การศึกษาการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่

The Study of Unbalance Battery Module

โดย

นายกิตติพงศ์ นาวา

นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์

นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์

นายปรัชญา ทรงมุสิก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา2561

การศึกษาการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่

The Study of Unbalance Battery Module

โดย

นายกิตติพงศ์ นาวา

นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์

นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์

นายปรัชญา ทรงมุสิก

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Unbalance Battery Module

Kittiphong Nawa

Naruebet Phawaphutanon

Nilubon Pattanapiboonsak

Prachaya Songmusik

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่

The Study of Unbalance Battery Module

โดย

นายกิตติพงศ์ นาวา

นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์

นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์

นายปรัชญา ทรงมุสิก

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่

ผู้จัดทำ

1.นายกิตติพงศ์ นาวา

2.นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์

3.นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์

4.นายปรัชญา ทรงมุสิก

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและวินิจฉัยการไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่โมดูล

นายกิตติพงศ์ นาวา
นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์
นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ
นายปรัชญา ทรงมุสิก
ผศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการศึกษาการไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่โมดูล เมื่อไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ battery management system (BMS) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่หลังจากเกิดการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่ โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่จำลองการทำงานของแบตเตอรี่โมดูล โดยขณะทดสอบมีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นที่ 25 °C, 30% แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองคือ Li-ion พิกัด 3000 mAh, 3.6 โวลต์ โดยทำการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ ด้วยอัตราการอัดและคายประจุเท่ากับ 0.5C, 1C และ 2C เพื่อต้องการทราบพฤติกรรมของแบตเตอรี่ เช่น ระยะเวลาในการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์, อุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะอัดและคายประจุ และการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ หลังจากนั้นทำการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่สมดุลและไม่สมดุลที่ต่อแบบอนุกรมตามลำดับ ซึ่งโมดูลสมดุลและไม่สมดุลจะกำหนดด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า โดยโมดูลที่ไม่สมดุลจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์อื่น 75% เพื่อทำให้เกิดการไม่สมดุล

โดยในการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่ทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล จะพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาในการอัดและคายประจุไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล, แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ และอุณหภูมิแต่ละเซลล์ ซึ่งในการทดสอบแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล จะพิจารณาตำแหน่งของเซลล์ที่ไม่สมดุล เนื่องจากตำแหน่งของเซลล์ที่ไม่สมดุลอาจส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของแบตเตอรี่โมดูล จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า เมื่อทำการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล ระยะเวลาที่ใช้ในการอัด และคายประจุไฟฟ้าลดลง 75.56%เมื่อเทียบกับแบบสมดุล, 60% เมื่อเทียบกับแบบเซลล์เดียว และแบตเตอรี่เซลล์ภายในโมดูลที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเซลล์ที่มีแรงดันต่ำในขณะอัดประจุไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม เซลล์ที่มีแรงดันต่ำกว่า จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเซลล์ที่มีแรงดันสูงกว่าขณะที่การคายประจุไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแสดงถึงผลเสียที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่โมดูลเมื่อไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ BMS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study and Diagnostic of Unbalance Battery Pack

Mr.Kittiphong Nawa
Mr.Naruebet Phawaphutanon
Miss.Nilubon Pattanapiboonsak
Mr.Prachaya Songmusik
Asst.Prof.Dr.Teeraphon Phophongviwat

Abstract

This thesis presents the study of unbalance module battery without the battery management system (BMS) by study the factors that impact the batteries after unbalancing in the module batteries. The battery test system also temperature and humidity chamber were used to control temperature at 25 °C and humidity 30% RH. Li-ion batteries at rated 3000 mAh, nominal 3.6 volts 4 cells were selected for this project. In a testing battery, battery cells were charged and discharged at rated 0.5C, 1C and 2C to find the characteristic of the batteries. i.e. the time of charge and discharge battery per cell, temperature and voltage of battery per cell during charging and discharging. After that, balance and unbalance module battery that connect in series were charged and discharged at rated 1C. In the unbalance module, one cell was set voltage at 75% SOC for unbalance module.

The time of charging and discharging, the voltage of module battery and temperature and voltage per cell were compared with balance and unbalance batteries. In unbalance battery, the position of the unbalance cell was changed because the position of the unbalance cell may affect the energy used to move electrons in the module battery. The results show that Charging and Discharging time in unbalance condition was decrease 75.56% by compared with the balance module, and 60% by compared with a single cell. In temperature condition, the highest temperature battery cell was the lowest voltage cell in discharge. Unbalanced cell was increasing the temperature of other cells in charge. The disadvantage of the module battery that hasn't a battery management system was shown by this reason.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพน์ฉบับนี้สำเร็จขึ้นมาตามความหวังของผู้เขียนได้ อันเนื่องมาจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาที่มีพระคุณอย่างยิ่งของคณะผู้วิจัย ผศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงศ์วิวัฒน์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาและมอบข้อแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาทั้งยังเสียสละเวลาอันมีค่าและยังได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขปริญญานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้อง REAL LAB (Renewable Energy Application Laboratory) ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือทั้งด้านแรงกายและแรงใจ รวมถึงให้คำแนะนำต่างๆกับคณะผู้วิจัยเป็นอย่างมาก ขอขอบคุณพี่ปัญญา เข็มมุก รวมถึงเพื่อนๆและน้องๆภายในสาขาพลังงานไฟฟ้าที่ให้คำปรึกษาด้านการจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ตลอดจนผู้ที่ให้การช่วยเหลือทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ สละเวลาเพื่อให้คำแนะนำแก่คณะผู้วิจัยด้วยความเต็มใจมาโดยตลอดจนทำให้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนด้านการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง วิทยานิพนธ์เล่มนี้เกิดขึ้นไม่ได้เลยหากขาดความกรุณาในด้านนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำทุนจากส่วนนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพระคุณบิดามารดาและครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนสนับสนุนด้านการเรียน ด้านทุนทรัพย์ และคอยให้กำลังใจจากการเรียนที่เหนื่อยล้าจนการเรียนผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่านและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งปวงให้แก่คณะผู้วิจัย จึงอยากจะใคร่ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

Abstract.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VIII

สารบัญรูป(ต่อ).....IX

สารบัญรูป(ต่อ).....X

สารบัญรูป(ต่อ).....XI

สารบัญตาราง.....XII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์.....3

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน.....3

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน.....4

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน.....4

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....6

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....7

2.1 บทนำ.....7

2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่.....7

2.3 นิยามคำศัพท์เกี่ยวกับแบตเตอรี่.....8

2.4 หลักการทำงานของแบตเตอรี่.....13

2.5 ประเภทแบตเตอรี่.....15

2.5.1 แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้.....15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ 16
2.6 การต่อแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มความจุของแบตเตอรี่ 16
2.6.1 แบบอนุกรม 17
2.6.2 แบบขนาน 18
2.7 โหมดการอัดประจุและการคายประจุ 20
2.7.1 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ 20
2.8 การอัดและคายประจุเกิน 22
2.8.1 การอัดประจุแบตเตอรี่เกิน (Overcharge) 22
2.8.2 การคายประจุแบตเตอรี่เกิน)Overdischarge(..... 22
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง 23
3.1 บทนำ 23
3.2 ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผล 23
3.2.1 การต่อแบตเตอรี่ 24
3.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการไม่สมดุลของโมดูลแบตเตอรี่ 25
3.3.1 การทดลองอัดและคายประจุแบตเตอรี่แต่ละเซลล์เพื่อวิเคราะห์ผล 26
3.3.3 การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล 29
3.4 การคำนวณประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ 30
3.5 สรุป 31
บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง 32
4.1 บทนำ 32
4.2 การทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ 33
4.2.1 การอัดประจุไฟฟ้า 33
4.2.การคายประจุไฟฟ้า 2 34
4.3 การทดสอบอัดและคายประจุประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม 35
4.3.1การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุล 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 36
4.3.1.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 37
4.3.1.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 38
4.3.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุล 39
4.3.2.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 39
4.3.2.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 40
4.3.2.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 41
4.4 การทดสอบการอัดและคายประจุไฟฟ้าโมดูลไม่สมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม 42
4.4.1ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ได้รับไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 42
4.4.1.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 43
4.4.1.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 44
4.4.1.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 45
4.4.1.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 46
4.4.1.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 47
4.4.1.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 48
4.4.2 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 49
4.4.2.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 50
4.4.2.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 51
4.4.2.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 52
4.4.2.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 53
4.4.2.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 54
4.4.2.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 55
4.4.3 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 56
4.4.3.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 57
4.4.3.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 58
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 59
4.4.3.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 60
4.4.3.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 61
4.4.3.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 62
4.4.4 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 63
4.4.4.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 64
4.4.4.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 65
4.4.4.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 66
4.4.4.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า 67
4.4.4.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์ 68
4.4.4.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์ 69
4.5 สรุป 70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 72
5.1 บทนำ 72
5.2 สรุปผลการทดลอง 72
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิจัย 74
เอกสารอ้างอิง 75
ภาคผนวก 76
ภาคผนวก ก เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ 77
ภาคผนวก ข บทความเชิงวิชาการ 81
ประวัติผู้เขียน 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การผลิตกำลังไฟฟ้าสูงกว่าความต้องการ	1
1.2 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลกับแบตเตอรี่ที่สมดุล	2
2.1 ส่วนประกอบของเซลล์กัลวานิก	7
2.2 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	13
2.3 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	15
2.4 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่	17
2.5 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย	18
2.6 การต่อขนานของแบตเตอรี่	18
2.7 การต่อขนานของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย	19
2.8 การต่อแบตเตอรี่แบบผสม	19
2.9 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่	20
2.10 การอัดประจุหรือคายประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่	21
2.11 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่	21
3.1 แบตเตอรี่ Samsung INR18650-30Q และประสิทธิภาพของเซลล์แต่ละชนิด	23
3.2 การต่อแบตเตอรี่สมดุลแบบอนุกรม	24
3.3 การต่อแบตเตอรี่ไม่สมดุลแบบอนุกรม	24
3.4 ชุดทดสอบแบตเตอรี่	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.5 การต่อแบตเตอรี่เพื่อทดสอบ 26

3.6 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดลอง 27

3.7 แผนผังการเชื่อมต่อชุดทดสอบแบตเตอรี่แบบสมดุล 28

3.8 แผนผังการเชื่อมต่อชุดทดสอบแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล 30

4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ 33

4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ 34

4.3 โมดูลการต่อเซลล์แบตเตอรี่แบบอนุกรม 35

4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 36

4.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 37

4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 38

4.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 39

4.8 ความสัมพันธ์ของแรงดันแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 40

4.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล 41

4.10 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 1 42

4.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 43

4.12 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 44

4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 46

4.15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 47

4.16 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1 48

4.17 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 2 49

4.18 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 50

4.19 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 51

4.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 52

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 53

4.22 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่2 52

4.23 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2 55

4.24 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 3 56

4.25 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 55

4.26 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 58

4.27 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 59

4.28 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 60

4.29 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 361

4.30 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.31 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 4 63

4.32 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 64

4.33 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 65

4.34 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 66

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 67

4.36 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 66

4.37 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงาน 5

2.1 จำนวนรอบการใช้งานต่อการอัดประจุแบตเตอรี่ ก่อนความจุแบตเตอรี่จะลดลงเหลือ 70% 11

5.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในแต่ละการทดลอง 72

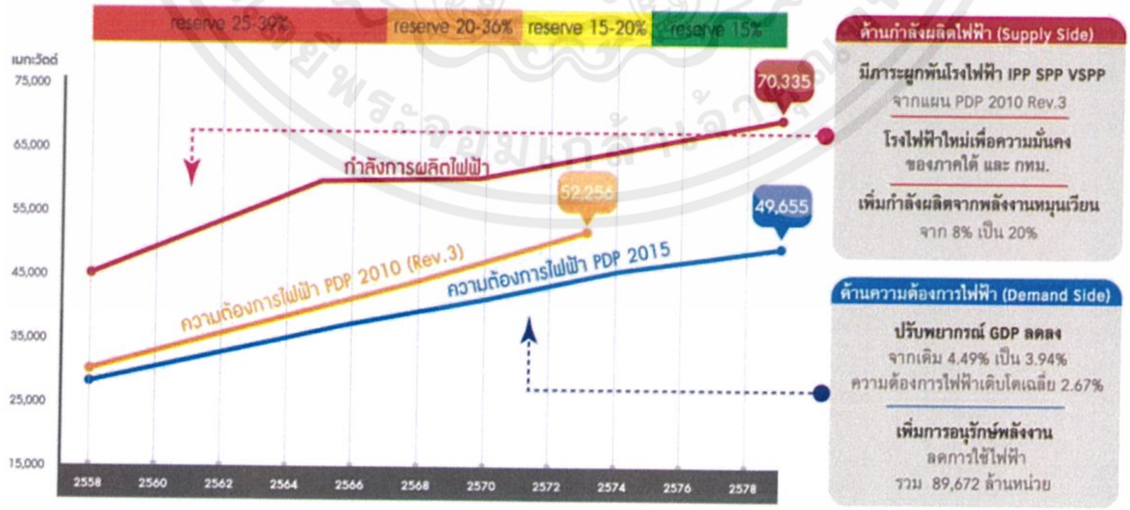
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

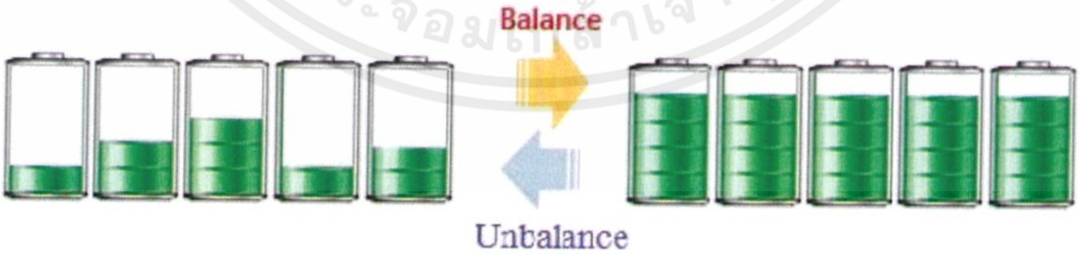
ปัจจุบันพลังงานทดแทนมีบทบาทต่อประเทศกำลังพัฒนา การใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของประชากรในอนาคต พลังงานจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจอย่างยิ่ง ในทั้งด้านอุสาหกรรมและด้านการคมนาคมการขนส่งล้วนมีพลังงานเป็นตัวขับเคลื่อน ในด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาตินั้น ไฟฟ้าที่ได้จะถูกผลิตออกมาไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณและช่วงเวลาในการผลิตได้ ก่อให้เกิดความผันผวนของการจ่ายพลังงาน และในระบบที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาติในปริมาณมากหากปล่อยให้มีการจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าโดยตรง โดยไม่มีการควบคุมจะเกิดเหตุการณ์ที่มีปริมาณไฟฟ้าไหลเข้าสู่ระบบเป็นจำนวนมากในช่วงที่มีความต้องการใช้น้อย แต่ในขณะที่มีความต้องการมาก แหล่งพลังงานทดแทนตามธรรมชาติกลับผลิตไฟฟ้าออกมาได้เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ระบบกักเก็บพลังงานจึงถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความสมดุลของปริมาณไฟฟ้าในระบบให้เหมาะสมกับความต้องการในการใช้งานซึ่งมีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลาโดยการกักเก็บพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าต่าง ๆ โดยในการผลิตไฟฟ้าสูงกว่ากำลังที่ต้องการ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 1.1 เพื่อนำมาช่วยจ่ายให้กับส่วนที่ที่มีความต้องการไฟฟ้าสูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ใช้ไฟฟ้า [1]



รูปที่ 1.1 การผลิตไฟฟ้าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แบตเตอรี่ (Battery) และแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมอย่างมากคือ แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน (Lithium-ion battery) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงมีความสามารถในการจัดเก็บพลังงานสูงรวมทั้งการคายประจุเอง (Self-discharge) น้อย ปลอดภัยและไม่ปล่อยมลพิษ ซึ่งแบตเตอรี่ทั่วไปหนึ่งลูกจะประกอบไปด้วยเซลล์เพียงหนึ่งเซลล์หรือเซลล์ หลายๆเซลล์ต่อกัน(โมดูลแบตเตอรี่) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน ที่ต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการใช้งานกับโหลดที่มีความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น ก็นำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า หรือถ้าต้องการใช้งานแบตเตอรี่นานขึ้น ความจุเพิ่มขึ้น จ่ายกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น ก็นำแบตเตอรี่มาต่อขนาน โดยการต่อแบตเตอรี่ทั้งสองแบบนี้ต้องใช้แบตเตอรี่ชนิดเดียวกัน แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ความจุแบตเตอรี่ที่เท่ากัน แต่ทว่าความจริงแล้ว ถึงแม้ว่าจะใช้แบตเตอรี่ที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แรงดันไฟฟ้าหรือความจุอาจไม่เท่ากัน ดังนั้น ถ้าหากเซลล์ใดเซลล์หนึ่งเกิดเสื่อมสภาพจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของแบตเตอรี่ลดน้อยลงและเป็นผลให้อายุการให้งานลดลงอีกด้วย คณะผู้วิจัย มีความต้องการที่จะศึกษาลักษณะการไม่สมดุลของแบตเตอรี่ (Unbalance Battery) ซึ่งอาจส่งผลต่าง ๆกับแบตเตอรี่ทั้งต่อเซลล์เดี่ยวและแบตเตอรี่โมดูล โดยแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลกับแบตเตอรี่ที่สมดุล สามารถแสดงได้ตามรูที่ 1.2 เนื่องด้วยในปัจจุบันมีเทคนิคที่ช่วยในการปรับสมดุลของแบตเตอรี่โมดูล เรียกว่า Balancing charger เป็นเทคนิคที่เพิ่มความสามารถของแบตเตอรี่ที่มีหลายเซลล์ เพื่อให้ทุกความจุของเซลล์แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของเซลล์แต่ละเซลล์ การปรับสมดุลแบตเตอรี่หรือการควบคุมแบตเตอรี่มักพบในแบตเตอรี่ชนิดลิเธียม ที่ใช้กับโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ค และยังพบในการใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 1.2 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลกับแบตเตอรี่ที่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหากพิจารณาการเสื่อมของแบตเตอรี่แล้ว ความไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่โมดูลไม่ได้เป็นเพียงปัจจัยเดียวที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมได้ ยังมีอีกหลายปัจจัยที่สามารถทำให้แบตเตอรี่เสื่อมได้ อาทิเช่น อุณหภูมิต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่ไม่เย็นหรือไม่ร้อนจนเกินไป โดยปกติแบตเตอรี่แต่ละเซลล์จะบอกอุณหภูมิที่เหมาะสมไว้เสมอ ลักษณะการใช้งานควรให้มีความเหมาะสมกับความต้องการ การอัดประจุแบตเตอรี่ควรอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้ขึ้นกับการใช้งานและการดูแลรักษาของผู้ใช้ หากไม่ปฏิบัติตามคำแนะนำการใช้งานอาจส่งผลให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่สั้นลงจนถึงไม่สามารถใช้แบตเตอรี่นั้น ๆ ได้

โครงงานนี้ได้นำเสนอถึงการศึกษาผลจากการที่ต่อแบตเตอรี่ไม่สมดุล โดยไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ ว่าเกิดผลกระทบอะไรกับแบตเตอรี่บ้าง โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อม โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบ โดยการอัดและคายประจุไฟฟ้า เพื่อจำลองการทำงานของแบตเตอรี่ โดยควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในการทดลอง แล้วจึงนำมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ว่าตัวแปรใดส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่อย่างไร และประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อศึกษาผลจากการไม่สมดุลของเซลล์ภายในโมดูลแบตเตอรี่

2. เพื่อศึกษาผลจากการไม่สมดุลทางแรงดันภายในโมดูลแบตเตอรี่ โดยจะพิจารณาแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ และระยะเวลาในใช้งาน

3. เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการใช้แบตเตอรี่โดยที่ไม่มี BMS โดยจะพิจารณาแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ และระยะเวลาในใช้งาน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา ความไม่สมดุลของแบตเตอรี่ภายในโมดูล และนำข้อมูลจากการทดสอบแบตเตอรี่มาวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบที่เกิดจาก ความไม่สมดุลและสาเหตุสำคัญในการใช้งานระบบจัดการแบตเตอรี่ โดยการใช้ผลจากการทดลองและข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงงาน

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์

2. ทำการทดลองในการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ ที่ 0.5C 1C และ 2C โดยควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นขณะทำการทดลอง

3. ทดลองต่อแบตเตอรี่ที่มีขนาดของแรงดันที่เท่ากัน แล้วจึงทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโมดูลแบตเตอรี่

4. ทดลองต่อแบตเตอรี่ที่มีขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เท่ากันแล้วจึงทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโมดูลแบตเตอรี่

5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างของโมดูลแบตเตอรี่ที่สมดุลและไม่สมดุล และผลกระทบ

6. รวบรวมข้อมูลการทดลองทั้งหมดและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และทำความเข้าใจในทฤษฎีตลอดจนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ พร้อมทั้งดำเนินงานในส่วนของการทดสอบและออกแบบการทดลอง โดยมีระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่ สิงหาคม 2561 ถึง พฤษภาคม 2562 รวมเป็น เวลา 10 เดือน โดยมีแผนการดำเนินโครงงานดังนี้

1. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทำโครงงาน

2. ศึกษาการใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่และตู้ควบคุมอุณหภูมิ

3. ทดสอบแบตเตอรี่แต่ละเซลล์

4. เชื่อมต่อและทดสอบเซลล์ของแบตเตอรี่ทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล

5. วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง

6. นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสรุปเป็นข้อเท็จจริง

7.รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษาความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทำโครงงาน	↔	↔								
2.ศึกษาการใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่ แล้วฝึกปฏิบัติ		↔	↔							
3.ศึกษาการใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น				↔	↔					
4.เชื่อมต่อและทดสอบเซลล์ของแบตเตอรี่ทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล						↔	↔			
5.วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง							↔	↔		
6.นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาสรุปเป็นข้อเท็จจริง								↔	↔	
7.รวบรวมข้อมูลการทดลองและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์									↔	↔

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติในการใช้งานของแบตเตอรี่ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์

2. โครงการวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าข้อมูลของแบตเตอรี่ นั้นเป็นข้อมูลจริงหรือเท็จจากการทดสอบการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่

3. โครงการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงสาเหตุของการใช้ BMS

4. โครงการวิจัยนี้ทำให้ทราบผลกระทบจากการเกิดกสรไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

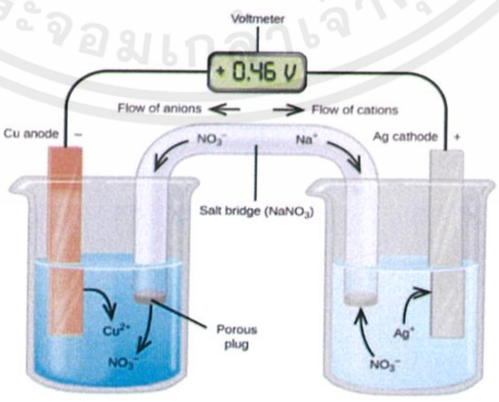
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่และเนื้อหาองค์ความรู้ที่นำไปใช้ประกอบการศึกษาและวินิจฉัยการไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่ โดยจะเน้นเนื้อหาไปทางด้านการเชื่อมต่อแบตเตอรี่และการทดสอบแบตเตอรี่ โดยกล่าวถึงลักษณะการทดสอบ วิธีการทดสอบ รวมถึงการใช้งานแบตเตอรี่ที่เหมาะสม ปัจจัยที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อม

2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ในอนาคต โดยภายในแบตเตอรี่ประกอบด้วย เซลล์ไฟฟ้าเคมี หนึ่งเซลล์หรือมากกว่า มีการเชื่อมต่อกันแต่ละเซลล์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า ที่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานของผู้บริโภค โดยส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีหรือเซลล์กัลวานิก สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.1 ในแต่ละเซลล์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ประกอบด้วยขั้วบวก (Anode) และ ขั้วลบ (Cathode) ซึ่งขั้วที่มีเครื่องหมายบวกจะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วที่มีเครื่องหมายลบ ขั้วที่มีเครื่องหมายลบคือแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนที่เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้จะไหลและส่งมอบพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายนอก โดยที่สารอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีความสามารถยอมให้ปฏิกิริยาทางเคมีในขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างกันทำงานเป็นการส่งมอบพลังงานให้กับวงจรภายนอก



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเซลล์กัลวานิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำหรับจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ได้ แต่สามารถอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ ได้หลายครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพของการอัดและคายประจุใหม่จะไม่เต็ม 100% จะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งาน เพราะมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปในรูปความร้อนและปฏิกิริยาเคมี ขณะอัดและคายประจุนั่นเอง แบตเตอรี่จัดเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และเสียหายได้ง่ายหากดูแลรักษาไม่ดีพอหรือใช้งานผิดวิธี รวมถึงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป เนื่องด้วยวิธีการใช้งาน, การบำรุงรักษา, การประจุไฟฟ้าหรืออุณหภูมิ ฯลฯ ที่แตกต่างกันไป[2]

2.3 นิยามคำศัพท์เกี่ยวกับแบตเตอรี่ [3]

Ampere (Amp, A)

แอมแปร์เป็นหน่วยวัดของกระแสไฟฟ้า ปริมาณกระแส 1 A ที่ไหลในตัวนำเป็นเส้นตรงขนานกัน 2 เส้น ที่มีความยาวไม่จำกัด มีพื้นที่หนตัดที่เล็กมาก และวางห่างกัน 1 เมตร ในสุญญากาศ ก็จะทให้เกิดแรงระหว่างตำแหน่งทั้งสองนี้เท่ากับ 2×10^{-7} นิวตันต่อเมตร

Ampere-Hour (Amp-Hrs., Ah)

หน่วยการวัดของความสามารถในการจัดเก็บความจุทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เท่ากับกระแสไฟฟ้าคูณกับเวลาเป็นชั่วโมง Ampere-Hour โดย 1 Ah เท่ากับการไหลของกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Battery Cells, Modules, Packs,

แบตเตอรี่ 1 เซลล์ที่เป็นหน่วยพื้นฐานที่เล็กที่สุดของแบตเตอรี่ เมื่อเซลล์จำนวนมากถูกใส่เข้าไปในเฟรมเพื่อป้องกันอันตรายจากแรงกระแทกจากภายนอก เช่นความร้อนหรือการสั่นสะเทือน เรียกว่าโมดูลแบตเตอรี่ และเมื่อมีโมดูลแบตเตอรี่หลายชุดต่อพร้อมกับ BMS และอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ควบคุมและจัดการอุณหภูมิของแบตเตอรี่, แรงดันไฟฟ้า จะเรียกว่าแบตเตอรี่แพค

BMS (Battery Management Systems)

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจสอบและจัดการการทำงานของชุดแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มระยะเวลาการใช้งานของชุดแบตเตอรี่ให้มากที่สุดและรับประกันความปลอดภัยสำหรับการใช้งานอย่างจำเพาะโดยการตรวจสอบการจ่ายพลังงานในชุดแบตเตอรี่และติดตามผลตัวแปรที่เป็นกุญแจสำคัญ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถสื่อสารกับระบบอื่นเช่นเครื่องอัดประจุหรือผู้ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C-Rate

ซีเรท คือหน่วยของการอัดประจุและคายประจุ จะคิดเป็นจำนวนเท่าของความจุของแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่ขนาด 80 Ah หากกำหนดให้คายประจุที่ 1 C จะหมายความว่าแบตเตอรี่จะคายประจุที่กระแสไฟฟ้า 80 แอมป์ ได้เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ถ้าคายประจุที่ 0.5C แบตเตอรี่จะคายประจุที่กระแสไฟฟ้า 40 แอมป์ ได้เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง

Capacity

ความจุของแบตเตอรี่คือปริมาณพลังงานที่สามารถใช้ได้ในการปล่อยประจุเพียงครั้งเดียว จะแสดงเป็นแอมป์ชั่วโมงหรือวัตต์ชั่วโมง

Capacity Retention (Charge Retention)

ความสามารถในการจุของแบตเตอรี่ที่ลดลง ซึ่งส่งผลมาจากการปล่อยประจุแบตเตอรี่ หลังจากที่มันถูกจัดเก็บไว้แล้วระยะนึง

Cell Mismatch

เซลล์ที่อยู่ในชุดแบตเตอรี่ซึ่งบรรจุด้วยความจุและระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

Cell Reversal

เซลล์ที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า (เซลล์ส่วนมากเชื่อมต่อกันโดยการต่อแบบอนุกรม) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับไปเซลล์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติภายในโมลดูล ทำให้อัตราการคายประจุของแบตเตอรี่ลดลง

Cutoff Voltage

แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำสุดที่เซลล์หรือแบตเตอรี่ ยอมให้มีได้ขณะอัดประจุหรือคายประจุ

Cycle Life

จำนวนรอบที่อัดประจุแบตเตอรี่ จนเต็ม 100% ก็จะนับเป็น 1 Cycle หรือ 1 รอบ จำนวนรอบหรือ Cycle มากกว่า แสดงว่าการใช้งานได้อย่างยาวนานกว่านั่นเอง ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่เต็ม 100% เมื่อเริ่มใช้งานตามปกติเมื่อใช้ไปจนแบตเตอรี่เหลือ 60% ก็นำแบตเตอรี่ไปอัดประจุจนเต็ม 100% เหมือนเดิม ในการอัดประจุจนเต็ม 100% แสดงว่าจะได้ 40% กลับมาเหมือนเดิม เมื่ออัดประจุเสร็จก็นำไปใช้งาน จนแบตเตอรี่เหลือ 40% ก็นำแบตเตอรี่ไปอัดประจุจนครบ 100% ซึ่งก็อัดประจุไฟเข้าไป 60 % ดังนั้นในการอัดประจุครั้งแรกเราได้อัดประจุไป 40% รวมกับครั้งที่สองที่อัดประจุไป 60% รวมเป็น 100% แสดงว่าคือการนับรอบเป็น 1 Cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Corrosion

การกัดกร่อน ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีระหว่างวัสดุ ส่วนมากมักเป็นโลหะ ซึ่งสภาพแวดล้อมมักก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุและสมบัติของวัสดุนั้น ๆ ขั้วแบตเตอรี่อาจมีการกัดกร่อนหากไม่ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

Depth of Discharge

ปริมาณแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป เช่น Depth of discharge 100% เท่ากับแบตเตอรี่ถูกใช้งานเหลือ 0% Depth of charge 10% เท่ากับ แบตเตอรี่เหลือ 90%

Discharge cycles before the battery capacity drops to 70% คือ จำนวนรอบการใช้งานต่อการอัดประจุแบตเตอรี่ ก่อนที่ความจุของแบตเตอรี่จะลดลงไปเหลือ 70% ของความจุเดิม ตารางที่ 2.1 นี้เป็นผลการทดลอง แสดงการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ระดับไฟฟ้าต่าง ๆ ส่งผลต่อความจุของแบตเตอรี่ในระยะยาวอย่างไรการทดลองทำโดยการอัดประจุแบตเตอรี่ Li-Ion ขนาดความจุเท่ากันแต่เริ่มอัดประจุที่ระดับ Depth of discharge ต่างกันและบันทึกข้อมูลว่าสามารถอัดประจุไปได้อีกกี่รอบก่อนที่ความจุเต็มๆของแบตเตอรี่จะตกลงไปเหลือ 70% จากความจุเริ่มต้น

ตารางที่ 2.1 จำนวนรอบการใช้งานต่อการอัดประจุแบตเตอรี่ ก่อนความจุแบตเตอรี่จะลดลงเหลือ 70%

Depth of Discharge	*Discharge cycles before the battery capacity drops to 70%*
100%	300 - 500
50%	1200 - 1500
25%	2000 - 2500
10%	3750 - 4700

พบว่าถ้าใช้งานแบตเตอรี่จนหมด แล้วจึงอัดประจุ และทำเช่นนี้ไป 300-500 รอบ ก็จะพบว่า แบตเตอรี่มีความจุลดลงไปเหลือ 70% จากเดิม ในขณะที่การอัดประจุแบตเตอรี่ตอนที่เหลือมากกว่า 0% จะมีจำนวนรอบมากกว่า 4-8 เท่าก่อนที่แบตเตอรี่จะมีความจุลดลงเหลือ 70%

