

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุของแบตเตอรี่
และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ANALYZING AND COMPARING THE PERFORMANCE OF BATTERY CAPACITY
AND SWELLING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERIES



โดย

นาย กมลพัชร อินทร์เกลี้ยง

นาย กร รัศมีปัญญาทิพย์

นางสาว กุลธิดา กลมเกลี้ยง

นาย คุณากร กะการดี

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

ตรวจสอบแล้ว

โดยไม่รวมการตรวจ
plagiarism

Wimut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในบริบทอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

31/05/2023

ANALYZING AND COMPARING THE PERFORMANCE OF BATTERY CAPACITY
AND SWELLING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERIES



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

2022

ปีการศึกษา 2565

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุของแบตเตอรี่และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ANALYZING AND COMPARING THE PERFORMANCE OF BATTERY CAPACITY

AND SWELLING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERIES



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. วิวัฒน์ เกษรวงศ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุของแบตเตอรี่และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นาย กมลพัชร อินทร์เกลี้ยง
2. นาย กร รัศมีปัญญาทิพย์
3. นางสาว กุลธิดา กลมเกลี้ยง
4. นาย คุณากร กะการดี

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ เกียรติวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุของแบตเตอรี่และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า

นาย กมลพัชร อินทร์เกลี้ยง

นาย กร รัศมีปัญญาทิพย์

นางสาว กุลธิดา กลมเกลี้ยง

นาย คุณากร กะการดี

ผศ.ดร. วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการบวมและความจุของแบตเตอรี่ EV ขนาด 18650 และ 21700 ชนิด INR (Nickel Manganese Cobalt oxide) และ NCR (Nickel Cobalt Aluminum oxide) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ EV โดยความจุแบตเตอรี่หมายถึงปริมาณพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถเก็บได้ในขณะเดียวกัน ในขณะที่การบวมหมายถึงการเพิ่มขนาดของแบตเตอรี่เนื่องจากการสะสมของก๊าซภายในเซลล์ ขณะที่กำลังชาร์จและดิสชาร์จ การวิจัยจะเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความจุแบตเตอรี่และประสิทธิภาพการบวมของแบตเตอรี่ EV ประเภทต่างๆ ในช่วงเวลาต่างๆ และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์หรือแบบแผนระหว่างปัจจัยทั้งสอง การวิจัยยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ EV ประเภทต่างๆ เพื่อหาว่าแบตเตอรี่ชนิดใดมีประสิทธิภาพของความจุแบตเตอรี่และการบวมที่ดีที่สุด ผลการวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าและนักวิจัยในการพัฒนาแบตเตอรี่ EV ที่มีประสิทธิภาพและทนทานมากขึ้น โดยการเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความจุแบตเตอรี่และการบวม จะช่วยให้เข้าใจว่าวัสดุและการออกแบบใดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบตเตอรี่ EV เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและอายุการใช้งานได้ สุดท้ายนี้การใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าจะเป็นวิธีการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืนมากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษอื่นๆ ในอากาศ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบัน ดังนั้นการพัฒนาแบตเตอรี่ EV เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทาน จะช่วยส่งเสริมการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าให้มีการเพิ่มขึ้นอย่างยั่งยืน และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษในอากาศในระยะยาว

Analyzing and comparing the performance of battery capacity and swelling in electric vehicle batteries

Mr. Kamonpach Inkleang

Mr. Korn Ratsamipenyathip

Miss Kulthida Klomkliang

Mr. Kunakorn Kakandee

Asst.Prof.Dr. Wiwat Keyoowong Advisor

ABSTRACT

This research aims to analyze and compare the performance and capacity of 18650 and 21700 INR (Nickel Manganese Cobalt oxide) and NCR (Nickel Cobalt Aluminum oxide) EV batteries, which are important factors that determine the efficiency and lifespan of EV batteries. Battery capacity refers to the amount of energy that a battery can store at once, while battery swelling refers to the increase in battery size due to gas buildup inside the cells during charging and discharging. The research will collect data on the capacity and charging performance of various types of EV batteries at different points in time and analyze the data to find correlations or patterns between these two factors. The research will also compare the performance of different types of EV batteries to determine which battery type has the best capacity and charging efficiency. The results of this research will be beneficial for electric vehicle manufacturers and researchers in developing more efficient and durable EV batteries. By understanding the relationship between battery capacity and swelling, it will be possible to determine which materials and designs are most suitable for EV batteries to improve their performance and lifespan. Ultimately, the use of electric vehicles will become a more efficient and sustainable transportation option, which will help reduce greenhouse gas and other pollutant emissions in the air, a major problem today.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพความจุของแบตเตอรี่ และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการอนุเคราะห์และสนับสนุนจาก ผศ.ดร. วิวัฒน์ เกียรติวงศ์ อาจารย์คณะภาควิศวกรรมไฟฟ้า ได้ให้ความกรุณาเป็นที่อาจารย์ปรึกษา ให้ความรู้แนวความคิดทิศทางที่ถูกต้อง แก้ไขปรับปรุงจุดบกพร่องต่างๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์เรื่องนี้สำเร็จเรียบร้อยด้วยดีและเป็นไปตามจุดประสงค์ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมภพ ผลไม้ ที่ท่านช่วยเรื่องการจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือในการทดลองและให้คำปรึกษา ในการเลือกใช้อุปกรณ์ รวมทั้งได้มีการสอนตัวต่อตัวกับการใช้อุปกรณ์ จนทำให้ผลการทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและตึก ECC ในเรื่องของการจัดสรรงบประมาณ และสถานที่ในการทำงานวิจัยปริญญานิพนธ์

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณเพื่อนๆทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์เล่มนี้ไม่ว่าจะมากหรือน้อยเพียงใดคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณทุกท่านที่คอยสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือ จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | ก |
| ABSTRACT | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญรูป | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิจัย | 2 |
| 1.3 วิธีดำเนินการวิจัย | 2 |
| 1.4 แผนการดำเนินการ | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากงานวิจัย | 6 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1 ชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน | 7 |
| 2.2 ความร้อนภายในแบตเตอรี่ | 9 |
| 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 12 |
| 2.3.1 Thermal evaluation of lithium-ion batteries: Defining the cylindrical cell cooling coefficient. | 12 |
| 2.3.2 Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries | 13 |

2.3.3 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of 15
electrochemical, thermal, and geometrical properties

| | |
|--|-----------|
| บทที่ 3 ออกแบบการทดลองและอุปกรณ์สำหรับทดลอง | 17 |
| 3.1 ขั้นตอนการทดลอง | 17 |
| 3.2 วิธีการทดลอง | 33 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง | 38 |
| 4.1 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ | 38 |
| 4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล | 73 |
| บทที่ 5 สรุปผล ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา | 78 |
| 5.1 สรุปผล | 78 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 79 |
| 5.3 แนวทางการพัฒนา | 79 |
| เอกสารอ้างอิง | 80 |
| ภาคผนวก | 83 |
| ประวัติผู้เขียน | 88 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงข้อเปรียบเทียบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดต่างๆที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า | 9 |
| 3.1 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 18650 | 16 |
| 3.2 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 21700 | 16 |
| 3.3 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 18650 | 17 |
| 3.4 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 21700 | 17 |
| 3.5 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 18650 | 17 |
| 3.6 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 21700 | 18 |
| 3.7 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 18650 | 18 |
| 3.8 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 21700 | 19 |
| 3.9 แหล่งจ่ายกระแสตรงและโหลดไฟฟ้ากระแสตรง | 19 |
| 3.10 โปรแกรม Matlab คำสั่ง runC | 21 |
| 3.11 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileC | 22 |
| 3.12 โปรแกรม Matlab คำสั่ง recorder | 23 |
| 3.13 โปรแกรม Matlab คำสั่ง runD | 24 |
| 3.14 โปรแกรม Matlab คำสั่ง recorderD | 25 |
| 3.15 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 1 | 26 |
| 3.16 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 2 | 27 |
| 3.17 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 3 | 28 |
| 3.18 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 4 | 29 |

| | |
|--|----|
| 3.19 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 5 | 30 |
| 3.20 Thermometer ที่ใช้ในการทดลอง | 31 |
| 3.21 เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดของแบตเตอรี่ขณะทำการทดลอง | 31 |
| 3.22 การติดตั้ง Thermocouple เข้ากับแบตเตอรี่รูปทรงกระบอก | 32 |
| 3.23 การต่ออุปกรณ์ทั้งหมดในการทดลอง | 32 |
| 3.24 การวัดแบตเตอรี่โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิทัลขณะทำการทดลอง | 33 |
| 3.25 Flowchart แสดงวิธีการทดลอง | 35 |
| 3.26 Flowchart แสดงวิธีการวัดขนาดของแบตเตอรี่ | 37 |
| 4.1 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (NCR18650) | 38 |
| 4.2 กราฟ Charge Temperature (NCR18650) | 39 |
| 4.3 กราฟ Capacity Charge (NCR18650) | 40 |
| 4.4 กราฟ Capacity Discharge (NCR18650) | 41 |
| 4.5 กราฟ SOH Charge, Discharge (NCR18650) | 42 |
| 4.6 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650) | 43 |
| 4.7 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650) | 43 |
| 4.8 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650) | 44 |
| 4.9 รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ NCR18650 | 45 |
| 4.10 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (NCR21700) | 46 |
| 4.11 กราฟ Charge Temperature (NCR21700) | 47 |
| 4.12 กราฟ Capacity Charge (NCR21700) | 48 |
| 4.13 กราฟ Capacity Discharge (NCR21700) | 49 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.14 | กราฟ SOH Charge, Discharge (NCR21700) | 50 |
| 4.15 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700) | 51 |
| 4.16 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700) | 52 |
| 4.17 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700) | 53 |
| 4.18 | รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ NCR21700 | 54 |
| 4.19 | กราฟ Charge and Discharge Characteristics (INR18650) | 55 |
| 4.20 | กราฟ Charge Temperature (INR18650) | 56 |
| 4.21 | กราฟ Capacity Charge (INR18650) | 57 |
| 4.22 | กราฟ Capacity Discharge (INR18650) | 58 |
| 4.23 | กราฟ SOH Charge, Discharge (INR18650) | 59 |
| 4.24 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR18650) | 60 |
| 4.25 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR18650) | 61 |
| 4.26 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR18650) | 62 |
| 4.27 | รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ INR18650 | 63 |
| 4.28 | กราฟ Charge and Discharge Characteristics (INR21700) | 64 |
| 4.29 | กราฟ Charge Temperature (INR21700) | 66 |
| 4.30 | กราฟ Capacity Charge (INR21700) | 66 |
| 4.31 | กราฟ Capacity Discharge (INR21700) | 67 |
| 4.32 | กราฟ SOH Charge, Discharge (INR21700) | 68 |
| 4.33 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR21700) | 69 |
| 4.34 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR21700) | 70 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.35 | กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ชนิดชาร์จ(INR21700) | 71 |
| 4.36 | รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ INR21700 | 72 |
| 4.37 | กราฟ Comparing SOH between NCR18650 and NCR21700 | 73 |
| 4.38 | กราฟ Comparing SOH between NCR18650 and INR18650 | 74 |
| 4.39 | กราฟ Comparing SOH between INR18650 and INR21700 | 75 |
| 4.40 | กราฟ Comparing SOH between INR21700 and NCR21700 | 76 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย | 3 |
| 1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย (ต่อ) | 5 |
| 3.1 เงื่อนไขการทดลอง | 33 |
| 4.1 สรุปรูปการพองตัวของแบตเตอรี่แต่ละชนิด | 77 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าเติบโตอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน [1] โดยมีการขายรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจากปี 2020 ถึง 6.6 ล้านหน่วยในปี 2021 ตามรายงานของสำนักงานพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ประเทศจีนมีส่วนร่วมในการขายรถยนต์ไฟฟ้าทั่วโลกอย่างมากที่สุด ด้วยร้อยละ 53 ตามด้วยยุโรป (33%) และสหรัฐอเมริกา (11%) ในปี 2021 การขายรถยนต์ไฟฟ้าเป็นส่วนแบ่ง 8.6% ของการขายรถยนต์ทั่วโลก ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.9% ในปี 2016

[2] หนึ่งในส่วนสำคัญของรถยนต์ไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ ส่วนใหญ่รถยนต์ไฟฟ้าใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน บริษัทที่มีตัวแทนจำหน่ายรถยนต์ไฟฟ้ามากที่สุดคือ Tesla ซึ่งใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ผลิตโดยบริษัทต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแบตเตอรี่สำหรับ Tesla โดย Panasonic เป็นผู้ผลิตแบตเตอรี่หลักของ Tesla โดยผลิตแบตเตอรี่รูปทรงกระบอก 18650 และ 21700 ของชนิด NCR ในขณะที่ LG Energy Solution ผลิตแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกขนาด 21700 ของชนิด NCR และ CATL ผลิตแบตเตอรี่ชนิดพรีสมาทิก LFP นอกจากนี้ Tesla ได้เริ่มผลิตแบตเตอรี่ขนาด 46800 แต่ยังไม่ได้เปิดเผยสารเคมีของแบตเตอรี่

ความนิยมของรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้สุขภาพของแบตเตอรี่เป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา [3] เนื่องจากการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าอาจมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการเปลี่ยนแบตเตอรี่ในรถยนต์ทั่วไปเนื่องจากต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีความสามารถในการเก็บพลังงานสูงเพื่อให้รถยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ไกลและมีแรงจูงใจพอสมควร นอกจากนี้ การผลิตและการกำจัดแบตเตอรี่เก่าที่มีสิ่งปนเปื้อนอาจมีผลต่อสิ่งแวดล้อม แต่หากใช้แบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้องและมีการดูแลรักษาอย่างเหมาะสม แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ยาวนานและสูงสุดประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าจะได้รับประโยชน์มากขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 18650 และ 21700 ด้วยวิธีการชาร์จและดิสชาร์จให้ได้จำนวน cycle ของแบตเตอรี่ในแต่ละชนิด
2. ศึกษาการบวมของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 18650 และ 21700 ด้วยวิธีการชาร์จและดิสชาร์จให้ได้จำนวน cycle ของแบตเตอรี่ในแต่ละชนิด
3. บันทึกค่ากระแส แรงดัน ความจุของแบตเตอรี่ วัดขนาดของแบตเตอรี่ ที่ได้จากการชาร์จและดิสชาร์จแล้วนำค่าที่บันทึกได้มาเปรียบเทียบเพื่อจะหาแนวโน้มและเปรียบเทียบระหว่างแบตเตอรี่ชนิดและขนาดต่างๆ

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีใช้งานโปรแกรม MATLAB
3. ออกแบบวงจรการอัดและคลายประจุโดยโปรแกรม MATLAB
4. รวบรวมเล่มและจัดทำการนำเสนอผลการศึกษาในภาคเรียนที่ 1
5. การสั่งซื้อแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR และ NCR โดยมี ขนาด 18650 และ 21700
6. ศึกษาวิธีใช้เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต่อการทดลอง
7. ทดสอบแบตเตอรี่โดยการชาร์จและดิสชาร์จเพื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ
8. จัดทำรายงานและนำเสนอ

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

คณะผู้จัดงานวิจัยได้เริ่มทำงานวิจัยโดยมีระยะการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2565



| การดำเนินงาน | ระยะเวลา | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|---|---|---|---------|---|---|---|--------|---|---|---|-----------|---|---|---|
| | สิงหาคม | | | | กันยายน | | | | ตุลาคม | | | | พฤศจิกายน | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1.ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง | | | | → | | | | | | | | | | | | |
| 2.ศึกษามาตรฐาน การทดสอบ แบตเตอรี่ | | | | → | | | | | | | | | | | | |
| 3.ออกแบบวงจร การอัดและคาย ประจุโดยใช้ โปรแกรม MATLAB | | | | | | | | → | | | | | | | | |
| 4.สั่งซื้อแบตเตอรี่ ขนาด 18650 ชนิด NCR | | | | | | | | | | | | → | | | | |
| 5.ศึกษาวิธีใช้ เครื่องมืออุปกรณ์ ต่างๆที่จำเป็นต่อ การทดลอง | | | | | | | | | | | | | | | | → |
| 6. รวบรวมรูปเล่ม นำและจัดทำกร นำเสนอ ผลการศึกษาภาค เรียนที่ 1 | | | | | | | | | | | | | | | | → |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย (ต่อ)

คณะผู้จัดงานวิจัยได้เริ่มทำงานวิจัยโดยมีระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนพฤษภาคมพ.ศ. 2566

| การดำเนินงาน | ระยะเวลา | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|---|---|---|--------|---|---|---|------------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|---------|---|---|---|--|--|--|---|
| | ธันวาคม | | | | มกราคม | | | | กุมภาพันธ์ | | | | มีนาคม | | | | เมษายน | | | | พฤษภาคม | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| 1.ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง เพิ่มเติม | | | | → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.สั่งซื้อ แบตเตอรี่ ขนาด 18650 ชนิด INR NCR | | | | → | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.ทดสอบ แบตเตอรี่โดย การชาร์จและ ดิสชาร์จเพื่อ นำค่าที่ได้มา ตรวจสอบและ เปรียบเทียบ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.สั่งซื้อ แบตเตอรี่ ขนาด 21700 ชนิด INR NCR | | | | | | | | | | | → | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.รวบรวม รูปเล่มนำและ จัดทำกร นำเสนอ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | → |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ประหยัดค่าใช้จ่าย: การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความจุแบตเตอรี่และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าได้ เนื่องจากประสิทธิภาพของแบตเตอรี่มีผลกระทบต่อระยะทางที่สามารถเดินทางได้ และส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการซื้อและบำรุงรักษารถยนต์ไฟฟ้า

2. การเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี: การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความจุแบตเตอรี่และการบวมของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เป็นการวิเคราะห์เทคโนโลยีที่กำลังเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การศึกษาแนวโน้มในการพัฒนาและการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีนี้ จะช่วยให้ผู้วิจัยและผู้ที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนการลงทุนและการพัฒนาเทคโนโลยีในอนาคตได้ดีขึ้น

3. การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก: การใช้รถยนต์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและการบริหารจัดการแบตเตอรี่อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เนื่องจากการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าน้อยกว่ารถยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทั่วไป ซึ่งส่งผลให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [5]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในปัจจุบันมีการใช้อยู่ 7 ประเภทหลัก โดยทั่วไปการแบ่งประเภทจะแบ่งตามวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วบวกของแบตเตอรี่ ส่วนขั้วลบนั้นทำจากแกรไฟต์เป็นหลัก แต่จะมีลิเทียมไททาเนต (lithium titanate: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) ที่แตกต่างจากประเภทอื่นเนื่องจาก มีขั้วลบเป็นลิเทียมไททาเนต แบตเตอรี่แต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน

1. ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (lithium cobalt oxide: LiCoO_2)

ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Sony ในปีคริสตศักราช 1991 โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนบุคคล เช่น แล็ปท็อป มือถือ กล้อง เป็นต้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานสูง และมี life cycle ยาวนานและมีความง่ายและสะดวกในการผลิต แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์นั้นมีความเสถียรทางความร้อนที่ไม่ดีและต้องมีการตรวจสอบระหว่างการดำเนินงานเพื่อความปลอดภัย

2. ลิเทียมนิกเกิลออกไซด์ (lithium nickel oxide: LiNiO_2)

ลิเทียมนิกเกิลออกไซด์ ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุที่ศักยภาพสำหรับแบตเตอรี่ไฟฟ้าแรงสูงแต่ถึงอย่างไรก็ตามปัญหาด้านการใช้งาน โดยเฉพาะการก่อกวนของชั้นเคลือบที่พื้นผิวซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการใช้งาน

3. ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (lithium manganese oxide: LiMn_2O_4)

แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ถูกเปิดตัวครั้งแรกในปีคริสตศักราช 1980 การไหลของไอออนบนอิเล็กโทรดดีมากเนื่องจากโครงสร้าง three-dimensional spinel ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานภายในลดลงจึงทำให้การชาร์จและดิสชาร์จเร็วขึ้น การคายประจุของลิเทียมแมงกานีสออกไซด์สามารถปล่อยกระแส 20-30 แอมแปร์ สารเคมีตัวนี้ให้เสถียรภาพทางความร้อนได้ดีกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์แต่ความจุลดลงอยู่ที่ประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์และ life span ที่ลดลง

4. ลิเทียมไอรอนฟอสเฟต (lithium iron phosphate: LiFePO_4)

ในปีคริสต์ศักราช 1996 นักวิจัยจากมหาวิทยาลัยเท็กซัสในออสตินพบว่าวัสดุลิเทียมไอรอนฟอสเฟตสามารถใช้ ในขั้วบวกแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนซึ่งได้ให้ปฏิกิริยาเคมีที่ดีและมีความต้านต่ำ ซึ่งส่งผลให้กระแสพิกัดสูงและ life span ที่ยาวนานฟอสเฟตช่วยให้อิเล็กโทรดมีเสถียรต่อการชาร์จไฟและส่งผลให้ความทนทานต่อความร้อนสูง แต่เกิดการ self-discharge สูงกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดอื่นๆ

5. ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (lithium nickel manganese cobalt oxide: LiNiMnCoO_2)

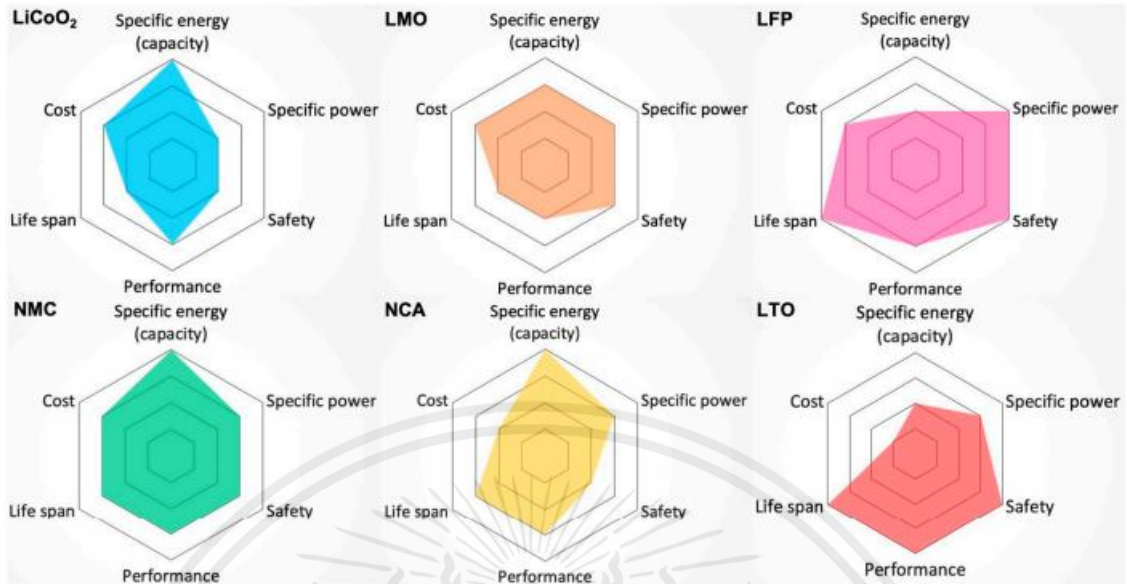
อิเล็กโทรดลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (INR) ให้มีสูงพลังงานหรือพลังงานที่มีความหนาแน่นสูงนิกเกิลมีพลังงานจำเพาะสูงแต่มีความเสถียรต่ำ แมงกานีสมีประโยชน์ด้านโครงสร้างซึ่งทำให้ความต้านทานภายในต่ำและมีพลังงานจำเพาะต่ำ จึงส่งผลให้ราคาถูก มีความเหมาะสมต่อการใช้ร่วมกับรถยนต์ไฟฟ้า

6. ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ (lithium nickel cobalt aluminum oxide: LiNiCoAlO_2)

ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ มีมาตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1999 สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเฉพาะมีความเหมือนกับลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ โดยให้พลังงานสูงและ life span ยาวนาน ซึ่งมีความปลอดภัยที่น้อยกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดอื่นๆ ซึ่งเหตุนี้จำเป็นต้องมีระบบความปลอดภัยจึงส่งผลให้มีราคาที่สูงเมื่อนำไปใช้กับรถยนต์ไฟฟ้า

7. ลิเทียมไททาเนต (lithium titanate: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

แบตเตอรี่ที่มีอิเล็กโทรดลบลิเทียมไททาเนตเป็นที่รู้จักมาตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1980 ลิเทียมไททาเนตแทนที่กราไฟต์ในขั้วลบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วไปและรูปแบบวัสดุเป็นโครงสร้าง spinel ลิเทียมไททาเนตถือเป็นวัสดุที่มีประโยชน์มากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเป็นศูนย์ ซึ่งส่งผลให้อายุการใช้งานยาวนานและมีความปลอดภัยที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงข้อเปรียบเทียบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดต่างๆที่ใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า[5]

2.2 ความร้อนภายในแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าเนื่องจากมีความเด่นในด้านพลังงานและอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนก็มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ราคาที่สูงกว่าแบตเตอรี่อื่น ๆ การสลายสารที่เร็วขึ้นตามเวลาและการแพร่กระจายความร้อนที่อาจเสื่อมสภาพหรือเป็นอันตรายได้

ดังนั้น [5] การควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ในระยะยาว ๆ ควรรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วง 15-35 องศาเซลเซียส และรักษาอุณหภูมิระหว่างเซลล์กับโมดูลให้อยู่ในระดับต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ หรือ การระเบิด การรักษาอุณหภูมิในระดับที่เหมาะสมจะช่วยให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีและยาวนานขึ้นได้

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยรอบแบตเตอรี่ที่มีรูปทรงกระบอก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$h = \frac{Nu_D \times k_b}{D} \quad (2.1)$$

$$Nu_D = \sqrt{0.6 + \frac{\sqrt[6]{0.387Ra_D}}{\frac{8}{1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}}}}, Ra_D \leq 10^{12} \quad (2.2)$$

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_b - T_\infty)D^3}{\nu\alpha} \quad (2.3)$$

สมการความร้อนเพื่อวิเคราะห์ความร้อนภายในแบตเตอรี่

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q_{battery} \quad (2.4)$$

โดยที่

| | |
|---------------|---|
| $Q_{battery}$ | คือ ความร้อนจากแบตเตอรี่ (W) |
| ρ_b | คือ ความหนาแน่นของแบตเตอรี่ (kg/m^3) |
| c_{pb} | คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแบตเตอรี่ (W/mK) |
| T | คือ อุณหภูมิ (K) |

$$Q_{entropy} = Q_{joule} + Q_{entropy} \quad (2.5)$$

โดยที่

| | |
|---------------|---|
| Q_{joule} | คือ ความร้อนในรูปแบบ Joule heating (W) |
| $Q_{entropy}$ | คือ ความร้อนในรูปแบบปฏิกิริยาเคมีที่ Entropy change (W) |

$$Q_{entropy} = -T\Delta S \frac{1}{nF} \quad (2.6)$$

โดยที่

| | |
|------------|----------------------------------|
| T | คือ อุณหภูมิ (K) |
| ΔS | คือ เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลง (J/W) |
| n | คือ จำนวนอิเล็กตรอน (mol) |

F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,485 C/mol)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

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

โดยที่

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

R_{int} คือ ความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่ (Ω)

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

โดยที่

R_{ohm} คือ (Ohmic resistance) ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรน และส่วนประกอบอื่นๆของแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (Ω)

