

การศึกษาและออกแบบบรรจุภัณฑ์แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนเพื่อปรับใช้
กับโครงการเกษตร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

STUDY AND DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERY PACK TO APPLY
WITH AGRICULTURE DRONE

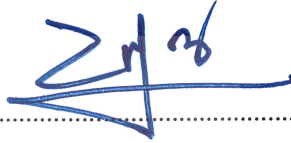


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การศึกษาและออกแบบบรรจุภัณฑ์แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนเพื่อปรับใช้
กับโครงการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

สุรเดช ตัญตวรรษรัตน์

(ผศ. ดร.สุรเดช ตัญตวรรษรัตน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปฏิธาน นิมิตานี้ : การศึกษาและออกแบบบรรจุภัณฑ์แบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนเพื่อปรับใช้
กับโดรนการเกษตร (STUDY AND DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERY PACK TO
APPLY WITH AGRICULTURE DRONE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล
ศรีเสรีรัฐผล, 107 หน้า.

คำสำคัญ: แบบจำลองของโดรน/แบบจำลองของแบตเตอรี่/การแพ็คแบตเตอรี่

ปัจจุบันในงานด้านการเกษตรมีอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังมาแทนที่การทำเกษตรแบบเก่าคือ
เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนในชื่อที่รู้จักกันดี มีการปรับใช้มากมายในงานด้านการเกษตร
ทั้งพ่นปุ๋ยสารเคมี สํารวจพื้นแปร่งไร้ทางอากาศเพื่อวางแผนการเพาะปลูกหรือกระทั่งเก็บข้อมูลเพื่อ
ทำโมเดลปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำนายสุขภาพของพืชผลที่เกษตรกรกำลังปลูกอยู่ โดยในปัจจุบันมีการใช้
งานโดรนเพื่อการเกษตรอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ของประเทศไทยเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ
เช่น ประหยัดเวลาในการฉีดพ่นสารเคมี ลดการสัมผัสสารเคมีโดยตรงหรือกระทั่งกำหนดค่าสั่งให้โดรน
ปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ตัวโดรนการเกษตรก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เช่น ตัวโดรนมีราคาที่สูง
มาก ไม่เหมาะแก่การลงทุนในรายบุคคล ผู้ใช้ต้องมีความชำนาญในการบังคับ มีระบบการทำงานที่
ซับซ้อน แบตเตอรี่ที่มีราคาแพงและความจุที่จำกัด และต้องมีแบตเตอรี่สำรองเพื่อสลับเปลี่ยนใช้และ
ชาร์จในทันที

ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าวผู้วิจัยได้เลือกที่จะศึกษาและออกแบบในส่วนของแบตเตอรี่
เพื่อที่จะยืดเวลาในการบินของโดรนไปอีกซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ OK Cell Lithium-
Polymer ซึ่งเป็นแพ็คแบตเตอรี่ที่ประกอบไปด้วย Battery Management System(BMS) ที่มีหน้าที่
ในการจัดการและจับตาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันตัวโดรนและตัวแบตเตอรี่จากการใช้งานและ
การชาร์จ และแบตเตอรี่ Pouch cell Lithium-Polymer ต่อก้อน 14 เซลล์ เป็นระบบ 48 โวลต์
และมีความจุอยู่ที่ 28 Ah

สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PATIPAN NIMTHANEE : STUDY AND DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERY PACK TO APPLY WITH AGRICULTURE DRONE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 107 PP.

Keywords: DRONE MODELLING/BATTERY MODELLING/BATTERY PACKING

Currently, in agriculture, there is another technology that is replacing the old farming method. Unmanned aerial vehicle technology or drones as well-known names. There are many applications in agriculture, including spraying chemical fertilizers. Explore the aerial brush fields for crop planning or even collect data for artificial intelligence models to predict the health of the crops farmers are growing.

At present, drones are widely used in agriculture in many areas of Thailand due to many advantages such as Save time in spraying chemicals. Minimize direct exposure to chemicals or even autonomously command drones. But all of these Agricultural drones still have some limitations, for example. Drones are very expensive. Not suitable for individual investment and the pilot must be skilled in steering. There is a complex working system. Expensive batteries and limited capacity and must have a spare battery to switch and charge immediately.

Based on these requirements, the researcher has chosen to study and design the battery in order to extend the flight time of the drone. The battery currently used is OK Cell Lithium-Polymer. It is a battery pack consisting of a Battery Management System (BMS) that manages and monitors parameters to protect the drone and battery from over-use and charging, and a Pouch Cell Lithium-Polymer battery in series. The 14-cell system is 48 V and has a capacity of 28 Ah.

School of Mechatronics Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature

Advisor's Signature

Patipan

Sirapol

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และห้างหุ้นส่วนจำกัด อาร์เอพี เอ็นเตอร์ไพรส์ แอนด์ เซอร์วิสเชส ให้การสนับสนุนอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตาให้โอกาสให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำ ในการทำงานวิจัย รวมไปถึงคำแนะนำในการดำรงชีวิตแก่ผู้วิจัยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องโดยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศิริพรรณชฎี ศรีอ่อน นักศึกษาปริญญาเอกที่กรุณาให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่ต่าง ๆ

และที่ขาดไม่ได้ขอกราบขอบพระคุณพ่อบุญสม นิมธานี และคุณแม่ธนาภา เตมียงค์ ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมสนับสนุนการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปฎิภาณ นิมธานี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.4 สถานที่ทำงานวิจัย.....	2
1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญารรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 Unmanned Aerial Vehicle (UAV).....	5
2.2.1 ส่วนประกอบของโดรน.....	5
2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรน.....	6
2.3 Battery.....	10
2.3.1 แบตเตอรี่ Lithium-ion และเซลล์ชนิดอื่น ๆ.....	10
2.3.1.2 Lead acid battery.....	13
2.3.1.3 Nickel Metal-Base Chemistries.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.4. Sodium-Base Chemistries	15
2.3.1.5. Lithium-ion cells	15
2.3.2. นิยามพื้นฐานของแบตเตอรี่	19
2.3.3. การเปรียบเทียบความแตกต่างของสารเคมีแต่ละชนิดใน แบตเตอรี่ Li-ion	20
2.3.4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่	20
2.3.4.2. SOC Calculation	21
2.3.4.3. Open Circuit Voltage Calculation	22
2.3.4.4. Calculation of internal resistance and RC network.....	22
2.4 Battery Management System (BMS).....	24
2.4.1. หน้าที่ของ BMS.....	24
2.4.2. การจัดประเภทของ BMS	24
2.4.2.1. BMS Technology	24
2.4.2.2. BMS Topology	27
2.4.2.3. BMS Format	30
2.4.3. Cell balancing method	30
2.4.3.1. Passive balance.....	30
2.4.3.2. Active balance.....	32
2.4.4. Evaluation of BMS.....	36
2.4.5. Mode and Logic of BMS	37
2.4.5.1. Mode	37
2.4.5.2. Logic	39
2.5 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.	46
2.6 สรุป.....	51
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	53
3.1 กล่าวนำ.....	53
3.2 โดรนการเกษตร SB1.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1. ข้อมูลพื้นฐานของโตรนการเกษตร SB1	53
3.3 แบตเตอรี่	54
3.3.1. ข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน.....	55
3.3.2. แบตเตอรี่ใหม่ที่จะเลือกใช้	55
3.3.3. ข้อมูลของ BMS ที่จะเลือกใช้.....	56
3.3.4. ออกแบบการแพ็คแบตเตอรี่ให้มีแรงดันเท่ากับระบบ 48V	57
3.3.5. ออกแบบ Battery holder และ Battery case ด้วยโปรแกรม Solid work.....	57
3.3.6. การขึ้นรูปชิ้นงานที่ออกแบบ.....	58
3.3.7. การประกอบ การแพ็คและการต่อสายต่าง ๆ.....	58
3.4 สรุป.....	59
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	60
4.1 กล่าวนำ.....	60
4.2 การทดสอบภาคห้องปฏิบัติการ	60
4.2.1. การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงยกของโตรน ในภาคห้องปฏิบัติการ.....	61
4.2.2. การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่โตรนต้องการเทียบกับแรงยกที่ มอเตอร์สร้างได้ภาคสนาม	61
4.2.3. เปรียบเทียบผลของสมการจากภาคห้องปฏิบัติการกับภาคสนาม	63
4.2.4. การทดสอบคายประจุไฟฟ้าคงที่ที่อัตรา C-rate ที่แตกต่างกัน เพื่อหาค่า Peukert's constant.....	64
4.2.5. การทดลองคายประจุไฟฟ้าแบบกำลังไฟฟ้าคงที่กับแบตเตอรี่ NCA ใน 1 เซลล์ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาที่วัดได้กับ ระยะเวลาที่ประเมินได้	68
4.2.6. ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ Li-PO.....	70
4.2.7. ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ NCA.....	71

สารบัญ (ต่อ)

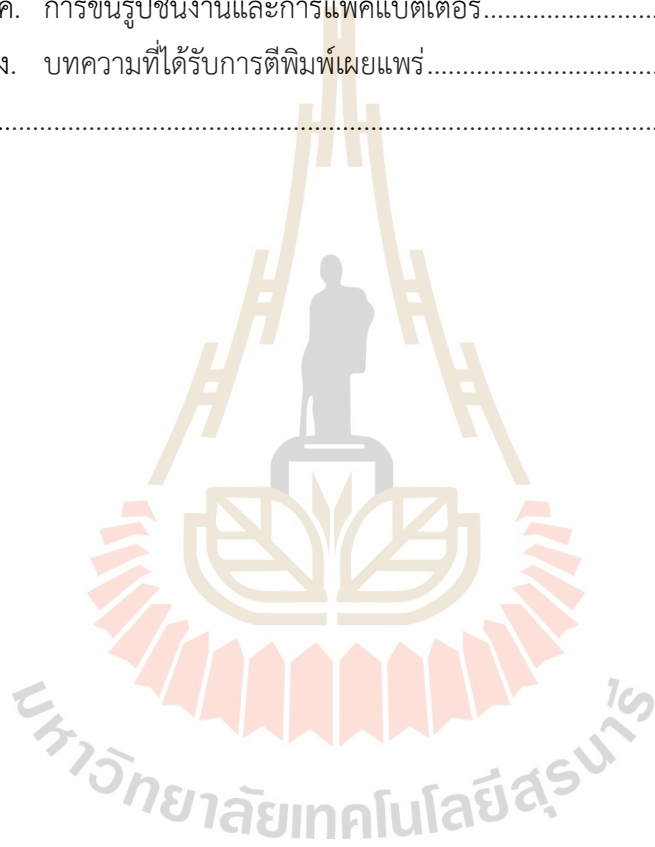
หน้า

4.2.8.	ประเมินระยะเวลาการคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ 500 W กับแบตเตอรี่ NCA.....	71
4.2.9.	ทดสอบคายประจุแบบเป็น Pattern กับแบตเตอรี่ Li-PO	72
4.2.10.	ทดสอบคายประจุแบบเป็น Pattern กับแบตเตอรี่ NCA	73
4.3	การทดสอบภาคสนาม	73
4.3.1.	ทดสอบบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดด้วย แบตเตอรี่ Li-PO.....	73
4.3.2.	ทดสอบบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดด้วย แบตเตอรี่ NCA.....	74
4.3.3.	จำลองคายประจุจากการบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดย ไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ NCA.....	74
4.3.4.	ทดสอบบินโดรนแบบเคลื่อนที่โดยไม่บรรทุกโหลดด้วย แบตเตอรี่ Li-PO.....	75
4.3.5.	ทดสอบบินโดรนแบบเคลื่อนที่โดยไม่บรรทุกโหลดด้วย แบตเตอรี่ NCA.....	76
4.3.6.	ทดสอบบินจริงกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำออกด้วยแบตเตอรี่ Li-PO	77
4.3.7.	ทดสอบบินจริงกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำออกด้วยแบตเตอรี่ NCA.....	77
4.3.8.	ประเมินการบินกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำออกด้วยแบตเตอรี่ NCA.....	78
4.4	สรุป.....	79
5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	80
5.1	สรุป.....	80
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	81
	รายการอ้างอิง.....	82

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โค้ดโปรแกรมสำหรับการคำนวณระยะเวลาการบินด้วย MATLAB	84
ภาคผนวก ข. การออกแบบการบรรจุภัณฑ์สำหรับแบตเตอรี่	87
ภาคผนวก ค. การขึ้นรูปชิ้นงานและการแพ็คแบตเตอรี่	94
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	99
ประวัติผู้เขียน	107



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	Non Lithium-based chemistries..... 12
2.2	Nickel Metal-Based Chemistries..... 13
2.3	Lithium-ion chemistries..... 16
2.4	Comparison of Li-ion's chemical cathode..... 20
2.5	การจำแนกประเภทของ BMS..... 28
2.6	Sample BMS fault type..... 42
2.7	BMS common safety measurements..... 43
4.1	การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S1P 65
4.2	การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S2P 65
4.3	การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S3P 66
4.4	การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 2S1P 66
4.5	การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 3S1P 67
4.6	กำลังไฟฟ้าที่จะทดลองในแต่ละรูปแบบการต่อ 68
4.7	เปรียบเทียบผลการทดลองดึงกระแสแบบกำลังไฟฟ้าคงที่โดยเปรียบเทียบเวลา จริงกับเวลาจากการคำนวณ..... 69

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Wiring inside BLDC motor	6
2.2	Electrical power of drone.....	8
2.3	Flowchart of flight time calculation.....	10
2.4	Enclosure	11
2.5	How Li-ion work.....	16
2.6	Anode material performance comparison.....	18
2.7	แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	21
2.8	OCV and SOC characteristic at 30 °C of LTO.....	22
2.9	Current pulse discharge test.....	23
2.10	การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วย Technology	25
2.11	การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยพอร์ต จำนวนเซลล์และ Switched Positive.....	26
2.12	การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยพอร์ต จำนวนเซลล์และ Switched Negative	27
2.13	การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยการเดินสายไฟและบอร์ด	28
2.14	Fixed shunt resistor method.....	31
2.15	Switching shunt resistor method	31
2.16	Single Capacitor.....	32
2.17	Several Capacitor	33
2.18	Single Inductor.....	34
2.19	Several Inductor.....	34
2.20	Single Transformer	35
2.21	Several Transformer	36
2.22	Relationship between each modes	38
2.23	Wiring of relay.....	39
2.24	Logic of power-up control	39
2.25	Charge flow	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26	Communication between BMS and charger during Charging..... 40
2.27	End of charge flow..... 41
3.1	ไดรณการเกษตร SB1..... 53
3.2	BLDC motor X9 Power System 110KV..... 54
3.3	การซ้่งน้ำหน้กไดรณ..... 54
3.4	OKCell Battery 14S 28Ah 20C..... 55
3.5	Lishen LR2170LA..... 56
3.6	Jikong BMS JK-B2A24S15P..... 56
3.7	Battery holder..... 57
3.8	Battery case..... 57
3.9	1 Segment (1 Serie 10 Parallels)..... 58
3.10	14 Segments (14 Series 10 Parallels)..... 58
3.11	Install BMS to Battery..... 59
4.1	Chroma model 17020 Regenerative Battery Test System..... 60
4.2	RCBenchmark 1780 test stand with BLDC motor, propeller, and battery. 61
4.3	3411 Propeller and 36190 Propeller..... 61
4.4	Electrical Power and Thrust of propeller test with test stand..... 62
4.5	Electrical Power and Thrust of propeller test with drone..... 63
4.6	การเปรียบเทียบการค้ำนวณของท้่งสองสมการ..... 64
4.7	Set up battery for testing..... 67
4.8	Fit curve by MATLAB..... 68
4.9	Peukert’s law with MATLAB m file..... 69
4.10	Constant Power Discharge Test 500 Watt of Li-PO Battery..... 70
4.11	Constant Power Discharge Test 500 Watt of NCA Battery..... 71
4.12	Simulation of Constant Power Discharge 500 Watt of NCA Battery..... 72
4.13	Multi Constant Power Discharge Test of LI-PO..... 72
4.14	Multi Constant Power Discharge Test of NCA..... 73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	Flight time testing of Li-PO with Hovering and no-load conditions 73
4.16	Flight time testing of NCA with Hovering and no-load conditions 73
4.17	Flight time calculation of NCA with Hovering and no-load conditions 75
4.18	Moving path for flight testing..... 75
4.19	Flight time testing of Li-PO with Moving pattern and no-load conditions..... 76
4.20	Flight time testing of NCA with Moving pattern and no-load conditions..... 76
4.21	Flight time testing of Li-PO with Hovering and 5kg-load conditions 77
4.22	Flight time testing of NCA with Hovering and 5kg-load conditions 78
4.23	Flight time calculation of NCA with Hovering and 5kg-load conditions 78
ข.1	Battery holder 1 Unit..... 88
ข.2	NCA 40 Ah 1 Cell..... 88
ข.3	NCA 40 Ah 14 Cells..... 89
ข.4	Left and Right side unit..... 90
ข.5	Front side unit 90
ข.6	Rear side unit 91
ข.7	Base side unit..... 91
ข.8	Top side unit..... 92
ข.9	Assembly with top..... 93
ข.10	Assembly without top..... 93
ค.1	3D Printer Creality Ender3 V2 95
ค.2	Battery holder..... 95
ค.3	Spot welding 1..... 96
ค.4	Check connection with multi meter 96
ค.5	Spot welding 2..... 97
ค.6	LFP battery for spot welding 2..... 97
ค.7	Wiring BMS to battery..... 98
ค.8	การขั้วนำหนักแบตเตอรี่ NCA..... 98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันในงานด้านการเกษตรมีอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังมาแทนที่การทำเกษตรแบบเก่าคือ เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือโดรนในชื่อที่รู้จักกันดี มีการปรับใช้มากมายในงานด้านการเกษตร ทั้งพ่นปุ๋ยสารเคมี สำรวจพื้นแปลงไร่นาทางอากาศเพื่อวางแผนการเพาะปลูกหรือกระทั่งเก็บข้อมูลเพื่อทำโมเดลปัญญาประดิษฐ์เพื่อทำนายสุขภาพของพืชผลที่เกษตรกรกำลังปลูกอยู่

โดยในปัจจุบันมีการใช้งานโดรนเพื่อการเกษตรอย่างแพร่หลายในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการเช่น ประหยัดเวลาในการฉีดพ่นสารเคมี ลดการสัมผัสสารเคมีโดยตรง หรือกระทั่งกำหนดคำสั่งให้โดรนปฏิบัติงานแบบอัตโนมัติ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น ตัวโดรนการเกษตรก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เช่น ตัวโดรนมีราคาที่สูงมาก ไม่เหมาะแก่การลงทุนในรายบุคคล ผู้ขับต้องมีความชำนาญในการบังคับ มีระบบการทำงานที่ซับซ้อน แบตเตอรี่ที่มีราคาแพงและความจุที่จำกัด และต้องมีแบตเตอรี่สำรองเพื่อสลับเปลี่ยนใช้และชาร์จในที่

ซึ่งจากข้อกำหนดดังกล่าวผู้วิจัยได้เลือกที่จะศึกษาและออกแบบในส่วนของแบตเตอรี่ เพื่อที่จะยืดเวลาในการบินของโดรนไปอีกซึ่งแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ OK Cell Lithium-Polymer ซึ่งเป็นแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ประกอบไปด้วย Battery Management System (BMS) ที่มีหน้าที่ในการจัดการและจับตาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อป้องกันตัวโดรนและตัวแบตเตอรี่จากการใช้งานและการชาร์จ และแบตเตอรี่ Pouch cell Lithium-Polymer ต่อนุกรม 14 เซลล์ เป็นระบบ 48 โวลต์ และมีความจุอยู่ที่ 28 Ah

วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อออกแบบการต่อแบตเตอรี่ลิเธียม โไอออนให้ได้แรงดันและความจุตามที่โดรนต้องการ
2. เพื่อออกแบบบรรจุภัณฑ์ของแบตเตอรี่ให้สามารถเดินสายไฟต่อเข้าระหว่าง Battery Management System และแบตเตอรี่ได้
3. เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการบินของโดรน

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

1. โดรนที่ทำการศึกษาคือ โดรนการเกษตร SB1 รุ่น ขนาด 20 ลิตร ที่ทดลองบินภายในมหาวิทยาลัย
2. ภาระโหลดของโดรนมากที่สุดอยู่ที่ 40.2 กิโลกรัม (น้ำหนักโดรน 20.2 กิโลกรัม และบรรทุกน้ำเปล่า 20 กิโลกรัม) และน้อยสุดที่ 20.2 กิโลกรัม
3. ทดลองบินโดยให้โดรนอยู่ในสถานะ Hovering & Spray และ Moving & Spray
4. โดรนสามารถบินได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ปัจจุบัน
5. ใช้วิธีการทดลองระหว่างภาระโหลดกับกำลังทางไฟฟ้าของโดรนเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและแบบจำลองทางไฟฟ้าของโดรนเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการออกแบบแบตเตอรี่
2. ทำการทดลองเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างภาระโหลดและกำลังไฟฟ้าที่โดรนต้องการเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ
3. ศึกษาการทำงานของแบตเตอรี่และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการบินของโดรนเพื่อเลือกชนิดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม
4. ออกแบบการต่อแบตเตอรี่เข้าด้วยกันเพื่อให้มีแรงดันเพียงพอต่อโดรนและความจุตามที่ต้องการโดยขึ้นอยู่กับระยะเวลาการบิน
5. ศึกษาประเภทและการทำงานของ Battery Management System เพื่อเลือกชนิดที่เหมาะสมกับโดรนและแบตเตอรี่
6. กำหนดสเปคของ Battery Management System
7. ออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อประกอบแบตเตอรี่และ Battery Management System เข้าด้วยกัน
8. ขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ด้วย 3D Printer และ Laser cut machine
9. ออกแบบการทดลองเพื่อเก็บผลจากแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้น
10. วิเคราะห์และสรุปผล
11. จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

1.4 สถานที่ทำการวิจัย

อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

1. Python programming language เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ระหว่างแบตเตอรี่และโดรน
2. C++ programming language เพื่อใช้ในการควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino MEGA 2560) สำหรับเก็บข้อมูลค่าแรงดันและกระแสที่ถูกดึงออกจากแบตเตอรี่
3. MATLAB เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. Solid work 2021 เพื่อใช้ในการออกแบบกล่องบรรจุแบตเตอรี่และ BMS
5. 3D printer สำหรับขึ้นรูปชิ้นงาน
6. Laser cut สำหรับตัดแผ่นอะคริลิกเพื่อประกอบเป็นชิ้นงาน
7. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ Battery pack ที่มีระบบแรงดัน 48 โวลต์ และมีความจุเพิ่มขึ้นทำให้โดรนสามารถบินได้นานขึ้น
2. ได้บรรจุภัณฑ์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับของเดิม
3. ได้องค์ความรู้ในด้านการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรนเพื่อใช้ในการออกแบบการต่อกันของแบตเตอรี่
4. ได้องค์ความรู้ในด้านของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาการบินของโดรนในแบตเตอรี่แต่ละชนิดว่าชนิดไหนเหมาะสมกับโดรน
5. ได้องค์ความรู้ในด้านของ Battery Management System ว่าแบบไหนเหมาะสมกับโดรน
6. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปปรับใช้กับการออกแบบแบตเตอรี่สำหรับภาระโหลดทางไฟฟ้าชนิดอื่นๆได้

1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัย วิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโดรน แบตเตอรี่และ Battery management system ที่ประกอบไปด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณ และประเภทต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ และ Battery management system

บทที่ 3 กล่าวถึงการตรวจสอบและการออกแบบแบตเตอรี่ให้มีระบบแรงดัน 48V

บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัยและการอภิปรายผล การทดสอบเพื่อหาลักษณะเฉพาะตัวของแบตเตอรี่และใบพัด และการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาในการบินของแบตเตอรี่เท่ากับแบตเตอรี่ใหม่

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. โค้ดโปรแกรมสำหรับการคำนวณระยะเวลาการบินด้วย MATLAB

ภาคผนวก ข. การออกแบบการบรรจุภัณฑ์สำหรับแบตเตอรี่

ภาคผนวก ค. การขึ้นรูปชิ้นงานและการแพ็คแบตเตอรี่

ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

อากาศยานไร้คนขับหรือโดรนเป็นยานพาหนะชนิดหนึ่งที่อาศัยพลังงานจากแบตเตอรี่ที่จะนำพลังงานไปขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ และแบตเตอรี่จัดเป็น Electrochemical ที่จะเปลี่ยนแปลงพลังงานจากเคมีไปสู่พลังงานทางไฟฟ้า ในบทความนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับ แบตเตอรี่ และ Battery management system เป็นต้น

2.2 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

อากาศยานไร้คนขับหรือโดรนเป็นอากาศยานซึ่งไม่มีผู้ขับ ไม่มีลูกเรือหรือผู้โดยสารอยู่บนเครื่อง โดรนสามารถบินภายใต้การควบคุมของมนุษย์ผ่านรีโมตคอนโทรลในกรณีที่ต้องการควบคุมอากาศยานแบบระยะไกล (remotely-piloted aircraft: RPA) หรือบินในแบบที่ไม่ต้องควบคุมในแบบ Autopilot

อากาศยานไร้คนขับได้ถูกพัฒนาในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 20 โดยจุดประสงค์หลัก ๆ คือใช้ในภารกิจทางทหาร ซึ่งในปัจจุบันโดรนได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายนอกเหนือจากภารกิจทางทหารเช่น การถ่ายภาพทางอากาศ การขนส่งสินค้า การเกษตร หรือการแข่งขัน

2.2.1 ส่วนประกอบของโดรน

2.2.1.1 Flight Controller เป็นแผงวงจรทางไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยเซ็นเซอร์หลาย ๆ ชนิด หน้าที่หลัก ๆ คือควบคุมให้ระบบมีความมั่นคงและควบคุมตำแหน่งของโดรน ไฟท์คอนโทรลถูกมองว่าเป็นสมองของโดรนที่รับและจัดการข้อมูลจากเซ็นเซอร์ คำสั่งจากนักบินโดรนหรืออื่น ๆ โดยปกติแล้วจะมีเซ็นเซอร์หลัก ๆ คือ Gyroscopes, Accelerometers)

2.2.1.2 BLDC motor ถูกพัฒนาเพื่อแก้ไขข้อเสียของ DC motor และตัวมันมีประสิทธิภาพ ราคาเข้าถึงได้และปฏิบัติงานในช่วงที่ความเร็วรอบสูงได้การทำงานของ BLDC motor จะอ้างอิงจากแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กถาวรกับสนามแม่เหล็กทางไฟฟ้า ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเฟสเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของสนามแม่เหล็กถาวรเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์

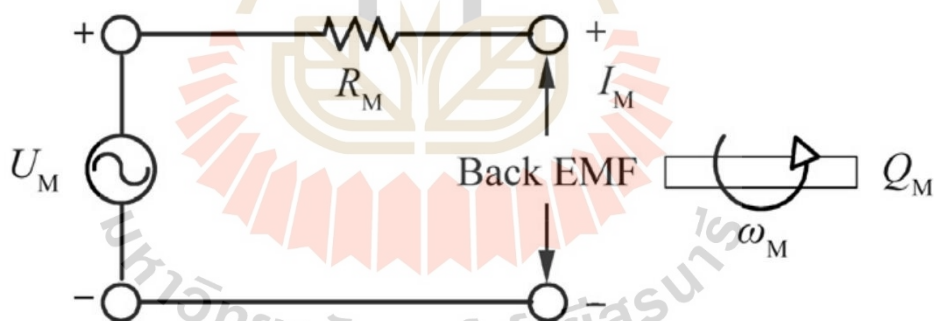
2.2.1.3 ESC เปรียบเสมือนมอเตอร์ไดร์เวอร์สำหรับ BLDC motor ที่ได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ซึ่งหลักการควบคุมความเร็วคือใช้ทรานซิสเตอร์ควบคุมมอเตอร์ด้วยสัญญาณ PWM หรือ PPM (pulse position modulation)

2.2.1.4 Propeller ใบพัดเป็นส่วนหนึ่งในระบบขับเคลื่อนที่สำคัญของโดรน เมื่อมอเตอร์หมุนใบพัด ใบพัดจะผลิตแรงยก รูปร่างใบพัดและความเร็วรอบมอเตอร์จะส่งผลต่อแรงยกที่จะผลิตได้

2.2.1.5 Battery เป็น power supply ให้กับระบบมีหน้าที่หลัก ๆ ในการจ่ายไฟให้กับส่วนต่าง ๆ ของโดรน

2.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรน

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรนจะเริ่มจากการหาแบบจำลองของ BLDC motor เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการกับแรงยกที่ใบพัดจะต้องสร้าง เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าแล้ว จะ Peukert's Law อธิบายการลดลงของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ทำให้สามารถคำนวณหาระยะเวลาที่โดรนจะสามารถบินได้ โดยรูปที่ 2.1 เป็นการต่อวงจรภายใน BLDC motor ซึ่งสมการที่ 2.1 จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแสและความเร็วเชิงมุม



รูปที่ 2.1 Wiring inside BLDC motor[6]

$$U_M = K_V \omega_M - I_M R_M \quad (2.1)$$

โดย	U_M	คือ	แรงดันที่ถูกควบคุมด้วย ESC
	R_M	คือ	ค่าความต้านทานภายใน
	ω_M	คือ	ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์
	I_M	คือ	กระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์

K_v คือ motor back EMF constant

และสมการที่ 2.2 และ 2.3 จะอธิบายถึงแรงยกของใบพัดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุมจากมอเตอร์

$$K_2 = C_T \rho D_p^4 \quad (2.2)$$

โดย K_2 คือ ค่าคงที่
 C_T คือ สัมประสิทธิ์แรงยกของใบพัด
 ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ
 D_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Rotor

$$T_p = K_2 \omega_m^2 \quad (2.3)$$

โดย T_p คือ แรงยกของใบพัด

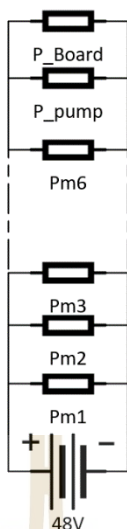
และนำสมการที่ 3 แทนค่าในสมการที่ 1 จึงจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและกำลังไฟฟ้า
 ได้ดังสมการที่ 2.4

$$P_M = U_M \left[\frac{T_p K_v + U_M K_2}{R_M K_2} \right] \quad (2.4)$$

โดย P_m คือ กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการ

ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่คิด เป็นกำลังไฟฟ้าแต่ละตัวของมอเตอร์โดยไดรอน SB1 จะมีทั้งหมด 6 มอเตอร์ แรงยกที่มอเตอร์จะต้องสร้างแต่ละตัวจะคิดจากน้ำหนักทั้งหมดของไดรอนหารด้วย 6 ในกรณีการบินแบบ Hovering การต่อวงจรของมอเตอร์แต่ละตัวจะต่อวงจรดังรูปที่ 2.2 โดยกำลังไฟฟ้าของ Flight controller และปั๊มจะเป็นไปตามที่ผู้ผลิตกำหนดและการคิดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดจะคิดตามสมการที่ 2.5

$$P_{Total} = 6P_M + P_{pump} + P_{Board} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.2 Electrical power of drone

โดย	P_{total}	คือ	กำลังไฟฟ้าทั้งหมด
	P_m	คือ	กำลังไฟฟ้าของ BLDC motor ที่ ESC อนุญาต
	P_{pump}	คือ	กำลังไฟฟ้าของปั้มน้ำ
	P_{board}	คือ	กำลังไฟฟ้าของ Flight controller

เมื่อได้กำลังไฟฟ้าทั้งหมดแล้ว จะนำค่าที่ได้ไปคำนวณประเมินระยะเวลากับ Peukert's law โดยสมการที่ 2.6 เป็นสมการที่สามารถอธิบายการลดลงของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ได้

$$V(t) = V_0 - K_1[C_0 - C(t)] \quad (2.6)$$

โดย	$V(t)$	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงตามระยะเวลา
	V_0	คือ	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดตอนเริ่มต้น
	K_1	คือ	Voltage drop coefficient
	C_0	คือ	ความจุของแบตเตอรี่เริ่มต้น
	$C(t)$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ที่ลดลงตามระยะเวลา

ตั้งแต่สมการที่ 2.7 จนถึง สมการที่ 2.10 จะเป็นการหาค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ก่อนที่จะคิดเป็นรอบ ๆ จนกว่าแรงดันของแบตเตอรี่จะต่ำเกินกว่าจะใช้งานได้โดย Voltage drop coefficient สามารถหาได้จากสมการที่ 2.7 กระแสเริ่มต้นจะคิดได้จากสมการที่ 2.8 แรงดันเริ่มต้นจะคิดได้จากสมการที่ 2.9

และความจุเริ่มต้นจะคิดได้จากสมการที่ 10 ซึ่งค่า Peukert's constant จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.5 ตามแต่ละชนิดของแบตเตอรี่โดยได้จากการทดลอง

$$K_1 = \frac{4.2 - 3.7}{DoD \times C_0 \times n_c} \quad (2.7)$$

$$I_0 = \frac{P_e}{V_0} \quad (2.8)$$

$$V_0 = 4.2 \times n_c \quad (2.9)$$

$$C_0 = I_0^{1-n} R_t^{1-n} C^n \quad (2.10)$$

โดย	DoD	คือ	Depth of discharge
	nc	คือ	จำนวนการต่ออนุกรมของแบตเตอรี่
	I0	คือ	กระแสเริ่มต้น
	Pe	คือ	กำลังไฟรวมของโตรน
	Rt	คือ	Battery hour rating
	n	คือ	Peukert's constant
	C	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ตามผู้ผลิตระบุ

ในการคิดประเมินระยะเวลาการบิน จะหาการลดลงของแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่โตรนต้องการ โดยจะต้องหาแรงดันและความจุในรอบถัดไปเมื่อแรงดันลดลงจนต่ำกว่าแรงดันที่กำหนด จะถือว่าโตรนควรจะนำเครื่องลงได้แล้ว โดยคำนวณเวลาได้จากการนับจำนวนครั้งที่ลดลงคูณกับ Time stamp ดังสมการที่ 2.11 ถึง 2.13