ดังนั้นข้อมูลที่ว่า การอัดประจุแบตเตอรี่เมื่อประจุเหลือน้อย ๆ นั้นทำให้แบตเตอรี่เสื่อมเร็วเป็นความจริง แต่ทว่าการอัดประจุเมื่อประจุลดไปเล็กน้อย ก็ไม่ได้ส่งผลดีนัก ช่วงที่เหมาะสมที่สุดจากข้อมูลในตารางที่ 2.1 คือช่วงที่แบตเตอรี่เหลือ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deep-Cycle Battery

แบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถคายประจุได้มากกว่าแบตเตอรี่แบบธรรมดา โดยที่แบตเตอรี่ deep cycle สามารถที่จะคายประจุได้ถึง 45 – 75%ของพลังงานที่เก็บสะสมอยู่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแต่ละผู้ผลิตแต่ละยี่ห้อ

แบตเตอรี่ deep cycle ยังเป็นแบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบมาให้มีอายุการใช้งานยาวขึ้น โดยการเพิ่มขนาดของแผ่นตะกั่วให้มีความหนามากขึ้น และลดพื้นที่ผิวสัมผัสตะกั่วกับสารละลายลง จึงทำให้การอัดประจุและคายการประจุใช้เวลานานกว่า แบตเตอรี่รถยนต์ และเนื่องจากมีพื้นผิวสัมผัสที่น้อยกว่านี่เอง การคายประจุหรือจ่ายกระแสไฟฟ้าจึงจ่ายออกมาไม่สูงมาก ไม่เหมือน แบตเตอรี่รถยนต์ ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้สามารถจ่ายกระแสได้สูงกว่า ซึ่งเหมาะกับการใช้งานลักษณะที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงขณะสตาร์ทเครื่องยนต์ และนั่นก็เป็นสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่รถยนต์มีอายุสั้นกว่าด้วย

E-Rate

กำลังในการอัดประจุหรือคายประจุ แสดงในรูปอัตราความจุของเซลล์หรือแบตเตอรี่ที่ถูกแสดงในรูป watt-hours ตัวอย่างเช่น อัตรา E/10 ของเซลล์หรือแบตเตอรี่อัตรา 17.3 watt-hours คือ 1.73 watts กระบวนการคล้ายกับการคำนวณ C-rate

Equalization Charge

วิธีในการอัดประจุในระบบที่เชื่อมต่อกันหลายเซลล์หลังจากใช้งานไประยะหนึ่ง แบตเตอรี่ทั้งชุดจะมีความต่างศักย์ในเรื่องการจ่ายและรับประจุในระดับหนึ่ง ซึ่งความต่างศักย์นี้จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุการใช้งาน ซึ่งในที่สุดก็จะทำให้ระบบไม่เสถียรหรือล่มได้ จึงต้องมีการอัดประจุเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน

ดังนั้นวิธีที่จะดูแลรักษาแบตเตอรี่ในระบบให้มีความต่างศักย์เท่ากันนั้นจะทำให้ระบบมีความเสถียรเหมือนติดตั้งใหม่ นั้นคือการ Equalize charge แบตเตอรี่ทั้งระบบให้กลับมาสมบูรณ์ที่สุด โดยแบตเตอรี่ทั้งหมดในระบบจะได้รับการอัดประจุจนกว่าจะกลับมาเท่ากันอีกครั้ง ซึ่งการอัดประจุในระบบนี้จะไม่เป็นอัตโนมัติแต่จะอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่จนกว่าแบตเตอรี่ทุกลูกในชุดจะเท่ากันหรือใกล้เคียงกันที่สุด

Float Charging (Trickle charge)

วิธีเก็บรักษาความจุภายในเซลล์ให้เต็มอยู่เสมอด้วยการประจุไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fast Charge

การอัดประจุอย่างรวดเร็ว โดยการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้า ในการอัดประจุเพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุ ทำให้แบตเตอรี่ใช้เวลาในการอัดประจุเต็มน้อยลง

Internal Resistance (IR)

ความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์หรือแบตเตอรี่ ภายในเซลล์ความต้านทานภายในคือผลรวมของความต้านทานไอออนิกและความต้านทานของอิเล็กโทรนิกส์ของแต่ละชิ้น

Memory Effect

เกิดจากการที่นำถ่านอัดประจุประเภท Ni-Cd และ Ni-MH มาอัดประจุซ้ำในขณะที่ประจุถ่านยังไม่หมดก้อน ประจุใหม่ที่อัดประจุเข้าไปนั้นจึงเข้าไปได้ไม่เต็มก้อน เมื่อนำถ่านมาใช้งานอีกครั้ง ประจุที่ใช้งานได้จะเป็นส่วนของประจุที่อัดประจุเข้าไปใหม่เท่านั้น ทำให้ถ่านมีความจุลดลง การใช้งานสั้นลง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อถ่านอัดประจุเหลือประจุอยู่ 70% แล้วเอาไปอัดประจุไฟใหม่ ประจุใหม่ที่อัดประจุเข้าไปได้จะได้แค่ 30% เมื่อเรานำไปใช้อีกครั้งถ่านอัดประจุก้อนนั้นจะสามารถจ่ายประจุออกมาได้แค่ 30% ไม่ใช่ 100% อีกต่อไป

Shelf Life

ระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถเก็บไว้ได้โดยไม่เสื่อมสภาพก่อนที่จะอัดประจุไฟ(ก่อนซื้อไปใช้งาน) ความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่ออายุการเก็บรักษา โดยสภาพแวดล้อมในการจัดเก็บที่อุ่นขึ้นจะทำให้อายุการเก็บรักษาสั้นลง คุณภาพของแบตเตอรี่มีผลต่ออายุการเก็บรักษาดังนั้นผู้ผลิตที่คำนึงถึงคุณภาพจึงผลิตแบตเตอรี่ที่มีคุณภาพสูงขึ้นอายุการใช้งานขณะเก็บรักษาไว้ในสภาพที่ไม่ได้ใช้งาน

State of Charge

บ่งบอกถึงความจุที่คงเหลือของแบตเตอรี่ สำหรับช่วงเวลาอัดประจุ ระดับแรงดันไม่ใช่พารามิเตอร์บ่งชี้ค่าของ SOC ของแบตเตอรี่ในบางกรณี แรงดันไฟฟ้า 12.6 โวลต์ แบตเตอรี่อาจมีค่า SOCเท่ากับ 100% แต่ที่แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ อาจพบว่า SOC มีค่าเท่ากับ 0% โดยทั่วไป SOC ของแบตเตอรี่จะถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วง 20 – 95% และไม่ควรต่ำกว่า 40% สำหรับการใช้งาน

State of Health

อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของความจุแบตเตอรี่ที่ใช้งานแล้วต่อค่าสูงสุดของความจุแบตเตอรี่ใหม่ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งชี้การเสื่อมสภาพและอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Self-Discharge

การคายประจุด้วยตัวเอง การสูญเสียความจุของแบตเตอรี่ที่เก็บไว้ ในขณะที่ไม่ได้ใช้งานใด ๆ โดยอัตราการคายประจุด้วยตัวเองแปรผันกับอุณหภูมิภายนอก

Watt-Hour (Watt-Hrs, WH)

การวัดค่าพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่กำหนด การคูณกันของแรงดันไฟฟ้าและแอมป์ชั่วโมง

Nominal Voltage

ค่าแรงดันของแบตเตอรี่ ค่าแรงดันนี้ใช้เพื่อบ่งบอกแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ค่าแรงดันไฟฟ้าคือ 2 โวลต์ต่อเซลล์

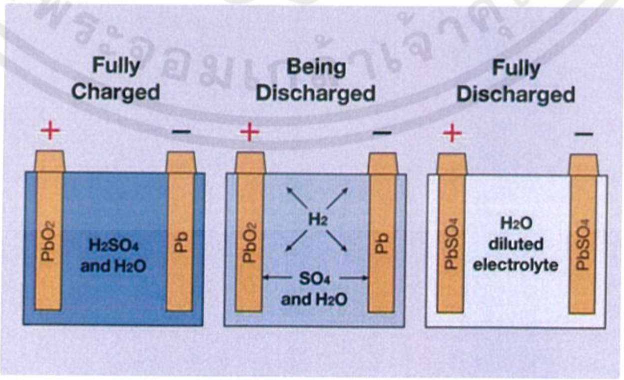
Rapid Charge

เวลาในการอัดประจุระหว่างการอัดประจุแบบช้าและอัดประจุแบบเร็ว

2.4 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์ และจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ในรถยนต์ ไฟฟ้าจะถูกจ่ายออกไปเรื่อย ๆ ถ้าไฟฟ้าหมดก็นำไปอัด ประจุกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยยกตัวอย่างการทำงานชองแบตเตอรี่ ตะกั่ว-กรด และ li-ion ดังนี้ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ประกอบด้วย

แผ่นธาตุบวก (+) มีสูตรทางเคมีเป็น PbO_2
แผ่นธาตุลบ (-) มีสูตรทางเคมีเป็น Pb
น้ำกรดกำมะถันที่ใช้ในแบตเตอรี่ มีสูตรทางเคมีเป็น H_2SO_4



รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแบตเตอรี่ เชื่อมต่อกับวงจรภายนอกจะเกิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ เป็นผลจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่าง กรดกำมะถัน (H_2SO_4), แผ่นธาตุบวก (PbO_2) และแผ่นธาตุลบ (Pb) โดยขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าออก ออกซิเจนในแผ่นธาตุบวก (PbO_2) จะรวมตัวกับไฮโดรเจนในกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เกิดเป็นน้ำ (H_2O) ในขณะเดียวกัน Pb ใน PbO_2 รวมตัวกับซัลเฟต (SO_4) ใน H_2SO_4 เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ ตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) ในขณะเดียวกันตะกั่วพรุน (Pb) ในแผ่นธาตุลบก็จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต (SO_4) ในกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เกิดตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) เช่นเดียวกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประกอบด้วย

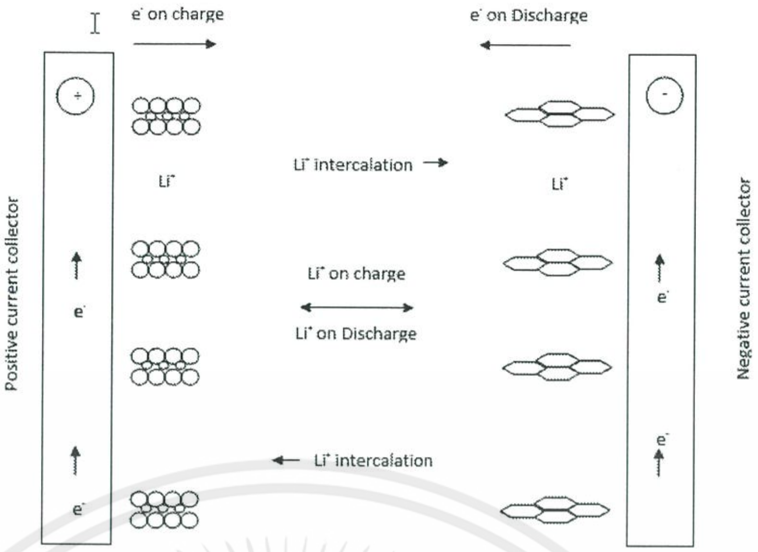
ขั้วลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนเคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง เช่น แกรไฟต์เคลือบ บนแผ่นทองแดง เป็นต้น

ขั้วบวกมีองค์ประกอบเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียม

อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียมในสารละลาย

โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนของลิเทียมและอิเล็กตรอนของขั้วบวกและขั้วลบ เยื่อเลือกผ่าน (Separator) ทำหน้าที่คั่นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็น พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเมื่อมีการอัดประจุลงในแบตเตอรี่ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.3 ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนตัวออกจากขั้วบวก ผ่านเยื่อเลือกผ่านและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าสู่ขั้วลบ เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมและคาร์บอน ในทางกลับกัน อิเล็กตรอนจากขั้วบวกจะเคลื่อนตัวจากขั้วบวกเข้าสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก ซึ่งในขณะที่เกิดการคายประจุ ก็จะเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงข้ามกันร่วมด้วย กระบวนการที่ไอออนของลิเทียมแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของขั้วลบเรียกว่า “Lithium insertion” หรือ “Lithium intercalation”

2.5 ประเภทแบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้และแบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ (ใช้แล้วทิ้ง)

2.5.1 แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้

แบตเตอรี่ใช้แล้วทิ้งเรียกอีกอย่างว่า “เซลล์ปฐมภูมิ” สามารถใช้ได้ครั้งเดียว เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมี และเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมดไฟฟ้าก็จะหมดจากแบตเตอรี่ แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกใช้ไฟฟ้าน้อยหรือใน พื้นที่ที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้

แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้หรือ “เซลล์ทุติยภูมิ”สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้หลังจากใช้งานไฟฟ้าหมด เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ ผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ประจุไฟฟ้านี้เรียกว่า รีชาร์จเจอร์

แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ที่เก่าแก่ที่สุดซึ่งใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบันคือ "เซลล์เปียก" หรือแบตเตอรี่ตะกั่วกรด นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ แบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ต้องเติม และ ดูแลน้ำกลั่นบ่อย ๆ อย่างน้อยสัปดาห์ละครั้งกับแบบไม่ต้องดูแลบ่อย ซึ่งจะกินน้ำกลั่นน้อยมาก โดยทั้ง 2 แบบนี้จะมีฝาปิด-เปิดสำหรับเติมน้ำกลั่น ในแบบแรกนี้จะมีอายุการใช้งานโดยประมาณ 1.5-2 ปี แต่ไม่ควรเกิน 3 ปี ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งาน และการดูแลรักษา ถ้าหากมีการดูแลรักษาอยู่สม่ำเสมอก็จะทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

อีกทั้งยังมีแบตเตอรี่ที่เกิดภายหลังมีการพัฒนาเพื่อไม่ต้องเติมน้ำกลั่น จึงเรียกตามลักษณะให้ตรงข้ามกับแบบดั้งเดิม คือ แบบแห้ง แต่สภาพที่แท้จริงของแบตเตอรี่ชนิดนี้ เมื่อนำมาใช้กับรถยนต์ก็ยังคงมีของเหลวอยู่ภายใน ไม่ว่าจะเป็นแบบตะกั่ว-กรดที่ใช้แคดเมียม (Cd) และตะกั่ว (Pb) ในแผ่นเซลล์หรือพวกที่ใช้สารละลายอัลคาไลน์หรือที่รู้จักกันในชื่อ นิเกิล-แคดเมียม ปัจจุบันนี้นิยมใช้แบตเตอรี่แบบแห้งอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าแบตเตอรี่แบบเปียก แบตเตอรี่แบบแห้งนี้จะมีอายุการใช้งานโดยประมาณ 5-10 ปี แต่มีราคาแพง แบตเตอรี่แบบนี้ไม่มีฝาปิด-เปิดสำหรับเติมน้ำกลั่น หรืออาจจะถูกซีลฝาแต่ก็ยังมีตาแมวไว้สำหรับไว้คอยตรวจเช็คระดับน้ำกรดและระดับไฟอัดประจุ

2.6 การต่อแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มความจุของแบตเตอรี่

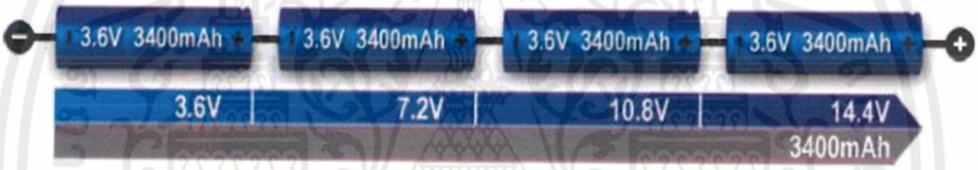
การเชื่อมต่อแบตเตอรี่หลายๆเซลล์นั้น เป็นผลเนื่องมาจากความต้องการ การใช้งานที่เพิ่มขึ้น ในทั้งความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น หรือความต้องการความจุที่มากขึ้นโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมงทั้งหมด (Ah) ซึ่งทำได้โดยการนำแบตเตอรี่มาต่อแบบอนุกรมและแบบขนานตามลำดับ หรือแบบผสมทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานในกรณีที่ต้องการเพิ่มทั้งแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ต้องคำนึงในการนำแบตเตอรี่มาเชื่อมต่อกัน ไม่ว่าจะเป็นแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสม คือประเภทของแบตเตอรี่ของแต่ละเซลล์ที่นำมาต่อ ซึ่งต้องใช้แบตเตอรี่ประเภทเดียวกัน มีแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ (Ah) เท่ากัน นอกจากนั้นยังไม่ควรใช้แบตเตอรี่ ที่มีชนิดและขนาดแตกต่างกันมาเชื่อมต่อ เนื่องจากเซลล์ที่แรงดันไฟฟ้าหรือความจุอ่อนกว่า จะก่อให้เกิดความไม่สมดุลของแบตเตอรี่

2.6.1 แบบอนุกรม

เป็นการต่อแบตเตอรี่แบบเรียงต่อกัน (ขั้วบวกต่อขั้วลบ) โดยที่มีปริมาณของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากัน แต่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีแบตเตอรี่ก้อนใด ก้อนหนึ่งหมดสภาพหรือเกิดความเสียให้จะทำให้แบตเตอรี่ ก้อนนั้น ๆ เปรียบเสมือนวงจรเปิด วงจรแบตเตอรี่อนุกรมก็จะไม่สามารถทำงานได้

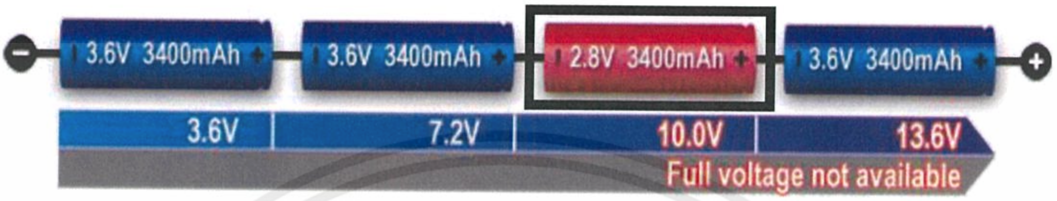


รูปที่ 2.4 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.4 แสดงการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม โดยที่ในแต่ละเซลล์มีพิกัดเดียวกัน คือ แรงดันไฟฟ้า 3.6 โวลต์ ความจุ 3400 mAh ซึ่งการต่อแบบอนุกรม นี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุก ๆเซลล์ที่ต่อเข้าไป แต่ความจุยังคงที่เท่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การต่อแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าสูงจำเป็นต้องมีการจับคู่เซลล์อย่างรอบคอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องนำไปใช้กับโหลดขนาดใหญ่หรือในขณะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อมีหลายเซลล์ที่เชื่อมต่ออยู่ในโมดูล ความเป็นไปได้ที่ความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพของเซลล์หนึ่ง อาจทำให้เกิดความล้มเหลวต่อทั้งโมดูล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้จึงต้องมีสวิทช์ที่จะบายพาสความล้มเหลวของเซลล์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเวียนได้อย่างต่อเนื่องแม้ว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำลง

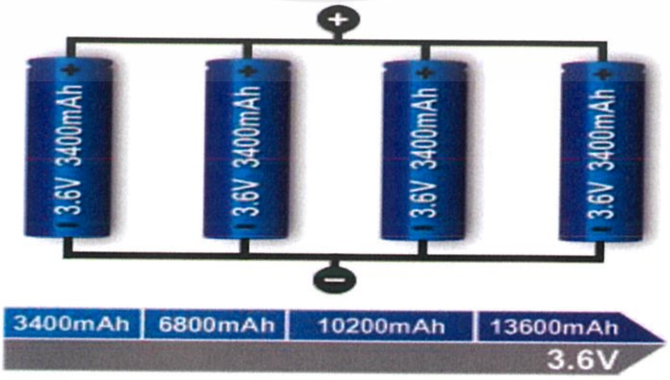


รูปที่ 2.5 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย

รูปที่ 2.5 แสดงชุดแบตเตอรี่ที่ "เซลล์ 3" ผลิตได้เพียง 2.8 โวลต์ แทนที่จะเป็น 3.6 โวลต์ ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ตกต่ำแบตเตอรี่นี้จะถึงจุดสิ้นสุดของปล่อยประจุเร็วกว่าชุดปกติ ซึ่งหมายความว่า แบตเตอรี่จะหมดไวกว่าปกติ ถ้าเซลล์หนึ่งในโมดูลเสื่อมสภาพหรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์อื่น จะนำไปสู่ความผิดพลาดในการใช้งานหรือเกิดอุบัติเหตุได้

2.6.2 แบบขนาน

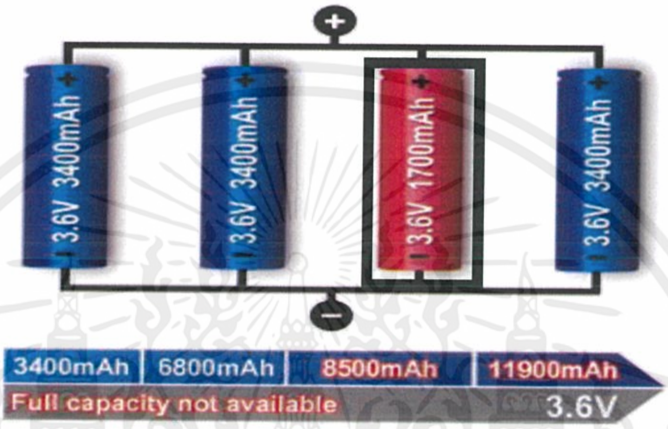
เป็นการนำปลายข้างเดียวกัน (ขั้วเดียวกัน) ของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันก่อนแล้วจึงต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้า โดยการต่อแบบขนานแรงดันไฟฟ้ารวมจะเท่าเดิม (เท่ากับเซลล์เดียว) แต่กระแสไฟฟ้าหรือความจุรวมในโมดูลเท่ากับกระแสไฟฟ้าหรือความจุแต่ละเซลล์รวมกัน ข้อดีของแบบขนานก็คือ ถ้ามีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรไม่ทำงาน ก็จะไม่ส่งผลให้อุปกรณ์ตัวอื่น ๆที่อยู่ในวงจรไม่ทำงานไปด้วย



รูปที่ 2.6 การต่อขนานของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

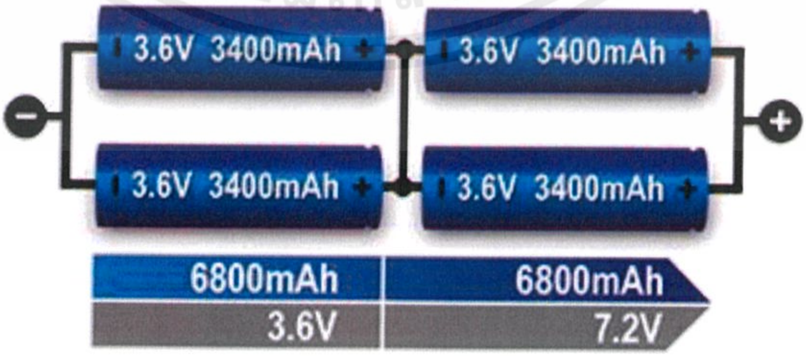
รูปที่ 2.6 แสดง เซลล์แบตเตอรี่ 4 เซลล์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน แรงดันไฟฟ้าระบุของโมดูล (พิกัด) ยังคงอยู่ที่ 3.6 โวลต์ ขณะที่ความจุ (Ah) และระยะเวลาในการทำงานจะเพิ่มขึ้นสี่เท่า ในกรณีที่เซลล์ที่นำมาต่อขนานเกิดความผิดพลาดหรือเปิดวงจรดังรูปที่ 2.7 จะเกิดความเสียหายต่อโมดูลน้อยกว่าการต่อวงจรแบบอนุกรม โดยที่เซลล์ที่มีข้อผิดพลาดจะลดความจุในการจ่ายโหลดทั้งหมด ทำให้เวลาในการทำงานลดลง เซลล์ที่ลัดวงจรอาจทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปและ อาจเกิดอันตรายจากไฟไหม้ได้จึงต้องมีฟิวส์ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้าสูงโดยการแยกเซลล์



รูปที่ 2.7 การต่อขนานของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย

2.6.3 แบบผสม

เป็นการนำเอาข้อดีของการต่ออนุกรมคือการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในโมดูลและข้อดีของการต่อแบบขนานคือการเพิ่มความจุของโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้การต่อแบตเตอรี่แบบผสมสามารถให้แรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ตามที่ต้องการใช้งานได้ ดังรูปที่ 2.8



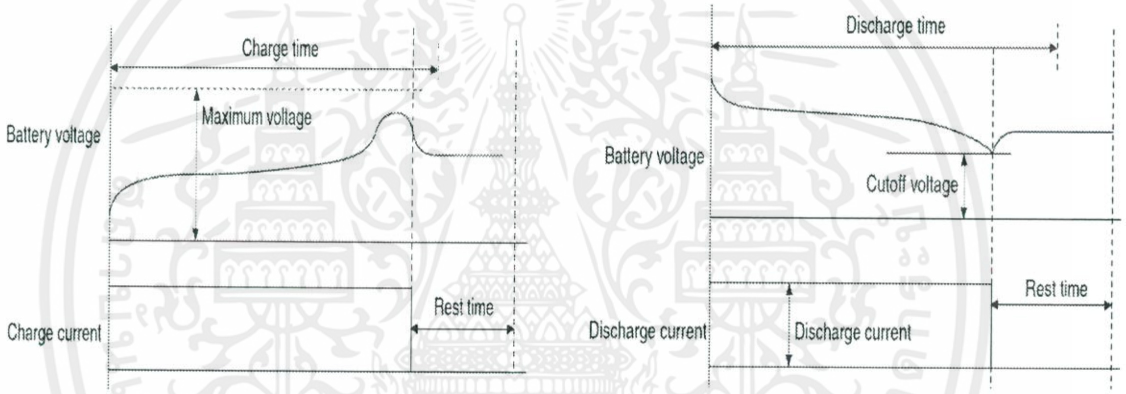
รูปที่ 2.8 การต่อแบตเตอรี่แบบผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 โหมดการอัดประจุและการคายประจุ

2.7.1 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุหรือคายประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Constant Current or CC) เป็นรูปแบบง่ายๆ โดยการกำหนดให้อัดประจุหรือคายประจุแบตเตอรี่ด้วยพิกัดกระแสไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่ง ในกรณีอัดประจุแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าพิกัดแบตเตอรี่สูงสุดแสดงว่าแบตเตอรี่อัดประจุเต็ม ในทางตรงกันข้ามการคายประจุแรงดันไฟฟ้าจะลดจนถึงค่าที่ตั้งไว้หรือจนถึงระดับค่าพิกัดแบตเตอรี่ต่ำสุด ซึ่งเวลาในการอัดประจุแบตเตอรี่แปรผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ใช้ ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าต่ำก็จะใช้เวลานาน แต่ถ้าใช้กระแสไฟฟ้าสูงใกล้เคียงพิกัดแบตเตอรี่ก็จะใช้เวลาน้อยลง แต่มีข้อเสียที่แบตเตอรี่อาจร้อนจนเกินไป ซึ่งจะนำไปสู่การเปลี่ยนแบตเตอรี่ก่อนเวลาอันควร ดังรูปที่ 2.9



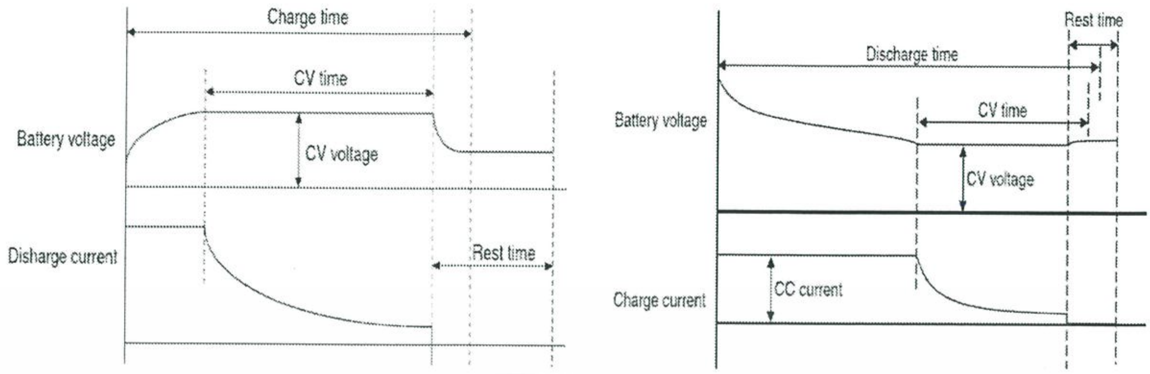
รูปที่ 2.9 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

2.7.2 การอัดประจุหรือคายประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุหรือคายประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Voltage or CV) ช่วยให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดของเครื่องอัดประจุหรือโหลด ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่แบตเตอรี่ได้ จนกว่าแหล่งจ่ายไฟจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งไว้ กระแสไฟฟ้าจะลดลงเหลือน้อยที่สุดเมื่อถึงระดับแรงดันไฟฟ้าแล้ว โดยที่สามารถเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับที่อัดประจุได้จนกว่าจะพร้อมสำหรับการใช้งาน เพื่อชดเชยการคายประจุเองของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.10

ซึ่งวิธีนี้มักใช้ร่วมกับการคงที่กระแสไฟฟ้าในช่วงแรก จนกว่าจะถึงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการคงสภาพไว้ เรียกว่า CC-CV Charge & Discharge

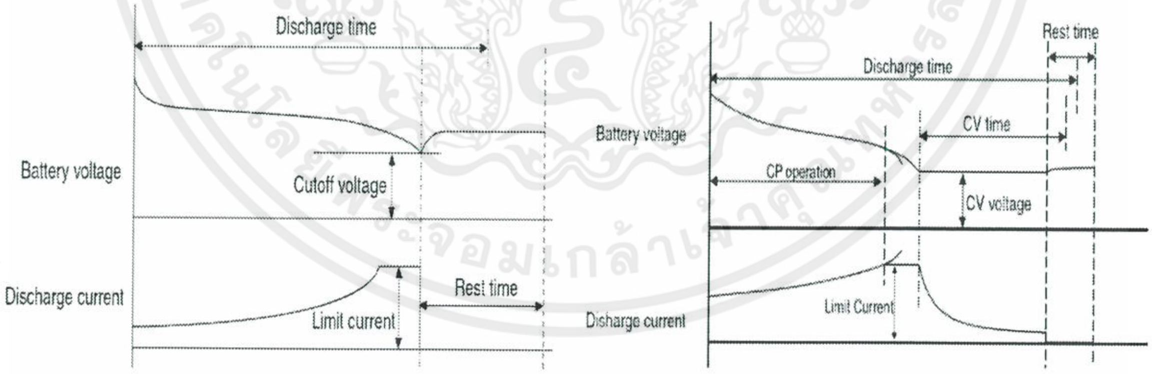
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การอัดประจุหรือคายประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่

2.7.3 การอัดประจุหรือการคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุหรือการคายประจุแบบคงที่กำลังไฟฟ้า (Constant Power or CP) ถ้าแรงดันไฟฟ้าลดลงทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สามารถจำกัด การใช้กระแสไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังสามารถใช้ร่วมกับโหมดคงที่แรงดัน ทำให้สามารถจ่ายกระแสที่ลดลงได้อีกเรียกว่า CP-CV Discharge ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การอัดประจุหรือคายประจุแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การอัดและคายประจุเกิน

2.8.1 การอัดประจุแบตเตอรี่เกิน (Overcharge)

แบตเตอรี่จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยภายใต้แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด ซึ่งหากมีการอัดประจุเกินแรงดันที่กำหนดโดยไม่ได้ตั้งใจ เช่น การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้า 4.30 โวลต์เป็นเวลานาน ในแบตเตอรี่ที่ออกแบบมามีแรงดันไฟฟ้า 4.20 โวลต์ ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวแยก (Separator) ที่บางมาก ทำหน้าให้องค์ประกอบของแบตเตอรี่แยกจากกัน นั่นคือสิ่งที่นำไปสู่การลัดวงจรภายในและการสะสมความร้อน การสะสมความร้อนในเซลล์หนึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อเซลล์อื่นในบริเวณใกล้เคียงซึ่งเป็นสาเหตุที่กลุ่มเซลล์ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าบางก้อนถูกเก็บไว้ในช่องป้องกันแยกต่างหาก

ดังนั้นควรอัดประจุแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิปานกลางตรวจสอบให้แน่ใจว่าแบตเตอรี่มีวงจรป้องกันการอัดประจุเกินเกินและหยุดการอัดประจุหากแบตเตอรี่มีความร้อนที่สูงขึ้นมาก เนื่องจากการสะสมความร้อนอาจนำสู่ ผลเสียต่อแบตเตอรี่ หรือในกรณีที่แย่ที่สุดคือเกิด การไฟไหม้ ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน เป็นต้น