R_{ch} คือ (Chare-transfer resistance) ความต้านทานจาก activation reactions กล่าวคือ ระหว่างกระบวนการไอออนลิเทียมจะแทรกตัวที่พื้นที่ส่วนต่อระหว่างอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด (Ω)

R_d คือ (Diffusion resistance) ความต้านทานจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ (Ω)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 Thermal evaluation of lithium-ion batteries: Defining the cylindrical cell cooling coefficient [6]

การจัดการอุณหภูมิของแบตเตอรี่แพ็คที่มีเซลล์ไอออนลิเทียมได้มีความสำคัญอย่างมากในการให้การทำงานที่ปลอดภัย ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อนที่มีในแผ่นข้อมูลไม่เพียงพอที่จะช่วยให้เราสามารถกล่าวได้ว่าเซลล์ง่ายต่อการใช้งาน การจัดการอุณหภูมิหรือ Thermal management เป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมการใช้งานของแบตเตอรี่ ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของเซลล์ (CCC) เป็นการวัดที่ช่วยในการกำหนดปริมาณความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากเซลล์ ในกรณีของแบตเตอรี่แบบลูกก็มีการใช้ค่า CCC แต่ไม่มีการวัดค่านี้สำหรับเซลล์แบบกระบอก การวิจัยล่าสุดนี้ได้สร้าง CCC สำหรับเซลล์แบบกระบอก โดยการวัดค่า CCC ที่ฐานของเซลล์ (CCCBase) ซึ่งเป็นการวัดความร้อนที่ถูกปล่อยออกจากฐานเซลล์ด้วยระหว่างฐานและแอโนด โดยใช้การเชื่อมต่อแบบไม่เหมาะสมและปรับแต่งด้านไฟฟ้าให้เหมาะสมที่สุด CCC ฐานสูงสุดสำหรับเซลล์ LG M50T (21700) และ Samsung 300 (18650) คือ 21700 มีค่า CCCBase สูงกว่า แต่เซลล์ยังสามารถถูกทำความเย็นได้มากกว่า เซลล์แบตเตอรี่ไอออนลิเทียมสามารถใช้งานได้เร็ว โดยมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุด ซึ่งได้รับผลกระทบจากการจัดการอุณหภูมิในแบตเตอรี่แพ็ค เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อจำกัดความเสียหายของเซลล์ จึงจำเป็นต้องวัดและทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางความร้อนของเซลล์ ค่า CCC หรือค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของเซลล์ (CCC) เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถในการลดความร้อนของฐานของเซลล์แบบกระบอก โดยการวัดค่านี้ใช้เครื่องมือที่ออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบขนาดเซลล์ทั่วไป คือ 18650 และ 21700 ค่า CCC ที่ได้จากการวัดนี้สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกันได้สำหรับเซลล์ที่มีจำหน่ายอยู่บนตลาดให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกซื้อเซลล์ที่มีการจัดการความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพได้ วิธีการคำนวณและแสดงค่า CCC ใหม่ที่นำเสนอในการวิจัยนี้เป็นวิธีที่ใช้ง่ายและสะดวกในการคำนวณ CCC สำหรับทั้งเซลล์แบบกระเปาะและแบบกระบอก โดยการพล็อตกราฟการไหลของความร้อนตามความแตกต่างอุณหภูมิข้างต้นของเซลล์ จะสามารถแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นกันและค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นของเซลล์ (CCC) จะเป็นค่าความชันของเส้นที่ดีที่สุด การวิจัยนี้ยังพบว่าค่า CCCBase ของเซลล์ 18650 ที่ทดสอบมีค่าต่ำกว่าเซลล์ 21700 ที่ใหญ่กว่า แต่เซลล์ 18650 ก็ยังสามารถปฏิบัติการทำความเย็น

ได้มากกว่า เมื่อนำ CCCBase หาดด้วยพื้นที่ที่ใช้ในการทำความเย็นของฐานเดียวกัน จะพบว่า เซลล์ 18650 มีค่าการปล่อยความร้อนทั้งหมดเพิ่มขึ้นถึง 13% สำหรับพื้นที่เดียวกัน นอกจากนี้ เซลล์ 18650 ยังสร้างความร้อนน้อยกว่า โดยการลดความต้านทานที่ 1 Hz ลง 20% ซึ่งทำให้ เซลล์ 21700 สร้างความร้อนมากขึ้นถึง 250% และสร้างความร้อนตามยาวของเซลล์มากขึ้นถึง 180%ไล่ระดับไปตามความยาวสำหรับอัตรา C เท่ากัน การเปรียบเทียบระหว่างฟอร์มแพคเตอร์ ไม่ค่อยยุติธรรม เนื่องจาก 18650 เป็นเซลล์ไฮบริด และ 21700 เป็นเซลล์พลังงาน แต่มันแสดงให้เห็นถึงความสำคัญเท่าเทียมกันของการทำความเข้าใจการสร้างความร้อนควบคู่ไปกับ CCC เมื่อออกแบบเซลล์

2.3.2 Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries [7]

แบตเตอรี่ไอออนลิเทียมมีความหนาแน่นพลังงานสูง (สูงสุดถึง 705 Wh/L) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง (สูงสุดถึง 10,000 W/L) ซึ่งมีความจุสูงและประสิทธิภาพการทำงานที่ดี โดยเป็นแบตเตอรี่ชนิดเติมได้ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานในระบบการประยุกต์ต่างๆ อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ไอออนลิเทียมและยังจำกัดการใช้งานของมันด้วย สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการทำงานของแบตเตอรี่ไอออนลิเทียมอย่างแตกต่างกัน การวัดอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ไอออนลิเทียมอย่างแม่นยำและเข้าใจผลกระทบจากอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการจัดการแบตเตอรี่อย่างถูกต้อง

ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อแบตเตอรี่ไอออนลิเทียม Thermal Runaway เป็นภาวะที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่เมื่อมีการสร้างความร้อนเกินไปที่ไม่สามารถควบคุมได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การผลิตแบตเตอรี่ไม่สมบูรณ์หรือไม่ได้รับการจัดการอย่างถูกต้อง ภาวะการร้อนเกินไปนั้นมักเกิดขึ้นโดยเฉพาะในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิสูงนี้จะกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาคลุ่มเอ็กโซเทอร์มิกภายในแบตเตอรี่ การปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเกิดปฏิกิริยาเอ็กโซเทอร์มิกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน หากการสร้างความร้อนนี้เกินกว่าทนต่อความร้อนของแบตเตอรี่ จะสามารถทำให้เกิดเหตุเพลิงไหม้และการระเบิดได้โดยไม่ควบคุมได้ ดังนั้น การจัดการและการผลิตแบตเตอรี่ที่ถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อป้องกันการเกิดภาวะการร้อนเกินไปในแบตเตอรี่

การใช้งานแบตเตอรี่ไอออนลิเทียม (LIBs) มีความท้าทายเกี่ยวกับอุณหภูมิ เนื่องจากประสิทธิภาพของ LIBs ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมาก การทำงานที่เหมาะสมสำหรับ LIBs เป็นระหว่าง 15-35 องศาเซลเซียส และอุณหภูมिनอกช่วงนี้อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถกลับไปได้ ที่อุณหภูมิต่ำ ความต้านทานในการโอนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและการนำไฟฟ้าของไอออนลิเทียมลดลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพลดลง การเกิดการพลตึงของลิเทียมเกิดขึ้นบนพื้นผิวของแอนออดกราฟไฟต์ที่มีกราฟไฟต์แบบคาร์บอนอื่นๆ ทำให้เสียความจุในอุณหภูมิต่ำ ในทางตรงกันข้าม อุณหภูมิสูงจะเร่งการเสื่อมสภาพของ LIBs และอาจย่อชีวิตของ LIBs ได้ การสร้างความร้อนภายในก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดปฏิกิริยากำลังตัวที่เพิ่มความร้อนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหา thermal runaway โดยสิ้นเชิง



2.3.3 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties [8]

ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรง Cylinder ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือขนาด 18650 21700 และ 26650 โดยที่ในส่วนแรกคือขนาด 18650 มีเส้นผ่านศูนย์กลางยาวและกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ AA แม้ว่า 18650 จะวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม. และยาว 65 มม. แต่ผู้ผลิตอาจมีความแตกต่างของมิติเล็กน้อยระหว่างผู้ผลิต แบตเตอรี่ 18650 โดยทั่วไปมี 3.6/3.7 โวลต์และมีอัตราความจุตั้งแต่ 2,300 ถึง 3,600 mAh ในส่วนต่อมาคือขนาด 21700 ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้แทนแบตเตอรี่ 18650 ที่ใหญ่ขึ้นและความจุมากขึ้น เช่นเดียวกับ 18650 21700 มีแรงดันไฟฟ้าเล็กน้อยที่ 3.6/3.7V 21700 ได้รับการออกแบบมาเพื่อแทนที่ 18650 ในชุดแบตเตอรี่ EV ความจุของแบตเตอรี่เหล่านี้มีตั้งแต่ 4,000 ถึง 5,000 mAh ในขนาดสุดท้ายคือขนาด 26650 เดิมที่ได้รับการออกแบบสำหรับการใช้งานที่มีอัตราสูง เช่น ไฟฉาย มีจำหน่ายจากผู้ผลิตในจำนวนที่จำกัดมากกว่ารูปแบบที่เล็กกว่าและสามารถมีความจุสูงถึง 10,000 mAh

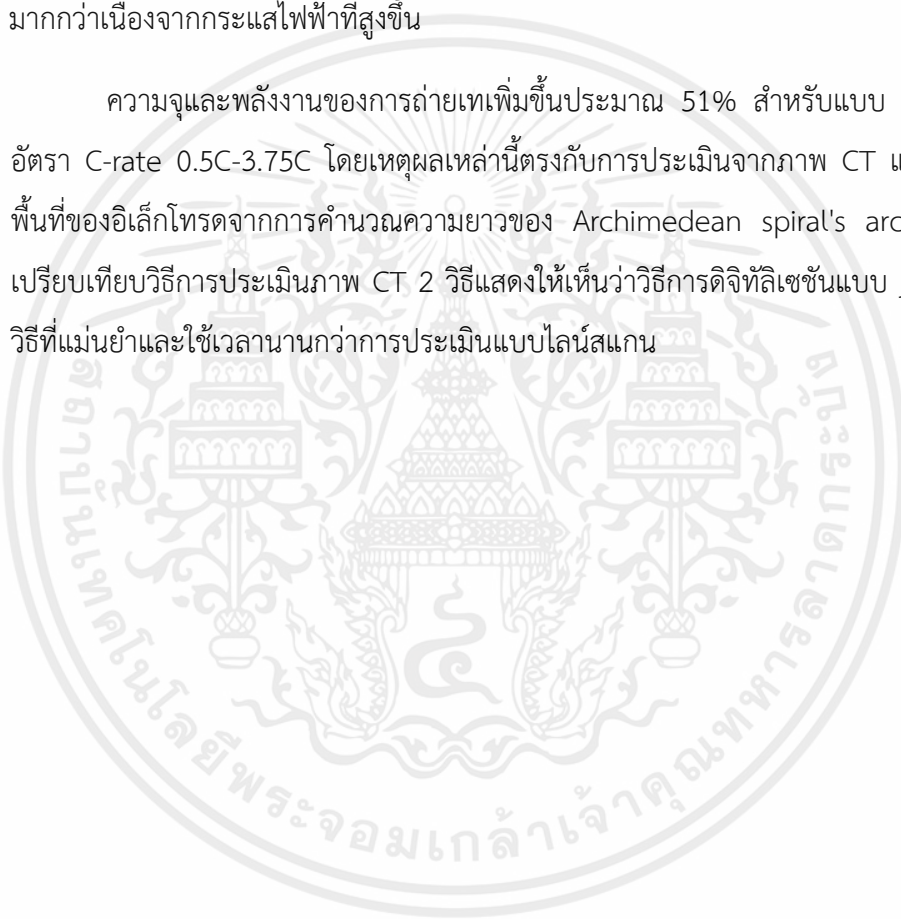
เซลล์ทรงกระบอกผลิตขึ้นโดยใช้อิเล็กโทรดแผ่น ที่มีข้อได้เปรียบของการผลิตที่เร็วกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบการเรียงซ้อนและกระเปาะแบบต่างๆ เซลล์ต่างๆ เช่น 18650 และ 21700 เป็นรูปแบบม้วนเยลลี่แบบพันแผ่นที่มีรูปร่างเป็นเกลียวอาร์คิมิดีส ระยะห่างเป็นระยะระหว่างขดลวดคือเยลลี่โรลคือ “d asc” และเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของเซลล์ ในเซลล์เหล่านี้ d asc คือผลรวมของความหนาของแคโทดและแอโนด (เคลือบสองด้าน) และความหนาสองเท่าของตัวคั่น ลักษณะความต้านทานของเซลล์และความร้อนเกี่ยวข้องโดยตรงกับ d asc ค่า d asc ที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดสูงขึ้นในระหว่างการคายประจุจนเต็ม อันเป็นผลมาจากปริมาณวัสดุที่ใช้งานมากขึ้น 20700 เซลล์มีความจุเพิ่มขึ้นมากกว่า 0.9Ah และ 21700 เซลล์มีความจุเพิ่มขึ้นประมาณ 1.35Ah เมื่อเทียบกับเซลล์ 18650 การเพิ่มขนาดเซลล์ส่งผลให้อัตราส่วนการเก็บพลังงานดีขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุเก็บที่ไม่มีพลังงาน การใช้รูปแบบที่ใหญ่กว่า เช่น รูปแบบ 22700, 25700 และ 30700 คาดว่าจะส่งผลให้มีความจุเพิ่มขึ้นต่อเซลล์พลังงานสูงที่ 1.8 Ah, 3.1 Ah และ 5.8 Ah ตามลำดับ เมื่อเทียบกับ 18650

ในการวิจัยนี้ ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างและความเหมือนกันระหว่างแบตเตอรี่แบบ 18650 และ 21700 โดยใช้โครงสร้างเดียวกันของอิเล็กโทรด

ซีพาร์เรเตอร์ และอิเล็กทรอนิกส์ โดยแสดงให้เห็นว่า การสร้างเซลล์แบบนี้มีความเสถียรและความแม่นยำในการผลิต โดยมีความแตกต่างและความเหมือนกันดังนี้

โดย 18650 และ 21700 มีแนวโน้มที่จะมีแรงดันชาร์จและชาร์จไฟฟ้าที่ตรงกันในอัตรา C-rate ต่ำ (0.1C-0.5C) สำหรับทั้งสองแบบ แต่เมื่ออัตรา C-rate เพิ่มขึ้น แบบ 18650 จะมีแรงต้านทานที่มากกว่า และทำให้เกิดการแตกต่างในแนวโน้มแรงดันระหว่างแบบ 18650 และ 21700 โดยเหตุผลคือความต้านทานของเซลล์ต่ำกว่า และเซลล์ 21700 มีการเกิดความร้อนที่มากกว่าเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ความจุและพลังงานของการถ่ายเทเพิ่มขึ้นประมาณ 51% สำหรับแบบ 21700 ในช่วงอัตรา C-rate 0.5C-3.75C โดยเหตุผลเหล่านี้ตรงกับ การประเมินจากภาพ CT และการคำนวณพื้นที่ของอิเล็กโทรดจากการคำนวณความยาวของ Archimedean spiral's arc length การเปรียบเทียบวิธีการประเมินภาพ CT 2 วิธีแสดงให้เห็นว่าวิธีการดิจิทัลเซลลแบบ jelly roll เป็นวิธีที่แม่นยำและใช้เวลานานกว่าการประเมินแบบไลน์สแกน



บทที่ 3

ออกแบบการทดลองและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการทดลอง

1.การออกแบบการทดลอง

1.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. แบตเตอรี่ในการทดลองนี้ แบตเตอรี่ที่จะใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่ รูปทรง Cylindrical จะใช้ 2 ชนิด คือ ชนิด NCR ขนาด 18650 และ 21700 และ ชนิด INR ขนาด 18650 และ 21700



รูปที่ 3.1 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 18650



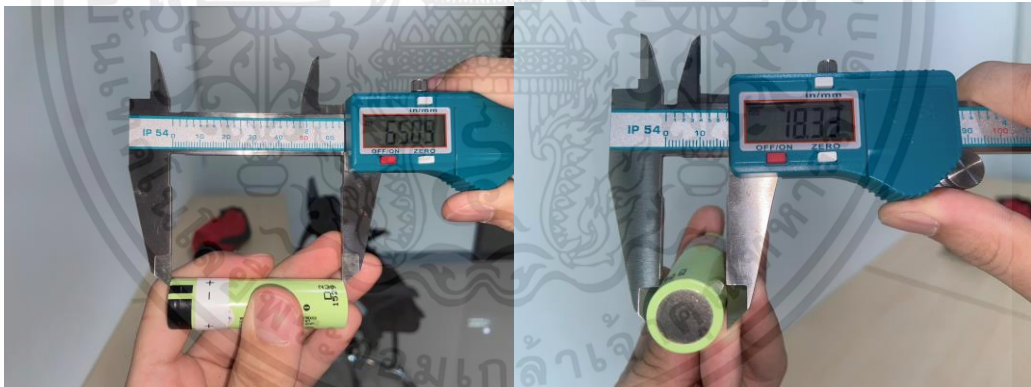
รูปที่ 3.2 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 21700



รูปที่ 3.3 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 18650



รูปที่ 3.4 แบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 21700



รูปที่ 3.5 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 18650

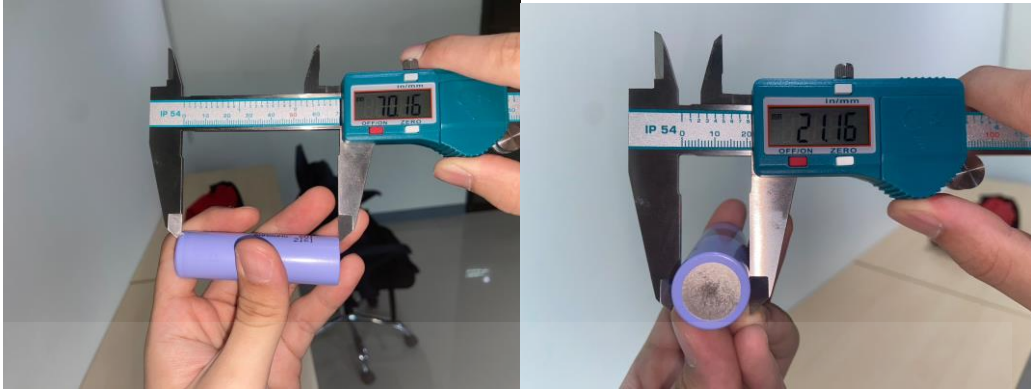


รูปที่ 3.6 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด NCR ขนาด 21700



รูปที่ 3.7 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 18650

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ขนาดของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอกชนิด INR ขนาด 21700

2. DC Power Supply และ DC Electronic Load

สำหรับ DC Power Supply (ด้านล่าง) ใช้สำหรับการชาร์จแบตเตอรี่ และ DC Electronic Load (ด้านบน) ใช้สำหรับการดิสชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายกระแสตรงและโหลดไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรม MATHLAB

ซึ่งโปรแกรม MATHLAB นั้นจะใช้ในการเขียนโค้ดเพื่อสั่งการสำหรับ DC Power Supply และ Electronic Load สำหรับการชาร์จและดิสชาร์จตามลำดับ

```

3  global count ...
4  count_end ...
5  t ...
6  time_count ...
7  time_elapse ...
8  file ...
9  V ...
10 I ...
11 Icutoff...
12 result;
13
14 % *** Change profile first ***
15 ocvprofileC(); % Call for charge profile
16
17 Icutoff = 0.05; % Set cutoff current
18 count_end = 129600; % Set full number of data record (36 Hours)
19 count = 1; % Initialize counter
20 V = 0; % Initialize voltage
21 I = 1; % Initialize current
22 time_elapse = 0; % Initialize time sequence
23 time_count = zeros(1,7); % Initialize timestamp
24 result = []; % Initialize result
25 filelet = datestr(now, 'yyyy.mm.dd - HH.MM'); % Filename
26 file = filelet + " - OCV Charge.xlsx";
27
28 t = timer( 'StartDelay', 0, ... % Delay time when timer start
29 'Period', 1, ... % Time between the execution
30 'tasksToExecute', inf, ... % Number of execution
31 'ExecutionMode', 'fixedRate'); % Set execution mode
32
33 t.TimerFcn = @(~,~) recorderC(); % Set callback function
34
35 DP811 = visa('ni', 'USB0::0x1A81::0x0E11::DP8H220800005::INSTR'); % Create VISA object
36
37 fopen(DP811); % Connect to VISA object
38 fprintf(DP811, ':OUTP:STAT on'); % Turn on
39 fclose(DP811);
40
41 start(t); % Start timer
42

```

รูปที่ 3.10 โปรแกรม Matlab คำสั่ง runC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

2 function ocvprofileC
3
4 DP811 = visa('ni','USB0::0x1AB1::0x0E11::DP8H220800005::INSTR'); % Create VISA object
5 fopen(DP811); % Connect serial port object to device
6
7 fprintf(DP811, ':SOUR:CURR:PROT:STAT off'); % Set state of current protection
8 fprintf(DP811, ':SOUR:CURR:PROT:LEV 3.05'); % Set current protection
9 fprintf(DP811, ':SOUR:CURR:PROT:STAT on '); % Set state of current protection
10 fprintf(DP811, ':SOUR:CURR:LEV:IMM:AMPL 3.00'); % Set charge current
11 fprintf(DP811, ':SOUR:VOLT:PROT:STAT off'); % Set state of voltage protection
12 fprintf(DP811, ':SOUR:VOLT:PROT:LEV 4.2500'); % Set voltage protection
13 fprintf(DP811, ':SOUR:VOLT:PROT:STAT on '); % Set state of voltage protection
14 fprintf(DP811, ':SOUR:VOLT:LEV:IMM:AMPL 4.20'); % Set charge voltage
15
16 fclose(DP811);
17
18 end

```

รูปที่ 3.11 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileC

```

function recorderC
global count ...
count_end ...
t ...
time_count ...
time_elapse ...
file ...
V ...
I ...
Icutoff...
result;

DP811 = visa('ni','USB0::0x1AB1::0x0E11::DP8H22080005::INSTR'); % Create VISA object

if count < count_end

    timestr = datestr(now,'dd mm yyyy HH MM SS FFF');
    time = str2num(timestr);

    time_count(count,:) = time; % Timestamp
    time_elapse(count,:) = count-1; % Record data sequence

    fopen(DP811);

    fprintf(DP811, ':MEAS:VOLT:DC?'); % Measure voltage from DP811
    Vrec = fscanf(DP811);
    V(count,1) = str2num(Vrec); % Save to V

    fprintf(DP811, ':MEAS:CURR:DC?'); % Measure current from DP811
    Irec = fscanf(DP811);
    I(count,1) = str2num(Irec); % Save to I

    fclose(DP811);

    if ( I(count,1) <= Icutoff ) && ( count > 1) % Battery protection
        count_end = count; % Stop the loop
        fopen(DP811);
        fprintf(DP811, ':OUTP:STAT off'); % Off DP811 if voltage is less than Vcutoff
        fclose(DP811);
        result = [time_elapse V I];
        xlswrite(file,result);
        stop(t);
    end
end
end

```

รูปที่ 3.12 โปรแกรม Matlab คำสั่ง recorderC

```

3 global count ...
4     count_max ...
5     count_end ...
6     t ...
7     time_count ...
8     time_elapse ...
9     time_last ...
10    file ...
11    V ...
12    I ...
13    Vcutoff...
14    result;
15
16 % *** Change profile first ***
17 ocvprofile0(); % Call for charge profile
18
19 Vcutoff = 2.5; % Set cutoff voltage
20 V = 0; % Initialize voltage
21 I = 0; % Initialize current
22 time_elapse = 0; % Initialize time sequence
23 result = []; % Initialize result
24 count = 1; % Initialize counter (10 Seconds for Start State)
25 count_max = 12000; % Maximum number of data (36 Hr)
26 time_count = zeros(1,7); % Initialize timestamp
27 time_last = 0; % Continued time recording after stop running DP811 (1 Hour)
28 count_end = [];
29 file = datestr(now, 'yyyy.mm.dd - HH.MM'); % Filename
30 file = file + "OCV Discharge.xlsx"; % xlsx Filename
31
32 t = timer('StartDelay', 0, ... % Delay time when timer start
33          'Period', 1, ... % Time between the execution
34          'TasksToExecute', inf, ... % Number of execution
35          'ExecutionMode', 'fixedRate'); % Set execution mode
36
37 t.TimerFcn = @(~,~) recorder0(); % Set callback function
38
39 DL3021 = visa('ni', 'USB0::0x1AB1::0x0E11::DL3A220700091::INSTR'); % Create VISA object
40
41 fopen(DL3021); % Connect to VISA object
42 fprintf(DL3021, ':SOUR:INP:STAT on'); % Turn on
43 fprintf(DL3021, ':SYST:KEY 34'); % Trigger transient
44 fclose(DL3021);
45
46 start(t); % Start timer

```

รูปที่ 3.13 โปรแกรม Matlab คำสั่ง runD

```

1 function recorderD
2 global count ...
3     count_max ...
4     count_end ...
5     t ...
6     time_count ...
7     time_elapse ...
8     time_last ...
9     file ...
10    V ...
11    I ...
12    Vcutoff...
13    result;
14
15 DL3021 = visa('ni','USB0::0x1AB1::0x0E11::DL3A220700091::INSTR');
16
17 if count < count_max
18
19     timestr = datestr(now,'dd mm yyyy HH MM SS FFF');
20     time = str2num(timestr);
21
22     time_count(count,:) = time;           % Timestamp
23     time_elapse(count,:) = count-1;      % Record data sequence
24
25     fopen(DL3021);
26
27     fprintf(DL3021, ':MEAS:VOLT:DC?');    % Measure voltage from DL3021
28     Vrec = fscanf(DL3021);
29     V(count,1) = str2num(Vrec);          % Save to V
30
31     fprintf(DL3021, ':MEAS:CURR:DC?');    % Measure current from DL3021
32     Irec = fscanf(DL3021);
33     I(count,1) = str2num(Irec);          % Save to I
34
35     fclose(DL3021);
36
37     if V(count,1) <= Vcutoff              % Battery protection
38         fopen(DL3021);
39         fprintf(DL3021, ':SOUR:INP:STAT off'); % Off DL3021 if voltage is less than Vcutoff
40         fclose(DL3021);
41         count_end = count;                % Save ending time value
42         count_max = count + time_last;    % Limit count_max by add time_last
43     end
44 end
45
46 if count >= count_max
47     result = [time_elapse V I];
48     xlswrite(file,result);
49     stop(t);
50 end
51
52 count = count + 1;
53
54 end

```

รูปที่ 3.14 โปรแกรม Matlab คำสั่ง recorderD