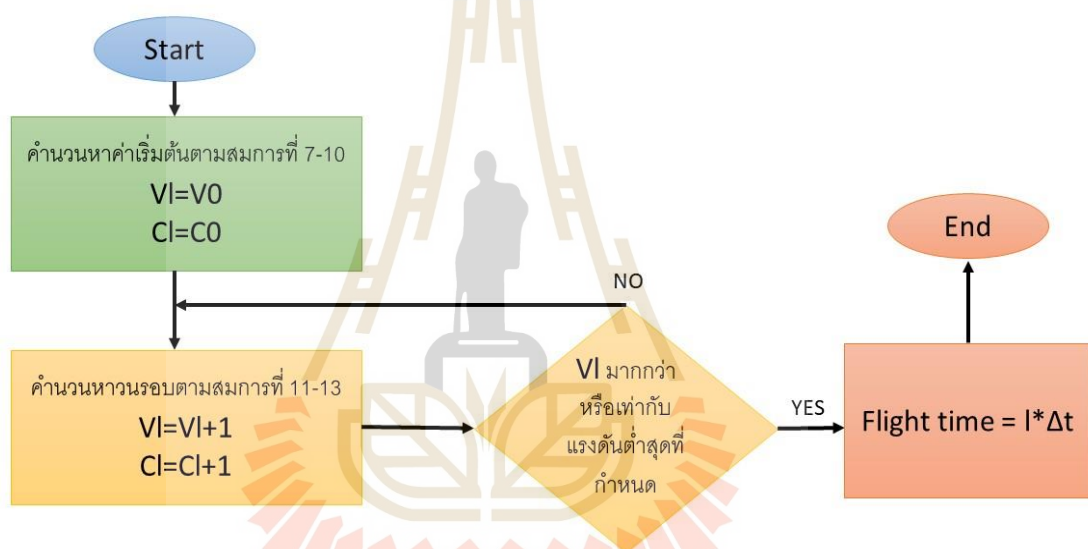
$$V_{l+1} = V_l - K_1 [C_0 - C_l] \quad (2.11)$$

$$I_{l+1} = \frac{P_e}{V_{l+1}} \quad (2.12)$$

$$C_{l+1} = I_{l+1}^{1-n} R_t^{1-n} C^n - \sum_{m=1}^{l+1} I_m \Delta t \quad (2.13)$$

โดย Cl	คือ	ความจुरอบปัจจุบัน
Vl+1	คือ	แรงดันรอบถัดไป
Vl	คือ	แรงดันรอบปัจจุบัน
Il+1	คือ	กระแสรอบถัดไป
Cl+1	คือ	รอบจुरอบถัดไป
Im	คือ	กระแสสะสม
Δt	คือ	Time stamp

Flow chart การคำนวณจะแสดงดังรูปที่ 2.3



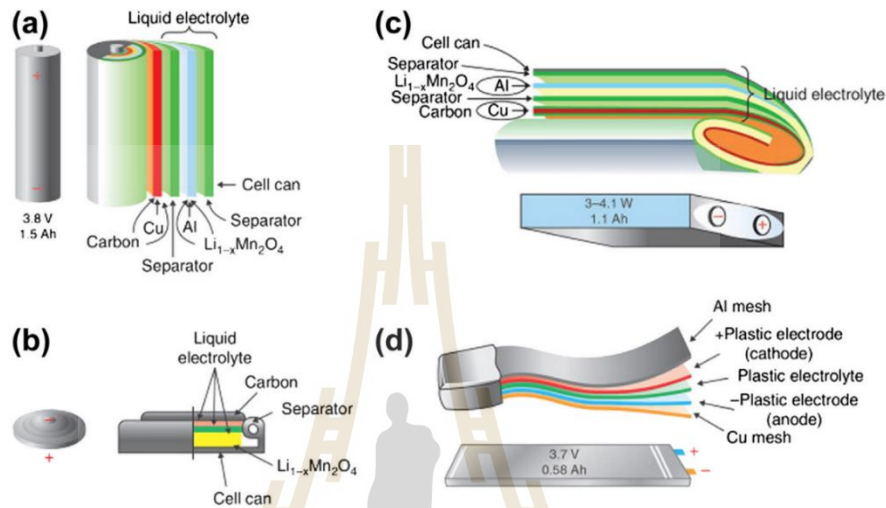
รูปที่ 2.3 Flowchart of flight time calculation

2.3 Battery

2.3.1 แบตเตอรี่ Lithium-ion และเซลล์ชนิดอื่น ๆ

การจัดประเภทแบตเตอรี่โดยปกติจะจัดได้ 2 รูปแบบคือ Primary หรือ Secondary ความแตกต่างระหว่างสองรูปแบบนี้ คือ Primary Battery จะเป็นแบตเตอรี่ประเภทใช้งานได้แค่ครั้งเดียวเมื่อคายประจุจนหมดแล้วจะไม่สามารถอัดประจุใหม่ได้ตัวอย่างของแบตเตอรี่ประเภทนี้ คือ

Alkaline battery ส่วน Secondary battery คือ แบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุซ้ำได้ (Rechargeable Battery) เมื่อใช้งานจนหมดแล้ว รูปแบบการชาร์จก็จะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่บรรจุอยู่ด้านใน โดยส่วนใหญ่แล้วจะสามารถนำกลับมาอัดประจุใหม่ได้เป็นร้อยรอบหรือเซลล์บางชนิดสามารถอัดประจุได้ถึงพันรอบ



รูปที่ 2.4 Enclosure[1]

ส่วนประกอบหลัก ๆ ของแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วย 5 ส่วน คือ Cathode Anode Separator Enclosure และ Electrolyte ดังรูปที่ 2.4 โดย Cathode คือครึ่งหนึ่งของแบตเตอรี่ที่เป็นขั้วบวก โดยจะถูกสร้างด้วยพื้นผิวที่เคลือบด้วย Activate material ใน Li-ion พื้นผิวจะถูกเคลือบด้วยอลูมิเนียมฟิล์มที่บางมาก ส่วน Anode คืออีกครึ่งหนึ่งของแบตเตอรี่ที่เป็นขั้วลบ โดยส่วนใหญ่จะถูกสร้างด้วยพื้นผิวของทองแดงและเคลือบด้วย Activate material และสิ่งที่คั่นกลางระหว่างขั้วบวกและขั้วลบคือ Separator เพื่อป้องกันการลัดวงจรภายในแบตเตอรี่ Enclosure คือรูปทรงหรือการบรรจุสารต่าง ๆ ภายในแบตเตอรี่โดยส่วนใหญ่จะมี 4 รูปแบบคือ Cylindrical Cell (a), Button Cell (b), Prismatic Cell (c) และ Pouch Cell (d) ดังรูปที่ 5 ความแตกต่างระหว่างทั้ง 4 รูปแบบ คือ ปริมาณสารภายในที่บรรจุจึงส่งผลให้ความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แตกต่างกัน ทำให้ระยะเวลาในการทำงานและราคาแตกต่างกันด้วย และ Electrolyte คือ สารตัวกลางที่อนุญาตให้อิออนเคลื่อนที่ระหว่าง Anode และ Cathode ได้ และความหมายของแบตเตอรี่คือ Electrochemical ซึ่งหมายความว่า การเก็บพลังงานเพื่อการใช้งานโดยการแปลงพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีไปสู่พลังงานไฟฟ้า ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างขั้ว Cathode และ Anode ภายในแบตเตอรี่จะทำให้เกิดการไหลของอิออน

ผ่านสารละลาย Electrolyte ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถนำไปจ่ายให้กับโหลดได้ และตารางเปรียบเทียบลักษณะต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ที่ไม่ใช่ Li-ion จะแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Non Lithium-based chemistries [1]

	Lead Acid	Nickel Cadmium	Nickel Metal Hydride	Sodium Sulfur	Sodium Nickel Chloride
Chemistry descriptor	PbA/LAB	NiCd	NiMh	NaS	NaNiCl
Specific energy (Wh/kg)	30-40	40-60	30-80	90-110	100-120
Energy density (Wh/L)	60-70	50-150	140-300	345	160-190
Specific power (W/kg)	60-180	150	250-1000	150-160	150
Power density (W/L)	100	210	400	-	-
Nominal voltage (per cell) (V)	2	1.2	1.2	2	2.6
Cycle life	300-800	1000-2000	50-1500	1000-2500	1000
Self-discharge (% per month)	3-5%	20%	30%	0%	0%
Operating temperature range(°C)	-20 to +60	-40 to +60	-20 to +60	300 to 400	300 to 400
Cost (per kWh)	\$150-\$200	\$400-\$800	\$200-\$300	\$350	\$100-\$300
Maintenance	3-6 months	30-60 days	60-90 days	None	None

2.3.1.2 Lead acid battery

แบตเตอรี่ชนิด Lead acid คือแบตเตอรี่ที่เก่าแก่และมีการใช้งานมากที่สุดที่รู้จักกันในชื่อภาษาไทยว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีการจ่ายพลังงานที่ดีแต่ข้อเสียคือสามารถชาร์จซ้ำได้น้อยโดยอยู่ที่ประมาณ 300 ถึง 500 รอบ และปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วบวกและขั้วลบจะทำให้เกิดไอของกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ โดยปัจจุบันแบตเตอรี่ตะกั่วกรดถูกใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์และรถจักรยานยนต์

2.3.1.3 Nickel Metal-Based Chemistries

แบตเตอรี่ชนิดนี้ได้รับความสนใจในช่วงปี 1990 ที่ประกอบไปด้วย NiMH และ NiCd เพราะทั้งนี้มีความจุต่อปริมาตรที่สูงจึงทำให้สามารถนำมาปรับใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กได้ โดยแบตเตอรี่ Nickel Metal-Based จะมีความจุ แรงดันไฟฟ้า และจำนวนรอบในการชาร์จซ้ำที่สูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือสามารถเกิด Memory effect ได้ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะทำให้ความจุของแบตเตอรี่ Nickel Metal-Based ลดลง โดยสาเหตุที่เกิดคือการใช้งานที่ผิดช่วงการใช้แรงดันของแบตเตอรี่เช่นการคายประจุแบตเตอรี่ไปได้ครึ่งหนึ่งของช่วงแรงดัน (Nominal voltage) และนำกลับไปอัดประจุจนแรงดันถึง Maximum voltage เมื่อทำการอัดประจุและคายประจุแบบนี้ซ้ำๆ ไปเรื่อยๆ จะทำให้ตัวแบตเตอรี่ไปจำ Nominal voltage เป็น Cut-off voltage แทน และข้อเสียอีกอย่างหนึ่งคือ แบตเตอรี่ประเภทนี้มีอัตราการเกิด Self-discharge ที่สูงมากดังตารางที่ 2 ซึ่งแบตเตอรี่ประเภทนี้ส่วนใหญ่ที่ใช้ NiCd และ NiMH ซึ่งข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไปคือ NiCd จะมี C-rate ที่สูงกว่า NiMH แต่สารเคมีที่บรรจุคือสารแคดเมียมซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่ NiMH ไม่มีทำให้ปลอดภัยต่อการใช้งานกว่า

ตารางที่ 2.2 Nickel Metal-Based Chemistries [1]

	Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Zinc	Nickel Hydrogen
Chemistry descriptor	NiMH	NiCd	NiZn	NiH ₂
Specific energy (Wh/kg)	30-80	40-60	70-110	50-65

ตารางที่ 2.2 Nickel Metal-Based Chemistries (ต่อ)

	Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Zinc	Nickel Hydrogen
Energy density (Wh/L)	140-300	50-150	130-350	55-110
Specific power (W/kg)	250-1000	150	280-2500	-
Power density (W/L)	400	210	420-7000	-
Nominal voltage (per cell) (V)	1.2	1.2	1.6	1.4
Cycle life	50-1500	1000-2000	300-900	>2000
Self-discharge (% per month)	30%	20%	20%	-
Operating temperature range(°C)	-20 to +60	-40 to +60	-20 to +50	-
Applications	Automotive hybrid electric vehicle (HEV)	Consumer electronics, power tools, light rail and train, uninterruptible power supplies, emergency lighting, telecom	Power tools, lawn and garden tools, light electric vehicles, HEVs	Satellite applications: Low earth orbit and geosynchronous earth orbit

2.3.1.4 Sodium-Based Chemistries

เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิสูง โดยสารละลายภายใน คือเกลือโซเดียมที่อยู่ในรูปของเหลวซึ่งถูกคิดค้นโดยทีมวิจัยในแอฟริกาใต้และถูกเรียกว่า Zeolite Battery Research Africa Project (ZEBRA)

ช่วงการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือที่อุณหภูมิ 350 ถึง 700 องศาเซลเซียส เพื่อที่จะทำให้เกลือโซเดียมอยู่สถานะของเหลวจึงทำให้ไอออนระหว่างขั้วบวกและขั้วลบสามารถเคลื่อนที่ได้

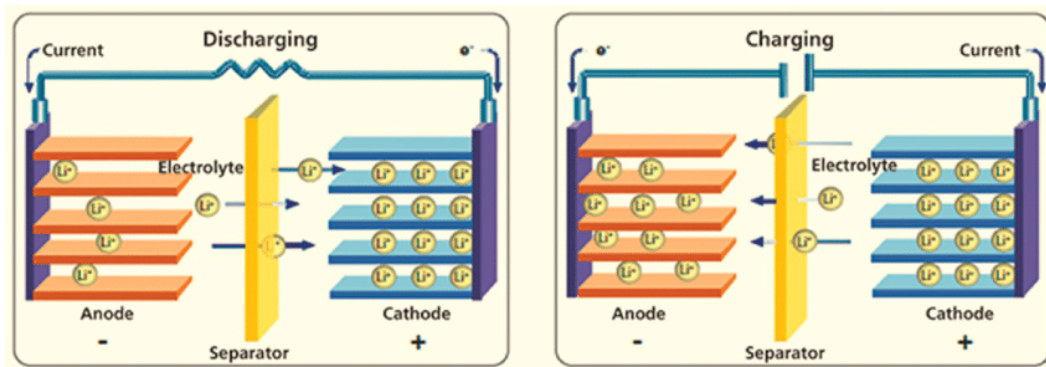
2.3.1.5 Lithium-ion cells

ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ. 1990 โดย ดร. John Goodenough จากมหาวิทยาลัยเท็กซัส และในต้นปี ค.ศ. 2000 ยอดการขายของ Li-ion ก็เพิ่มขึ้นสูงเป็นอย่างมากเนื่องจากความจุและแรงดันไฟฟ้าที่มากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นในท้องตลาด

หลักการทำงานเหมือนกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นคือการไหลของลิเทียมไอออนผ่านสารละลายจากขั้ว Anode ไปที่ขั้ว Cathode จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าการทำงานแบบนี้จะถูกเรียกว่าการคายประจุแต่การอัดประจุจะเกิดการแลกเปลี่ยนลิเทียมไอออนที่ตรงข้ามกัน ดังรูปที่ 2.5

ข้อดีของ Li-ion ที่เหนือกว่าแบตเตอรี่ก่อนหน้าคือ มีแรงดันที่มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น โดย Nominal voltage จะอยู่ระหว่าง 3.2 ถึง 3.8 โวลต์ ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่บรรจุอยู่ภายในขั้ว Cathode ถึงหมายความว่าจำนวนการต่ออนุกรมของแบตเตอรี่จะใช้จำนวนน้อยลงเช่น NiMh ที่ Nominal voltage 1.2 โวลต์ เมื่อใช้งานกับโหลดที่ต้องการแรงดัน 120 โวลต์ จะต้องต่ออนุกรมถึง 100 ก้อน แต่ถ้าใช้ Li-ion ที่มี Nominal voltage 3.7 โวลต์ แทน จะต่ออนุกรมแค่ประมาณ 32 ก้อน

นอกจากแรงดันและความจุไฟฟ้าที่มากแล้ว อีกหนึ่งข้อดีของ Li-ion คือไม่มี Memory effect และมีอัตรา Self-discharge ที่ต่ำโดยจะอยู่ที่ 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ต่อเดือน และแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถนำกลับมาอัดประจุใหม่ได้ถึงพันรอบ โดยตารางที่ 3 คือตารางสรุปการเปรียบเทียบระหว่างความแตกต่างของสารเคมีที่บรรจุอยู่ในขั้ว Cathode



รูปที่ 2.5 How Li-ion work
(แหล่งที่มา: <https://www.researchgate.net>)

ตารางที่ 2.3 Lithium-ion chemistries [1]

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Energy density (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Specific power (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Nominal voltage (per cell) (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7

ตารางที่ 2.3 Lithium-ion chemistries (ต่อ)

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cycle life	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%
Cost (per kWh)	\$400-\$1200	\$400-\$900	\$600-\$2000	\$250-\$450	\$600-\$1000	\$500-\$900
Operating temperature range(°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

1) Cathode Chemistries

Li-ion เป็นชื่อเรียกรวมๆซึ่งโดยปกติจะแบ่งได้หลากหลายชนิดมากขึ้นอยู่กับสารเคมีที่บรรจุอยู่ในขั้ว Cathode และจะมีชื่อย่อตามมาเช่น lithium iron phosphate (LFP), lithium nickel manganese cobalt (NMC), lithium nickel cobalt aluminum (NCA), lithium titanate (LTO), lithium manganese oxide (LMO) และ lithium cobalt oxide (LCO)

LFP เป็นหนึ่งในสารเคมีที่นิยมใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเพราะว่ามี Power capability และ C-rate ที่สูง ราคาไม่แพงและปลอดภัยกว่าชนิดอื่นแต่มีข้อเสียคือ มี Energy density น้อยและ Nominal voltage อยู่ที่ 3.2 ถึง 3.3 โวลต์

NMC จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพราะว่ามี Energy density ถึง 140-180 Wh/kg โดยบางผู้ผลิตสามารถทำได้ถึง 200 Wh/kg และยังมี Nominal voltage อยู่ที่ 3.6 ถึง 3.7 โวลต์

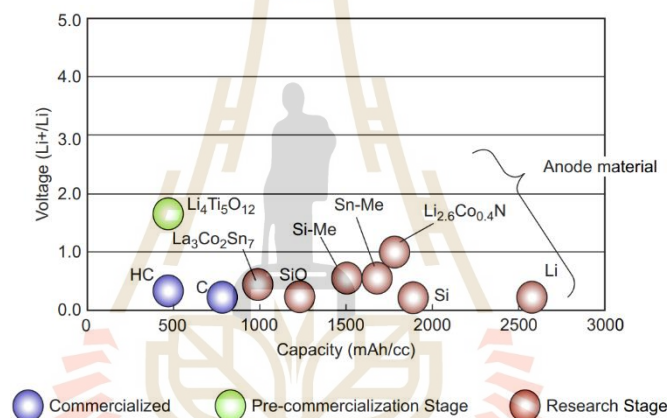
LCO เป็นนิยมอย่างแพร่หลายมากในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา มี Energy density สูงและสามารถอัดประจุซ้ำได้หลายรอบ แต่ข้อเสียคืออุณหภูมิที่จะถึงปรากฏการณ์ Thermal runaway น้อยกว่าสารเคมีชนิดอื่น ๆ โดยอยู่ที่ 130 องศาเซลเซียส เป็นปรากฏการณ์ที่เมื่อแบตเตอรี่มีอุณหภูมิถึงค่านี้แล้ว จะเกิดการลุกไหม้และไม่สามารถหยุดได้ สิ่งที่เราควรทำการนำแบตเตอรี่ไปในพื้นที่กว้าง ๆ และกันไม่ให้ไฟลามไปที่วัสดุอื่น ๆ LCO จึงเหมาะกับอุปกรณ์ที่มีการกินกระแสไฟฟ้าที่ต่ำซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดความร้อน

NCA โดยปกติจะใช้ในอุปกรณ์พกพา แต่เริ่มมีการปรับใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าแล้ว แต่เนื่องจากมีราคาที่สูงเลยยังไม่เป็นที่นิยม

และ LMO มี C-rate และ Energy density สูงแต่ข้อเสียคือจำนวนรอบในการชาร์จช้าหน่อยเลยไม่มีการปรับใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า

2) Anode Materials

เป็นขั้วลบของแบตเตอรี่ซึ่งจะถูกสร้างด้วยส่วนผสมระหว่าง graphite หรือ carbons ซึ่งบางผู้ผลิตไม่ได้ใช้ส่วนผสมแต่ใช้เป็นชนิดเดียวเลย และยังมีขั้ว Anode อีกชนิดที่กำลังได้รับความสนใจคือ LTO ที่มีข้อดีคือสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำและมี Power density ที่สูงแต่ข้อเสียคือมี Nominal voltage อยู่ที่ 2.2 ถึง 2.3 โวลต์ และในปัจจุบันได้มีการวิจัยขั้ว Anode เกิดขึ้นมากมายแต่ยังไม่ได้ออกมาสู่ตลาดจริงซึ่งในอนาคตแบตเตอรี่มีความจุเพิ่มขึ้นมากดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Anode material performance comparison[1]

3) Separators

Separator เป็นวัสดุบาง ๆ ซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นเซรามิกหรือพลาสติก เพื่อที่จะแบ่งระหว่างขั้ว Anode และ Cathode โดยคุณสมบัติของ Separator จะต้องทนการกัดกร่อนของสารละลายได้ ในบางจะใช้ Separator หลายชั้นเช่น PP หรือ PE พลาสติก และในบางเซลล์จะใช้แบบ Tri-layer คือ PP/PE/PP และในบางเซลล์จะใช้เซรามิกเป็น Separator ซึ่งจะทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าพลาสติก

4) Electrolytes

โดยปกติสารละลายจะเป็นของเหลวหรือเจลที่ขั้ว Cathode หรือ Anode จะไหลขึ้นมาซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำที่อนุญาตให้ลิเทียมไอออนไหลผ่านระหว่างขั้วได้ โดยสารละลายจะเป็นส่วนผสมของ HC-based ที่ประกอบไปด้วยสารเติมแต่งหลายอย่างเช่น ethylene carbonate, dimethyl, diethyl และ ethylmethyl carbonates และ lithium salts (LiPF₆) ซึ่งอาจจะมีเพิ่มเติมนอกเหนือจากนี้เป็นความลับของผู้ผลิต

2.3.2 นิยามพื้นฐานของแบตเตอรี่

- 2.3.2.2 Capacity (Ah) เป็นปริมาณประจุทั้งหมดที่สามารถชาร์จหรือดิสชาร์จได้
- 2.3.2.3 C-rate คือ อัตราการอัดประจุหรือคายประจุใน 1 ชั่วโมง เช่น แบตเตอรี่ขนาด 3 Ah ดิสชาร์จที่ 1 C-rate หมายความว่าในหนึ่งชั่วโมงจะมีกระแสถูกปล่อยออกมา 3 A
- 2.3.2.4 Specific energy (Wh/kg) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่
- 2.3.2.5 Specific power (W/kg) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าต่อน้ำหนักของแบตเตอรี่
- 2.3.2.6 Energy density (Wh/l) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานต่อปริมาตรของแบตเตอรี่
- 2.3.2.7 Power density (W/l) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าต่อปริมาตรของแบตเตอรี่
- 2.3.2.8 Internal resistance คือ ค่าความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ค่านี้สามารถหาได้จากการทดลอง
- 2.3.2.9 Maximum voltage คือ แรงดันสูงสุดเมื่อแบตเตอรี่ถูกอัดประจุจนเต็ม
- 2.3.2.10 Nominal voltage คือ แรงดันปกติของแบตเตอรี่
- 2.3.2.11 Cut-off voltage คือ แรงดันต่ำสุดของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุต่ำกว่าแรงดันนี้ แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพ
- 2.3.2.12 Stage of charge (SOC) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประจุที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่
- 2.3.2.13 Stage of health (SOH) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงสุขภาพของแบตเตอรี่ซึ่งอ้างอิงได้หลายปัจจัย
- 2.3.2.14 State of deterioration (SOD) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสื่อมถอยของแบตเตอรี่

2.3.2.15 Depth of discharge (DOD) เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนการคายประจุออกจากแบตเตอรี่นับตั้งแต่อัดประจุจนเต็ม

2.3.2.16 Cycle life คือจำนวนรอบการอัดประจุ-คายประจุที่แบตเตอรี่สามารถทำได้

2.3.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างของสารเคมีแต่ละชนิดในแบตเตอรี่ Li-ion

ตารางที่ 2.4 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าจริงของแต่ละสารเคมี โดยเซลล์แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่จะต้องพิจารณาว่าเซลล์ประเภทไหนเหมาะสมกับโหนดของตนเอง

ตารางที่ 2.4 Comparison of Li-ion's chemical cathode

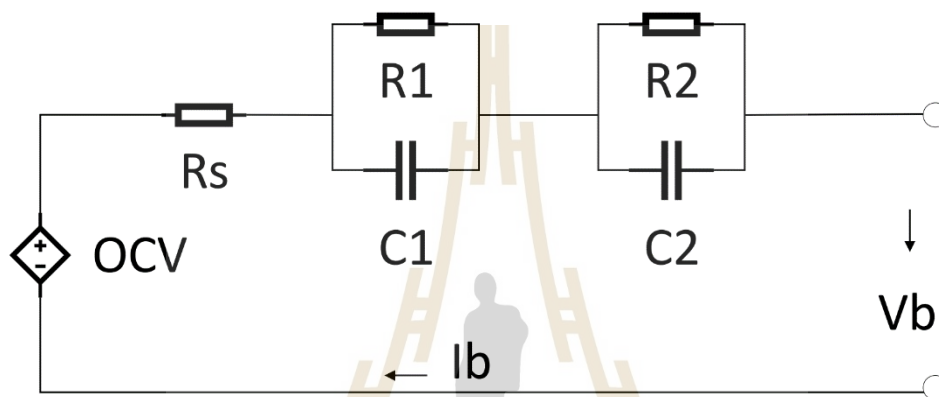
Comparison of Li-ion's chemical cathode									
Cathode	Cost (\$)	Specific energy (Wh/kg)	Specific power (W/kg)	High operating temp. (°C)	Low operating temp. (°C)	Nominal voltage (V)	Life span (Cycle)	Self-discharge (% per month)	Thermal runaway (°C)
LCO	350	135	600	60	-20	3.7	700	3	150
LMO	650	112.5	1000	60	-20	3.8	500	5	250
NMC	700	160	1750	55	-20	3.65	2500	1	210
LFP	800	105	1900	60	-20	3.25	1500	1	270
NCA	800	150	1700	60	-20	3.6	1000	6	150
LTO	1300	70	750	55	-40	2.25	4000	6	One of safest Li-ion batteries
Max	1300	160	1900	60	-40	3.8	4000	6	270

2.3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอ้างอิงวงจรทางไฟฟ้าจากรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วย OCV, Internal resistance (R_s), Terminal voltage (V_b) และ RC network อีกสองวงจร โดย Internal resistance จะตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อโหนดที่มีการดึงกระแสทำให้

แรงดันของแบตเตอรี่ลดลง และ OCV จะสัมพันธ์กับ SOC ซึ่งการหาสมการเพื่ออธิบายจะหาได้จาก การทดลอง Constant current discharge test

วงจร RC network คือวงจรที่ใช้อธิบายการเพิ่มขึ้นของแรงดัน V_b เมื่อทำการปลด โหลดออกจากแบตเตอรี่โดยวงจร $R1C1$ จะใช้อธิบายการใช้งานแบตเตอรี่ในระยะเวลาสั้น ๆ และ $R2C2$ ใช้อธิบายในระยะเวลาที่นานกว่า การจะหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะหาได้จากการทดลอง Current pulse discharge test



รูปที่ 2.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่[7]

2.3.4.2 SOC Calculation

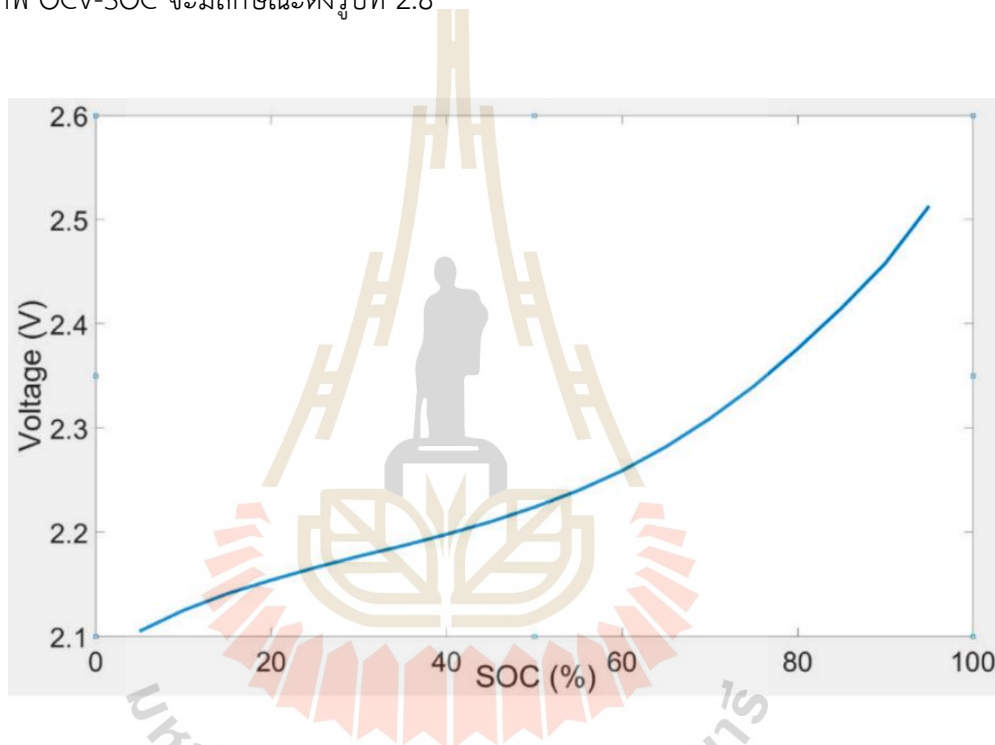
การคำนวณหา SOC จะคำนวณได้จาก Coulomb counting method คือ การนับจำนวนกระแสที่ถูกอัดประจุหรือคายประจุตั้งสมการที่โดยจะต้องทราบค่า SOC เริ่มต้นก่อน หรือก่อนการเริ่มการทดลองต่าง ๆ ควรอัดประจุแบตเตอรี่ให้เต็ม เมื่อเต็ม SOC จะมีค่าเท่ากับ 1

$$SOC = SOC_0 - \int_0^t \frac{I_b}{C_c} dt \quad (2.14)$$

โดย SOC_0 คือ SOC เริ่มต้น
 I_b คือ กระแสทั้งหมดที่ถูกดึงออกจากแบตเตอรี่
 C_c คือ ความจุสูงสุด

2.3.4.3 Open Circuit Voltage Calculation

การหาความสัมพันธ์ระหว่าง OCV และ SOC จะหาได้จากการทดลอง Constant current discharge test โดยจะต้องอัดประจุให้แบตเตอรี่เต็มก่อนเพราะที่สถานะอัดประจุจนเต็มจะทราบว่า SOC จะเท่ากับ 1 โดยจะนำไปคำนวณ SOC Calculation ต่อ โดยการทดลองจะทำการดิสชาร์จแบตเตอรี่ที่ 1/30C เมื่อดิสชาร์จที่ค่านี้อัตราการลดลงของ Terminal voltage ค่าระหว่าง Terminal voltage กับ OCV จะแตกต่างกันน้อยมากจนแทบไม่แตกต่างเลย เมื่อทราบ OCV แล้วก็จะทราบ SOC ณ ขณะนั้นได้จากสมการที่ 14 จะดิสชาร์จจนกระทั่ง SOC เข้าใกล้ 0 กราฟ OCV-SOC จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8

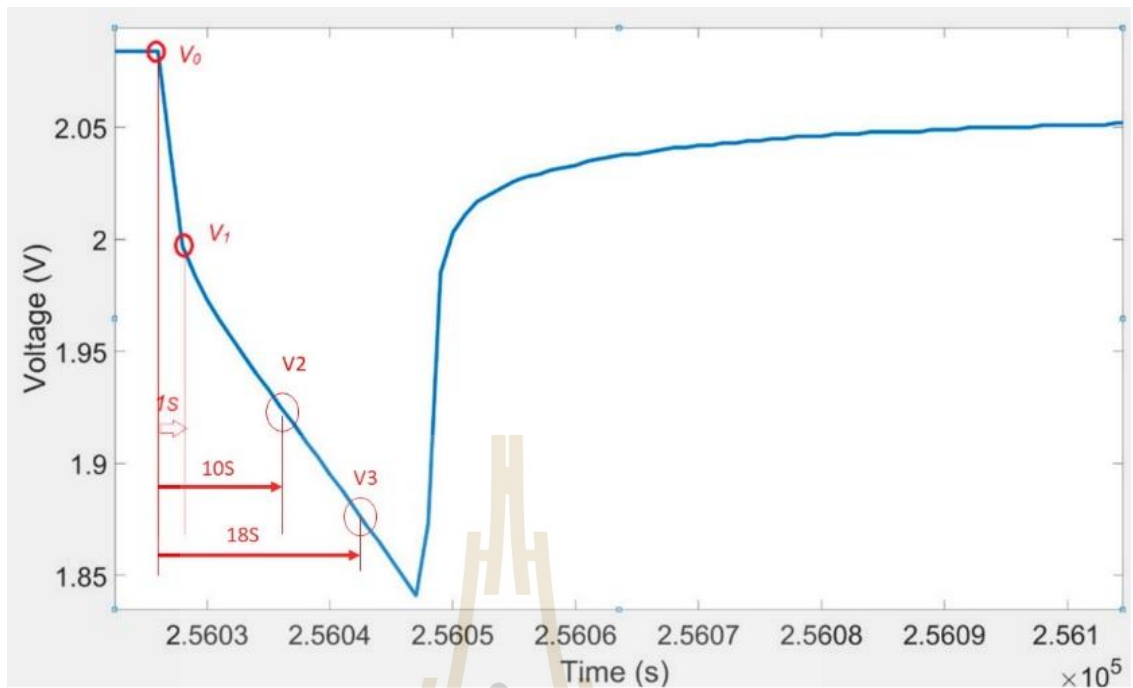


รูปที่ 2.8 OCV and SOC characteristic at 30 °C of LTO.[7]

