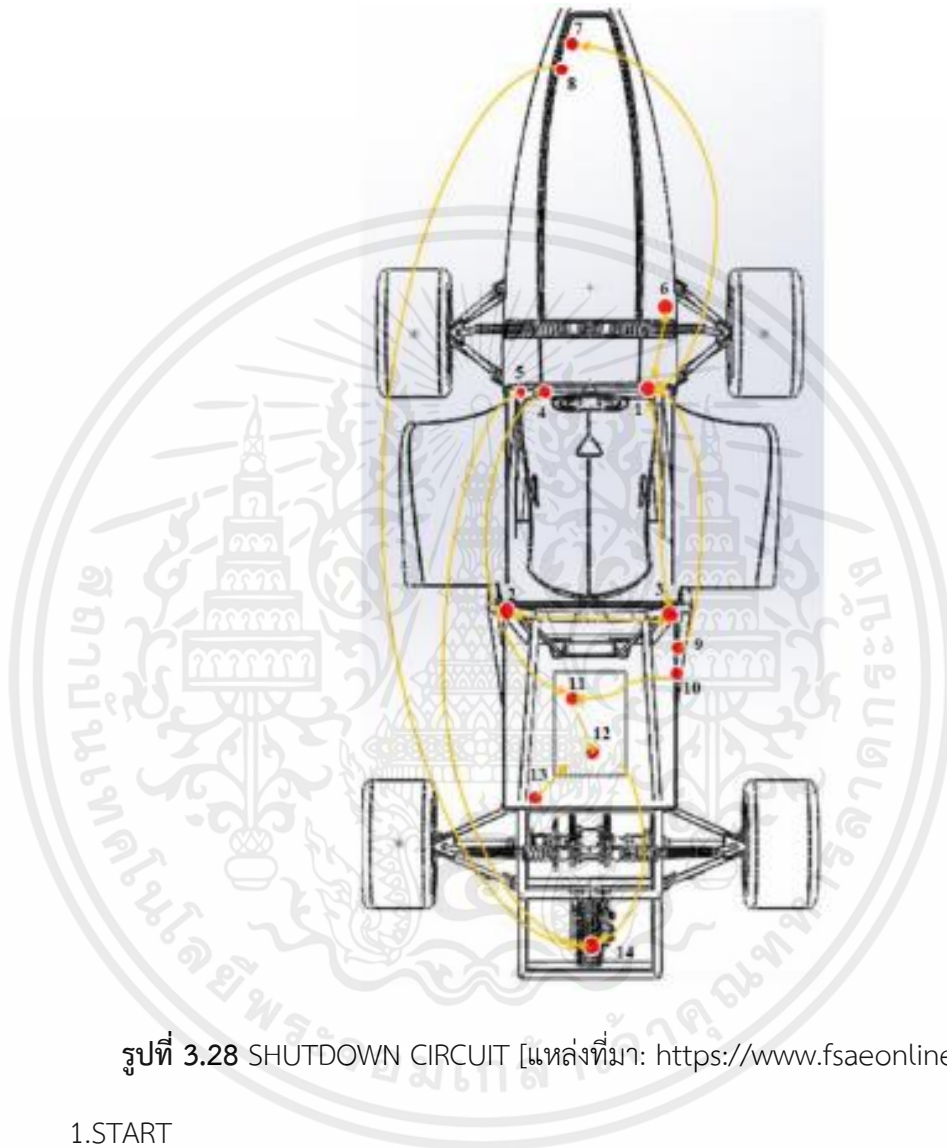
void loop() {
  VIMD = analogRead(IMD) / 102.3;
  Serial.print("VIMD =");
  Serial.println(VIMD);
  Serial.println(VSW);
  if (VSW >= 12) {
    if (OnIMD == 1) {
      delay(25000);
      VBMS = analogRead(BMS) / 69;
    }
    OnIMD = 0;
    if (VIMD <= 5) {
      digitalWrite(LEDimdF, 1);
      digitalWrite(R1, 0);
      digitalWrite(R2, 0);
      OnBMS = 0;
    }
    if (OnBMS == 1) {
      digitalWrite(R4, 0);
      SON = (Duty / 100.00) * Time;
      SOFF = (Time - SON);
      digitalWrite(R5, 1);
      delay(SON);
      digitalWrite(R5, 0);
      delay(SOFF);
    }
    else if (OnBMS == 0) {
      digitalWrite(R5, 0);
      digitalWrite(R4, 1);
    }
    if (VBMS <= 12) {
      digitalWrite(LEDbmsT, 1);
      digitalWrite(LEDbmsF, 0);
    }
  }
}

```

รูปที่ 3.27 โค้ดคำสั่งงาน Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.10 SHUTDOWN CIRCUIT จะประกอบไปด้วยระบบย่อยต่างๆ ดังรูปที่ 3.28 และ SHUTDOWN CIRCUIT (ตามกฎหมาย FSEA 2022) แสดงดังรูป 3.29

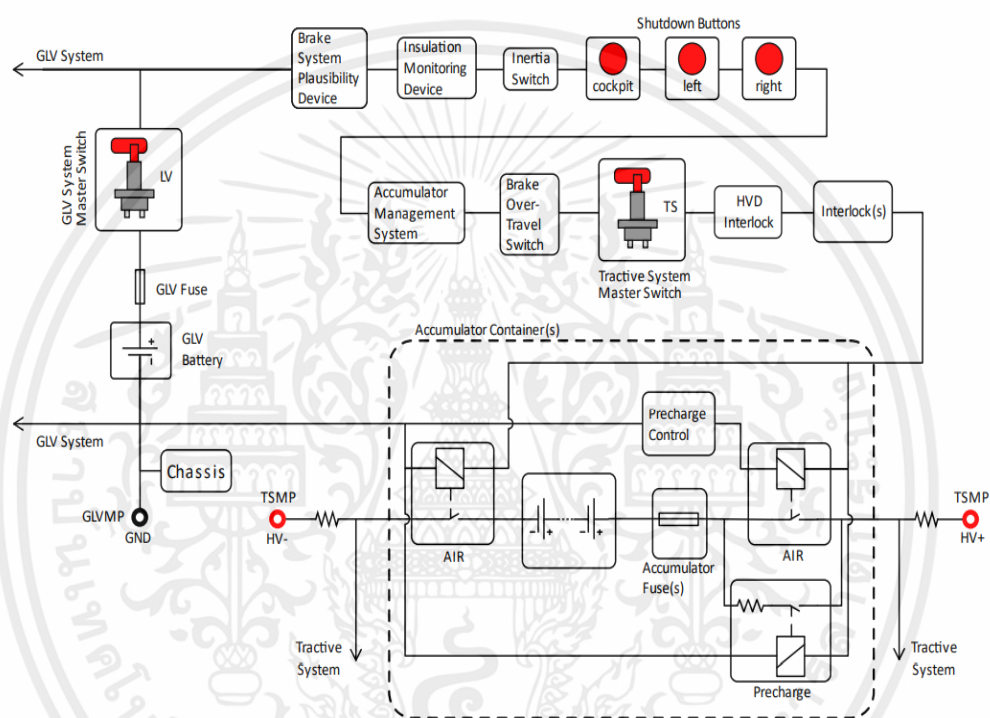


รูปที่ 3.28 SHUTDOWN CIRCUIT [แหล่งที่มา: <https://www.fsaeonline.com>]

- 1.START
- 2.LEFT ROLLHOOP E-SWITCH
- 3.RIGHT ROLLHOOP E-SWITCH
- 4.DASHBOARD E-SWITCH
- 5.RUN MOTOR SWITCH
- 6.INERTIA SWITCH
- 7.BRAKE OVER TRAVEL SWITCH
- 8.BRAKE SYSTEM PLAUSIBILITY DEVICE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. GLV SYSTEM MASTERSWICH
10. TRACTIVE SYSTEM MASTERSWICH
11. BATTERY MANAGEMENT SYSTEM
12. ISOLATION MONITORING DEVISE
13. MOTOR



รูปที่ 3.29 SHUTDOWN CIRCUIT [แหล่งที่มา: <https://www.fsaeonline.com>]

### 3.2 เครื่องมือเก็บผล

1. เครื่องวัดความเร็วรอบ TESTO 465

เป็นเครื่องมือที่สามารถวัดรอบต่อนาทีได้อย่างง่ายดาย โดยไม่ต้องสัมผัส เพียงติดรีเฟล็กเตอร์กับวัตถุที่จะวัด จากนั้นเล็งลำแสงสีแดงที่มองเห็นได้ไปที่รีเฟล็กเตอร์และทำการวัด ดังรูปที่ 3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.30 เครื่องวัดความเร็วรอบ TESTO 465

## 2. BMS Control Unit

เป็นชุดควบคุมการแสดงผลประมวลผลข้อมูลสถานะของ BMS ในขณะการทำงานดังรูปที่ 3.31 และยังสามารถปรับค่าการทำงานของ BMS ได้ เพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.31 BMS Control Unit [แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. Dynotech

เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ และการวัดแรงม้า แรงบิด ดังรูปที่ 3.32 เพื่อทำการปรับแต่งแก้ไขรถ



รูปที่ 3.32 Dynotech

### 4. เกจวัดเติมลมยาง รุ่น TG-10 SUMO

ใช้สำหรับวัดลมยางในยางรถยนต์และยางรถบรรทุกมีลักษณะดังรูปที่ 3.33 แกนกลมนั้นจะใช้สำหรับการระบายลมออกจากยาง โดยในส่วนของช่องเปิดลมจะสามารถสวมเข้ากับจู่บยางขนาดมาตรฐานได้ ส่วนแถบพลาสติกเป็นมาตรวัด ซึ่งมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางนิ้ว และกิโลปาสคาล ซึ่งเป็นหน่วยเมตริกสำหรับบอกปริมาณลมในยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.33 เกจวัดเติมลมยาง รุ่น TG-10 SUMO [แหล่งที่มา: <https://www.stintertrade.com>]