```

1 function ocvprofileD
2
3 DL3021 = visa('ni','USB0::0x1AB1::0x0E11::DL3A220700091::INSTR'); % Create VISA object
4 fopen(DL3021); % Connect to VISA object
5
6 % Setup profile
7 fprintf(DL3021, ':SYST:KEY 7'); % Mode set to List
8
9 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:MODE CC'); % Select mode CC/CV/CR/CP
10 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:RANG 40'); % Set current range 4/40
11 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:COUN 1'); % Set number of cycle 0-99999
12 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:STEP 5'); % Set number of step 2-512
13 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:END OFF'); % Set end state OFF/LAST
14
15 % State 1
16 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 0,0.00'); % Start state
17 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 0,10'); % 10 seconds
18 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 0,1.00');
19
20 % State 2
21 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 1,3.00'); % Discharge 0.1A (C/30 = 0.108333)
22 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 1,3600'); % 1 hour
23 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 1,1.00');
24
25 % State 3
26 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 2,3.00'); % Discharge 0.1A
27 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 2,3600'); % 1 hour
28 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 2,1.00');
29
30 % State 4
31 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 3,3.00'); % Discharge 0.1A
32 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 3,3600'); % 1 hour
33 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 3,1.00');
34
35 % State 5
36 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 4,3.00'); % Discharge 0.1A
37 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 4,3600'); % 1 hour
38 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 4,1.00');
39
40 % State 6
41 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 5,0.10'); % Discharge 0.1A
42 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 5,3600'); % 1 hour
43 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 5,1.00');
44
45 % State 7
46 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 6,0.10'); % Discharge 0.1A
47 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 6,3600'); % 1 hour
48 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 6,1.00');
49
50 % State 8
51 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 7,0.10'); % Discharge 0.1A
52 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 7,3600'); % 1 hour
53 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 7,1.00');
54
55 % State 9
56 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 8,0.10'); % Discharge 0.1A
57 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 8,3600'); % 1 hour
58 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 8,1.00');
59
60 % State 10
61 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 9,0.10'); % Discharge 0.1A
62 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 9,3600'); % 1 hour
63 fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 9,1.00');

```

รูปที่ 3.15 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 1

```

% Delay Loop for Stable Communication
for i = 1:10000
    for j = 1:10000
        end
    end

% State 11
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    10,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    10,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    10,1.00');

% State 12
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    11,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    11,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    11,1.00');

% State 13
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    12,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    12,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    12,1.00');

% State 14
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    13,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    13,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    13,1.00');

% State 15
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    14,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    14,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    14,1.00');

% State 16
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    15,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    15,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    15,1.00');

% State 17
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    16,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    16,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    16,1.00');

% State 18
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    17,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    17,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    17,1.00');

% State 19
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    18,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    18,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    18,1.00');

% State 20
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV    19,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID    19,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW    19,1.00');

% Delay Loop for Stable Communication
for i = 1:10000
    for j = 1:10000
        end
    end
end

```

รูปที่ 3.16 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% State 21
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 20,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 20,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 20,1.00');

% State 22
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 21,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 21,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 21,1.00');

% State 23
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 22,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 22,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 22,1.00');

% State 24
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 23,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 23,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 23,1.00');

% State 25
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 24,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 24,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 24,1.00');

% State 26
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 25,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 25,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 25,1.00');

% State 27
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 26,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 26,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 26,1.00');

% State 28
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 27,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 27,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 27,1.00');

% State 29
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 28,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 28,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 28,1.00');

% State 30
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 29,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 29,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 29,1.00');

% Delay Loop for Stable Communication
for i = 1:10000
    for j = 1:10000
        end
    end

% State 31
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 30,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 30,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 30,1.00');

```

รูปที่ 3.17 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 3

```

% State 32
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 31,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 31,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 31,1.00');

% State 33
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 32,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 32,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 32,1.00');

% State 34
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 33,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 33,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 33,1.00');

% State 35
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 34,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 34,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 34,1.00');

% State 36
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 35,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 35,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 35,1.00');

% State 37
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 36,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 36,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 36,1.00');

% State 38
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 37,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 37,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 37,1.00');

% State 39
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 38,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 38,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 38,1.00');

% State 40
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 39,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 39,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 39,1.00');

% Delay Loop for Stable Communication
for i = 1:10000
    for j = 1:10000
        end
    end

% State 41
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 40,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 40,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 40,1.00');

% State 42
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 41,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 41,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 41,1.00');

```

รูปที่ 3.18 โปรแกรม Matlab คำสั่ง ocvprofileD รูปที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% State 43
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 42,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 42,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 42,1.00');

% State 44
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 43,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 43,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 43,1.00');

% State 45
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 44,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 44,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 44,1.00');

% State 46
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 45,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 45,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 45,1.00');

% State 47
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 46,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 46,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 46,1.00');

% State 48
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 47,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 47,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 47,1.00');

% State 49
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 48,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 48,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 48,1.00');

% State 50
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:LEV 49,0.10'); % Discharge 0.1A
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:WID 49,3600'); % 1 hour
fprintf(DL3021, ':SOUR:LIST:SLEW 49,1.00');