2.3.4.4 Calculation of internal resistance and RC network

การคำนวณหาค่าความต้านทานต่าง ๆ จะคำนวณได้จากการทดลอง Current pulse discharge test ที่คายประจุกระแส (I) เป็นเวลามากกว่า 18 วินาที จะได้กราฟดังรูปที่ 2.9 โดยค่า R_s จะหาได้จากผลต่างระหว่างแรงดันในระยะเวลา 0 ถึง 1 วินาที ดังสมการที่ 2.15 R_1 จะหาได้จากผลต่างระหว่างแรงดันในระยะเวลา 1 ถึง 10 วินาที ดังสมการที่ 2.16 R_2 จะหาได้จากผลต่างระหว่างแรงดันในระยะเวลา 10 ถึง 18 วินาที ดังสมการที่ 2.17

$$R_s = \frac{V_0 - V_1}{I} \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.9 Current pulse discharge test[7]

$$R_1 = \frac{V_1 - V_2}{I} \quad (2.16)$$

$$R_2 = \frac{V_2 - V_3}{I} \quad (2.17)$$

การคำนวณหาตัวเก็บประจุจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 และการคำนวณหาแรงดันที่ตกคร่อม R_s และ RC network จะคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.20, 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ และ Terminal voltage (V_b) จะหาได้จากสมการที่ 2.23

$$C_1 = \frac{9I}{(V_2 - V_1) \ln(V_2/V_1)} \quad (2.18)$$

$$C_2 = \frac{8I}{(V_3 - V_2) \ln(V_3/V_2)} \quad (2.19)$$

$$V_{R_s} = I \times R_s \quad (2.20)$$

$$V_{RC1} = \left(\frac{1}{s}\right) \left[\left(\frac{1}{C_1}\right) \left(I - \frac{V_1}{R_1}\right)\right] \quad (2.21)$$

$$V_{RC2} = \left(\frac{1}{s}\right) \left[\left(\frac{1}{C_2}\right) \left(I - \frac{V_2}{R_2}\right)\right] \quad (2.22)$$

$$V_b = OCV - V_{RC1} - V_{RC2} - V_{R_s} \quad (2.23)$$

2.4 Battery Management System (BMS)

2.4.1 หน้าที่ของ BMS

2.4.1.1 คอย Monitoring ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ เช่น Cell voltage, Current, Temperature, SOC, SOH และแจ้งเตือนสถานะผิดปกติต่าง ๆ

2.4.1.2 ป้องกันการ Over-Charge (Over Voltage, Over Current) และ Over-Discharge (Under Voltage, Over Current) โดยการตัดวงจรไฟฟ้าด้วยสวิตช์หรือ Fuse

2.4.1.3 Balancing voltage แต่ละ Cell เพื่อป้องกันแบตเตอรี่เสื่อม

2.4.1.4 เก็บข้อมูลการอัดประจุและคายประจุ

2.4.1.5 สื่อสารกับโหลดเพื่อลดกำลังไฟฟ้าของโหลดเมื่อกระแสที่ไหลออกจากแบตเตอรี่ใกล้ถึงขอบเขตที่ตั้งค่าไว้

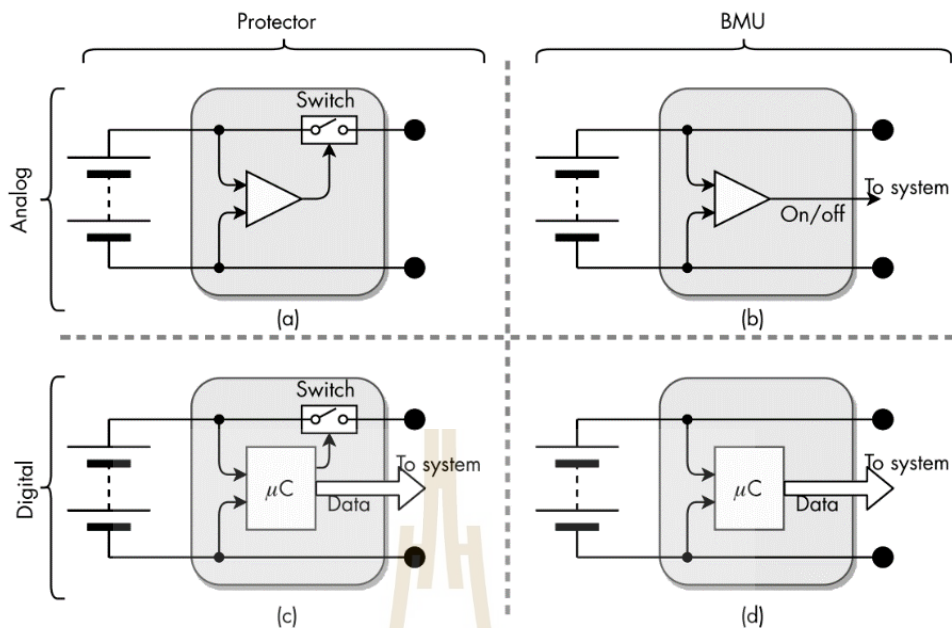
2.4.1.6 ควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่ให้ต่ำหรือสูงเกินไปด้วยระบบ Heating และระบบ Cooling

2.4.2 การจัดประเภทของ BMS

BMS สามารถจัดประเภทโดยยึดตาม 1) Technology 2) Topology 3) Format

2.4.2.1 BMS Technology

ในการจัดหมวดหมู่แบบเทคโนโลยีสามารถแบ่งออกเป็นอีก 2 ประเภท คือ 1) Analog BMS 2) Digital BMS 3) Power Switch และ 4) Battery management unit/Battery monitoring unit(BMU) ซึ่ง



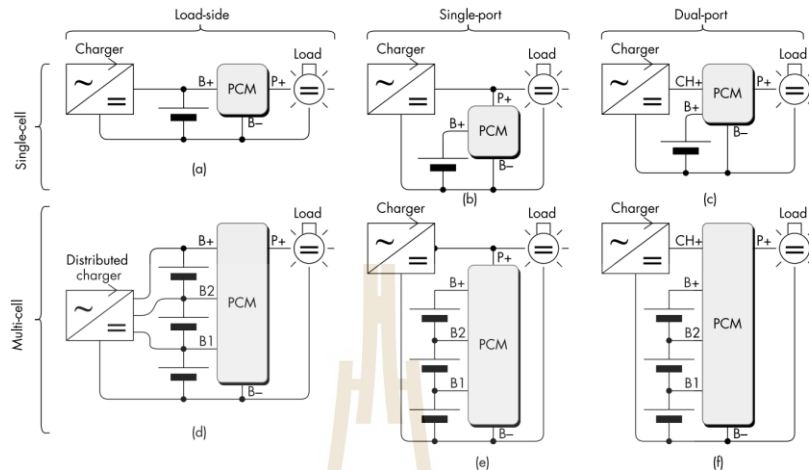
รูปที่ 2.10 การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วย Technology[3]

จะจับคู่กันดังรูปที่ 2.10 และโดยปกติแล้ว Analog BMS จะตรวจจับได้ว่าระบบตอนนี้เกิดสิ่งผิดปกติขึ้นแต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งและผลกระทบได้ แต่ Digital BMS สามารถทำได้ และความแตกต่างระหว่าง Power Switch และ BMU คือ Power Switch จะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงเพื่อตัดวงจรเมื่อเกิดเหตุการณ์ Over-Charge หรือ Over-Discharge แต่ BMU จะไปสั่งการในภาคของภาระโหลดเพื่อให้ลดกำลังไฟฟ้าแทน

1) Analog Protector BMS (PCM)

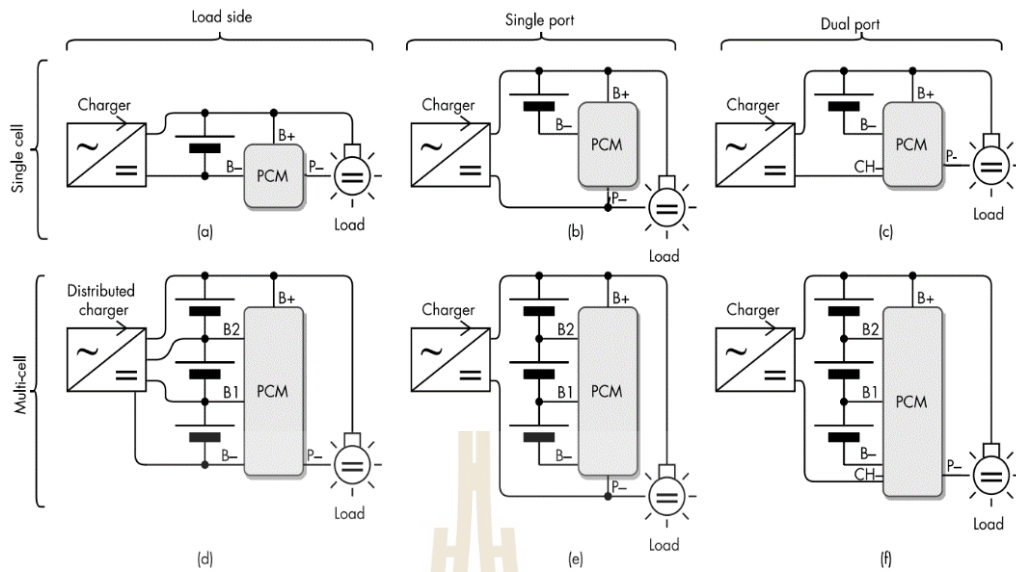
โมดูลการต่อวงจรของ BMS กับแบตเตอรี่โดยจะแบ่งการต่อออกเป็น 3 แบบ คือ 1) Load-side เป็นการต่อวงจรที่ PCM ต่อติดกับโหลดและแบตเตอรี่โดยตรง วงจรแบบ Load-side จะมีแค่ Power Switch เพียงฝั่ง Discharge ด้านเดียว ส่วนฝั่ง Charge เครื่อง Charger จะต่อตรงกับแบตเตอรี่ ซึ่งหมายความว่า Charger ที่นำมาชาร์จจะต้องไม่สามารถจ่ายกระแสเกินได้ เพราะไม่มีสวิตช์ป้องกัน 2) Single-port เป็นการต่อที่ปลอดภัยที่สุดและเป็นที่ยอมรับ คือ PCM จะต่อกับแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว และจะมีพอร์ตสำหรับ Charge และ Discharge เดียวกัน สามารถป้องกันได้ทั้ง Overcharge และ Over-discharge และ 3) Dual-port เป็นการต่อที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพราะ พอร์ต Charge และ Discharge แยกออกจากกันจึงทำให้สามารถใช้งานโหลดในขณะที่ชาร์จไปด้วยได้ แต่จะไม่สามารถป้องกันการ Discharge ผ่าน Charge port หรือ Charge ผ่าน

Discharge ได้ นอกจากนี้ยังมีการแบ่งอีก 2 แบบ คือ 1) Single-cell คือ PCM ที่ดูแลแค่เซลล์เดียว และ 2) Multicell คือ PCM ที่สามารถต่อได้หลายเซลล์ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยพอร์ต จำนวนเซลล์และ Switched Positive[3]

PCM Terminal Label ในการกำกับขาที่จะทำการต่อกับแบตเตอรี่ ส่วนใหญ่แล้วลาเบล B0 หรือ B- จะหมายถึงขั้วลบของแบตเตอรี่ ส่วนขั้วบวกจะเป็นหมายเลข B1 จนถึงจำนวนแบตเตอรี่ที่สามารถต่อได้(Bn) เช่น BMS รุ่นหนึ่งสามารถต่อแบตเตอรี่อนุกรมได้ทั้งหมด 3 เซลล์ ลาเบลที่ปรากฏจะมีตั้งแต่ B0 ถึง B3 การต่อ B1 ก็คือต่อที่ขั้วบวกเซลล์แรกและขั้วลบเซลล์ที่ 2 B2 คือขั้วบวกเซลล์ที่ 2 และขั้วลบเซลล์ที่ 3 และ B3 คือขั้วบวกเซลล์ที่ 3 เป็นลำดับสุดท้าย และการต่อยังแบ่งออกได้อีก 2 แบบคือ 1) Switched Positive และ 2) Switched Negative โดยวงจรแบบแรก PCM จะมีขา P+ เป็นขาที่ถูกควบคุมการเปิดปิดใช้งานด้วย Power Switch ที่คั่นระหว่าง Bn+ และ P+ กล่าวคือเมื่อต่อแบตเตอรี่จนครบแล้ว การจะใช้งานให้ต่อโหลดขั้วบวกที่ P+ และต่อโหลดขั้วลบที่ B0 ดังรูปที่ 2.11 ส่วนวงจรแบบที่สองจะตรงข้ามกันคือมีขา P- มาแทน การต่อใช้งานคือ ขั้วบวกของโหลดต่อกับ Bn+ และขั้วลบของโหลดต่อที่ P- ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยพอร์ต จำนวนเซลล์และ Switched Negative[3]

Digital BMS องค์ประกอบส่วนใหญ่จะเหมือนกับ Analog BMS แต่จะมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแสดงผลและติดต่อสื่อสารเพิ่มขึ้นมา

2.4.2.2 BMS Topology

BMS สามารถจัดประเภทตามส่วนประกอบและวิธีการต่อแบตเตอรี่ได้

1) By Assembly Subdivision

เป็นการจำแนกตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน BMS จำแนกดังนี้
 Single board: ทุกอย่างรวมกัน Single BMU: คล้ายๆ กับ Single board แต่ Protector switch จะอยู่แยกส่วนกัน และ Modular

2) By Connection to Cell

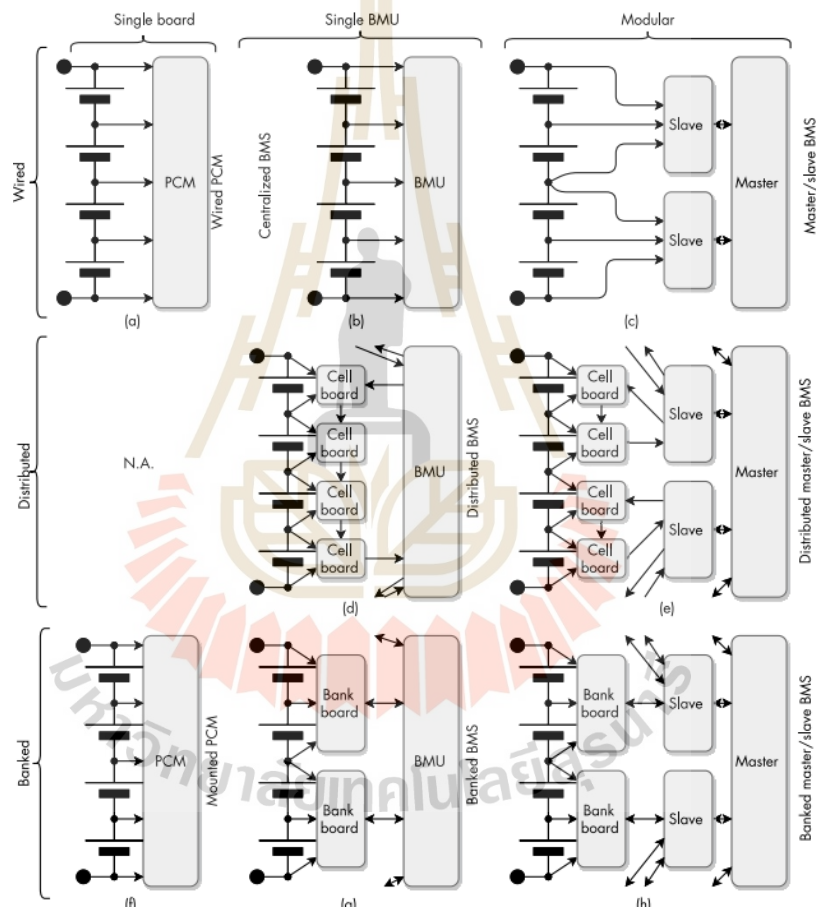
BMS สามารถจัดประเภทได้ตามวิธีการต่อ BMS เข้ากับแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.13 Wired เป็นการต่อปกติด้วยการเดินสาย Cell board เป็นการต่อ BMS แบบเซลล์ต่อเซลล์ และ Bank board เป็นการต่อ BMS คล้าย ๆ Wired แต่จะไม่มีเดินสายโดยต่อขั้วของแบตเตอรี่เข้ากับขาของ BMS โดยตรง

3) Permutation of BMS Topology

จากการจัดประเภทตามส่วนประกอบและการต่อ สามารถจับคู่และเรียกชื่อใหม่ได้ตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การจำแนกประเภทของ BMS[3]

	Single-Board	Single-BMU	Modular
Wired	Wired PCM	Centralized BMS	Master/Slave BMS
Cell boards	-	Distributed BMS	Distributed master/slave BMS
Bank boards	Mounted PCM	Banked BMS	Banked master/slave BMS



รูปที่ 2.13 การจำแนกรูปแบบของ BMS ด้วยการเดินสายไฟและบอร์ด[3]

Wired PCM คือ BMS ปกติที่มีการเชื่อมต่อเซลล์แบตเตอรี่กับ BMS ด้วยสายไฟแล้วสามารถดูแลแต่ละเซลล์ได้เลย

Mounted PCM มีลักษณะเหมือนกับ Wired PCM แต่จะไม่มีเส้นสายไฟโดยจะออกแบบมาให้พอดีกับเซลล์แบตเตอรี่แต่ละประเภทแล้วเชื่อมต่อด้วยแผ่น Nickel

Centralized BMS เป็น BMS ที่ Battery pack แยกอยู่กับ BMS Pack ที่เชื่อมต่อกันด้วยสายไฟส่วนใหญ่จะใช้งาน High voltage

Distributed BMS เป็น BMS ที่มีการต่อ BMU แบบเซลล์ต่อเซลล์โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการทำงาน ข้อดีคือสามารถแสดงผลได้อย่างต่อเนื่องในขณะที่ BMS จะปิดอยู่และมี BMU เซลล์ไหนที่เสียก็สามารถเปลี่ยนเฉพาะเซลล์นั้นได้ ไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนทั้งหมด ข้อเสียคือจะหยุดทำงานเมื่อแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ลดต่ำกว่าที่กำหนด การส่งข้อมูลคือ BMS ตัวแรกจะอ่านค่าและส่งไปให้ตัวที่สอง ตัวที่สองจะอ่านค่าและนำข้อมูลไปต่อทำซ้ำกับข้อมูลชุดแรกแล้วจึงส่งไปให้ตัวที่สาม ตัวที่สามก็จะทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงตัวสุดท้ายแล้วจึงส่งข้อมูลทั้งหมดให้ BMU

Banked BMS เป็น BMS ที่มี BMS ซ้อนเข้าไปอีกทีโดยจะประกอบไปด้วย BMS หลายๆตัวคอยดูแลเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันอยู่ชุดหนึ่งโดยไม่มีเส้นสายไฟ การส่งข้อมูลคือแต่ละ BMS จะอ่านค่าและส่งข้อมูลเอามาที่ BMU

Master/Slave BMS เป็น BMS ที่ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ Master และ Slave โดย Slave แต่ละตัวจะดูแลเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันผ่านสายไฟและส่งข้อมูลไปยัง Master ด้วยวิธี Daisy chain Bus หรือ Individual link

Distributed master/slave BMS มีความคล้ายคลึงกับ Master/Slave BMS แต่จะใช้ BMS ต่อแบบเซลล์ต่อเซลล์แทน และการส่งข้อมูลจะเหมือนเดิมแต่ข้อมูลสุดท้ายจะส่งไปให้ Slave ก่อน หลังจากนั้น Slave ทั้งหมดก็จะส่งข้อมูลไปให้ Master

Banked master/slave BMS จะเหมือนกับ Distributed master/slave BMS แต่ Slave จะต่อกับเซลล์แบตเตอรี่แบบไม่ใช่สายไฟแทน

2.4.2.3 BMS Format

นอกเหนือจาก Technology และ Topology แล้ว BMS สามารถแบ่งออกได้ตามการบรรจุโดย Open board Enclosed หรือ Sealed

2.4.3 Cell balancing method

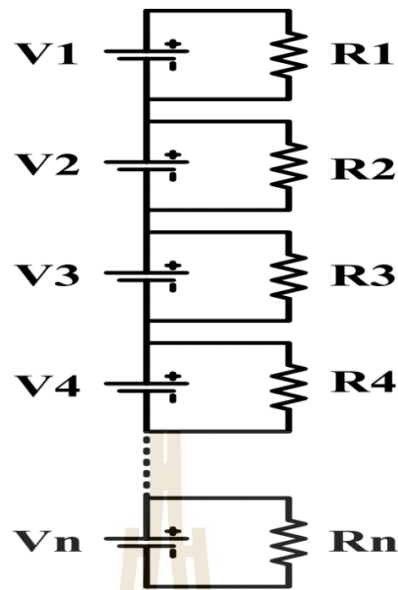
การต่ออนุกรมกันของเซลล์แบตเตอรี่จะเป็นการนำแรงดันของแต่ละเซลล์มารวมกัน เมื่อวัดที่ขั้วบวกหัวท้ายจะได้แรงดันรวมทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเซลล์แต่ละเซลล์ไม่ได้มีแรงดันเท่ากัน ซึ่งการต่อที่แรงดันต่างกันเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลง การทำ Cell balancing จึงมีความจำเป็น การจำแนกวิธีการ Balancing จะแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ 1) Passive balance เป็นวิธีการที่มีมีความซับซ้อน แต่จะเกิด Loss ขึ้นมาในระบบเพราะ เป็นการนำพลังงานไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ไปทิ้งให้กับ Shunt resistor 2) Active balance เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ แต่มีความซับซ้อนในการควบคุมและการต่อวงจร เกิด Loss น้อยหรือไม่เกิดเลย โดยหลักการคือนำพลังงานของเซลล์ที่สูงกว่ามาชาร์จเซลล์ที่ต่ำที่สุด

2.4.3.1 Passive balance

อย่างที่กล่าวไปข้างต้น วิธีการนี้จะนำพลังงานไปเผาไฟทิ้งที่ Shunt resistor ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ

1) Fixed shunt resistor method

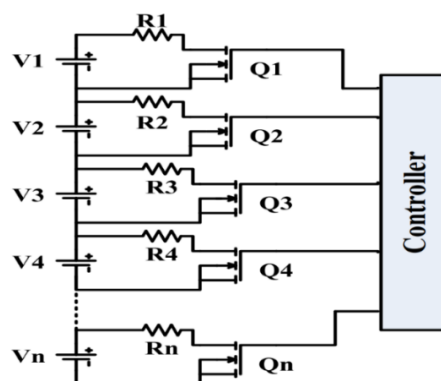
วิธีการนี้คือนำ Shunt resistor มาต่อขนานกับเซลล์แต่ละเซลล์เพื่อคายประจุทิ้ง วิธีการนี้เหมาะกับแบตเตอรี่ Nickel และ Lead-acid เพราะว่าแบตเตอรี่ทั้งสองชนิดสามารถทนการ Overcharge โดยไม่เกิดผลกระทบได้ ข้อดีคือวงจรง่ายแต่ข้อเสียคือเกิด Loss ในรูปแบบความร้อนที่แต่ละ Shunt resistor ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 Fixed shunt resistor method[5]

2) Switching shunt resistor method

วิธีการนี้จะมีรูปแบบการต่อใกล้เคียงกับ Fixed shunt resistor method แต่จะมีการเพิ่มสวิตช์ดังรูปที่ 2.15 เพื่อควบคุมขึ้นมาซึ่งโดยปกติจะเป็น Semiconductor switch เช่น MOSFET Voltage sensor และไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันของแต่ละเซลล์ เซลล์ที่สูงกว่าเซลล์ที่ต่ำที่สุด ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสัญญาณเพื่อ Active MOSFET ให้นำกระแสจากแบตเตอรี่เซลล์นั้น ๆ ไหลผ่าน Shunt resistor เพื่อลดแรงดันลงมา วิธีการนี้มีอีกชื่อคือ Charge shutting method และปกติจะใช้กับแบตเตอรี่ Li-ion วิธีการนี้มีความน่าเชื่อถือกว่า Fixed shunt resistor method แต่ก็ยังมีการเกิด Loss อยู่ และปกติกระแสที่นำไปคายประจุทั้งหมดจะไม่เกิน 100 mA per Ah ต่อเซลล์



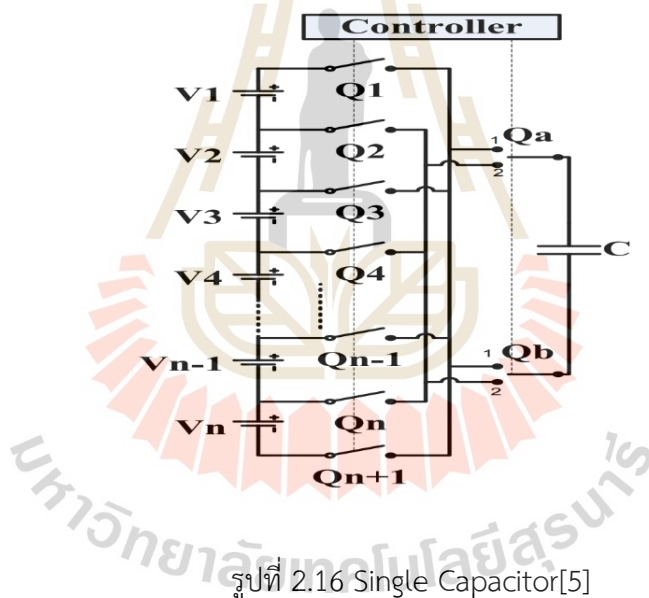
รูปที่ 2.15 Switching shunt resistor method[5]

2.4.3.2 Active balance

ตามที่กล่าวไปข้างต้น วิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพกว่า Passive balance เพราะจะนำประจุไฟฟ้าจากเซลล์ที่มีแรงดันที่สูงไปอัดประจุแบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุดด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้ไม่เกิด Loss หรือเกิดน้อย แต่จะมีการเดินสายไฟและการเขียนโปรแกรมควบคุมที่ยากกว่า

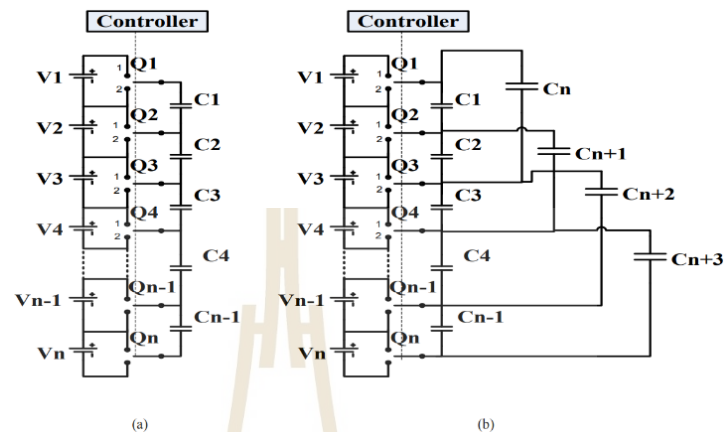
1) Capacitor based Active Balancing Method

วิธีการนี้คือการนำประจุไฟฟ้าที่สูงกว่าไปอัดประจุตัวเก็บประจุ เมื่ออัดประจุตัวเก็บประจุจนเต็มก็สลับสวิทซ์ไปอัดประจุแบตเตอรี่ที่มีแรงดันต่ำกว่า ซึ่งการต่อตัวเก็บประจุกับ Semiconductor switch สามารถแบ่งการต่อได้เป็น 3 วิธี ได้แก่ Single Capacitor วิธีการต่อแบบนี้ จะใช้แค่ตัวเก็บประจุเพียงแคตัวเดียวแต่จะใช้ Semiconductor switch จำนวน $n+5$ ตัวเมื่อ n คือจำนวนแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกัน วิธีการนี้จะมีความเร็วในการถ่ายโอนพลังงานแต่จะมีความยากในการควบคุมดังรูปที่ 2.16



Switched Capacitor วิธีการนี้ จะมีความง่ายในการเขียนโปรแกรมควบคุมกว่าวิธี การแรก หลักการทำงาน คือ สมมติให้แรงดันของแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ต่ำกว่าเซลล์อื่น ๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้สลับสวิทซ์เพื่อนำเซลล์ที่ 1 ไปอัดประจุตัวเก็บประจุตัวที่ 1 เมื่อเต็มนำตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ไปชาร์จเซลล์ที่ 2 แล้วจึงนำไปอัดประจุตัวเก็บประจุตัวที่ 2 วนแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนถึงเซลล์ตัวที่ 4 ดังรูปที่ 19(a) ข้อเสียของวิธีการนี้คือจะใช้เวลานานกว่าวิธีแรก และวิธี Double-tiered Switched Capacitor วิธีการนี้จะเหมือนกับ Switched Capacitor แต่จะมีการ

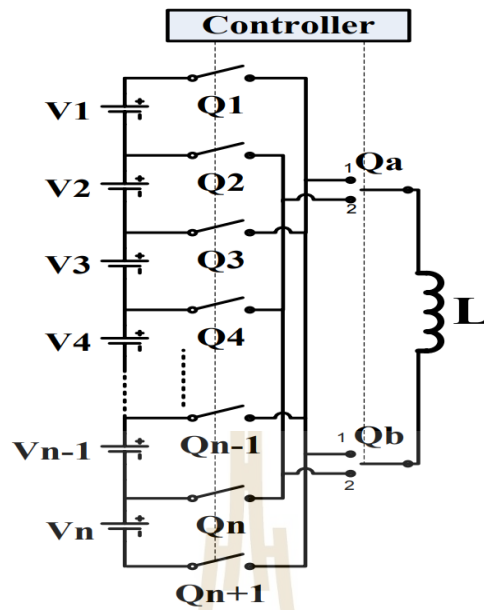
ต่อตัวเก็บประจุขนานเพิ่มมาอีก 1 แกวเพื่อให้อัดประจุแบบกระโดดข้ามไปได้หนึ่งเซลล์ เช่น จาก 1 ไป 3 จาก 2 ไป 4 ดังรูปที่ 2.17(b)



รูปที่ 2.17 Several Capacitor[5]

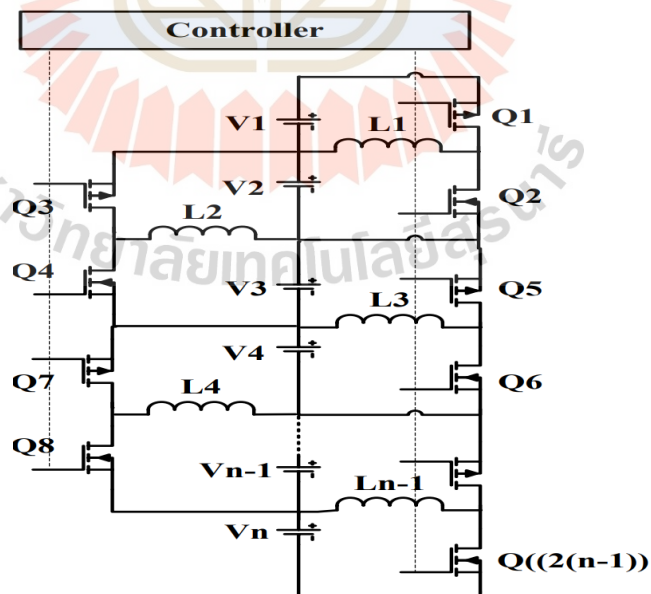
2) Inductor based Active Balancing Schemes

เป็นอีกหนึ่งวิธีในการทำ Active balance ซึ่งข้อดีของการใช้ตัวเหนี่ยวนำคือ การทำ Balancing จะมีความรวดเร็วกว่าตัวเก็บประจุ แต่เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำจะสะสมพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงมีโอกาสในการเกิด Loss ทำให้ต้องมีการป้องกันการสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้อายุขัยของวงจรจะมีอุปกรณ์ป้องกันและไดโอดเพื่อการ Short circuit ทำให้มีราคาที่สูงขึ้นซึ่งการต่อวงจรจะแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ที่มีลักษณะคล้ายกับตัวเก็บประจุ แบบที่ 1 คือ Single Inductor หลักการทำงานคล้ายกับตัวเก็บประจุ (Single Capacitor) ที่มีไดโอดเพิ่มขึ้นมา แต่ตัวเหนี่ยวนำจะเร็วกว่าตัวเก็บประจุ วงจรการต่อจะเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Single Inductor[5]

แบบที่ 2 คือ Several Inductor หลักการทำงานคล้ายกับ Switched Capacitor แต่จะมีความรวดเร็วในการทำ Balancing กว่า ดังรูปที่ 2.19

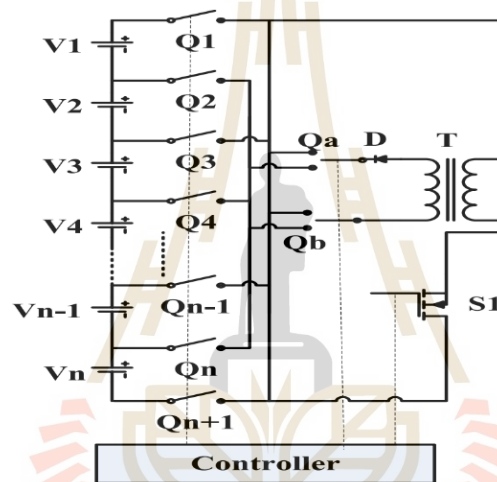


รูปที่ 2.19 Several Inductor[5]

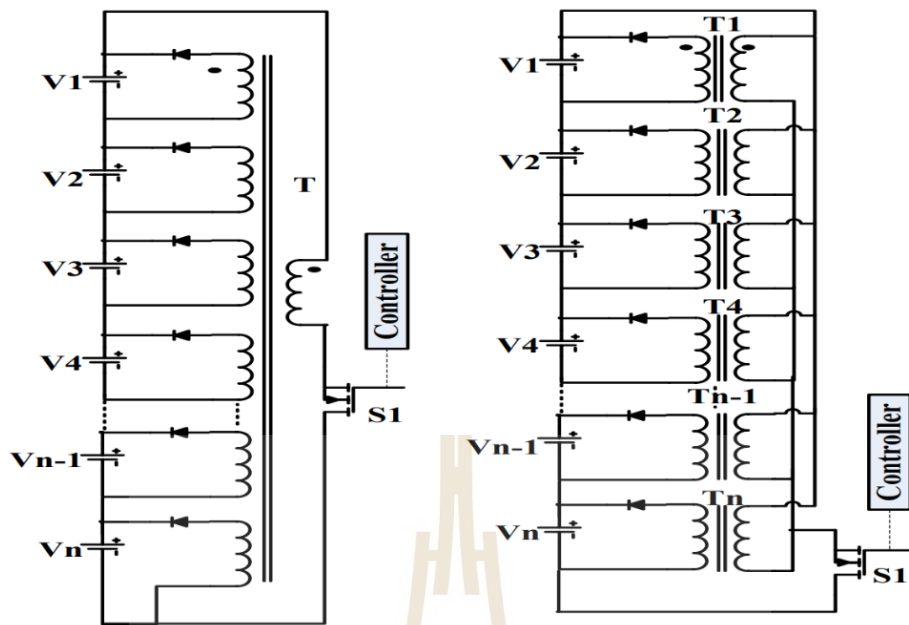
3) Transformer based Active Balancing Schemes