2.8.2 การคายประจุแบตเตอรี่เกิน (Overdischarge)

การคายประจุเกิดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่เกินกว่าแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด เช่น แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย ได้ที่แรงดันไฟฟ้า 2 โวลต์ ซึ่งหากมีการใช้งานจนแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำกว่า 2 โวลต์ ก็จะเกิดการคายประจุเกิน หรือ Deep Discharge ซึ่งแบตเตอรี่บางชนิดจะถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จึงไม่ได้รับความเสียหายเมื่อมีการคายประจุเกิน

การคายประจุเกินจะมีผลใกล้เคียงกับการอัดประจุเกิน โดยที่จะทำให้เกิดการใช้งาน Active material มากเกินไป เกิดการกัดกร่อนที่ขั้ว เมื่อใช้ในระยะเวลานานจะทำให้ความจุของแบตเตอรี่ลดลง ไม่สามารถอัดประจุใหม่ได้ การสะสมความร้อน สามารถนำไปสู่การเกิดไฟไหม้ได้เช่นกัน

BMS หรือวงจรป้องกัน จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากในการใช้งานแบตเตอรี่ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งานที่ผิดวิธีที่อาจเกิดขึ้น ทั้งกับแบตเตอรี่ และตัวผู้ใช้งานเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

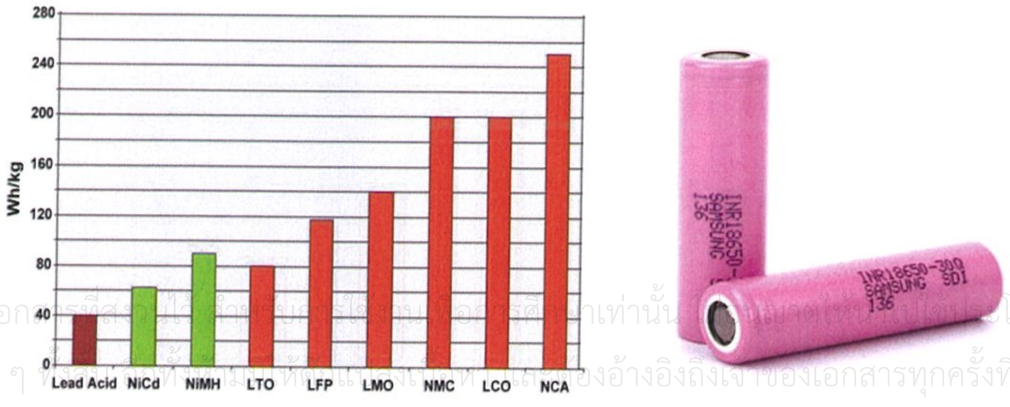
การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้งานแบตเตอรี่อย่างแพร่หลายทำให้แบตเตอรี่เข้ามามีบทบาทอย่างมากในหลากหลายภาคส่วน แต่ทว่าแบตเตอรี่ยังมีข้อจำกัดคือมีราคาแพงและเสียหายได้ง่ายหากใช้แบบผิดวิธีหรือใช้ไม่ถูกกับลักษณะงานที่ต้องการใช้ รวมไปถึงการบำรุงรักษาผิดวิธี ทำให้แบตเตอรี่เกิดการเสื่อมสภาพ หรืออายุการใช้งานและประสิทธิภาพลดลง การต่อแบตเตอรี่ในแบบต่าง ๆ นั้นผู้ใช้งานต้องอาศัยความรู้เชิงลึกด้านแบตเตอรี่ ซึ่งอาจมีผู้ใช้ที่มีความต้องการใช้งานแบตเตอรี่ในพิกัดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นหรือต้องใช้ในงานที่ต้องการระยะเวลาในการทำงานที่นานขึ้น ทำให้ต้องมีการเชื่อมต่อแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มพิกัดตามความต้องการในการใช้งานของผู้ใช้ หากไม่มีความรู้ด้านแบตเตอรี่ที่มากพอ ทำให้ใช้งานแบตเตอรี่อาจเกิดความผิดพลาด ส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่ ทั้งอายุการใช้งานที่สั้นลง อุณหภูมิขณะใช้งานที่สูงขึ้น รวมไปถึงประสิทธิภาพในการทำงานลดลง หรือส่งผลเสียต่อตัวผู้ใช้ เนื่องจากอาจเกิดการระเบิดหรือลุกไหม้ในเซลล์ที่ไม่สมดุล เมื่อใช้ในระยะเวลานาน ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อทดสอบเปรียบเทียบและวิเคราะห์ การทำงานของแบตเตอรี่เมื่อต่อแบบสมดุลและการต่อแบบไม่สมดุล ทำให้สามารถประเมินแบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการใช้งานต่อไปในอนาคตหรือไม่ [5] [6]

3.2 ข้อมูลแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผล

ในการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลจากกราฟนั้นผู้วิจัยได้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแบบทุติยภูมิ Samsung INR18650-30Q เซลล์เคมีชนิด NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide) สามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 2.5-4.2 โวลต์ ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 60 $^{\circ}$C โดยมีความจุ 3000 mAh สามารถอัดประจุด้วยกระแสสูงสุด 4 แอมป์ และคายประจุได้สูงสุด 15 แอมป์ (5C)โดยลักษณะของแบตเตอรี่ Samsung INR18650-30Q สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.1 อีกทั้งยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การต่อแบตเตอรี่

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่นั้น ผู้วิจัยทำการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม ทั้งแบบที่สมดุล สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.2 และที่ไม่สมดุลสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.3 โดยนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ทำการทดสอบการเกิดการไม่สมดุลของแบตเตอรี่โมดูลแบบอนุกรม เนื่องจากการต่อขนานแบบไม่มีวงจรป้องกันหรือ BMS กระแสไฟฟ้าที่เข้า-ออกแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ย่อมมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เซลล์นั้น ๆ ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าย่อมไม่เท่ากัน ความจุก็ย่อมไม่เท่ากัน อีกทั้งภายในอุตสาหกรรมยังไม่แนะนำให้ทำการต่อแบตเตอรี่เซลล์แบบขนานเอง เนื่องด้วยอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาคณะผู้จัดทำเล็งเห็นความอันตรายที่อาจเกิดขึ้น จึงทำการทดสอบเพียงแค่การต่อแบบอนุกรม

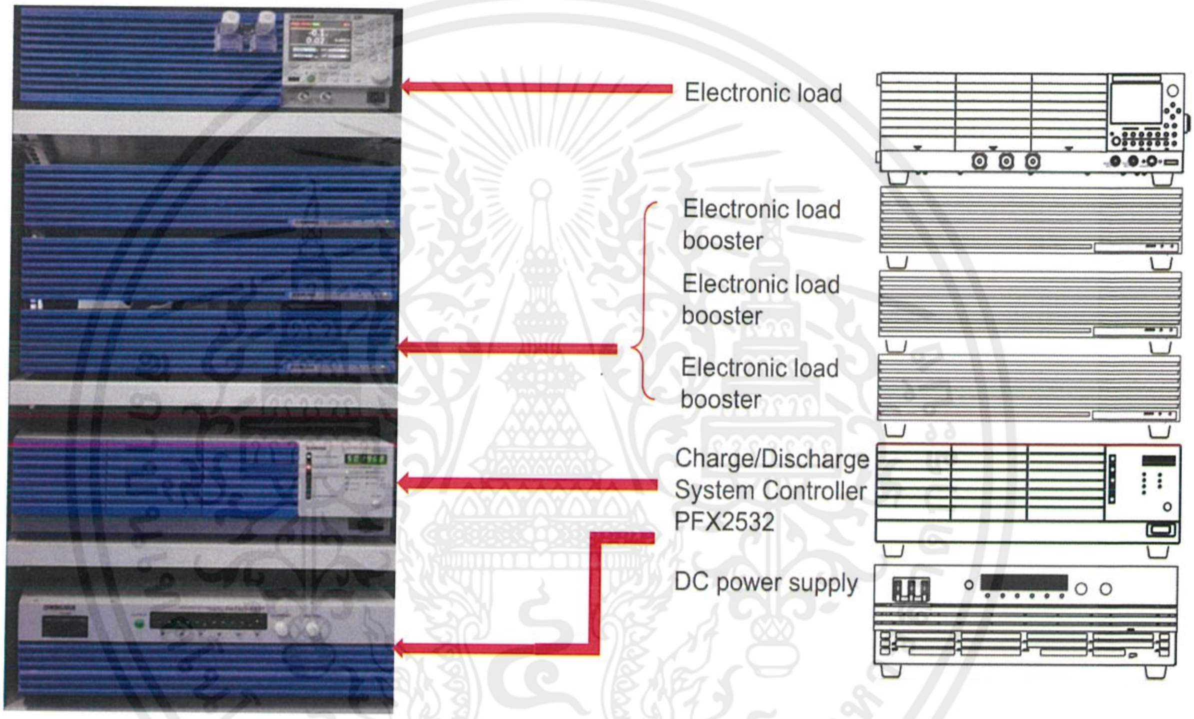
รูปที่ 3.2 การต่อแบตเตอรี่สมดุลแบบอนุกรม

รูปที่ 3.3 การต่อแบตเตอรี่ไม่สมดุลแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการไม่สมดุลของโมดูลแบตเตอรี่

เป็นการนำแบตเตอรี่มาเชื่อมต่อทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล แล้วจึงทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลต่าง ๆ และคำนวณค่าประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ หรือ Coulombic Efficiency รวมไปถึงการนำข้อมูลจากปริญญานิพนธ์มาอ้างอิงการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่และค่ากราฟมาตรฐานเพื่อสร้างกราฟอ้างอิงซึ่งผู้ทดสอบได้ทำการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.4 ที่สามารถทดสอบการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ [7]



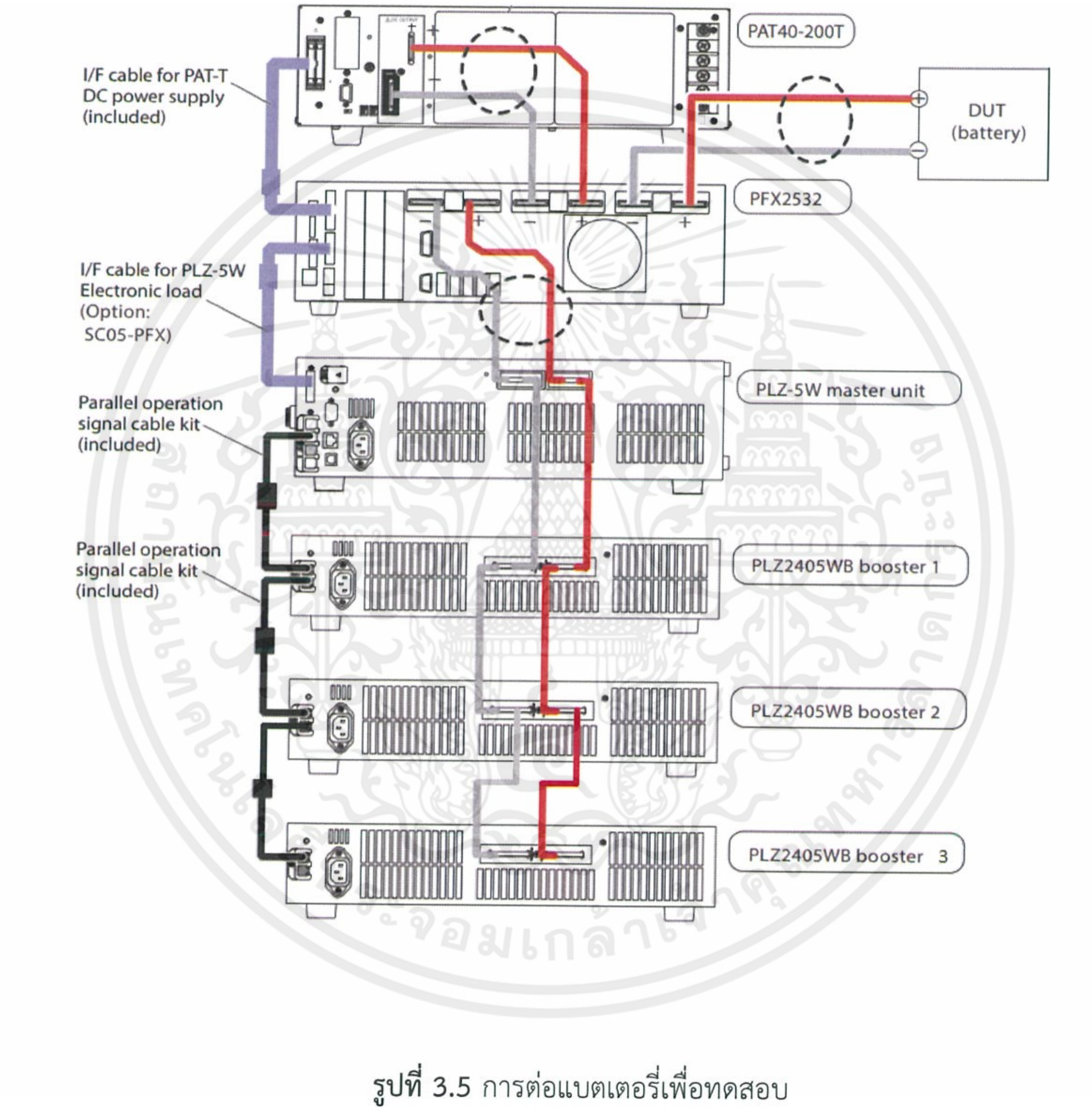
รูปที่ 3.4 ชุดทดสอบแบตเตอรี่

โดยที่ชุดทดสอบสามารถทดสอบแบตเตอรี่ได้หลายฟังชันก์ เช่น Constant Current, Constant Voltage, Constant Power และฟังชันก์พื้นฐานอื่น ๆ โดยสามารถอัดประจุได้พิกัดสูงสุด 60V 200A และดึงประจุด้วยพิกัดสูงสุด 150V 240A ซึ่งจะบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆไว้ระหว่างการทดสอบ เพื่อนำมาสร้างเป็นกราฟข้อมูลต่าง ๆ ทำให้ผู้ใช้งานทำการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การทดลองอัดและคายประจุแบตเตอรี่แต่ละเซลล์เพื่อวิเคราะห์ผล

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองการอัดและคายประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ 1C-rate แต่ละเซลล์ก่อนที่จะนำมาเชื่อมต่อกัน เพื่อเก็บข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ต่อไป โดยมีหัวข้อการทดลองหรือปัจจัยที่ใช้พิจารณาดังต่อไปนี้ ซึ่งการต่อแบตเตอรี่เพื่อทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.5 นั้นจะทำการสั่งการผ่านซอฟแวร์ (PC) ของชุดทดสอบแบตเตอรี่

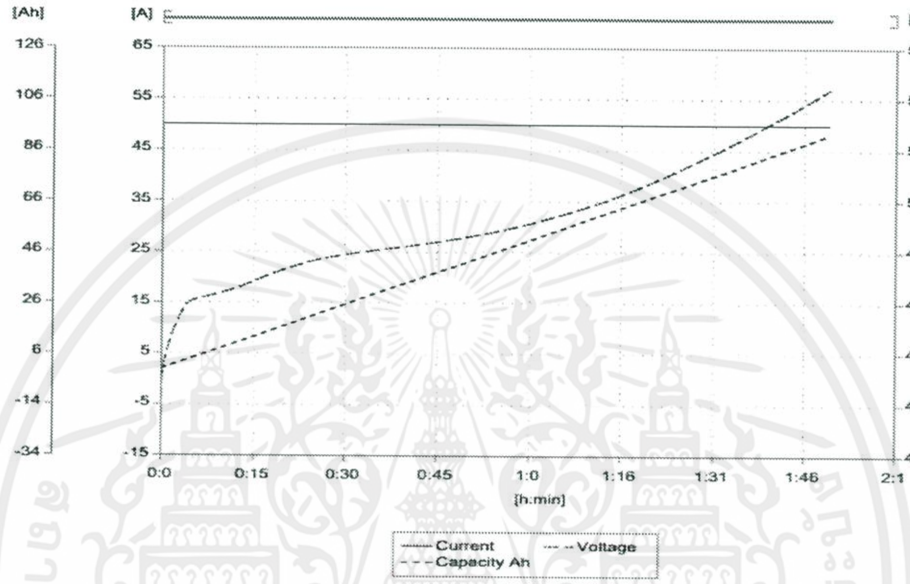


รูปที่ 3.5 การต่อแบตเตอรี่เพื่อทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

เป็นการทดลองอัดและคายประจุแบตเตอรี่ที่อัตรา 1C โดยควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ แล้ววัดค่าออกมาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วและระยะเวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุตามลำดับ (1 Cycle) โดยค่าที่ทำการเก็บข้อมูลจะเป็นค่าของกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟกระแสไฟฟ้ากับเวลา ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6



Result	
*** Result**	
Sequence (Repeat) /Profile	S1 (0) / P1
Profile type	CC Charge
Profile Name	Pro02_50A
Finishedby	Max Voltage
Start Time	20/8/2561 15:23:41
End Time	20/8/2561 17:14:23
MaxVoltage / MinVoltage	54.6000V / 41.7434V
ChgMaxPower / DisMaxPower	2730.007W / -0.121W
Capacity	92.262Ah
Power	4567.524Wh
Start SOC / End SOC	0.0% / 0.0%
Max Temperature	30.3°C
Elapsed Time	1:50:43 [h:min:s]
Max Cell Voltage / Min Cell Voltage	---
*** Cell Result**	
Slot / Term	---
CellCutOffVoltage	---
CellCutOffTemperature	---
Cell Unbalance	---
*** Start of test**	
Open Voltage	41.7434V
Open Temperature	30.2°C
*** Discharge Finish**	
Cut Voltage	54.6000V
Cut Current	49.998A
Cut Temperature	30.0°C
Max Cell Voltage / Min Cell Voltage	---
*** Finish of rest**	
Finishedby	Rest Time
Rest ElapsedTime	0:00:00 [h:min:s]
Rest Temperature	30.0°C

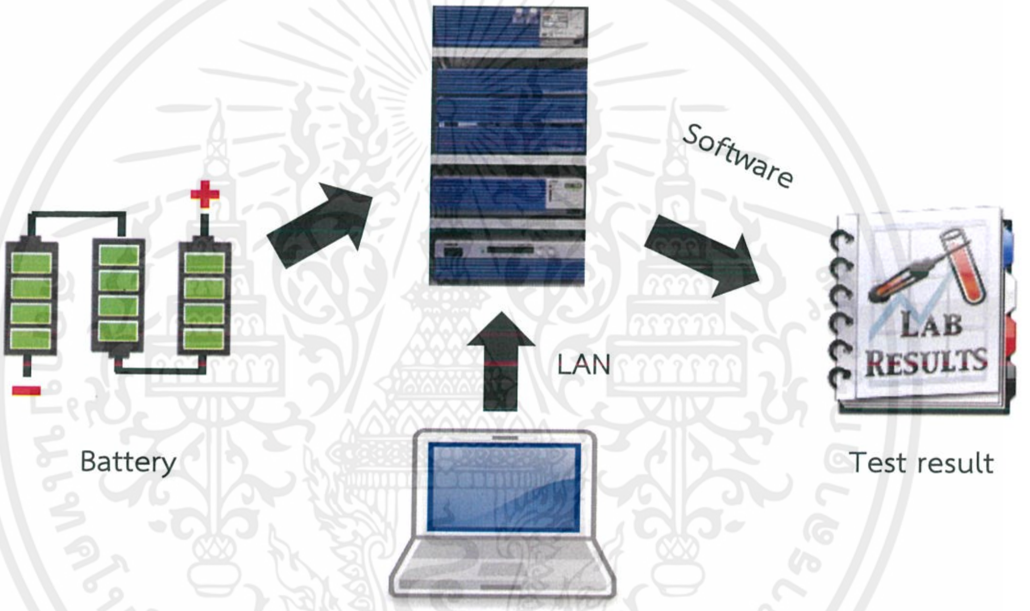
General	
***Test Condition File**	
File Name	ccC_50A_Old_2082018.bpct3
***Comment**	
Project Name	Project001_Old
Date	20/8/2561
Operator	MOS
Battery Type	Lithim
Note	
***Nominal Value**	
Capacity [Ah]	100.0000
Voltage [V]	1.000
Volume [l]	28.350
Mass [kg]	42.500
***DUT Protection**	
OVP [V]	60.000
UVP [V]	0.000
OAH [%]	100
OTP [°C]	100.0
***Module Setting**	
DUT Confirm Combine	True
***Life Judgment**	
Use Life Judgement	False
Capacity Ratio [%]	0.0
Judgment Count	3

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบสมดุล

ในหัวข้อการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการนำเอาแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบแบตเตอรี่แต่ละเซลล์แล้ว มาเชื่อมต่อกันแบบสมดุลแบบอนุกรม เพื่อที่จะนำไปทดสอบ โดยแผนผังการทดสอบแบตเตอรี่ที่สมดุล สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.7 ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา และทำการเก็บข้อมูลการทดสอบไปพิจารณาเปรียบเทียบกับโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล และทำการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์ตลอดการทดลอง ทำให้ได้ค่าของกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟกระแสไฟฟ้ากับเวลา และกราฟกำลังไฟฟ้าต่อเวลา กราฟอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ต่อเวลา

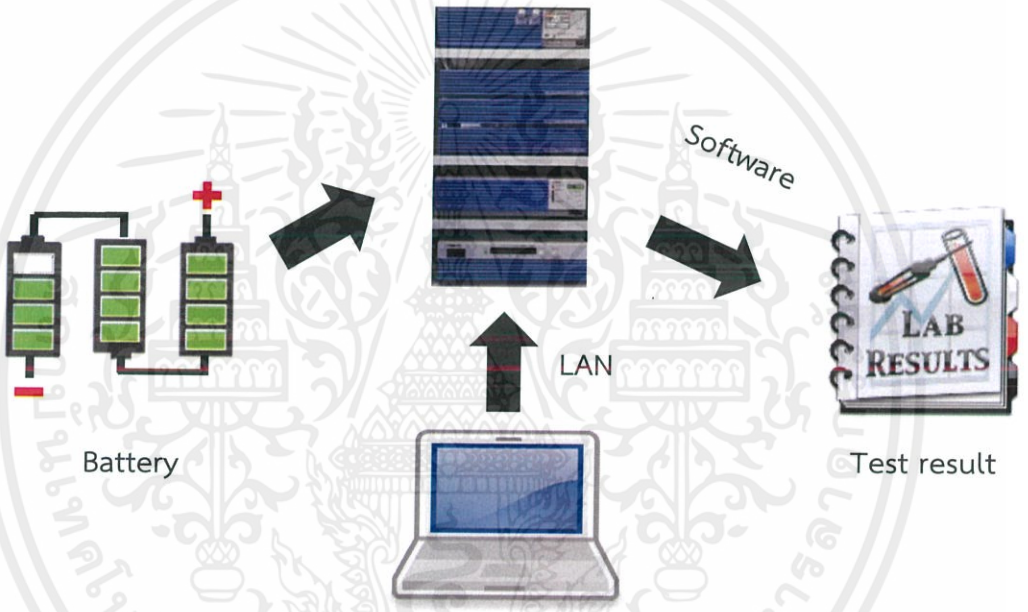


รูปที่ 3.7 แผงผังการทดลองแบบสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล

ในหัวข้อการทดลองนี้ ผู้วิจัยทำการต่อแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล โดยคายประจุของแบตเตอรี่เซลล์หนึ่งลง ก่อนมาทำการต่อเพื่อทดสอบ โดยแผนผังการทดสอบแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.8 ทำการทดสอบเหมือนการทดลองข้างต้น และทำการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์ตลอดการทดลอง ทำให้ได้ค่าของกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟกระแสไฟฟ้ากับเวลา และกราฟกำลังไฟฟ้าต่อเวลา กราฟอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ต่อเวลา เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแต่ละเซลล์ที่ต่อแบบสมดุลว่าเกิดความเสียหายหรือส่งผลอย่างไรกับแบตเตอรี่แต่ละเซลล์บ้าง



รูปที่ 3.8 แผงผังการทดลองแบบไม่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การคำนวณประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

การคำนวณประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุของแบตเตอรี่ Coulombic efficiency (CE) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Faradaic efficiency หรือ Current efficiency อธิบายถึงประสิทธิภาพการประจุอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอนไปในแบตเตอรี่ ซึ่ง CE คืออัตราส่วนของค่าประจุทั้งหมดที่คายออกมาจากแบตเตอรี กับค่าประจุทั้งหมดที่อัดลงในแบตเตอรี่ ในช่วงเต็มรูปแบบ โดยทั่วไปแบตเตอรี่นั้นจะไม่สามารถคายประจุไปได้หมด ดังนั้นถ้าทำได้สูงจะหมายความว่าคายประจุออกได้มากเท่าที่ระบุไว้ ดังสมการที่ 3.1

$$\eta_{coulombic} = \frac{C_{discharge}}{C_{charge}} \tag{3.1}$$

เมื่อ $C_{discharge}$ และ C_{charge} แสดงค่าความจุในการคายประจุและการอัดประจุที่ใช้ตามลำดับ ค่าความจุจะสามารถคำนวณหาได้จากการอินทิเกรตกราฟกระแสไฟฟ้าต่อเวลาที่ใช้ในการอัดหรือคายประจุ ดังนั้นสามารถคำนวณสมรรถนะของ coulombic ได้ดังสมการที่ 3.2

$$\eta_{coulombic} = \frac{\int_{t_0}^{t_d} I_{discharge}\,dt}{\int_{t_0}^{t_c} I_{charge}\,dt} \tag{3.2}$$

ในกรณีกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบอัดและคายประจุคงที่กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าในการคายประจุเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุ ($I_{discharge} = I_{charge}$) ดังนั้นประสิทธิภาพ CE สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3

$$\eta_{coulombic} = \frac{t_{discharge}}{t_{charge}} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สรุป

บทนี้กล่าวถึงการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลต่าง ๆ แบตเตอรี่ทำงานในสภาวะที่ไม่สมดุล ซึ่งจะพิจารณาตัวแปร อุณหภูมิแบตเตอรี่ของโมดูลแบตเตอรี่ และของแต่ละเซลล์ ระดับแรงดันไฟฟ้าของโมดูลแบตเตอรี่ และของแต่ละเซลล์ ระยะเวลาในการอัดและคายประจุ รวมไปถึงการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ Coulombic efficiency (CE) โดยแบ่งการทดลองสามส่วน ได้แก่ การทดลองอัดและคายประจุแบตเตอรี่แต่ละเซลล์เพื่อวิเคราะห์ผล โดยการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อเก็บค่าผลการทดลองของแบตเตอรี่ที่จะนำมาทดสอบแต่ละเซลล์ และจะนำไปวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ที่ผ่านการใช้งานแบบไม่สมดุลภายหลัง ซึ่งกเป็นการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา ในส่วนถัดมา คือ การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบสมดุล โดยทำการต่อแบตเตอรี่ (แบบอนุกรม) แบบสมดุล เพื่อทำการทดสอบอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่ และในส่วนสุดท้าย เป็นการทดสอบอัดและคายประจุของแบตเตอรี่โมดูลที่ต่อแบบไม่สมดุล ซึ่งในการทดลองทั้งสามส่วนจะควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ 1C-rate โดยเก็บข้อมูลเป็นกราฟระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลา กราฟระหว่างอุณหภูมิต่อเวลา โดยวิเคราะห์และเปรียบเทียบหาข้อจำกัดในการใช้แบตเตอรี่แบบไม่สมดุล และผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งต่อโมดูลแบตเตอรี่ และแต่ละเซลล์ รวมไปถึงสามารถคาดการณ์การเกิดไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่จากลักษณะหรือพฤติกรรมการทำงานของแบตเตอรี่ (อัดและคายประจุ) โดยสมมุติฐานว่าเมื่อใช้แบตเตอรี่โมดูลที่ไม่สมดุล เซลล์ที่เสื่อมสภาพหรือเซลล์ที่ไม่สมดุลจะเป็นสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่โมดูลเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งการทดสอบต่าง ๆ ผู้วิจัยทำการทดสอบผ่านชุดทดสอบแบตเตอรี่ โดยจะนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์ผลในบทที่ 4 ต่อไป ซึ่งการทดลองนี้จะใช้ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่สามารถทำงานผ่านซอฟแวร์เดียวกันกับชุดทดสอบแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง, ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนยี่ห้อ Samsung 18650-30Q ซึ่งสามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 2.5 โวลต์ และสูงสุด 4.2 โวลต์ ความจุ 3000 mAh ขณะทดสอบได้ทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30% ซึ่งเป็นอุณหภูมิและความชื้นที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบตเตอรี่ จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 หัวข้อ โดยหัวข้อแรกจะกล่าวถึงการนำแบตเตอรี่ลิเธียมแต่ละเซลล์มาทำการทดสอบโดยการอัดและคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1C, 2C เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และหาคุณลักษณะก่อนการเริ่มใช้งานของแบตเตอรี่ หัวข้อที่สองจะกล่าวถึงการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุลที่มีการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ หัวข้อที่สามจะกล่าวถึงการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลไม่สมดุลที่มีการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม โดยจะเปลี่ยนตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ทำให้ไม่สมดุล เนื่องจากสันนิษฐานว่าทิศทางการไหลของอิเล็กตรอนอาจจะมีผลต่อการทดลอง จึงใช้ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ทำให้ไม่สมดุลในการทดสอบเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาบันทึกผล โดยทั้งสามหัวข้อการทดลองจะมีเงื่อนไขการหยุดการทดสอบตามพิกัดของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ เช่น ในหัวข้อแรกการอัดและคายประจุจะหยุดเมื่อมีแรงดันเท่ากับ 4.2 โวลต์และ 2.5 โวลต์ตามลำดับ ขณะที่หัวข้อที่สองและสามการอัดและคายประจุจะหยุดเมื่อมีแรงดันเท่ากับ 16.8 โวลต์และ 10.0 โวลต์ตามลำดับ

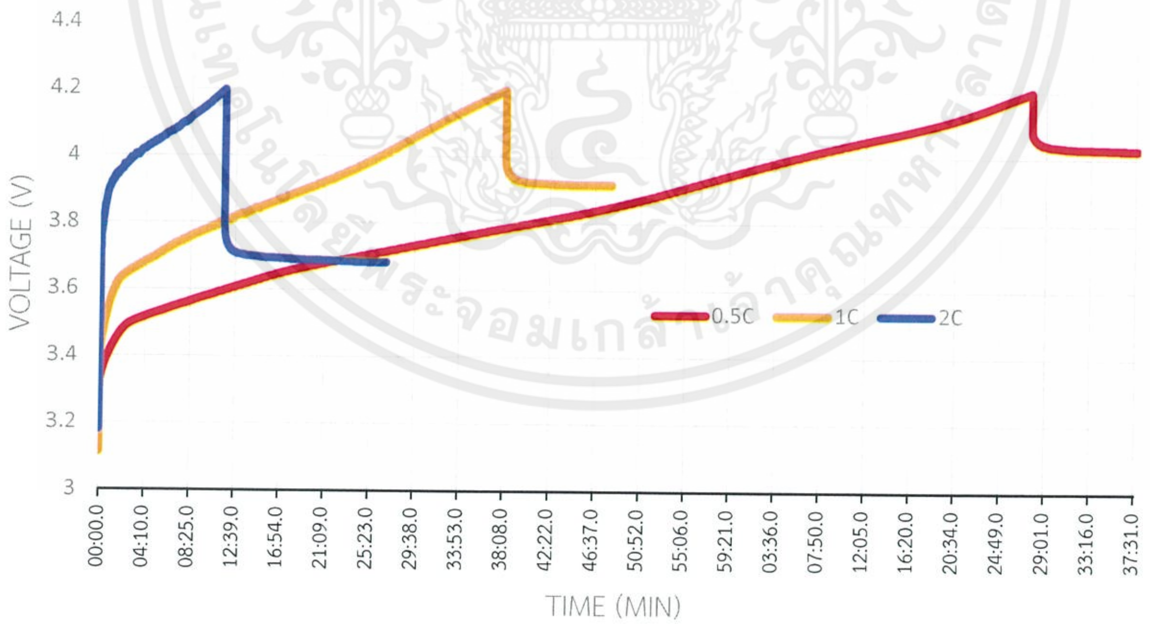
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบเซลล์แบตเตอรี่

ทำการทดสอบแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1C และ 2C เนื่องจากพิกัดของแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบมีอัตราการอัดประจุสูงสุดที่ 2C แต่มีอัตราการคายประจุสูงสุดที่ 5C เพื่อให้ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงใช้การทดสอบที่ 0.5C, 1C และ 2C โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น สามารถแสดงผลได้ดังนี้