#### 5. Infrared Thermometer AZ - 8868

มีชื่อเรียกอีกหลายชื่อ อาทิเช่น IR Thermometer, Temp gun ,เป็นวัดอุณหภูมิเบื้องต้น มีลักษณะดังรูปที่ 3.34 โดยอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัสกับวัตถุ (Non-Contact) ในการวัดอุณหภูมิเราจะวัดจากรังสีอินฟราเรด (Infrared) ที่แผ่ออกจากวัตถุ



รูปที่ 3.34 Infrared Thermometer AZ-8868 [แหล่งที่มา: <https://www.ponpe.com>]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6. นาฬิกาจับเวลา (Timer)

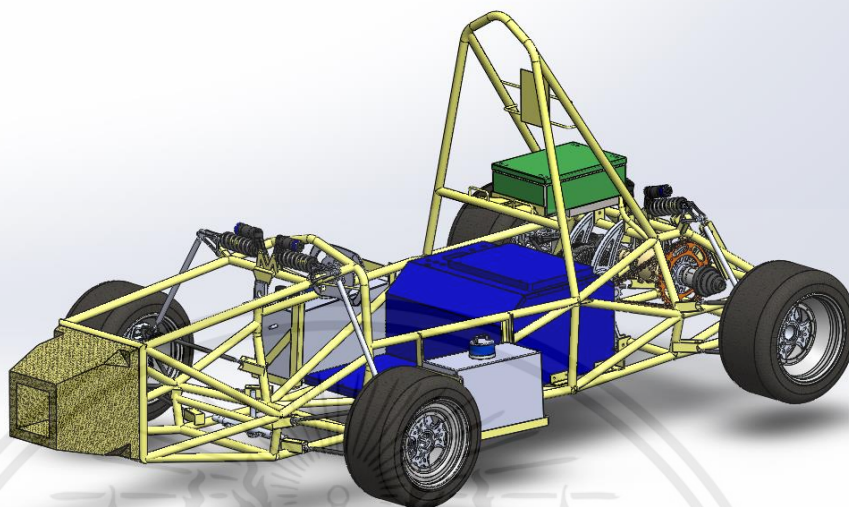
ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับจับเวลาในระหว่างทำกิจกรรมต่างๆ เช่น การแข่งขัน กีฬา การวิ่ง เล่นเกมส์ การทำอาหาร การทำข้อสอบ การทดลองในห้องปฏิบัติการ หรือใช้สำหรับติดตั้งกับเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มีลักษณะดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 นาฬิกาจับเวลา [แหล่งที่มา: <http://jedto.com>]

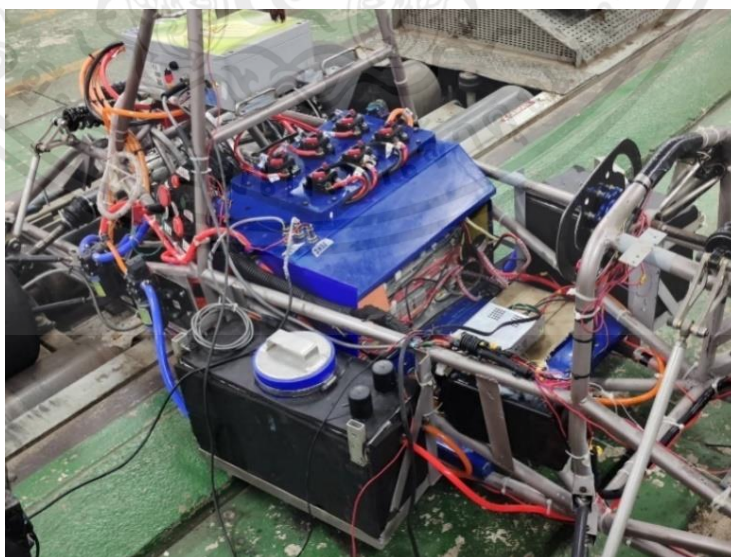
### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการโครงการงาน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบแบตเตอรี่ โดยเอาระบบต่างๆ มาแยกชิ้นส่วนศึกษาและปรับเปลี่ยน เพื่อแก้ไขปัญหาที่พบในการแข่งขันก่อนให้เหมาะสมและตรงกับกฎการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2022 Student Formula EV
2. ทำการออกแบบจากข้อมูลที่ศึกษาในข้างต้นมาเป็นหลักในการออกแบบ เพื่อประสิทธิภาพที่เหมาะสมและตรงตามกฎการแข่งขันแล้วทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Solid work ดังรูปที่ 3.36



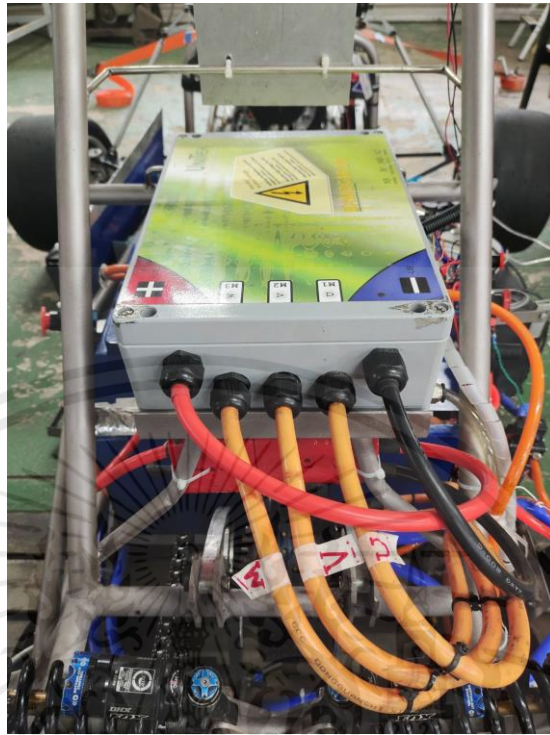
รูปที่ 3.36 แบบจำลองรถ Student Formula EV

3. ประดิษฐ์และหาอุปกรณ์ชิ้นส่วนประกอบของรถในระบบต่างๆ ตามแบบจำลองแล้วนำชิ้นส่วนมาประกอบกัน เพื่อให้ความสามารถตรงตามระบบต่างๆ รูปที่ 3.37 ในรถโดยมีการประกอบชิ้นส่วนที่สำคัญในด้านไฟฟ้า คือการแพคแบตเตอรี่ รูปที่ 3.38 ด้วยการเชื่อมต่อระบบกับกล่องควบคุม และมอเตอร์ รูปที่ 3.39 แบตเตอรี่จะมีการใช้ระบบ Cooling เพื่อลดอุณหภูมิมาขณะที่แบตเตอรี่มีความร้อน



รูปที่ 3.37 แบตเตอรี่แพ็คและชุดระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.38 การติดตั้งกล่องคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.39 รถ Student Formular EV ที่ประกอบเสร็จ

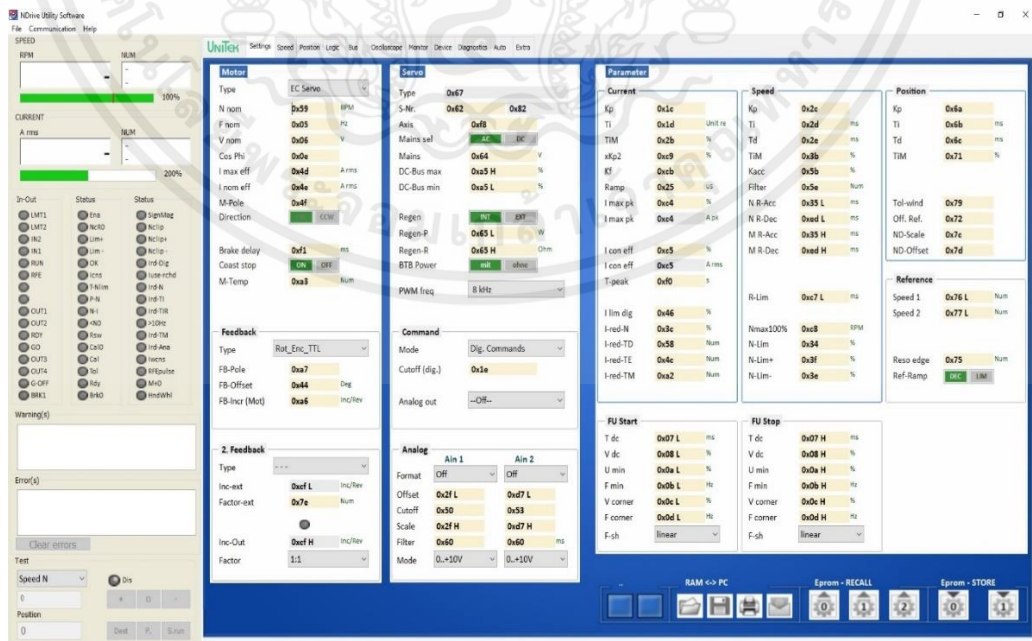
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ทำการปรับแต่งระบบที่ทำการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหา โดยการปรับแต่งระบบของกล่องควบคุม เพื่อให้มอเตอร์สามารถส่งกำลังได้มากขึ้น ด้วยการทดสอบ Dyno Test และเปลี่ยนสปริงของโช้คอัพให้เหมาะสมกับการใช้งาน ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การทดสอบด้วย Dyno Test