fclose(DL3021); % Disconnect VISA object
end

```

รูปที่ 3.19 โปรแกรม Matlab คำสั่ง `ocvprofileD` รูปที่ 5
ที่ใช้ในการสั่งการแหล่งจ่ายกระแสตรงและโหลดให้ทำการอัดและคายประจุ

4. Data Logger TENMARS TM-7470

Thermometerที่ใช้สำหรับวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในขณะที่ทำการชาร์จและดิสชาร์จอยู่ ซึ่งจะมีตัว Thermocouple จำนวน 4 ตัว (T1, T2, T3 และ T4) ไว้สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 3.20 Thermometer ที่ใช้ในการทดลอง

5. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ดิจิทัล

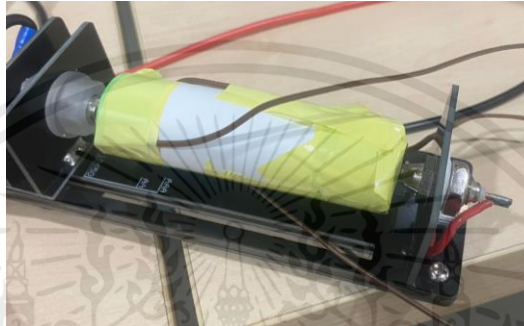
เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดขนาดภายนอกของแบตเตอรี่ขณะทำการชาร์จและดิสชาร์จ



รูปที่ 3.21 เครื่องมือที่ใช้วัดขนาดของแบตเตอรี่ขณะทำการทดลอง

1.2 การติดตั้งการทดลอง

ขั้นตอนแรกทำการติดตั้งThermometerซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องDataLaggerโดยทำการใช้สก็อตเทปแปะไปที่แบตเตอรี่โดยจะให้ T1 วัดค่าอุณหภูมิที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ และ T2 กับ T3 วัดที่บริเวณผิวภายนอกของแบตเตอรี่ และ T4 ใช้วัดค่าที่อุณหภูมิห้อง

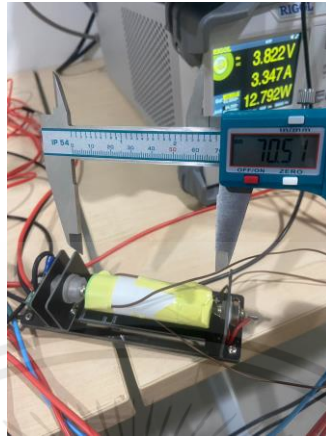


รูปที่ 3.22 การติดตั้ง Thermocouple เข้ากับแบตเตอรี่รูปทรงกระบอก

จากนั้นทำการเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับแบตเตอรี่เข้ากับ DC Power Supply และ DC Electronic Load โดยเครื่องทั้งสองนั้นจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และจะใช้ MATLAB ในการเก็บค่าแรงดัน (V) กระแสชาร์จ (IC) และกระแสดิสชาร์จ (Id) และใช้เครื่อง Data Logger ในการบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 วินาที และขณะทำการลองจะใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิตอลวัดขนาดภายนอกของแบตเตอรี่ ขณะทำการชาร์จและดิสชาร์จ



รูปที่ 3.23 การต่ออุปกรณ์ทั้งหมดในการทดลอง



รูปที่ 3.24 การวัดแบตเตอรี่โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิทัลขณะทำการทดลอง

3.2 วิธีการทดลอง

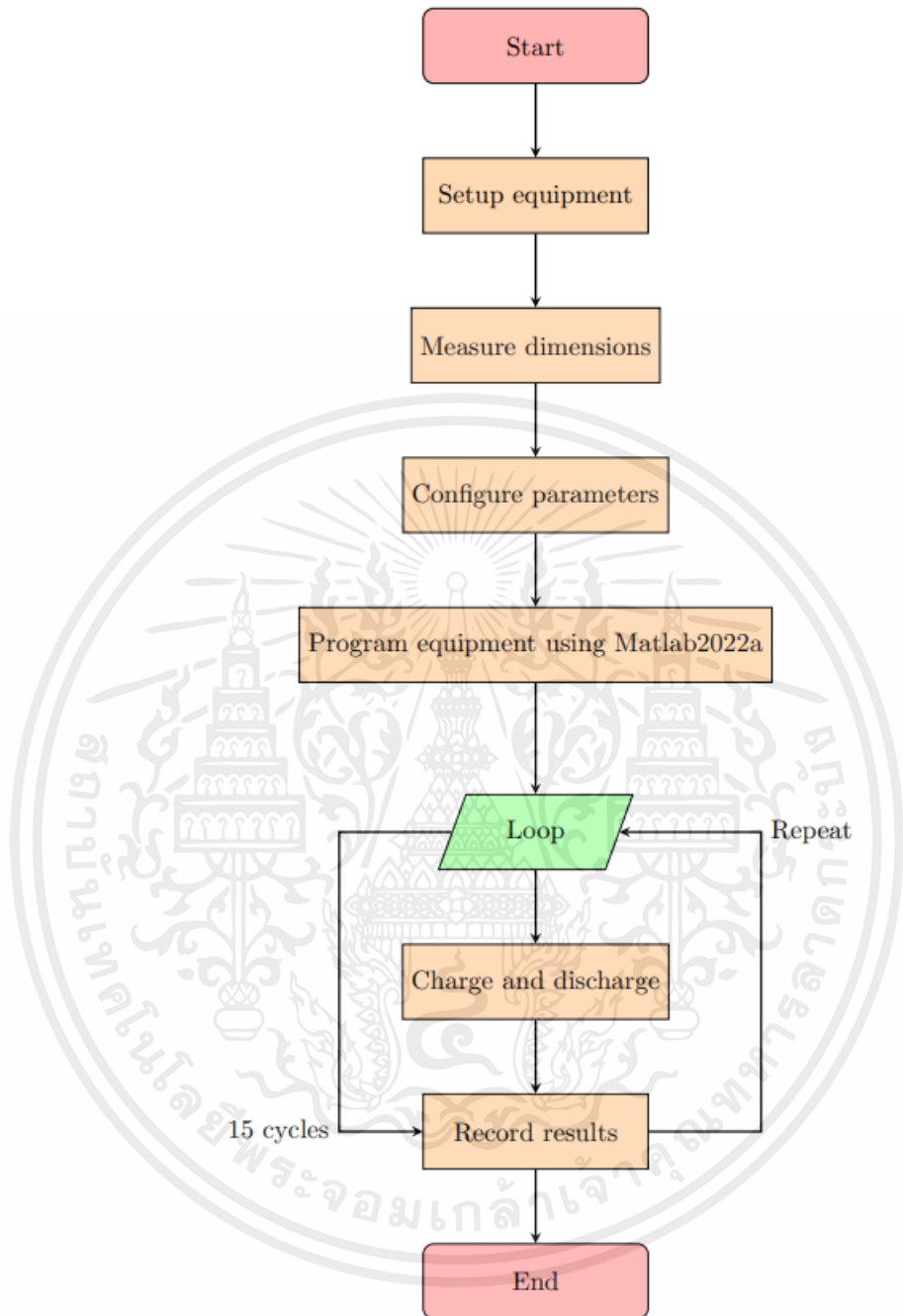
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการทดลอง

| Setup | Table column subhead | Nominal capacity (mAh) | Charging voltage(V) | Discharge cut-off voltage (V) | End Current (mA) |
|-------|----------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|------------------|
| 1 | INR18650 | 3000 | 4.20 | 2.5 | 50 |
| 2 | INR21700 | 4800 | 4.20 | 2.5 | 200 |
| 3 | NCR18650B | 3350 | 4.20 | 2.5 | 65 |
| 4 | NCR21700B | 5000 | 4.20 | 2.5 | 100 |

ในการทดลองการชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่นั้นการทดลองสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์ NCR18650 และ21700 และINR 18650 และ21700 ซึ่งอยู่ภายในช่วงอุณหภูมิภายในห้องสำหรับสภาพสิ่งแวดล้อมในอาคาร ในการวัดความสามารถในการคายประจุและความจุประจุ ทั้งการชาร์จและการคายประจุดำเนินการโดยใช้แหล่งจ่ายไฟ DC Power Supply และ DC Electronic Load ตามลำดับ แหล่งจ่ายไฟ DC และโหลดไฟฟ้ากระแสตรงได้รับการตั้งโปรแกรมโดยใช้ Matlab2022a โดยใช้ในการชาร์จหรือคายประจุแบตเตอรี่และบันทึกผลลัพธ์ รวมถึงกระแสประจุ กระแสประจุ แรงดันแบตเตอรี่ และเวลา ในการติดตั้งอุปกรณ์ ขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ DC เชื่อมต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่

และขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ DC เชื่อมต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ มีการใช้ฟังก์ชัน Sense เพื่อให้แน่ใจว่าการวัดพารามิเตอร์ต่างๆถูกต้องแม่นยำ และ DC Electronic Load ได้รับการติดตั้งในลักษณะเดียวกับแหล่งจ่ายไฟ DC อุปกรณ์ทั้งสองเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และสั่งการโดยใช้โค้ดใน Matlab2022a เพื่อชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่ตามที่กำหนด ในการทดลองนี้ แบตเตอรี่ทั้งหมดได้รับการทดสอบโดยใช้ขั้นตอน CC-CV การตั้งค่าเกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่เข้ากับอุปกรณ์และใช้ฟังก์ชัน Sense เพื่อให้แน่ใจว่ามีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์อย่างแม่นยำ Matlab2022a ใช้เพื่อสั่งให้อุปกรณ์ชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่และบันทึกผลลัพธ์ประกอบด้วยค่าโวลต์และกระแสเพื่อนำมาคำนวณหาความจุของแบตเตอรี่ จากนั้นใช้เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ดิจิทัล วัดขนาดภายนอกของแบตเตอรี่ ขั้วบวก กลาง และขั้วลบเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงและเปรียบเทียบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแบตเตอรี่แต่ละก้อน พร้อมทั้งหาค่าเฉลี่ยของเส้นศูนย์กลางของแบตเตอรี่ จากนั้นทำการทดลองซ้ำ 15 รอบแล้วนำข้อมูลมาวิเคราะห์





รูปที่ 3.25 Flowchart แสดงวิธีการทดลอง

วิธีการวัดขนาดของแบตเตอรี่

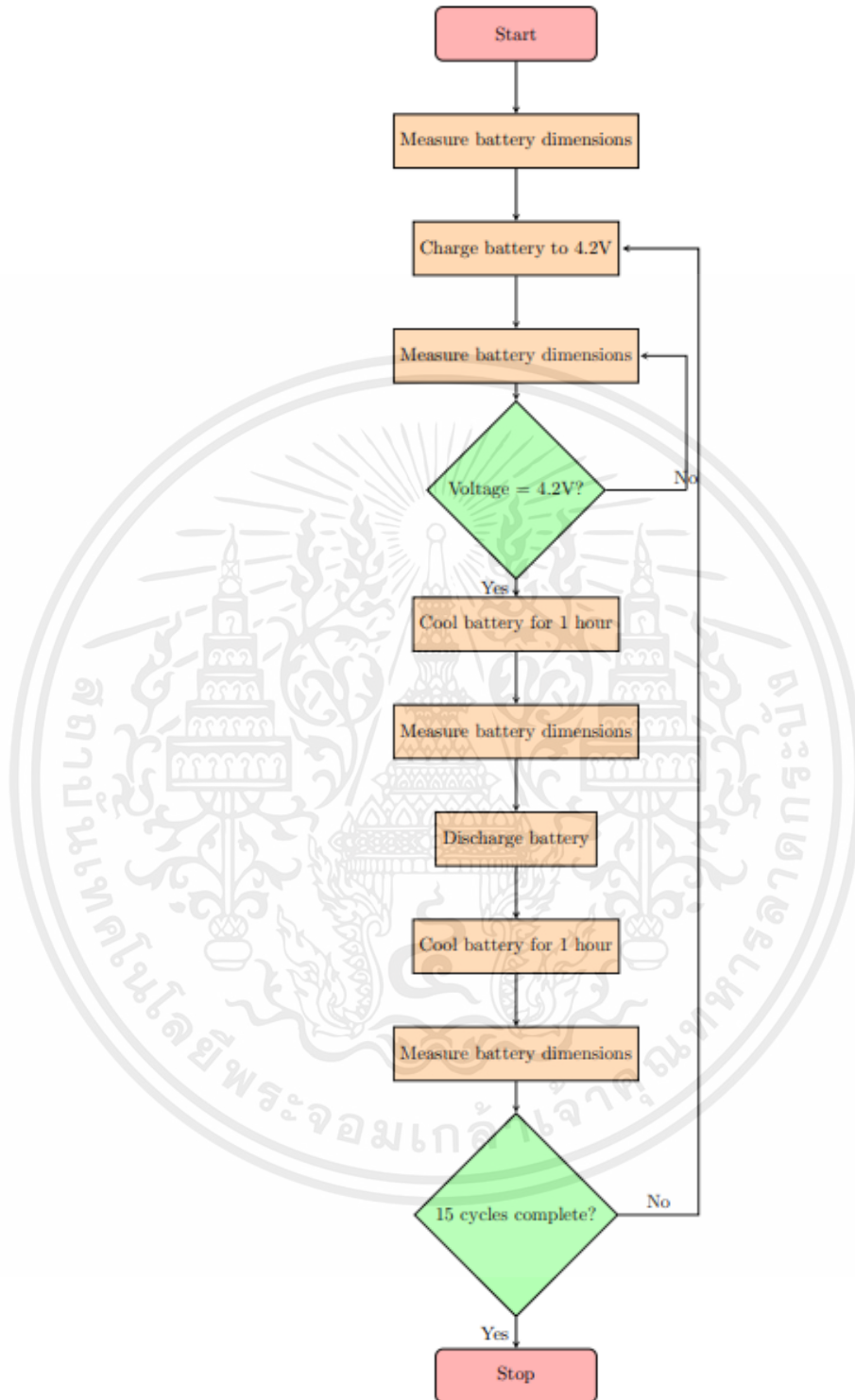
1. วัดขนาดเริ่มต้นของแบตเตอรี่: ก่อนที่จะเริ่มทดสอบแบตเตอรี่ในกระบวนการชาร์จและดิสชาร์จ วัดขนาดเริ่มต้นของแบตเตอรี่เพื่อเป็นค่าอ้างอิงเริ่มต้น
2. กระบวนการชาร์จแบตเตอรี่: เริ่มกระบวนการชาร์จแบตเตอรี่ตามระยะเวลาที่กำหนด. ในขณะเดียวกันกับกระบวนการชาร์จ, วัดขนาดของแบตเตอรี่เมื่อมีแรงดันตามระดับที่กำหนด เช่น 3.9V, 4.0V, 4.1V, และ 4.2V
3. ทิ้งแบตเตอรี่ในอุณหภูมิห้องเย็น: เมื่อแบตเตอรี่ชาร์จเต็มแล้ว ทิ้งแบตเตอรี่ไว้ในอุณหภูมิห้องเย็นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้แบตเตอรี่เย็นลงและเป็นสภาวะพร้อมทดสอบ
4. วัดขนาดแบตเตอรี่: หลังจากทิ้งแบตเตอรี่เย็นลงเพียงพอ, วัดขนาดแบตเตอรี่เพื่อตรวจสอบปัจจัยความร้อนและความสมดุลของแบตเตอรี่
5. ดำเนินการดิสชาร์จแบตเตอรี่: ดำเนินการดิสชาร์จแบตเตอรี่โดยไม่ต้องวัดขนาด ระหว่างการดิสชาร์จไม่จำเป็นต้องวัดขนาดแบตเตอรี่ แต่จะวัดขนาดหลังจากดิสชาร์จเสร็จและทิ้งแบตเตอรี่ไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6. ทำซ้ำกระบวนการ: ทำซ้ำกระบวนการทั้งหมดเหล่านี้ไปเรื่อยๆจนครบ 15 รอบของแบตเตอรี่

การวัดแบตเตอรี่มี 3 ตำแหน่งดังนี้:

ตำแหน่งที่ 1: อยู่ห่างจากขั้วบวก 15% ของความยาวทั้งหมดของแบตเตอรี่

ตำแหน่งที่ 2: ตรงกลางของแบตเตอรี่

ตำแหน่งที่ 3: อยู่ห่างจากขั้วลบ 15% ของความยาวทั้งหมดของแบตเตอรี่



รูปที่ 3.26 Flowchart แสดงวิธีการวัดขนาดของแบตเตอรี่

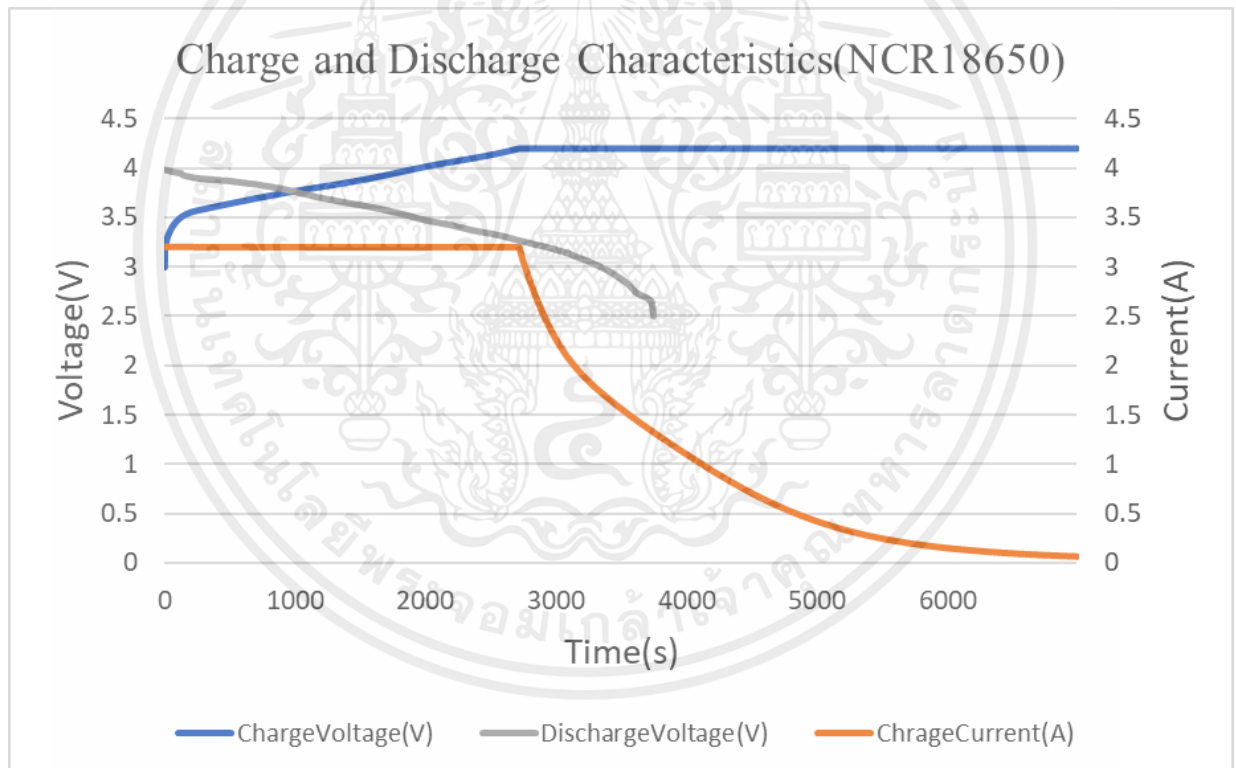
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบแบตเตอรี่

4.1.1 ชนิด NCR18650

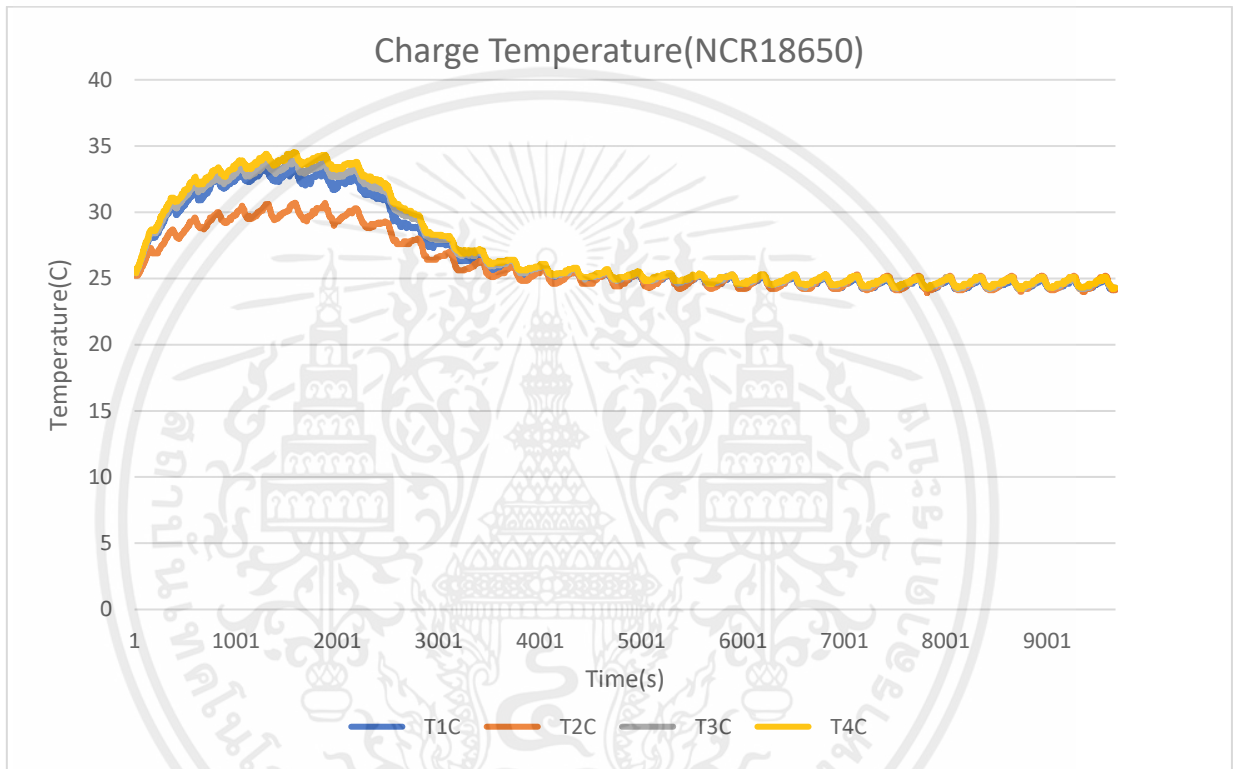
ข้อมูลการทดสอบชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่ตามอัตรา $Crate = C/1$ ที่ได้จากการทดสอบจำนวน 15 ซัยเคิล แสดงด้วยกราฟด้านล่างนี้ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) โดยที่เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีส้มแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.1 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (NCR18650)

เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ NCR 18650 มีดังนี้ ใช้กระแสชาร์จที่ $Crate = C/1$ โดย:แบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 3350 mAh แรงดันไฟชาร์จ 4.20 V และกระแสไฟสิ้นสุด 65 mA และใช้กระแสดิสชาร์จที่ $Crate = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 3350 mAh แรงดันไฟตัด 2.5 V

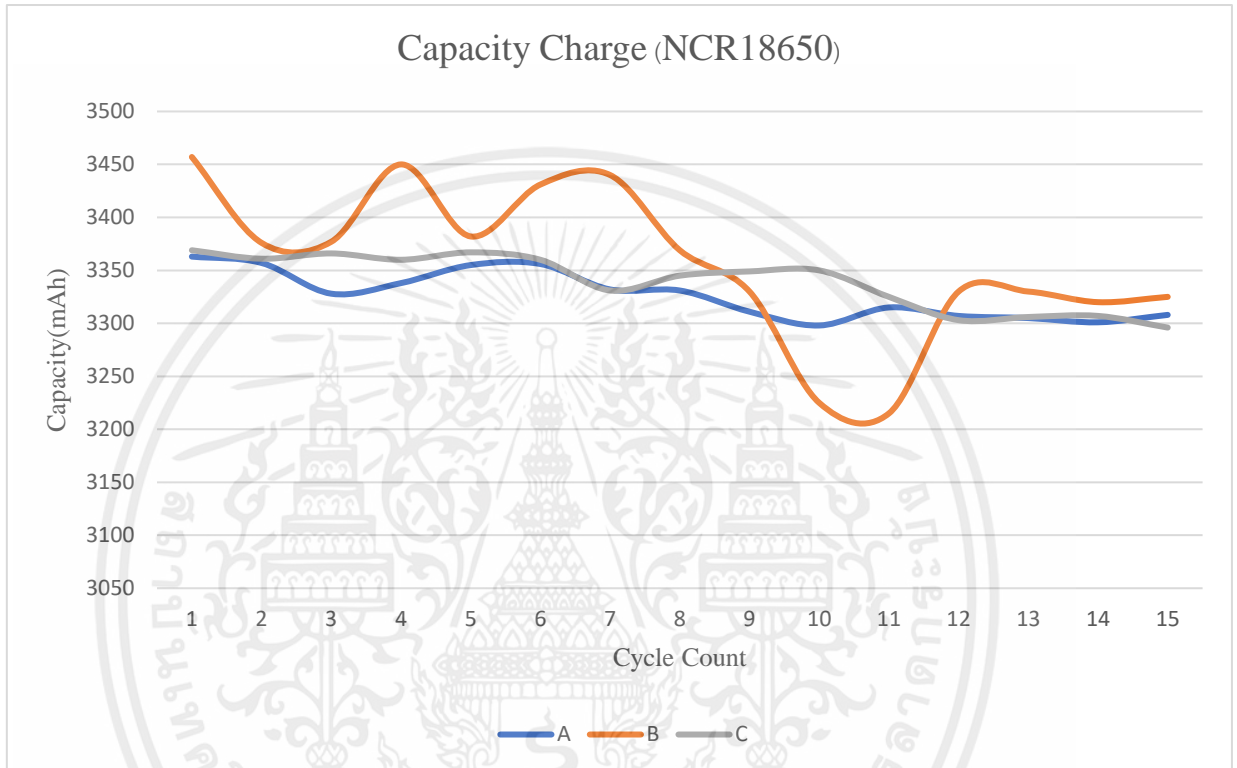
จาก รูปที่ 4.2 นี้แสดงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาทดสอบ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยที่เส้นกราฟสีเหลืองแสดงถึงอุณหภูมิส่วนกลางของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีเทาแสดงถึงอุณหภูมิส่วนข้างของแบตเตอรี่ โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิขั้วบวกของแบตเตอรี่ สุดท้ายเส้นกราฟสีส้มแสดงถึงอุณหภูมิของห้องที่ทดลอง



รูปที่ 4.2 กราฟ Charge Temperature (NCR18650)

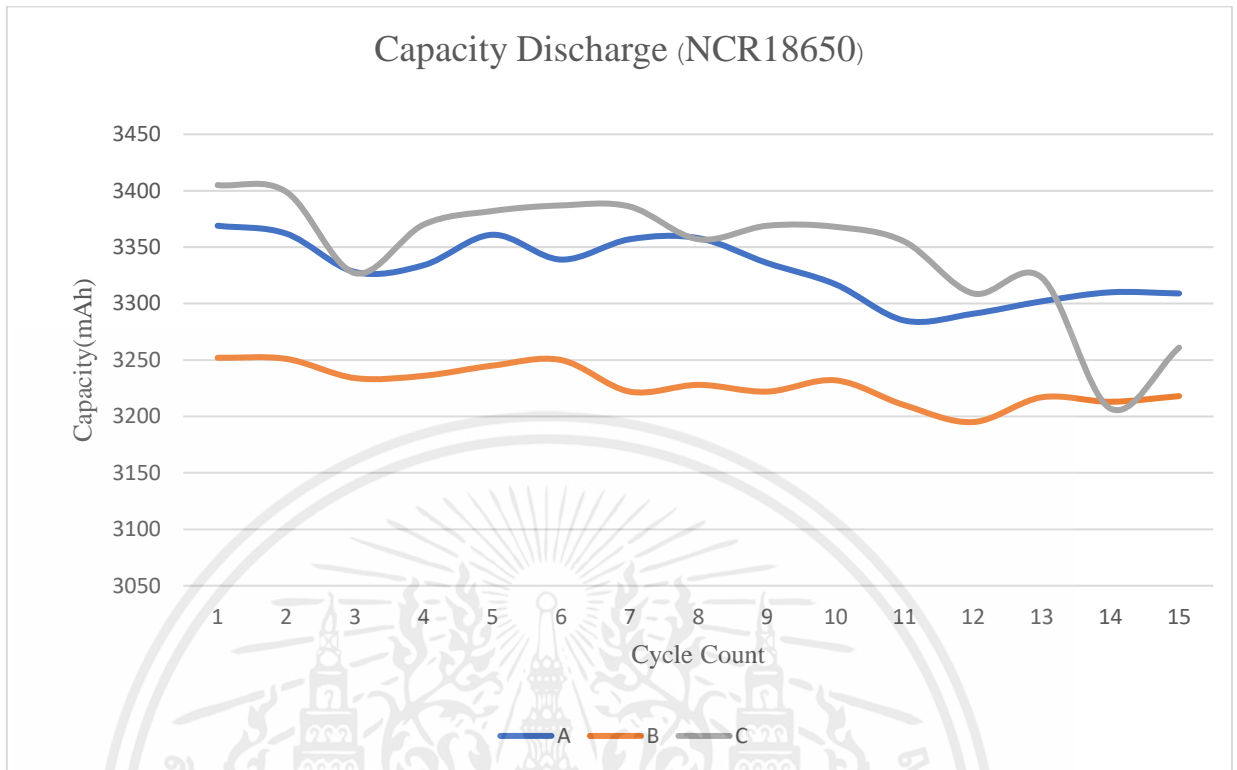
จาก รูปที่ 4.2 พบว่าในช่วงวินาทีที่ 2,000 แบตเตอรี่มีค่าไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3.9 ถึง 4.2 โวลต์ ซึ่งอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงนี้อยู่ที่ประมาณ 34 องศาเซลเซียสถึง 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการชาร์จแบตเตอรี่

จาก รูปที่ 4.3 นี้เป็นการแสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการทดสอบจำนวน 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่าความจุของแบตเตอรี่ในหน่วย mAh โดยเส้นกราฟสีน้ำเงิน เส้นกราฟสีส้มและเส้นกราฟสีเทาแสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ A B และ C ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 กราฟ Capacity Charge (NCR18650)

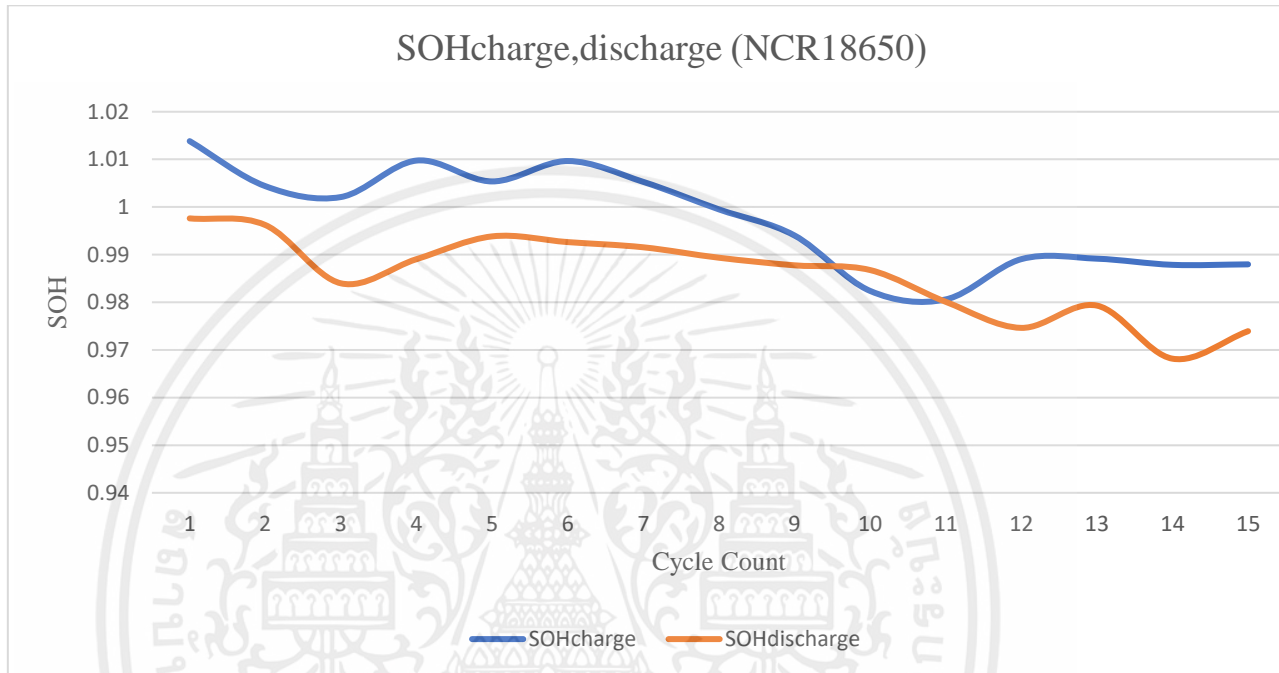
จาก รูปที่ 4.3 แบตเตอรี่ก้อน A และก้อน B มีความจุที่คงที่ตั้งแต่รอบที่หนึ่งจนถึงรอบที่ 15 แต่ในช่วงรอบที่ 10 ของแบตเตอรี่ก้อน B มีการแกว่งของค่าความจุ ในขณะที่ในช่วงรอบที่ 12 ถึง 15 ค่าความจุเริ่มเข้าใกล้ค่าความจุของแบตเตอรี่ก้อน A และก้อน B ก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.4 กราฟ Capacity Discharge (NCR18650)

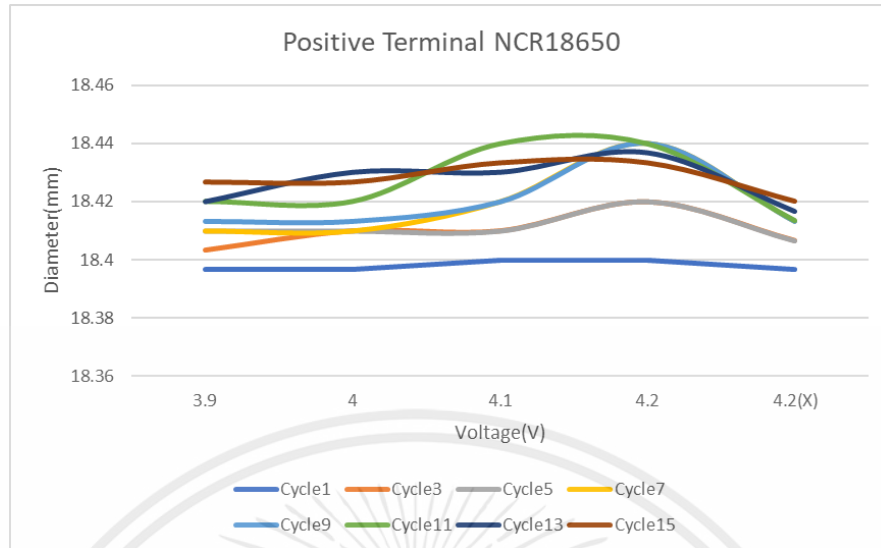
จาก รูปที่ 4.4 แบตเตอรี่ก้อน A มีความจุเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 3350 mAh และเริ่มลดลงไปเมื่อถึงรอบที่ 10 โดยความจุของแบตเตอรี่ก้อน A ลดลงเหลือประมาณ 3300 mAh จากนั้นความจุค่าในช่วงรอบที่ 10-15 สำหรับแบตเตอรี่ก้อน B มีความจุเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 3250 mAh และเริ่มลดลงไปเมื่อถึงรอบที่ 6 โดยความจุของแบตเตอรี่ก้อน B ลดลงเหลือประมาณ 3230 mAh จากนั้นความจุค่าในช่วงรอบที่ 6-15 สำหรับแบตเตอรี่ก้อน C มีความจุเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 3400 mAh และเริ่มลดลงไปเมื่อถึงรอบที่ 11 โดยความจุของแบตเตอรี่ก้อน C ลดลงเหลือประมาณ 3300 mAh จากนั้นความจุค่าในช่วงรอบที่ 11-15 ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าแบตเตอรี่ก้อน A และแบตเตอรี่ก้อน B มีความเสถียรมากกว่าแบตเตอรี่ก้อน C ในช่วงรอบที่ 1-15