วิธีการนี้จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแทน ซึ่งเป็นวิธีการทำ Balancing ที่เร็วที่สุดแต่ก็ยังสามารถเกิดการสูญเสียสนามแม่เหล็กได้เหมือนกับตัวเหนี่ยวนำ ข้อดีของการใช้หม้อแปลงไฟฟ้า คือ สามารถนำเซลล์ที่มีแรงดันสูงสุดไปชาร์จให้กับเซลล์ที่มีแรงดันต่ำกว่าได้ เรียกวิธีการนี้ว่า Cell to pack และสามารถนำ

เซลล์ที่มีแรงดันที่สูงกว่าเซลล์ที่มีแรงดันต่ำสุดทั้งหมดมาชาร์จให้กับตัวมันได้ เรียกวิธีการนี้ว่า Pack to cell และยังสามารถแบ่งวงจรได้ 2 แบบ คือ 1) Single Transformer ดังรูปที่ 2.20 2) Several Transformer ดังรูปที่ 2.21 ตามลำดับ



รูปที่ 2.20 Single Transformer[5]



รูปที่ 2.21 Several Transformer[5]

2.4.4 Evaluation of BMS

โดยปกติแล้ว BMS จะมีการคำนวณค่าสถานะต่าง ๆ เพื่อรายงานสภาพของแบตเตอรี่ไว้

2.4.4.1 State of Charge Evaluation เป็นพารามิเตอร์หลัก ๆ ที่ต้องแสดงให้เห็นให้ใช้งานทราบ ค่านี้จะบ่งบอกถึงพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่ ซึ่งโดยปกติแล้วจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง OCV-SOC จากการทดลองเพราะว่าเซลล์แต่ละเซลล์มีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าจะผลิตมาจากโรงงานหรือวิธีการเดียวกัน

2.4.4.2 Effective Capacity Evaluation เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงจำนวนพลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่ชุดหนึ่งจะสามารถปฏิบัติงานได้

2.4.4.3 OCV Evaluation เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงแรงดันของแบตเตอรี่ขณะที่ไม่ได้ต่อภาระโหลดใด ๆ รวมถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เองด้วย

2.4.4.4 Internal Resistance Evaluation เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ เป็นค่าที่สำคัญที่ BMS จะต้องทราบเพื่อใช้คำนวณหา OCV โดยค่านี้ได้จากการทดลอง Constant pulse current discharge

2.4.4.5 State of Health Evaluation เป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงสุขภาพแบตเตอรี่ การคำนวณค่านี้มีได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้ผลิต BMS โดยค่า SOH เป็นค่าการทำนายเบื้องต้นเพื่อให้ผู้ใช้งานตัดสินใจว่าควรเปลี่ยนแบตเตอรี่เซลล์นั้น ๆ หรือไม่

2.4.4.6 State of Power Evaluation เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ณ ขณะนั้น เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าที่จะถูกดึงออกเกิน ซึ่ง BMS จะสื่อสารกับภาระโหลดว่าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกินกี่วัตต์

2.4.4.7 Ground Fault Evaluation เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบ Capacitance ระหว่างแบตเตอรี่กับกราวด์ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกถึงความผิดปกติโดยถ้าค่านี้ต่ำจะหมายถึงสายไฟอาจจะหลุด ถ้าค่านี้สูงหมายถึง ภาระโหลดอาจจะถูกต่อกับแบตเตอรี่โดยที่ไม่ควรจะถูกต่ออยู่

2.4.5 Mode and Logic of BMS

2.4.5.1 Mode

ใน BMS จะมีโหมดการทำงานที่ขึ้นอยู่กับการทำงานเชื่อมต่อกับโหลดหรือเครื่องชาร์จ และคำสั่งภายนอกไมโครคอนโทรลเลอร์หลักเช่นในรถยนต์ไฟฟ้า จะมีกล่อง ECU ที่เป็นศูนย์กลางการควบคุมระบบต่าง ๆ โดยปกติแล้ว BMS จะมีโหมดดังรูปที่ 2.22 อยู่ประมาณ 7 โหมด คือ

1) Low-power หรือ Sleep mode

ในโหมดนี้แบตเตอรี่จะตัดการเชื่อมต่อกับโหลดผ่านการเปิดหน้าคอนแทคของสวิตช์ ดังนั้น กระแสทำถูกดึงออกจากแบตเตอรี่จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ทั้งตัวแบตเตอรี่และการกินกระแสของบอร์ด BMS การวัดค่าอุณหภูมิและแรงดันของแต่ละเซลล์จะไม่ถูกดำเนินการ การสื่อสารระหว่างระบบจะอยู่ในสถานะ Idle ด้วยเช่นกัน ตัวอย่างการปรากฏของโหมดนี้คือเมื่อกุญแจรถยนต์ถูกถอดออกจากรถ

2) Periodic wake-up from sleep mode

ถึงแม้ว่า BMS และโหลดจะไม่ถูกใช้งานแล้ว แต่ด้วยเหตุผลหลายประการทำให้ต้องมีฟังก์ชันในการ Self-test อยู่เช่น เพื่อตรวจสอบการ Balancing ของแต่ละเซลล์เพื่อประเมิน SOC ณ ขณะนั้น โดยการที่จะมีโหมดนี้ใน BMS จะต้องมีอุปกรณ์ Real-time clock หรือ Timer และไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าที่ต่ำมากเพื่อที่จะสื่อสารกับ BMS ด้วยการสื่อสารแบบ Serial bus

3) Idle หรือ Standby mode

ในโหมดนี้แบตเตอรี่จะยังคงตัดการเชื่อมต่อกับโหลดหรือเครื่องชาร์จอยู่ แต่การวัดค่าต่างๆจะถูกวัดเช่นแรงดันและอุณหภูมิของแต่ละเซลล์ Fault detection จะเริ่มทำงานและจะเริ่มประเมิน SOC หรืออื่น ๆ ตามฟังก์ชันใน BMS โหมดนี้จะปรากฏขึ้นเมื่อ Startup

หรือ Shutdown โหลดหรือเครื่องชาร์จ เพื่อที่จะตรวจสอบว่าการปิดหน้าคอนแทคจะปลอดภัยต่อแบตเตอรี่และโหลดหรือเครื่องชาร์จ

4) Special operational mode

ในโหมดนี้จะเป็นโหมดพิเศษที่จะปิดหน้าคอนแทคเฉพาะเพื่อ Pre-charge หรือ Soft start เท่านั้น โดยจุดประสงค์คือ ป้องกันอันตรายจากการดีงกระแสหรือกระแสไหลเข้าเกินในช่วง Peak

5) Multiple online mode

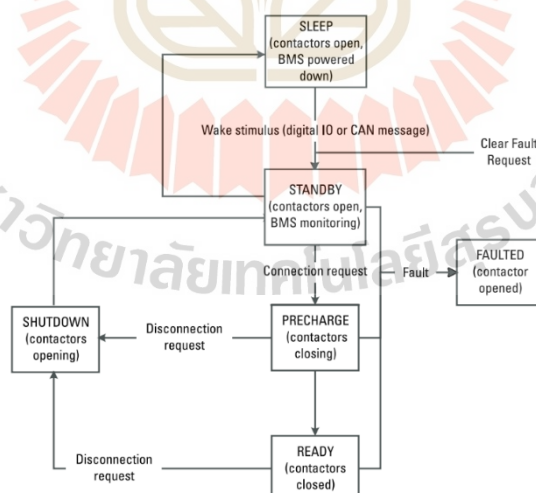
บางระบบใช้ระบบเครือข่ายเดียวกันเพื่อที่จะ Charge หรือ Discharge

6) Error mode

ในโหมดนี้ระบบจะเปิดโหมดนี้เมื่อพบกับข้อผิดพลาดบางประการ BMS จะไม่มีทางปิดหน้าคอนแทคจนกว่าผู้ใช้จะเคลียร์ข้อผิดพลาดได้

7) Preconditioning cycle mode

โหมดนี้จะมีเฉพาะ BMS ที่มีระบบ Heating หรือ Cooling โดยเรียกรวมกันว่า Thermal management ซึ่งจะทำให้การปรับอุณหภูมิไม่ให้อุ่นหรือเย็นเกินไปซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนเริ่มการใช้งานแบตเตอรี่ด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น พัดลมหรือฮีตเตอร์ และหน้าคอนแทคเพื่อการ Charge หรือ Discharge จะถูกเปิด

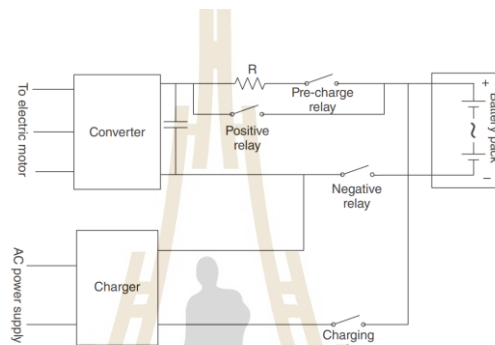


รูปที่ 2.22 Relationship between each modes[2]

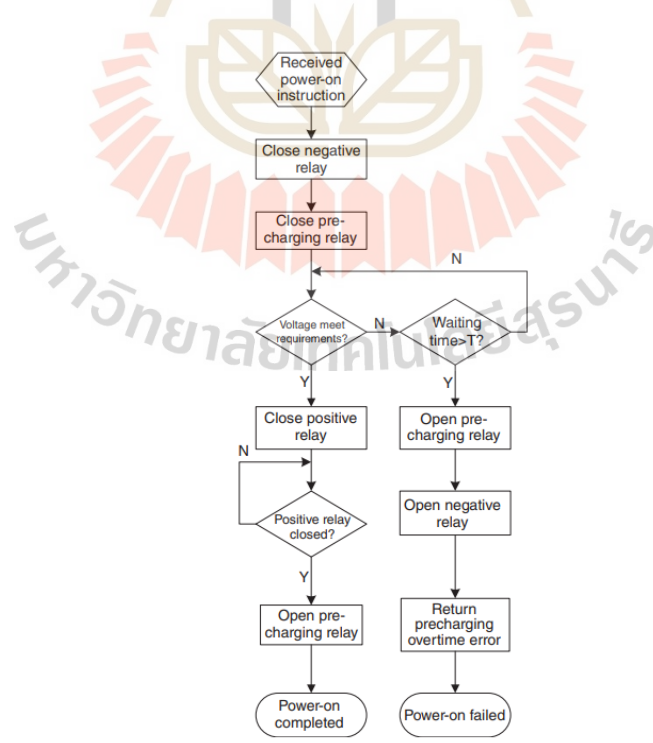
2.4.5.2 Logic

1) Power-Up control

BMS จะประกอบไปด้วย Negative relay, total positive relay, pre-charge relay และ charge relay (ในรุ่นที่เป็น Dual-port) เพื่อคอยตัดหรือเชื่อมต่อวงจรแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2.23 ในการเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับโหลดอย่างรวดเร็ว จะมีการดึงกระแสที่สูงมาก ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบตเตอรี่ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องต่อวงจรเข้ากับตัวทวนต้านเพื่อลดกระแสก่อนด้วย Pre-charge relay เมื่อแรงดันของตัวเก็บประจุเท่ากับแรงดันแบตเตอรี่ จะสั่งกลับมาเปิด Total positive relay แทน โดยจะใช้ logic ดังรูป 2.24



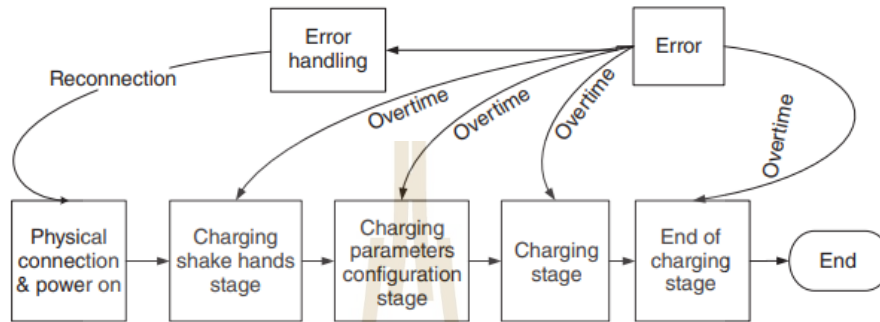
รูปที่ 2.23 Wiring of relay [4]



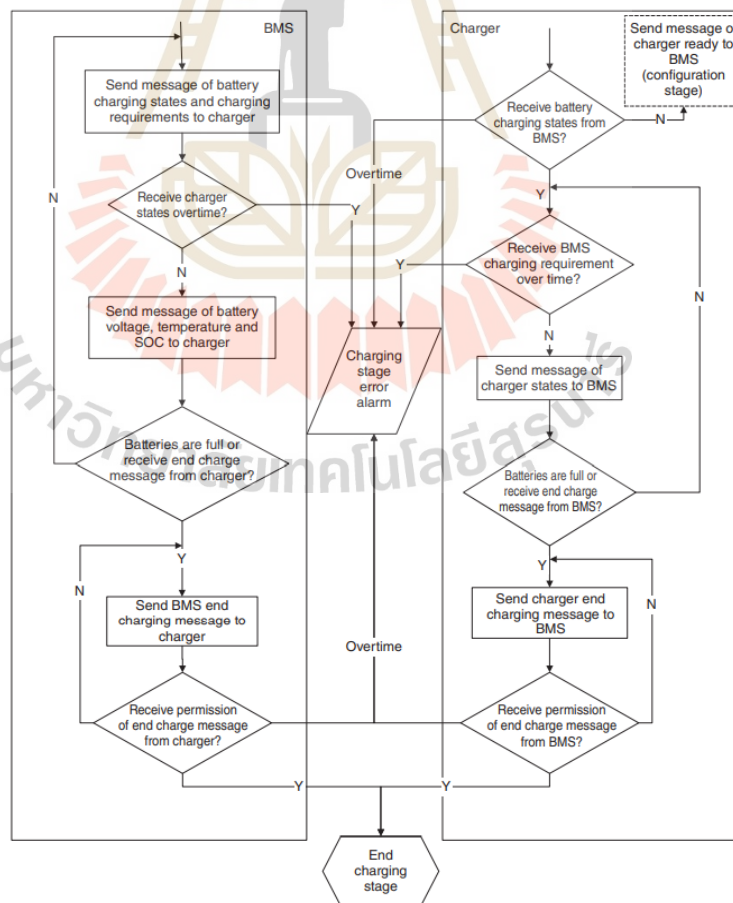
รูปที่ 2.24 Logic of power-up control [4]

2) Charge control

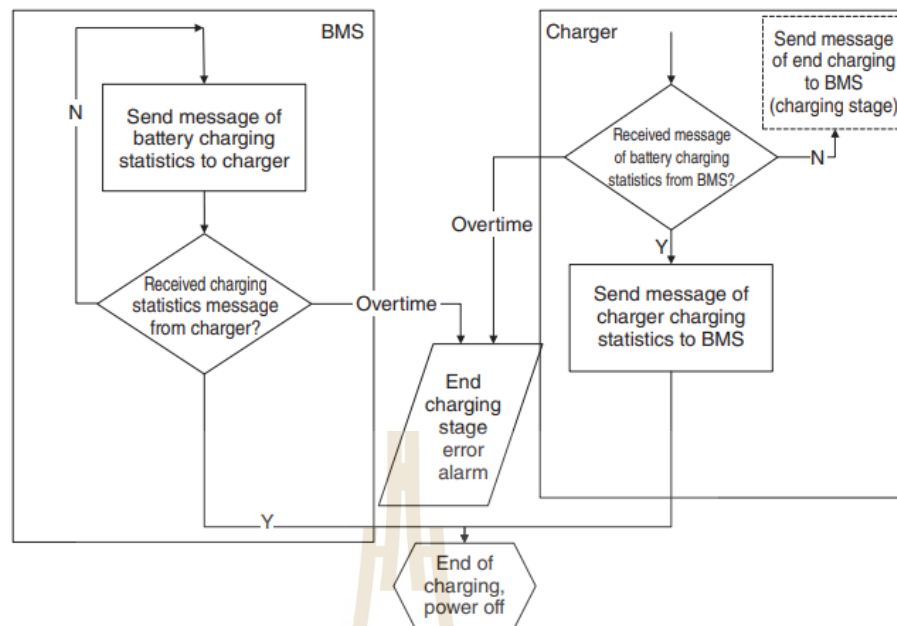
การชาร์จจะเป็นไปตามมาตรฐานสากล การชาร์จที่สมบูรณ์จะเป็นไปตามรูปที่ 2.25 และลอจิกในการชาร์จจะเป็นไปตามรูปที่ 2.26 และ 2.27 ซึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างเครื่องชาร์จและ BMS



รูปที่ 2.25 Charge flow[4]



รูปที่ 2.26 Communication between BMS and charger during



รูปที่ 2.27 End of charge flow[4]

3) Temperature control

ในการที่จะควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่จะต้องทำการวิเคราะห์แบตเตอรี่แต่ละแบบก่อนเพราะแบตเตอรี่แต่ละชนิดมีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกัน เมื่อทราบค่าแล้วจะนำช่วงเหล่านั้นไปตั้งค่า Threshold ใน BMS ซึ่งค่า Threshold นี้จะแบ่งออกเป็น เลเวล 1 และ 2 ในช่วงอุณหภูมิสูง และเลเวล 1 และ 2 ในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยหลักการควบคุมคือ เมื่ออุณหภูมิเกิน Threshold เลเวล 1 ที่กำหนดไว้ในช่วงอุณหภูมิสูง BMS จะสื่อสารกับโหลดเพื่อให้ลดกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าเกินเลเวล 2 ไปแล้ว BMS จะแจ้งเตือนว่าอุณหภูมิถึงขีดจำกัดแล้วและคำสั่งเปิดรีเลย์เพื่อป้องกันอันตรายจาก Thermal runaway

4) Fault alarm and control

ตารางที่ 2.6 คือตารางที่แสดงระดับการแจ้งเตือนและควบคุมในสถานะการณ์ต่าง ๆ ซึ่งค่า Threshold ที่ตั้งค่าไว้คือแบตเตอรี่ LFP ที่ต่ออนุกรมกัน 120 ลูก ความจุอยู่ที่ 210 Ah และตารางที่ 7 คือการตรวจสอบและดำเนินการพื้นฐานใน BMS เมื่อแบตเตอรี่มีความผิดปกติ

ตารางที่ 2.6 Sample BMS fault type[4]

No.	Fault type	Grade 1 fault criterion	Grade 2 fault criterion
1	Setting temperature non-equalization threshold value	>10 °C	-
2	Setting voltage non-equalization threshold value	>0.3 V	-
3	Setting over-temperature fault threshold value	>50 °C (T_{max}) Battery temperature T_{max1}	>55 °C (T_{max}) Battery temperature T_{max2}
4	Setting cell over-voltage fault threshold value	>3.65 V	>3.75 V
5	Setting temperature cell under-voltage fault threshold value	<3.0 V	<2.8 V
6	Setting total voltage over-voltage fault threshold value	>432 V (3.6 x 120)	>438 V (3.65 x 120)
7	Setting total voltage under-voltage fault threshold value	<366 V (3.05 x 120)	<360 V (3.0 x 120)
8	Setting over-current of charging fault threshold value	>1 °C (1 min)	>1.5 °C (10 s)
9	Setting over-current of discharging fault threshold value	>1.5 °C (3 min)	>2 °C (60 s)
10	SOC too high	>100%	>100%
11	SOC too low	<30%	<10%
12	Insulation fault	<500 Ω/V ,but >100 Ω/V	$\leq 100\Omega/V$

ตารางที่ 2.7 BMS common safety measurements[4]

No.	Fault type	Fault grade	Criterion	Measurement	Note
1	Cell battery over-voltage	Grade 1	$V_{Max} > V_{H1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging
2		Grade 2	$V_{Max} > V_{H2}$	Cut-off main return circuit	Stop charging
3	Cell battery under-voltage	Grade 1	$V_{Min} > V_{L1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging
4		Grade 2	$V_{Min} > V_{L1, L2}$	Cut-down main return circuit	Stop discharging
5	Battery over-temperature	Grade 1	$T_{Max} > T_{H1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging
6		Grade 2	$T_{Max} > T_{H2}$	Cut-down main return circuit	Stop use
7	Over-current	Grade 1	$I > I_{H1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging
8		Grade 2	$I > I_{H2}$	Cut-down main return circuit	Stop use
9	SOC too high	Grade 1	$SOC > SOC_{H1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging

ตารางที่ 2.7 BMS common safety measurements (ต่อ)

No.	Fault type	Fault grade	Criterion	Measurement	Note
10		Grade 2	$SOC > SOC_{H2}$	Cut-down main return circuit	Stop charging
11	SOC too low	Grade 1	$SOC < SOC_{L1}$	Alarm + buzzer	Derating current charging
12		Grade 2	$SOC < SOC_{L2}$	Cut-down main return circuit	Stop charging
13	Insulation fault	Grade 1	$R_{min} < R_{L1}$	Alarm + buzzer	Quick detection
14		Grade 2	$R_{min} < R_{L2}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
15	Contactora fault	Grade 2	Non conducting $I_{c+} < I_{L+}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
16		Grade 2	Over-current $I_{c+} > I_{H+}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
17	Pre-charging contactora fault	Grade 2	Non conducting $I_{p+} < I_p$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
18		Grade 2	Non conducting $I_{p+} > I_{p-}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
19	Contactora fault	Grade 2	Non conducting $I_{c-} < I_{L-}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
20		Grade 2	Over-current $I_{c-} > I_{H-}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use

ตารางที่ 2.7 BMS common safety measurements (ต่อ)

No.	Fault type	Fault grade	Criterion	Measurement	Note
21	Air-machine fault	Grade 2	Non conducting $I_{Fan} < I_{LF}$	Alarm + buzzer	Quick detection
22		Grade 2	Over-current $I_{Fan} > I_{LF}$	Alarm + buzzer	Quick detection
23	CAN communication fault	Grade 2	Overtime: $CAN > t_H$	Alarm + buzzer	Stop car nearby
24	Pre-charging fault	Grade 2	Overtime: $t_{pre} > t_{Ph}$	Cut-down main return circuit	Prohibit use
25	BMS fault	Grade 2	Voltage detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
26		Grade 2	Temperature detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
27		Grade 2	Current detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
28		Grade 2	Total voltage detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
29		Grade 2	Insulation detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
30		Grade 2	Storage detection abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
31		Grade 2	Internal communication abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection

ตารางที่ 2.7 BMS common safety measurements (ต่อ)

No.	Fault type	Fault grade	Criterion	Measurement	Note
32		Grade 2	Real-time check abnormal	Alarm + buzzer	Quick detection
33	Battery inconsistency fault	Grade 1	Voltage inconsistency: $U_{\max} - U_{\min} > U_{R2}$	Alarm	Quick maintenance
34		Grade 2	Voltage non-match: $U_{\max} - U_{\min} > U_{R2}$	Cut-down main return circuit	Stop nearby
35		Grade 1	Temperature inconsistency: $T_{\max} - T_{\min} > T_B$	Alarm	Quick maintenance
36	Too full storage	Grade 1	Storage full	Alarm	Quick read
37	Battery magnetic fault	Grade 2	Battery anti-connection	Cut-down main return circuit	Prohibit use

2.5 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2021 Khac และคณะได้อธิบายส่วนประกอบพื้นฐานต่าง ๆ ของโดรนและได้ทำการทดลอง Brushless DC motor (BLDC) จำนวน 4 ตัวในชุดทดลองที่เขาสร้างขึ้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของโดรนโดยการประดิษฐ์แท่งเหล็กสำหรับยึดโครงของโดรนที่ต่ออยู่กับ BLDC motor และ Electronics Speed Control (ESC) โดยออกแบบให้มุม Pitch หมุนไม่ได้ผลที่ได้คือทาง Khac และคณะได้โปรไฟล์การบินที่เป็นค่าระหว่างแรงดันแบตเตอรี่และกระแสที่ไหลออกจากแบตเตอรี่ในโหมด Take-off Hovering และ Landing [8]

Wang และคณะได้ทำการ Optimize หาจำนวนการต่อขนานและอนุกรมของแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดโปรไฟล์การบินที่แตกต่างกันไว้ในปี ค.ศ. 2020 โดยเริ่มจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรนก่อนที่ประกอบไปด้วยใบพัด เกียร์บล็อกที่ใช้ทดแรงจากมอเตอร์ BLDC มอเตอร์ที่ใช้สร้างความเร็วเชิงมุมให้กับใบพัดซึ่งถูกควบคุมด้วย ESC และแบตเตอรี่ที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับ

ระบบ หลังจากนั้น คือ การ Optimization ด้วยวิธี Trajectory optimization ผลที่ได้คือสามารถหาจำนวนการต่อขนานและอนุกรมของแบตเตอรี่ที่จะทำให้บินได้นานที่สุดในโหมดการบินแบบ Take-off และ Hovering เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโดรน

ในโหมด Take-off การต่อขนานเพื่อเพิ่มความจุของแบตเตอรี่จะบินได้นานที่สุดก็ต่อเมื่อมีการต่อที่เหมาะสม การต่อขนานมากไปเมื่อโดรนต้องนำเครื่องขึ้นจะ BLDC motor จะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงเพื่อหมุนใบพัดสร้างแรงยกให้มากกว่าน้ำหนักทั้งหมดของตัวโดรนจึงจะบินขึ้นได้ ทำให้ความจุของแบตเตอรี่ทั้งหมดไปกลายเป็นภาระโหลดให้กับโดรนและการต่อน้อยเกินไปก็ส่งผลโดยตรงทำให้ระยะเวลาการบินสั้นลง

ส่วนในโหมดการบินแบบ Hovering จะเป็นการบินที่ใช้กำลังไฟฟ้าคงที่ทำการจำนวนการต่อขนานของแบตเตอรี่ส่งผลให้ระยะเวลาการบินของโดรนเพิ่มขึ้น[6]

ในปี ค.ศ. 2019 Ngoc Anh Vu ได้ออกแบบระบบขับเคลื่อนของโดรนการเกษตรโดยทำการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง Power-Mass Mass-Internal resistance ของ BLDC motor Internal resistance-Max continuous current Mass-Max continuous current ของ ESC ซึ่งบางกราฟค่า R^2 ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเข้ากันของข้อมูลมีค่าน้อยกว่า 0.5 แต่ที่น่าสนใจคือกราฟแต่ละกราฟมีการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบที่ละเอียดพอสมควร

หลังจากนั้น Ngoc Anh Vu ได้ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรนโดยแบ่งออกเป็น 2 โมเดล คือ Electrical model และ Performance model และหาสมการที่อธิบายระหว่างความจุของแบตเตอรี่และระยะเวลาในการบิน

หลังจากนั้น Ngoc Anh Vu ได้ทดสอบโมเดลและนำผลที่ได้ไปสร้างกราฟที่อธิบายถึงน้ำหนักที่โดรนแบกกับระยะเวลาที่โดรนจะสามารถบินได้ตามจำนวนการต่อขนานและการต่ออนุกรมของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันด้วยโดรนรุ่น DJI -MG1 ซึ่งผลลัพธ์ที่ทางผู้ผลิตรายนี้ไ้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ 13%[9]

Marcin และคณะได้ออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของโดรนโดยผลลัพธ์สุดท้ายเป็นการคำนวณระยะเวลาในการบินไว้ในปี ค.ศ. 2020 โดยเริ่มต้นจากการกำหนดรูปแบบการใช้งานซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า Thrust-to-weight ratio ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงยกของโดรนกับน้ำหนักโดยเป็นไปได้หลายค่าขึ้นอยู่กับกรออกแบบเช่น โดรนที่ใช้ในการแข่งขันความเร็ว ค่า Thrust-to-weight ratio จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 7 หรือโดรนที่ใช้ในการบรรทุกจำพวกโดรนการเกษตร ค่านี้จะมีค่าเท่ากับ 2 หลังจากนั้น จะกราฟที่ใช้อธิบายถึงแรงยกที่ต้องการต่อความเร็วรอบ แรงบิดต่อความเร็วรอบ และกำลังต่อความเร็วรอบของใบพัด

เพื่อที่จะหากำลังทางกลที่มอเตอร์จะต้องจ่ายให้ใบพัดเพื่อสร้างแรงยกที่ต้องการ เมื่อได้กำลังทางกลแล้วจะไปเลือกมอเตอร์ที่ตามเงื่อนไขจึงจะได้กำลังทางไฟฟ้าออกมา

เมื่อได้กำลังทางไฟฟ้าแล้ว จึงนำไปเลือก ESC ที่ทนต่อ Max continuous current ได้ตามเงื่อนไขและเลือกแบตเตอรี่ที่มี C-Rate ที่สามารถจ่ายกระแสและเหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ หลังจากนั้น Marcin และคณะได้นำสมการของ Peukert เพื่อใช้อธิบายการลดลงของแรงดันแบตเตอรี่โดยคิดเป็นรอบ ๆ ที่มี Time stamp เป็น 1 วินาที เมื่อคิดจนถึงรอบที่แรงดันแบตเตอรี่ต่ำกว่าแรงดันที่กำหนดซึ่งปกติจะอยู่ที่ค่า Nominal voltage คุณด้วยจำนวนการต่ออนุกรม จะถือว่าเป็นระยะเวลาที่ควรนำโตรนลงจอดแล้ว จึงนำจำนวนรอบคูณกับ Time stamp จะออกมาเป็นระยะเวลาการบินของโตรนลำนั้น ๆ

หลังจากนั้น Marcin และคณะได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ทางผู้ผลิตระบุไว้ ผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถประเมินได้แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง[10]

ในปี ค.ศ. 2021 Benitto ได้ออกแบบและประดิษฐ์ Battery management system(BMS) ที่สามารถ Monitoring ค่าพารามิเตอร์ State of charge(SOC) State of health(SOH) แรงดันของแต่ละเซลล์และอุณหภูมิของแบตเตอรี่ และเพิ่มระบบ Cell voltage balancing ควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้วยพัดลมระบายอากาศ และแจ้งเตือนเมื่อ SOC ต่ำกว่า 20% โดยใช้ Microcontroller ในการประมวลผลค่า SOC และ SOH โดยใช้วิธี Direct method(Open circuit voltage(OCV)) แล้วนำข้อมูลต่าง ๆ แสดงผ่าน Open-source Grafana การบันทึกข้อมูลจะใช้ InfluxDB ส่วนการ Balancing cell จะใช้ Passive balance ด้วย MOSFET ในการสั่งเปิดปิดที่ต่อกับ Power resistor ในการดั่งกระแสเพื่อลดแรงดันของแบตเตอรี่ที่สูงกว่าให้ลดลงมาเท่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ำที่สุด ส่วนอุณหภูมิจะใช้เซนเซอร์ LM25 ในการอ่านค่าอุณหภูมิซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิด Analog output voltage[11]

Madhav ได้ออกแบบและประดิษฐ์ Uninterruptible power supply(UPS) ไว้ในปี ค.ศ. 2020 โดยหลักการคือจะ AC to DC Converter จ่ายพลังงานเพื่อชาร์จแบตเตอรี่และจ่ายให้ DC to AC Inverter เพื่อเลี้ยงโหลด เมื่อแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเกิดหยุดขึ้นมา Microcontroller จะสั่งให้นำพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาจ่ายให้ DC to AC Inverter แทน ซึ่ง UPS มีส่วนประกอบของแบตเตอรี่ Madhav จึงสร้าง BMS ขึ้นมาด้วยโดยมีหน้าที่หลัก ๆ คือ 1) ป้องกัน Over and under voltage และ Over current ในกรณีของ Charge และ Discharge โดยไม่จำเป็นต้องมี Cell balancing เพราะ Madhav เลือกใช้แบตเตอรี่เพียงแค่ 1 เซลล์

หลักการที่เกี่ยวข้องคือการหา SOC จาก Columb counting โดย SOC เริ่มต้นหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง OCV-SOC ที่ทาง Madhav มีข้อมูลอยู่แล้วและการนับจำนวนกระแส Madhav เลือกใช้ LTC4150 เป็นตัวนับเนื่องจากสามารถตรวจจับทิศทางกระแสได้ เมื่อตรวจจับได้ก็จะทำให้ทราบว่าสถานะแบตเตอรี่กำลังถูก Charge หรือ Discharge อยู่ เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทุกอย่างก็จะสามารถหา SOC ณ ขณะนั้นได้[12]

ในปี ค.ศ. 2021 Ananthraj และคณะได้สรุปองค์ประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ BMS ใน Electronics Vehicle(EV) ซึ่งจะประกอบไปด้วย 1) Block diagram ที่ประกอบไปด้วยระบบต่าง ๆ ที่ BMS ควรมีคือ 1.1) Battery pack 1.2) Measurement block 1.3) Temperature block 1.4) SOC and SOH estimation block 1.5) Capacity estimation 1.6) Equalization block 1.7) Signal block (To ECU) 2) สรุปข้อดีข้อด้อยของแบตเตอรี่แต่ละ ประเภทที่ใช้ใน EV ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน (Li-ion) นิยมใช้ที่สุดเพราะมีอายุการใช้งานและ Specific energy สูง 3) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ Li-ion โดยใช้วงจร Open circuit voltage ที่ต่อกับ Internal resistance กับ Resistor-Capacitor network โดยที่มองว่าวงจรมีความสมดุลทำให้ OCV เท่ากับ Terminal voltage หลังจากนั้นจึงทำการทดลอง Constant current pulse test โดยดึงกระแสอยู่ที่ 1C เป็นเวลา 180 วินาที และพัก 3240 วินาที ผลลัพธ์จากการทดลองนี้จะทำให้ทราบค่า Internal resistance หลังจากนั้นจะทำการทดลอง Continuous constant current discharge test เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง OCV-SOC โดยวัด OCV ที่ Terminal voltage ส่วน SOC ใช้ Columb counting method แล้วนำกลับมา fit curve โดยใช้ Non-linear polynomial trend line 5th order และ 4) ทำการตรวจสอบโมเดลโดย Continuous constant current discharge test ที่ 0.25C 0.5C และ 1C ซึ่ง Ananthraj และคณะได้สรุปไว้ว่าโมเดลที่พัฒนามีความคล้ายคลึงกับลักษณะแบตเตอรี่ Li-ion โดยการสร้างโมเดลต่าง ๆ ออกแบบผ่าน Simulink และ Simscape[13]