5 ตรวจสอบระบบการทำงานต่างๆของรถ เพื่อให้มีความพร้อมสำหรับการทดสอบเก็บผล โดยเก็บผลจากโปรแกรม NDrive2 Software ดังรูปที่ 3.41 และ ดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.41 โปรแกรม NDrive2 Software ของกล่องควบคุม แสดงถึงรอบมอเตอร์และกระแสที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.42 การตรวจสอบระบบการทำงานต่างๆของรถ เพื่อให้มีความพร้อมสำหรับการทดสอบเก็บ

ผล

### 3.4 ขั้นตอนการเก็บผลการทดสอบ

1. ทำการเอารถขึ้นบน Dyno Test ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 การเอารถขึ้นบน Dyno Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการติดตั้งสายรัดสแต็กเกอร์ของ MERTRA B/S 5T×12M ดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 การติดตั้งสายรัดสแต็กเกอร์ของ MERTRA B/S 5T×12M

3. ทำการวางบล็อกในตำแหน่งล้อ ดังรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 การวางบล็อกในตำแหน่งล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทำการจ่ายไฟ 12 โวลต์ (Low Voltage)
5. ทำการเชื่อมต่อ BMS และ คอนโทรลเลอร์ เข้ากับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 การเชื่อมต่อ BMS และ คอนโทรลเลอร์ เข้ากับคอมพิวเตอร์

6. ทำการ Setting ระบบขับเคลื่อน 1 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ ดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 การ Setting ระบบขับเคลื่อน 1 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดลองและบันทึกเวลา, อุณหภูมิยาง, กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ดังรูปที่

3.48



รูปที่ 3.48 การทดลองและบันทึกเวลา อุณหภูมิยาง กระแสที่ใช้ และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

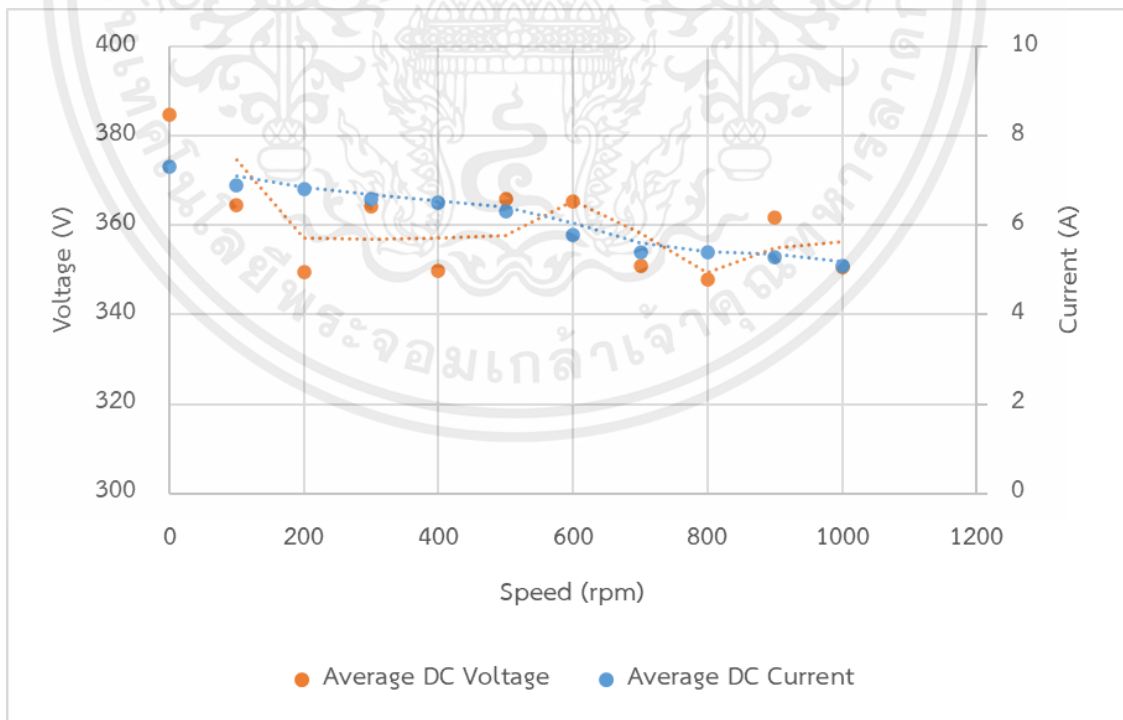
## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผล

เมื่อทำการจัดสร้างรถที่มีประสิทธิภาพตรงตามกฎการออกแบบของ TSAE Formula ที่กำหนดโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย โดยมีส่วนประกอบหลักในรถคือมอเตอร์ไฟฟ้าแบบ Medium 470 โวลต์ 100 กิโลวัตต์ คอนโทรลเลอร์ในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟของแบตเตอรี่และควบคุมความเร็วของมอเตอร์ แบตเตอรี่ ชนิด Lithium Ion NMC กระแสไฟฟ้าที่จ่ายไม่เกิน 80 กิโลวัตต์ BMS ในการชาร์จของแบตเตอรี่และระบบระบายความร้อนแบบน้ำผสมน้ำแข็ง เพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน TSAE Auto Challenge Student Formula โดยประเภทรถไฟฟ้าแล้วนำมาเก็บผลโดยการทดสอบวิ่งบน Dynamometer

#### 4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1.1 การทดสอบค่าแรงดันไฟและกระแสไฟต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.1 และดังรูปที่ 4.2

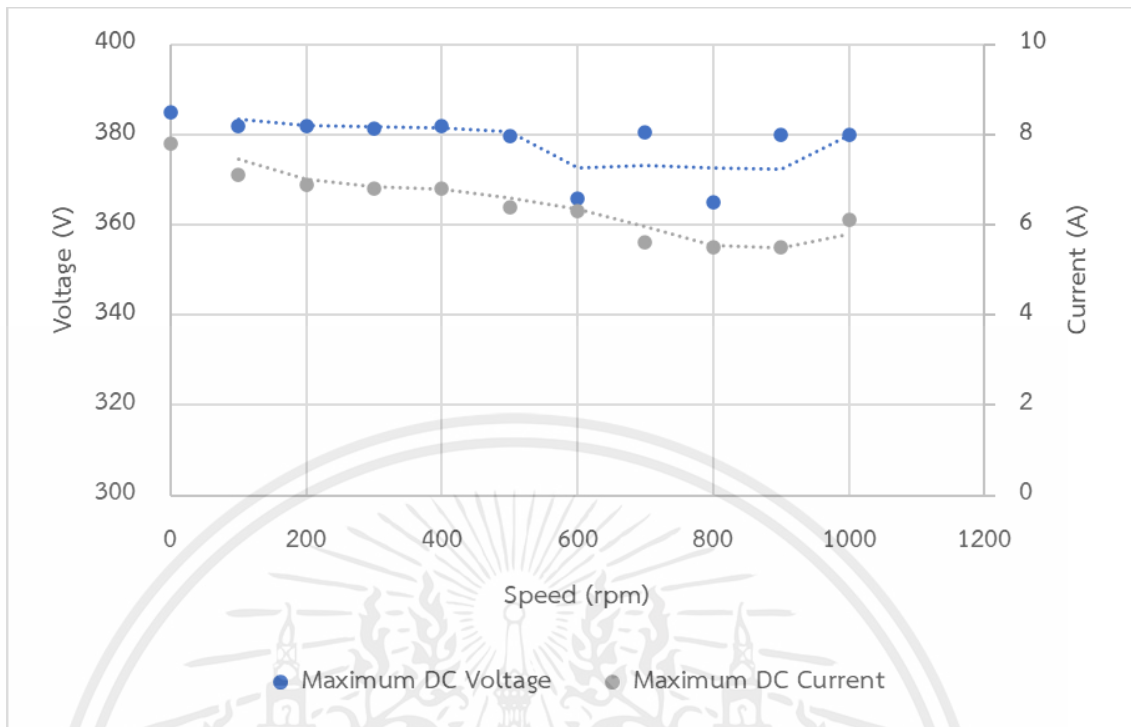