4.2.1 การอัดประจุไฟฟ้า

เมื่อทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับโดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30% จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์ และ 6 แอมป์ ตามลำดับ เข้าไปในแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 3.193 โวลต์, 3.115 โวลต์และ 3.166 โวลต์ ตามลำดับ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.200 โวลต์ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแต่ละอัตราการอัดประจุ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.1 ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 97.40 นาที, 39.05 นาทีและ 18.47 นาที ตามลำดับ ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีค่า 4.028 โวลต์, 3.9174 โวลต์และ 3.878 โวลต์ ตามลำดับ จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ

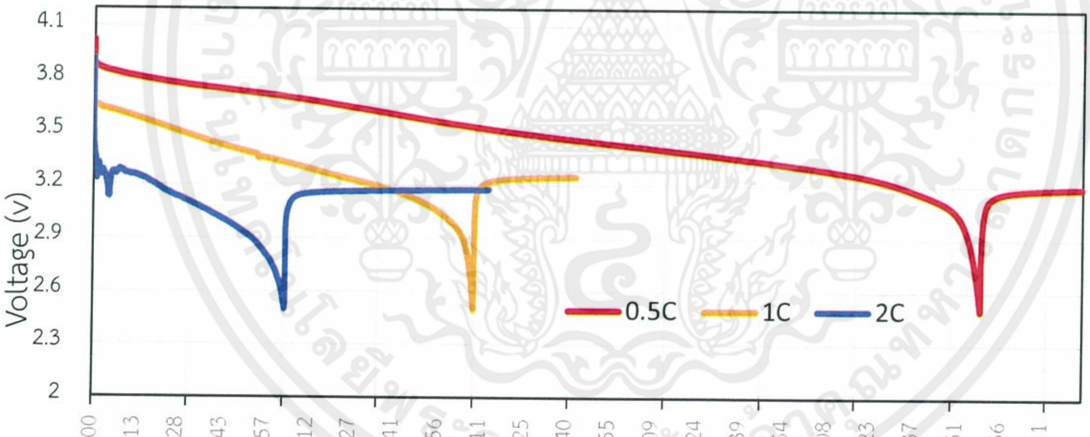


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การคายประจุไฟฟ้า

เมื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับ โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30% ดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์และ 6 แอมป์ ตามลำดับ ออกจากแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 4.009 โวลต์, 3.927 โวลต์และ 3.913 โวลต์ ตามลำดับ แต่การทดสอบที่ 2C เมื่อแบตเตอรี่ถูกดึงกระแสมากขึ้น ทำให้มีการปรับสภาพแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ก่อนที่จะจ่ายกระแสได้ตามที่ต้องการ จึงทำให้ผลการทดสอบในช่วงแรกๆเป็นไปตามรูป 4.2 จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 2.500 โวลต์ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแต่ละอัตราการคายประจุ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.2 ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 86.36 นาที, 38.55 นาทีและ 10.39 นาที ตามลำดับ ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 3.128 โวลต์, 3.061 โวลต์และ 3.179 โวลต์ ตามลำดับ จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ

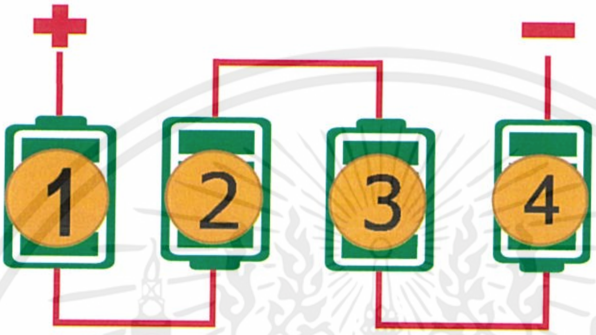


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในทำการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบการอัดและคายประจุประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.2463 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.1195 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.1466 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.4424 โวลต์ โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลสมดุล สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งใช้ในการทดสอบการอัดและคายประจุ



รูปที่ 4.3 โมดูลการต่อเซลล์แบตเตอรี่แบบอนุกรม

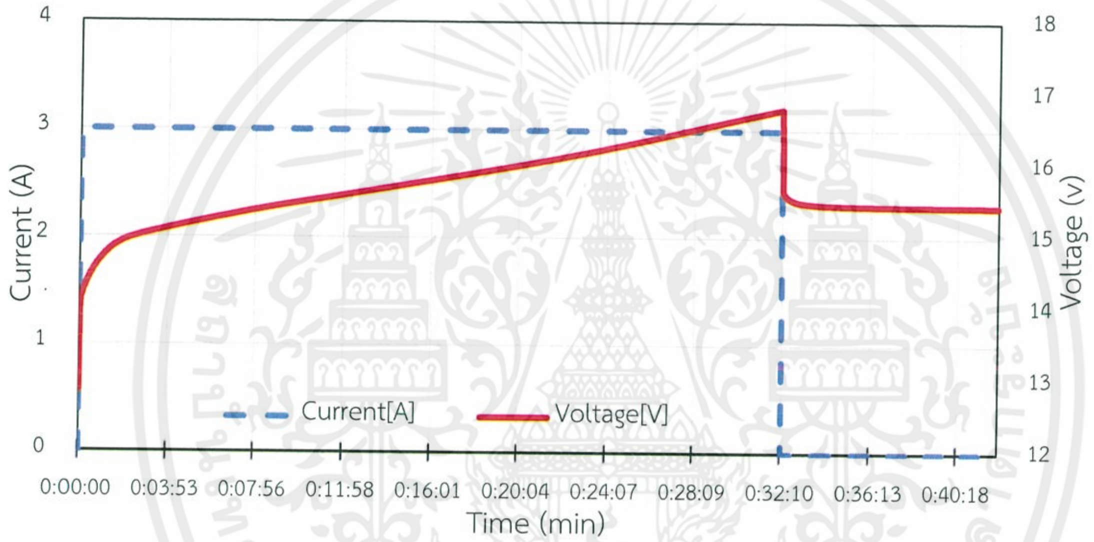
4.3.1การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุล

ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 1C โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30% จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.800 โวลต์ ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทดสอบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าคงที่ เมื่อสิ้นสุดระยะสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 12.855 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.798 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 32.10 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.4 จากนั้นระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.438 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

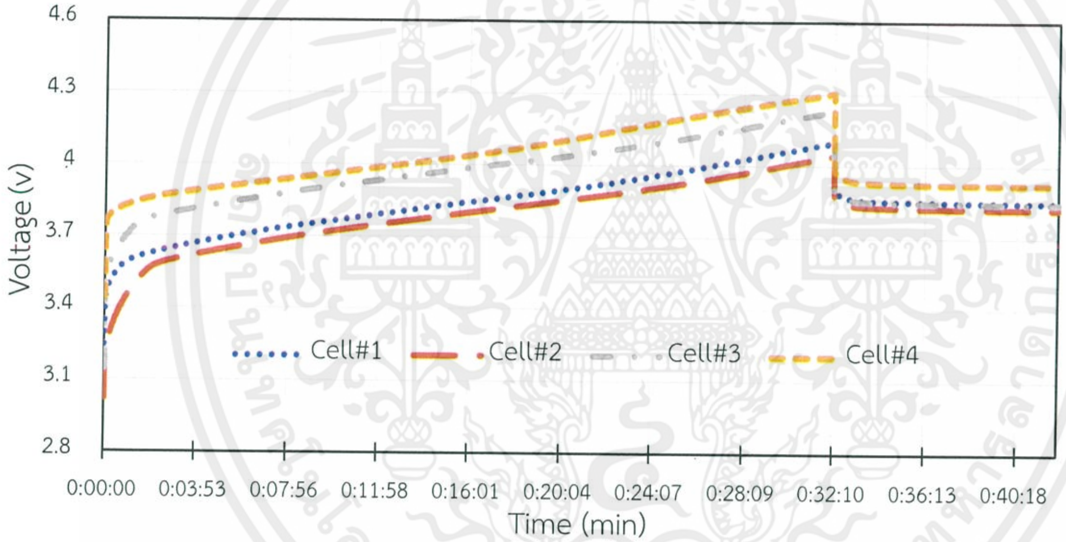


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.246 โวลต์ 3.119 โวลต์ 3.147 โวลต์ และ 3.442 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.098 โวลต์ 4.143 โวลต์ 4.228 โวลต์และ 4.305 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.849 โวลต์ 3.822 โวลต์ 3.843 โวลต์และ 3.923 โวลต์ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า ภายในกระบวนการต่าง ๆ ของการทดสอบจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะที่ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

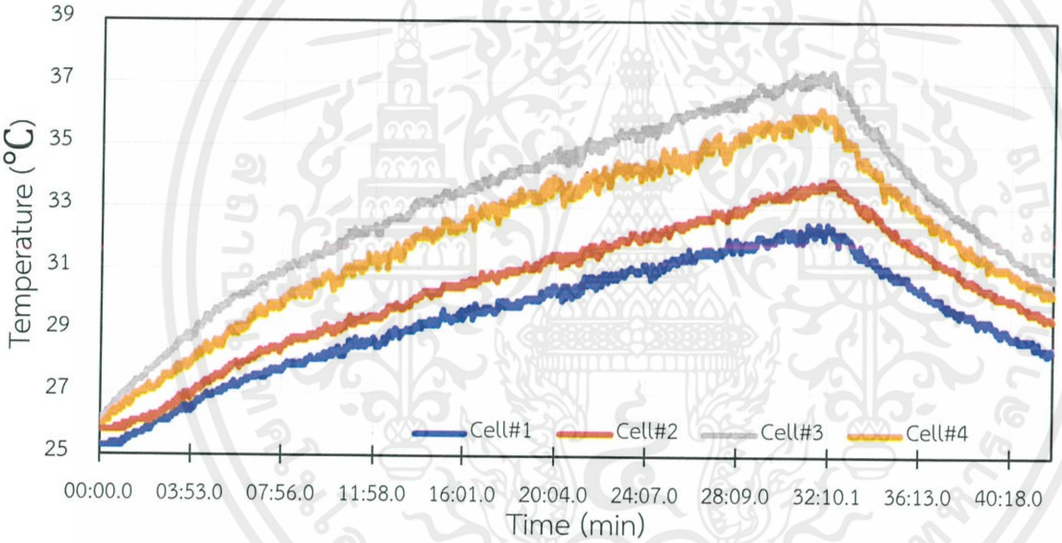


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของแรงดันแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 27.2 °C, 26.5 °C, 27 °C และ 26.7 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 41.1 °C, 40.7 °C, 40.9 °C และ 41 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 35.720 °C, 35.486 °C, 35.466 °C และ 35.823 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 35.624 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.6 จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในแต่ละเซลล์มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

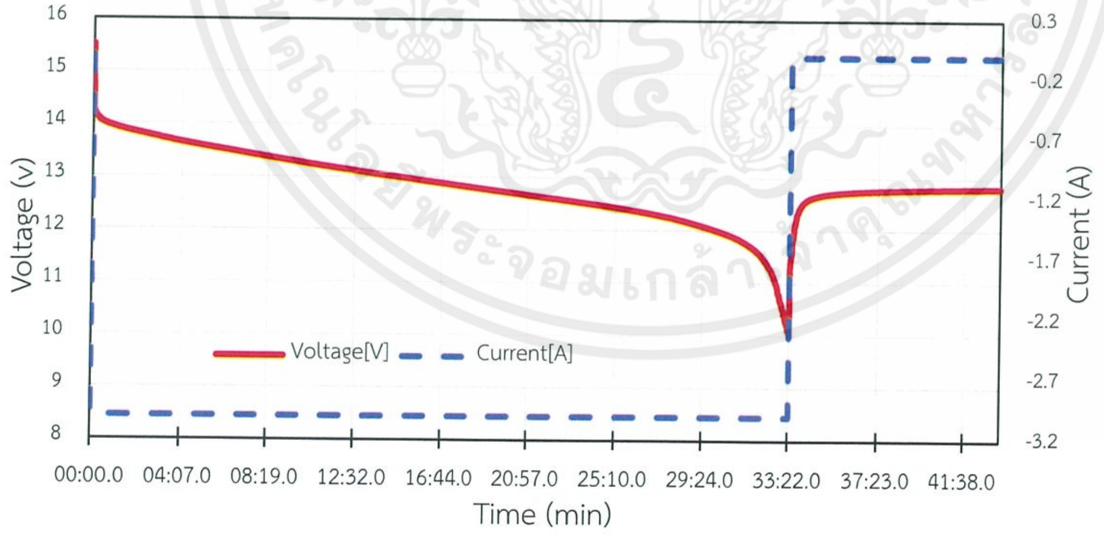
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุล

ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ 1C โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30% ดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจากแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.000 โวลต์ ระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทดสอบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าคงที่ เมื่อสิ้นสุดระยะสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ

4.3.2.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.516 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.001 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า 31.57 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.7 จากนั้นระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 12.816 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

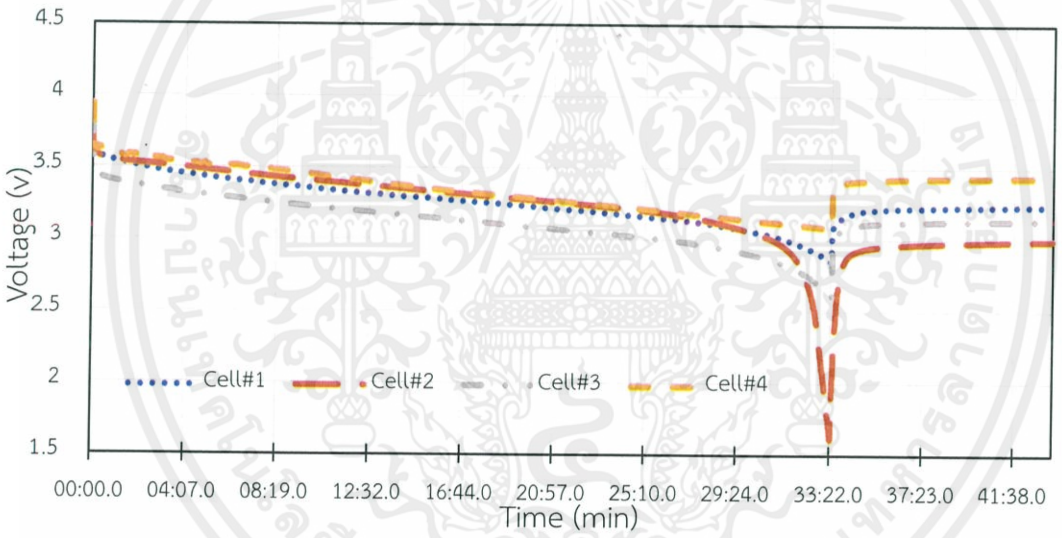


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.869 โวลต์, 3.843 โวลต์, 3.865 โวลต์ และ 3.938 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 3.074 โวลต์, 1.876 โวลต์, 3.005 โวลต์และ 3.375 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.239 โวลต์, 3.299 โวลต์, 3.137 โวลต์และ 3.440 โวลต์ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.8 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ภายในกระบวนการต่าง ๆ ของการทดสอบจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะที่ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าลดลงและมีค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

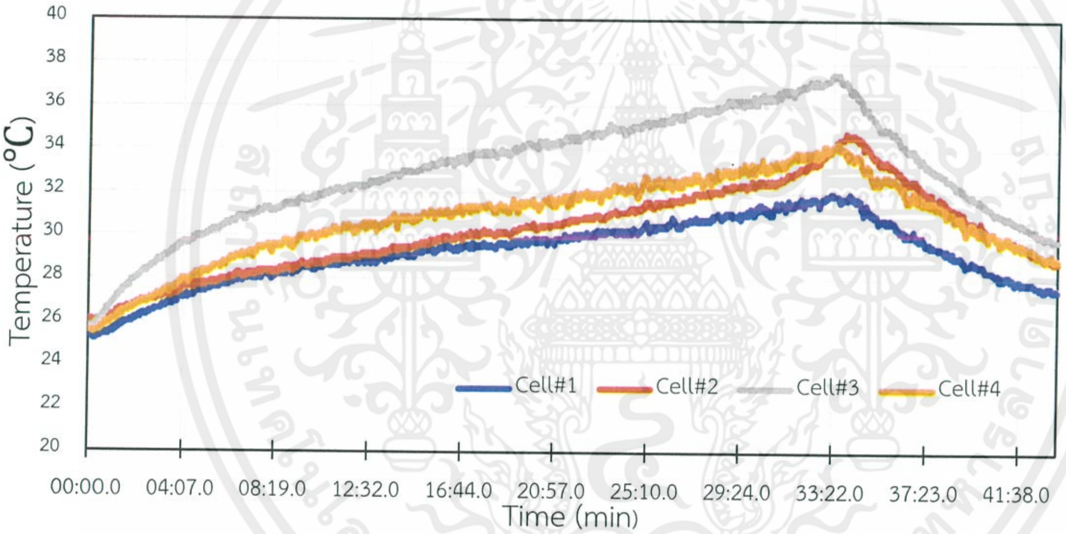


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 25.2 °C, 24.8 °C, 25.1 °C และ 24.9 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 40.5 °C, 39.7 °C, 39.1 °C, 41 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 34.146 °C, 33.917 °C, 33.262 °C และ 35.125 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 34.112 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.9 จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในแต่ละเซลล์มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

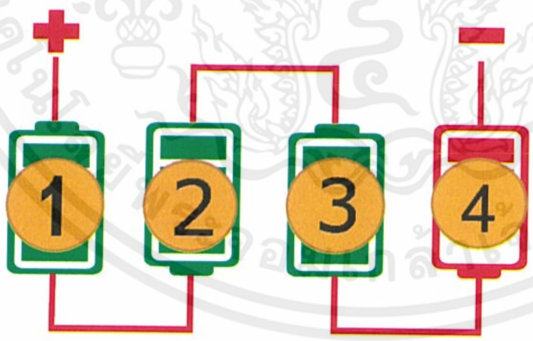
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดสอบการอัดและคายประจุไฟฟ้าโมดูลไม่สมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองอัดและคายประจุไฟฟ้าโมดูลไม่สมดุล โดยมีข้อสันนิฐานว่า ตำแหน่งของแบตเตอรี่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอน อาจส่งผลต่อแบตเตอรี่ในโมดูล ผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งของเซลล์ที่ไม่สมดุล เพื่อดูผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

4.4.1ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ได้รับไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

ในกรณีทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 2.869 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.466 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.471 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.489 โวลต์ ส่วนกรณีทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 3.738 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.906 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.912 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.929 โวลต์ โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลไม่สมดุล ซึ่งมีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหายตำแหน่งที่ 1 สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.10 ในการทดสอบการอัดและคายประจุ

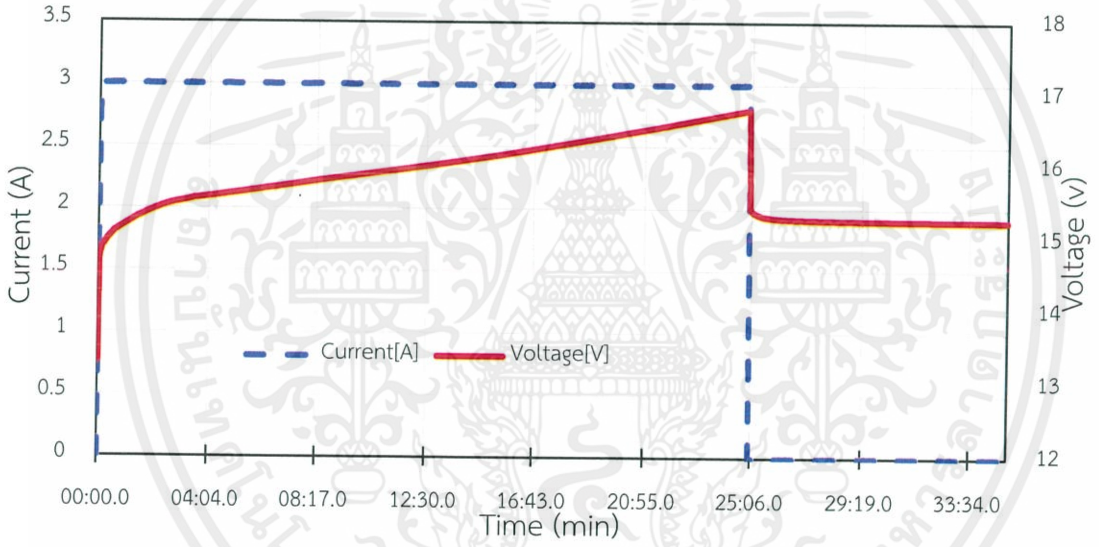


รูปที่ 4.10 แบตเตอรี่ที่ไม่สมบในโมดูลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 13.316 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.798 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 26.16 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.11 จากนั้นระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.261 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

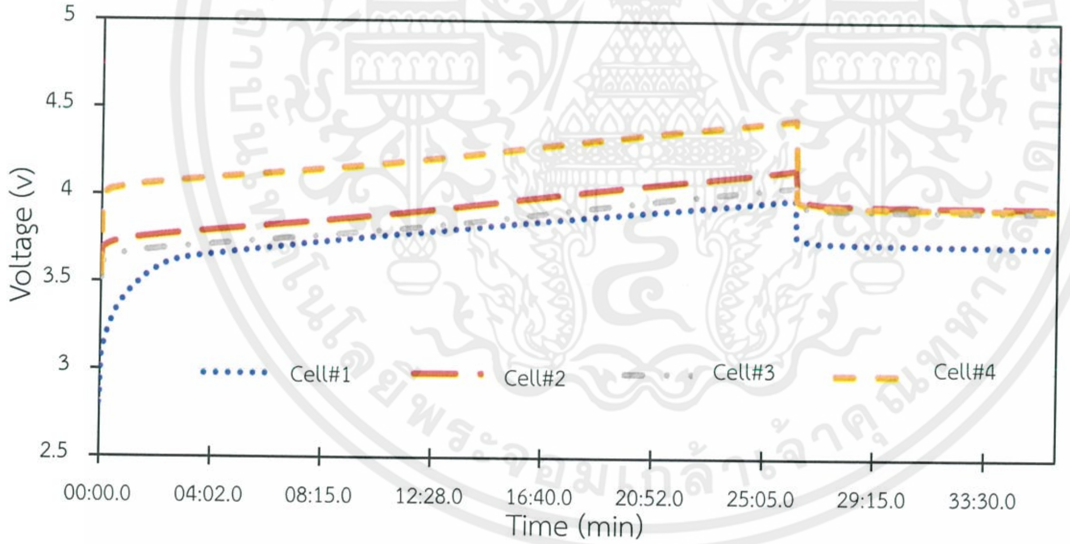


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 2.869 โวลต์, 3.466โวลต์, 3.471 โวลต์ และ 3.489 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 3.638 โวลต์, 4.016 โวลต์, 4.306 โวลต์และ 4.301 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.582 โวลต์, 3.843 โวลต์, 3.851 โวลต์และ 3.872 โวลต์ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.12 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2, 3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

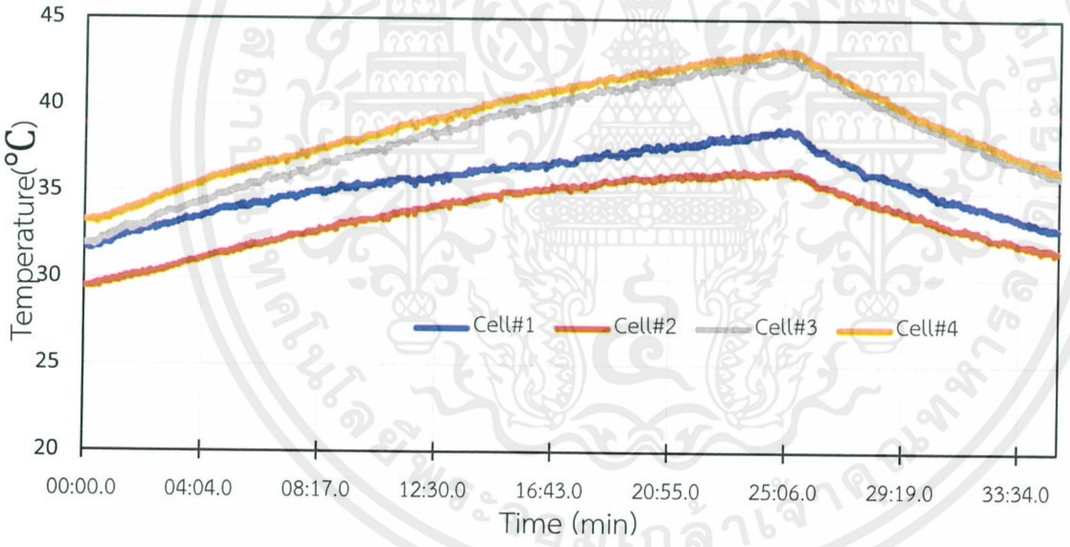


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 26.2 °C, 27.5 °C, 27.6 °C และ 26.6 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 35.4 °C, 36.9 °C, 38.0 °C และ 39.2 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 31.669 °C, 33.397 °C, 33.963 °C และ 34.697 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 33.431 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.13 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 1 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าต่ำกว่าเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

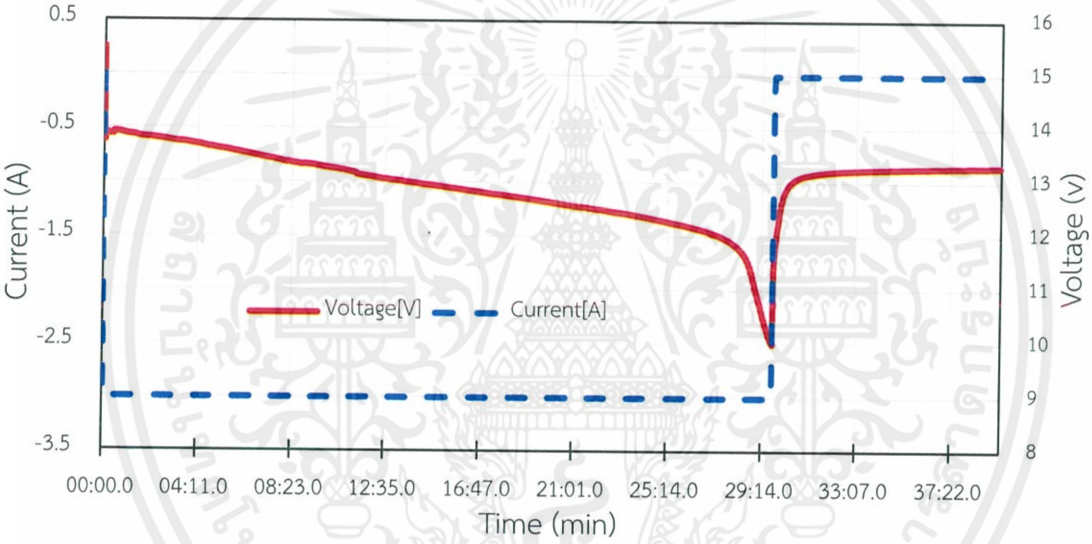


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.506 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.001 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 25.19 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุ ซึ่งดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.14 จากนั้นระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 13.298 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

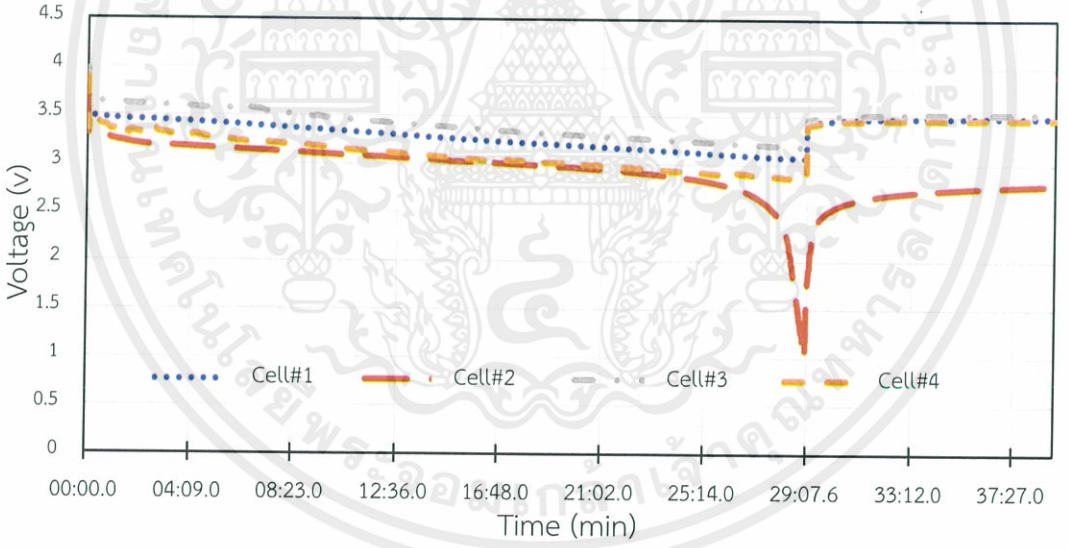


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.738 โวลต์, 3.906 โวลต์, 3.912 โวลต์ และ 3.929 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 1.065 โวลต์, 3.268 โวลต์, 2.992 โวลต์และ 3.059 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 2.8369 โวลต์, 3.465 โวลต์, 3.471 โวลต์และ 3.488 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.15 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่เซลล์ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2, 3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

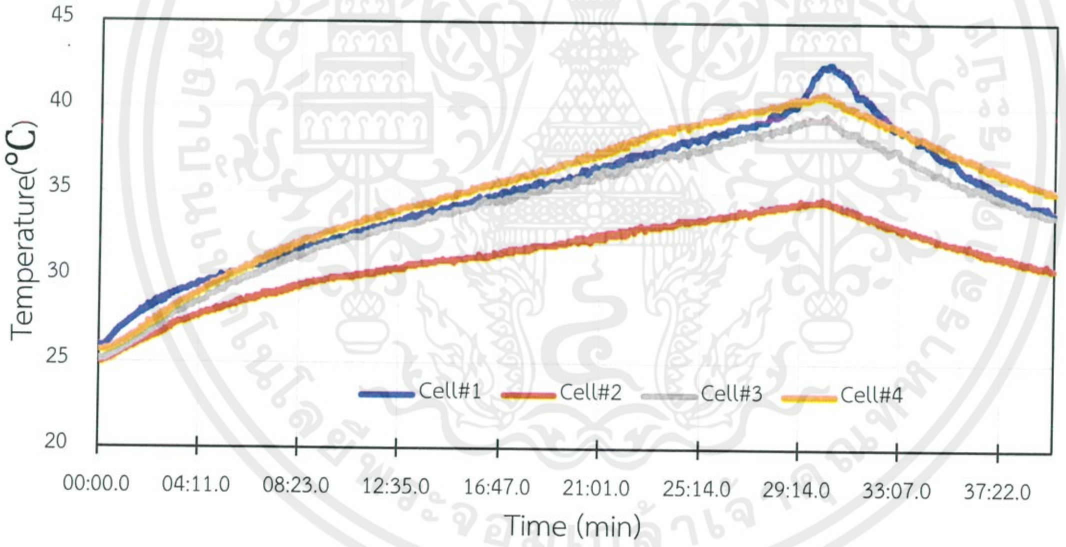


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 24.5 °C, 24.7 °C, 24.6 °C และ 24.5 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 40.0 °C, 32.1 °C, 32.8 °C และ 33.7 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 32.689°C, 29.402 °C, 29.815 °C และ 30.029 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 30.484 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.16 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 1 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 2, 3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

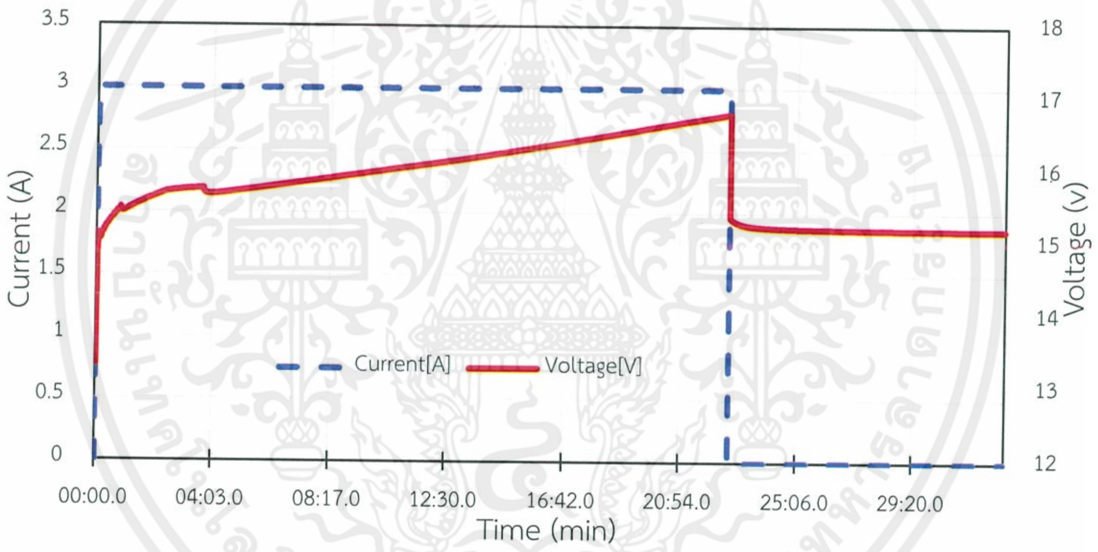
ในกรณีทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบมีแรงดันไฟฟ้า 3.499 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 2.830 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.531 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.473 โวลต์ ส่วนกรณีทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.939 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 3.736 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.961 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.905 โวลต์ โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลไม่สมดุล ซึ่งมีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหายตำแหน่งที่ 2 สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.17 ในการทดสอบการอัดและคายประจุ