ในปัจจุบันอีกหนึ่งเทคโนโลยีกำลังเป็นที่นิยมไม่แพ้กับ EV คือ ปัญญาประดิษฐ์(AI) ซึ่ง Jeewandara และคณะได้เก็บข้อมูลและพัฒนา AI ไว้ในปี ค.ศ. 2021 สำหรับการทำนาย SOC ด้วย Electro-thermal battery model ของแบตเตอรี่ Li-ion เพื่อปรับใช้กับ Battery energy storage system โดยเก็บข้อมูล Data set ด้วยผลการทดลองคือ 1) Constant current constant voltage charge test 2) Constant current discharge test 3) Pulse discharge test โดย Input ของโมเดลคือ แรงดันแบตเตอรี่ กระแสที่ถูกดึงออกจากแบตเตอรี่และอุณหภูมิที่แกนกลางโดยโมเดลที่แตกต่างกันออกไปถึง 7 โมเดล โดยโมเดลที่มีความแม่นยำที่สุดเมื่อใช้ทำนายในงานประเภท Real time คือ Moving-Average ที่มีค่า R^2 ถึง 0.999302[14]

การทำ Cell balance เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญเพราะเป็นการช่วยเพิ่ม Lifetime ของแบตเตอรี่เนื่องเนื่องผลกระทบของแรงดันแบตเตอรี่ที่ไม่เท่ากันได้ Hemavathi ได้ทำการศึกษาและสรุปหลักการทำงาน ข้อดีและข้อด้อยของแต่ละ Cell balancing method ไว้ในปี ค.ศ. 2020 โดยได้แบ่งชนิดออกเป็น Passive balance และ Active balance

Passive balance เปรียบเสมือนการนำกระแสไฟฟ้าจากแรงดันของแบตเตอรี่ที่สูงกว่าตัวต่ำที่สุดไปจ่ายให้กับ Shunt resistor เพื่อลดความจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ลงมา วิธีนี้จะเกิด Loss

อย่างแน่นอนจึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ใช้ได้เฉพาะสถานะ Charge เท่านั้นและใช้เวลาในการ Balancing นานกว่าแรงดันจะเท่ากัน แต่ข้อดีของวิธีนี้คือ วงจรมีความง่ายไม่ซับซ้อน ใช้อุปกรณ์แค่ Shunt resistor และ MOSFET ตามจำนวนของเซลล์แบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกัน

Active balance เป็นวิธีที่ยุ่งยากวงจรมีความซับซ้อนแต่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพกว่า Passive balance การ Wiring กับ Programming ความยากง่ายจะสวนทางกันเช่น ถ้าเลือกวิธีที่เดินสายไฟง่าย การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมจะยาก เป็นต้น หลักการทำงานคือ การนำเซลล์ที่มีแรงดันสูงกว่าเซลล์อื่นไปชาร์จตัวที่มีแรงดันต่ำกว่าโดยอุปกรณ์ที่ใช้ชาร์จแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ 1) Capacitor(C) เป็นอุปกรณ์ที่เกิด Loss น้อยที่สุดจึงทำให้ใช้อุปกรณ์น้อยตามไปด้วยเพราะไม่ต้องป้องกันการสูญเสีย Loss หลักการคือนำเซลล์ที่มีแรงดันสูงไปชาร์จประจุที่ C แล้วจึงนำไปชาร์จเซลล์ที่มีแรงดันต่ำ 2) Inductor หรือตัวเหนี่ยวนำ เป็นอุปกรณ์ที่มีความไวในการทำ Balancing แต่จะเกิด Loss จากการสูญเสียสนามแม่เหล็กจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน หลักการคล้ายกับ C แต่ตัวเหนี่ยวนำจะสะสมพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็ก 3) Transformer หรือหม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวในการทำ Balancing เช่นกัน และยังสามารถเกิด Loss จากการสูญเสียสนามแม่เหล็กได้อีกเช่นกัน แต่ข้อดีคือสามารถนำเซลล์ที่มีแรงดันสูงกว่าตัวต่ำสุดทั้งหมดชาร์จให้ตัวต่ำสุดได้ ซึ่งแตกต่างจาก C และตัวเหนี่ยวนำเพราะสองอุปกรณ์นั้นจะทำการชาร์จเซลล์ต่อเซลล์ และยังสามารถนำเซลล์ที่มีแรงดันสูงสุดไปชาร์จให้มีแรงดันที่ต่ำกว่าได้ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Pack to cell และ Cell to pack ตามลำดับ[5]

Mars และคณะได้ทำการเปรียบเทียบชนิดของเซลล์แบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งไว้ในปี ค.ศ. 2017 ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ Li-ion (NI-MH, NI-Cd) และ Lead-acid โดยได้อธิบายถึงลักษณะของแบตเตอรี่โดยรวมก่อนคือแบตเตอรี่ที่ชาร์จซ้ำได้ถือเป็น Electrochemical cell ที่ให้พลังงานทางไฟฟ้าผ่านสารเคมีด้านในแบตเตอรี่ ซึ่งหลักๆ จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ 1) ขั้วบวกหรือ Positive electrode (Cathode) เป็นขั้วที่ยอมให้ Electron ไหลเข้าซึ่งจะทำให้เกิดกระแสในทิศสวนทางกับ Electron ไปหล่อเลี้ยงโหลด 2) ขั้วลบหรือ Negative electrode (Anode) เป็นขั้วที่ผลิต Electron 3) Electrolyte เป็นสารละลายชนิดหนึ่งที่สามารถให้การนำไฟฟ้าของ Electron ระหว่าง Cathode และ Anode ได้ และอธิบายถึงเซลล์แต่ละประเภทโดย Li-ion ที่ขั้ว Cathode จะประกอบไปด้วยสาร Lithiated metal oxide และขั้ว Anode เป็น Graphitic carbon โดยมี Separator เป็นตัวกั้นระหว่าง Electrolyte ระหว่าง Cathode และ Anode แต่จะสามารถยอมให้อิออนผ่านไปได้ การทำงานคือ Li atom จะกลายเป็น ลิเทียมไอออนและเคลื่อนย้ายจาก Cathode ไป Anode ในสถานการณ์ชาร์จส่วนการ Discharge จะมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกัน ข้อดีของ Li-ion คือมี Energy density สูง Lead-acid ที่ขั้วลบจะประกอบไปด้วย Metal lead ส่วนขั้วบวกจะเป็น Lead dioxide หลักการคือการรวมตัวกันใหม่ของ Oxygen โดยใช้

Electrolyte ที่เคลื่อนที่ไม่ได้ Oxygen จะกำเนิดที่ขั้วบวกในระหว่างการอัดประจุและจะกระจายไปที่ขั้วลบ ส่วนการคายประจุจะเกิดปฏิกิริยาที่ตรงข้ามกัน และ Nickel battery มีสองประเภทคือ NiCd และ NiMH ในส่วนของ NiMH ที่ขั้วบวกคือ Nickel hydroxide สารละลาย Electrolyte คือ Potassium hydroxide และขั้วลบคือ Hydrogen-absorbing alloy ส่วน NiCd จะมีองค์ประกอบเหมือนกันกับ NiMH ทุกอย่างยกเว้นขั้วลบที่ใช้ Cadmium hydroxide แทน NiMH จะมีความจุมากกว่า NiCd 2 ถึง 3 เท่า ซึ่งเกือบจะเท่ากับ Li-ion แต่ C-rate จะน้อยกว่า NiCd ซึ่งข้อดีของ NiCd คือมี C-rate สูง สามารถ Supply โหลดที่มีกำลังไฟฟ้าสูงได้ และยังสามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็ว แต่ข้อเสียคือ สาร Cadmium เป็นสารที่มีอันตรายต่อมนุษย์ที่เป็นสาเหตุของโรคมะเร็งหรือโรคไต-อิตาลีได้ ซึ่ง NiMH มีความปลอดภัยต่อการใช้งานมากกว่าเพราะไม่มีสารพิษ[15]

ในปีค.ศ. 2019 Seyed ได้หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแบตเตอรี่ Lithium Titanate Oxide (LTO) โดยได้ใช้แบบจำลองไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วย แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ Open Circuit Voltage (OCV) ตัวต้านทานภายใน และ RC network 2 วงจร ที่ใช้อธิบายถึงการกลับคืนมาของแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ทั้งถูกดึงกระแสในระยะเวลาสั้นและระยะยาว ซึ่งการหาความสัมพันธ์ระหว่าง OCV-SOC ค่าความต้านทานภายใน ค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุในวงจร RC network จะหาได้จากการทดลอง Pulse current discharge testing เมื่อทราบค่าทั้งหมดแล้วก็จะสามารถหาสมการสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ [7]

2.6 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน แบตเตอรี่และ Battery management system หรือ BMS โดยได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโดรนและแบตเตอรี่ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินระยะเวลาในการบินได้ และได้ทำการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ที่มีในอดีตจนถึงแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งเหตุผลที่เลือกใช้แบตเตอรี่ Li-ion เพราะมีประสิทธิภาพสูงสุดเช่น Cycle-life สูงทำให้มีอายุการใช้งานได้นาน Self-discharge ต่ำทำให้การเก็บรักษาแบตเตอรี่เมื่อไม่ได้ใช้งานจะคงแรงดันไว้ ณ ขณะที่ทำการอัดประจุ Power density สูงและมีแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่าแบบอื่นที่สูงสุดถึง 4.2 V ต่อ 1 เซลล์ ซึ่งเป็นข้อดีที่เห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่เทคโนโลยีเก่า ทำให้ในการแพ็คแบตเตอรี่ที่ระบบแรงดันสูง ๆ จะทำให้ใช้จำนวนในการต่ออนุกรมกันน้อยลง โดยแบตเตอรี่ Li-ion ยังสามารถแบ่งประเภทสารเคมีขั้ว Cathode โดยสารเคมีที่จะเลือกใช้ คือ ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์หรือ NCA และส่วนที่สำคัญที่สุดในการใช้งานแบตเตอรี่ทั้งทางด้านอัดประจุและคายประจุคือ BMS ซึ่งจะคอย monitoring แรงดัน กระแส

และอุณหภูมิในขณะที่ใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้แบตเตอรี่เกิดปรากฏการณ์ Thermal runaway ซึ่งเป็นอันตรายต่อแบตเตอรี่และตัวผู้ใช้งานเอง โดยจะเลือกรุ่นที่หาง่ายและเป็นที่ยอมรับในท้องตลาดคือ Digital multi-cell single port Wired PCM BMS



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับโดรนการเกษตร ซึ่งจะเริ่มจากศึกษาข้อมูลพื้นฐานของโดรนก่อนแล้วจึงทำการศึกษาแบตเตอรี่ลูกเดิมที่โดรนใช้อยู่ หลังจากนั้น จะทำการออกแบบบรรจุภัณฑ์ให้กับแบตเตอรี่โดยใช้โปรแกรม Solidwork แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่อง 3D Printer และ Laser cut หลังจากนั้นจะทำการแพ็คแบตเตอรี่ที่เลือกใช้ให้มีการต่อที่เหมาะสมกับโดรนการเกษตร

3.2 โดรนการเกษตร SB1

โดรนถือเป็นเงื่อนไขหลักในการออกแบบแบตเตอรี่ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความต้องการที่อุปกรณ์ภายในโดรนที่จะสามารถรับได้ อาทิเช่น แรงดันไฟฟ้าที่โดรนจะสามารถรับได้ หรือน้ำหนักรวมทั้งหมดที่โดรนจะบรรทุกได้ เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จำเป็นต่อการออกแบบเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อวงจรไฟฟ้าภายในหรืออุบัติเหตุจากการที่โดรนรับน้ำหนักเกิน



รูปที่ 3.1 โดรนการเกษตร SB1

3.2.1 ข้อมูลพื้นฐานของโดรนการเกษตร SB1

โดรนการเกษตร SB1 ระบบ 48 V ดังรูปที่ 3.1 เป็นโดรนที่มีถังน้ำสำหรับบรรจุปุ๋ย น้ำได้ 20 ลิตร ซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ X9 Power System 110KV ดังรูปที่ 3.2 เป็นจำนวน 6 ตัว โดยที่แรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่รับ 52.2 V กระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้สูงสุด 720 A และพิกัดได้นานเป็นเวลา

10 วินาที ได้ถึง 900 A ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุดที่ 5742 RPM และจากการขับเคลื่อนด้วยใบพัดทั้ง 6 ตัวจะทำให้สามารถสร้างแรงยกได้สูงสุดอยู่ที่ 115.2 kgf แต่แรงยกที่ทางผู้ผลิตแนะนำจะอยู่ที่ 42-57 kgf โดยในการชั่งน้ำหนักของโดรนด้วยตราชั่งจะใช้ไม้รองขาของโดรนซึ่งมีน้ำอยู่ที่ 1.6 kg ซึ่งเมื่อชั่งแล้วจะได้น้ำหนักรวมทั้งหมดยุติที่ 21.8 kg จะทำให้ทราบว่าน้ำหนักของโดรนที่แท้จริงจะอยู่ที่ 20.2 kg ดังรูปที่ 3.3 จากน้ำหนักที่ชั่งได้ ภารกิจของโดรนที่จะบรรจุปุ๋ยน้ำ ปริมาตร 20 ลิตร รวมเป็น 40.2 kg และความสามารถของมอเตอร์ที่สร้างแรงยกได้ 42-57 kgf จะทำให้สามารถออกแบบแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักได้ไม่เกิน 16.8 kg



รูปที่ 3.2 BLDC motor X9 Power System 110KV.



รูปที่ 3.3 การชั่งน้ำหนักโดรน

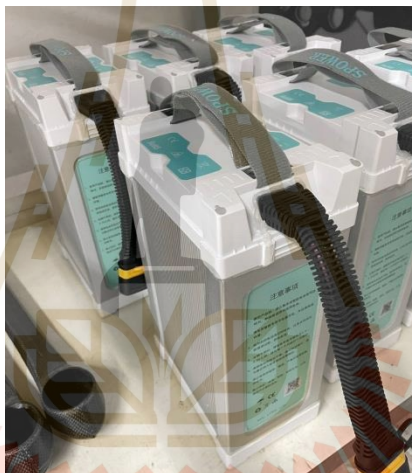
3.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือเป็นส่วนสำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานให้กับโดรน โดยจัดเป็นอุปกรณ์ประเภท Electrochemical คือ อุปกรณ์ที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีแปลงเป็นพลังงานทางไฟฟ้าให้กับโหลด โดย

ในการเลือกชนิดแบตเตอรี่จะมีความสำคัญที่จะอำนวยความสะดวกในการใช้และความปลอดภัย ซึ่งแบตเตอรี่ที่กำลังเป็นที่นิยมคือแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน

3.3.1 ข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ปัจจุบัน

แบตเตอรี่ที่ใช้ปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ของแบรนด์ OK Cell ขนาด 175x290x110 มม. น้ำหนัก 8.4 kg ดังรูปที่ 3.4 ที่มีแรงดัน Nominal voltage อยู่ที่ 51.8 V ซึ่งภายในเคสแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วยแบตเตอรี่ LI-PO ชนิด Pouch cell ต่ออนุกรมกันอยู่ 14 เซลล์ โดยมีความจุอยู่ที่ 28 Ah และดึงกระแสสูงสุดได้ 20C การใช้งานในปัจจุบันจะมีแบตเตอรี่อยู่ทั้งหมด 6 ลูก เมื่อแบตเตอรี่ที่ถูกบินด้วยโดรนถูกใช้งานหมด จะสลับลูกสำรองมาใช้แทนและนำแบตเตอรี่ทั้งหมดไปชาร์จประจุแบบนี้ ซึ่งราคาต่อก้อนจะอยู่ที่ \$859 หรือแปลงเป็นราคาไทยอยู่ที่ 29,867 บาท (แปลงราคา ณ วันที่ 2/3/2566)



รูปที่ 3.4 OKCell Battery 14S 28Ah 20C

3.3.2 แบตเตอรี่ใหม่ที่จะเลือกใช้

จากการศึกษาข้อมูลทั้งแบตเตอรี่แบบเก่าและแบบใหม่ แบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออนมีความน่าสนใจที่สุด เนื่องจากมีที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูง Cycle-life สูง Self-discharge ต่ำ และ Thermal runaway ที่สูง แต่เนื่องจากสถานการณ์ความนิยมรถไฟฟ้าในปัจจุบันผนวกกับกฎหมายด้านการนำเข้าทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมนั้น หายากขึ้น จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์หรือ NCA ของแบรนด์ Lishen รุ่น LR2170LA ดังรูปที่ 3.5 เป็นแบตเตอรี่ชนิด Cylindrical cell ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 4.2 V ซึ่งสามารถใช้งานได้ถึง 2.5 V ทำให้เหมาะแก่การแพ็คให้ได้ระบบ 48 V ความจุของแบตเตอรี่จะอยู่ที่ 4 Ah กระแสที่ใช้งานได้สูงสุดจะอยู่ที่ 45A และมีราคา 109 บาทต่อเซลล์



รูปที่ 3.5 Lishen LR2170LA

3.3.3 ข้อมูลของ BMS ที่จะเลือกใช้

เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากกับแบตเตอรี่เพราะเป็นอุปกรณ์ที่คอยดูแลจัดการเกี่ยวกับการอัดประจุหรือคายประจุ ซึ่งการอัดหรือคายประจุที่เกินขีดจำกัดของแบตเตอรี่จะนำไปสู่การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่และอันตรายต่อตัวผู้ใช้งานได้ ซึ่ง BMS ที่เลือกใช้จะเป็นของแบรนด์ Jikong BMS รุ่น JK-B2A24S15P ดังรูปที่ 3.6 โดยมีคุณสมบัติคือ สามารถกำหนดรูปแบบการแพ็คแบบอนุกรมได้ตั้งแต่ 7-24 เซลล์ ทนกระแสไฟได้ถึง 300 A และกระแสต่อเนื่องได้ถึง 150 A มีวงจร Active balance อยู่ที่ 2 A โดยมีราคารวมปุ่ม Power switch และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิอยู่ที่ 3800 บาท



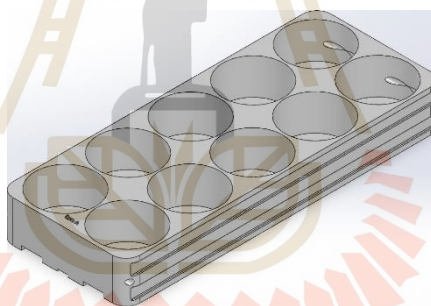
รูปที่ 3.6 Jikong BMS JK-B2A24S15P

3.3.4 ออกแบบการแพ็คแบตเตอรี่ให้มีแรงดันเท่ากับระบบ 48V

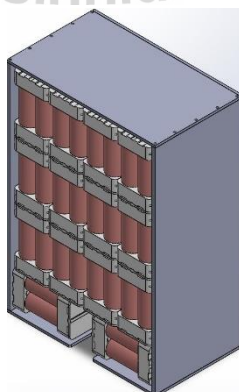
การที่จะแพ็คแบตเตอรี่ให้มีระบบแรงดันเท่าเดิม จะต้องรู้สเปคแรงดันแบตเตอรี่ที่จะเอามาแพ็คก่อน ซึ่งแบตเตอรี่ LS2170LA ที่เลือกใช้ จะมีช่วงการใช้งานอยู่ที่ 4.2 – 2.5 V ทำให้จำเป็นต้องต่ออนุกรมกันทั้งหมด 14 เซลล์ ซึ่งจะทำให้มีช่วงการใช้งานอยู่ที่ 58.8 – 35 V และจะต่อขนานกัน 10 เซลล์ เพื่อให้มีความจุเป็น 40 Ah จะทำให้ Battery case มีขนาดเท่า ๆ เดิม ซึ่งจะทำให้มีความจุเพิ่มขึ้นมา 42.86% ซึ่งจากการออกแบบจะทำให้ราคาแบตเตอรี่ทั้งหมดอยู่ที่ 15,260 บาท รวมกับราคาของ BMS จะทำให้ราคาทั้งหมดอยู่ที่ 19,060 บาท ทำให้แบตเตอรี่ที่ประกอบใหม่มีราคาต่ำกว่า 36.47%

3.3.5 ออกแบบ Battery holder และ Battery case ด้วยโปรแกรม Solid work

เนื่องจากแบตเตอรี่ LS2170LA มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 มม. จึงได้ทำการออกแบบ Battery holder ดังรูปที่ 3.7 ที่สามารถบรรจุ LS2170LA ได้เป็นจำนวน 10 เซลล์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 46x115x15 มม. และทำการออกแบบ Battery case ให้มีขนาด 200x293x118 มม. เพื่อให้สามารถบรรจุแบตเตอรี่ที่จะทำการแพ็คได้ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 Battery holder



รูปที่ 3.8 Battery case

3.3.6 การขึ้นรูปชิ้นงานที่ออกแบบ

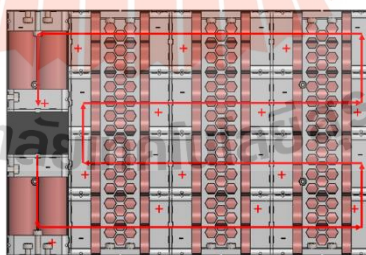
Battery holder จะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุ PLA+ ของแบรนด์ eSun เป็นจำนวนทั้งหมด 28 ชิ้น และ Battery case จะใช้แผ่นอะคริลิกความหนา 3 และ 5 มม. ตัดด้วยเครื่อง Laser cut และการยึดจะใช้สกรู M3 ในการยึด โดยจะทำการต๊าปเกลียวใน

3.3.7 การประกอบ การแพ็คและการต่อสายต่าง ๆ

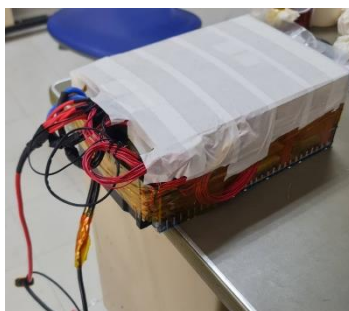
เริ่มต้นจากการแพ็คแบตเตอรี่ 1 Segment ด้วย Battery holder ต่อขนานกันเป็นจำนวน 10 เซลล์ ให้ได้ทั้งหมด 14 Segments ก่อดังรูปที่ 3.9 โดยใช้เครื่อง Spot welding หลังจากนั้นจะทำการต่ออนุกรมกันทั้งหมด 14 Segments เพื่อให้ได้ระบบ 48V ดังรูปที่ 3.10 และทำการนำแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันใส่ลงไปใน Battery case ที่ถูกประกอบและยึดด้วยสกรู M3 และติดตั้ง BMS ได้ดังรูปที่ 3.11 เป็นอันเสร็จสิ้น ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักทั้งหมด 11.8 kg ทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมา 40.48%



รูปที่ 3.9 1 Segment (1 Serie 10 Parallels)



รูปที่ 3.10 14 Segments (14 Series 10 Parallels)



รูปที่ 3.11 Install BMS to Battery

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอข้อมูลของโครงการเกษตรที่จะทำการแพ็คแบตเตอรี่ให้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ล้วนมีความสำคัญต่อการออกแบบแบตเตอรี่ โดยในตอนที่ 2 จะนำเสนอถึงวิธีการออกแบบและการต่อแบตเตอรี่ซึ่งเป็นหัวข้อหลักในบทนี้ การต่อแบตเตอรี่ควรจะทำด้วยความระมัดระวัง ซึ่งอันตรายของแบตเตอรี่ประเภท Li-ion คือมีความสามารถในการจ่ายกระแสได้สูงมาก ถ้าเกิดทำเซลล์แบตเตอรี่ลัดวงจรกันจะเกิดความเสียหายต่อแบตเตอรี่และที่สำคัญยังเป็นอันตรายต่อตัวผู้แพ็คแบตเตอรี่เอง ดังนั้น จึงควรระมัดระวัง ไม่ควรสวมใส่เครื่องประดับที่นำไฟฟ้าได้ เมื่อต้องการจะแก้ไขเซลล์ใด ๆ ก็ตาม ควรจะหาเทปหรือวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้ามาปิดกั้นเซลล์แบตเตอรี่อื่นก่อน

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบโตรนและแบตเตอรี่โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการทดสอบภาคห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม โดยในการทดสอบภาคห้องปฏิบัติการจะเป็นการทดสอบเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าที่โตรนต้องการซึ่งจะได้จากการทดสอบมอเตอร์และใบพัด การทดสอบเปรียบเทียบแบตเตอรี่ระหว่าง Li-PO กับ NCA การหาค่า Peukert's constant และการจำลองการคายประจุของแบตเตอรี่

ส่วนการทดสอบภาคสนามจะเป็นการทดสอบเกี่ยวกับระยะเวลาในการบินของโตรนซึ่งจะทำการบินจริงด้วยแบตเตอรี่ Li-PO และ NCA ด้วยโปรไฟล์การบินต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการบินของแบตเตอรี่ทั้งสองชนิด

4.2 การทดสอบภาคห้องปฏิบัติการ

การทดสอบภาคห้องปฏิบัติการ จะใช้เครื่องทดสอบแบตเตอรี่ Chroma model 17020 Regenerative Battery Test System ดังรูปที่ 4.1 เป็นเครื่องมือในการอัดประจุและคายประจุซึ่งสามารถกำหนดโปรไฟล์ได้หลายรูปแบบและบันทึกผลทุก ๆ 1 วินาที



รูปที่ 4.1 Chroma model 17020 Regenerative Battery Test System

ในการทดสอบกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงยกของใบพัดเพื่อที่จะสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองโดยผลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประเมินระยะเวลาการบินจากภาระโหลดที่แตกต่างกันได้ ซึ่งเครื่องที่ใช้ทดสอบคือ RCBenchmark 1780 test stand ดังรูปที่ 4.2 ที่จะใช้เก็บข้อมูลแรงยกจากใบพัด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟจากแบตเตอรี่



รูปที่ 4.2 RCBenchmark 1780 test stand with BLDC motor, propeller, and battery.

4.2.1 การทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงยกของโรตอร์ในภาคห้องปฏิบัติการ

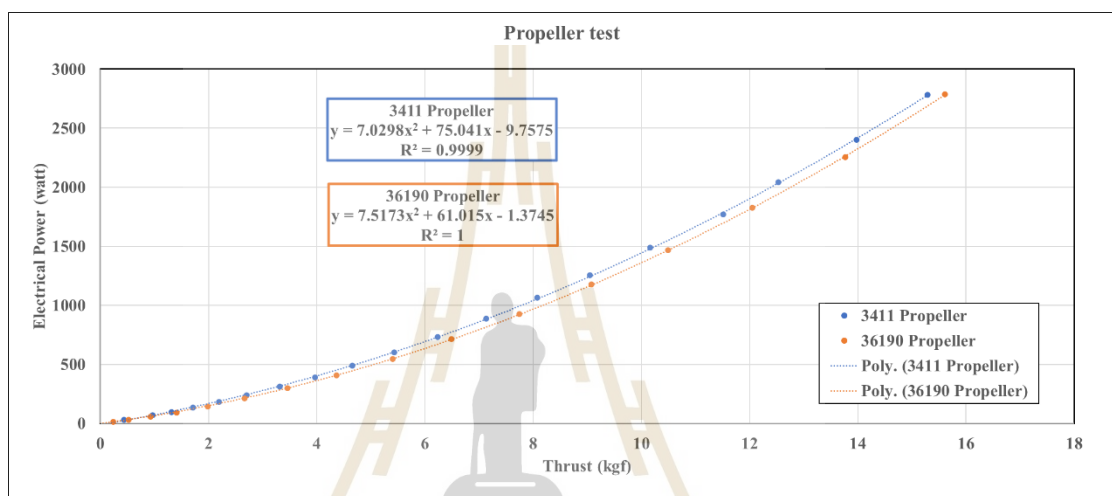
ในการทดลองจะใช้มอเตอร์แบบเดิมที่ติดอยู่กับตัวโรตอร์แต่ใบพัดจะใช้ใบพัดสองชนิดคือใบพัดเดิมที่โรตอร์ใช้ในการบินเป็นประจำ 3411 Hobbywing Propeller และใบพัดชนิดใหม่ที่ไม่เคยใช้ คือ 36190 Hobbywing Propeller ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีข้อแตกต่างกันในเรื่องของความยาวและมุมพิทของใบพัด



รูปที่ 4.3 3411 Propeller and 36190 Propeller.

(ที่มา: image.made-in-china.com)

โดยในการทดลองจะทดลองแรงยกจาก 0 kgf จนถึง 15 kgf เนื่องจากเครื่องที่ใช้ทดสอบรับ โหลดแรงยกได้เพียง 20 kgf ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยจากผลการทดลองจะใช้สมการ Polynomial order 2 ในการ Fit curve ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงยกซึ่งมีค่า R-square อยู่ที่ 0.99 และ 1 แสดงว่าสมการที่ได้มามีความน่าเชื่อถือ และอีกหนึ่งจุดสังเกตคือ ที่แรงยกเท่ากัน ใบพัด 36190 จะกินกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าใบพัด 3411 โดยการกินกำลังไฟฟ้าที่น้อยกว่าจะสามารถเพิ่มระยะเวลาในการบินได้

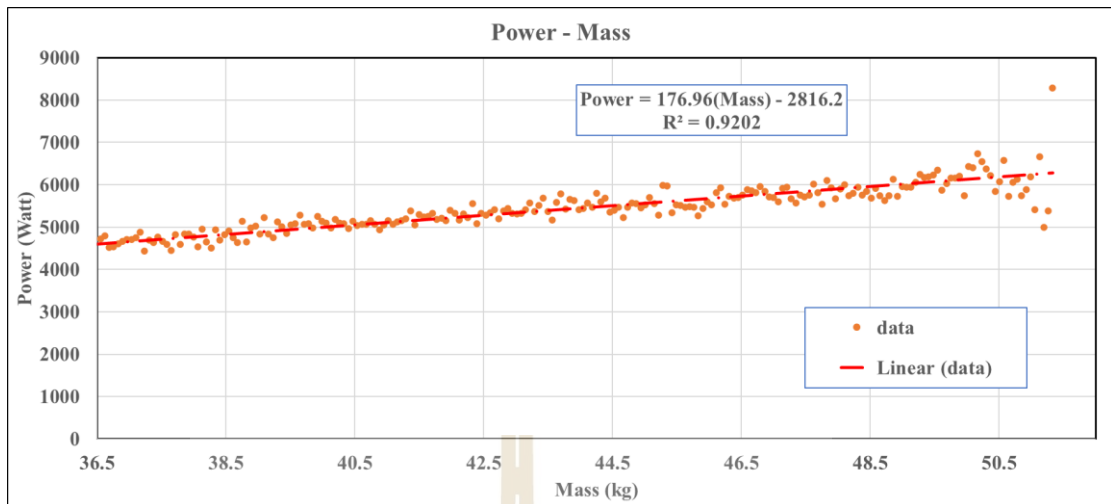


รูปที่ 4.4 Electrical Power and Thrust of propeller test with test stand.

4.2.2 การทดสอบกำลังไฟฟ้าที่โดรนต้องการเทียบกับแรงยกที่มอเตอร์สร้างได้

ภาคสนาม

ในการทดสอบภาคสนามจะใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแบตเตอรี่ที่ถูกดึงด้วยโดรน ซึ่งจะนำโดรนขึ้นบินโดยบรรทุกน้ำปริมาตร 22 ลิตร แล้วทำการสเปรย์น้ำออกเพื่อลดน้ำหนักลง โดยจะจับเวลาในการสเปรย์น้ำเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำเพื่อคำนวณหา mass flow rate โดยมีค่าเป็น 0.06875 kg/sec โดยจะใช้สมการ Linear ในการ Fit curve ซึ่งจะมีค่า R-square อยู่ที่ 0.92 แสดงว่าสมการที่ได้มามีความใกล้เคียงกับข้อมูล ดังรูปที่ 4.5



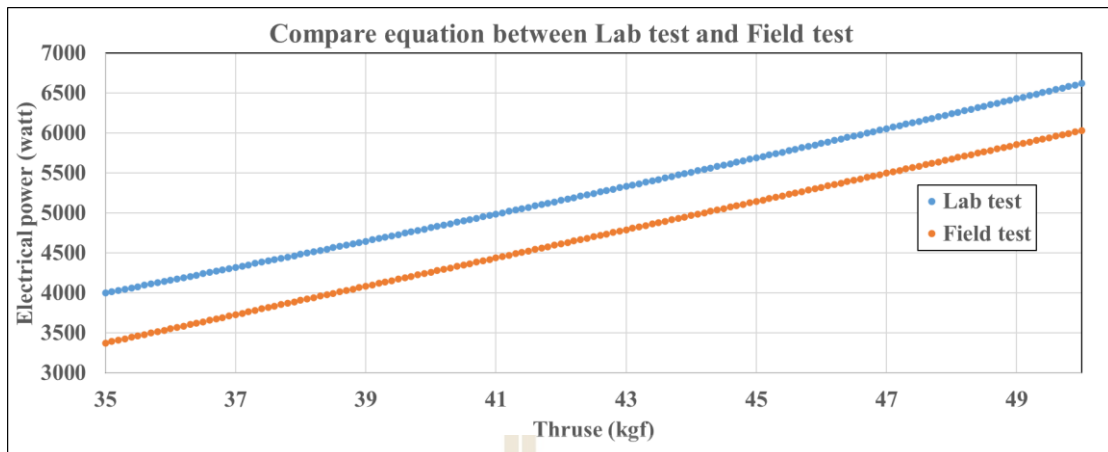
รูปที่ 4.5 Electrical Power and Thrust of propeller test with drone.