จาก รูปที่ 4.5 เป็นการแสดงค่า State of Health (SOH) ของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการคำนวณทั้งหมด 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่า SOH ของแบตเตอรี่โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่า SOH ของการชาร์จ ส่วนเส้นกราฟสีส้มแสดงค่า SOH ของการดิสชาร์จ



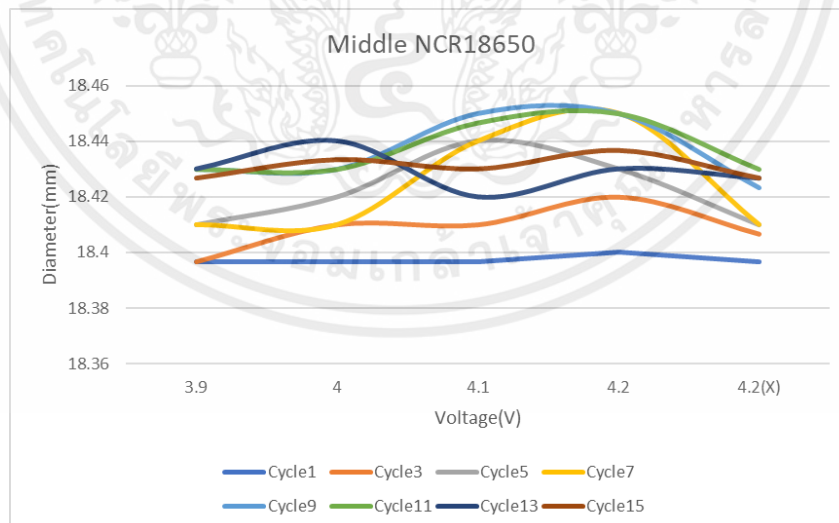
รูปที่ 4.5 กราฟ SOH Charge, Discharge (NCR18650)

จาก รูปที่ 4.5 เป็นไปได้ว่าค่า SOH หาได้จากการนำค่าความจุแบตเตอรี่ทั้ง 3 ก้อนมาเฉลี่ยกัน โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟสีน้ำเงิน ในช่วงรอบที่ 1-6 ค่า SOH มีค่าประมาณ 1.01 และลดลงเรื่อยๆ ในช่วงรอบที่ 7-15 ค่า SOH ตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 0.99 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่า SOH ของแบตเตอรี่ในช่วงรอบแรกสูงกว่าช่วงรอบที่หลัง นอกจากนี้ เส้นกราฟสีส้มแสดงแนวโน้มของการลดลงตั้งแต่รอบที่ 1 ถึงรอบที่ 15 โดยค่า SOH ในช่วงแรกมีค่าประมาณ 1 และช่วงสุดท้าย มีค่าโดยประมาณอยู่ระหว่าง 0.97-0.98 ซึ่งหมายความว่าแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพลงเรื่อยๆ จนถึงช่วงท้ายของการใช้งาน



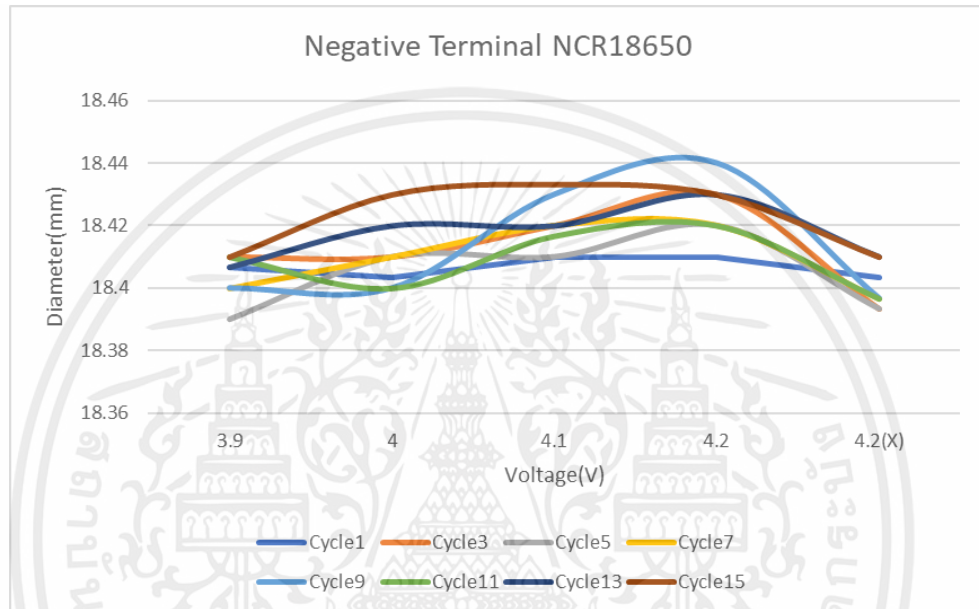
รูปที่ 4.6 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650)

จาก รูปที่ 4.6 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.44 มิลลิเมตร เป็น 18.42 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 18.4 มิลลิเมตรเป็น 18.42 มิลลิเมตร



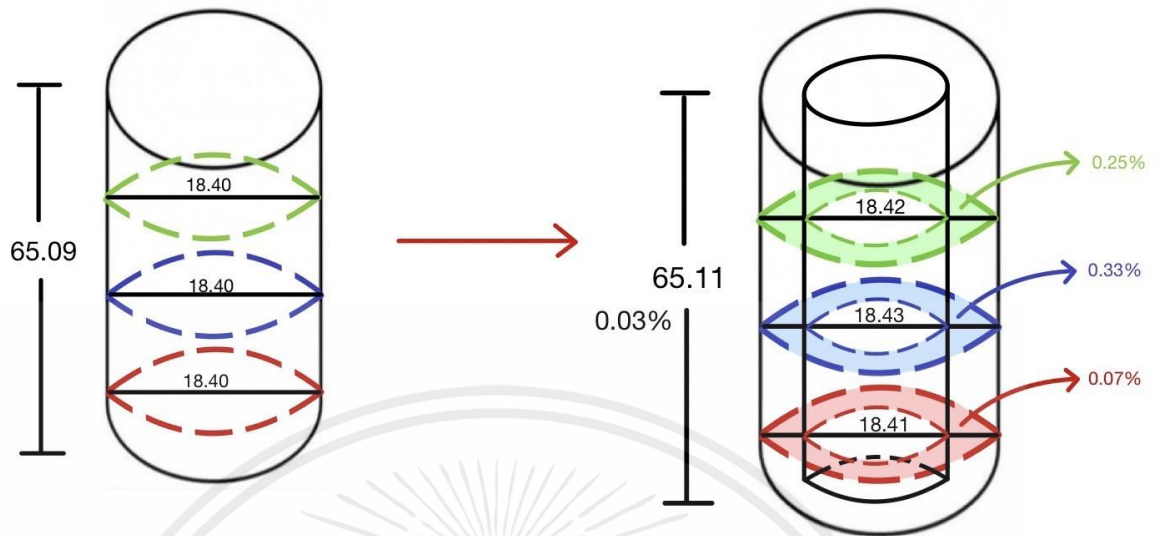
รูปที่ 4.7 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650)

จาก รูปที่ 4.7 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.45 มิลลิเมตร เป็น 18.43 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 18.4 มิลลิเมตรเป็น 18.43 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.8 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR18650)

จาก รูปที่ 4.8 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.44 มิลลิเมตร เป็น 18.4 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 18.39 มิลลิเมตรเป็น 18.41 มิลลิเมตร

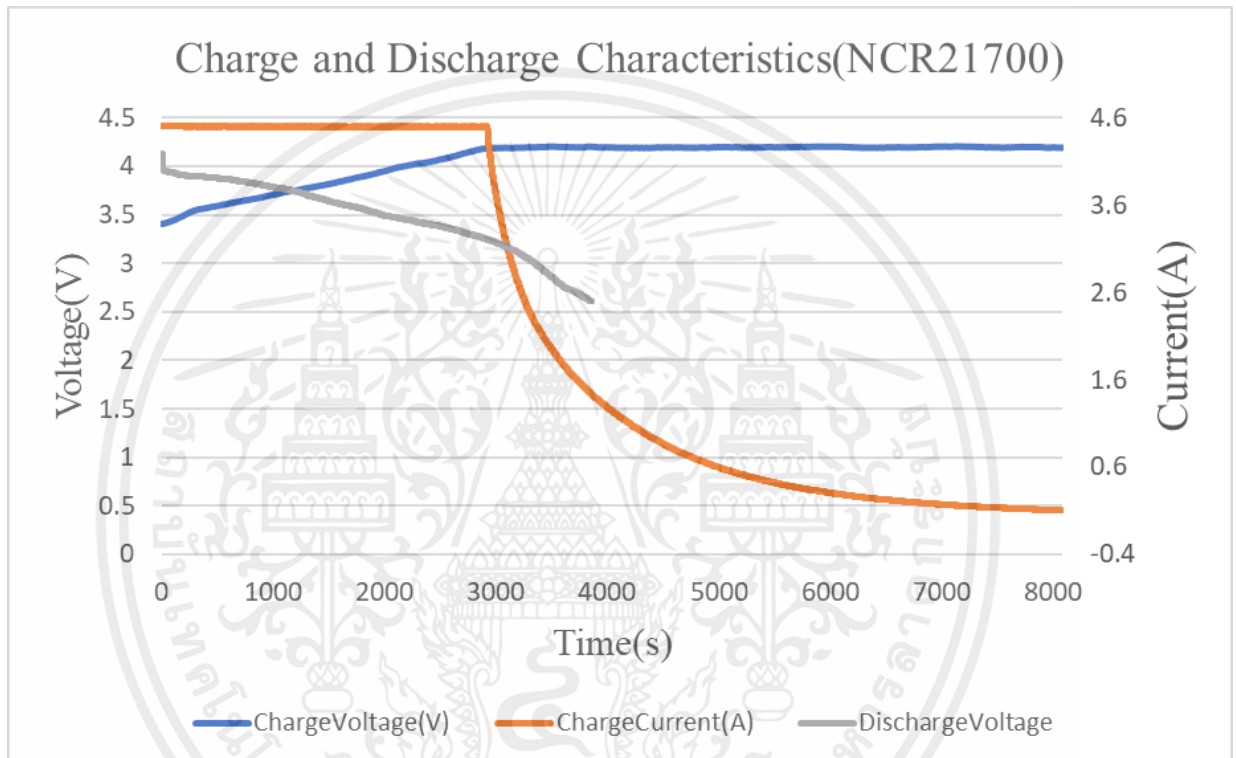


รูปที่ 4.9 รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ NCR18650

จากผลการทดลอง มีการบวมขึ้นของแบตเตอรี่ในส่วน พื้นที่หน้าตัดสีเขียว 0.25% พื้นที่หน้าตัดสีฟ้า 0.33% พื้นที่หน้าตัดสีแดง 0.07% และความยาว 0.03% โดยมีการชาร์จและดิสชาร์จทั้งหมด 15 รอบ

4.1.2 ชนิด NCR21700

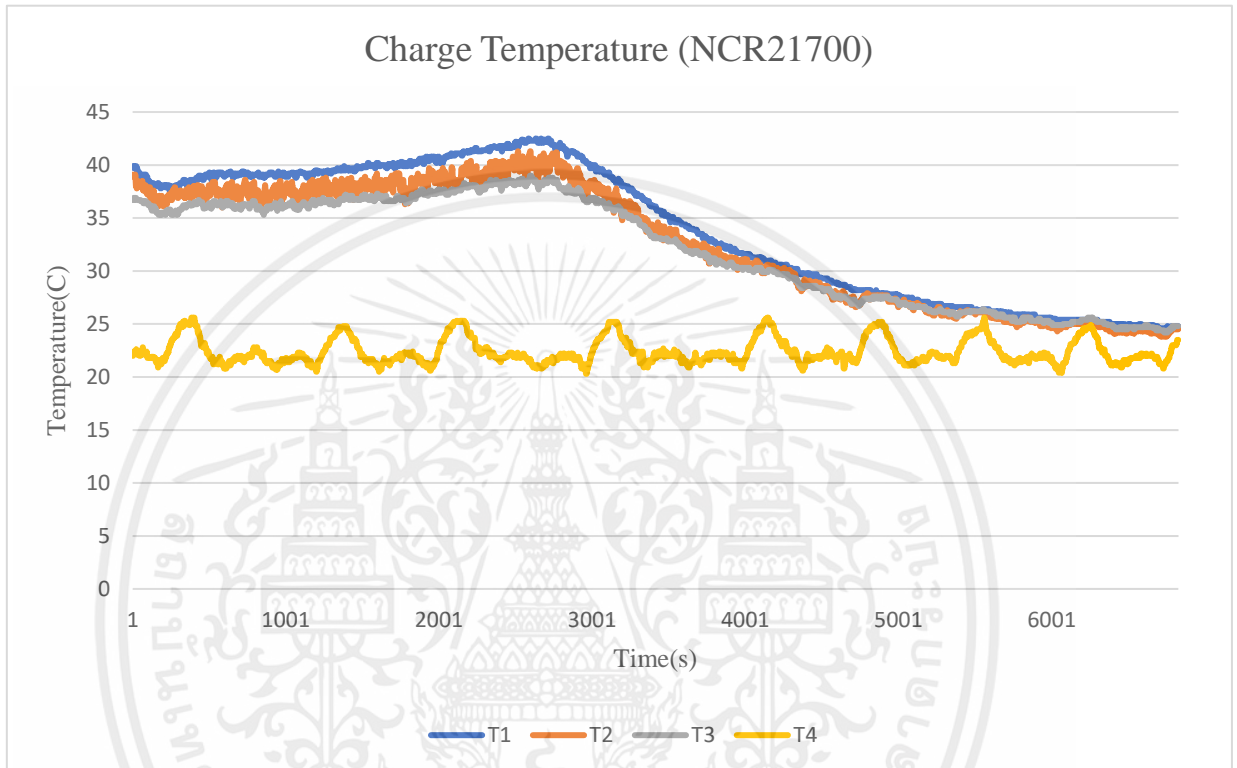
ข้อมูลการทดสอบชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่ตามอัตรา $C_{rate} = C/1$ ที่ได้จากการทดสอบจำนวน 15 ไซเคิล แสดงด้วยกราฟด้านล่างนี้ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) โดยที่เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่และเส้นกราฟสีส้มแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.10 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (NCR21700)

เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ NCR21700 มีดังนี้ ใช้กระแสชาร์จที่ $C_{rate} = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 4800 mAh แรงดันไฟชาร์จ 4.20 V และกระแสไฟสิ้นสุด 100 mA และใช้กระแสดิสชาร์จที่ $C_{rate} = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 4800 mAh แรงดันไฟตัด 2.5 V

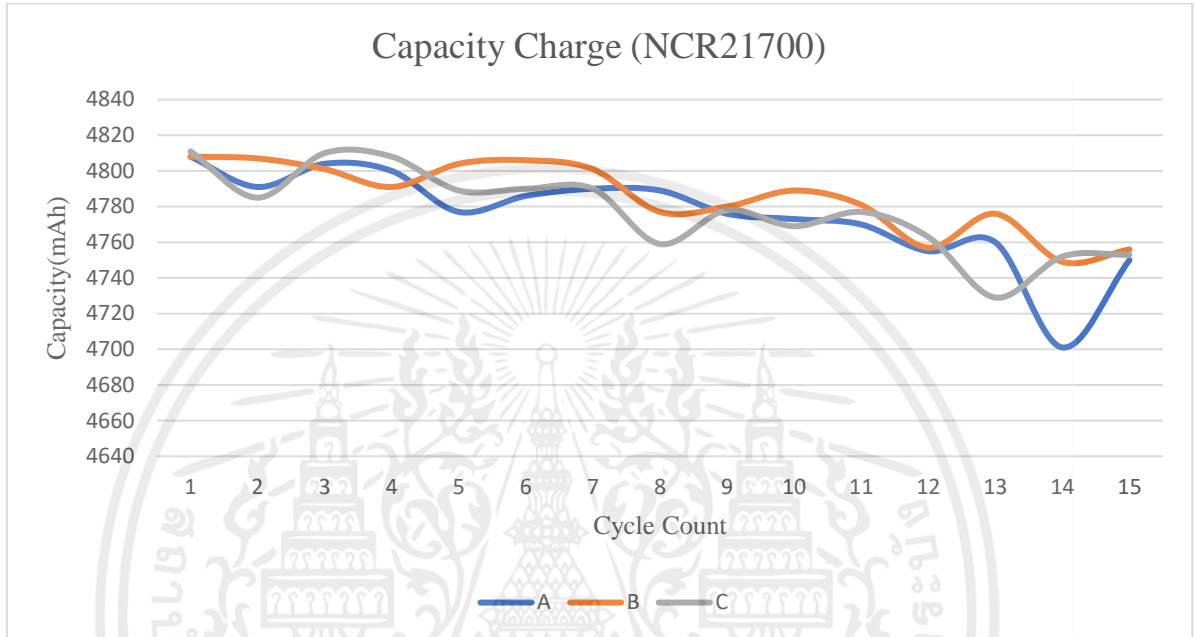
จาก รูปที่ 4.11 แสดงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาทดสอบ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยที่เส้นกราฟสีเหลืองแสดงถึงอุณหภูมิส่วนกลางของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีเทาแสดงถึงอุณหภูมิส่วนหัวของแบตเตอรี่โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิหัวบวกของแบตเตอรี่สุดท้ายเส้นกราฟสีส้มแสดงถึงอุณหภูมิของห้องที่ทดลอง



รูปที่ 4.11 กราฟ Charge Temperature (NCR21700)

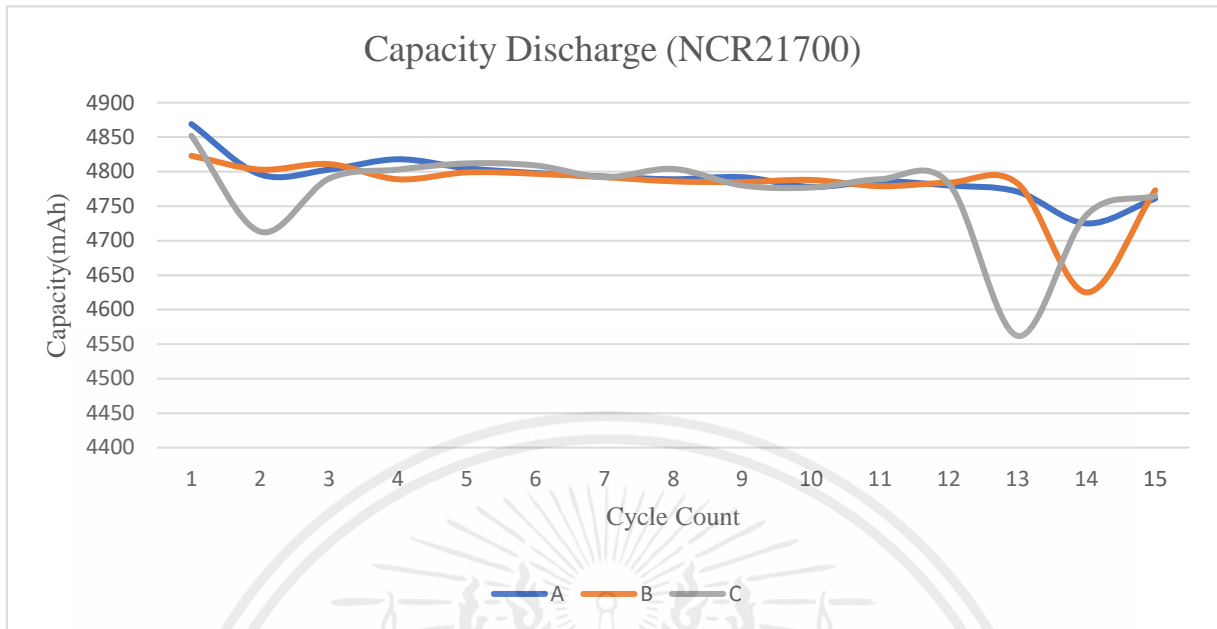
จาก รูปที่ 4.11 ในช่วงวินาทีที่ 3000 แบตเตอรี่มีค่าไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3.9 ถึง 4.2 โวลต์ ซึ่งอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงนี้อยู่ที่ประมาณ 36 องศาเซลเซียสถึง 42.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการชาร์จแบตเตอรี่

จาก รูปที่ 4.12 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการทดสอบจำนวน 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่าความจุของแบตเตอรี่ในหน่วย mAh โดยเส้นกราฟสีน้ำเงิน เส้นกราฟสีส้มและเส้นกราฟสีเทาแสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ A B และ C ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟ Capacity Charge (NCR21700)

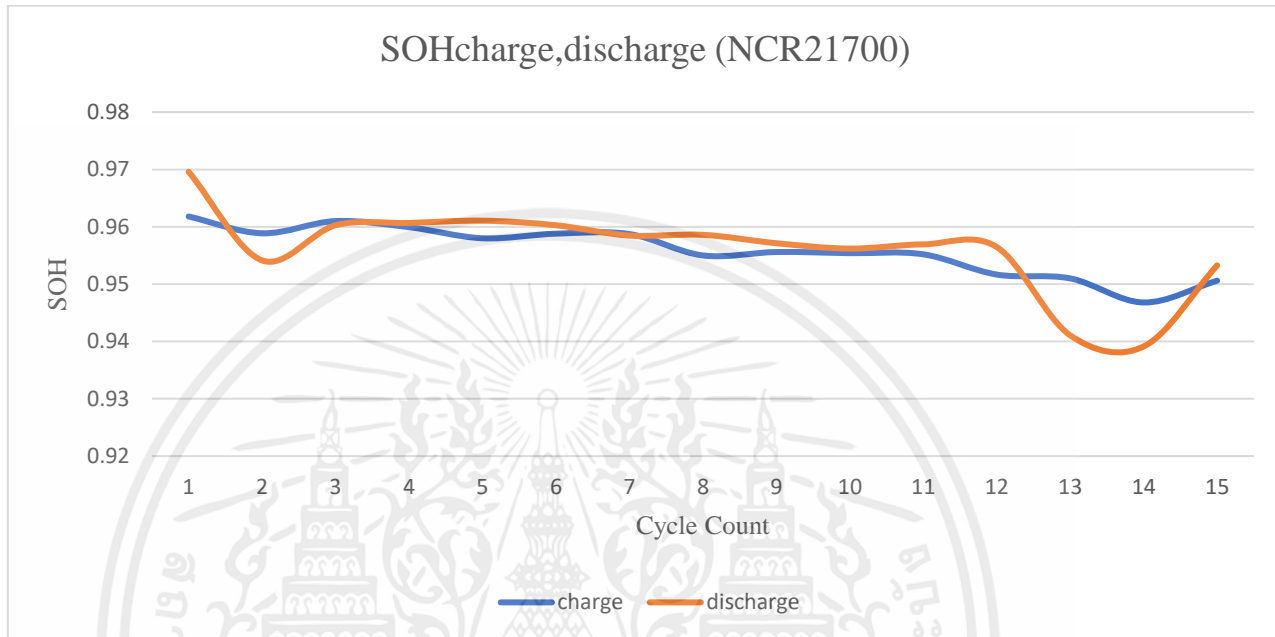
จาก รูปที่ 4.12 เมื่อสังเกตกราฟจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ทั้ง 3 ก้อนมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน ตั้งแต่ในช่วงรอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 15 โดยค่าความจุเริ่มต้นโดยประมาณอยู่ที่ 4,800-4,820 mAh และลดลงจนเหลือโดยประมาณ 4,740-4,760mAh



รูปที่ 4.13 กราฟ Capacity Discharge (NCR21700)

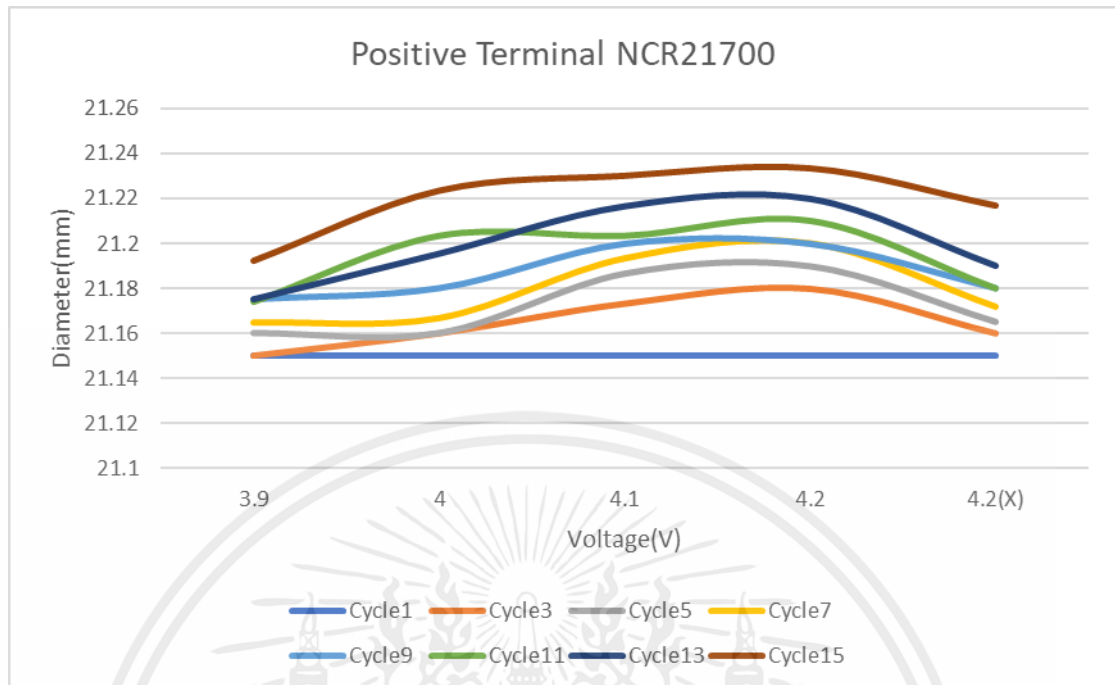
จาก รูปที่ 4.13 เมื่อสังเกตจะเห็นได้ว่าแบตเตอรี่ทั้ง 3 ก้อนมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกัน ตั้งแต่ในช่วงรอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 15 โดยค่าความจุเริ่มต้นโดยประมาณอยู่ที่ 4,800-4,850 mAh และลดลงจนเหลือโดยประมาณ 4,4750-4,800 mAh

จาก รูปที่ 4.14 แสดงค่า State of Health (SOH) ของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการคำนวณทั้งหมด 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่า SOH ของแบตเตอรี่โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่า SOH ของการชาร์จ ส่วนเส้นกราฟสีส้มแสดงค่า SOH ของการดิสชาร์จ



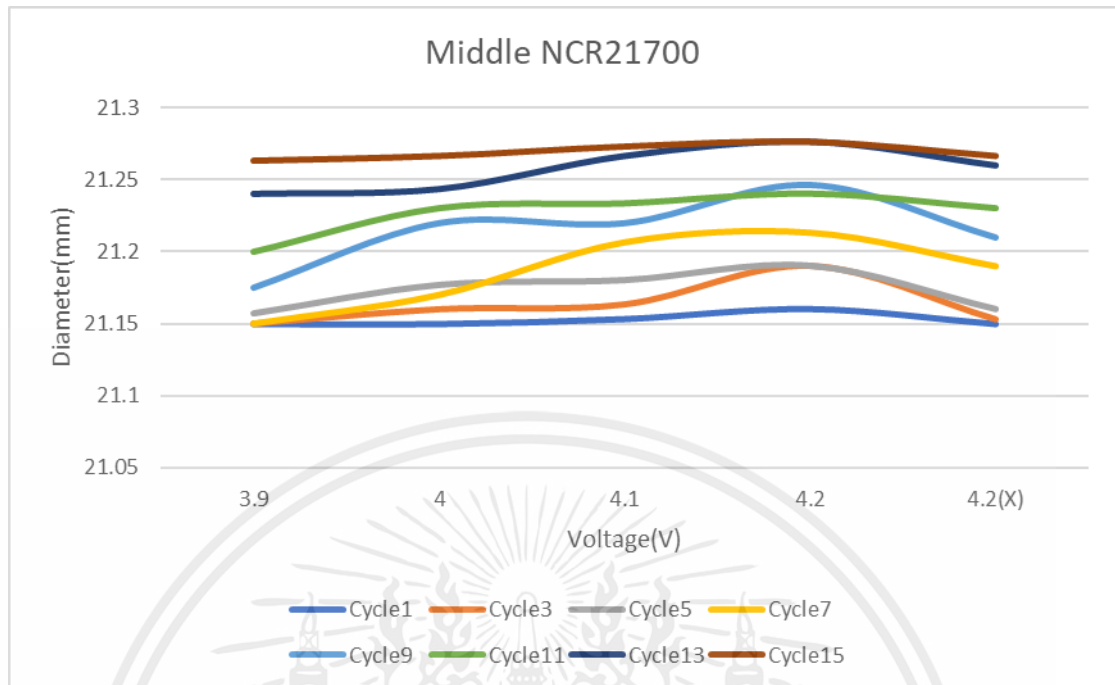
รูปที่ 4.14 กราฟ SOH Charge, Discharge (NCR21700)

จาก รูปที่ 4.14 เมื่อสังเกตจะเห็นได้ว่าค่า SOH หาได้จากการนำค่าความจุแบตเตอรี่ทั้ง 3 ก้อนมาเฉลี่ยกัน โดยกราฟเส้นสีน้ำเงิน ในช่วงรอบที่ 1 ถึงรอบที่ 12 มีค่า SOH เท่ากับ 0.96 และในช่วงที่ 13 ถึง 15 ค่า SOH ตกลงเหลือโดยประมาณ 0.95 กราฟเส้นสีส้ม ในช่วง 1 ถึง 2 รอบแรก ค่า SOH ตกลงจาก 0.97 เหลือโดยประมาณระหว่าง 0.95 และ 0.96 ในช่วง 3 ถึง 12 รอบ ค่า SOH มีอัตราที่คงที่ และในช่วง 13 ถึง 15 รอบ ค่า SOH ตกลงจาก 0.97 เหลือโดยประมาณระหว่าง 0.95 และ 0.96



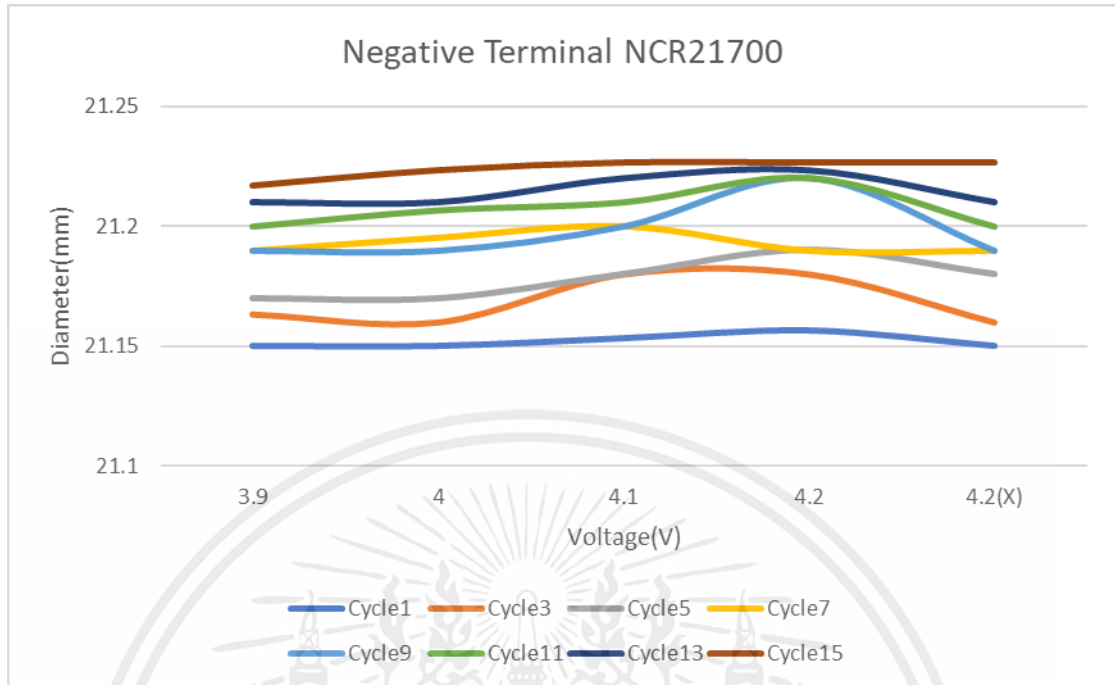
รูปที่ 4.15 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700)

จาก รูปที่ 4.15 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 21.23 มิลลิเมตร เป็น 21.22 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 21.15 มิลลิเมตรเป็น 21.22 มิลลิเมตร



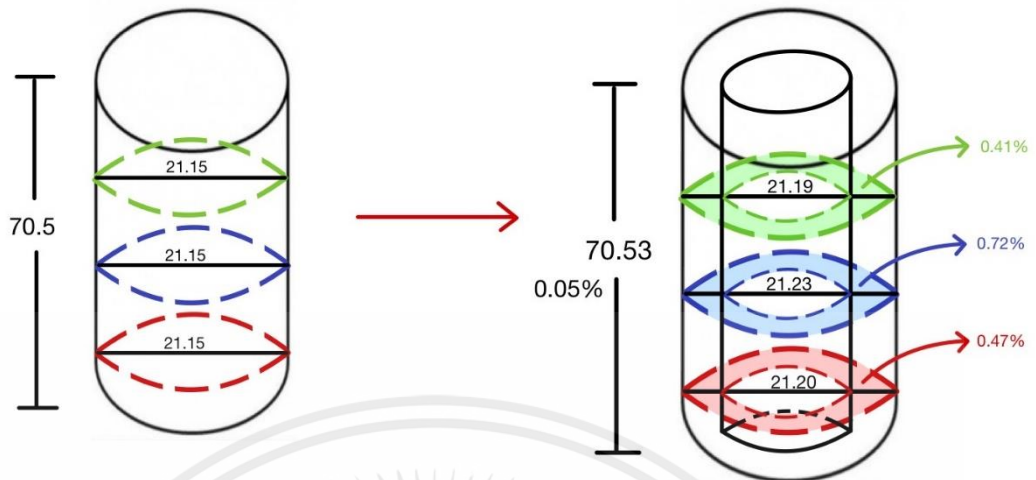
รูปที่ 4.16 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700)

จาก รูปที่ 4.16 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงน้อยมากหรืออาจสรุปได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 21.15 มิลลิเมตรเป็น 21.25 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(NCR21700)

จาก รูปที่ 4.17 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงน้อยมากหรืออาจสรุปได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 21.15 มิลลิเมตรเป็น 21.23 มิลลิเมตร

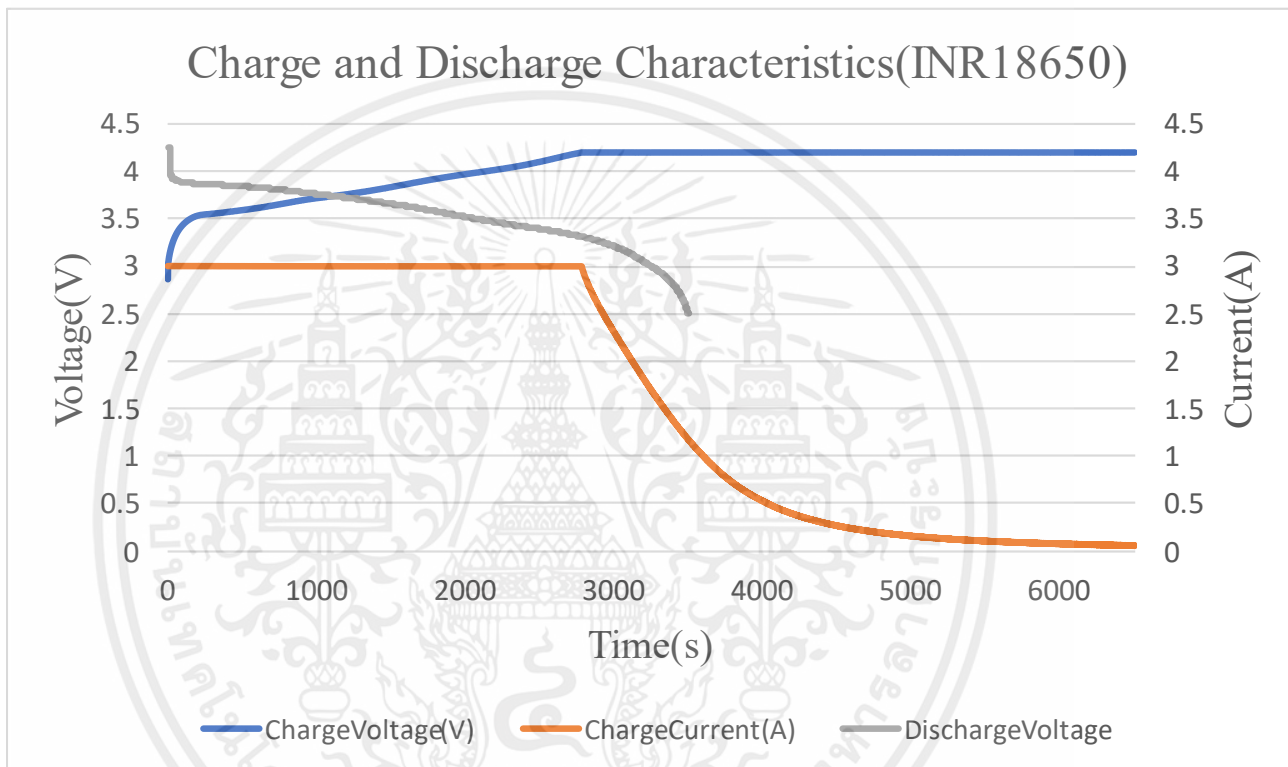


รูปที่ 4.18 รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ NCR21700

จากผลการทดลอง มีการบวมขึ้นของแบตเตอรี่ในส่วน พื้นที่หน้าตัดสีเขียว 0.41% พื้นที่หน้าตัดสีฟ้า 0.72% พื้นที่หน้าตัดสีแดง 0.47% และความยาว 0.05% โดยมีการชาร์จและดิสชาร์จทั้งหมด 15 รอบ

4.1.3 ชนิด INR18650

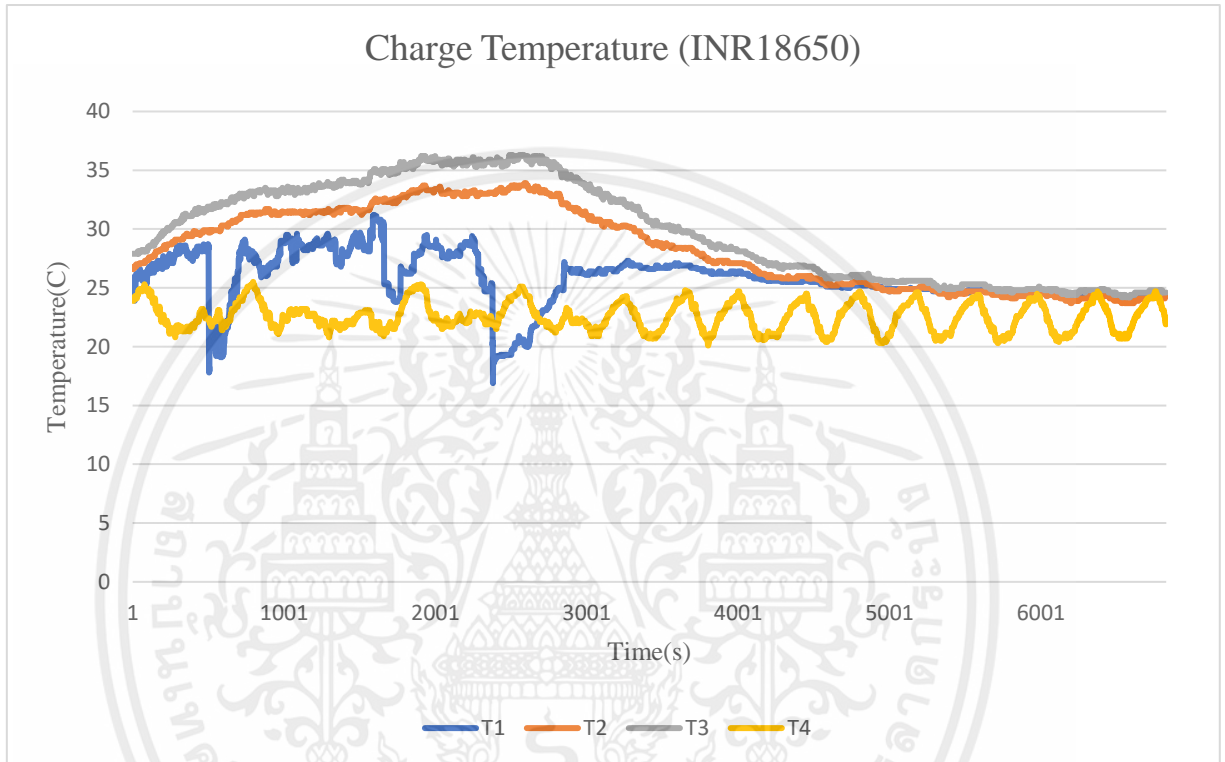
ข้อมูลการทดสอบชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่ตามอัตรา $Crate = C/1$ ที่ได้จากการทดสอบจำนวน 15 ซีกเซล แสดงด้วยกราฟด้านล่างนี้ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) โดยที่เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีส้มแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.19 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (INR18650)

เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ INR18650 มีดังนี้ ใช้กระแสชาร์จที่ $Crate = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 3000 mAh แรงดันไฟชาร์จ 4.20 V และกระแสไฟสิ้นสุด 50 mA และใช้กระแสดิสชาร์จที่ $Crate = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 3000 mAh แรงดันไฟตัด 2.5 V

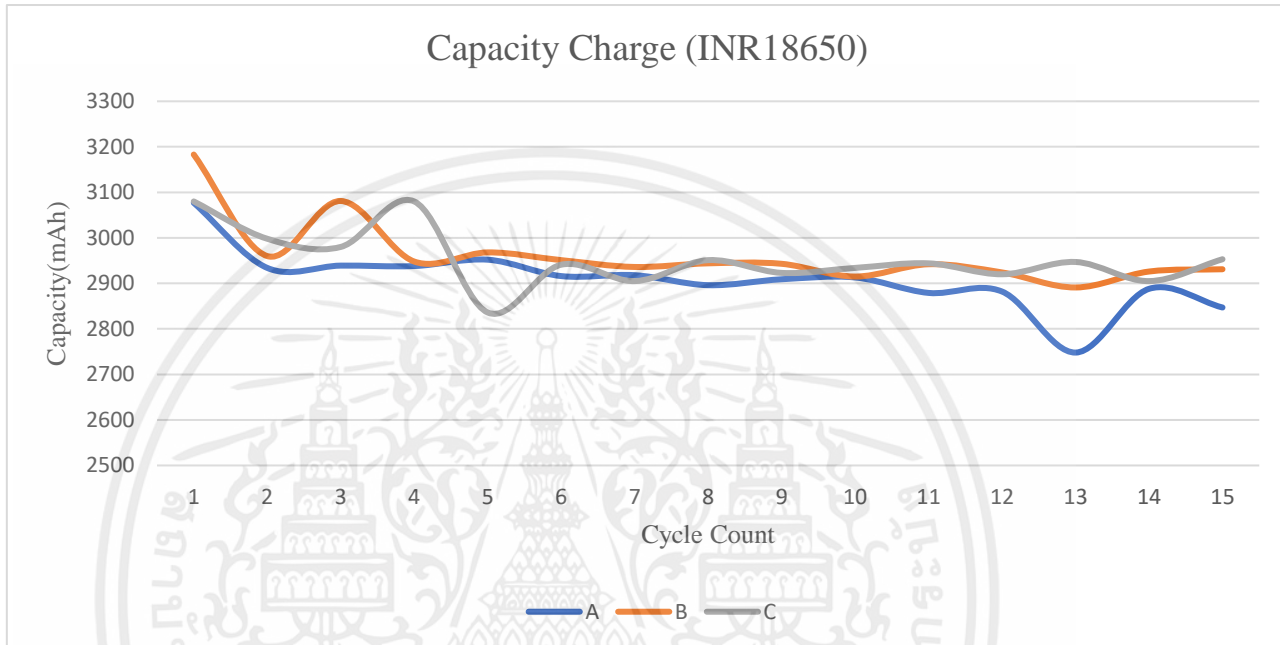
จาก รูปที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาทดสอบโดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยที่เส้นกราฟสีเหลืองแสดงถึงอุณหภูมิส่วนกลางของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีเทาแสดงถึงอุณหภูมิส่วนหัวของแบตเตอรี่โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิขั้วบวกของแบตเตอรี่ สุดท้ายเส้นกราฟสีส้มแสดงถึงอุณหภูมิของห้องที่ทดลอง



รูปที่ 4.20 กราฟ Charge Temperature (INR18650)

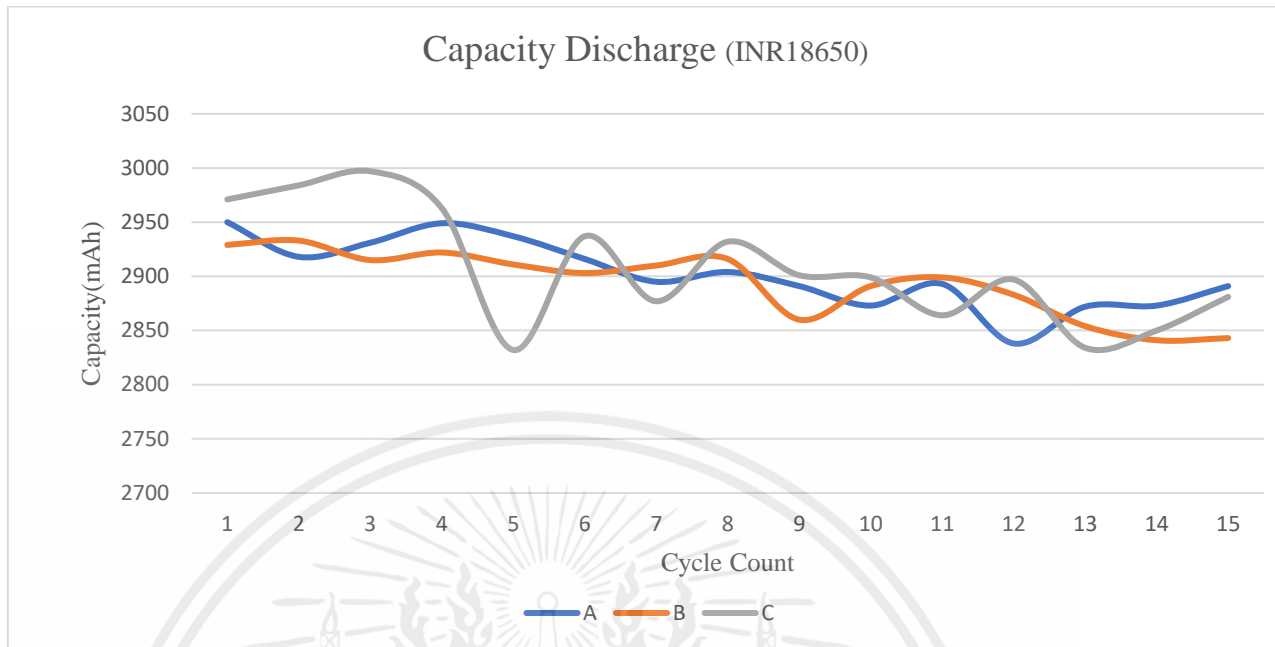