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟเฉลี่ยของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปภาพที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟเฉลี่ยของแบตเตอรี่กับ กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ พบว่าในขณะที่รถหยุดนิ่ง ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีค่าอยู่ที่ 384.87 โวลต์ และ 7.6 แอมป์ ตามลำดับ เมื่อมอเตอร์มีการขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อ นาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 364.48 โวลต์ และ 6.9 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 349.66 โวลต์ และ 6.5 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 364.29 โวลต์และกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 6 แอมป์ ความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาที ค่า แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 349.78 โวลต์ และกระแสไฟฟ้ามีค่าที่คงที่อยู่ที่ 6 แอมป์ ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นเป็น 365.85 โวลต์ แต่กระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 4.5 แอมป์ ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 365.29 โวลต์ และ 4.3 แอมป์ ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 350.99 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 5 แอมป์ ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและ ค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 347.82 โวลต์ และ 4.4 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบ 900 รอบ ต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 361.84 โวลต์ และ 4.6 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงอยู่ที่ 350.75 โวลต์ และ 4.1 แอมป์ ตามลำดับ

จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดนั้นอยู่ในช่วงที่รถหยุดนิ่ง มี ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 384.87 โวลต์ และ 7.6 แอมป์ ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลง เมื่อมีความเร็วรอบที่มากขึ้น เนื่องด้วยมีแรงเฉื่อยจากโรเตอร์ของ Dynamometer



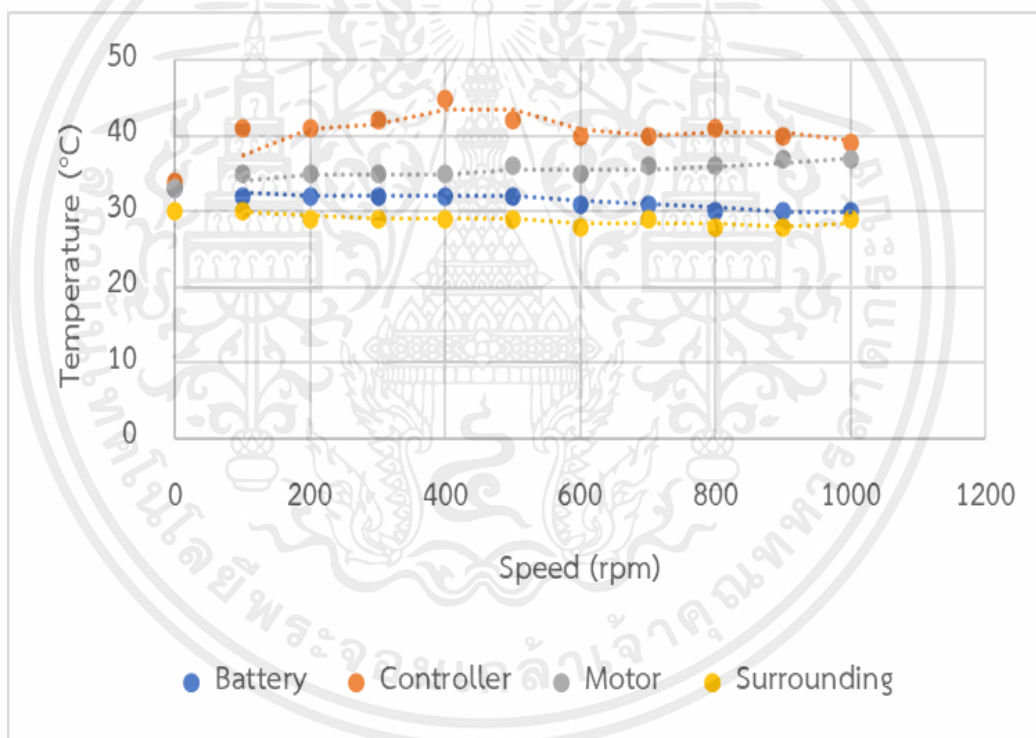
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่

จากรูปภาพที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันสูงสุดของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ พบว่าในขณะที่รถหยุดนิ่ง ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า มีค่าอยู่ที่ 384.87 โวลต์ และ 7.8 แอมป์ ตามลำดับ เมื่อมอเตอร์มีการขับเคลื่อนที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 381.9 โวลต์ และ 7.1 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ 200 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 381.97 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 6.9 แอมป์ ความเร็วรอบที่ 300 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 381.32 โวลต์ และ 6.8 แอมป์ ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุ่ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ 381.78 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้ามียุ่ที่อยู่ที่ 