4.2.3 เปรียบเทียบผลของสมการจากภาคห้องปฏิบัติการกับภาคสนาม

เพื่อที่จะทดสอบความแม่นยำของทั้งสองการทดลอง จึงได้นำสมการที่ได้มาจากการ fit curve ของใบพัด 3411 มาเปรียบเทียบกับกันโดยกำหนดให้ค่า x เป็นแรงยกมีค่าตั้งแต่ 35 kgf จนถึง 50 kgf และค่า y เป็นกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการ เพื่อดูว่าทั้งสองสมการมีค่าต่างกันเท่าใดซึ่งสมการที่ 4.1 จะเป็นสมการของภาคห้องปฏิบัติการ ส่วนสมการที่ 25 จะเป็นของภาคสนาม โดยผลที่ได้คือค่า RMS มีค่าเป็น 199.92 watt และค่า MAE เป็น 69.02 watt โดยผลดังกล่าวจะแสดงดังรูปที่ 4.6

$$Y_{lab_test} = 6 \left(7.0298 \left(\frac{X}{6} \right)^2 + 75.041 \left(\frac{X}{6} \right) - 9.7575 \right) \quad (4.1)$$

$$Y_{field_test} = 176.96X - 2816.2 \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการคำนวณของทั้งสองสมการ

4.2.4 การทดสอบคายประจุไฟฟ้าคงที่ที่อัตรา C-rate ที่แตกต่างกันเพื่อหาค่า Peukert's constant

อีกหนึ่งสิ่งที่จะทำให้ผล Simulation สมบูรณ์ คือการหาค่า Peukert's constant ของแบตเตอรี่โดยการทดสอบคายประจุออกจากแบตเตอรี่ที่ C-rate ที่แตกต่างกัน โดยสมการที่อธิบายระยะเวลาในการดึงกระแสคือสมการที่ 26 โดย Q_0 คือความจุของแบตเตอรี่ I คือกระแสที่ดึง k คือ Peukert's constant และ t คือระยะเวลา ซึ่งจะเห็นการทดลองดังรูปที่ 4.7 แล้วทำการ fit curve ด้วยโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.8 โดยจะแบ่งการทดลองการคายประจุออกเป็น 10 การทดลองและ Validation 2 การทดลอง ซึ่งจะทำให้การต่อแบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ทำให้จะต้องทำการทดลองทั้งหมด 60 การทดลอง โดยแบ่งการต่อออกเป็น 1S1P 1S2P 1S3P 2S1P และ 3S1P โดยความหมายของ S และ P คือ จำนวนการต่ออนุกรมและการต่อขนานตามลำดับ เช่น 3S1P คือต่ออนุกรมกัน 3 เซลล์ ต่อขนาน 1 เซลล์ทำให้ระบบมีแรงดันสูงสุดที่ 12.6 V และความจุที่ 4 Ah และ 1S3P คือต่ออนุกรมกันแค่ 1 เซลล์ ต่อขนานกัน 3 เซลล์ ทำให้ระบบมีแรงดันสูงสุด 4.2 V และความจุ 12 Ah เป็นต้น โดยการทดลองจะทำให้ได้ค่า Peukert's constant ของแต่ละรูปแบบการต่อทั้งหมด 5 ค่า ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 โดยผลการทดลองไฮไลต์สีเหลืองจะเป็นผลการทดลองสำหรับการ Validation ส่วนไฮไลต์สีฟ้าคือค่า Peukert's constant ของแต่ละรูปแบบ

$$Q_0 = I^k t \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.1 การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S1P

1S1P				Peukert's Constant	Error (%)
No.	C-Rate	Current(A)	Measured time(hr)	1.014	
1	0.2	0.8	4.753411111	Simulated time	5.029115721
2	0.4	1.6	2.421736111		
3	0.5	2	1.885844444	1.980685744	5.029115721
4	0.6	2.4	1.60275		
5	0.8	3.2	1.18805		
6	1	4	0.962097222		
7	1.66	6.64	0.563038889		
8	2.32	9.28	0.399544444		
9	2.98	11.92	0.305772222		
10	3.31	13.24	0.274172222		
11	3.64	14.56	0.253625		
12	4.3	17.2	0.209636111		

ตารางที่ 4.2 การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S2P

1S2P				Peukert's Constant	Error (%)		
No.	C-Rate	Current(A)	Measured time(hr)	1.066			
1	0.2	1.6	4.675411111	Simulated time	1.884056519		
2	0.4	3.2	2.342738889				
3	0.5	4	1.860177778	1.825130977	1.884056519		
4	0.6	4.8	1.567338889				
5	0.8	6.4	1.159236111				
6	1	8	0.904113889				
7	1.66	13.28	0.506830556				
8	1.99	15.92	0.437780556				
9	2.32	18.56	0.367625			0.355456016	3.310162254
10	2.65	21.2	0.305286111				
11	2.98	23.84	0.275558333				
12	3.31	26.48	0.222475				

ตารางที่ 4.3 การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 1S3P

1S3P				Peukert's Constant			
No.	C-Rate	Current(A)	Measured time(hr)	1.057	Error (%)		
1	0.2	2.4	4.740302778	Simulated time			
2	0.4	4.8	2.394011111				
3	0.5	6	1.843725	1.805823808	2.055685762		
4	0.6	7.2	1.557				
5	0.8	9.6	1.130558333				
6	1	12	0.855236111				
7	1.1	13.2	0.690266667				
8	1.2	14.4	0.672272222				
9	1.3	15.6	0.609044444				
10	1.4	16.8	0.544091667			0.60817608	11.77823841
11	1.5	18	0.494711111				
12	1.6	19.2	0.479327778				

ตารางที่ 4.4 การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 2S1P

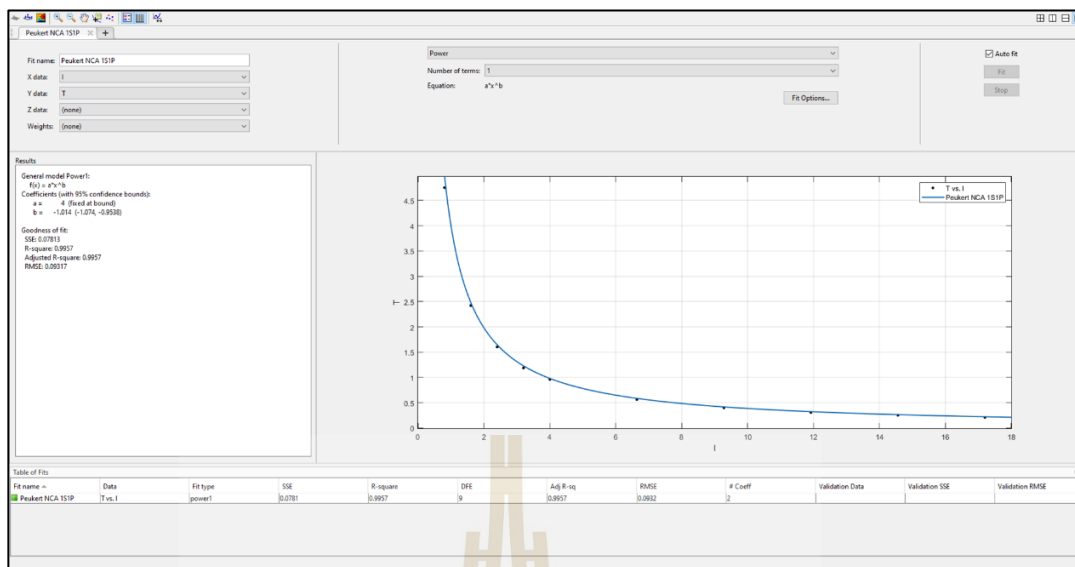
2S1P				Peukert's Constant			
No.	C-Rate	Current(A)	Measured time(hr)	1.02	Error (%)		
1	0.2	0.8	4.784155556	Simulated time			
2	0.4	1.6	2.380411111				
3	0.5	2	1.920966667	1.972465409	2.680876416		
4	0.6	2.4	1.589977778				
5	0.8	3.2	1.199833333				
6	1	4	0.954216667				
7	1.66	6.64	0.566327778				
8	2.32	9.28	0.408586111				
9	2.98	11.92	0.310183333				
10	3.31	13.24	0.278283333			0.286902443	3.097242547
11	3.64	14.56	0.253644444				
12	4.3	17.2	0.212966667				

ตารางที่ 4.5 การทดลองหาค่า Peukert's constant สำหรับ 3S1P

3S1P				Peukert's Constant	Error (%)		
No.	C-Rate	Current(A)	Measured time(hr)	1.022			
1	0.2	0.8	4.812327778	Simulated time	1.871465209		
2	0.4	1.6	2.394058333				
3	0.5	2	1.933547222				
4	0.6	2.4	1.581980556				
5	0.8	3.2	1.205882353				
6	1	4	0.945361111				
7	1.66	6.64	0.570377778				
8	2.32	9.28	0.405686111				
9	2.98	11.92	0.313169444				
10	3.31	13.24	0.281666667			0.285423988	1.33396039
11	3.64	14.56	0.254491667				
12	4.3	17.2	0.212177778				



รูปที่ 4.7 Set up battery for testing.



รูปที่ 4.8 Fit curve by MATLAB

โดยจากการทดลองและ fit curve จะทำให้ทราบค่า Peukert's constant อยู่ที่ 1.014 1.066 1.057 1.02 และ 1.022 สำหรับการต่อแบบ 1S1P 1S2P 1S3P 2S1P และ 3S1P ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 1.0358

4.2.5 การทดลองคายประจุไฟฟ้าแบบกำลังไฟฟ้าคงที่กับแบตเตอรี่ NCA ใน 1 เซลล์ เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาที่วัดได้กับระยะเวลาที่ประเมินได้

จากการทดสอบหาค่า Peukert's constant ก่อนหน้านี้เพื่อที่จะพิสูจน์สมการที่ 5-12 จะทำการทดลองคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ ทั้งหมด 3 การทดลองในแต่ละรูปแบบการต่อดังตารางที่ 4.5

การที่จะทำการจำลองคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ จะนำสมการที่ 5-12 ไปเขียนเป็นลอจิกใน MATLAB m file ดังรูปที่ 4.9 โดยจะนำเวลาในการจำลองกับเวลาที่คายประจุออกมาจริง ๆ มาคิดหาความคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าที่จะทดลองในแต่ละรูปแบบการต่อ

Connection	Power to test constant power discharging (watt)		
1S1P	17.5	27.5	37.5
1S2P	47.5	57.5	67.5
1S3P	20	30	40
2S1P	35	55	75
3S1P	52.5	82.5	112.5

```

1 %% SECTION TITLE
2 % DESCRIPTIVE TEXT
3 clc;clear;
4 cap_mah = 5000;
5 Peukert_constant = 1.049;
6 rating = 1;
7 Power = 5;
8 amount_of_series = 1;
9 dod = 0.8;
10 v_max = 4.03;
11 v_min = 2.5;
12 cap_ah = cap_mah / 1000;
13 v_sag_constant = (v_max - v_min) / dod * amount_of_series;
14 voltage = [v_max*amount_of_series];
15 current = [Power/voltage(size(voltage,2))];
16 cap = [(current(size(current,2))^(1-Peukert_constant))^(rating^(1-Peukert_constant))*(cap_ah*Peukert_constant)];
17 k1 = (v_max - v_min)/(dod*amount_of_series*cap(size(cap,2)));
18 %% calculation
19 timestep = 1/60/60;
20 i = 0;
21 while voltage(size(voltage,2)) > 2.51
22     voltage = [voltage (voltage(1) - (v_sag_constant/cap(1))*(cap(1) - cap(size(cap,2))))];
23     current = [current Power/voltage(size(voltage,2))];
24     cap = [cap ((current(size(current,2))^(1-Peukert_constant))^(rating^(1-Peukert_constant)))-sum(current.*timestep)];
25     i = i + 1;
26 end
27 ft = i*timestep;
28 time = [0 linspace(1,i,1)];
29 power_plot = ones(1,i+1).*Power;
30 fprintf('Total FT is %f hr\n',ft);
31 % plot

```

Command Window
Total FT is 2.703889 hr
f >>

รูปที่ 4.9 Peukert's law with MATLAB m file

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่โดยเปรียบเทียบเวลาจริงกับเวลาจากการประเมิน

1S1P					
Power(W)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	Measured time(hr)	Predicted time (hr)	Error (%)
17.5	7	4.166666667	0.752088889	0.716111	4.783728283
27.5	11	6.547619048	0.450294444	0.438056	2.717875958
37.5	15	8.928571429	0.320566667	0.317778	0.869917854
1S2P					
Power(W)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	Measured time(hr)	Predicted time (hr)	Error (%)
47.5	19	11.30952381	0.471002778	0.448611	4.754064909
57.5	23	13.69047619	0.354655556	0.347222	2.095992982
67.5	27	16.07142857	0.285769444	0.276111	3.379803066
1S3P					
Power(W)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	Measured time(hr)	Predicted time (hr)	Error (%)
20	8	4.761904762	1.886944444	1.877222	0.515248049
30	12	7.142857143	1.152413889	1.15	0.20946371
40	16	9.523809524	0.796116667	0.798056	0.243599137
2S1P					
Power(W)	I _{max} (A)	I _{min} (A)	Measured time(hr)	Predicted time (hr)	Error (%)
35	7	4.166666667	0.746197222	0.707222	5.223179752
55	11	6.547619048	0.455461111	0.44	3.394606199
75	15	8.928571429	0.326991667	0.319444	2.308213767

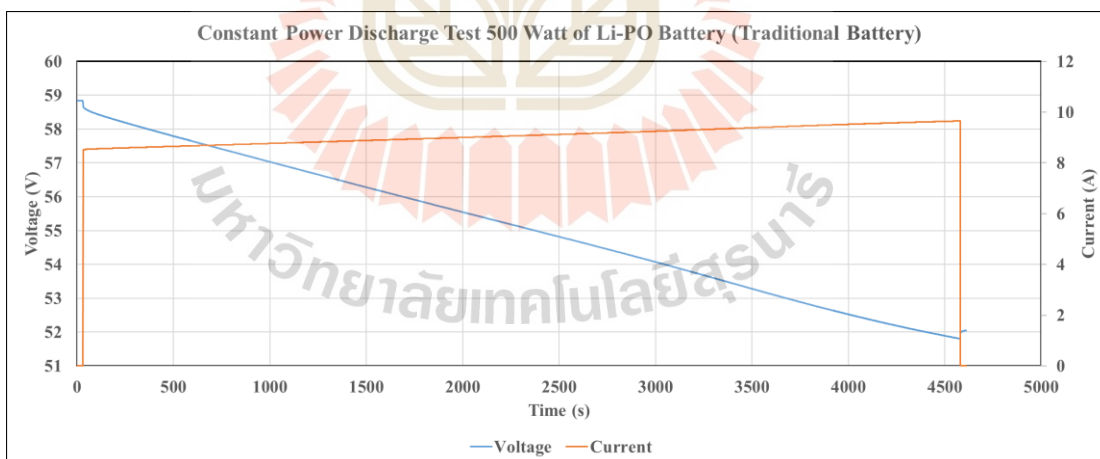
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการทดลองคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่โดยเปรียบเทียบเวลาจริงกับเวลาจากการประเมิน (ต่อ)

3S1P					
Power(W)	I_max (A)	I_min (A)	Measured time(hr)	Predicted time (hr)	Error (%)
52.5	7	4.166666667	0.751538889	0.708333	5.748989111
82.5	11	6.547619048	0.456741667	0.440833	3.483077597
112.5	15	8.928571429	0.320466667	0.316944	1.099230289

จากตารางที่ 4.7 จะพบว่า การทดสอบเพื่อหาค่า Peukert's constant ของแบตเตอรี่แต่ละประเภท จะทำให้สามารถใช้ Peukert's law ในการจำลองการคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยค่าความผิดพลาดมากที่สุดที่ 5.75% และน้อยสุดที่ 0.21% โดยความสำคัญของสมการเหล่านี้คือ เมื่อทราบสเปคของแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าคงที่ที่โหลดต้องการ ก็จะสามารถประเมินระยะเวลาได้ว่าแบตเตอรี่ลูกนั้นจะสามารถบินได้นานกี่นาที

4.2.6 ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ Li-PO

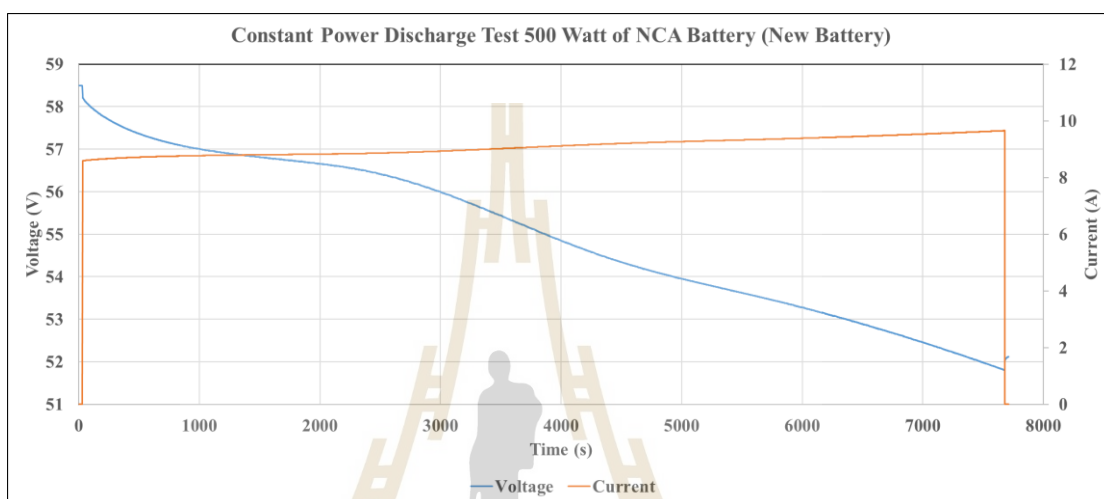
ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ Li-PO ซึ่งจะคายประจุจากแรงดัน 58.8 V ลดลงจนถึง 51.8 V แล้วทำการจับเวลา แบตเตอรี่ Li-PO สามารถคายได้ 1 ชั่วโมง 15 นาที 49 วินาที ความจุที่ดึงออกไปอยู่ที่ 11.464 Ah ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 Constant Power Discharge Test 500 Watt of Li-PO Battery

4.2.7 ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ NCA

ทดสอบคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ที่ 500 W กับแบตเตอรี่ NCA ซึ่งจะคายประจุจากแรงดัน 58.8 V ลดลงจนถึง 51.8 V โดยจะเช็คการทดลองให้เหมือนกับ Li-PO แล้วทำการจับเวลาแบตเตอรี่ NCA สามารถดึงได้ 2 ชั่วโมง 7 นาที 29 วินาที ความจุที่ดึงออกไปอยู่ที่ 19.3069 Ah ดังรูปที่ 4.11

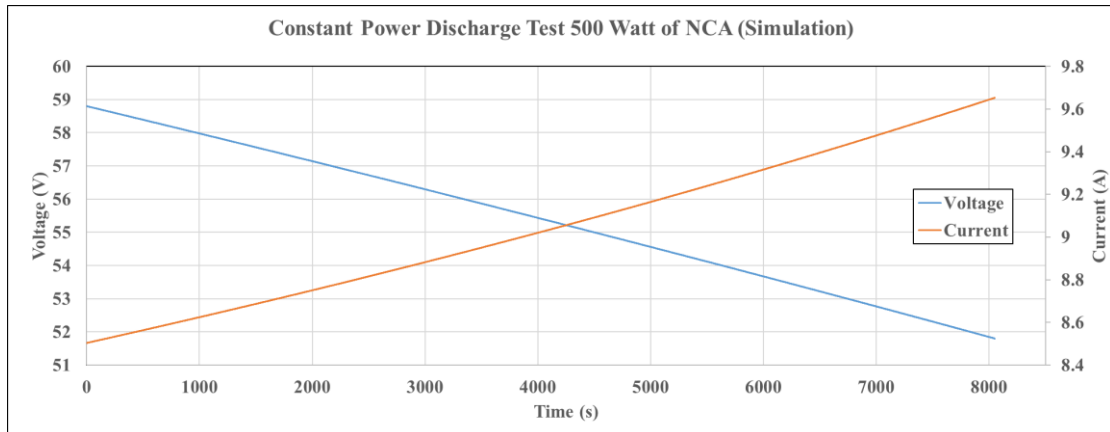


รูปที่ 4.11 Constant Power Discharge Test 500 Watt of NCA Battery

โดยจุดประสงค์ของการทดลองเพื่อจะหาระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นเมื่อคายประจุด้วยโปรไฟล์เดียวกัน ซึ่งแบตเตอรี่ NCA สามารถคายประจุได้เพิ่มมากขึ้น 7.8429 Ah คิดเป็น 68.41% และระยะเวลาเพิ่มขึ้น 51 นาที 40 วินาที คิดเป็น 68.14%

4.2.8 ประเมินระยะเวลาการคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ 500 W กับแบตเตอรี่ NCA

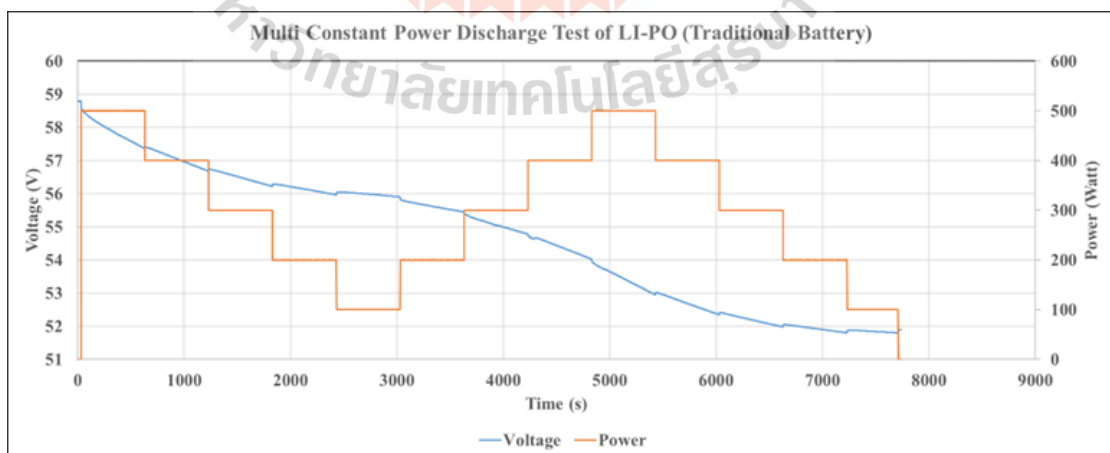
โดยจะเช็คโปรไฟล์ให้เหมือนกันโดยจะคายประจุจากแรงดัน 58.8 V จนถึง 51.8 V ซึ่งเวลาที่ประเมินได้จากการจำลองคือ 2 ชั่วโมง 14 นาที 10 วินาที ซึ่งมากกว่าความเป็นจริงอยู่ที่ 6 นาที 41 วินาที หรือคิดเป็นค่าผิดพลาดอยู่ที่ 5.24% โดยผลการจำลองจะแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 Simulation of Constant Power Discharge 500 Watt of NCA Battery

4.2.9 ทดสอบคายประจุแบบเป็น Pattern กับแบตเตอรี่ Li-PO

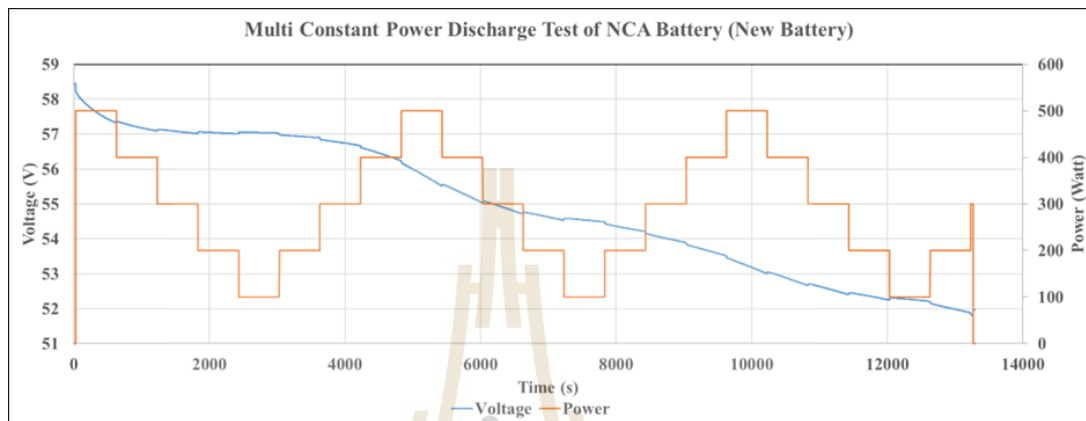
การคายประจุแบบมีรูปแบบหรือ Pattern จะเป็นจำลองโหลดที่แบตเตอรี่จะต้องเจอแบบที่หลากหลาย ซึ่งเปรียบเสมือนลักษณะการใช้งานของโดรนที่เมื่อเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่งจะมีโหลดที่แตกต่างกัน โดย Pattern ที่กำหนดคือ จะคายประจุจากแรงดัน 58.8 V ลดลงจนถึง 51.8 V ที่กำลังไฟที่คงที่จาก 500 W จนถึง 100 W โดยจะแบ่งช่วงออกเป็น 5 ช่วงคือ 500W 400W 300W 200W และ 100W ซึ่งในแต่ละช่วงจะคายประจุเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะถือว่าเป็นช่วงกลาง เมื่อคายประจุที่ช่วง 100W ครบ 10 นาที แล้วจะคายประจุในช่วงเดียวกันแต่จะสลับเป็นขาขึ้นแทนวนลูปอยู่แบบนี้จนกระทั่งแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงจนถึง 51.8 V ซึ่งระยะเวลาที่แบตเตอรี่ Li-PO ดึงได้จะอยู่ที่ 2 ชั่วโมง 7 นาที 58 วินาที ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 Multi Constant Power Discharge Test of LI-PO

4.2.10 ทดสอบคายประจุแบบเป็น Pattern กับแบตเตอรี่ NCA

ทำการทดลองคายประจุแบบเดียวกับการทดลอง 4.2.9. ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบตเตอรี่ NCA คือ 3 ชั่วโมง 40 นาที 35 วินาที ซึ่งมีระยะเวลาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ Li-PO อยู่ที่ 72.38% โดยผลลัพธ์จะแสดงดังรูปที่ 4.14



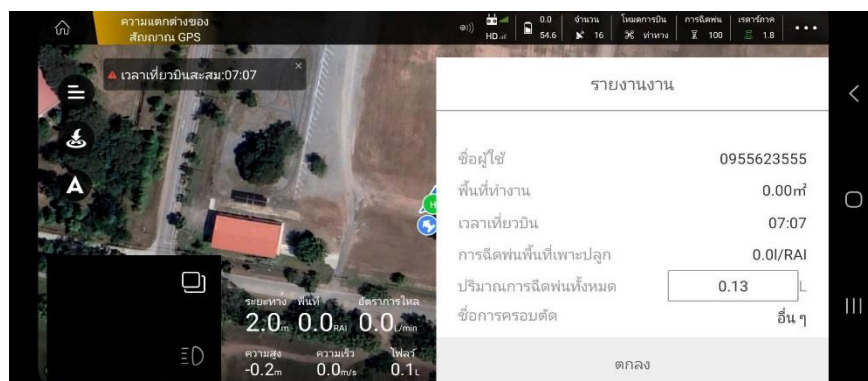
รูปที่ 4.14 Multi Constant Power Discharge Test of NCA

4.3 การทดสอบภาคสนาม

จะเป็นการทดสอบระยะเวลาในการบินของแต่ละแบตเตอรี่ด้วยโดรนการเกษตร SB1

4.3.1 ทดสอบบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ Li-PO

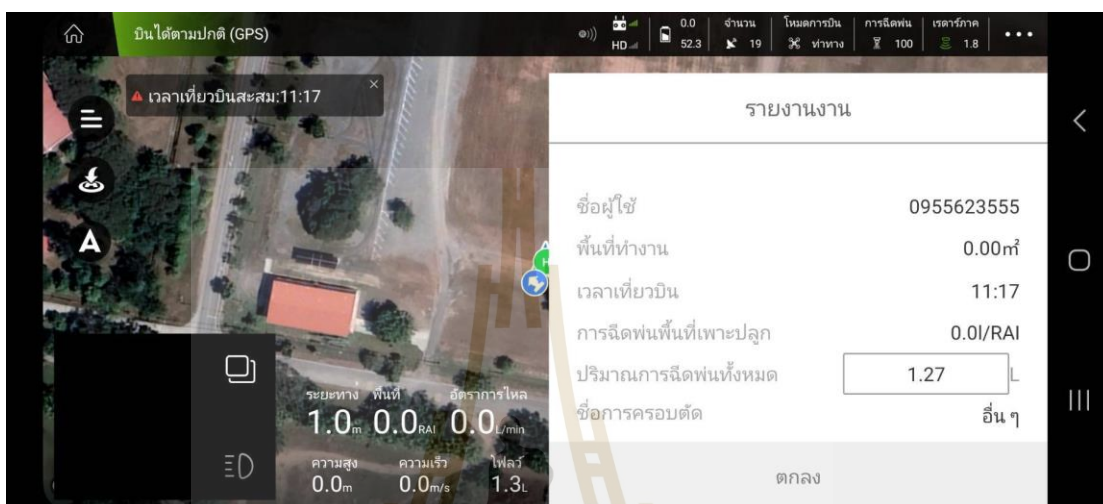
เป็นการทดสอบกับแบตเตอรี่ดั้งเดิม โดยจะให้โดรนบินขึ้นไปแล้วหยุดนิ่งกลางอากาศจาก แรงดันแบตเตอรี่ 61 V จนกระทั่งลดลงถึง 51.8 V ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้คือ โดรนสามารถบินได้ 7 นาที 7 วินาที ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 Flight time testing of Li-PO with Hovering and no-load conditions

4.3.2 ทดสอบบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ NCA

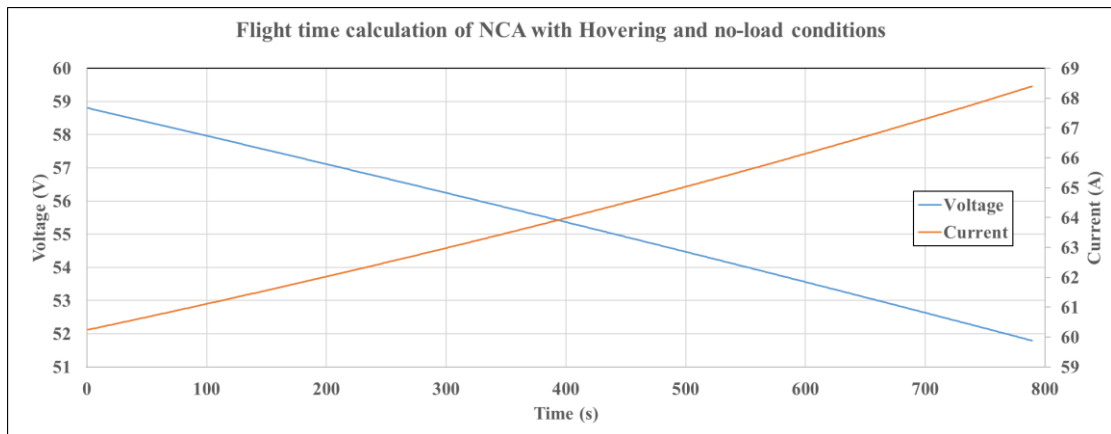
เป็นการทดสอบด้วยเงื่อนไขแบบเดียวกับการทดสอบ 4.3.1. แต่แรงดันแบตเตอรี่เริ่มต้นจะอยู่ที่ 58.8 V ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือโดรนสามารถบินได้ 11 นาที 17 วินาที ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ Li-PO อยู่ 4 นาที 10 วินาที โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 58.55%



รูปที่ 4.16 Flight time testing of NCA with Hovering and no-load conditions

4.3.3 จำลองค่ายประจุจากการบินโดรนแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ NCA

เนื่องจากการบินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศจะทำให้โดรนกินกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ ซึ่งจะสามารถระบุกำลังไฟฟ้าที่โดรนต้องการได้จากสมการที่ 24 ซึ่งจะคิดจากน้ำหนักของโดรน 20.2 kg และน้ำหนักของแบตเตอรี่ NCA 11.8 kg ทำให้มีน้ำหนักรวมอยู่ที่ 32 kg จึงทำให้โดรนต้องการกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 3542.52 watt โดยจากผลการประเมินคือ 13 นาที 8 วินาที ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งคาดเคลื่อนอยู่ 1 นาที 51 วินาที หรือคิดเป็น 16.4% โดยสาเหตุที่ผลการประเมินคลาดเคลื่อนเกิดได้จากหลายสาเหตุเนื่องจากการบินจริง ปัจจัยที่ส่งผลต่อกำลังไฟฟ้ามียหลายอย่าง เช่น ความเร็วลม ณ ขณะนั้น โหลดของอุปกรณ์ต่าง ๆ หรือโหลดของสายไฟ เป็นต้น



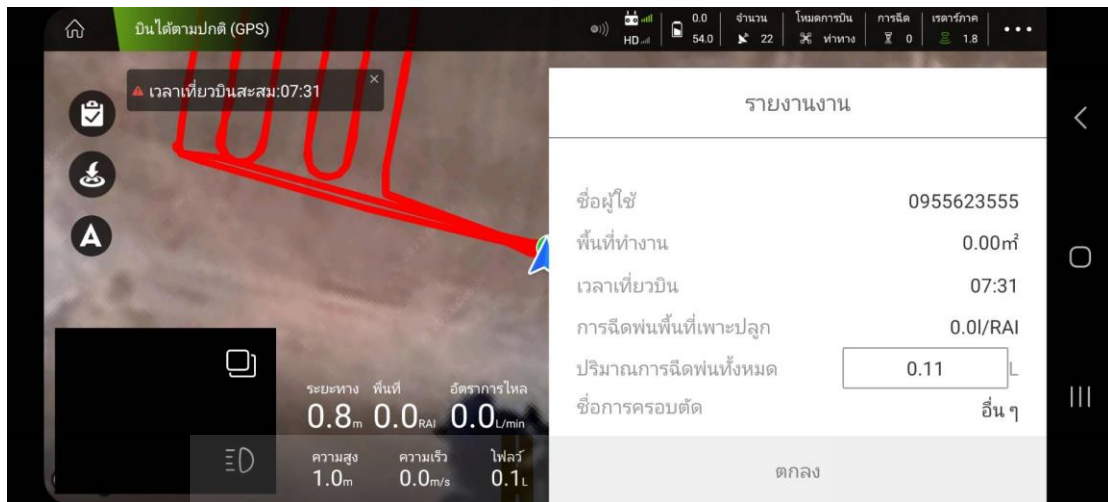
รูปที่ 4.17 Flight time calculation of NCA with Hovering and no-load conditions