จาก รูปที่ 4.20 ในช่วงวินาทีที่ 1000 แบตเตอรี่มีค่าไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3.9 ถึง 4.2 โวลต์ ซึ่งอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงนี้อยู่ที่ประมาณ 33.9 องศาเซลเซียสถึง 36.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการชาร์จแบตเตอรี่

จาก รูปที่ 4.21 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการทดสอบจำนวน 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่าความจุของแบตเตอรี่ในหน่วย mAh โดยเส้นกราฟสีน้ำเงิน เส้นกราฟสีส้มและเส้นกราฟสีเทาแสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ A B และ C ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กราฟ Capacity Charge (INR18650)

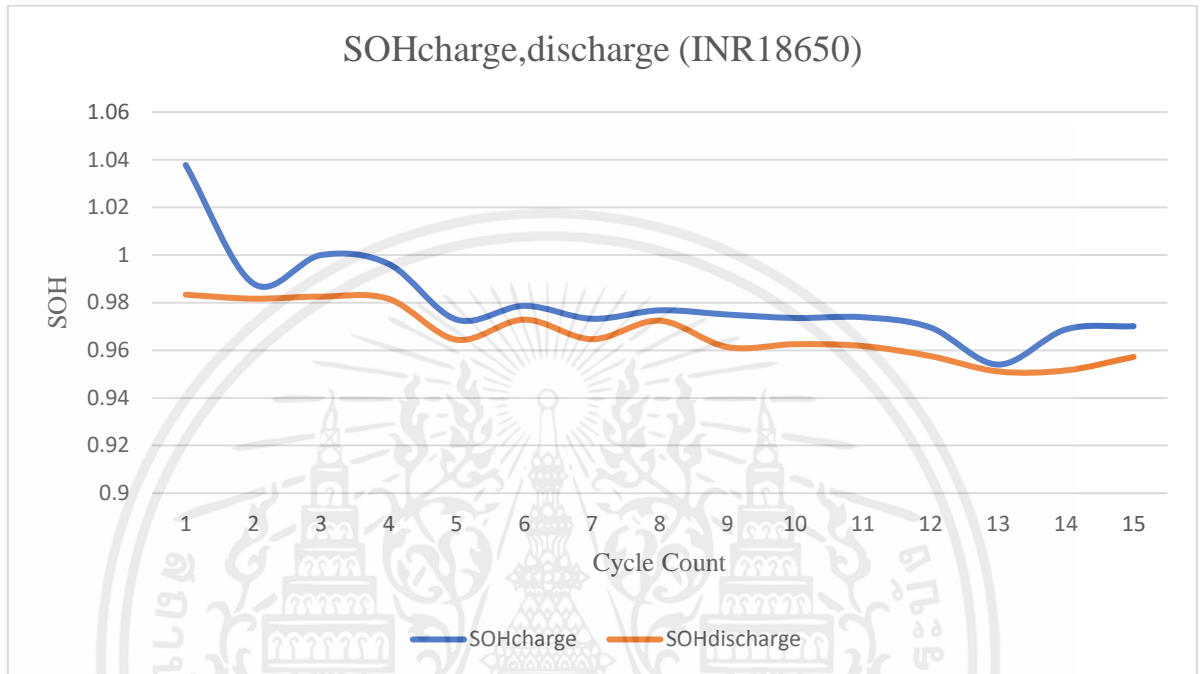
จาก รูปที่ 4.21 พบว่าในช่วงรอบแรกถึงรอบที่สอง กราฟเส้นสีน้ำเงินมีค่าความจุเริ่มต้นที่ 3,000 ถึง 3,100 mAh และลดลงเหลือประมาณ 2,900 ถึง 3,000 mAh ในช่วงรอบที่ 3 ถึงรอบที่ 12 ค่าความจุลดลงเหลือประมาณ 2,700 ถึง 2,800 mAh ในช่วงรอบที่ 13 ถึงรอบที่ 15 ค่าความจุเริ่มต้นเป็นประมาณ 2,800 ถึง 2,900 mAh ส่วนกราฟเส้นสีส้ม พบว่าในช่วงรอบแรกถึงรอบที่ 4 ค่าความจุเริ่มต้นเป็น 3,200 mAh และลดลงเหลือประมาณ 2,900 ถึง 3,000 mAh ในช่วงรอบที่ 5 ถึงรอบที่ 15 ค่าความจุเป็นค่าคงที่และเท่ากับ 2,900 mAh สุดท้าย กราฟเส้นสีเทา พบว่าในช่วงรอบแรกถึงรอบที่ 5 ค่าความจุลดลงจาก 3,100 mAh เหลือ 2,800 mAh และในช่วงรอบที่ 6 ถึงรอบที่ 15 อัตราการลดลงมีค่าคงที่และเท่ากับ 2,900 mA



รูปที่ 4.22 กราฟ Capacity Discharge (INR18650)

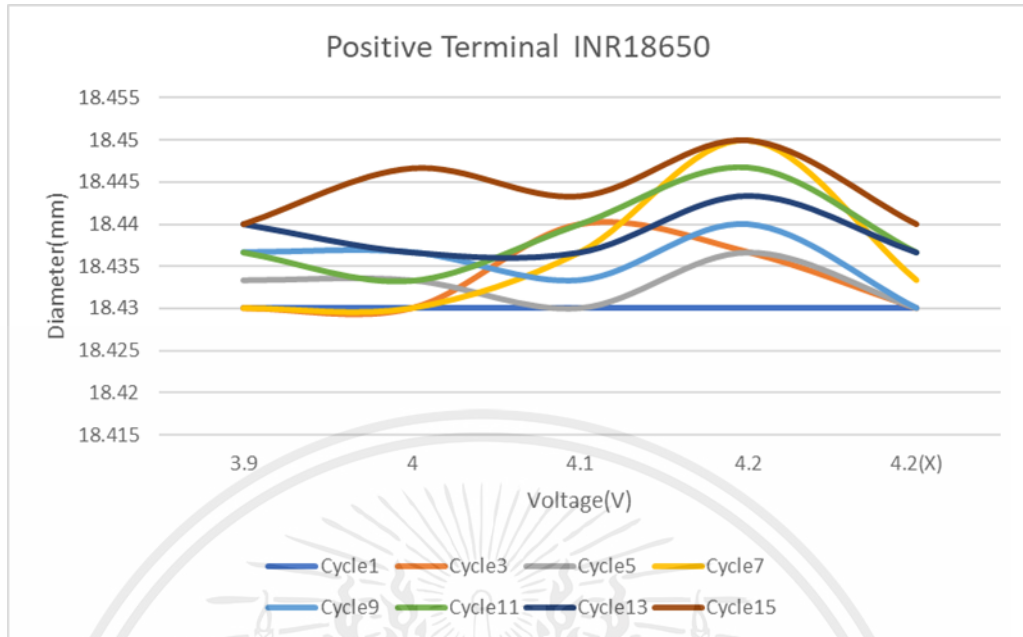
จาก รูปที่ 4.22 สามารถสรุปได้ว่ากราฟเส้นสีน้ำเงินและกราฟเส้นสีส้มมีแนวโน้มลดลงที่เท่ากันตั้งแต่รอบแรกจนถึงรอบที่ 15 โดยกราฟเส้นสีน้ำเงิน เริ่มต้นด้วยค่าความจุ 2,950 mAh ลดลงเหลือโดยประมาณ 2,850 ถึง 2,900 mAh ส่วนกราฟเส้นสีส้ม เริ่มต้นด้วยค่าความจุ 2,900 ถึง 2,950 mAh ลดลงเหลือโดยประมาณ 2,850 mAh โดยในช่วงรอบแรกถึงรอบที่ 6 กราฟเส้นสีเทามีค่าความจุ เริ่มต้น 2,950 ถึง 3,000 mAh ลดลงเหลือโดยประมาณ 2,900 ถึง 2,950 mAh และตั้งแต่รอบที่ 7 ถึงรอบที่ 15 กราฟเส้นสีเทามีอัตราการลดลงค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าความจุที่ใกล้เคียงกันเริ่มต้นและสิ้นสุดที่ 2,850 ถึง 2,900 mAh โดยสรุปคือ กราฟเส้นสีน้ำเงินและกราฟเส้นสีส้มมีแนวโน้มลดลงเท่ากัน ในขณะที่กราฟเส้นสีเทามีอัตราการลดลงค่อนข้างคงที่ในช่วงรอบที่ 7 ถึงรอบที่ 15 โดยมีค่าความจุที่ใกล้เคียงกัน เริ่มต้นและสิ้นสุดที่ 2,850 ถึง 2,900 mAh

จาก รูปที่ 4.23 แสดงค่า State of Health (SOH) ของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการคำนวณทั้งหมด 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่า SOH ของแบตเตอรี่ โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่า SOH ของการชาร์จ ส่วนเส้นกราฟสีส้มแสดงค่า SOH ของการดีสชาร์จ



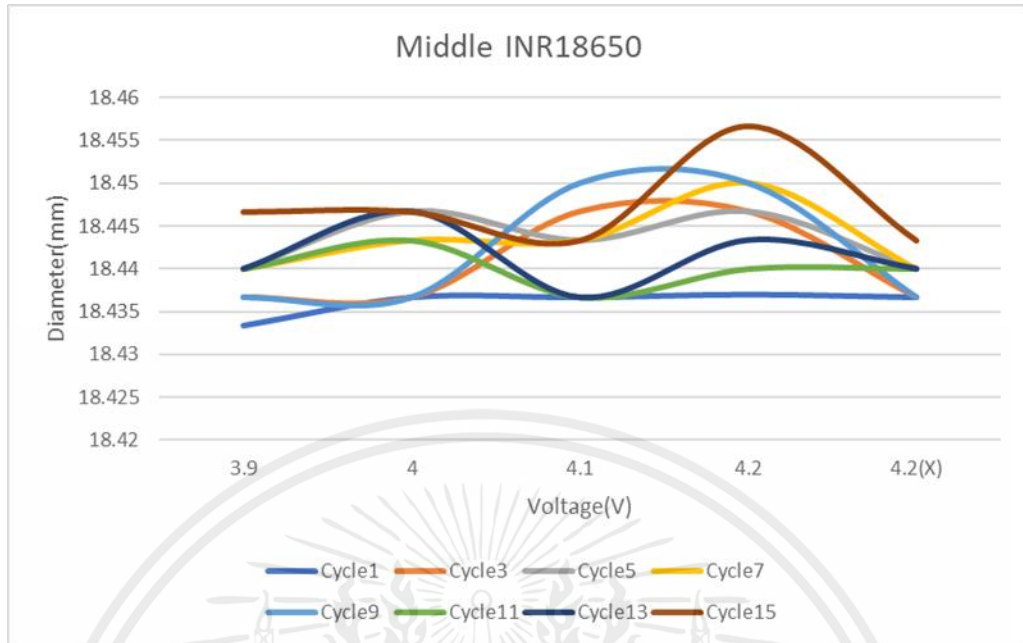
รูปที่ 4.23 กราฟ SOH Charge, Discharge (INR18650)

จาก รูปที่ 4.23 สามารถสรุปได้ว่าค่าสถานะของสถานะการใช้งานแบตเตอรี่หรือ SOH สามารถคำนวณได้จากการเฉลี่ยค่าความจุของแบตเตอรี่ทั้ง 3 ก่อนเข้าด้วยกัน โดยในกราฟเส้นสีน้ำเงินในช่วงรอบแรกถึงรอบที่ 3 ค่า SOH ลดลงจาก 1.04 เหลือโดยประมาณ 0.98 ถึง 1 และในช่วงรอบที่ 3 ถึงรอบที่ 15 ค่า SOH ลดลงอย่างช้าๆจนถึงประมาณ 0.96 ถึง 0.98 ส่วนกราฟเส้นสีส้มแสดงให้เห็นว่าค่า SOH ลดลงอย่างคงที่และช้ามากตั้งแต่ว่ารอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 15 โดยค่า SOH ลดลงจาก 1 เหลือโดยประมาณ 0.96 ถึง 0.98 โดยสรุปได้ว่า กราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงอัตราการลดลงของค่า SOH ที่สูงขึ้นในรอบแรก และช้าลงในช่วงรอบถัดไป ส่วนกราฟเส้นสีส้มแสดงให้เห็นว่าอัตราการลดลงของค่า SOH คงที่และช้ามากตลอดระยะเวลาที่สังเกตได้ ตั้งแต่ว่ารอบที่ 1 จนถึงรอบที่ 15 โดยค่า SOH ลดลงจาก 0.98 เหลือโดยประมาณ 0.96



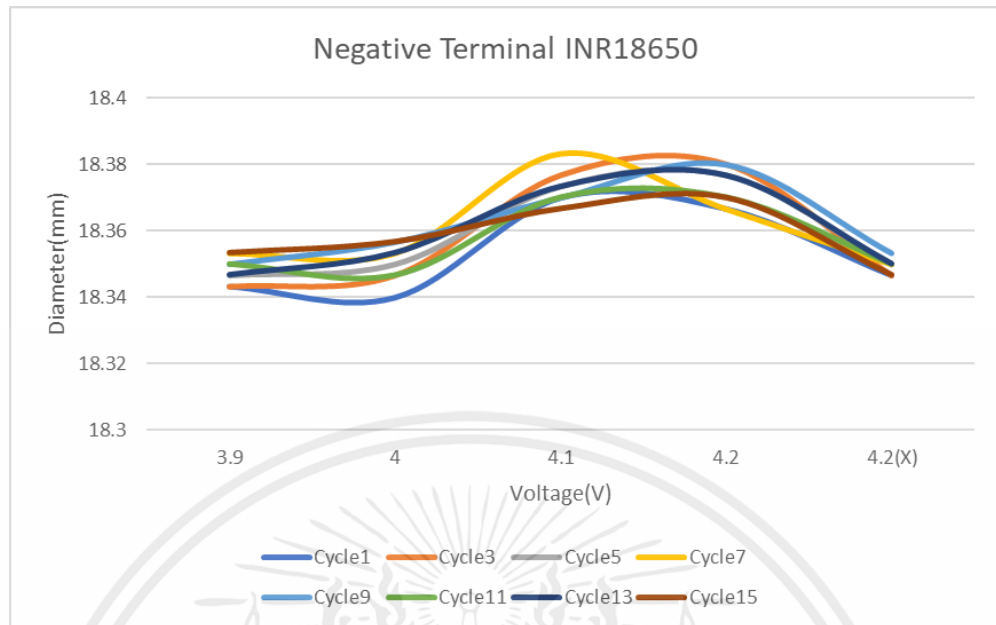
รูปที่ 4.24 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR18650)

จาก รูปที่ 4.24 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.45 มิลลิเมตร เป็น 18.44 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 18.43 มิลลิเมตรเป็น 18.44 มิลลิเมตร



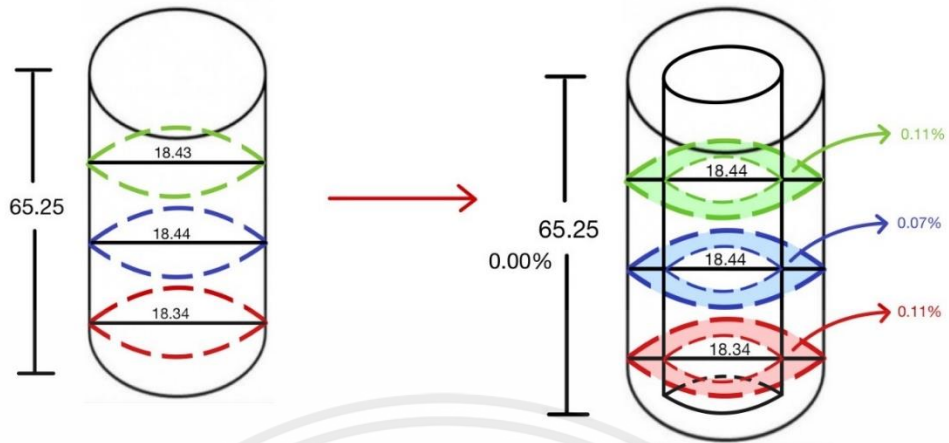
รูปที่ 4.25 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR18650)

จาก รูปที่ 4.25 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.455 มิลลิเมตร เป็น 18.445 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นขนาดของแบตเตอรี่ก็มีขนาดเพิ่มขึ้นโดยประมาณจาก 18.435 มิลลิเมตรเป็น 18.444 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.26 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ชนิดชาร์จ(INR18650)

จาก รูปที่ 4.26 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 18.38 มิลลิเมตร เป็น 18.35 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นจะสังเกตได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

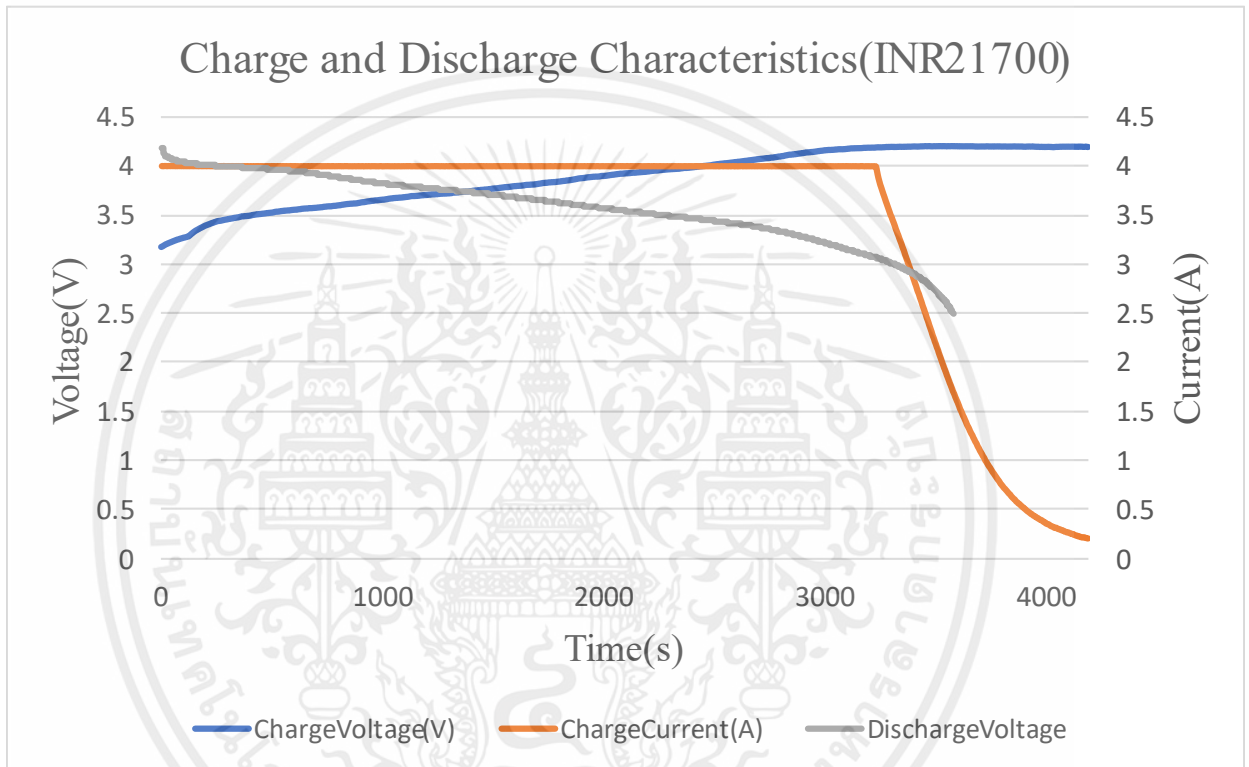


รูปที่ 4.27 รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ INR18650

จากผลการทดลอง มีการบวมขึ้นของแบตเตอรี่ ในส่วน พื้นที่หน้าตัดสีเขียว 0.11% พื้นที่หน้าตัดสีฟ้า 0.07% พื้นที่หน้าตัดสีแดง 0.11% และความยาว 0.00% โดยมีการชาร์จและดิสชาร์จทั้งหมด 15 รอบ

4.1.4 ชนิด INR21700

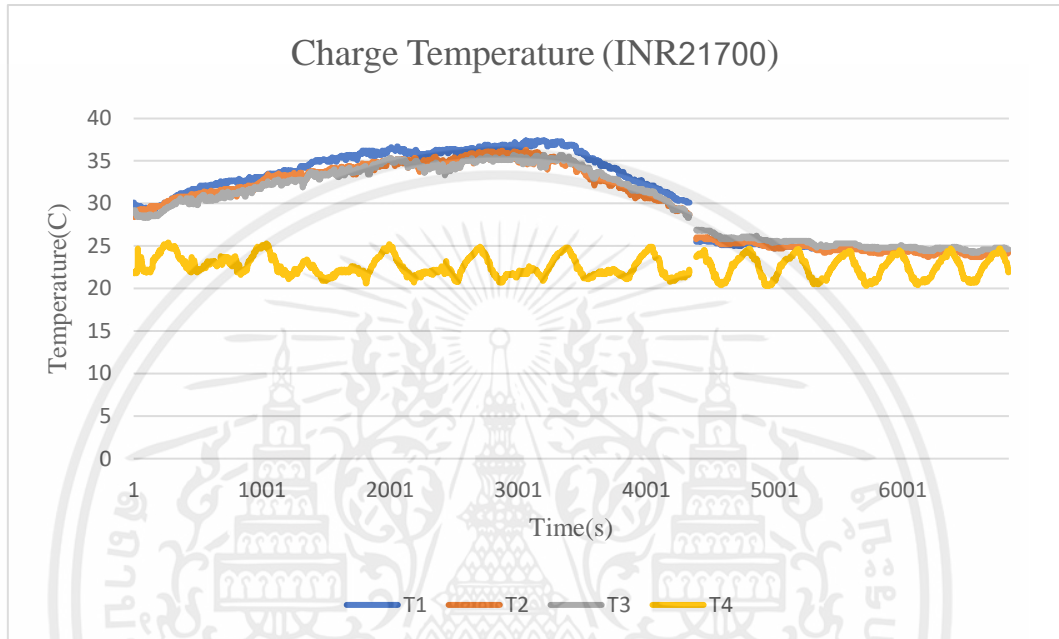
ข้อมูลการทดสอบชาร์จและดิสชาร์จแบตเตอรี่ตามอัตรา $C_{rate} = C/1$ ที่ได้จากการทดสอบจำนวน 15 ไซเคิล แสดงด้วยกราฟด้านล่างนี้ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) โดยที่เส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีส้มแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 4.28 กราฟ Charge and Discharge Characteristics (INR21700)

เงื่อนไขการทดลองสำหรับการทดสอบแบตเตอรี่ INR21700 มีดังนี้ ใช้กระแสชาร์จที่ $C_{rate} = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 4000 mAh แรงดันไฟชาร์จ 4.20 V, และกระแสไฟสิ้นสุด 200 mA และใช้กระแสดิสชาร์จที่ $C_{rate} = C/1$ โดยแบตเตอรี่มีความจุอยู่ที่ 4000 mAh แรงดันไฟตัด 2.5 V

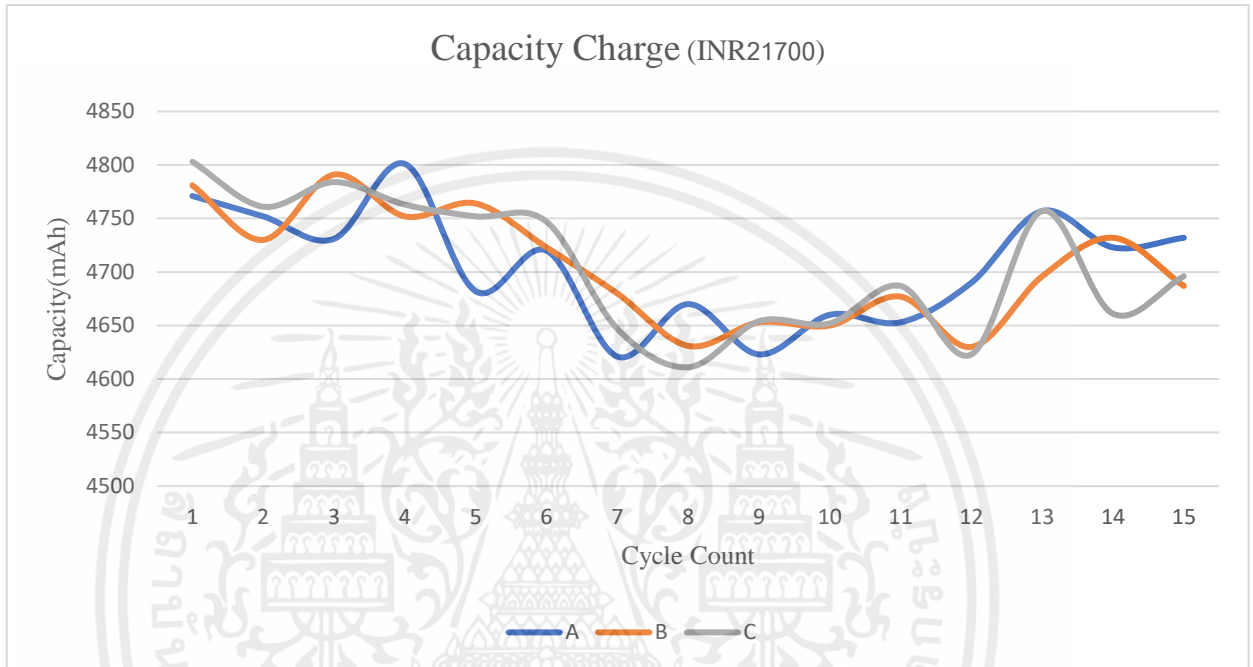
จาก รูปที่ 4.29 แสดงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาทดสอบ โดยแกน x เป็นเวลาในการทดสอบ (วินาที) และแกน y เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) โดยที่เส้นกราฟสีเหลืองแสดงถึงอุณหภูมิส่วนกลางของแบตเตอรี่ และเส้นกราฟสีเทาแสดงถึงอุณหภูมิส่วนหัวของแบตเตอรี่ โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงอุณหภูมิขั้วบวกของแบตเตอรี่ สุดท้ายเส้นกราฟสีส้มแสดงถึงอุณหภูมิของห้องที่ทดลอง



รูปที่ 4.29 กราฟ Charge Temperature (INR21700)

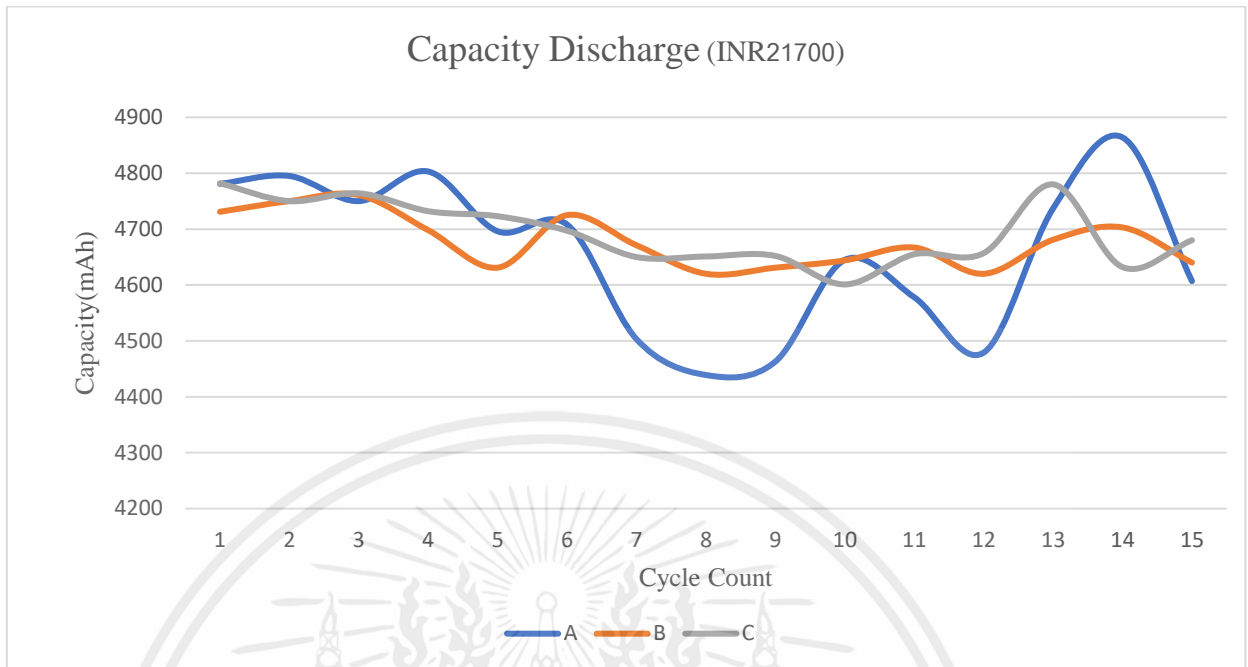
จาก รูปที่ 4.29 ในช่วงวินาทีที่ 2000 แบตเตอรี่มีค่าไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 3.9 ถึง 4.2 โวลต์ ซึ่งอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในช่วงนี้อยู่ที่ประมาณ 34.8 องศาเซลเซียสถึง 37.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดในการชาร์จแบตเตอรี่

จาก รูปที่ 4.30 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการทดสอบจำนวน 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่าความจุของแบตเตอรี่ในหน่วย mAh โดยเส้นกราฟสีน้ำเงิน เส้นกราฟสีส้มและเส้นกราฟสีเทาแสดงค่าความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ A B และ C ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 กราฟ Capacity Charge (INR21700)

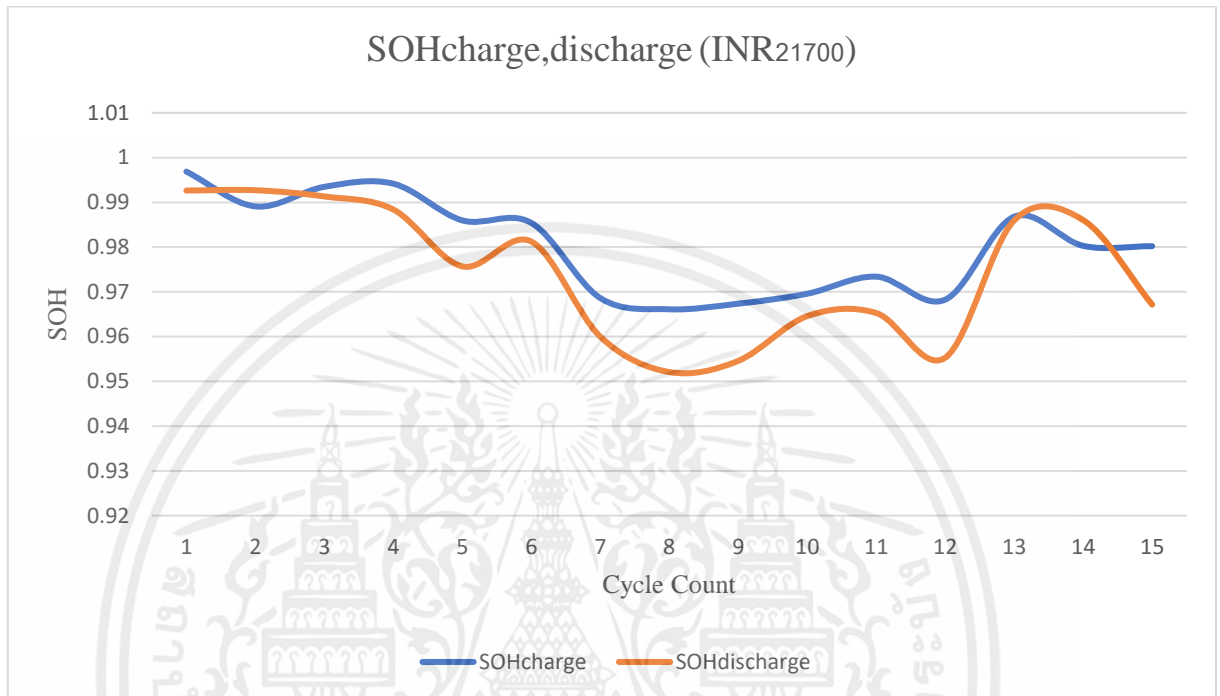
จาก รูปที่ 4.30 กราฟเส้นสีส้มและกราฟเส้นสีเทาในช่วง หนึ่ง ถึง 9 รอบแรกมีอัตราการลดลงที่ใกล้เคียงกันโดยเริ่มต้น ค่าความจุโดยประมาณ 4,750 ถึง 4,800 mAh และ ลดลงเหลือโดยประมาณ 4,650 mAh และในช่วงรอบที่ 10 ถึงรอบที่ 15 ถัดไปค่าความจุลดลงเหลือโดยประมาณ 4,700 mAh และกราฟเส้นสีน้ำเงินมีอัตราการลดลงในช่วง หนึ่ง ถึง 7 รอบแรกโดยเริ่มต้นค่าความจุอยู่ประมาณ 4,750 ถึง 4,800 mAh ลดลงเหลือโดยประมาณ 4,600 ถึง 4,650 mAh และในช่วงรอบที่ 8 ถึงรอบที่ 15 ค่าความจุลดลงเหลือโดยประมาณ 4,700 ถึง 4,750 mAh



รูปที่ 4.31 กราฟ Capacity Discharge (INR21700)

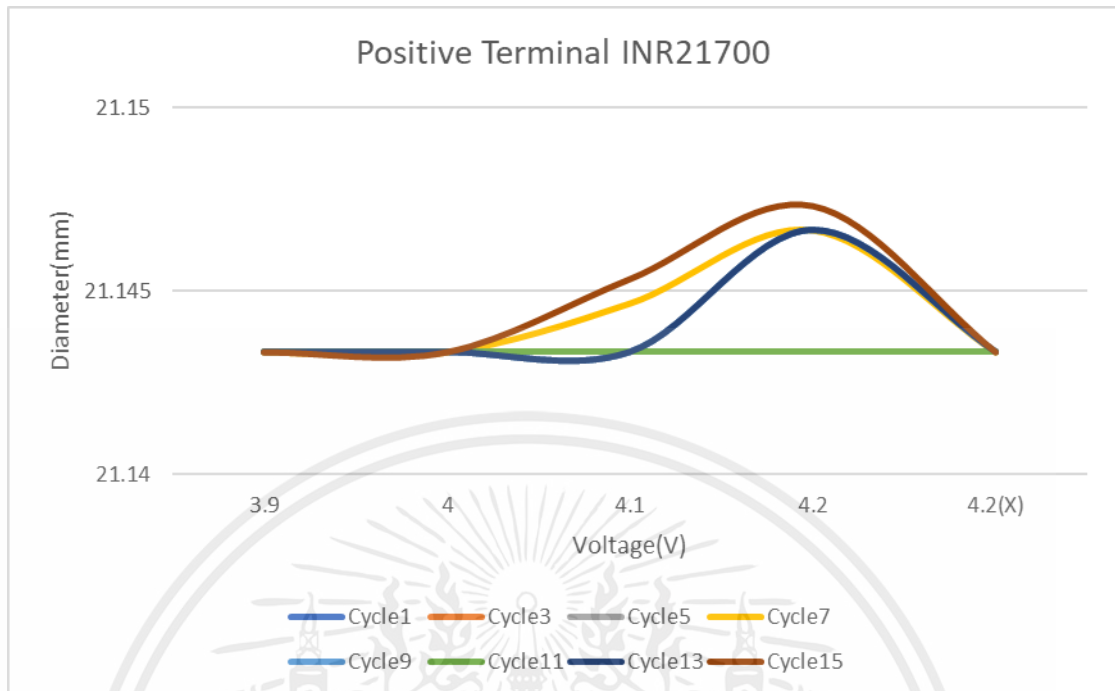
จาก รูปที่ 4.31 สรุปได้ว่าในช่วง หนึ่ง ถึง 9 รอบแรก กราฟเส้นสีส้มและกราฟเส้นสีเทา มีค่าความจุเริ่มต้นประมาณ 4,750 ถึง 4,800 mAh และลดลงเหลือประมาณ 4,650 mAh โดยอัตราการลดลงใกล้เคียงกัน ในช่วงรอบที่ 10 ถึงรอบที่ 15 ค่าความจุลดลงเหลือประมาณ 4,700 mAh ส่วนกราฟเส้นสีน้ำเงินมีการลดลงในช่วง หนึ่ง ถึง 7 รอบแรกโดยค่าความจุเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 4,750 ถึง 4,800 mAh ลดลงเหลือประมาณ 4,600 ถึง 4,650 mAh และในช่วงรอบที่ 8 ถึงรอบที่ 15 ค่าความจุลดลงเหลือประมาณ 4,700 ถึง 4,750 mAh ดังนั้นกราฟเส้นสีส้มและกราฟเส้นสีเทามีอัตราการลดลงใกล้เคียงกัน ในช่วง หนึ่ง ถึง 9 รอบแรก และค่าความจุลดลงเหลือประมาณ 4,650 mAh ในช่วงรอบที่ 10 ถึงรอบที่ 15 ส่วนกราฟเส้นสีน้ำเงินมีการลดลงในช่วง หนึ่ง ถึง 7 รอบแรกโดยค่าความจุเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 4,750 ถึง 4,800 mAh และค่าความจุลดลงเหลือประมาณ 4,600 ถึง 4,650 mAh ในช่วงรอบที่ 8 ถึงรอบที่ 15

จาก รูปที่ 4.32 แสดงค่า State of Health (SOH) ของแบตเตอรี่ซึ่งได้จากการคำนวณทั้งหมด 15 รอบ โดยแกน x แสดงจำนวนรอบของแบตเตอรี่ และแกน y แสดงค่า SOH ของแบตเตอรี่ โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงค่า SOH ของการชาร์จ ส่วนเส้นกราฟสีส้มแสดงค่า SOH ของการดิสชาร์จ



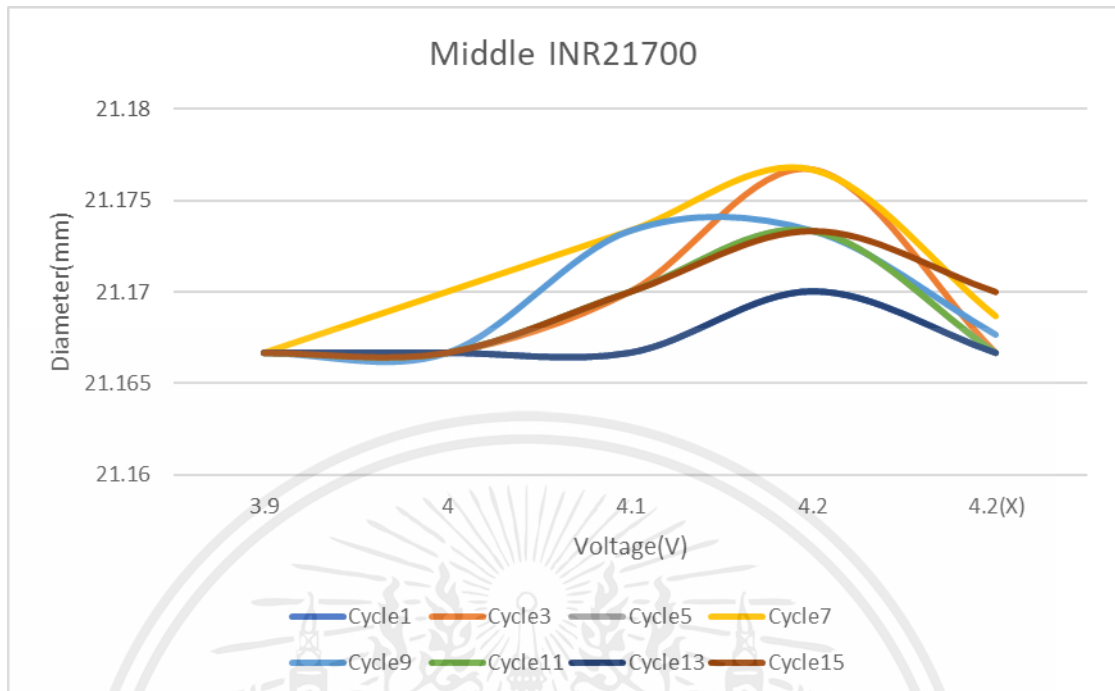
รูปที่ 4.32 กราฟ SOH Charge, Discharge (INR21700)