รูปที่ 4.17 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 13.330 โวลต์ (open voltage) เนื่องจากแบตเตอรี่บางก้อนได้รับแรงดันมากกว่าแบตเตอรี่ก้อนอื่น จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลเพิ่มกว่าปกติ ทำให้ได้ผลการทดสอบในช่วงแรกเป็นไปตามรูปที่ 4.18จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.799 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 25.01 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.18 จากนั้นระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.199 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

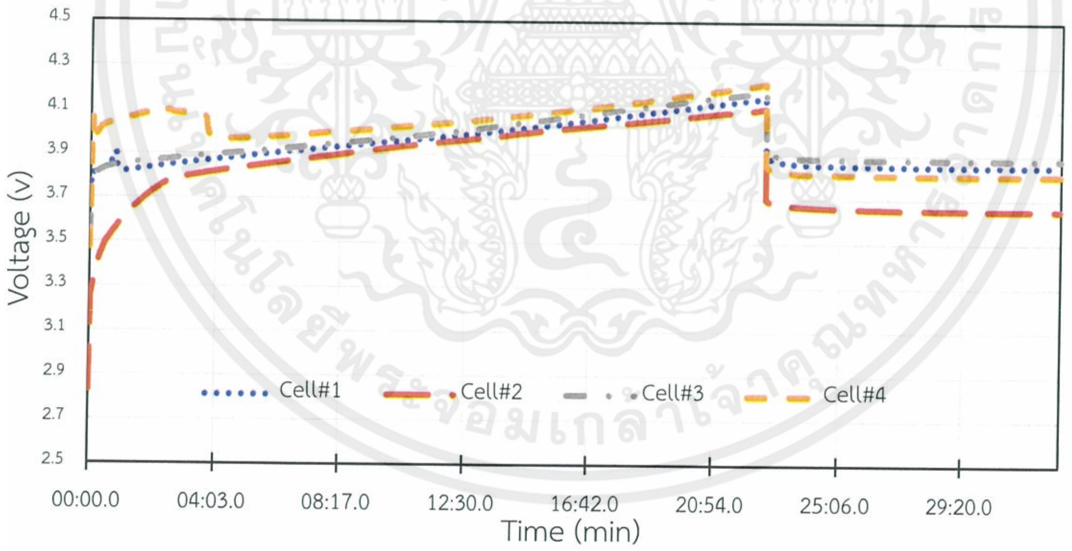


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.494 โวลต์, 2.830 โวลต์, 3.531 โวลต์ และ 3.473 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ได้รับแรงดันฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่เซลล์อื่น จึงทำให้ผลการทดสอบในช่วงแรกเป็นไปตามรูปที่ 4.19 จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.162 โวลต์, 4.112 โวลต์, 4.185 โวลต์และ 4.225 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.852 โวลต์, 3.653 โวลต์, 3.880 โวลต์และ 3.811 โวลต์ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.19 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

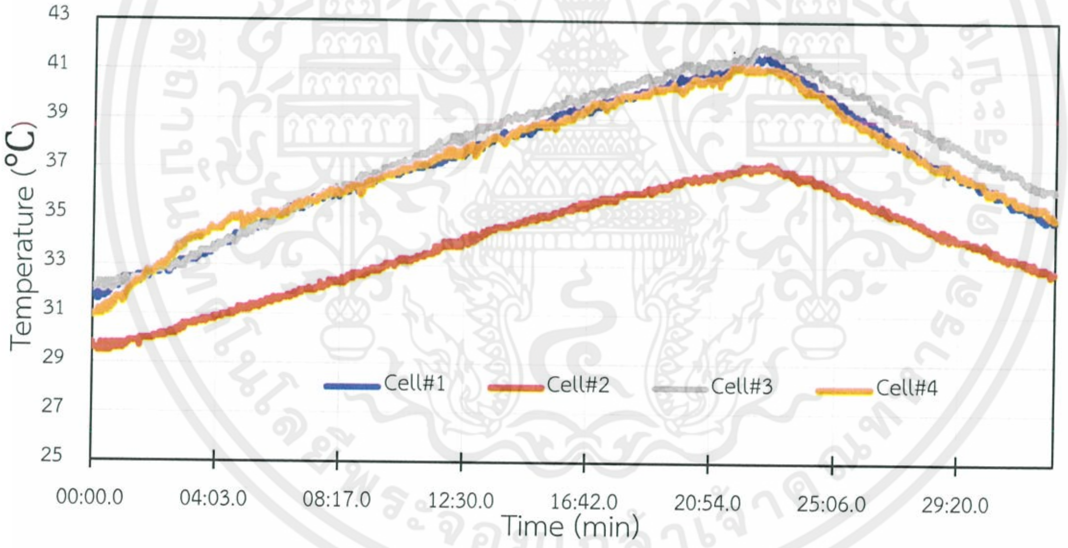


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 31.8 °C, 29.8 °C, 32.1 °C และ 30.9 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 41.6 °C, 37.1 °C, 41.9 °C และ 41.1 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 37.324 °C, 33.931 °C, 37.792 °C และ 37.322 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 36.592 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.20 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 2 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

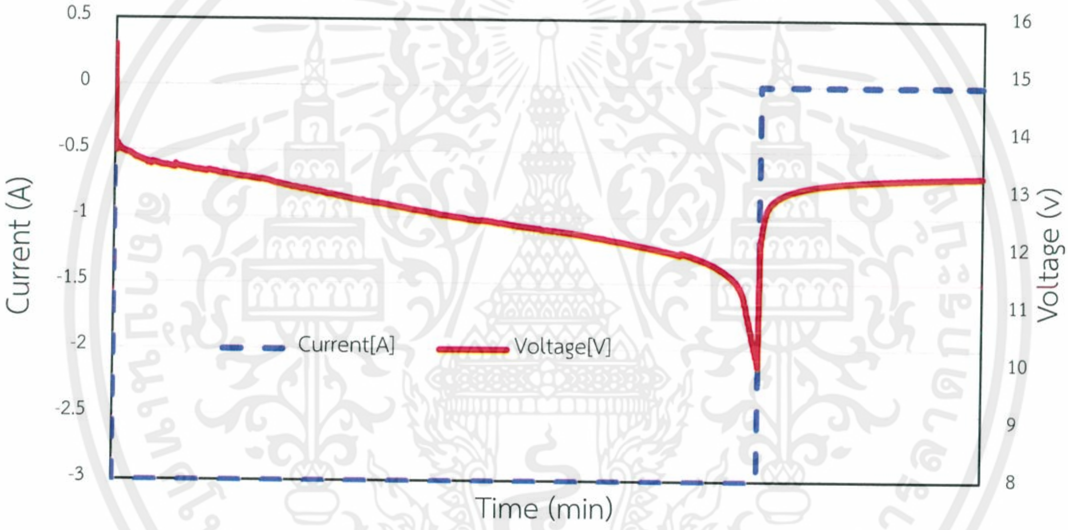


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.55 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.002 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 22.40 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุ ซึ่งดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.21 จากนั้นระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 13.287 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

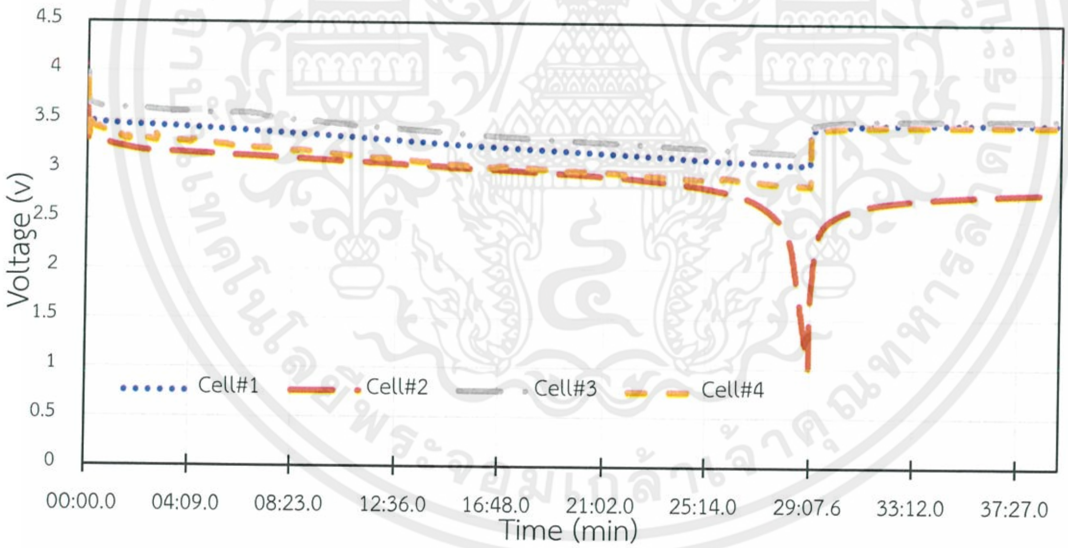


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.939 โวลต์, 3.736 โวลต์, 3.961 โวลต์ และ 3.905 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 3.070 โวลต์, 1.010 โวลต์, 3.182 โวลต์และ 2.863 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.492 โวลต์, 2.791 โวลต์, 3.529 โวลต์และ 3.472 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.22 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 2 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

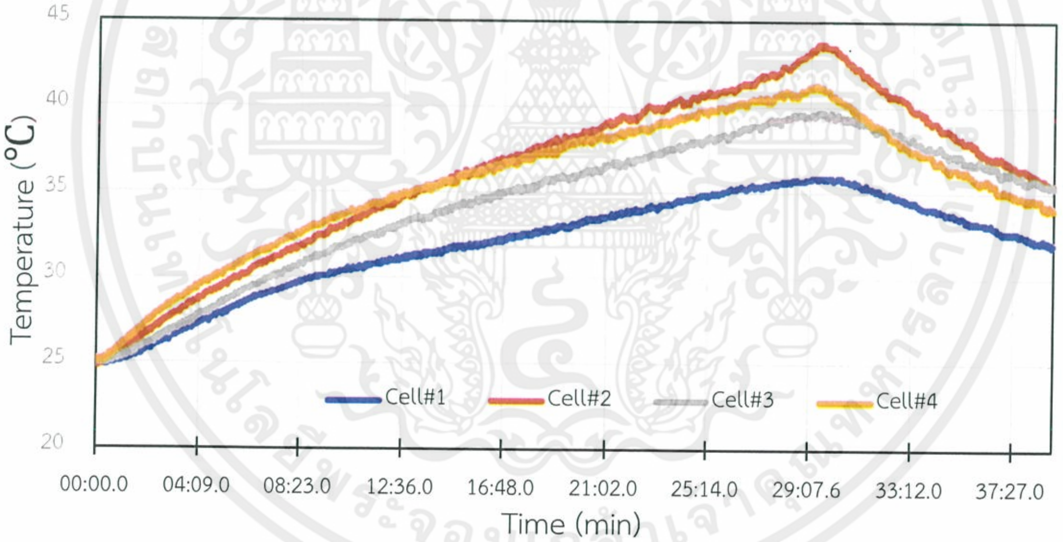


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 24.9 °C, 24.8 °C, 25.0 °C และ 25.1 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 35.8 °C, 43.2 °C, 39.5 °C และ 41.2 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 32.017 °C, 36.188 °C, 34.423 °C และ 35.561 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 34.572 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.23 จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 2 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 1, 3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

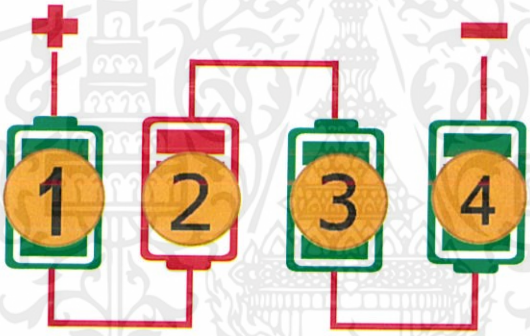


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

ในกรณีทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.566 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.565 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 2.749 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.554 โวลต์ ส่วนกรณีทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.906 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.906 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 ซึ่งเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 3.637 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.892 โวลต์ โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลไม่สมดุล ซึ่งมีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหายตำแหน่งที่ 3 สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.24 ในการทดสอบการอัดและคายประจุ

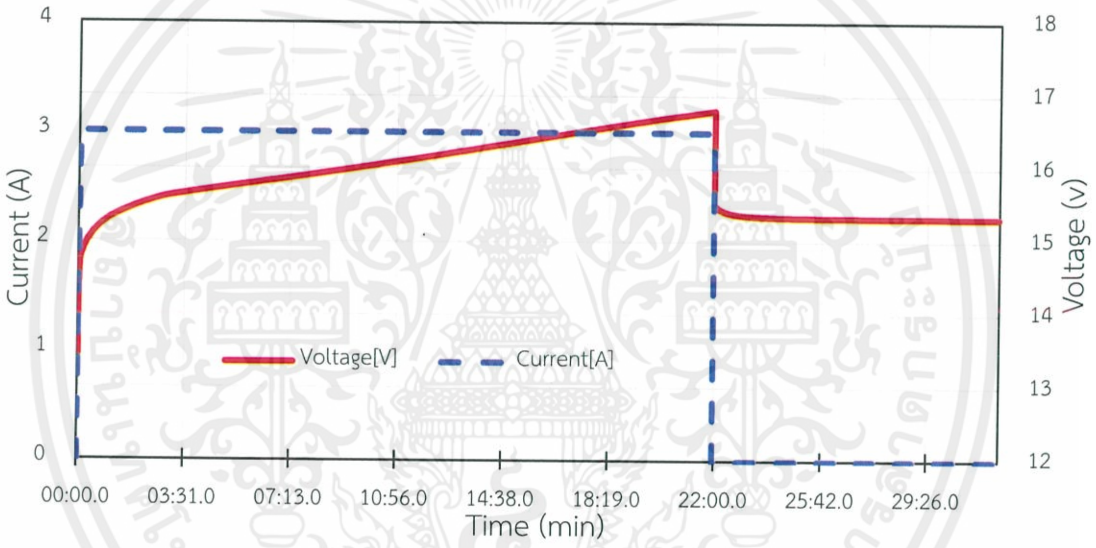


รูปที่ 4.24 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 13.435 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.798 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 22.46 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.25จากนั้นระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.325 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

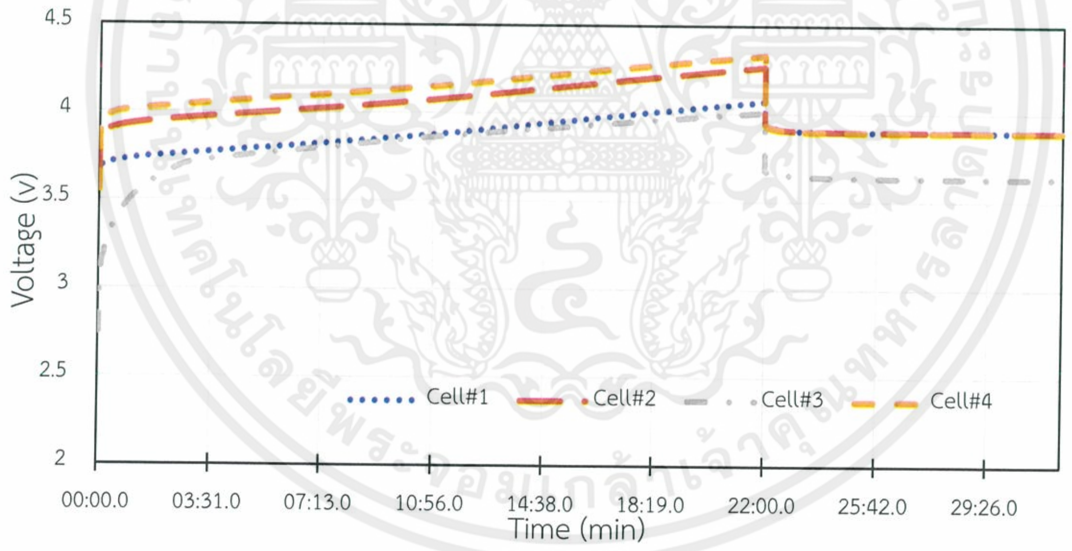


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.566 โวลต์, 3.565 โวลต์, 2.749 โวลต์ และ 3.554 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.071 โวลต์, 4.266 โวลต์, 4.006 โวลต์และ 4.332 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.898 โวลต์, 3.897 โวลต์, 3.632 โวลต์และ 3.896 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.26 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

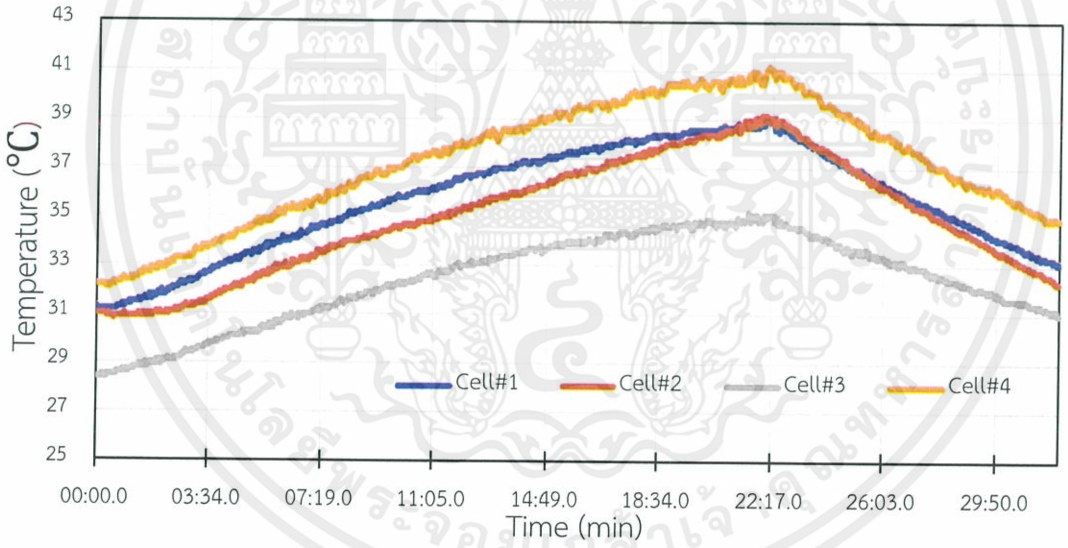


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 31.3 °C, 31.0 °C, 28.4 °C และ 32.2 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 39 °C, 39.2 °C, 35.0 °C และ 40.5 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 35.756 °C, 35.081 °C, 32.452 °C และ 37.326 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 35.152 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.27 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 3 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

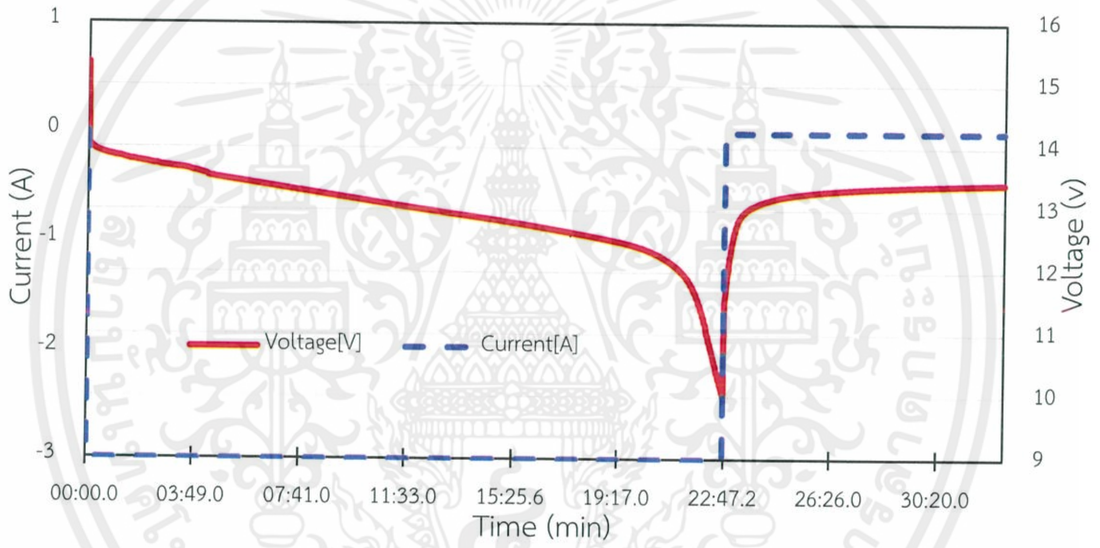


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.35 โวลต์ (open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.002 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 21.57 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุ ซึ่งดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.28 จากนั้นระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 13.427 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

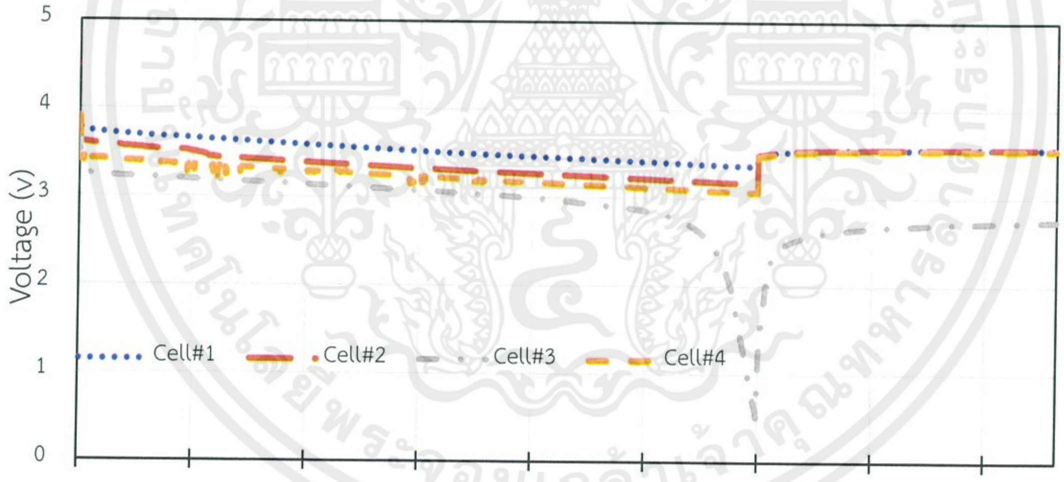


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.906 โวลต์, 3.906 โวลต์, 3.637 โวลต์ และ 3.892 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 3.368 โวลต์, 3.169 โวลต์, 0.516 โวลต์และ 3.067 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.565 โวลต์ 3.565 โวลต์ 2.742 โวลต์และ 3.553 โวลต์ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.29 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ไม่สมบูรณ์ในโมดูลในตำแหน่งที่ 3 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

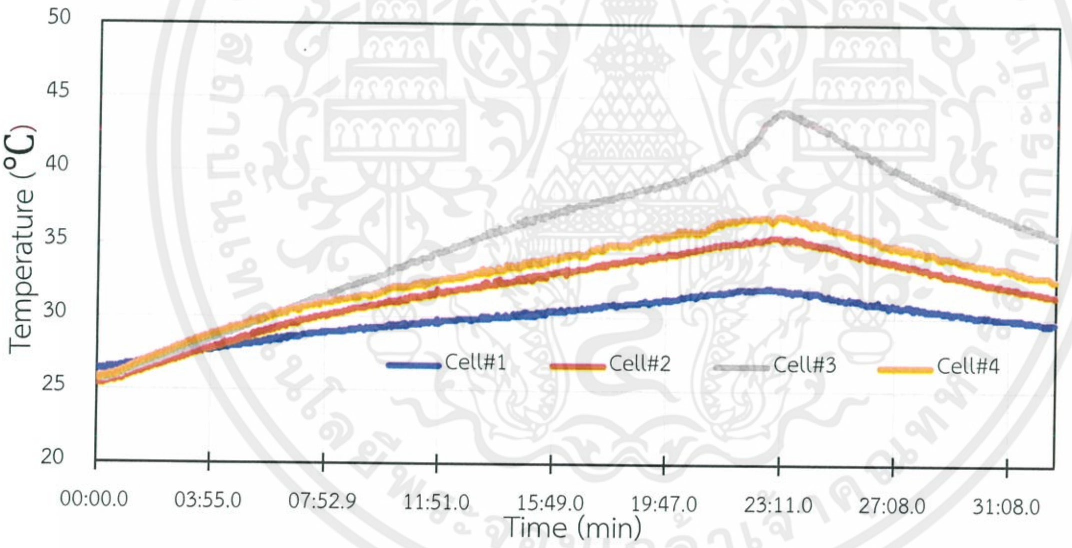


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 26.4 °C, 25.6 °C, 25.8 °Cและ 25.8 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 32.0 °C, 35.4 °C, 43.2 °C และ 36.9 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 29.890 °C, 31.874 °C, 35.680 °C และ 32.940 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 32.596 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.30 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 3 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 1, 2 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

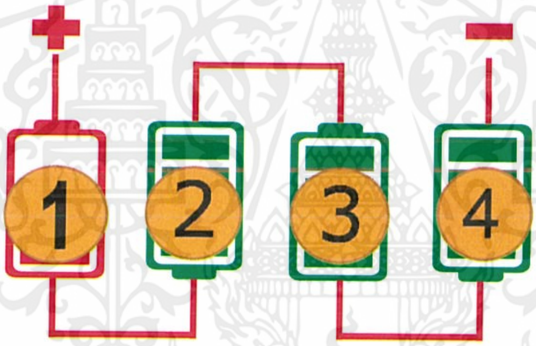


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

ในกรณีทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.428 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.480 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.399 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวกและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล มีแรงดันไฟฟ้า 2.981 โวลต์ ส่วนกรณีทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1 ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.893 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2 มีแรงดันไฟฟ้า 3.920 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3 มีแรงดันไฟฟ้า 3.882 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4 ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวกและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล มีแรงดันไฟฟ้า 3.731 โวลต์ โดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลไม่สมดุล ซึ่งมีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหายตำแหน่งที่ 4 สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.31 ในการทดสอบการอัดและคายประจุ

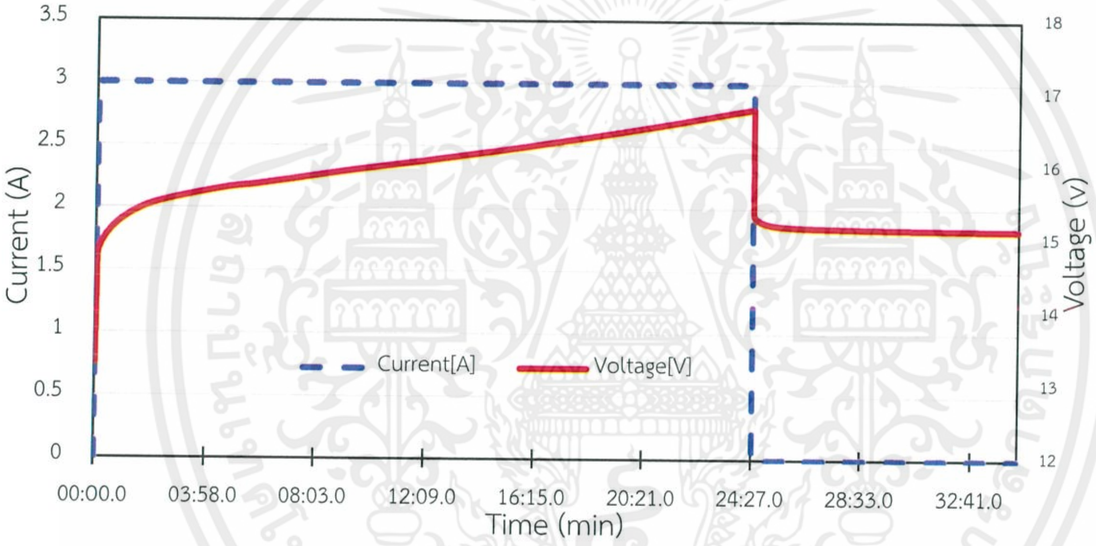


รูปที่ 4.31 แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 13.307 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.798 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 24.28 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุ ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.32 จากนั้นระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.141 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

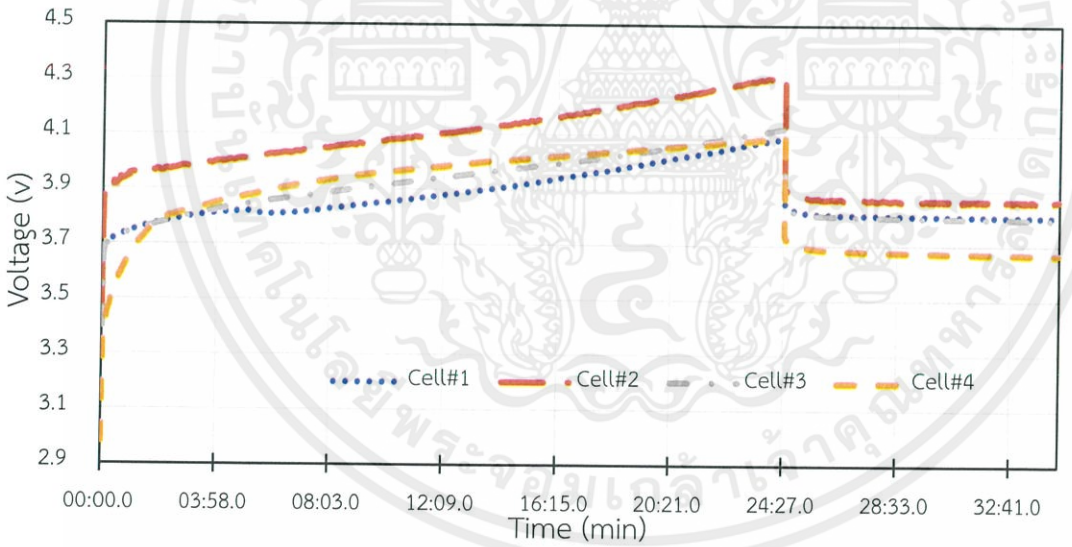


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.428 โวลต์, 3.480 โวลต์, 3.399 โวลต์ และ 2.981 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 4.090 โวลต์, 4.315 โวลต์, 4.124 โวลต์และ 4.094 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.805 โวลต์, 3.863 โวลต์, 3.795 โวลต์และ 3.668 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.33 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

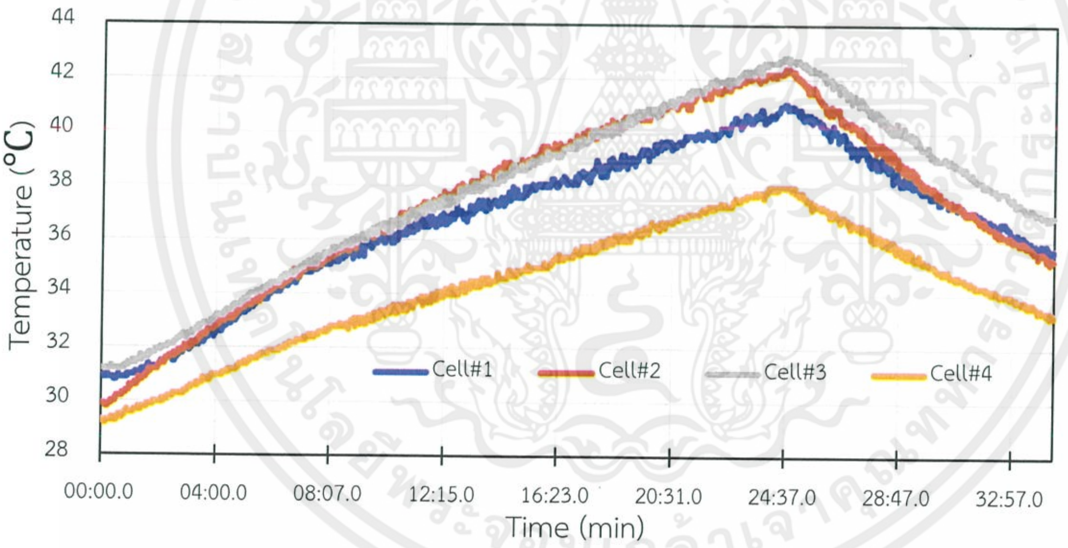


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 30.9 °C, 29.9 °C, 31.2 °C และ 29.3 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 41.0 °C, 42.2 °C, 42.7 °C และ 38.0 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 36.861 °C, 37.472 °C, 37.923 °C และ 34.326 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 36.645 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.34 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 4 ที่ไม่สมบูณ์มีค่าอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าต่ำกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 ในขณะเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