4.3.4 ทดสอบบินโดรนแบบเคลื่อนที่โดยไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ Li-PO

การทดสอบเคลื่อนที่โดยไม่บรรทุกโหลดจะเป็นการบินโดยกำหนดจุดให้โดรนบินอัตโนมัติด้วยอัตราเร็ว 1 m/s ที่ความสูง 3 เมตร แบบเป็น Pattern ด้วยแรงดันแบตเตอรี่เริ่มต้นที่ 61 V ดังรูปที่ 4.18 เมื่อโดรนบินแบบเป็น Pattern เสร็จแล้ว โดรนจะบินกลับมาตำแหน่งที่โดรนทำการ Take off โดยจะให้โดรนบินแบบลอยตัวกลางอากาศ ณ ตำแหน่งนี้ จนกระทั่งแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 51.8 V จึงทำการ Landing โดยผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถบินได้ 7 นาที 31 วินาที ดังรูปที่ 4.19



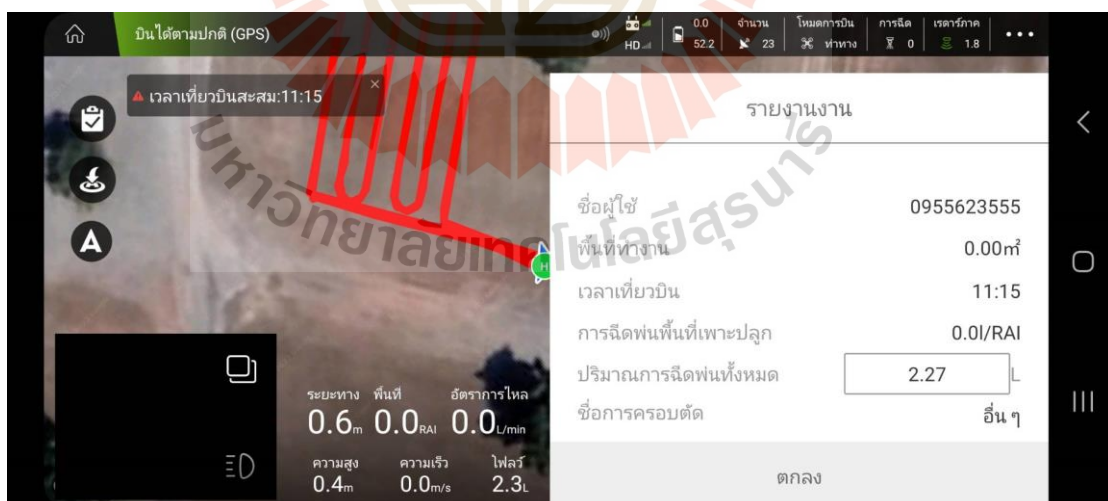
รูปที่ 4.18 Moving path for flight testing



รูปที่ 4.19 Flight time testing of Li-PO with Moving pattern and no-load conditions

4.3.5 ทดสอบบินโดรนแบบเคลื่อนที่โดยไม่บรรทุกโหลดด้วยแบตเตอรี่ NCA

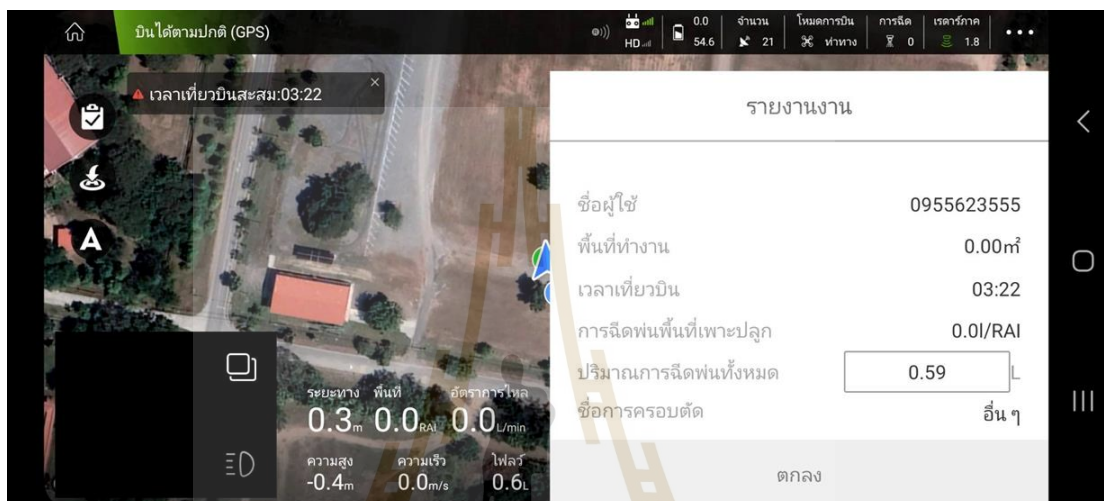
เป็นการบินโดรนโดยใช้โปรแกรมการทดลองแบบเดียวกับการทดลอง 4.3.4. แต่จะเปลี่ยนไปใช้แบตเตอรี่ NCA แทนโดยแรงดันแบตเตอรี่เริ่มต้นคือ 58.8 V ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือสามารถบินได้ 11 นาที 15 วินาที ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งมากกว่าแบตเตอรี่ Li-PO อยู่ 3 นาที 44 วินาที หรือคิดเป็น 49.67%



รูปที่ 4.20 Flight time testing of NCA with Moving pattern and no-load conditions

4.3.6 ทดสอบบินจริงกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำ ออกด้วยแบตเตอรี่ Li-PO

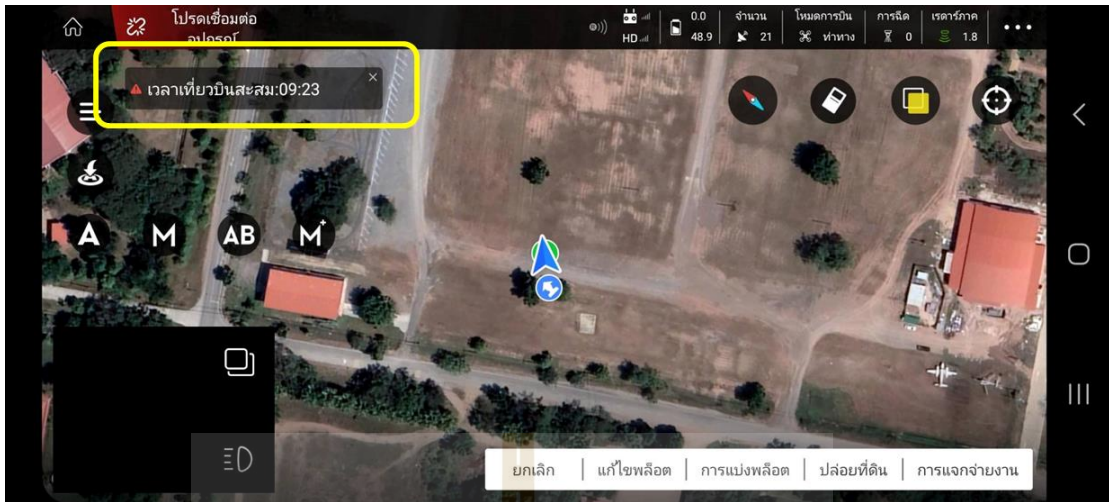
เป็นการทดสอบบินโดรนแบบให้โดรนหยุดนิ่งกลางอากาศโดยบรรทุกน้ำขึ้นไปโดยไม่สเปรย์น้ำออกมาซึ่งคล้ายกับการทดลอง 4.3.1. โดยจะบินจากแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เริ่มต้นที่ 58.8 V จนลดลงเหลือ 51.8V ซึ่งแบตเตอรี่ Li-PO สามารถบินได้ 3 นาที 22 วินาที ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 Flight time testing of Li-PO with Hovering and 5kg-load conditions

4.3.7 ทดสอบบินจริงกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำ ออกด้วยแบตเตอรี่ NCA

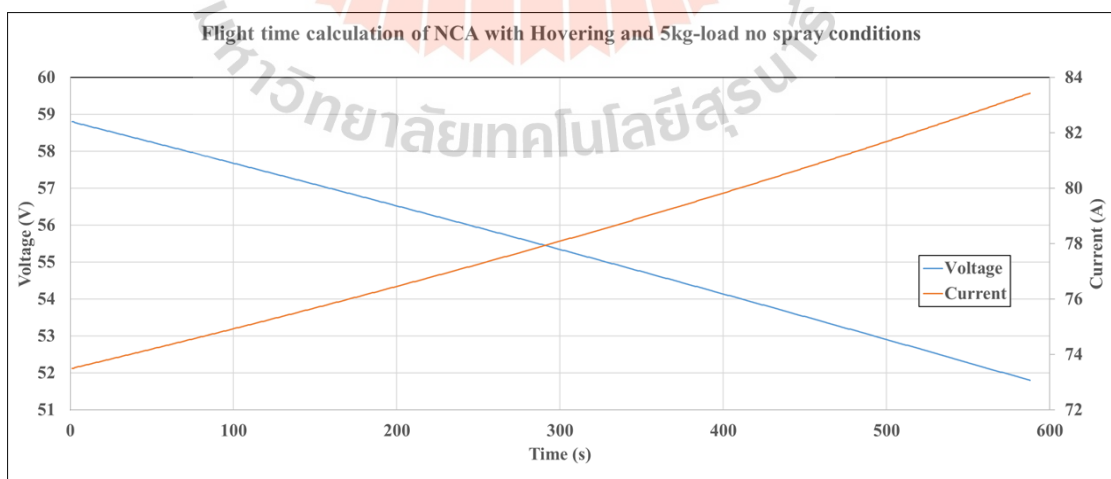
เป็นการทดสอบบินโดรนแบบให้โดรนหยุดนิ่งกลางอากาศโดยบรรทุกน้ำขึ้นไปโดยไม่สเปรย์น้ำออกมาซึ่งเช่นเดียวกับการทดลอง 4.3.6. โดยจะบินด้วยแบตเตอรี่ใหม่ NCA ที่ช่วงแรงดันแบตเตอรี่เท่ากัน ซึ่งสามารถบินได้ 9 นาที 23 วินาที โดยจะบินได้นานกว่า Li-PO อยู่ 6 นาที 1 วินาที หรือคิดเป็น 178.71% ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 Flight time testing of NCA with Hovering and 5kg-load conditions

4.3.8 ประเมินการบินกับโดรนโดยไม่เคลื่อนที่และบรรทุกโหลด 5 kg โดยไม่สเปรย์น้ำออกด้วยแบตเตอรี่ NCA

เนื่องจากการบินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศจะทำให้โดรนกินกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ ซึ่งจะสามารถระบุกำลังไฟฟ้าที่โดรนต้องการได้เหมือนกับการจำลองที่ 4.3.3. ซึ่งจะคิดจากน้ำหนักของโดรน 20.2 kg น้ำหนักของแบตเตอรี่ NCA 11.8 kg และโหลด 5 kg ทำให้มีน้ำหนักรวมอยู่ที่ 37 kg จึงทำให้โดรนต้องการกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 4321.94 watt โดยจากผลการจำลองคือ 9 นาที 48 วินาที ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งคาดเคลื่อนอยู่ 25 วินาที หรือคิดเป็น 4.44%



รูปที่ 4.23 Flight time calculation of NCA with Hovering and 5kg-load conditions

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการและผลการทดลองซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยส่วนที่ 1 จะเป็นผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่จะทำการทดสอบมอเตอร์ ใบพัดและแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินระยะการบินด้วย Peukert's law ที่จะทดสอบกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์และหาค่า Peukert's constant ของรูปแบบการต่อทั้ง 5 แบบ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.0358 หลังจากนั้น จะเป็นการประเมินการคายประจุของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.72% หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบกับแบตเตอรี่ลูกเดิมกับที่แพ็คขึ้นมาใหม่ด้วยโปรไฟล์การคายประจุด้วยกำลังไฟฟ้าคงที่และคายประจุกำลังไฟฟ้าแบบพลวัต ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือแบตเตอรี่ลูกใหม่สามารถคายประจุได้นานกว่าลูกเดิม และยังทำการประเมินระยะเวลาการคายประจุกับแบตเตอรี่ลูกใหม่ด้วยโปรไฟล์การคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่โดยจะเปรียบเทียบระยะเวลาที่ประเมินได้กับระยะเวลาจริงที่วัดได้ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 5.24%

ในส่วนของการทดสอบภาคสนามจะเป็นการทดลองบินด้วยโดรนจริงโดยจะเปรียบเทียบระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถทำได้จากทั้งสองแบตเตอรี่ ซึ่งจะแบ่งโปรไฟล์การบินออกเป็น 3 รูปแบบ คือ บินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลด บินแบบเคลื่อนที่แบบเป็น Pattern โดยไม่บรรทุกโหลด และบินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยบรรทุกโหลด 5 kg แต่ไม่สเปรย์น้ำออก ซึ่งแบตเตอรี่ที่แพ็คใหม่สามารถบินโดรนได้นานกว่าแบตเตอรี่ลูกเดิมเพิ่มขึ้น 58.55% 49.67% และ 178.71% ตามลำดับ

นอกจากนี้การบินโดรนแบบบินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่บรรทุกโหลดและบรรทุกโหลดจะเป็นการบินโดรนแบบใช้กำลังไฟฟ้าคงที่ ซึ่งสามารถใช้ Peukert's law ประเมินระยะเวลาการบินได้ โดยจะใช้กำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากการทดลองในภาคห้องปฏิบัติการเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่โดรนจะต้องรับภาระ ซึ่งผลการคำนวณมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 16.4% และ 4.44% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ประเมินได้กับระยะเวลาจริง โดยที่ผลการคำนวณมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเป็นผลมาจากในการบินจริง จะมีปัจจัยอื่นมาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งปัจจัยที่เห็นได้ชัดเจนคือสภาพอากาศที่มีลมแรง จะทำให้โดรนจำเป็นต้องรักษาสมดุลของโดรนทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าของแต่ละมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบแพ็คแบตเตอรี่และขนาดความจุของแบตเตอรี่ให้มีพลังงานพอเพียงสำหรับโดรนการเกษตรเพื่อเพิ่มเวลาการทำงานของโดรนโดยสามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับแรงยกของโดรนที่ใช้มอเตอร์ X9 Power System 110 KV กับใบพัดชนิด 3411 Propeller และ 36190 Propeller ด้วยเครื่องทดสอบ RCBenchmark 1780 โดยผลการทดลองพบว่าใบพัด 36190 Propeller จะใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อใบพัดสร้างแรงยกที่ค่าเดียวกัน

5.1.2 ได้ทดลองคายประจุไฟฟ้าคงที่ที่อัตรา C-rate ที่แตกต่างกันเพื่อหาค่า Peukert's constant ซึ่ง C-rate คืออัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออกแบตเตอรี่กับความจุของแบตเตอรี่ จากทดลองสามารถประมาณค่า Peukert's constant ของแบตเตอรี่ NCA ได้ 1.0358 สามารถนำไปประเมินระยะเวลาการบินของโดรนจากสมการ Peukert's law ในกรณีการบินแบบลอยตัวหยุดนิ่งกลางอากาศได้

5.1.3 ได้ทดลองคายประจุไฟฟ้าแบบกำลังไฟฟ้าคงที่เพื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาที่คายประจุไฟฟ้าจริงกับระยะเวลาการบินของโดรนที่ประเมินได้จากสมการ Peukert's law โดยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดคือ 2.72%

5.1.4 ออกแบบการแพ็คและขนาดความจุของแบตเตอรี่ชนิด NCA โดยรักษาจุด CG ของโดรนให้คงที่ เพื่อดำรงประสิทธิภาพในการควบคุมโดรน โดยการออกแบบให้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมกัน 14 เซลล์ เพื่อให้แบตเตอรี่ที่แพ็คเป็นระบบ 48V มีความสูงแพ็คแบตเตอรี่อยู่ที่ 118 mm. มี Watt-hour อยู่ที่ 2.352 kWh และมีความจุอยู่ที่ 40 Ah ซึ่งเพิ่มขึ้นมาจากเดิมอยู่ 42.86% มีน้ำหนักอยู่ที่ 11.8 kg เพิ่มขึ้นมาจากแบตเตอรี่เดิมอยู่ 40.48% แต่ราคาของแบตเตอรี่ที่ประกอบขึ้นจะถูกกว่าแบตเตอรี่เดิมอยู่ประมาณ 36.47%

5.1.5 ออกแบบบรรจุภัณฑ์ของแบตเตอรี่ด้วยโปรแกรม Solidwork ขึ้นรูปชิ้นงานด้วย 3D printer และ Laser cut

5.1.6 การทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ได้ทำการแพ็คขึ้นในภาคห้องปฏิบัติการ เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 การคายประจุไฟฟ้าแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ 500 วัตต์ โดยแบตเตอรี่ NCA มีระยะเวลาการใช้งานได้นานกว่าเมื่อเทียบกับของเดิมอยู่ 68.14%

กรณีที่ 2 การคายประจุแบบพลวัตโดยแบตเตอรี่ NCA มีระยะเวลาการใช้งานได้นานกว่าเมื่อเทียบกับของเดิมอยู่ 72.38%

5.1.7 การทดสอบใช้งานแบตเตอรี่จริงกับโดรนในภาคสนามโดยจะบินโปรไฟล์ที่ต่างกันเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถทำได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี

กรณีที่ 1 โดรนบินหยุดนิ่งกลางอากาศโดยไม่มีโหลด โดยแบตเตอรี่ NCA สามารถบินเป็นระยะเวลาได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่เดิมอยู่ที่ 58.55%

กรณีที่ 2 โดรนบินเคลื่อนที่แบบเป็น Pattern โดยไม่มีโหลด โดยแบตเตอรี่ NCA สามารถบินระยะเวลาได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่เดิมอยู่ที่ 49.67%

กรณีที่ 3 โดรนบินแบบหยุดนิ่งกลางอากาศโดยบรรทุกโหลด 5 kg แต่ไม่สเปรย์น้ำออก ซึ่งแบตเตอรี่ลูกใหม่สามารถทำระยะเวลาได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่เดิมอยู่ที่ 178.71%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการใช้งานแบตเตอรี่ประเภท Li-ion จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิของแบตเตอรี่เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์ Thermal runaway เพื่อป้องกันอันตรายกับตัวผู้ใช้งานเอง โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงถึงค่าที่กำหนดจากการดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ไม่เหมาะสมหรือมาจากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป โดย NCA จะอยู่ที่ 150 °C ซึ่งระบบ Cooling มีความสำคัญต่อแบตเตอรี่เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการทำงาน

5.2.2 ในการใช้งานสมการ Peukert's law จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ทำให้ระยะเวลาจำลองในการบินมีค่ามากกว่าความเป็นจริง ซึ่งระยะเวลานี้มีผลต่อการออกแบบภารกิจการบินที่อาจทำให้ภารกิจนั้นไม่สำเร็จเพราะแบตเตอรี่หมดก่อน จึงอาจจะต้องพิจารณาในส่วนของค่าเพื่อ เพื่อให้ภารกิจการบินนั้น ๆ สำเร็จลุล่วง

รายการอ้างอิง

- [1] J. Warner, The handbook of lithium-ion battery pack design. Waltham: Elsevier, 2015.
- [2] P. J. Weicker, A systems approach to lithium-ion battery management. Norwood: ARTECH HOUSE, 2014.
- [3] D. Andrea, Lithium-ion batteries and applications. Norwood: Artech house, 2020.
- [4] C. Z. Jiuchun Jiang, Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles. Singapore: Wiley, 2015.
- [5] H. S, "Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology," Great Britain, 2021/01/01/ 2021, vol. 3: John Wiley & Sons Ltd, 2 ed. [Online]. Available: <https://search.sut.ac.th/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbl&AN=vdc.100121639983.0x000001&site=eds-live&scope=site>. [Online]. Available: <https://search.sut.ac.th/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbl&AN=vdc.100121639983.0x000001&site=eds-live&scope=site>
- [6] M. Wang, S. Zhang, J. Diepolder, and F. Holzapfel, "Battery package design optimization for small electric aircraft," Chinese Journal of Aeronautics, Article vol. 33, no. 11, pp. 2864-2876, 11/01/November 2020 2020, doi: 10.1016/j.cja.2020.04.021.
- [7] M. Seyed Saeed, S. Erik, and K. Søren Knudsen, "An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery," Batteries, article vol. 5, no. 1, pp. 31-31, 03/01/ 2019, doi: 10.3390/batteries5010031.
- [8] K. L. Pham, J. Leuchter, R. Bystricky, V. T. Pham, and N. N. Pham, "Design and Simulation System for Quadrotor UAVs," ed: IEEE, 2021, pp. 1-5.

- [9] N. A. Vu, D. K. Dang, and T. Le Dinh, "Electric propulsion system sizing methodology for an agriculture multicopter," *Aerospace Science and Technology*, Article vol. 90, pp. 314-326, 07/01/July 2019 2019, doi: 10.1016/j.ast.2019.04.044.
- [10] M. Biczyski, R. Sehab, J. F. Whidborne, G. Krebs, and P. Luk, "Multirotor Sizing Methodology with Flight Time Estimation," *Journal of Advanced Transportation*, Article pp. 1-15, 2020, doi: 10.1155/2020/9689604.
- [11] B. A, G. Rajendran, H. V. Sathyabalu, R. N. R. S, and B. S, "Real-Time Implementation of Battery Management System in Electric Vehicles," ed: IEEE, 2021, pp. 1-6.
- [12] M. Bhardwaj, "Implementing a DC UPS with Battery's State of Charge Estimation Based on Coulomb-Counting Method," ed: IEEE, 2020, pp. 1547-1553.
- [13] A. C. R and A. Ghosh, "Battery Management System in Electric Vehicle," ed: IEEE, 2021, pp. 1-6.
- [14] J. M. D. S. Jeewandara, K. Jp, and K. T. M. U. Hemapala, "SOC Level Estimation of Lithium-ion Battery Based on Time Series Forecasting Algorithms for Battery Management System," ed: IEEE, 2021, pp. 43-49.
- [15] N. Mars, F. Krouz, F. Louar, and L. Sbita, "Comparison study of different dynamic battery model," ed: IEEE, 2017, pp. 1-6.
- [16] A. A. Akhil et al., "DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA," United States, 2016-09-01 2016. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1431469> <https://www.osti.gov/servlets/purl/1431469>
- [17] D. Aurbach et al., "Design of electrolyte solutions for Li and Li-ion batteries: a review," *Electrochimica Acta*, vol. 50, no. 2, pp. 247-254, 2004/11/30/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.090>.
- [18] G. K. Prasad and C. D. Rahn, "Development of a First Principles Equivalent Circuit Model for a Lithium Ion Battery," 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1115/DSCC2012-MOVIC2012-8607>.
- [19] L. Zdravkova, "Fiber Optic Sensor for In-Situ State-of-Charge Monitoring for Lithium-Ion Batteries," UWSpace, 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10012/9059>



ภาคผนวก ก

โค้ดโปรแกรมสำหรับการคำนวณระยะเวลาการบินด้วย MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 โค้ดสำหรับการคำนวณด้วย Peukert's law

```

%% SECTION TITLE
% DESCRIPTIVE TEXT
clc;clear all;
cap_mah = 40*1000;%%
%Peukert_constant = 1.022;%%1
%Peukert_constant = 1.074;%%2
Peukert_constant = 1.0358;%%3
rating = 1;
Power = 3542.52;
amount_of_series = 14;
dod = (14.4*1000)/40000%%
%dod = 1;
vmax = 4.2;
vmin = 3.7;
cap_ah = cap_mah / 1000;
v_sag_constant = (vmax - vmin) / dod * amount_of_series;
voltage = [vmax*amount_of_series;
current = [Power/voltage(size(voltage,2))];
cap = [(current(size(current,2))^(1-Peukert_constant))*(rating^(1-Peukert_constant))*(cap_ah^Peukert_constant)];
k1 = (vmax - vmin)/(dod*amount_of_series*cap(size(cap,2)));
%% calculation
timestep = 1/60/60;
i = 0;
while voltage(size(voltage,2)) > vmin*amount_of_series
    voltage = [voltage (voltage(1) - (v_sag_constant/cap(1))*(cap(1) - cap(size(cap,2))))];
    current = [current Power/voltage(size(voltage,2))];
    cap = [cap ((current(size(current,2))^(1-Peukert_constant))*(rating^(1-Peukert_constant))*(cap_ah^Peukert_constant))-
sum(current.*timestep)];
    i = i + 1;
end
ft = i*timestep;
time = [0 linspace(1,i,i)];
power_plot = ones(1, i+1).*Power;
fprintf('Total FT is %f hr\n',ft);
fprintf('Total FT is %f min\n',ft*60);
%% plot
%plot(time,current,time,voltage,time,power_plot)

figure
yyaxis left
plot(time,voltage)
ylabel('Voltage')
yyaxis right
plot(time,current)
ylabel('Current')
legend('Voltage','Current')
%%

```

```
% plot(time,current,voltage,power_plot)
figure

[yyh,H1,H2] = plotyy(time,voltage,time,current,'plot','plot');
yyh(1).XTickMode = 'manual';
yyh(1).YTickMode = 'manual';
yyh(1).YLim = [min(yyh(1).YTick), max(yyh(1).YTick)];
yyh(1).XLimMode = 'manual';
grid(yyh(1),'on')
ytick = yyh(1).YTick;
xlabel(yyh,'Time')

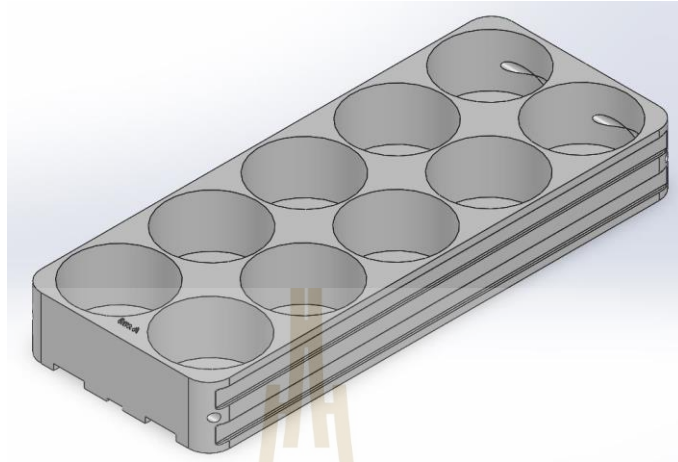
ax2 = axes('position', yyh(1).Position);
H3 = plot(ax2,time,power_plot, 'k')
pause(0.1)
ax2.Color = 'none';
grid(ax2, 'on')

ax2.XLim = yyh(1).XLim;
ax2.XTick = yyh(1).XTick;
ax2.YLimMode = 'manual';
yl = ax2.YLim;
ax2.YTick = linspace(yl(1), yl(2), length(ytick));

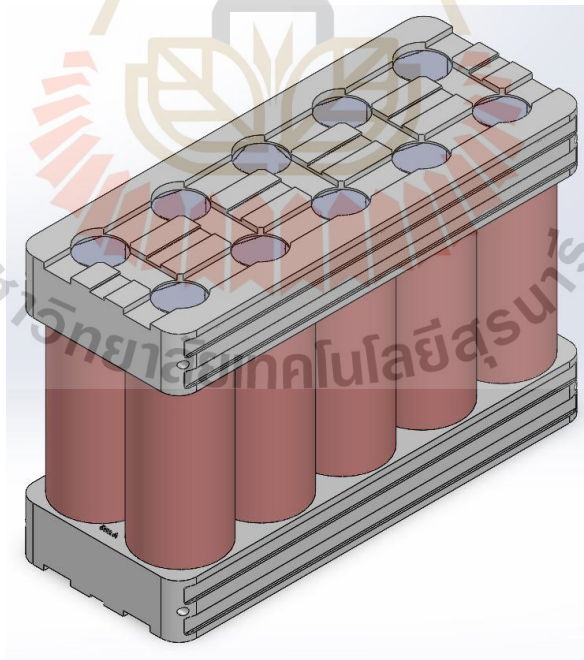
ax2.YTickLabel = strcat(ax2.YTickLabel, { ' ' });
legend([H1;H2;H3],'Voltage','Current','Power');
title('Constant Power Discharge Test 500 Watt of NCA (Simulation)')
```