จาก รูปที่ 4.32 พบว่าค่าสถานะของสถานะความพร้อมของแบตเตอรี่หรือ SOH สามารถคำนวณได้จากการเฉลี่ยค่าความจุของแบตเตอรี่ที่ 3 ก่อน เมื่อวัดในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ โดยเส้นกราฟสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงอัตราการลดลงของค่า SOH ในช่วงรอบที่ 1-7 โดยค่า SOH ลดลงจาก 0.99 ลงเหลือประมาณ 0.96-0.97 และเส้นกราฟสีส้มแสดงให้เห็นถึงอัตราการลดลงของค่า SOH ในช่วงรอบที่ 1-7 โดยค่า SOH ลดลงจาก 0.99 ลงเหลือประมาณ 0.95-0.96 และในช่วงรอบที่ 8-15 ค่า SOH ลดลงเหลือประมาณ 0.96-0.97



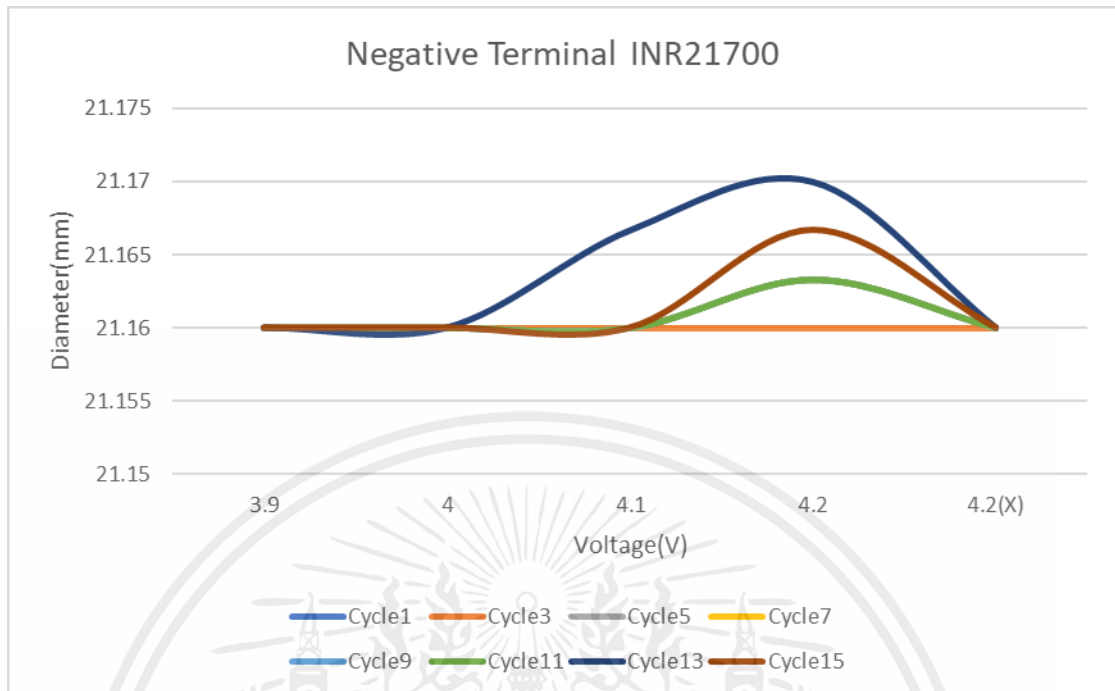
รูปที่ 4.33 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR21700)

จาก รูปที่ 4.33 Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่ แรงดันไฟฟ้า อยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 21.147 มิลลิเมตรเป็น 21.143 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นจะสังเกตได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



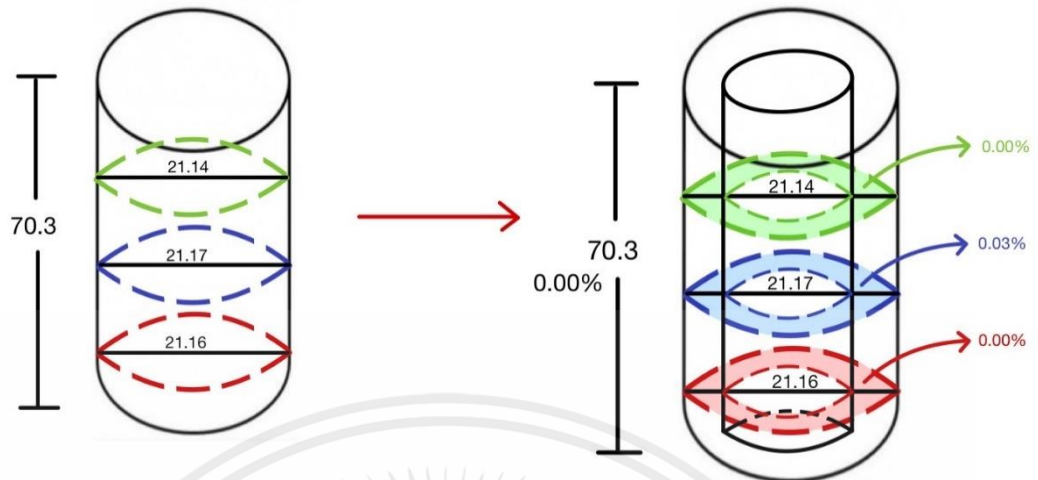
รูปที่ 4.34 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR21700)

จาก รูปที่ 4.34 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 21.176 มิลลิเมตร เป็น 21.168 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นจะสังเกตได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยประมาณจาก 21.166 มิลลิเมตรเป็น 21.17 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.35 กราฟ แสดงขนาดของแบตเตอรี่ขณะชาร์จ(INR21700)

จาก รูปที่ 4.35 แต่ละ Cycle ของแบตเตอรี่นั้นจะมีการพองตัวมากที่สุดคือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 4.1-4.2 V เพราะเนื่องจากในช่วงเวลานั้นแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงและหลังจากทิ้งแบตเตอรี่ไว้ 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องจะเห็นว่าแบตเตอรี่มีขนาดเล็กลงโดยประมาณจาก 21.17 มิลลิเมตร เป็น 21.16 มิลลิเมตร และยังจะเห็นว่ายิ่งจำนวน Cycle เพิ่มมากขึ้นจะสังเกตได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

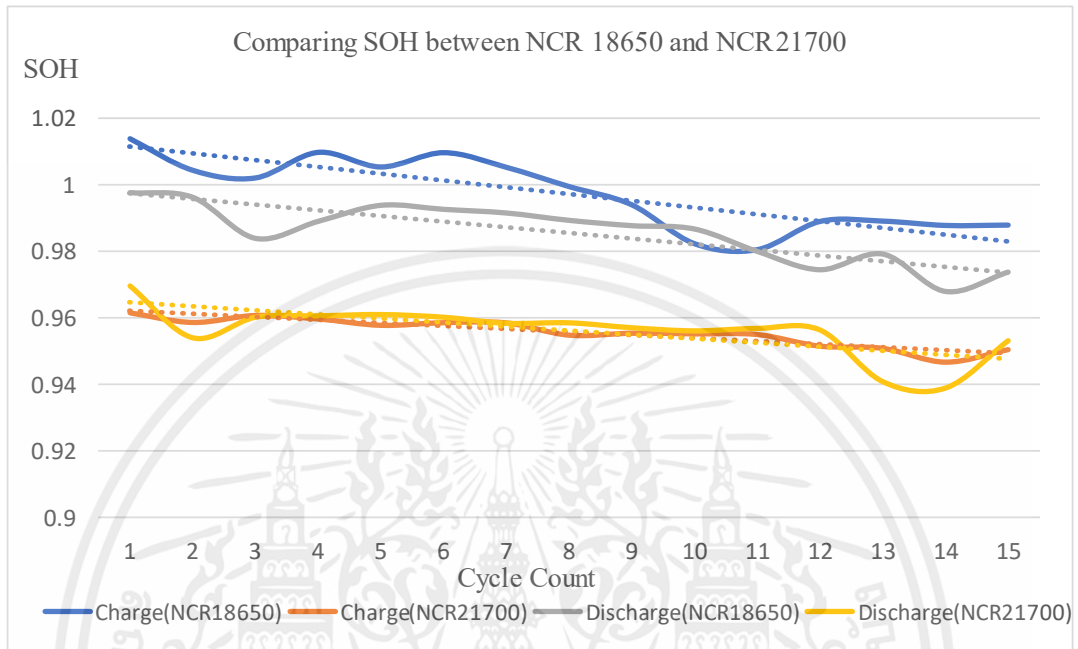


รูปที่ 4.36 รูปแสดงลักษณะการพองตัวของ INR21700

จากผลการทดลอง มีการบวมขึ้นของแบตเตอรี่ ในส่วน พื้นที่หน้าตัดสีเขียว 0.00%
พื้นที่หน้าตัดสีฟ้า 0.03% พื้นที่หน้าตัดสีแดง 0.00% และความยาว 0.00% โดยมีการชาร์จและดิสชาร์จ
ทั้งหมด 15 รอบ

4.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

4.2.1 เปรียบเทียบ NCR18650 และ NCR21700

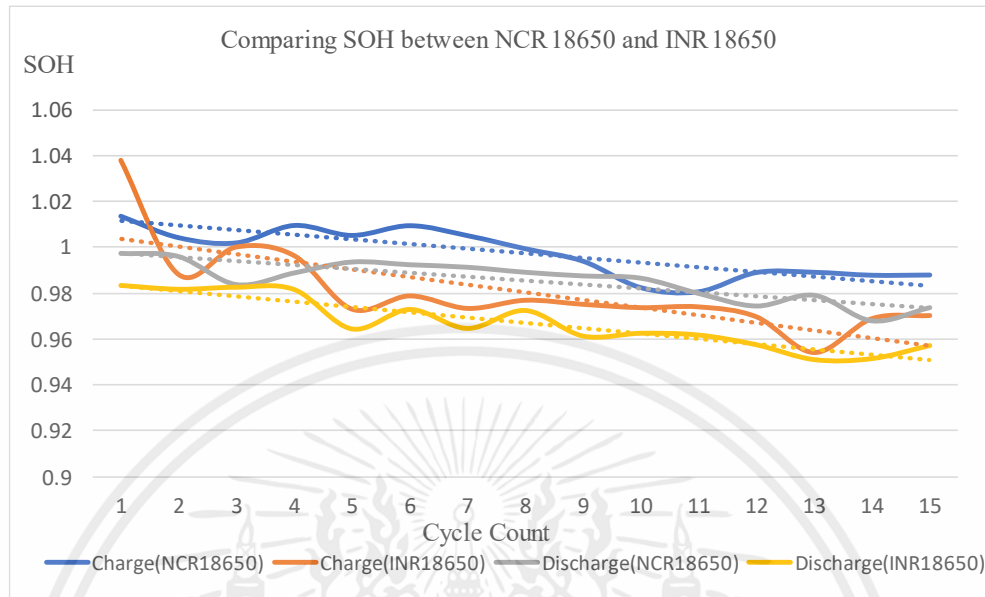


รูปที่ 4.37 กราฟ Comparing SOH between NCR18650 and NCR21700

จาก รูปที่ 4.37 สังเกตได้ว่าทั้งแบตเตอรี่ NCR18650 และ NCR21700 มีการลดค่า State of Health, SOH ตลอดรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ NCR18650 มีค่าเฉลี่ยของ SOH ที่สูงกว่าแบตเตอรี่ NCR21700 ในช่วง 15 รอบแรกของการใช้งาน ในการเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มของเส้นสีฟ้าและสีส้ม สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีฟ้า (NCR18650) มีความเสื่อมสภาพของ SOH มากกว่าเส้นสีส้ม (NCR21700) ถัดมาในการเปรียบเทียบเส้นสีเทาและสีเหลือง สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีเทา (NCR21700) มีความเสื่อมสภาพของ SOH มากกว่าเส้นสีเหลือง (NCR18650)

เหตุผลที่ NCR18650 มีอัตราการเสื่อมสภาพสูงกว่า NCR21700 อาจเกี่ยวข้องกับพื้นผิวของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ NCR18650 มีขนาดเล็กกว่า NCR21700 ซึ่งหมายความว่าพื้นผิวเล็กกว่า ซึ่งทำให้แบตเตอรี่ NCR18650 มีพื้นผิวเพื่อการละลายความร้อนเล็กกว่า NCR21700 ซึ่งทำให้มีความยากต่อการละลายความร้อนมากกว่า NCR21700 ดังนั้น อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้นและพลังงานจะสูญเสียในรูปแบบของความร้อน ซึ่งส่งผลให้มีอัตราการเสื่อมสภาพของ SOH สูงขึ้นสำหรับ NCR18650 เมื่อเปรียบเทียบกับ NCR21700

4.2.2 เปรียบเทียบ NCR18650 และ INR18650

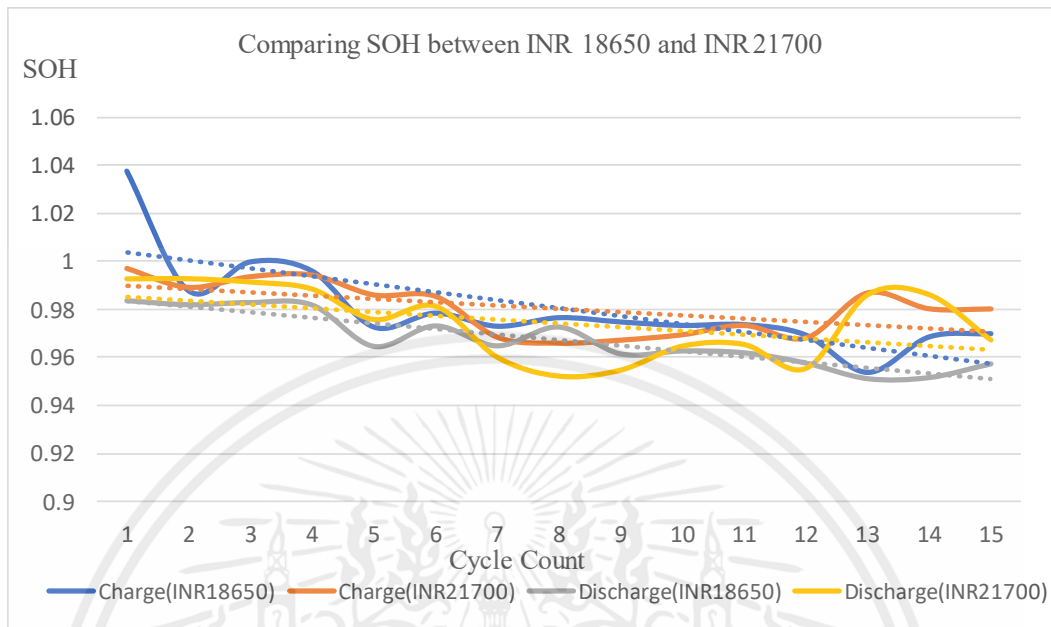


รูปที่ 4.38 กราฟ Comparing SOH between NCR18650 and INR18650

จาก รูปที่ 4.38 สังเกตได้ว่าทั้งแบตเตอรี่ INR18650 และ NCR18650 มีการลดค่า State of Health, SOH ตลอดรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ NCR18650 มีค่าเฉลี่ยของ SOH ที่สูงกว่าแบตเตอรี่ INR18650 ในช่วง 15 รอบแรกของการใช้งาน ในการเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มของเส้นสีส้มและสีฟ้า สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีส้ม (NCR18650) มีความเสื่อมสภาพของ SOH ที่คล้ายกับเส้นสีฟ้า (INR18650) ถัดมาในการเปรียบเทียบเส้นสีเทาและสีเหลือง สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีเหลือง (INR21700) มีความเสื่อมสภาพของ SOH ที่คล้ายกับเส้นสีเทา (NCR21700)

ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าทั้งแบตเตอรี่ INR18650 และ NCR18650 มีการเสื่อมสภาพจากการใช้งาน และอัตราการเสื่อมสภาพสำหรับทั้งสองชนิดนั้นเป็นอย่างใกล้เคียงกันในช่วง 15 รอบแรกของการใช้งาน

4.2.3 เปรียบเทียบ INR18650 และ INR21700



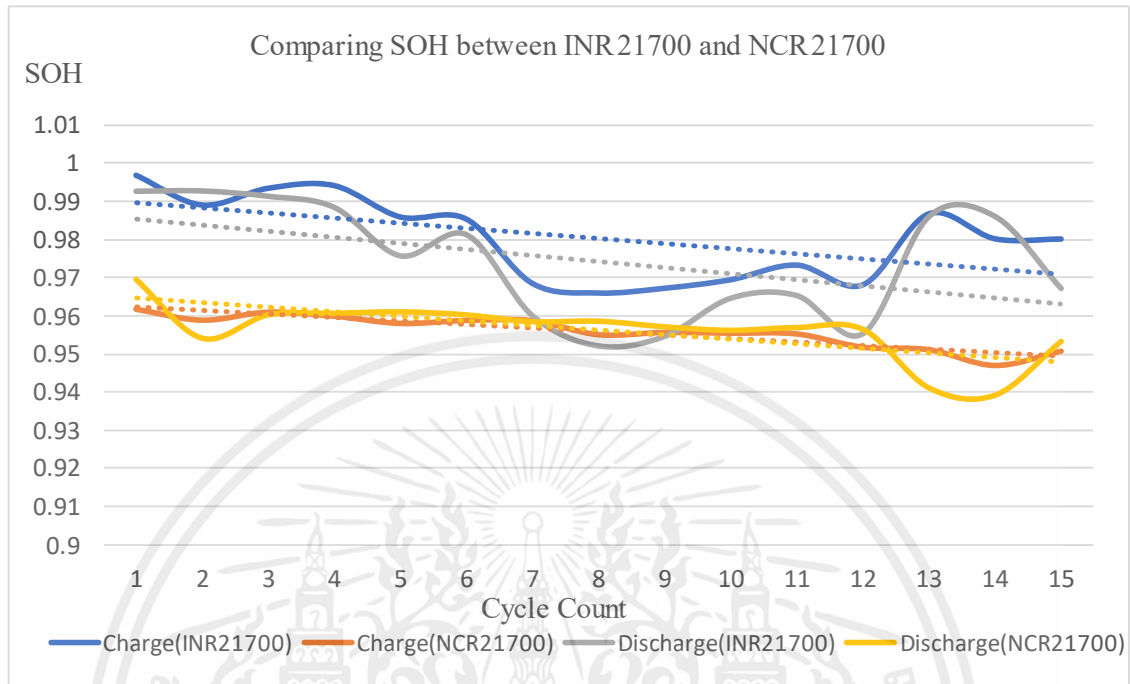
รูปที่ 4.39 กราฟ Comparing SOH between INR18650 and INR21700

จาก รูปที่ 4.39 เมื่อเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มของเส้นสีฟ้าและสีส้ม สามารถสังเกตเห็นได้ว่าเส้นสีฟ้า (INR18650) มีความเสื่อมสภาพของ SOH มากกว่าเส้นสีส้ม (INR21700) ถัดมาในการเปรียบเทียบเส้นสีเทาและสีเหลือง สามารถสังเกตเห็นได้ว่าเส้นสีเหลือง (INR21700) มีความเสื่อมสภาพของ SOH น้อยกว่าเส้นสีเทา (INR18650)

เหตุผลที่แบตเตอรี่ INR21700 มีค่าสถานะของสุขภาพ (State of Health, SOH) สูงกว่าแบตเตอรี่ INR18650 อาจเกี่ยวข้องกับขนาดของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ INR21700 มีขนาดใหญ่กว่า INR18650 ซึ่งเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งผลักดันกระแสไฟฟ้าในแบตเตอรี่ให้ไหลผ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้แบตเตอรี่ INR21700 มีประสิทธิภาพมากกว่าแบตเตอรี่ INR18650 ที่มีขนาดเล็กกว่า

ความแตกต่างในประสิทธิภาพอาจเกิดจากการออกแบบของแบตเตอรี่ INR21700 ที่มีขนาดใหญ่และมีพื้นที่สำหรับสารสัมผัสมากขึ้น ซึ่งทำให้เก็บพลังงานได้ดีกว่าและสูญเสียพลังงานในระหว่างกระแสชาร์จน้อยลง ทำให้มีค่าสถานะของสุขภาพ (SOH) สูงกว่าแบตเตอรี่ INR18650

4.2.4 เปรียบเทียบ INR21700 และ NCR21700



รูปที่ 4.40 กราฟ Comparing SOH between INR21700 and NCR21700

จาก รูปที่ 4.40 เราสามารถสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของ State of Health, SOH ของ แบตเตอรี่ INR21700 สูงกว่าแบตเตอรี่ NCR21700 ในช่วง 15 รอบแรกของการใช้งาน ในการเปรียบเทียบเส้นแนวโน้มของเส้นสีฟ้าและสีส้ม สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีฟ้า (INR21700) มีความเสื่อมสภาพของ SOH มากกว่าเส้นสีส้ม (NCR21700) ถัดมาในการเปรียบเทียบเส้นสีเทาและสีเหลือง สามารถสังเกตได้ว่าเส้นสีเหลือง (NCR21700) มีความเสื่อมสภาพของ SOH คล้ายกับเส้นสีเทา (INR21700)

ดังนั้น เราสามารถสรุปได้ว่าทั้งแบตเตอรี่ INR21700 และ NCR21700 มีการเสื่อมสภาพ จากการใช้งาน และอัตราการเสื่อมสภาพสำหรับทั้งสองชนิดนั้นเป็นอย่างใกล้เคียงกันในช่วง 15 รอบแรกของการใช้งาน อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ INR21700 มีอัตราการเสื่อมสภาพของ SOH ที่สูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ NCR21700 ซึ่งมีค่าเริ่มต้นของ SOH ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.1 สรุปรูปการพองตัวของแบตเตอรี่แต่ละชนิด

| ชนิด | ขั้วบวก(%) | กลาง(%) | ขั้วลบ(%) | ยาว(%) |
|----------|------------|---------|-----------|--------|
| NCR18650 | 0.25 | 0.33 | 0.07 | 0.03 |
| NCR21700 | 0.41 | 0.72 | 0.47 | 0.05 |
| INR18650 | 0.11 | 0.07 | 0.11 | 0 |
| INR21700 | 0 | 0.03 | 0 | 0 |

จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบชนิดของสารเคมีภายในของแบตเตอรี่จะเห็นว่าชนิด NCR นั้นจะมีการพองตัวมากกว่าชนิด INR ซึ่งอาจจะเกิดจากแบตเตอรี่ NCR มีปริมาณโคบอลต์ออกไซด์สูงกว่า INR ดังนั้นมักจะไม่เสถียรมากกว่า INR ปริมาณโคบอลต์สูงส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรในแบตเตอรี่ไอออนลิเทียมซึ่ง

1. ออกไซด์โคบอลต์มีโครงสร้างแบบชั้นที่ทำให้ไอออนลิเทียมสามารถเข้าไปและออกมาได้อย่างง่ายดาย แต่โครงสร้างนี้มีความเสี่ยงต่อการพังทลายขณะรอบการชาร์จและดิสชาร์จต่อเนื่อง ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความจุและการบวมของแบตเตอรี่

2. โคบอลต์เป็นสารที่มีความตบองสูงและสามารถเป็นตัวเร่งแก๊สได้ พลังงานสูงในออกไซด์โคบอลต์สามารถแตกตัวได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการปลดปล่อยออกซิเจนออกมาจากโคบอลต์ จากนั้นออกซิเจนจะตอบสนองกับไฟฟ้านำโดย electrolyte ซึ่งทำให้เกิดการเป็นตัวเร่งในกระบวนการเคลื่อนที่ของไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่

3. อะตอมนิกเกิลและโคบอลต์ในโครงสร้าง cathode มักจะละลายลงในสาร electrolyte ตลอดเวลาและการวนรอบการใช้งาน ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างผลึกและยังเพิ่มความตอบสนองต่อสารเคมีเพิ่มขึ้นด้วย

ในส่วนของการเปรียบเทียบชนิดในด้านขนาดของแบตเตอรี่ จะเห็นได้ว่าทั้ง 4 ชนิดนั้น ยังไม่มีความชัดเจนว่าขนาด 18650 หรือ 21700 มีการพองตัวที่มากกว่ากัน จึงสามารถทำได้เพียงสรุปในส่วนชนิดของสารเคมีภายในของแบตเตอรี่

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผล

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพด้านความจุและความบวมของแบตเตอรี่รูปทรงกระบอก NCR18650, NCR21700, INR18650 และ INR21700 สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า ทั้งหมด แบตเตอรี่มีรูปทรงกระบอก ทดสอบโดยใช้กระแสในการชาร์จและดิสชาร์จที่อัตรา C/1 ในอุณหภูมิห้อง ขนาดแบตเตอรี่จะถูกวัดในแต่ละรอบทดลอง 15 รอบ พฤติกรรมของการสูญเสียการชาร์จจะเปรียบเทียบระหว่างทุกชนิดแบตเตอรี่