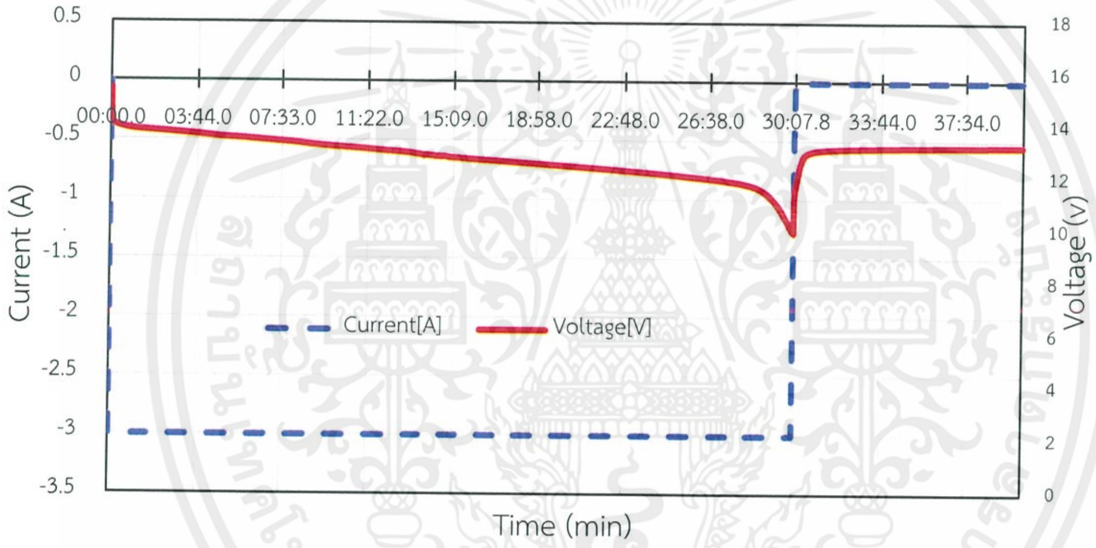


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.458 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.001 โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 26.07 นาที โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุ ซึ่งดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ตลอดการทดสอบ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.35 จากนั้นระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 13.284 โวลต์ (rest voltage) เมื่อสิ้นสุดสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

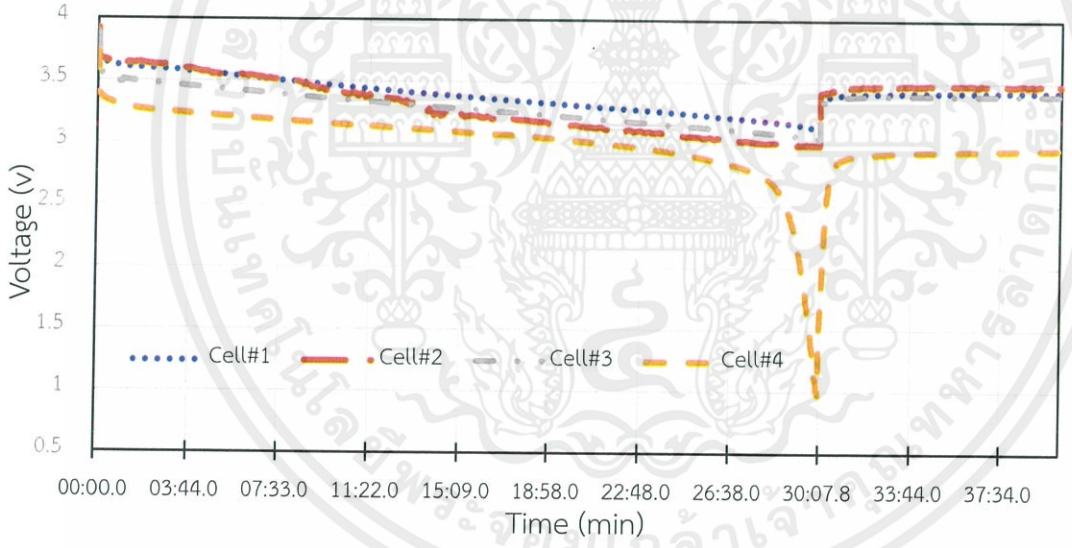


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.893 โวลต์, 3.920 โวลต์, 3.882 โวลต์ และ 3.731 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 3.1314 โวลต์, 2.994 โวลต์, 3.047 โวลต์และ 0.982 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.427 โวลต์, 3.477 โวลต์, 3.398 โวลต์และ 2.963 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดันไฟฟ้าขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.36 สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุลในโมดูลในตำแหน่งที่ 4 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน

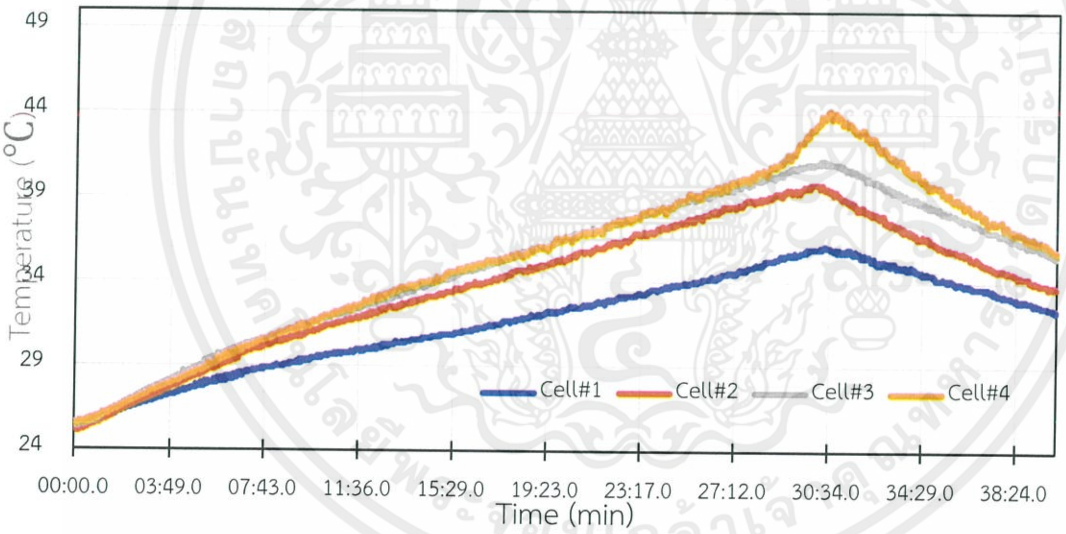


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1, 2, 3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 25.5 °C, 25.2 °C, 25.5 °Cและ 25.6 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 36.0 °C, 39.8 °C, 40.9 °C และ 43.1 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 31.763 °C, 33.967 °C, 34.036 °C และ 35.508 °Cตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 33.818 °C โดยอุณหภูมิขณะทำการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.37 จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 4 ที่ไม่สมดุลมีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 ในขณะเซลล์ที่ 1, 2 และ 3 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุป

ผลการทดลองของปริญญานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้าดังนี้

การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในเซลล์แบตเตอรี่

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับ จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์, และ 6 แอมป์ ตามลำดับ ระยะเวลาที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าแปรผกผันตามกระแสไฟฟ้าที่ในการอัดประจุไฟฟ้า จึงทำให้การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 2C มีระยะเวลาในการทดสอบน้อยที่สุด คือ 10.47 นาทีและการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 0.5C มีระยะเวลาในการทดสอบมากที่สุด คือ 97.40 นาที แต่มีค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 แบบ โดยทั้ง 3 แบบมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่เท่ากับ 3.874 โวลต์

การทดสอบการคายประจุประจุไฟฟ้าในเซลล์แบตเตอรี่

จากการทดสอบพบว่าเมื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับ ดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์, และ 6 แอมป์ ตามลำดับ ระยะเวลาที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าแปรผกผันตามกระแสไฟฟ้าที่ในการอัดประจุไฟฟ้า จึงทำให้การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 2C มีระยะเวลาในการทดสอบน้อยที่สุด คือ 18.39 นาทีและการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 0.5C มีระยะเวลาในการทดสอบมากที่สุด คือ 86.36 นาที แต่มีค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ใกล้เคียงกันทั้ง 3 แบบ โดยทั้ง 3 แบบมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่เท่ากับ 3.123 โวลต์

การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุล

จากการทดสอบพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่สมดุลภายในกระบวนการต่าง ๆของการทดสอบจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะที่ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น มีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน ใช้เวลาในการทดสอบ 32.10 นาที อีกทั้งอุณหภูมิในแต่ละเซลล์ขณะที่ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุล

จากการทดสอบพบว่าจากการทดสอบพบว่าเมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ที่สมดุล ภายในกระบวนการต่าง ๆของการทดสอบจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะที่ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าลดลง มีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน ใช้เวลาในการทดสอบ 31.57 นาที อีกทั้งอุณหภูมิในแต่ละเซลล์ขณะที่ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลที่ไม่สมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

จากการทดสอบพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งต่าง ๆ ตามเงื่อนไข ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 เงื่อนไข ระยะเวลาเฉลี่ยของการทดสอบทั้ง 4 เงื่อนไขเท่ากับ 24.47 นาที อีกทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลมีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน ในส่วนของอุณหภูมิเซลล์แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ ขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลที่ไม่สมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

จากการทดสอบพบว่าเมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจกโมดูลแบตเตอรี่ที่มีตำแหน่งของแบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งต่าง ๆ ตามเงื่อนไข ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 เงื่อนไข ระยะเวลาเฉลี่ยของการทดสอบทั้ง 4 เงื่อนไขเท่ากับ 23.81 นาที อีกทั้งค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของเซลล์แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลมีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติมีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน ในส่วนของอุณหภูมิเซลล์แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ ขณะที่เซลล์แบตเตอรี่ที่ปกติจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นตัวบ่งผลกระทบจากการไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ BMS ทำให้เกิดการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่ จากการดูผลการทดสอบต่าง ๆ ของปริญญานิพนธ์นี้ ไม่ว่าจะเป็น ระยะเวลาในการอัดและคายประจุไฟฟ้า, อุณหภูมิขณะอัดและคายประจุไฟฟ้า, แรงดันสูงสุดขณะอัดประจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะคายประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอผลจากการใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ณ ขณะที่ไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) เพื่อให้ทราบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่ จะเกิดส่งผลเสียอย่างไร และจะบ่งบอกได้อย่างไรว่าเกิดการไม่สมดุลภายในโมดูล โดยการทดลองในปริญญานิพนธ์นี้ใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่โดยทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นขณะอัดและคายประจุ ผ่านตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งแบบที่สมดุลและไม่สมดุล โดยแบบไม่สมดุลเซลล์แบตเตอรี่ที่ทำให้เกิดการไม่สมดุลจะแบ่งออกเป็น 4 ตำแหน่ง เพื่อหาข้อแตกต่างที่ทำให้เกิดความเสียหาย

5.2 สรุปผลการทดลอง

การพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลอง จะแบ่งเป็น 5 เงื่อนไขในการพิจารณาผลที่เกิดขึ้น ได้แก่ ตำแหน่งของเซลล์ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลในโมดูล, ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุ , แรงดันไฟฟ้า, อุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ภายในโมดูล และพิจารณาจากการค่าประสิทธิภาพของการคายประจุไฟฟ้า (Coulombic Efficiency) โดยในเงื่อนไขแรกจะมีผลไปในแนวโน้มเดียวกัน ในตำแหน่งที่ 1 2 และ 4 ซึ่งในตำแหน่งที่ 3 อาจเกิดจากการที่แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์น้อยกว่าในกรณีอื่น

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

		เซลล์เดียว	สมดุล	ไม่สมดุล ตำแหน่งที่1	ไม่สมดุล ตำแหน่งที่2	ไม่สมดุล ตำแหน่งที่3	ไม่สมดุล ตำแหน่งที่4
เวลาที่ใช้ (นาที)	อัด	39:32	32:10	26:16	25:02	22:47	24:29
	คาย	39:29	31:57	25:19	22:40	21:57	26:07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุจะแสดงดังตาราง 5.1 ในกรณี เซลล์เดียวจะเห็นว่าใช้เวลาในการอัดและคายประจุไม่ถึง 1 ชั่วโมง ในอัตรา C-rate 1C ซึ่งในการอัด-คายประจุ จะใช้กระแสคงที่ ที่ 2.25 A เพื่อให้ได้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังภาคผนวก ข

ส่วนของเงื่อนไขที่ 2 เวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุของโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุลจะใช้เวลาต่ำกว่าแบตเตอรี่ทั้งแบบเซลล์เดียวและแบบสมดุล แสดงให้เห็นว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นทำให้ใช้งานได้สั้นลง

เงื่อนไขที่ 3 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ภายในโมดูลมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด แรงดันจะลดลงต่ำสุดที่ 0.5 โวลต์ ซึ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ไม่ควรมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 2 V/cell เนื่องจากทำให้เกิดความเสียหายภายในเซลล์ที่สามารถนำไปสู่การปลดปล่อยตัวเองสูง (Self-discharge) หรือไฟฟ้าลัดวงจรบางส่วน เมื่ออัดประจุใหม่เซลล์จะไม่เสถียร เมื่อนำเซลล์แบตเตอรี่ไปทำการทดสอบอัดและคายประจุอีกครั้งพบว่า แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เซลล์ตกลง มีค่าประมาณ 3.7 โวลต์ ซึ่งแรงดันแบตเตอรี่เซลล์ที่ปกติ (ก่อนทดลองแบบไม่สมดุล) จะประมาณ 3.9 โวลต์

เงื่อนไขที่ 4 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ภายในโมดูลสมดุล มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่ในโมดูลแบบไม่สมดุล ในขณะทำการคายประจุ อุณหภูมิเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเซลล์อื่น ๆ ในขณะอัดประจุ อุณหภูมิเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์อื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการคายประจุเกิน (Over-discharge) และอัดประจุเกิน (Over-charge) ตามลำดับ

ในเงื่อนไขสุดท้าย เราจะทำการคำนวณประสิทธิภาพในการคายประจุไฟฟ้า ที่กระแสคงที่ พบว่าโมดูลแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเกิดการไม่สมดุล โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 97.5% ในขณะที่โมดูลแบตเตอรี่สมดุลมีค่าประสิทธิภาพ 99.7% ซึ่งค่าที่ได้เกิดจากการเฉลี่ยจากผลการทดลอง

ทั้ง 5 เงื่อนไขจะแสดงผลไปในแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อเกิดการไม่สมดุลทางแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่เป็นอย่างมาก วงจรบายพาส หรือ ระบบจัดการแบตเตอรี่ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เพื่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ของแบตเตอรี่ และผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิจัย

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีในอนาคตเช่นวิธี Raman Spectroscopy เพื่อการทดสอบหาสถานะของแบตเตอรี่ที่รวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

2. สามารถนำไปทดสอบกับระบบไฟฟ้าที่มีการใช้แบตเตอรี่ในการเก็บพลังงานเพื่อบ่งบอกการเกิดการไม่สมดุลที่เกิดขึ้น

3. สามารถนาไปพัฒนาต่อยอดในการทำวงจรป้องกันเพื่อบายพาทสถานะของแบตเตอรี่นั้น ๆ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานของแบตเตอรี่ขนาดใหญ่และต้องการความเสถียรในการจ่ายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Modern Manufacturing. (2017) "Energy Storage Technology เมื่อพลังงานที่ผลิตได้ ต้องกักเก็บสำรอง," Retrived August 16, 2018, from https://www.mmthailand.com/energy-storage-technology

[2] McGraw-Hill, J. Dahn and G. Ehrlich. (2011). Lithium-Ion Batteries. (4th ed).

[3] Battery University (2016)." What Is C-rate," Retrived August 16, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate

[4] Battery University (2016)."Series and Parallel Battery Configurations," Retrived August 15, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations

[5] Sihua Wen. (2009) "Cell balancing buys extra run time and battery life," Retrived August 16, 2018, from https://e2echina.ti.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/13-112-00-00-00-00-58-11/Cell-balancing-buys-extra-run-time-and-battery-life.pdf

[6] Yevgen Barsukov, Texas Instruments (2009). Battery Cell Balancing: What to Balance and How

[7] จิดาภา ประกิจฤทธานนท์ ชนกนาถ พิทักษ์ธนางกูร และ ชัญญา รุจิวนารมย์,"วิธีการวินิจฉัยแบตเตอรี," **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

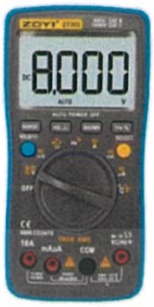
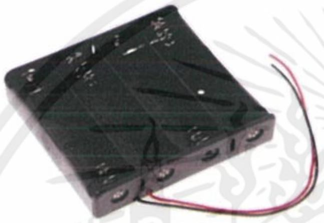
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

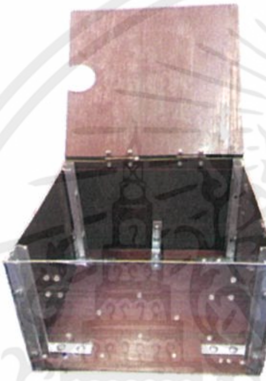
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	มัลติมิเตอร์ (Multimeter)
	รางถ่าน (Charcoal rails)
	โน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์ (Notebook computer)
	สายวัดอุณหภูมิ (Temperature measuring cable)

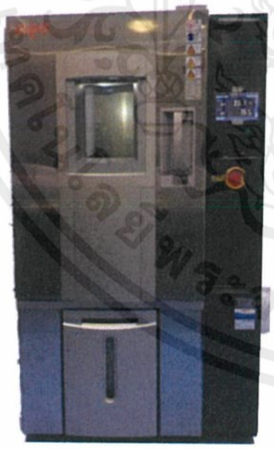
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	สายวัดแรงดันไฟฟ้า
	กล่อง safety
	ถ่านชาร์จ Samsung INR18650 30Q 3000mAh
	KIKUSUI PLZ1250WB Electronic load

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดและอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

รูปเครื่องมือวัดและอุปกรณ์	รายละเอียด
	KIKUSUI PFX2532 Charge/Discharge system controller
	KIKUSUI PAT60-133T DC power supply
	Chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่
The Study of Unbalance Battery Module

ชื่อนักศึกษา : นายกิตติพงศ์ นาวา[1], นายนฤเบศร์ ภวภูตานนท์[2], นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์[3], นายปรัชญา ทรงมุสิก[4]

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 E-mail : tongla.tg8@hotmail.com

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการศึกษาการไม่สมดุลภายในแบตเตอรี่โมดูล เมื่อไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ battery management system (BMS) โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่หลังจากเกิดการไม่สมดุลภายในโมดูลแบตเตอรี่ โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่ จำลองการทำงานของแบตเตอรี่โมดูล โดยขณะทดสอบมีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นที่ 25 °C, 30% แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองคือ Li-ion พิกัด 3000 mAh, 3.6 โวลต์ โดยทำการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ด้วยอัตราการอัดและคายประจุเท่ากับ 0.5C, 1C และ 2C เพื่อต้องการทราบพฤติกรรมของแบตเตอรี่ เช่น ระยะเวลาในการอัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์, อุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะอัดและคายประจุ และการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ หลังจากนั้นทำการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่สมดุลและไม่สมดุลที่ต่อแบบอนุกรมตามลำดับ ซึ่งโมดูลสมดุลและไม่สมดุลจะกำหนดด้วยระดับแรงดันไฟฟ้า โดยโมดูลที่ไม่สมดุลจะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์อื่น 75% เพื่อทำให้เกิดการไม่สมดุล

โดยในการทดสอบอัดและคายประจุไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่ทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล จะพิจารณาเปรียบเทียบระยะเวลาในการอัดและคายประจุไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่โมดูล, แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ และอุณหภูมิแต่ละเซลล์ ซึ่งในการทดสอบแบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล จะพิจารณาตำแหน่งของเซลล์ที่ไม่สมดุล เนื่องจากตำแหน่งของเซลล์ที่ไม่สมดุลอาจส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของแบตเตอรี่โมดูล จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าผลเสียที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่โมดูลเมื่อไม่มีระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ BMS

Abstract

This thesis presents the studying of unbalance module batteries without battery management system (BMS). By studying the factors that impact to the batteries after unbalancing in the module batteries by using battery test system. Reproduce working of module batteries by control temperature at 25 °C and humidity 30%. Li-ion batteries rated 3000 mAh, 3.6 volt is used in the experiment by testing charge and discharge battery per cell rated charging and discharging at 0.5C, 1C and 2C..Then test charging and discharging in balance and unbalance module batteries in series and parallel. Balance and unbalance module determine voltage level by unbalance module has lower voltage than the others 75% to cause an unbalance.

Testing charge and discharge in balance and unbalance batteries focus on the comparison of the period charging and discharging, voltage of module batteries and voltage and temperature per cell. The testing unbalance batteries consider by the position of unbalance cell. From the studying found that charge and discharge unbalance module the period charging and discharging decrease 75.56% compared with the balance, 60% compared with single cell and battery cell inside module with higher voltage will have an average temperature higher than cell with low pressure while charging. On the hand cell with lower voltage will have an average temperature higher than cell with high pressure while discharging. Which indicates the disadvantage of the module battery when there is no battery management system or BMS.

1.บทนำ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนมีบทบาทต่อประเทศกำลังพัฒนา การใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนของประชากรในอนาคต พลังงานจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อระบบเศรฐกิจอย่างยิ่ง ในทั้งด้านอุสาหกรรมและด้านการคมนาคมการขนส่งล้วนมีพลังงานเป็นตัวขับเคลื่อน ในด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาตินั้น ไฟฟ้าที่ได้จะถูกผลิตออกมาไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถควบคุมปริมาณและช่วงเวลาในการผลิตได้ ก่อให้เกิดความผันผวนของการจ่ายพลังงาน และในระบบที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนตามธรรมชาติในปริมาณมากหากปล่อยให้มีการจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสู่ระบบของการไฟฟ้าโดยตรงโดยไม่มีการควบคุมจะเกิดเหตุการณ์ที่มีปริมาณไฟฟ้าไหลเข้าสู่ระบบเป็นจำนวนมากในช่วงที่มีความต้องการใช้น้อย แต่ในขณะที่มีความต้องการมากแหล่งพลังงานทดแทนตามธรรมชาติกลับผลิตไฟฟ้าออกมาได้เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ระบบกักเก็บพลังงาน จึงถูกนำมาใช้เพื่อสร้างความสมดุลของปริมาณไฟฟ้าในระบบให้เหมาะสมกับความต้องการในการใช้งานซึ่งมีความแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา โดยการกักเก็บพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้ ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าต่าง ๆ เพื่อนำมาช่วยจ่ายให้กับส่วนที่ที่มีความต้องการไฟฟ้าสูง ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ในอนาคต โดยภายในแบตเตอรี่ประกอบด้วย เซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งเซลล์หรือมากกว่า โดยมีการเชื่อมต่อกันแต่ละเซลล์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้า ที่เพียงพอต่อความต้องการใช้งานของผู้บริโภค ในแต่ละเซลล์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแบตเตอรี่ประกอบด้วย ขั้วบวก (Anode) และ ขั้วลบ (Cathode) ซึ่งขั้วที่มีเครื่องหมายบวกจะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วที่มีเครื่องหมายลบ ขั้วที่มีเครื่องหมายลบคือแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนที่เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกแล้ว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะไหลและส่งมอบพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายนอก โดยที่สารอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีความสามารถยอมให้ปฏิกิริยาทางเคมีในขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างกันทำงานเป็นการส่งมอบพลังงานให้กับวงจรภายนอก

2.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

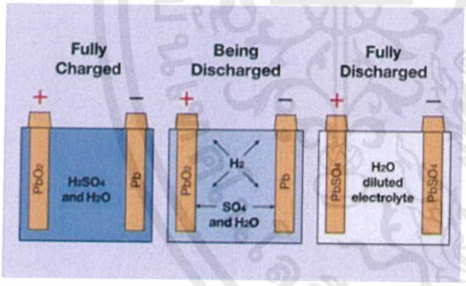
แบตเตอรี่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับสตาร์ทเครื่องยนต์ และจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ในรถยนต์ ไฟฟ้าจะถูกจ่ายออกไปเรื่อยๆ ถ้าไฟฟ้าหมดก็นำไปอัด ประจุกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยยกตัวอย่างการทำงานซองแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และ li-ion ดังนี้

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ประกอบด้วย

แผ่นธาตุบวก (+) มีสูตรทางเคมีเป็น PbO_2

แผ่นธาตุลบ (-) มีสูตรทางเคมีเป็น Pb

น้ำกรดกำมะถันที่ใช้ในแบตเตอรี่ มีสูตรทางเคมีเป็น H_2SO_4



รูปที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

เมื่อแบตเตอรี่ เชื่อมต่อกับวงจรภายนอกจะเกิดการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ เป็นผลจากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่าง กรดกำมะถัน (H_2SO_4), แผ่นธาตุบวก (PbO_2) และแผ่นธาตุลบ (Pb) โดยขณะที่จ่ายกระแสไฟฟ้าออก ออกซิเจนในแผ่นธาตุบวก (PbO_2) จะรวมตัวกับไฮโดรเจนในกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เกิดเป็นน้ำ (H_2O) ในขณะเดียวกัน Pb ใน PbO_2 รวมตัวกับซัลเฟต (SO_4) ใน H_2SO_4 เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ ตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) ในขณะเดียวกันตะกั่วพรุน (Pb) ในแผ่นธาตุลบก็จะรวมตัวกับอนุมูลซัลเฟต (SO_4) ในกรดกำมะถัน (H_2SO_4) เกิดตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) เช่นเดียวกัน

จากที่กล่าวมาข้างต้นพอสรุปได้ว่า ขณะที่แบตเตอรี่จ่ายไฟฟ้าออกจะเกิดตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) ขึ้นทั้งแผ่นธาตุบวกและแผ่นธาตุลบ โดยกรดกำมะถัน (H_2SO_4) จะถูกใช้ไปเกิดเป็นน้ำ (H_2O) ขึ้นมา ถ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อไปเรื่อย ๆ กรด H_2SO_4 ก็จะเจือจางลงไปเรื่อย ๆ และเมื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ แผ่นธาตุก็จะถูกเปลี่ยนเป็นตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) แบตเตอรี่ก็จะไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ต่อไป ต้องนำไปอัดประจุประจุไฟฟ้าใหม่ การอัดประจุไฟฟ้าจะเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับกับการจ่ายไฟฟ้าออก โดยตะกั่วซัลเฟต ($PbSO_4$) ที่เกิดมาตอนปฏิกิริยาจ่ายไฟฟ้าออก จะถูกแตกตัวเป็นอนุมูลของตะกั่ว (Pb) และ ซัลเฟต (SO_4)ในขณะเดียวกันน้ำ (H_2O) ก็จะถูกแยกตัวออกเป็นไฮโดรเจน (H_2) และออกซิเจน ซัลเฟต (SO_4) จะรวมตัวกับไฮโดรเจน (H_2) กลายเป็นกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ในขณะที่ออกซิเจนจะรวมตัวกับตะกั่ว (Pb) กลายเป็น PbO_2 ที่แผ่นธาตุบวกซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมานี้เป็นลักษณะการทำงานที่สำคัญของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด

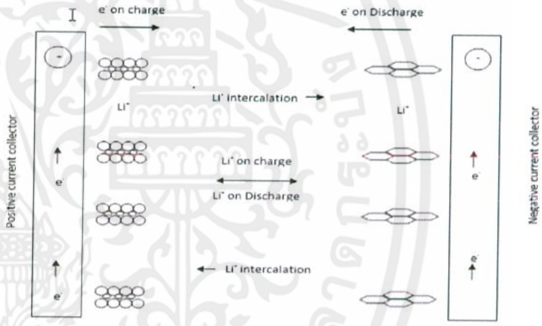
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประกอบด้วย

ขั้วลบมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุนเคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง เช่น แกรไฟต์เคลือบ บนแผ่นทองแดง เป็นต้น

ขั้วบวกมีองค์ประกอบเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบอยู่บนแผ่นอลูมิเนียมสารละลาย

อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียมในสารละลาย โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนของลิเทียมและอิเล็กตรอนของขั้วบวกและขั้วลบ

เยื่อเลือกผ่าน (Separator) ทำหน้าที่คั่นระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็น พอลิ-โพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 ลักษณะการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

โดยเมื่อมีการอัดประจุลงในแบตเตอร์รี่ ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนตัวออกจากขั้วบวก ผ่านเยื่อเลือกผ่านและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าสู่ขั้วลบ เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมและคาร์บอน ในทางกลับกัน อิเล็กตรอนจากขั้วบวกจะเคลื่อนตัวจากขั้วบวกเข้าสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก ซึ่งในขณะที่เกิดการคายประจุ ก็จะเกิดปฏิกิริยาในทิศทางตรงข้ามกันร่วมด้วยกระบวนการที่ไอออนของลิเทียมแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของขั้วลบ

2.3 การต่อแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มความจุของแบตเตอรี่

การเชื่อมต่อแบตเตอรี่หลายๆเซลล์นั้น เป็นผลเนื่องมาจากความต้องการ การใช้งานที่เพิ่มขึ้น ในทั้งความต้องการแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น หรือความต้องการความจุที่มากขึ้นโดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมงทั้งหมด (Ah) ซึ่งทำได้โดยการนำแบตเตอรี่มาต่อแบบอนุกรมและแบบขนานตามลำดับ หรือแบบผสมทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานในกรณีที่ต้องการเพิ่มทั้งแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่ต้องคำนึงในการนำแบตเตอรี่มาเชื่อมต่อกัน ไม่ว่าจะเป็นแบบอนุกรม แบบขนาน หรือแบบผสม คือประเภทของแบตเตอรี่ของแต่ละเซลล์ที่นำมาต่อ ซึ่งต้องใช้แบตเตอรี่ประเภทเดียวกัน มีแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ (Ah) เท่ากัน นอกจากนั้นยังไม่ควรใช้แบตเตอรี่ ที่มีชนิดและขนาดแตกต่างกันมาเชื่อมต่อ เนื่องจากเซลล์ที่แรงดันไฟฟ้าหรือความจุอ่อนกว่า จะก่อให้เกิดความไม่สมดุลของแบตเตอรี่

2.3.1 แบบอนุกรม

เป็นการต่อแบตเตอรี่แบบเรียงต่อกัน (ขั้วบวกต่อขั้วลบ) โดยที่มีปริมาณของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเท่ากัน แต่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีแบตเตอรี่ก้อนใด ก้อนหนึ่งหมดสภาพหรือเกิดความเสียให้จะทำให้แบตเตอรี่ ก้อนนั้นๆเปรียบเสมือนวงจรเปิด วงจรแบตเตอรี่อนุกรมก็จะไม่สามารถทำงานได้

รูปที่ 2.3 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่

จากรูปที่ 2.3 แสดงการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม โดยที่ในแต่ละเซลล์มีพิกัดเดียวกัน คือ แรงดันไฟฟ้า 3.6 โวลต์ ความจุ 3400 mAh ซึ่งการต่อแบบอนุกรม นี้จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกๆเซลล์ที่ต่อเข้าไป แต่ความจุยังคงที่เท่าเดิม

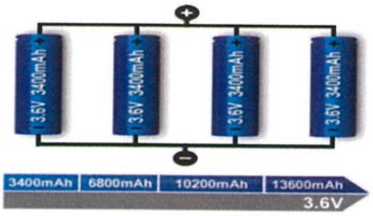
การต่อแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าสูงจำเป็นต้องมีการจับคู่เซลล์อย่างรอบคอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องนำไปใช้กับโหลดขนาดใหญ่หรือในขณะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อมีหลายเซลล์ที่เชื่อมต่ออยู่ในโมดูล ความเป็นไปได้ที่ความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพของเซลล์หนึ่ง อาจทำให้เกิดความล้มเหลวต่อทั้งโมดูล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้จึงต้องมีสวิทช์ที่จะบายพาสความล้มเหลวของเซลล์เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลเวียนได้อย่างต่อเนื่องแม้ว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำลง

รูปที่ 2.4 การต่ออนุกรมของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย

รูปที่ 2.4 แสดงชุดแบตเตอรี่ที่ "เซลล์ 3" ผลิตได้เพียง 2.8 โวลต์ แทนที่จะเป็น 3.6 โวลต์ ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ตกต่ำแบตเตอรี่นี้จะถึงจุดสิ้นสุดของปล่อยประจุเร็วกว่าชุดปกติ ซึ่งหมายความว่า แบตเตอรี่จะหมดไวกว่าปกติ ถ้าเซลล์หนึ่งในโมดูลเสื่อมสภาพหรือแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเซลล์อื่น จะนำไปสู่ความผิดพลาดในการใช้งานหรือเกิดอุบัติเหตุได้

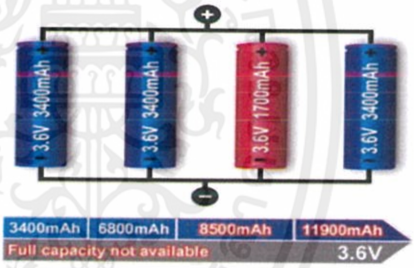
2.3.2 แบบขนาน

เป็นการนำปลายข้างเดียวกัน (ขั้วเดียวกัน) ของแต่ละอุปกรณ์มารวมกันก่อนแล้วจึงต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้า โดยการต่อแบบขนานแรงดันไฟฟ้ารวมจะเท่าเดิม (เท่ากับเซลล์เดียว) แต่กระแสไฟฟ้าหรือความจุรวมในโมดูลเท่ากับกระแสไฟฟ้าหรือความจุแต่ละเซลล์รวมกัน ข้อดีของแบบขนานก็คือ ถ้ามีอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งในวงจรไม่ทำงาน ก็จะไม่ส่งผลให้อุปกรณ์ตัวอื่นๆที่อยู่ในวงจรไม่ทำงานไปด้วย



รูปที่ 2.5 การต่อขนานของแบตเตอรี่

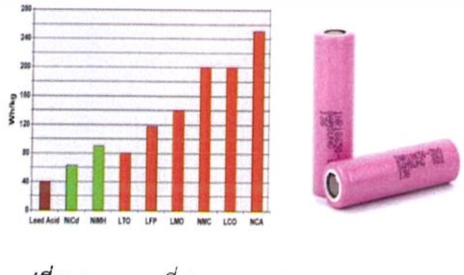
รูปที่ 2.5 แสดง เซลล์แบตเตอรี่ 4 เซลล์ที่เชื่อมต่อกันแบบขนาน แรงดันไฟฟ้าระบุของโมดูล (พิกัด) ยังคงอยู่ที่ 3.6 โวลต์ ขณะที่ความจุ (Ah) และระยะเวลาในการทำงานจะเพิ่มขึ้นสี่เท่า ในกรณีที่เซลล์ที่นำมาต่อขนานเกิดความผิดพลาดหรือเปิดวงจร จะเกิดความเสียหายต่อโมดูลน้อยกว่าการต่อวงจรแบบอนุกรม โดยที่เซลล์ที่มีข้อผิดพลาดจะลดความจุในการจ่ายโหลดทั้งหมด ทำให้เวลาในการทำงานลดลง เซลล์ที่ลัดวงจรอาจทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปและ อาจเกิดอันตรายจากไฟไหม้ได้จึงต้องมีฟิวส์ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันกระแสไฟฟ้าสูงโดยการแยกเซลล์



รูปที่ 2.6 การต่อขนานของแบตเตอรี่เมื่อมีเซลล์เสียหาย

3. การออกแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนแบบทุติยภูมิ คือ Samsung INR18650-30Q เซลล์เคมีชนิด NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide) สามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 2.5-4.2 โวลต์ โดยมีความจุ 3000 mAh สามารถอัดประจุด้วยกระแสสูงสุด 4 แอมป์ และคายประจุได้สูงสุด 15 แอมป์ อีกทั้งยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดด้วย

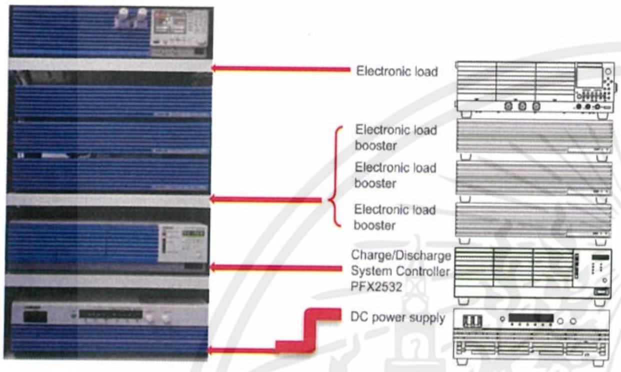


***รูปที่ 3.1** แบตเตอรี่ Samsung INR18650-30Q*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผลการไม่สมดุลของโมดูลแบตเตอรี่

เป็นการนำแบตเตอรี่มาเชื่อมต่อทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล แล้วจึงทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลต่าง ๆ และคำนวณค่าประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุ หรือ Coulombic Efficiency รวมไปถึงการนำข้อมูลจากปริญญานิพนธ์มาอ้างอิงการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาแนวโน้มของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่และค่ากราฟมาตรฐานเพื่อสร้างกราฟอ้างอิง ซึ่งผู้ทดสอบได้ทำการทดสอบโดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่ ที่สามารถทดสอบการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบแบตเตอรี่

โดยที่ชุดทดสอบสามารถทดสอบแบตเตอรี่ได้หลายฟังชันก์ เช่น Constant Current, Constant Voltage, Constant Power และฟังชันก์พื้นฐานอื่นๆ ซึ่งจะบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้ระหว่างการทดสอบ เพื่อนำมาสร้างเป็นกราฟข้อมูลต่างๆ ทำให้ผู้ใช้งานทำการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบได้

3.2 การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบสมดุล

ในหัวข้อการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการนำเอาแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบแบตเตอรี่แต่ละเซลล์แล้ว มาเชื่อมต่อกันแบบสมดุลแบบอนุกรม เพื่อที่จะนำไปทดสอบ โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา และทำการเก็บข้อมูลการทดสอบไปพิจารณาเปรียบเทียบกับโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล และทำการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์ตลอดการทดลอง ทำให้ได้ค่าของกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟกระแสไฟฟ้ากับเวลา และกราฟกำลังไฟฟ้าต่อเวลา กราฟอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ต่อเวลา

3.3 การทดลองอัดและคายประจุโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล

ในหัวข้อการทดลองนี้ ผู้วิจัยทำการต่อแบตเตอรี่แบบไม่สมดุล โดยคายประจุของแบตเตอรี่เซลล์หนึ่งลง ก่อนมาทำการต่อเพื่อทดสอบ โดยทำการทดสอบเหมือนการทดลองข้างต้น และทำการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์ตลอดการทดลอง ทำให้ได้ค่าของกราฟแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟกระแสไฟฟ้ากับเวลา และกราฟกำลังไฟฟ้าต่อเวลา กราฟอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ต่อเวลา เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแต่ละเซลล์ที่ต่อแบบสมดุลว่าเกิดความเสียหายหรือส่งผลอย่างไรกับแบตเตอรี่แต่ละเซลล์บ้าง

3.4 การคำนวณประสิทธิภาพของแบตเตอรี่

การคำนวณประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ผู้วิจัยจะทำการคำนวณประสิทธิภาพในการอัด-คายประจุของแบตเตอรี่ Coulombic efficiency (CE) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Faradaic efficiency หรือ Current efficiency อธิบายถึงประสิทธิภาพการประจุอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอนไปในแบตเตอรี่ ซึ่ง CE คืออัตราส่วนของค่าประจุทั้งหมดที่คายออกมาจากแบตเตอรี กับค่าประจุทั้งหมดที่อัดลงในแบตเตอรี่ ในช่วงเต็มรูปแบบ โดยทั่วไปแบตเตอรี่นั้นจะไม่สามารถคายประจุไปได้หมด ดังนั้นถ้าทำได้สูงจะหมายความว่าคายประจุออกได้มากเท่าที่ระบุไว้

$$\eta_{coulombic} = \frac{C_{discharge}}{C_{charge}}$$

เมื่อ $C_{discharge}$ และ C_{charge} แสดงค่าความจุในการคายประจุและการอัดประจุที่ใช้ตามลำดับ ค่าความจุจะสามารถคำนวณหาได้จากการอินทิเกรตกราฟกระแสไฟฟ้าต่อเวลาที่ใช้ในการอัดหรือคายประจุ ดังนั้นสามารถคำนวณสมรรถนะของ coulombic ได้ดังนี้

$$\eta_{coulombic} = \frac{\int_{t_0}^{t_d} I_{discharge}\,dt}{\int_{t_0}^{t_c} I_{charge}\,dt}$$

ในกรณีกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบอัดและคายประจุคงที่กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าในการคายประจุเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดประจุ ($I_{discharge} = I_{charge}$) ดังนั้นประสิทธิภาพ CE สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{coulombic} = \frac{t_{discharge}}{t_{charge}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

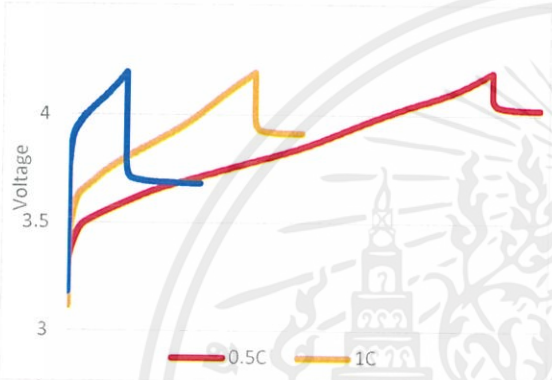
4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบเซลล์แบตเตอรี่

ทำการทดสอบแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนโดยการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1C และ 2C โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้น สามารถแสดงผลได้ดังนี้

4.1.1 การอัดประจุไฟฟ้า

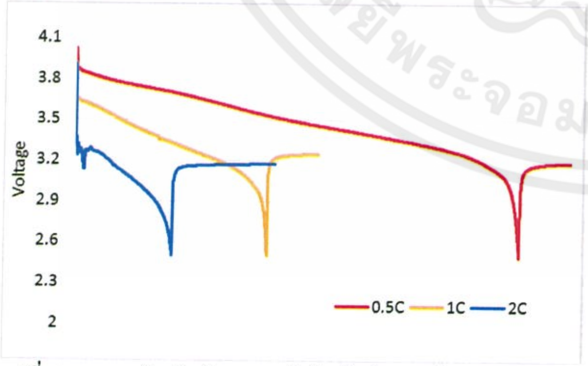
เมื่อทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับ จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์และ 6 แอมป์ ตามลำดับ เข้าไปในแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์

4.1.2 การคายประจุไฟฟ้า

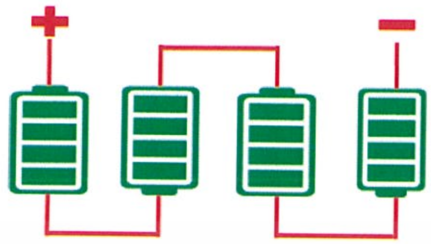
เมื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C, 1Cและ 2C ตามลำดับ ดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1.5 แอมป์, 3 แอมป์และ 6 แอมป์ ตามลำดับ ออกจากแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน ถือเป็นการเสร็จสิ้นการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าต่อเวลาในทำการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์

4.2 การทดสอบการอัดและคายประจุประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

จากรูปแสดงการการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมภายในโมดูลสมดุล โดยแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1(Exp1#1-1) ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบ มีแรงดันไฟฟ้า 3.2463 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2(Exp1#1-2) มีแรงดันไฟฟ้า 3.1195 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3(Exp1#1-3) มีแรงดันไฟฟ้า 3.1466 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4(Exp1#1-4) ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.4424 โวลต์

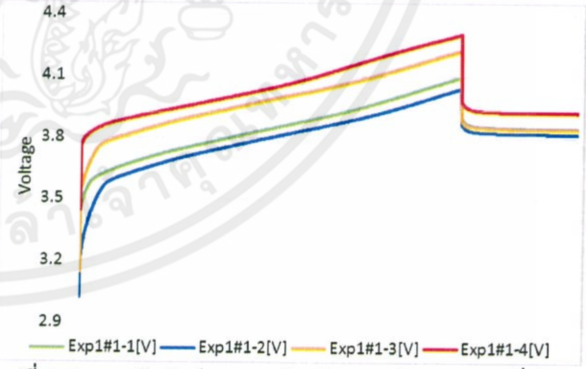


รูปที่ 4.3 โมดูลการต่อเซลล์แบตเตอรี่แบบอนุกรม

4.2.1การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในกรณีโมดูลสมดุล ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าที่ 1C โดยใช้ชุดทดสอบแบตเตอรี่, ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่ 25 °C, 30 % จ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทดสอบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดระยะสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

4.2.1.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 12.855 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่



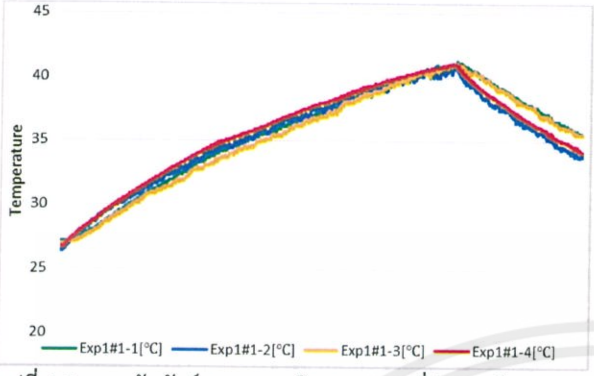
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของแรงดันแต่ละเซลล์ของแบตเตอรี่ต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

4.2.1.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

แบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 41.1 °C 40.7 °C 40.9 °C 41 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 35.720 °C 35.486 °C 35.466 °C 35.823 °C ตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

35.624 °C จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในแต่ละเซลล์มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



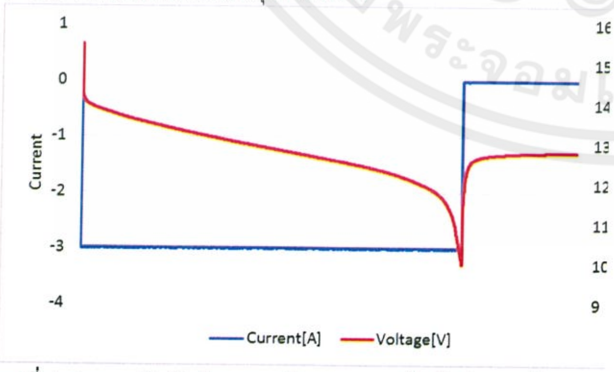
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ต่อเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

4.2.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลสมดุล

ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ 1C ดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจากแรงดันไฟฟ้าสูงสุด จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.000 โวลต์ ระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ในโปรแกรมทดสอบ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าคงที่ เมื่อสิ้นสุดระยะสภาวะแรงดันคงที่ระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน

4.2.2.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

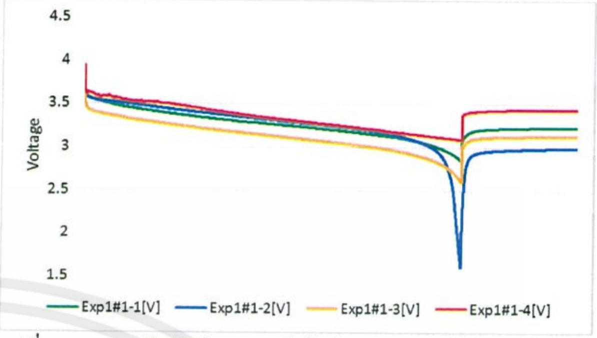
เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าจะลดลง จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 12.816 โวลต์ (rest voltage) จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

4.2.2.2 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

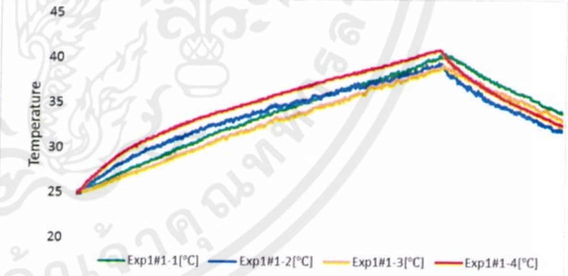
จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ภายในกระบวนการต่างๆของการทดสอบจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะที่ทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าลดลงและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

4.2.2.3 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 25.2 °C 24.8 °C 25.1 °Cและ 24.9 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 40.5 °C 39.7 °C 39.1 °C 41 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 34.146 °C 33.917 °C 33.262 °C 35.125 °Cตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 34.112 °C จากการทดสอบสังเกตได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในแต่ละเซลล์มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุไฟฟ้าโมดูลสมดุล

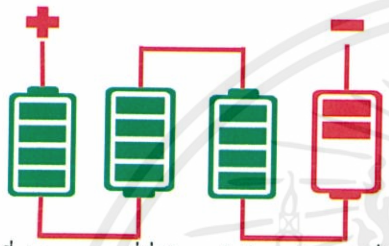
4.3 การทดสอบการอัดและคายประจุไฟฟ้าโมดูลไม่สมดุลโดยการต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรม

ในหัวข้อนี้จะทำการทดลองอัดและคายประจุไฟฟ้าโมดูลไม่สมดุล โดยมีข้อสันนิฐานว่า ตำแหน่งของแบตเตอรี่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของ อิเล็กตรอน อาจส่งผลต่อแบตเตอรี่ในโมดูล ผู้วิจัยจึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งของเซลล์ที่เสียหาย เพื่อดูผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

4.3.1ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหายตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

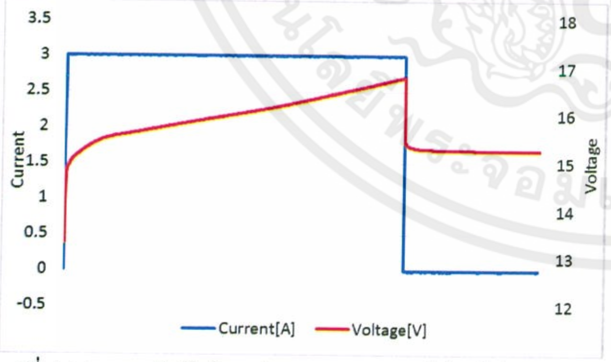
ในกรณีทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1(Exp1#1-1) ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 2.869 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2(Exp1#1-2) มีแรงดันไฟฟ้า 3.466 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3(Exp1#1-3) มีแรงดันไฟฟ้า 3.471 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4(Exp1#1-4) ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.489 โวลต์ ส่วนกรณีทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1(Exp1#1-1) ซึ่งอยู่ตรงขั้วลบและเป็นตำแหน่งแบตเตอรี่ที่ได้รับความเสียหาย มีแรงดันไฟฟ้า 3.738 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2(Exp1#1-2) มีแรงดันไฟฟ้า 3.906 โวลต์, แบตเตอรี่เซลล์ที่ 3(Exp1#1-3) มีแรงดันไฟฟ้า 3.912 โวลต์และแบตเตอรี่เซลล์ที่ 4(Exp1#1-4) ซึ่งอยู่ตรงขั้วบวก มีแรงดันไฟฟ้า 3.929 โวลต์



รูปที่ 4.9 แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลตำแหน่งที่ 1

4.3.1.1 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

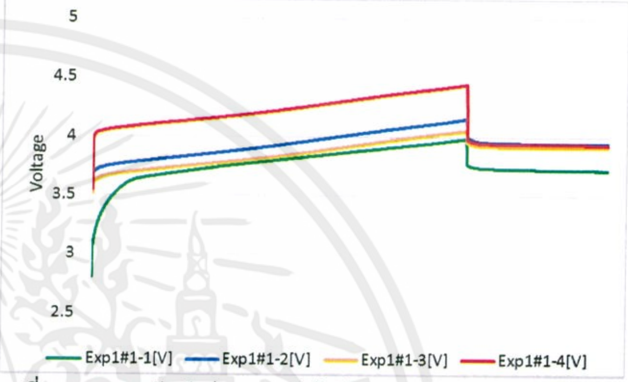
เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูล แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 13.316 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 16.798โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 26.16 นาที ระบบจะหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 15.261 โวลต์ (rest voltage) จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

4.3.1.2 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

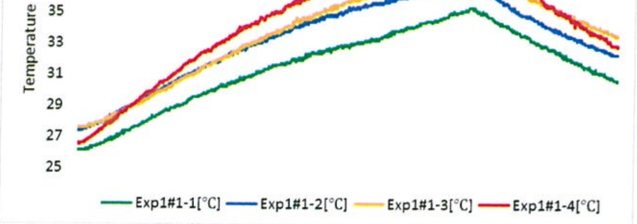
จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 2.869โวลต์ 3.466โวลต์ 3.471 โวลต์และ 3.489 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 3.638 โวลต์ 4.016 โวลต์ 4.306 โวลต์และ 4.301 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 3.582 โวลต์ 3.843 โวลต์ 3.851 โวลต์และ 3.872 โวลต์ตามลำดับ สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2,3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

4.3.1.3 ผลการอัดประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 26.2 °C 27.5 °C 27.6 °Cและ 26.6 °C ตามลำดับ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ เข้าไปในโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 35.4 °C 36.9 °C 38.0 °C 39.2 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 31.669 °C 33.397 °C 33.963 °C 34.697 °Cตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 33.431 °C จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 1 ที่เสียหายมีค่าอุณหภูมิสูงสุดต่ำกว่าเซลล์ที่ 2,3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าต่ำกว่าเซลล์ที่ 2,3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 2,3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ

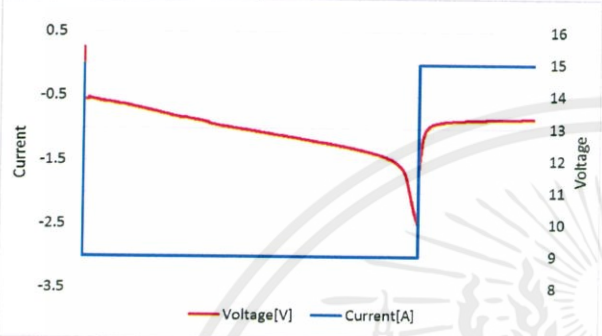


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการอัดประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1.4 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

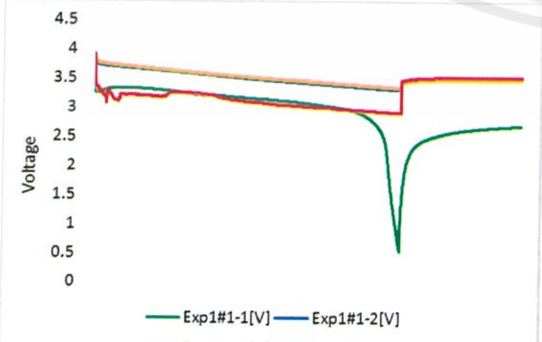
จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูล แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจาก 15.506 โวลต์(open voltage) จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่าถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 10.001โวลต์ (final voltage) ใช้เวลาในการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 25.19 นาที ระบบจะหยุดดึงกระแสไฟฟ้าและจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าภายในโมดูลแบตเตอรี่มีค่า 13.298 โวลต์ (rest voltage) จากนั้นระบบการทดสอบทั้งหมดจะหยุดการทำงาน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

4.3.1.5 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าต่อเซลล์

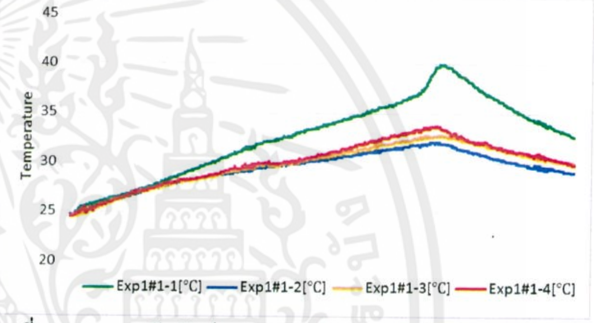
จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 3.738โวลต์ 3.906 โวลต์ 3.912 โวลต์และ 3.929 โวลต์ ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลง จนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ 1.065 โวลต์ 3.268 โวลต์ 2.992 โวลต์และ 3.059 โวลต์ ตามลำดับ และจะเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์มีค่า 2.8369 โวลต์ 3.465 โวลต์ 3.471 โวลต์และ 3.488 โวลต์ตามลำดับ สังเกตได้ว่าขณะทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นน้อยที่สุด เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ลดลงจนถึงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดแต่ค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแบตเตอรี่ที่เสียหายในโมดูลในตำแหน่งที่ 1 มีค่าน้อยที่สุดและมีค่าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่น้อยที่สุด ขณะที่แบตเตอรี่เซลล์ที่ 2,3 และ 4 มีค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและมีค่าค่าแรงดันไฟฟ้าหลังจากเข้าสู่สภาวะแรงดันคงที่ในแต่ละเซลล์ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

4.3.1.6 ผลการคายประจุไฟฟ้าเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเซลล์

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่าแบตเตอรี่เซลล์ที่ 1,2,3 และ 4 มีอุณหภูมิก่อนเริ่มกระบวนการทดสอบอยู่ที่ 24.5 °C 24.7 °C 24.6 °Cและ 24.5 °C ตามลำดับ เมื่อดึงกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 3 แอมป์ ออกจากโมดูลแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์มีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละเซลล์มีค่าเท่ากับ 40.0 °C 32.1 °C 32.8 °C 33.7 °C ตามลำดับ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละเซลล์อยู่ที่ 32.689°C 29.402 °C 29.815 °C 30.029 °Cตามลำดับ และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่ 30.484 °C จากการทดสอบสังเกตุได้ว่าการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าในโมดูลของแบตเตอรี่ที่สมดุล อุณหภูมิในเซลล์ 1 ที่เสียหายมีค่าอุณหภูมิสูงสุดสูงกว่าเซลล์ที่ 2,3 และ 4 อีกทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบยังมีค่าสูงกว่าเซลล์ที่ 2,3 และ 4 ในขณะเซลล์ที่ 2,3 และ 4 มีค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของกระบวนการทดสอบใกล้เคียงกันตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงสิ้นสุดกระบวนการทดสอบ



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิต่อเวลาในการคายประจุโมดูลไม่สมดุลตำแหน่งที่ 1

5. สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลอง จะแบ่งเป็น 5 เงื่อนไขในการพิจารณาผลที่เกิดขึ้น ได้แก่ ตำแหน่งของเซลล์ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลในโมดูล, ระยะเวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุ , แรงดันไฟฟ้า, อุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ภายในโมดูล และพิจารณาจากการค่าประสิทธิภาพของการคายประจุไฟฟ้า (Coulombic Efficiency) โดยในเงื่อนไขแรกจะมีผลไปในแนวโน้มเดียวกัน หมายความว่า ตำแหน่งของเซลล์ที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลจะมีผลใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่ง

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

		เซลล์เดียว	สมดุล	ไม่สมดุลตำแหน่งที่1	ไม่สมดุลตำแหน่งที่2	ไม่สมดุลตำแหน่งที่3	ไม่สมดุลตำแหน่งที่4
เวลาที่ใช้ (นาที)	อัด	39:32	32:10	26:16	25:02	22:47	24:29
	คาย	39:29	31:57	25:19	22:40	21:57	26:07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของเงื่อนไขที่ 2 เวลาที่ใช้ในการอัดและคายประจุของโมดูลแบตเตอรี่แบบไม่สมดุลจะใช้เวลาต่ำกว่า แบตเตอรี่ทั้งแบบเซลล์เดียวและแบบสมดุล แสดงให้เห็นว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นทำให้ใช้งานได้สั้นลง

เงื่อนไขที่ 3 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ภายในโมดูลมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุดแรงดันจะลดลงต่ำสุดที่ 0.5 โวลต์ ซึ่งแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ไม่ควรมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 2 V/cell เนื่องจากทำให้เกิดความเสียหายภายในเซลล์ที่สามารถนำไปสู่การปลดปล่อยตัวเองสูง (Self-discharge) หรือไฟฟ้าลัดวงจรบางส่วน เมื่ออัดประจุใหม่เซลล์จะไม่เสถียร เมื่อนำเซลล์แบตเตอรี่ไปทำการทดสอบอัดและคายประจุอีกครั้งพบว่า แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เซลล์ตกลง มีค่าประมาณ 3.7 โวลต์ ซึ่งแรงดันแบตเตอรี่เซลล์ที่ปกติ (ก่อนทดลองแบบไม่สมดุล) จะประมาณ 3.9 โวลต์

เงื่อนไขที่ 4 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ภายในโมดูลสมดุล มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน แต่ในโมดูลแบบไม่สมดุล ในขณะทำการคายประจุ อุณหภูมิเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิสูงกว่าเซลล์อื่น ๆ ในขณะอัดประจุ อุณหภูมิเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเซลล์อื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากการคายประจุเกิน (Over-discharge) และอัดประจุเกิน (Over-charge) ตามลำดับ

ในเงื่อนไขสุดท้าย เราจะทำการคำนวณประสิทธิภาพในการคายประจุไฟฟ้า ที่กระแสคงที่ พบว่าโมดูลแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อเกิดการไม่สมดุล โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 97.5% ในขณะที่โมดูลแบตเตอรี่สมดุลมีค่าประสิทธิภาพ 99.7% ซึ่งค่าที่ได้เกิดจากการเฉลี่ยจากผลการทดลอง

ทั้ง 5 เงื่อนไขจะแสดงผลไปในแนวโน้มเดียวกัน คือ เมื่อเกิดการไม่สมดุลทางแรงดันไฟฟ้าจะส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่เป็นอย่างมาก วงจรบายพาส หรือ ระบบจัดการแบตเตอรี่ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมาก เพื่อความปลอดภัยและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ของแบตเตอรี่ และผู้ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

[1] จิดาภา ประกิจฤทธานนท์ ชนกนาถ พิทักษ์ธนางกูร และ ชัญญา รุจิวนารมย์, “วิธีการวินิจฉัยแบตเตอรี,”ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.

[2] Battery University (2016)."Series and Parallel Battery Configurations," Retrived August 15, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations

[3] Battery University (2016)." Charging at High and Low Temperatures," Retrived August 15, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures

[4] Battery University (2016)." Discharging at High and Low Temperatures," Retrived August 15, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_at_high_and_low_temperatures

[5] Battery University (2016)." What Is C-rate," Retrived August 16, 2018, from https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate

[6] Modern Manufacturing. (2017) “Energy Storage Technology เมื่อพลังงานที่ผลิตได้ ต้องกักเก็บสำรอง,” Retrived August 16, 2018, from https://www.mmthailand.com/energy-storage-technology

[7] Sihua Wen. (2009) “Cell balancing buys extra run time and battery life,” Retrived August 16, 2018, from https://e2echina.ti.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/13-112-00-00-00-00-58-11/Cell-balancing-buys-extra-run-time-and-battery-life.pdf

[8] McGraw-Hill, J. Dahn and G. Ehrlich. (2011). Lithium-Ion Batteries. (4th ed).

[9] Yevgen Barsukov, Texas Instruments (2009). Battery Cell Balancing: What to Balance and How

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL ENGINEERING PROJECT DAY 2019

Department of Electrical Engineering (Electrical Engineering)

PW 6141

The Study of Unbalance Battery Module

Kittiphong Nawa[1], Naruebet Phawaphutanon[2], Nilubon Pattanapiboonsak[3], Prachaya Songmusik[4] and Asst.Prof.Dr.Teeraphon Phophongviwat[5]

Abstract

This thesis presents the studying of unbalance module batteries without battery management system (BMS). By studying the factors that impact to the batteries after unbalancing in the module batteries by using battery test system. Reproduce working of module batteries by control temperature at 25 °C and humidity 30%. Li-ion batteries rated 3000 mAh, 3.6 volt is used in the experiment by testing charge and discharge battery per cell rated charging and discharging at 0.5C, 1C and 2C. In order to know the behavior of the batteries such as the period of time of charge and discharge battery per cell, temperature of battery during charging and discharging and changing the voltage of battery per cell. Then test charging and discharging in balance and unbalance module batteries in series and parallel Balance and unbalance module determine voltage level by unbalance module has lower voltage than the others 75% to cause an unbalance.

Introduction

At current, energy consumption is increasing Electricity production that fluctuates can be controlled by the battery. The popular battery is Li-ion battery because the Li-ion battery is a pollution problem. We charge and discharge the battery each time to see the charge by using the battery. The test of charge-discharge battery can be summarized. In the case of deteriorated the battery, the battery pack is not only factor. There are many things that can be said about the temperature, usability and charge range. Usability must be suitable for use. Charge range should be in the state of charge (SOC) range. According to factors depend on usage and maintenance. If not following the instructions, the usage may result in a service life cycle.