6.8 แอมป์ ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 379.73 โวลต์ และ 6.4 แอมป์ ความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 365.73 โวลต์ และ 6.3 แอมป์ ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุ่ที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 380.46 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 5.6 แอมป์ ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 364.9 โวลต์ และมีค่ากระแสไฟฟ้ามียุ่ที่ลดลงอยู่ที่ 5.5 แอมป์ ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามียุ่ที่เพิ่มขึ้นอยู่ที่ 379.96 โวลต์ และค่ากระแสไฟฟ้ามียุ่ที่คงที่อยู่ที่ 5.5

แอมป์ ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ลดลงเล็กน้อยอยู่ที่ 379.96 โวลต์ แต่ค่ากระแสไฟฟ้านั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 6.1 แอมป์

จากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสูงสุดนั้นอยู่ในช่วงที่รถหยุดนิ่ง มีค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 384.87 โวลต์ และ 7.8 แอมป์ ตามลำดับ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดน้อยลง เมื่อมีความเร็วรอบที่มากขึ้น เนื่องด้วยมีแรงเฉื่อยจากโรเตอร์ของ Dynamometer

4.1.2 ผลการทดสอบค่าอุณหภูมิต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000 ดังรูปที่ 4.3



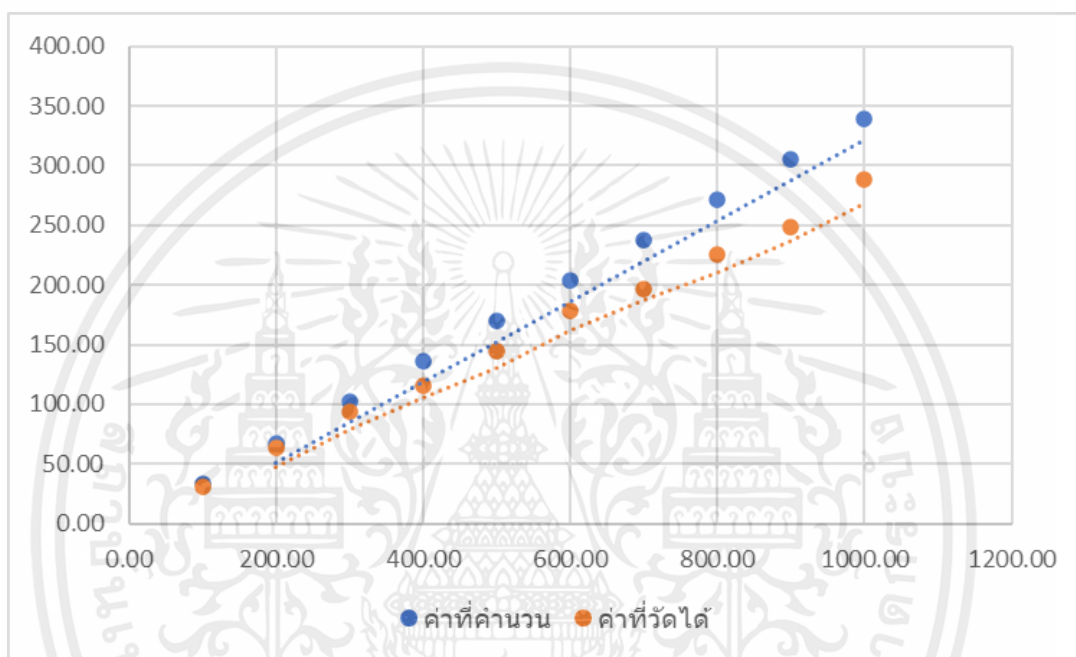
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิต่อความเร็วรอบของมอเตอร์

จากรูปภาพที่ 4.3 ค่าอุณหภูมิแบตเตอรี่เฉลี่ยในระบบมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วงที่ 30-33 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิของมอเตอร์นั้นในการทดลองเมื่อมีความเร็วรอบที่มากขึ้น ค่าอุณหภูมิของมอเตอร์ก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 33-37 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิของกล่องคอนโทรลเลอร์มีค่าอยู่ในช่วง 33-45 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิขณะที่ยังหยุดนิ่งไม่มีการขับเคลื่อนและอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ 45 องศา

เซลเซียส ในช่วงความเร็วรอบของมอเตอร์ 400 รอบต่อนาที และค่าอุณหภูมิภายนอกจะอยู่ช่วง 28-30 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ทำการทดลองนั้นเป็นช่วงเวลากลางคืนจึงมีแนวโน้มของค่าอุณหภูมิที่ต่ำลง

#### 4.1.3 ผลการทดสอบค่าความเร็วรอบที่มอเตอร์เปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ล้อ ดังรูปที่

4.4



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่คำนวณได้กับความเร็วรอบวัดได้จริง

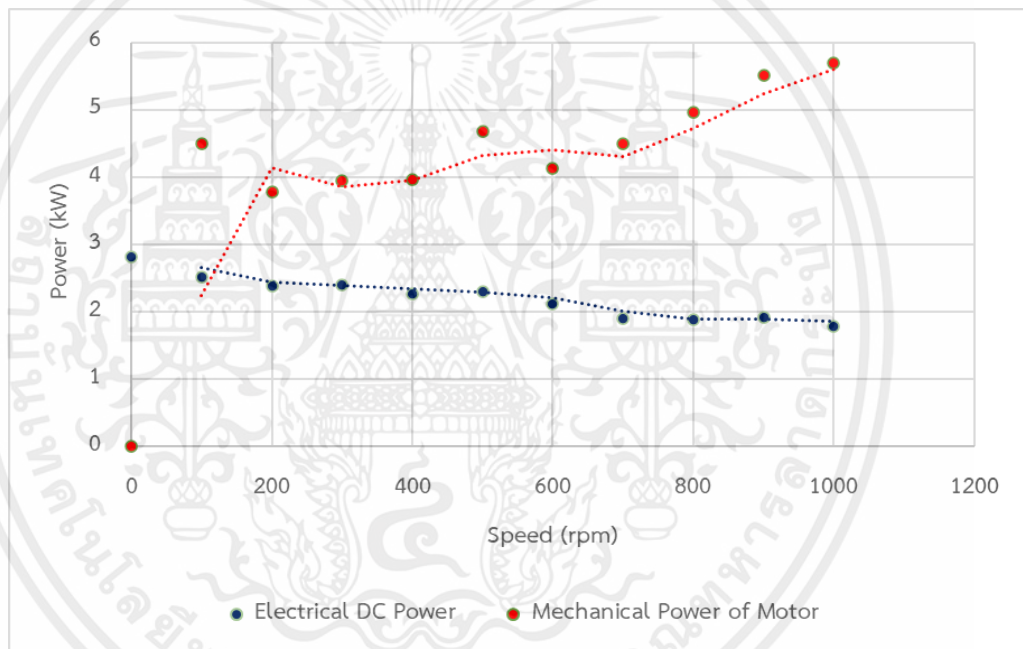
จากรูปภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ที่คำนวณได้กับความเร็วรอบวัดได้จริง พบว่าค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณนั้น เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ล้อจากการวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วรอบ TESTO 465 ค่าที่ได้มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งในช่วงของความเร็วรอบที่ 100 รอบต่อนาที - 300 รอบต่อนาที ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยมาก ช่วงความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาที - 800 รอบต่อนาที ค่าความผิดพลาดจะมีค่าที่มากกว่าในช่วงความเร็วรอบที่ 400 รอบต่อนาที - 800 รอบต่อนาที และในช่วงความเร็วรอบที่ 900 รอบต่อนาที - 1000 รอบต่อนาที จะมีค่าความผิดพลาดที่มากกว่าช่วงความเร็วรอบที่ 100 รอบต่อนาที - 300 รอบต่อนาที และช่วง 400 รอบต่อนาที - 800 รอบต่อนาที

#### 4.1.4 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟและกระแสไฟต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000

จากการทดลองและเก็บผล สามารถคำนวณหาค่า Electric DC Power และ Mechanical Power of Motor ได้จากแรงดันไฟและกระแสไฟต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยใช้สูตรจากสมการ ดังนี้

$$P = 1.732 \times V \times I \times PF \times eff \quad (4.1)$$

จากผลการคำนวณสามารถนำไปแสดงผลในรูปแบบกราฟได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเร็วรอบมอเตอร์กับค่า Electric DC Power และค่า Mechanical Power of Motor ที่ได้จากการคำนวณ

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ค่า Electric DC Power จะมีค่าที่ลดน้อยลง และเมื่อมีความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้น ค่า Mechanical Power of Motor จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องด้วย Electric DC Power นั้น จะถูกเปลี่ยนเป็นกำลังทางกลให้กับมอเตอร์ หรือ Mechanical Power of Motor เพื่อให้มอเตอร์นั้นสามารถมีแรงขับเคลื่อนที่มากขึ้นนั่นเอง

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยของแบตเตอรี่กับกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดกระแสไฟฟ้าต่ำสุดและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย โดยมีการทดสอบบน DYNAMETER ซึ่งมีการใช้มอเตอร์ EMRAX 228 และใช้กล่องควบคุม BAMOCAR PG D3-400-400 RS มีการใช้แบตเตอรี่ใช้แบตเตอรี่ ชนิด Lithium Ion NMC จำนวน 96 ก้อน แรงดันไฟฟ้ารวม 355.2 โวลต์ ในการทดสอบทำการกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ EMRAX 228 โดยมีกำหนดความเร็วรอบในการทดสอบอยู่ที่ 0 รอบต่อนาที, 100 รอบต่อนาที, 200 รอบต่อนาที, 300 รอบต่อนาที, 400 รอบต่อนาที, 500 รอบต่อนาที, 600 รอบต่อนาที, 700 รอบต่อนาที, 800 รอบต่อนาที, 900 รอบต่อนาที และ 1,000 รอบต่อนาที ทำการจับเวลาในแต่ละการทดสอบครั้งละ 1 นาที

#### 5.1 สรุปผล

1. การทดสอบเก็บผลอุณหภูมิของมอเตอร์ คอนโทรลเลอร์ แบตเตอรี่ และอากาศภายนอก มีค่าอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 33 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากในการทำการทดสอบแต่ละครั้งมีการใช้เวลาในการทดสอบที่น้อย อยู่ที่ครั้งละ 1 นาที และมีการใช้รอบของมอเตอร์ที่ต่ำอยู่ในช่วง 0 – 1,000 รอบต่อนาที