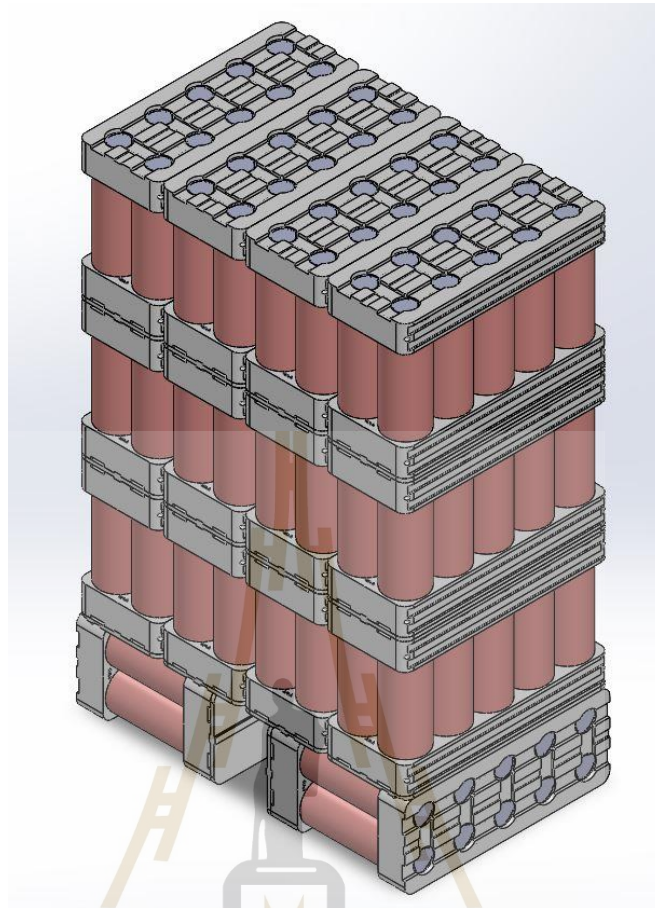
ข.1 การออกแบบ Battery holder



รูปที่ ข.1 Battery holder 1 Unit



รูปที่ ข.2 NCA 40 Ah 1 Cell



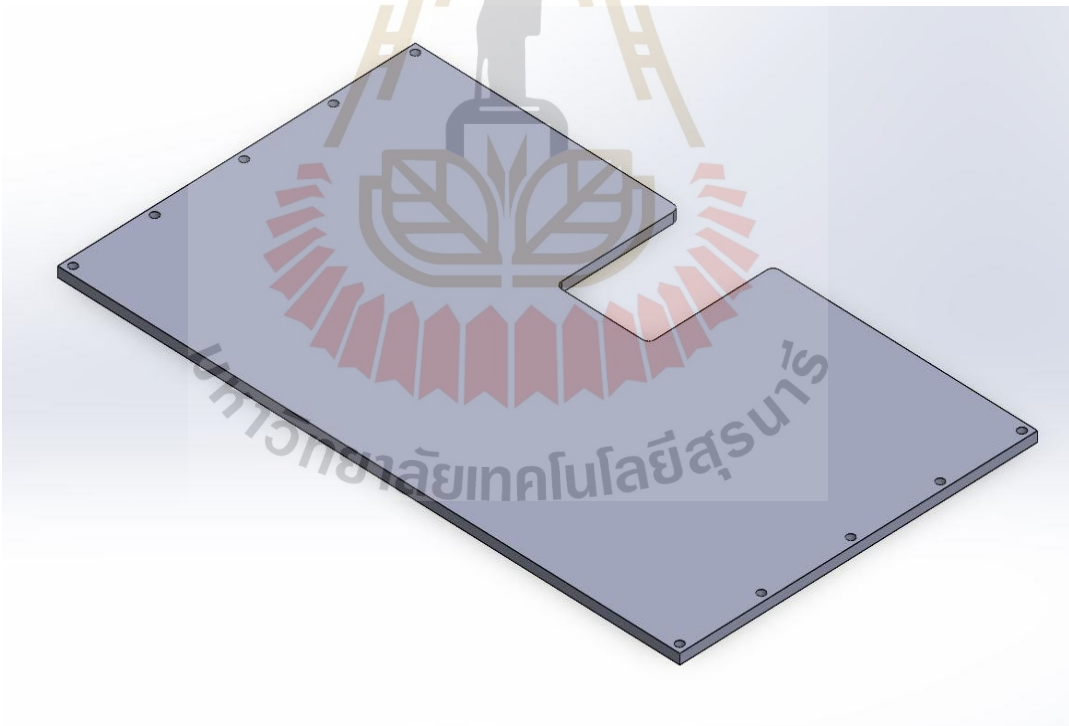
รูปที่ ข.3 NCA 40 Ah 14 Cells

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

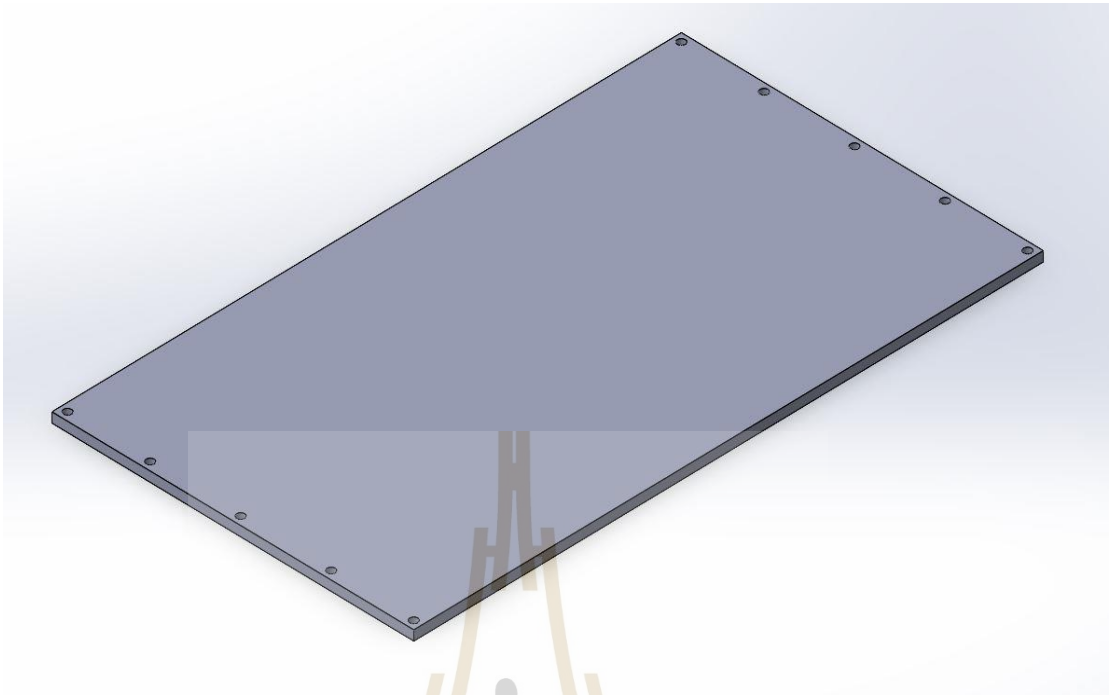
ข.2 การออกแบบ Battery casing



รูปที่ ข.4 Left and Right side unit



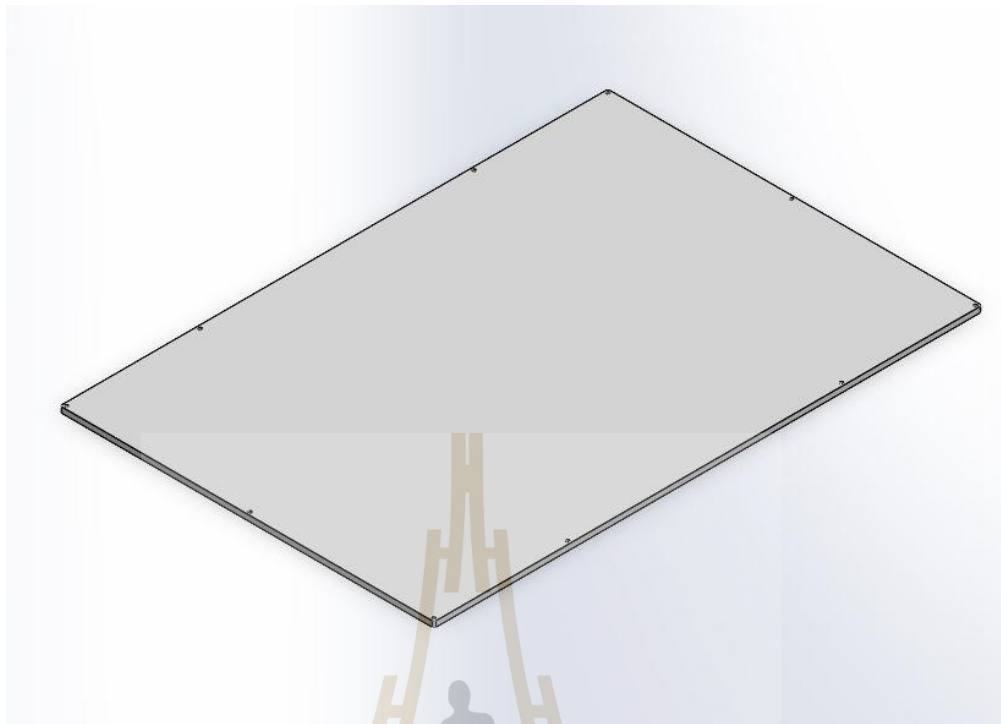
รูปที่ ข.5 Front side unit



รูปที่ ข.6 Rear side unit



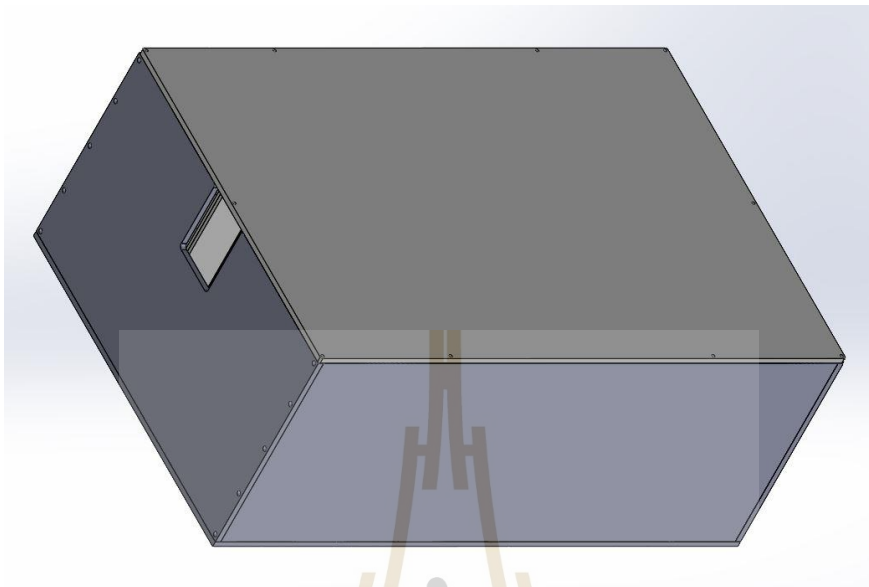
รูปที่ ข.7 Base side unit



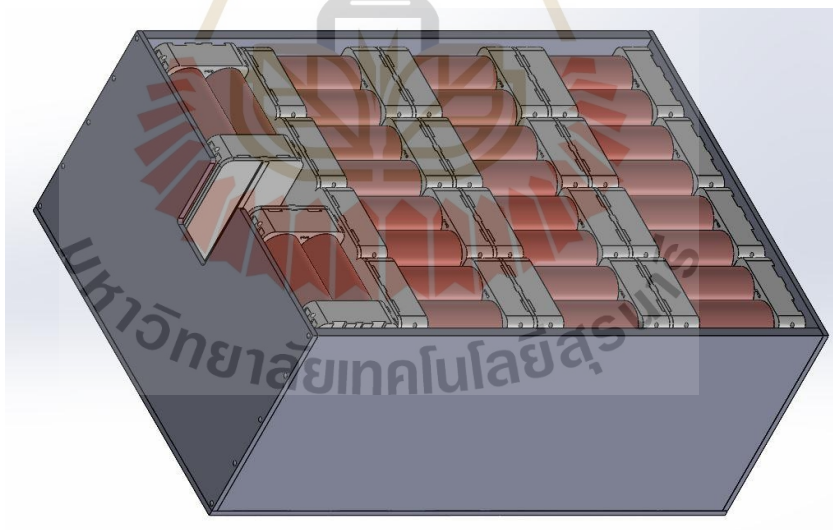
รูปที่ ข.8 Top side unit



ข.3 Assembly



รูปที่ ข.9 Assembly with top



รูปที่ ข.10 Assembly without top



ภาคผนวก ค

การขึ้นรูปชิ้นงานและการแพ็คแบตเตอรี่

ค.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน



รูปที่ ค.1 3D Printer Creality Ender3 V2



รูปที่ ค.2 Battery holder

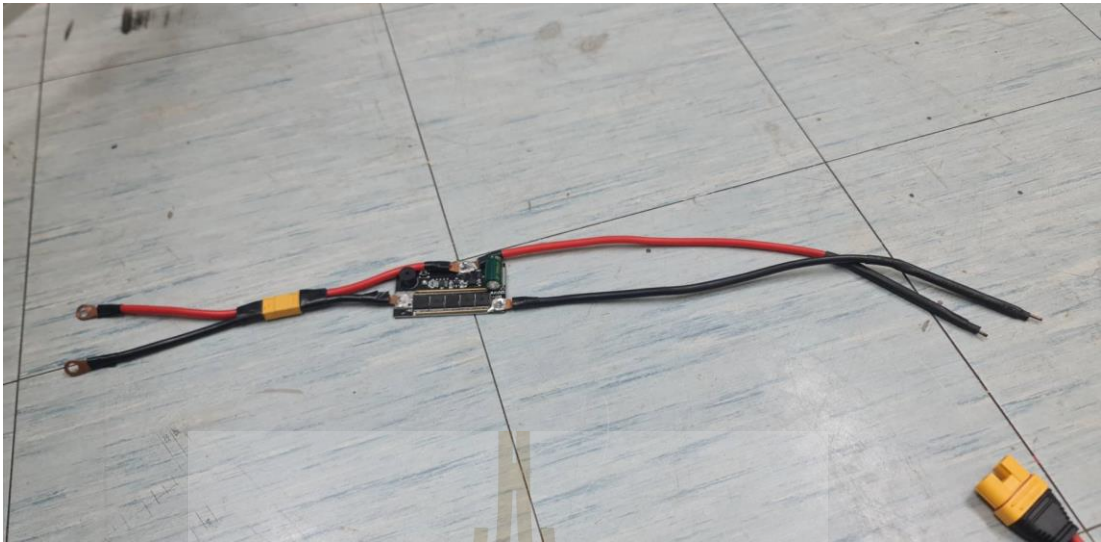
ค.2 การแพ็คแบตเตอรี่



รูปที่ ค.3 Spot welding 1



รูปที่ ค.4 Check connection with multi meter



รูปที่ ค.5 Spot welding 2



รูปที่ ค.6 LFP battery for spot welding 2



รูปที่ ค.7 Wiring BMS to battery



รูปที่ ค.8 การชั่งน้ำหนักแบตเตอรี่ NCA



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



The Electrical Modeling Of Lithium-ion Battery Using Matlab Simscape

Patipan Nimthanee ⁽¹⁾, Theeraphat Sri-on ⁽¹⁾, Kontorn Chamniprasart ⁽¹⁾, *Jiraphon Srisertpol ⁽¹⁾

⁽¹⁾School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

*Corresponding author: jiraphon@sut.ac.th

Abstract: Lithium-ion batteries are widely used as energy storage and distribution devices. This study presents an electrical equivalent circuit model of the battery developed on MATLAB Simscape to study lithium nickel cobalt aluminum oxide (NCA), lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC) and lithium iron phosphate (LFP) batteries behaviour in practice. The selected current draw pattern is the initial variable of prediction, and the terminal voltage and the state of charge (SOC) are the variables obtained from the model. Including observation of the temperature behavior of the battery. The developed model is able to accurately predict the terminal voltage significantly; with a maximum Root Mean Square Error (RMS) of 97.14 mV, 36.30 mV, and 54.05 mV, with the battery having a maximum temperature-increasing rate of 0.027°C/s, 0.022°C/s, and 0.020°C/s for pulse discharge of NMC, NCA, and LFP respectively.

Keywords: Li-ion battery, Battery modeling, Simscape.

1. Introduction

The Lithium-Ion batteries (Li-ion) are popular due to their higher specific power, specific energy, voltage, and long-life cycle compared to conventional rechargeable batteries. Therefore, Li-ion is widely used in modern devices, such as smartwatches, smartphones, and laptops, including electric vehicles (EVs). In such applications, it is necessary to consider the safety and reliability of the Li-ion control and management system. Currently, Li-ion control and management systems designing requires data on the behavior of Li-ion batteries to compose an algorithm and calculation, which can be done via experimental and modeling studies of Li-ion batteries.

In the state of model development, many researchers aim to create models to predict the stage of charge (SOC), stage of health (SOH), and Li-ion temperature with the most accuracy and ease of use. The literature review found that the developed models are often in the form of mathematical equations. Hinz [6] presented results using a mathematical model of Li-ion. The results showed that the precise model compounded equations with high-order differential equations resulting from the components in the model. The dynamic behavior of Li-ion was shown to be as close to reality as possible, with the third-order differential equations was the most accurate of the studies. Madani, Schaltz and Knudsen Kaer [10] presented the use of an electrical equivalent circuit model (EEC) to study the performance of Lithium Titanate Oxide (LTO) batteries.

The mathematical model required a second-order differential equation. An experiment required defining the effect of SOC, current, and temperature on the parameter in the equation. Campagna, et al. [3] presented the comparison results of EEC model with three different mathematical equations. The results showed that the model with the highest power equation in the study was the model with the most accuracy in predicting the behavior of Li-ion, which was the second-order differential equation. Eltoumi, et al. [4] used a quadratic mathematical model to study Li-ion behavior using experiments to determine parameters in the equation prior to use. Compared to models that did not consider Li-ion internal parameters, the results showed that the use of power equations had better predictive performance in both continued discharge and dynamic discharge models. Precision of EEC is dependent on the order of mathematical model. In addition to using mathematical models to predict the dynamic behavior of Li-ion, the results can also be analyzed in terms of the heat generated in batteries which is a critical factor in Li-ion design. Working with the thermal model will provide a precise mathematical model that can effectively predict thermal behavior, as presented by Alhanouti, et al. [1]. Using a high-order mathematical model is complicated to quantify the parameters within an equation and is followed by more complex methods to obtain a valid model, as presented by Barcellona and Piegari [2]. Past research implies that Li-ion behavior can be studied by mathematical modeling and programming using the previously mentioned equations. However, accurate mathematical models are often complex and questioning to use of equations. As a result, studies with such a model often require numerous resources and result in costs.

Simscape is one of the robust programs for physical simulation, enabling the rapid creation of models of physical systems within the MATLAB Simulink environment, as presented by MathWorks Inc. [8]. Milanowski and Pilat [9] presented modeling of robot leg motion in MATLAB Simscape. The developed model was able to predict the motion accurately and was able to shorten the modeling time by solving mathematic equations. Enocksson [5] modeled a vehicle powertrain in MATLAB Simscape. The simulation results are reliable and can be put into practice. It can also reduce programming time with complex mathematical models. Martinez and Zamora [7] modelled a photovoltaic (PV) energy storage system working with an alkaline

electrolyzer cell for solar power generation. The results showed that the MATLAB Simscape model provided satisfactory predictive results and could be used to analyze system performance in other scenarios. In contrast, it simplifies the problem-solving of mathematical models. Simscape has been used to model mechanical, electrical, and thermal-fluid systems, as the results are authentic and trustworthy. Accordingly, developing a model from a mathematical equation to a Simscape model is essential for forthcoming analyses.

This paper develops an EEC in Simscape. The model can predict the Li-ion's dynamic behavior with calculated terminal voltage (V_{bat}) and SOC values under a defined discharge pattern. Also, accurate and uncomplicated to use. The experiment combined with the least squares method was used to determine the parameter value in EEC.

2. Battery model using simscape

This research uses EEC based on the Thevenin-based 2-RC networks model, as referred to [3],[6],[10] to construct in Simscape. As shown in Fig 1, the model consists of the DC source voltage representing the Li-ion's open-circuit voltage (OCV), the series resistance R_s , and parallel circuit $R_1 C_1$ showing short-term transient behavior, and the parallel circuit $R_2 C_2$ showing long-term transient behavior, as referred to [4]. All the variables mentioned will react to changes in the SOC. The SOC is calculated based on the usable change remaining in the Li-ion's capacity, which is determined from the charge and discharge experiment. The R_s , R_1 , C_1 , R_2 , and C_2 can be estimated using the least square method for SOC. Finally, an EEC model can evaluate V_{bat} and SOC.

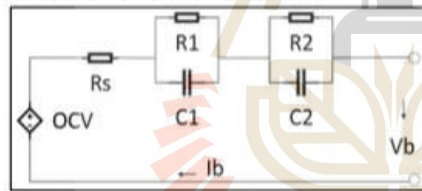


Fig. 1. Thevenin-based 2-RC networks model [10]

2.1 Mathematic model

The mathematical model used to create the model for this study is a remarkably accurate and steadfast model, as referred to [1],[2],[4]. It possesses an equation for estimating V_b , representing the Li-ion voltage at different times and the SOC depicting the amount of charge present in the Li-ion to the maximum capacity of the Li-ion. In determining the V_b and SOC values, it is necessary to calculate the voltage drop across one resistance and 2 RC networks, as detailed in Fig. 1. and the following equation.

$$V_b = OCV - V_{R_s} - V_1 - V_2 \quad (1)$$

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I_{b,t} dt}{Q} \quad (2)$$

$$V_{R_s} = I_b R_{s,SOC} \quad (3)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{I_b}{C_{1,SOC}} - \frac{V_1}{R_{1,SOC} C_{1,SOC}} \quad (4)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{I_b}{C_{2,SOC}} - \frac{V_2}{R_{2,SOC} C_{2,SOC}} \quad (5)$$

Where SOC_0 , SOC_t represent the state of charge at the initial and at that time, respectively. The Q and I_b is the Li-ion capacity and current flow through the Li-ion, and the V_{R_s} represent the R_s 's voltage, V_1 and V_2 is the voltage across the 1st RC network and 2nd RC network, respectively. The $R_{s,SOC}$, $C_{1,SOC}$, $R_{1,SOC}$, $C_{2,SOC}$, and $R_{2,SOC}$ are the function of SOC.

2.2 EEC model in Simscape

Investigation of the Li-ion completed with the EEC model according to equations 1 to 5 commences with evaluating the SOC_t by taking Q and SOC_0 into equation 2, where the input variable is the I_b to gather current from start to time and to know how vastly changes in the amount of electric charge occurred. Finally, the SOC_t obtain from the EEC model. The SOC calculation equation constructed in the Simscape model is shown in Fig. 2. With the I_b is positive when discharged and negative when charged.

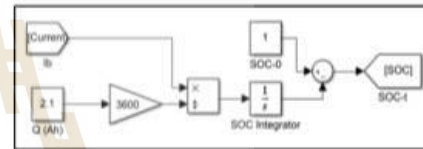


Fig. 2. SOC estimation model in Simscape

A pivotal component of the EEC model is the RC network. They are building a model of the resistor and capacitor available in the Simscape library, following the same characteristics as equations 4 and 5 in EEC model. This allows the model to show the dynamic behavior of Li-ion. The RC network model implemented in Simscape is shown in Fig. 3. The calculation starts with the OCV and I_b as the input, then the model estimates the voltage drop across the RC network and takes that value into the next calculation. Modeling in this pathway is simplified and dramatically reduces the time spent on model constructs.

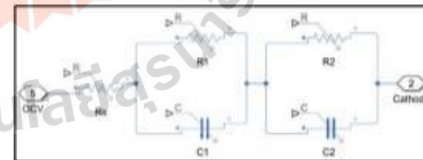


Fig. 3. RC-network in Simscape

Another component that drives the EEC model to be fully functional is the OCV. The OCV is the DC voltage source within the Li-ion as mentioned above, so in the modeling of the OCV the DC voltage source model available in the Simscape library can be employed. The OCV model can be created in this paper, as shown in Fig. 4.

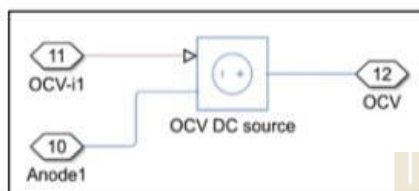


Fig. 4. OCV in Simscape

From the Simscape model developed from equations 3, 4 and 5, the variable values OCV, $R_{1,SOC}$, $C_{1,SOC}$, $R_{2,SOC}$ and $R_{3,SOC}$ were varied when the SOC changed. This variable value was obtained from the experiment and used in the Simscape model. Therefore, for the model to use the variables, a lookup table was used as the variable's value setting device for all resistors and capacitors in the Simscape model. The model has to output variables when the SOC is assigned. Then the model takes the relevant computations. They are shown in Fig. 5.

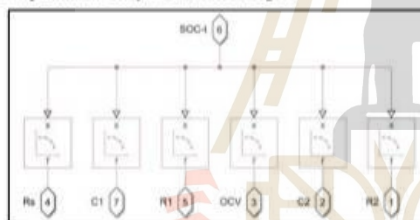


Fig. 5. The Constance variable in Simscape

3. Experimental

In testing, Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide cell (NMC), Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide cell (NCA), and Lithium Iron Phosphate cell (LFP) batteries were used, the details of which are shown in Table 1. The discharge test was conducted with Chroma model 17020 Regenerative Battery Test System. The voltage and current values were recorded every 1 sec, including Li-ion surface temperature by National Instruments NI 9211 data acquisition (DAQ) interface with LabVIEW 2015.

Table 1. Li-ion technical specification

Specification	NMC	NCA	LFP
	ORB217C 50	INR21700 -50E	IFR3270 0 G65
Cell character	21700	21700	32650
Nominal voltage (V)	3.6	3.6	3.2
Maximum voltage (V)	4.2	4.2	3.65
Discharge cut-off voltage (V)	2.5	2.5	2
Cell weight (g)	86	69	150

3.1 Li-ion capacity

The capacity test to determine the amount of charge Q that can be discharged or usable, where Q depends on the value of I_b . In this article, discharge current I_b is set at 1C-rate, which is 5 A for NMC and NCA, and LFP I_b was 6.5 A. Li-ion was prepared with the CC-CV charge protocol at maximum voltage and allowed to rest for 2 h, then discharged with I_b until the voltage decreased to the lowest value. During that time, the voltage and amount of electric charge were recorded. Results indicate the behavior of voltage and charge as shown in Fig. 6. It is also found that the Q-values of NMC, NCA, and LFP are equal to 4,743.7 mAh, 4,742.5 mAh, and 5,987.1 mAh, respectively.

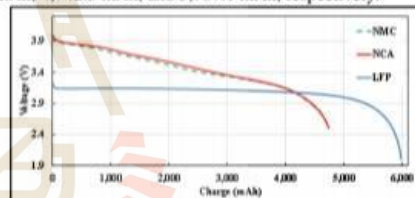


Fig. 6. Voltage and discharge capacity

3.2 The EEC parameter

The EEC parameters are constant variables in equations 3, 4, and 5, consisting of $R_{1,SOC}$, $C_{1,SOC}$, $R_{2,SOC}$, $C_{2,SOC}$ and $R_{3,SOC}$ that change according to SOC values previously mentioned. The pulse discharge testing is established to define the value of EEC parameters. Initially, the li-ion is prepared at the same maximum voltage as the previous experiment and then discharged with the same current I_b as the experiment in the past. The discharge time was set so that the SOC was reduced by 10%, for NMC equal to 342 s, 348 s for NCA and 332 s for LFP, then rest for 40 min and repeated until the 0% SOC. The results were calculated for all 5 variables at all SOC by the least square method which show in Tables 2-4. In addition, this result indicates the relationship between OCV and SOC as shown in Fig. 7. Finally, the results of this experiment and the computational results can be generated as a looking table in the simscape model of those variables.

Table 2. Parameter of each SOC for NCA

SOC (%)	Rs (Ω)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)
100	0.0232	0.0122	0.0032	3254.0	972.07
	2	9	4	5	
90	0.0225	0.0128	0.0085	26695.	2308.1
	1	1	1	61	0
80	0.0225	0.0231	0.0133	38202.	1635.5
	9	7	8	25	6
70	0.0235	0.0086	0.0129	62089.	2074.8
	3	0	6	18	1
60	0.0238	0.0104	0.0106	20971.	2271.0
	8	2	5	56	0
50	0.0236	0.0155	0.0146	21987.	2223.5
	5	9	3	89	0
40	0.0243	0.0208	0.0131	16858.	1818.2
	5	5	9	84	0
30	0.0244	0.0116	0.0114	10079.	1993.6
	5	7	4	24	0
20	0.0257	0.0095	0.0245	64033.	2273.7
	8	5	5	99	5
10	0.0293	0.0470	0.1150	1262.8	19400.
	7	5	0	3	06

Table 4. Parameter of each SOC for LFP

SOC (%)	Rs (Ω)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)
100	0.02	0.007	0.002	696.95	2494.
	180	91	21		60
90	0.01	0.006	0.006	60446.0	1761.
	863	65	29	6	20
80	0.01	0.016	0.006	51496.0	1403.
	920	60	92	9	27
70	0.02	0.008	0.007	104386.	1297.
	035	29	57	90	51
60	0.02	0.008	0.007	103645.	1635.
	115	06	57	91	04
50	0.02	0.008	0.007	54476.0	1789.
	311	89	42	7	33
40	0.02	0.015	0.008	44843.8	1995.
	317	91	75	2	58
30	0.02	0.016	0.009	42490.9	1617.
	535	68	90	1	31
20	0.02	0.013	0.012	13525.3	1020.
	549	85	72	1	12
10	0.02	0.016	0.005	1818.99	5459.
	465	75	58		34

Table 3. Parameter of each SOC for NMC

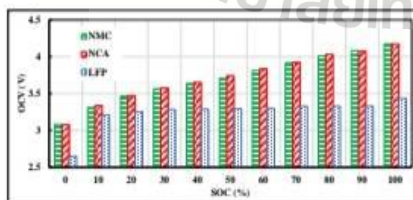
SOC (%)	Rs (Ω)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	C1 (F)	C2 (F)
100	0.03	0.0057	0.0113	35737.	2252.0
	896	8	7	10	2
90	0.03	0.0163	0.0087	21719.	1748.4
	636	2	4	81	1
80	0.03	0.0284	0.0134	32108.	1755.6
	632	0	1	05	4
70	0.03	0.0074	0.0124	60394.	2591.7
	712	1	5	29	9
60	0.03	0.0106	0.0091	16424.	2872.1
	638	1	5	80	3
50	0.03	0.0164	0.0127	16264.	2685.3
	586	1	6	88	6
40	0.03	0.0196	0.0110	14266.	1805.0
	550	6	8	51	0
30	0.03	0.0098	0.0115	13697.	2132.7
	590	4	2	35	0
20	0.03	0.0123	0.0202	52160.	1929.3
	682	1	9	78	0
10	0.04	0.1733	0.0478	12975.	760.26
	148	5	6	24	

4. Model validation and dynamic behavior

Validation of models constructed with Simscape assembles model trustworthiness and ensures usability. In expansion, this section presents the dynamic behavior of randomized discharge experiments in comparison with the results of simulations generated with Simscape, as well as the behavior of the Li-ion surface temperatures shown in the experiments.

4.1 Model validation

This paper investigates the model's validity by comparing the voltage values obtained from the experiment in Section 3.2 with the results of the Simscape model. By comparison, with pulse discharge, the model was able to predict the Li-ion voltage as shown in Fig. 8. Considering these data, it was found that the NMC had the RMS error is 97.14 mV and the maximum voltage difference is 1378.88 mV. For NCA the RMS error is 36.30 mV and the maximum voltage difference is 238.52 mV. The LFP has a RMS error is 54.05 mV and a maximum voltage difference of 649.55 mV. This shows that the EEC developed in Simscape is accurate in pulse discharge. Fig. 9 shows the Li-ion surface temperature, pointed out when the Li-ion temperature rises throughout the discharge and decreases when the discharge is stopped.

**Fig. 7.** OCV and SOC

Moreover, the temperature change at low SOC has a higher rate of temperature change at high SOC. Including, Li-ion has a different rate of temperature change which type of electrode, with an applied current in 1C-rate with NCA having the highest rate of change is 0.022 °C/s, followed by NMC is 0.027 °C/s and LFP is 0.020 °C/s, respectively.

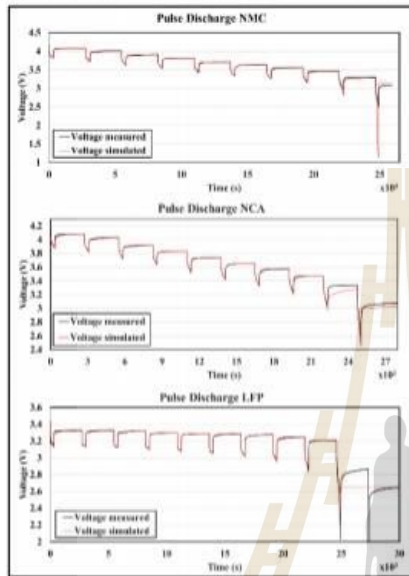


Fig. 8. V_b experimental and V_b simulation

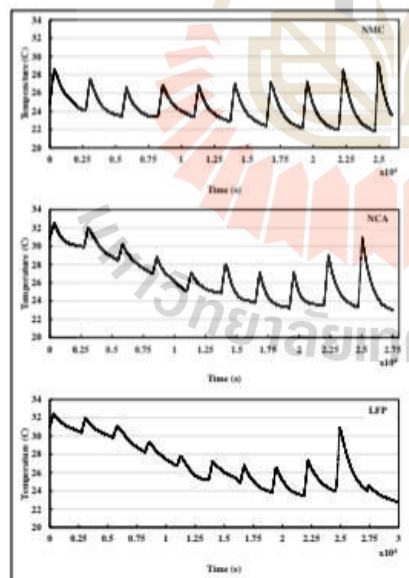


Fig. 9. Li-ion surface temperature

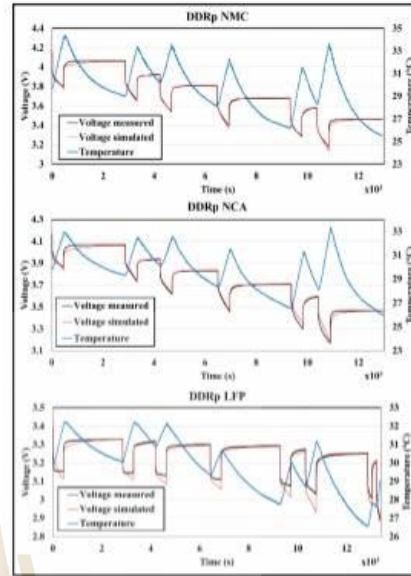


Fig. 10. V_b experimental and V_b simulation for DDRp

4.2 Dynamic discharge with random profile

In this section, discharge testing is a functional test of a model constructed with Simscape to offer the mastery to predict the result of a model on a definite operating situation. In the experiment, we fixed I_b for a discharge is 1C-rate, and the duration of the discharge time and rest time was randomized, known as Dynamic Discharge with Random profile (DDRp), as shown in Fig. 10. But we do not predict V_b for 20%SOC to 0%SOC period because the non-linear zone of battery. Considering that data, the V_b fetched from the Simscape model was always close to the experimental results, with RMS error values is 9.26 mV, 15.03 mV and 16.16 mV for the NMC, NCA and LFP respectively. Additionally, the maximum voltage difference is 47.53 mV for NMC, 69.59 mV for NCA and 97.35 mV for LFP. That proved the Simscape model able to simulate Li-ion completely agreeably in an unformed discharge mode. Furthermore, the temperature of the battery is raising during discharge, It is found that the average rate of temperature increase of NMC is 0.009607 °C/s and NCA is 0.007584 °C/s and LFP is equal to 0.004303 °C/s. It is shown that during the use of unformed discharge NMC, there will be the highest increase in temperature, followed by NCA and LFP in sequence. Therefore, in the use of batteries, it is necessary to measure and monitor values to prevent the temperature from exceeding the safe range for each battery type.

5. Conclusions

The article aims to develop an equivalent circuit model of a Lithium-ion battery into a computer model for use within MATLAB Simscape. The Simscape model can predict the dynamic behavior of Lithium-ion batteries with great agreement, in case of pulse discharge the RMS error is 97.14 mV, 36.30 mV and 54.05 mV for Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide cell, Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide cell, and Lithium Iron Phosphate respectively, and dynamic discharge with random profile the RMS error is 9.26 mV, 15.03 mV and 16.16 mV for Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide cell, Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide cell, and Lithium Iron Phosphate respectively. This model is uncomplicated to construct and straightforward to operate and can also be applied to other chemical-based batteries. In obtaining, the study found that the battery temperature increases with discharge, and those lithium-ion batteries with different chemical-based exhibit different temperature behaviors. This information can refer to another analysis for designing the battery casing and cooling system to be suitable and safe for battery usage.

Acknowledgment

The research team would like to thank you, the Systems and Control Engineering Laboratory, Suranaree University of Technology for subsidizing and supporting the equipment in this research until the completion stands satisfactory.

References

- [1] Alhanouti, M., M. Giebler, T. Blank and F. Gauterin. (2016). New Electro-Thermal Battery Pack Model of an Electric Vehicle. *Energies*, 9(7):563.
- [2] Barcellona, S. and L. Piegari. (2017). Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques. *Energies*, 10(12):2007.
- [3] Campagna, N., V. Castiglia, R. Miceli, R. A. Mastromauro, C. Spataro, M. Trapanese and F. Viola. (2020). Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study. *Energies*, 13(166):4085.
- [4] Eltoumi, F., A. Badji, M. Becherif and H. S. Ramadan. (2018). Experimental Identification using Equivalent Circuit Model for Lithium-Ion Battery. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 19(3).
- [5] Enocksson, S. (2011). Modeling in MathWorks Simscape by building a model of an automatic gearbox. Independent thesis Advanced level (professional degree) Student thesis. Uppsala university.
- [6] Hinz, H. (2019). Comparison of Lithium-Ion Battery Models for Simulating Storage Systems in Distributed Power Generation. *Inventions*, 4(3):41.
- [7] Martinez, D. and R. Zamora. (2018). MATLAB simscape model of an alkaline electrolyser and its simulation with a directly coupled PV module. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(1):552-560.
- [8] The MathWorks Inc., (2022). Simscape™ Getting Started Guide. 1 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098, The MathWorks Inc.
- [9] Milanowski, H. and A. K. Pilat. (2020). Comparison of Identified and SimScape Model of Human Leg Motion. In 2020 International Conference Mechatronics Systems and Materials (MSM). Bialystok, Poland. 1-6.
- [10] Seyed Saeed, M., S. Erik and K. Søren Knudsen. (2019). An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery. *Batteries*, 5(1): 31.

Authors Information



Jiraphon Srirertpol Currently holding the position Associate Professor of School of Mechanical Engineering and head of systems engineering and control research lab. Suranaree University of Technology.



Kontorn Chamniprasart received Currently holding the position Associate Professor of School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology.



Patipan Nimthanee received the B.E. (2019) degrees in Mechatronics engineering from Suranaree University of Technology. Currently, He is a Student master degree, Department of Mechatronics Engineering, Suranaree University of Technology. His Currently interests include battery modelling, drone modelling.



Theeraphat Sri-on PhD student Mechatronic Engineering Suranaree University of Technology Completed a master's degree in mechanical engineering. Suranaree University of Technology Research fields of interest include mathematical modeling, thermal system, automatic control system, battery technology.

ประวัติผู้เขียน

นายปฏิภาณ นิ่มธानी เกิดเมื่อวันที่ 6 กรกฎาคม พ.ศ.2540 ที่อำเภอเสนาห์ ตำบลเมืองเก่า จังหวัดสระบุรี เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์อติศรศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนเสนาห์ “วิมลวิทยานุกูล” อำเภอเสนาห์ จังหวัดสระบุรี และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 และเข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์) สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ณ สถาบันการศึกษาเดิม