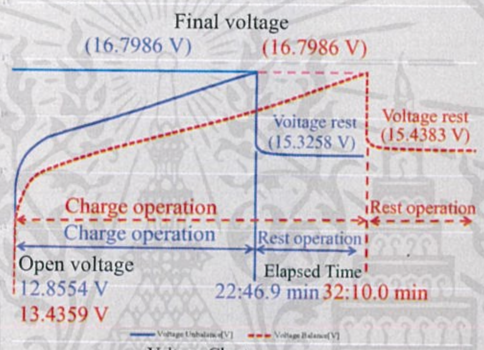
Methodology

1.The study of battery testing machine and temperature testing machine.
2.Test for collecting the information of each battery.
3.Test for collecting the information of balance battery pack at 0.5c and 1c.
4.Test for collecting the information of the unbalance battery pack. The variable is the position of unbalance battery.
5.Collect, compile and analyze the information from the testing balance and unbalance battery.

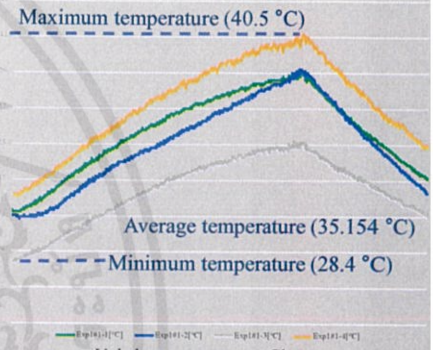
Results

Balance and Unbalance Battery Pack

➢ Charge

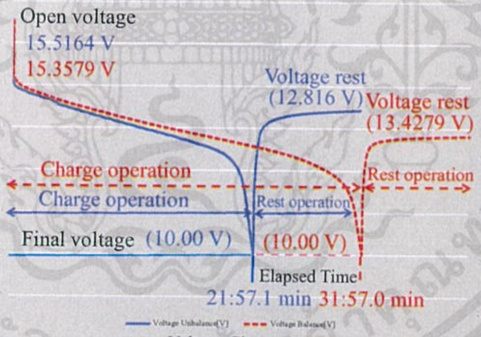


Voltage Chart

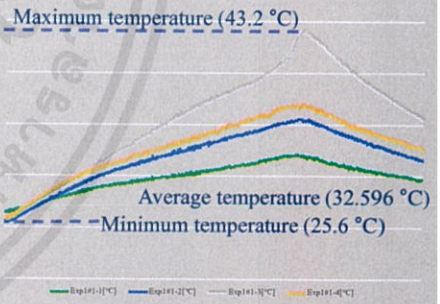


Unbalance temperature Chart

➢ Discharge



Voltage Chart



Unbalance temperature Chart

Conclusion

When testing the charge and the discharge in case of unbalance found that the charge and discharge times were less compared to balanced and single cells. And when the charge unbalance battery on battery cell with higher voltage will have a higher temperature than the cell with lower pressure. While discharge unbalance battery at cell with lower voltage will have higher temperatures than cells with higher pressure. This phenomenon is known as Overcharge and Over-discharge, which causes heat that leads to damage to the battery. Resulting in shorter service life, higher self-discharge, which, when frequently damaged, the battery capacity will decrease.

The results that mentioned above making it possible to conclude that voltage unbalance in battery causing high damage to battery life, therefore, there should be a bypass circuit or battery management system for battery safety and users.

References

[1] Yevgen Barsukov, Texas Instruments (2009). Battery Cell Balancing: What to Balance and How
[2] McGraw-Hill, J. Dahn and G. Ehrlich. (2011). Lithium-Ion Batteries. (4th ed).

ENGINEERS LADKRABANG

E-mail: teeraphon.ph@kmitl.ac.th

Battery Cell Balancing: What to Balance and How

Yevgen Barsukov, Texas Instruments

ABSTRACT

Different algorithms of cell balancing are often discussed when multiple serial cells are used in a battery pack for particular device. The means used to perform cell balancing typically include by-passing some of the cells during charge (and sometimes during discharge) by connecting external loads parallel to the cells through controlling corresponding FETs. The typical by-pass current ranges from a few milliamps to amperes.

A difference in cell voltages is a most typical manifestation of unbalance, which is attempted to be corrected either instantaneously or gradually through by-passing cells with higher voltage. However, the underlying reasons for voltage differences on the level of battery chemistry and discharge kinetics are not widely understood. Therefore goals and extent of bypassing charge can not be clearly defined and attempted balancing can often achieve more harm than good. In fact, many common cell balancing schemes based on voltage only result in a pack more unbalanced that without them. This presentation explains existing underlying causes of voltage unbalance, discusses trade-offs that are needed in designing balancing algorithms and gives examples of successful cell balancings.

I. INTRODUCTION

Different algorithms of cell balancing are often discussed when multiple serial cells are used in a battery pack for particular device. Means used to perform cell balancing typically include by-passing some of the cells during charge and sometimes during discharge, by connecting external loads parallel to the cells through controlling corresponding FETs. Typical by-pass currents range from a few milliamps to amperes.

Difference of cell voltages is a most typical manifestation of unbalance, which is attempted to be corrected either instantaneously or gradually through by-passing cells with higher voltage. However, the underlying reasons for voltage differences on the level of battery chemistry and discharge kinetics are not widely understood. Therefore goals and extent of bypassing charge can not be clearly defined and attempted balancing can often achieve more harm than good. In fact, many common cell balancing schemes based on voltage only result in a pack more unbalanced that without them.

II. TYPES OF BATTERY CELL UNBALANCE AFFECTING CHARGE/DISCHARGE VOLTAGE

A. *State of Charge (SOC) Unbalance*

State of charge unbalance is caused by cells being charged to different state of charge (SOC) levels. For example if we have 3 x 2200mAh cells (Q_{max}), and discharge one by 100mAh (Q1), second by 100mAh and third by 200mAh from a fully charged state, the first and second cells chemical state of charge will be $(Q_{max}-Q1)/Q_{max}$ = 95.4%, but third cell will be 91%. So we can say cell 3 is imbalanced by 4.4%. This in turn will result in a different open circuit voltage for cell 3 compared to cells 1 and 2, because the open circuit voltage (OCV) is in direct correlation with chemical state of charge. Note that while % SOC unbalance remains constant during entire discharge, voltage differences between the cells vary with state of charge because dV/dSOC varies with SOC. Fig 1 shows OCV differences between the cells at constant SOC unbalance but at different states of charge.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

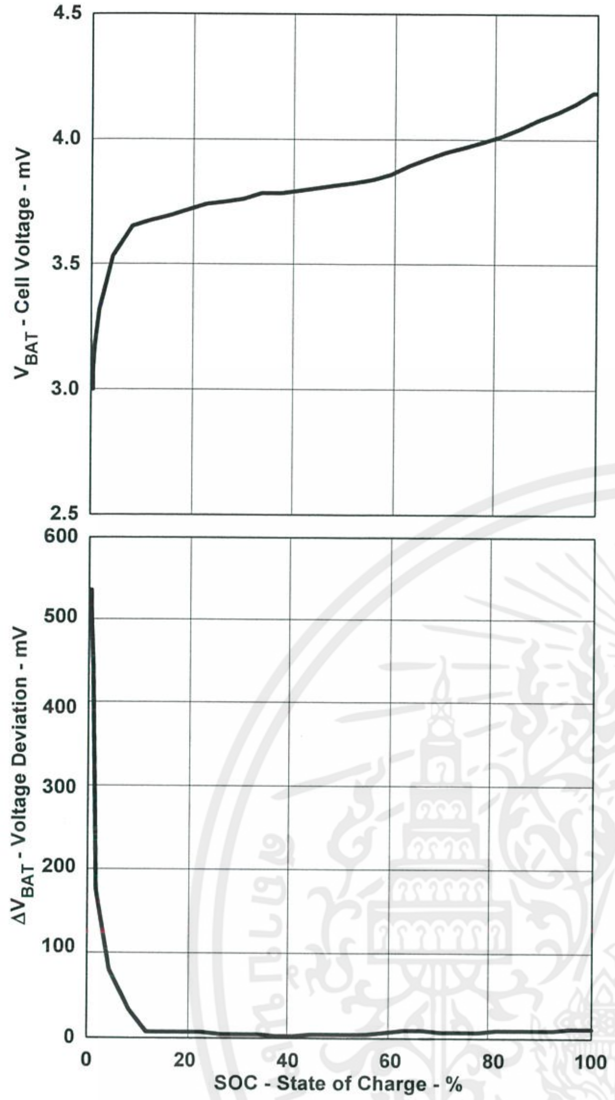


Fig. 1. (top) OCV dependence on SOC (bottom) OCV differences at different states of charge between two cells with SOC unbalance of 1%.

Voltage under load can be approximately modeled for DC case as:

V=OCV(SOC) + I • R(SOC)

(considering that discharge current is negative). Because function R(SOC) is rapidly increasing its value at low SOC values, the voltage differences between the cells with fixed SOC unbalance increases in highly discharge states, as shown in Fig. 2. This gives the impression that there is increased need of balancing near end of discharge. However, if SOC unbalance is removed during other stages of discharge, increased voltage differences that it causes near end of discharge is eliminated without need of high by-pass currents.

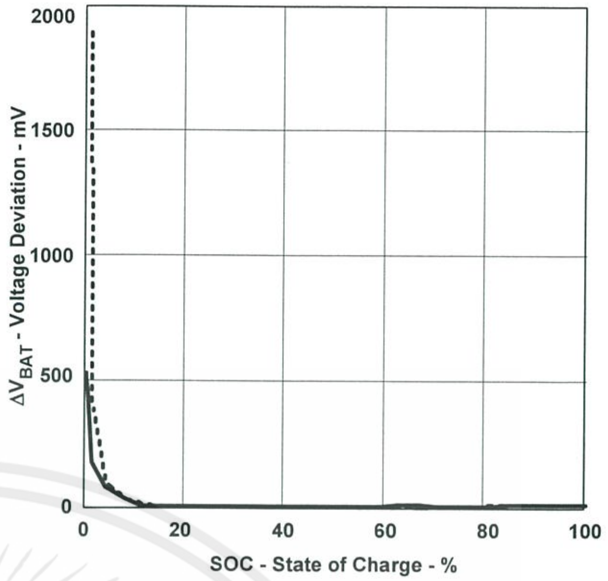


Fig. 2. Voltage differences under C/2 load at different states of charge between cells with 1% of SOC unbalance. Solid line shows differences for OCV case for comparison.

B. Total Capacity Differences

It can be that a cells total chemical capacity, Q_{MAX}, was different to start with. But even if all cells were discharged by an equal amount from a fully charged state, their chemical state of charge will be different. Indeed, if all 3 cells are discharged by 100 mAh, but cell 3 has different total capacity (eg: 2000 mAh instead of 2200 mAh), the resulting chemical states of charge will be 95.4 and 95%.

This in turn will also cause different OCVs. As can be seen, 200 mAh difference in Q_{MAX} causes only 0.4% difference in SOC. Because SOC correlates with voltage, this indicates that capacity imbalance causes less voltage difference than charge unbalance (cause 1).

C. Impedance differences

Internal impedance differences between the cells can be expected to be approximately 15% per production batch as can be seen in Fig. 3 (a).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

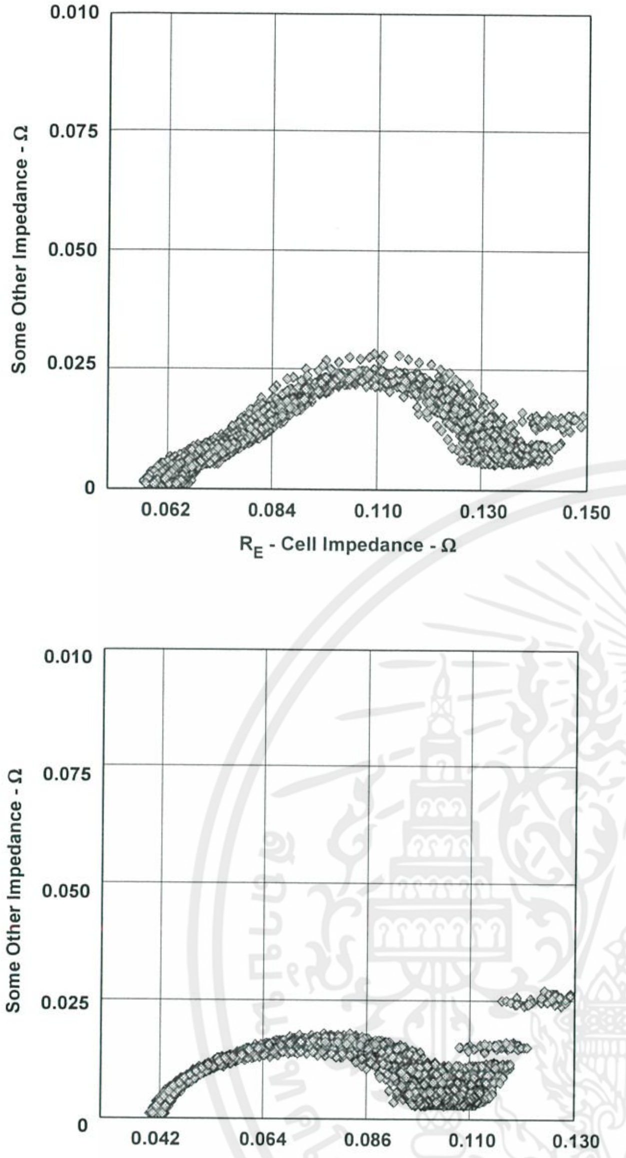


Fig.3 Impedance spectra differences between 50 cells in 1 batch for manufacturer (a) and manufacturer (b). Data is shown from 1kHz (left) to 10mHz (right)

Impedance unbalances do not cause differences in OCV. However they will cause differences in cell voltage during discharge. Indeed, cell voltage can be approximated as V = OCV + I • R. If current is negative (discharge), the voltage will be lower for a cell with higher R. If current is positive (charge), the voltage is higher for a cell with higher R.

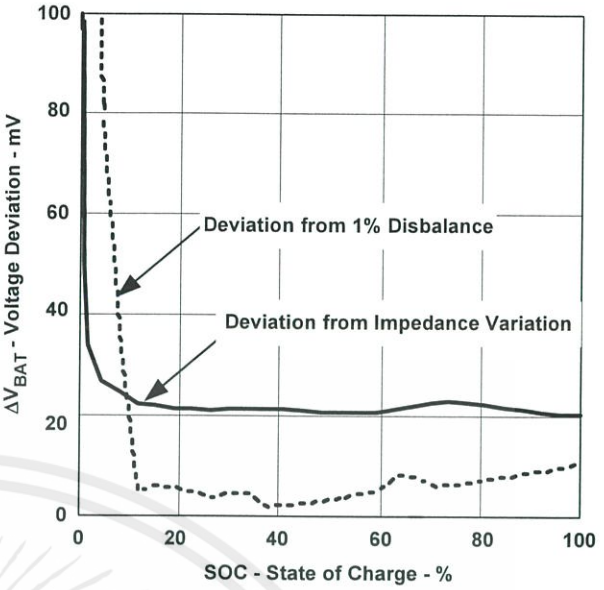


Fig. 4. Voltage differences between 2 cells with 15% impedance unbalance at C/2 discharge rates, solid line. Doted line shows difference between the cells with 1% SOC unbalance for comparison.

No balancing algorithm can help against the resistance imbalance. However, it can significantly distort attempts to balance what we can – namely the SOC. Note in Fig. 4 that for absolute majority of discharge(from 10 to 100% SOC) the distortion caused by impedance deviation is larger than that caused by SOC unbalance. If we try too look at the voltage under load and use it to decide that we need to pass more charge through a cell that has higher voltage, we will not know if this difference in voltage is really caused by differences in SOC or by impedance (note that difference can be in opposite direction of that caused be actual SOC unbalance if any). If it is caused by impedance unbalance, bypassing more current through this cell will result in the opposite effect – increase the SOC difference from other cells to larger value than it would be without balancing. As result, the open circuit voltage of this cell at the end of charge will be different from the other cells and can reach high levels, potentially causing the safety circuit to trip.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If a by-pass FET is turned ON based on voltage during charge, it can cause an actual increase of unbalance through bypassing the cell with higher impedance. At the end of charge the IR rise becomes insignificant because of current decrease, so that FET switches ON at the other cell. However, it happens too late so at the end of charge this procedure results in higher SOC and higher voltage for low impedance cells. Eventually it leads to increased cell degradation.

Problems can be reduced if cell balancing switches ON only near the end of charge when current is reduced and so I*R drop has smaller effect on battery voltages.

Unbalance is even higher when by-pass is ON during both charge and discharge because discharge does not have low-rate phase and wrong by-pass is never reversed resulting in higher accumulated unbalance per cycle.

III. How Unbalance Harms Performance

A. Premature Cells Degradation Through Exposure to Overvoltage

In both cases of SOC or total capacity unbalance, the cell with higher resulting SOC is exposed to higher voltages. For example, what happens if one cell has less capacity than the other three serially connected in the pack, if they all start in the same state of charge? CC/CV (constant current/constant voltage) charging will bring the pack to 4.2 x 4 = 16.8 V (typical). However, individual cell voltages will not be equal. As you can see in Fig. 5 below, the "low capacity" cell will have a much higher voltage than the remaining cells, while the normal capacity cells will have a lower voltage than achieved in normal charging.

As shown in Fig. 5, when the lower cell has a total capacity deficiency above 10%, its cell voltage begins to rise into dangerous area above 4.3 V which will result in additional degradation of this cell or even become a safety concern.

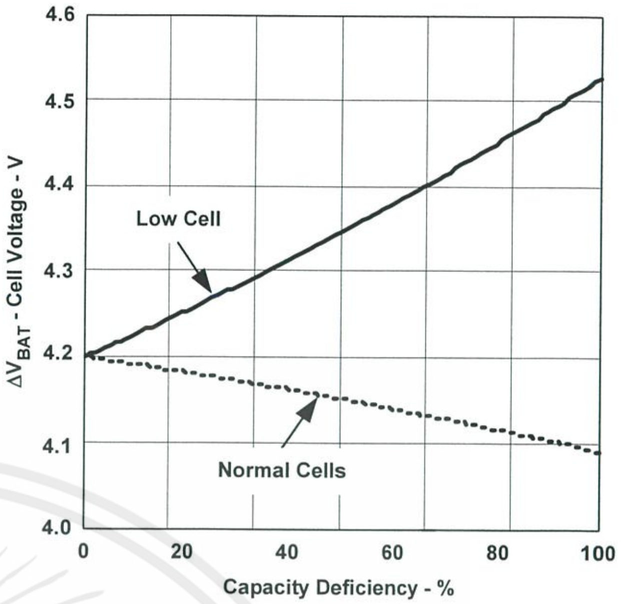


Fig. 5. Individual cell voltage vs. capacity deficiency from nominal.

To make the matters worse, the affects of cell degradation caused by imbalance is auto-accelerating, once a cell has a lower capacity, it is exposed to increasingly higher voltage during charge which makes it degrade faster so its capacity becomes even less, which closes the runaway circle.

Note that not all battery chemistries are equally affected by cell-unbalance. While Li-ion chemistry is specially vulnerable because of its ability to store almost 100% of all energy delivered, Lead-acid, NiMH and NiCd-s are relatively tolerant to overcharge because they can respond to increased voltage by internal shuttle reactions that are equivalent to a chemical short-circuit inside the cell. For example in NiMH battery oxygen and hydrogen generated after the end of charge recombine inside the cell building water. This causes extensive heating because all the energy of the charger is converted to heat rather than stored. Still, overcharge at high rates does cause increased pressure inside the cell and creates a chance for explosion or venting. Needs for cell balancing has to be evaluated in conjunction with rate capability, cooling and other properties of charging system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B. Safety Hazards from Overcharged Cells

Li-ion batteries have very high electric energy concentrated in small volume. While possibility of their release through short-circuit can be prevented by appropriate mechanical protections, the co-existence of highly reactive chemicals in close proximity makes this battery inherently dangerous. Overcharging and overheating of the battery causes reaction of active components with electrolyte and with each other ultimately causing to explosion and fire. Thermal run-away can be caused merely by overcharging a single cell to voltages above 4.35V. Other cells of the pack will also join the explosive chain reaction if one cell is compromised. That is why cell balancing should prevent any cells from reaching the dangerous voltage territory, and safety protection circuit should terminate the charge if this still happens.

C. Early Charge Termination Resulting in Reduced Capacity

Safety issues will be prevented by additional safe-guards present in the bq20xxx devices such as cell overvoltage control. The bq20xxx series gas-gauging IC will terminate charging if one of cell voltages exceeds the programmable Cell Over Voltage Threshold (default 4.35V). However, termination of charging at this parameter means the pack will be severely undercharged. Therefore, despite prevention of a safety hazard useful life of the pack is severely reduced. This consideration makes cell balancing one of the most critical issues related to the cycle life of a battery pack. Successful balancing can significantly increase useful cycle life.

D. Early Discharge Termination

To prevent over discharge of cells and resulting damage, battery managements system will terminate discharge if any of the cells reached low voltage threshold. Cell based termination voltage is usually set to lower value than pack based threshold divided by number of serial cells, so that the difference can allow for a small unbalance. For Li-ion battery it varies from 2.7 to 2.2V depending on typical discharge rate.

Bypassing the low cell during end of discharge phase can increase battery useful discharge time, but to be effective it requires high-rate capable by-pass capability which is expensive to implement. Approach with more effective hardware utilization is to gradually remove any existing SOC unbalance during the entire charge/discharge and not only when it results in acute voltage differences (at the end of discharge).

IV. HARDWARE IMPLEMENTATION OF BALANCING

A. Current Bypass

Simple implementation of cell-balancing includes a FET placed in parallel with each cell and controlled by a comparator for simple voltage based algorithms that turn-on the bypass FETs during the onset of voltage differences, or by microcontroller for more complex and effective algorithms that can work continuously regardless of variations of voltage differences. General setup is shown in Fig. 6.

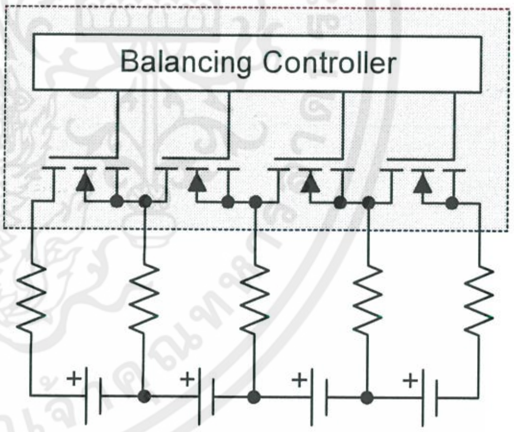


Fig. 6. Cell balancing set-up using by-pass FETs.

Main choice here is to use FETs that are integrated in the balancing controller IC and typically have by-pass currents from 9 to 2mA (depending on the choice of the external resistors), or to use external FETs with by-pass capability that can be freely tailored to particular application needs.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In Li-ion batteries which have very low self-discharge and therefore accumulative unbalance per cycle is usually less than 0.1%, bypass current of internal FETs is sufficient to keep the pack continuously balanced. In other chemistries where self-discharge is much higher and therefore differences in self-discharge rates between the cells results in higher SOC differences per cycle, higher rates might be needed.

B. Charge Redistribution

The disadvantage of current by-pass approach is that the energy of the by-passed charge is wasted. While this can be acceptable during charge while system is connected to power grid, during actual usage of the battery in portable applications every milliWatthour is precious. This asks for a possibility to have a cell-balancing approach that would allow to drain the "high" cells to the bottom using most efficient way.

The ultimate approach for this is to use a pack that has no serially connected cells at all. The step-up converter would then assure that device will obtain sufficient voltage. This way energy waste from cell-balancing is completely eliminated. The trade-off however is lower efficiency of the power supply, as well as its increased size and complexity.

Other solutions can include circuits that allow to transfer energy from high cells to low cells rather than burning it in a by-pass resistor.

Charge Shuttles

Simple approach to redistribute the energy between the cells is to connect a capacitor first to higher voltage cell, than to lower voltage cell, as shown in Fig. 7 (a).

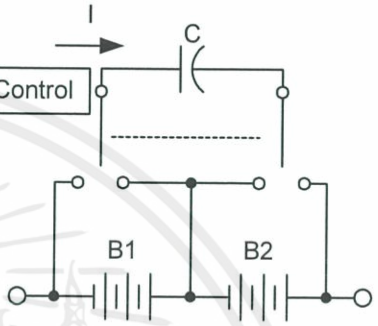


Fig. 7a. (a) simple capacitor-based shuttle cell balancing circuit.

More complicated implementations allow the connection of not only two nearby cells, but also cells for far away in the stack for faster equilibration (Fig. 7 (b)).

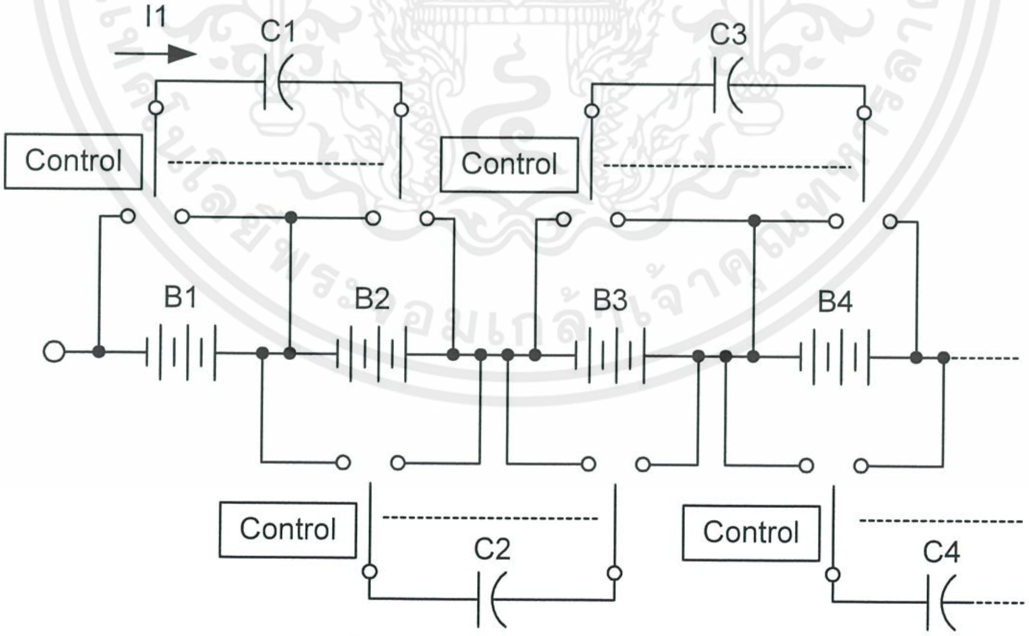


Fig. 7 (b) shuttle circuit with remote cells connection capability. Reprinted from S. W. Moore and P. J. Schneider, Delfi application note 2001-01-0959

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The main problem with this method is that significant energy losses occur during capacitors charging, as maximal efficiency of this process is 50%. Another problem is that high voltage differences between the unbalanced cells exist only in highly discharged state. Because this method transfer rate is proportional to voltage differences, it only becomes efficient near the end of discharge so total amount of unbalance that can be removed during one cycle is low.

Inductive Converters

A cell-balancing method that is free from the disadvantage of small voltage differences between cells decreasing the balancing rate is implemented by transferring pack energy into single cell by directing pack current through a transformer which is switched to one of the cells that needs additional charge.

However, efficiency of such converter is limited, and the need to use a transformer results in increased price and size of the overall solution. So far no commercial implementations of such system in portable devices have been successful. Probably area where it could be more practical are high-power systems such as EV and hybrid vehicles.

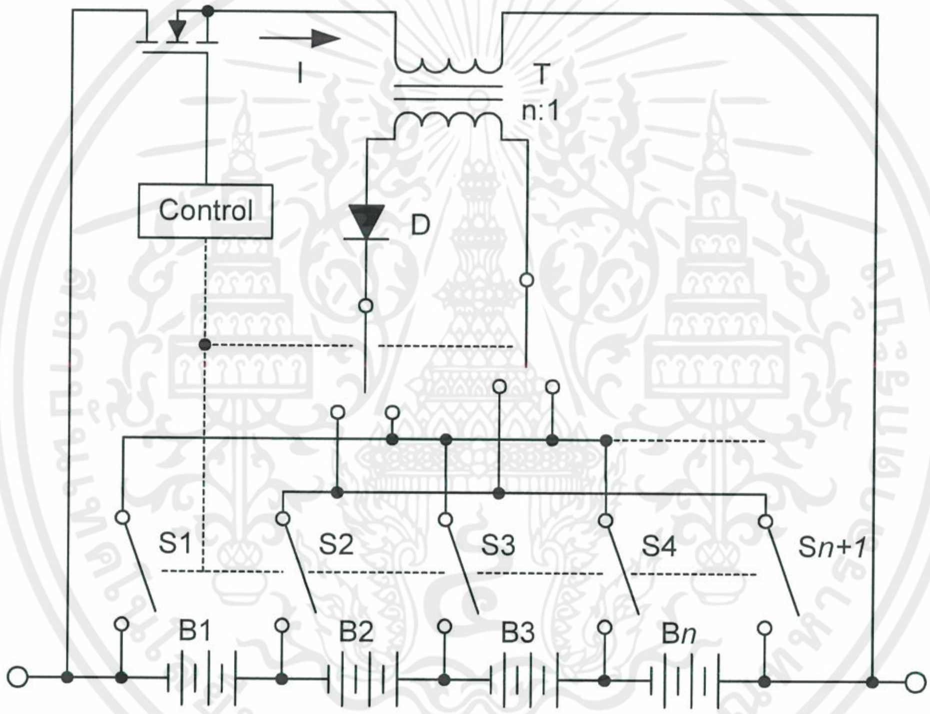


Fig. 8 Inductive converter cell balancing circuit. Reprinted from S. W. Moore and P. J. Schneider, Delfi application note 2001-01-0959.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V. Balancing algorithms

Regardless of particular hardware implementation, there is always a decision to be made, when to turn ON bypass switch or when to engage the energy exchange circuit to particular cell. Different algorithms of making this decision are reviewed below. For simplicity we will refer to the case of current bypass because transfer of the logic to other balancing schemes is trivial.

C. Cell voltage based

Simplest algorithm is based on voltage difference between the cells. If difference exceeds predefined threshold, bypass is engaged. To resolve several problems of this simple method, more complicated modifications can be implemented if microcontroller is used to execute the algorithm:

- **Balancing during charge only** is used to save energy in portable applications.
- **Balancing at high states of charge only** is used to decrease the effect on SOC balancing that can come from impedance unbalance.
- **Simultaneous multi-cell balancing** makes decision on which cells have to by bypassed under considerations of the entire pack and not only neighboring cells as it is the case with comparator-based solutions

One of the advanced implementation of voltage-based algorithms using all above optimizations is used in bq2084 battery fuel-gauge. Fig. 9 is showing voltage convergence of multiple cells during balancing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกิตติพงศ์ นาวา

วัน เดือน ปี เกิด 14 มีนาคม 2540

ที่อยู่ 236 ม.6 ต.ป่างิ้ว อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย 64130

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายโรงเรียนอุตรดิตถ์

ปีการศึกษา 2562 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน Rayong Gas Separation Plant PTT Public Company Limited

แผนกบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า

ชื่อ-นามสกุล นฤเบศร์ ภวภูตานนท์

วัน เดือน ปี เกิด 21 กันยายน 2539

ที่อยู่ 143 ม.13 ต.เกิ้ง อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายโรงเรียนเกิ้งวิทยานุกูล

ปีการศึกษา 2562 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน Asia Magnetic Winding Co., Ltd

แผนกวิศวกรออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดักแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ-นามสกุล นางสาวนิลุบล พัฒนพิบูลศักดิ์

วัน เดือน ปี เกิด 3 ธันวาคม 2539

ที่อยู่ 25 ซอยร่วมใจ ต. นาสาร อ. บ้านนาสาร จ. สุราษฎร์ธานี 84120

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายโรงเรียนสุราษฎร์ธานี

ปีการศึกษา 2562 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน การไฟฟ้าฝ่ายผลิต สถานีจ่ายไฟแรงสูงสำนักงานบ้านดอน

แผนกบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า

ชื่อ-นามสกุล นายปรัชญา ทรงมุสิก

วัน เดือน ปี เกิด 08 ธันวาคม 2539

ที่อยู่ 16 ซอย อารีย์สัมพันธ์ 9 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท ถนนพระราม6 กทม 10400

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2558 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมตอนปลายโรงเรียนสารวิทยา

ปีการศึกษา 2562 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานภาคฤดูร้อน Rayong Gas Separation Plant PTT Public Company Limited

แผนกบำรุงรักษาระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้