2. ในการทดสอบเก็บผลแรงดันและกระแสไฟฟ้า เมื่อปรับรอบของมอเตอร์ EMRAX ตั้งแต่ 0 - 1,000 รอบต่อนาที พบว่าแรงดันเฉลี่ยกับกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทดสอบที่สูงสุดในครั้งนี้อยู่ที่ 600 รอบต่อนาที ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 365.73 V<sub>dc</sub> แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 365.29 และ 600 รอบต่อนาที มีการกินกระแสน้อยที่สุดอยู่ที่ 6.3 A

3. ในการทดสอบเก็บผลของความเร็วรอบมอเตอร์กับความเร็วรอบล้อที่วัดได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อยังไม่ปรับรอบ หรือ 0 รอบต่อนาที มอเตอร์จะหยุดนิ่งและไม่กินกระแส เมื่อปรับรอบของมอเตอร์ 100 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของล้อจะอยู่ที่ 31.00 รอบต่อนาที และเมื่อปรับรอบสูงสุดในการทดสอบ 1000 รอบต่อนาที ความเร็วรอบของล้อจะอยู่ที่ 287.90 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดรอบ TESTO 465 จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบล้อจะน้อยกว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราทดของระบบส่งกำลังอยู่ที่ 3.81 และความเร็วรถที่คำนวณได้อยู่ที่ 21 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า ควรทดสอบโดยอุปกรณ์ที่มีมาตรฐานและปลอดภัย โดยมีผู้ที่เชี่ยวชาญควบคุมดูแล
2. ค่ากระแสที่ลดลงเมื่อความเร็วรอบที่สูงขึ้นนั้น เกิดขึ้นจากเมื่อรอบสูงขึ้นที่โรเตอร์ของ Dynamometer จะเกิดแรงเฉื่อย ทำให้มอเตอร์กินกระแสที่ลดน้อยลง
3. อุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ เก็บผลค่าต่างๆ ควรมีประสิทธิภาพและแม่นยำในการใช้งาน
4. ในการจัดสร้างรถสูตรนักศึกษาในครั้งนี้ สามารถเป็นรถต้นแบบ เพื่อให้ผู้ที่สนใจได้พัฒนาปรับปรุง และแก้ไข ในข้อบกพร่องนั้นๆ ให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nijmeijer. (2014). “TRACTION CONTROL OF AN ELECTRIC FORMULA STUDENT RACING CAR.”
- [2] Nicola, Bianchi. (2013). “Formula SAE Electric Competition: Electrical Motor Design.”
- [3] Shray, Chandra. (2014). “Safety system of an electric vehicle for formula Racing”
- [4] Mark, Allison. (2013). “FORMULA ELECTRIC SYSTEM: DESIGN AND INTEGRATION.”
- [5] Marcos, Luz Junior. (2017). Kinematic Design and Finite Element Analysis of a Suspension System for a FourWheel Drive Electric Formula Student Vehicle
- [6] Jamshoro. (2013). The design of SAE formula electric vehicles combined with battery safety systems and race protection
- [7] สถาบันยานยนต์. (2563). ความรู้ยานยนต์ไฟฟ้าเบื้องต้น
- [8] SAE International. (2565). 2021-2022 Formula SAE Rules INTRODUCTION. Accessed December 28. Available from
- [9] Kalmakov, V.A. (2016). Development of Formula Student Electric Car Battery Design Procedure
- [10] พูลพร, แสงบางปลา และคณะ. (2558). “สมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย(สวยท)” ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 [1มกราคม-มิถุนายน 2558] หน้า 32-38.
- [11] ศรณศักดิ์ ลาภใหญ่, ศราวุธ คาริระแปง และอนิชา กันนิกา. (2551). การวิเคราะห์และออกแบบ โครงสร้างรถ TSAE Student Formula
- [12] จิรเมธ บุญศักดิ์, พัฒน์สินี สอนเย็น และรัตภูมิ เกศกะงาม. (2556). “การศึกษาพฤติกรรมตัวแปรเชิง ปริมาตรและความยาวของระบบท่อไอดีสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา” **ปริญญา นิพนธ์คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า**
- [13] Kirt, Yodpradit. (2018). Battery in Electric Vehicles — แบตเตอรี่ในรถ EV
- [14] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2559). รู้จักแบตเตอรี่ ตอนที่ 4 **วารสารเทคโนโลยี วัสดุ** ฉบับ ที่ 80 มกราคม – มีนาคม 2559
- [15] สถาบันยานยนต์. (2561). การศึกษาและพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. ค่าการหน่วงเวลาของ Motor ที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,000 - 4,000 ms

การหน่วงเวลา (ms)	Time (s)
1,000	5.16
2,000	5.51
3,000	5.66
4,000	5.88

ตารางที่ ข. ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟและกระแสไฟต่อความเร็วรอบ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000 รอบต่อนาที

ความเร็วรอบที่ (ต่อนาที)	แรงดันไฟฟ้า สูงสุด (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า ต่อเนื่อง (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า สูงสุด (แอมป์)	กระแสไฟฟ้า ต่ำสุด (แอมป์)	กระแส	
					AC (motor) (แอมป์)	DC (battery) (แอมป์)
หยุดนิ่ง	384.87	384.87	7.8	7.6	0	7.3
100	381.90	364.48	7.1	6.9	9.37	6.9
200	381.97	349.66	6.9	6.5	8.22	6.8
300	381.32	364.29	6.8	6	8.22	6.6
400	381.78	349.78	6.8	6	8.60	6.5
500	379.73	365.85	6.4	4.5	9.72	6.3
600	365.73	365.29	6.3	4.3	8.6	5.8
700	380.46	350.99	5.6	5	9.72	5.4
800	364.90	347.82	5.5	4.4	10.84	5.4
900	379.96	361.84	5.5	4.6	11.59	5.3
1,000	379.90	350.75	6.1	4.1	12.34	5.1

หมายเหตุ : ค่าที่ได้จากการเก็บผลในการทดลองนี้อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องด้วย  
ความพร้อมของ Dynamometer ที่ทำการทดสอบตัวรถ มีการชำรุด ฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์  
ไม่พร้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. ค่าอุณหภูมิขมยงก่อนและหลังทำการทดสอบ

การทดสอบ	อุณหภูมิของล้อยหลังซ้าย (°C)			อุณหภูมิของล้อยหลังขวา (°C)		
	ทางด้านในของล้อย	ตรงกลางของล้อย	ทางด้านนอกของล้อย	ทางด้านในของล้อย	ตรงกลางของล้อย	ทางด้านนอกของล้อย
ก่อนทำการทดสอบ	30	30	30	30	30	30
หลังทำการทดสอบ	32	31	31	31	31	31

ตารางที่ ง. ผลการทดสอบค่าอุณหภูมิต่อความเร็วรอบ ตั้งแต่ความเร็วรอบที่ 0 - 1,000

ความเร็วรอบที่ (RPM)	อุณหภูมิของแบตเตอรี่เฉลี่ยในระบบ (°C)	อุณหภูมิของกล่องคอนโทรลเลอร์ (°C)	อุณหภูมิของมอเตอร์ (°C)	อุณหภูมิอากาศภายนอก (°C)
หยุดนิ่ง	33	34	33	30
100	32	41	35	30
200	32	41	35	29
300	32	42	35	29
400	32	45	35	29
500	32	42	36	29
600	31	40	35	28
700	31	40	36	29
800	30	41	36	28
900	30	40	37	28
1,000	30	39	37	29

**หมายเหตุ :** ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการเก็บผลในการทดลองนี้ อาจมีความคลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัด คือ Infrared Thermometer AZ-8868 มีอายุการใช้งานที่มาก และด้วยการเก็บรักษาที่ไม่ดี อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์มีการวัดค่าที่คลาดเคลื่อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล กฤติมา ภูระย้า  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2542  
 ภูมิลำเนา จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 ที่อยู่ 115 หมู่ 7 ตำบลทรายทอง  
 อำเภอบางสะพานน้อย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
 77170  
 e-mail krittimaphuraya89@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนราชประชานุเคราะห์ 20 จังหวัดชุมพร
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล ชยานิษฐ์ รัตน์แก้วช่วย  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ.2542  
 ภูมิลำเนา จังหวัดตรัง  
 ที่อยู่ 217/48 ถนนวิเศษกุล ตำบลทับเที่ยง  
 อำเภอเมือง จังหวัดตรัง 92000  
 e-mail chayanid6790@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนสภาราชินี จังหวัดตรัง
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล ทัดเทพ สุรบิญญานนท์  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ.2541  
 ภูมิลำเนา จังหวัดขอนแก่น  
 ที่อยู่ 332 หมู่ 17 ตำบลศิลา อำเภอเมือง  
 จังหวัดขอนแก่น 40000  
 e-mail ne-ro@hotmail.co.th

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล วรพรรณ สุขัมพรรณ  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ.2542  
 ภูมิลำเนา จังหวัดเชียงใหม่  
 ที่อยู่ 70/1 ถนนศรีสำราญ 2 ตำบลสองพี่น้อง  
 อำเภอสองพี่น้อง จังหวัดสุพรรณบุรี 72110  
 e-mail jahhworaphan@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ศูนย์วิจัยและพัฒนาการศึกษา จังหวัดนครปฐม
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล อภิศักดิ์ ศรีฟ้า  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2542  
 ภูมิลำเนา จังหวัดศรีสะเกษ  
 ที่อยู่ 146 หมู่ 2 ตำบลสุขสวัสดิ์ อำเภอไพรบึง  
 จังหวัดศรีสะเกษ 33180  
 e-mail aphisak.srifa@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปลาย (วิทย์-คณิต) ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนมาบอำมฤตวิทยา จังหวัดชุมพร
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้