ผลการวิจัยแสดงว่าแบตเตอรี่ขนาด 18650 ทั้ง NCR และ INR มีอัตราการสูญเสียการชาร์จที่สูงกว่าแบตเตอรี่ขนาด 21700 ทั้ง NCR และ INR ในเชิงพื้นที่ความจุ แบตเตอรี่ขนาด 21700 แสดงผลดีกว่าแบตเตอรี่ขนาด 18650 เนื่องจากขนาดแบตเตอรี่ใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่สำหรับการระบายความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น แต่สารเคมีที่ใช้ในแต่ละชนิดแบตเตอรี่ไม่สามารถทำการสรุปได้เนื่องจากรอบทดลอง 15 รอบไม่เพียงพอที่จะทำนายทางได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อกำหนดแนวโน้มการลดความจุและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละชนิดแบตเตอรี่ในเชิงพื้นที่ความจุ

ส่วนเรื่องการเปรียบเทียบการพองตัวของแบตเตอรี่ จะเห็นว่าแบตเตอรี่ชนิด NCR มีการพองตัวมากกว่า แบตเตอรี่ชนิด INR โดยสาเหตุมาจากสารเคมีภายใน ของแบตเตอรี่ชนิด NCR มีปริมาณโคบอลต์ออกไซด์สูงกว่าชนิด INR ดังนั้น มักจะมีความไม่เสถียรมากกว่า INR ปริมาณโคบอลต์สูงส่งผลให้เกิดความไม่เสถียร ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า แบตเตอรี่ขนาด 21700 ทั้ง NCR และ INR มีประสิทธิภาพด้านความจุดีกว่าแบตเตอรี่ขนาด 18650 ในขณะที่แบตเตอรี่ชนิด INR มีความพองตัวน้อยกว่า NCR แต่ข้อมูลที่ได้ยังไม่เพียงพอที่จะสรุปได้ว่าชนิดใดดีที่สุด จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลและเคมีของแบตเตอรี่แต่ละชนิดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างเหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การวิจัยนี้ควรทำการทดลองให้ได้จำนวนรอบการชาร์จและดิสชาร์จมากกว่า 15 รอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำสูงขึ้น
2. การวิจัยควรรวมถึงการทดสอบและวิเคราะห์ผลลัพธ์ในเชิงสถิติเพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผลการวิจัย นอกจากนี้ยังควรระบุเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองเพื่อประเมินความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้มา ดังนั้นเพื่อให้การวิจัยมีความเป็นทางการมากขึ้น ควรมีการทดลองและวิเคราะห์ผลลัพธ์อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือสูงสุด

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ศึกษาขนาดและชนิดของแบตเตอรี่ให้มีความหลากหลายเพิ่มมากขึ้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้หลายทางเพื่อหาข้อสรุป
2. การพัฒนาเทคโนโลยีการชาร์จแบตเตอรี่การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการชาร์จแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะในเรื่องของเวลาชาร์จและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เอกสารอ้างอิง

- [1] BloombergNEF, “Electric Vehicle Outlook 2021,” International Energy Agency, April 2021. (references)
- [2] M report, “Electric car sales 2021 Toprush 109% Tesla occupies number 1,” February 2021
- [3] Mr. Mark Kane, “What Batteries Are Tesla Using In Its Electric Cars?,” insideevs, May 2022.
- [4] M. Waseem Marzook, Alastair Hales, Yatish Patel, Gregory Offer, Monica Marinescu, Thermal evaluation of lithium-ion batteries: Defining the cylindrical cell cooling coefficient, Journal of Energy Storage, Volume 54, 2022, 105217.
- [5] Daozhong Hu, Gang Chen, Jun Tian, Ning Li, Lai Chen, Yuefeng Su, Tinglu Song, Yun Lu, Duanyun Cao, Shi Chen, Feng Wu, “Unrevealing the effects of low temperature on cycling life of 21700-type cylindrical Li-ion batteries,” Journal of Energy Chemistry, Volume 60, 2021, Pages 104-110
- [6] Thomas Waldmann, Rares-George Scurtu, Karsten Richter, Margret Wohlfahrt-Mehrens, 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties, Journal of Power Sources, Volume 472, 2020, 228614.
- [7] IEC 62660-1 Edition 2.0 (2018-12) Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part1: Performance testing
- [8] Technical Information of LG 18650HG2 (3.0Ah), High Power Cell Development Team, Dec. 05. 2014
- [9] Panasonic Lithium Ion NCR18650B Description, NCR18650B Datasheet, NCR18650B view ___ ALLDATASHEET ___

[10] SPACIFICATION OF PRODUCT Tentative version (TBD) for Lithium-ion rechargeable cell Model : INR21700-48G, Samsung SDI Co., Ltd Battery Business Division, Oct., 2015

[11] Panasonic NCR21700T 3.7v lithium battery 4800mAh, Batemo Cell Library

Panasonic TESLA Model 3, <https://www.batemo.de/products/batemo-cell-library/panasonic-tesla-model-3/>

[12] Product Specification Rechargeable Lithium-Ion Battery Model : ICR18650 D1 3000mAh

[13] Cheng Lin, Aihua Tang, Wenwei Wang, A Review of SOH Estimation Methods in Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Applications, Energy Procedia, Volume 75, 2015, Pages 1920-1925.

[14] Anthony Barré, Benjamin Deguilhem, Sébastien Grolleau, Mathias Gérard, Frédéric Suard, Delphine Riu. “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications”, Journal of Power Sources, 241, 2013.

[15] Ellen Ivers-Tiffée “ Electrochemical characterization and post-mortem analysis of aged LiMn₂O₄-INR/graphite lithium ion batteries part II: Calendar aging”, Journal of Power Sources, 258 , 2014, pp. 61-75.

[16] Madeleine Ecker*, B. Jochen, Gerschler, Jan Vogel, Stefan Käbitz, Friedrich Hust, Philipp Dechent, et al. “ Development of a . lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data”, Journal of Power Sources, 215, 2012.

[17] Bor Yann Liaw, Rudolph G. Jungst, Ganesan Nagasubramanian, Herbert L. Case, Daniel H. Doughty, “Modeling capacity fade in lithium-ion cells”, Journal of Power Sources, Volume 140, Issue 1, 2005, Pages 157-161.

[18] Xiongwen Zhang, Thermal analysis of a cylindrical lithium-ion battery, Electrochimica Acta, Volume 56, Issue 3, 2011, Pages 1246-1255.

- [19] Doron Aurbach, Boris Markovsky, Alexander Rodkin, Miriam Cojocaru, Elena Levi, Hyeong-Jin Kim, An analysis of rechargeable lithium-ion batteries after prolonged cycling, *Electrochimica Acta*, Volume 47, Issue 12, 2002, Pages 1899-1911.
- [20] Huang, S., Sun, F., Chen, C., Liu, Y., Xu, L., & Wang, C. (2019). Comparative Study of Heat Dissipation Characteristics of Lithium-Ion Battery Packs with Different Structures. *Energies*, 12(10), 1982. <https://doi.org/10.3390/en12101982>
- [21] "Comparison of the Performance of Li-ion Batteries with Different Shapes and Sizes" From *Journal of The Electrochemical Society* The group of researchers consisted of Heng Zhang, Xingxing Chen, Zongping Shao, Jun Chen, Xinyong Tao, Ruying Li and Yuping Wu. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0661910jes>
- [22] Sandeep Kumar, Anil Kumar, Ashish Kumar, and Anurag Kumar, "State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries Using Different Adaptive Filters," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1-10, 2019.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่

1.LG 18650HG2

Summary

Confidential

| Type | Specification | Actual |
|-------------------------|---|-----------------------------------|
| Chemistry | Li[NiMnCo]O ₂ (H-NMC) / Graphite + SiO | |
| Dimensions (mm) | Diameter | 18.3 +0.2 / -0.3 mm |
| | Height | 65.00 ± 0.2 mm |
| Weight (g) | Max. 48 | 44~45 |
| Initial IR (mΩ AC 1kHz) | Max. 17 | 14~16 |
| Initial IR (mΩ DC) | Max. 30 | 24~26 |
| Nominal Voltage (V) | 3.6 | |
| Charge Method | Nominal : 1.5A 4.2V, 50mA End-current (CC-CV) | |
| | Fast : 4A 4.2V, 100mA End-current (CC-CV) | |
| Charge Time | Nominal (min) | 165min |
| | Fast (min) | 85min |
| Charge Current | Nominal Current (A) | 1.25A |
| | Max. Current (A) | 4A |
| Discharge | End Voltage (A) | 2V |
| | Max. Current (A) | 20A (Continued discharge current) |
| 0.2C Capacity | Nominal (Ah) | 3.0 Ah |
| Energy Density | Nominal (Wh/kg) | 240 |

2.NCR18650B

Lithium Ion

Panasonic NCR18650B

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

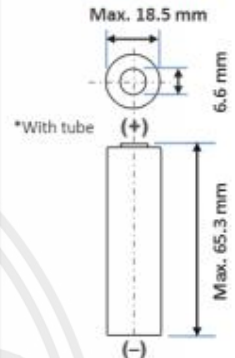
Specifications

| | |
|-------------------------------|---|
| Rated capacity ⁽¹⁾ | Min. 3200mAh |
| Capacity ⁽²⁾ | Min. 3250mAh Typ. 3350mAh |
| Nominal voltage | 3.6V |
| Charging | CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs |
| Weight (max.) | 48.5 g |
| Temperature | Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C |
| Energy density ⁽³⁾ | Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg |

* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

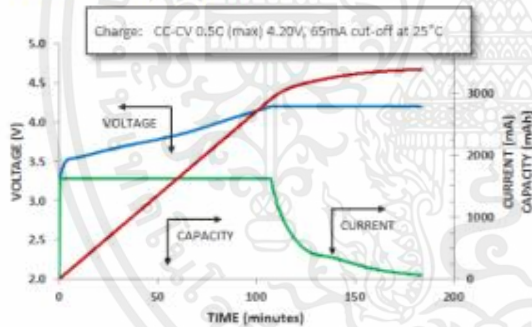
⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

Dimensions

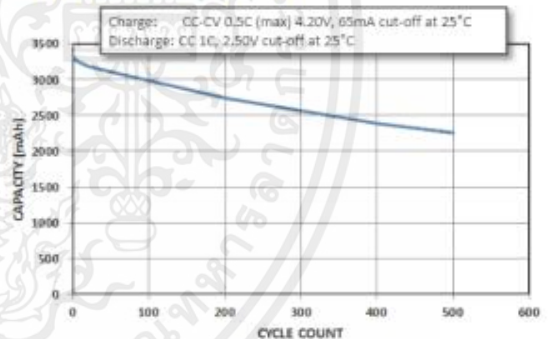


For Reference Only

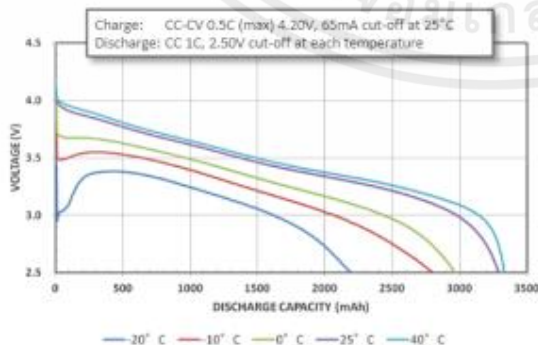
Charge Characteristics



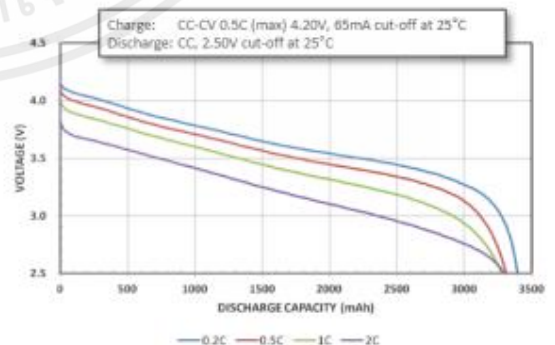
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

For more information on how Panasonic can assist you with your battery power solution needs, visit us at www.panasonic.com/industrial/batteries-oem, e-mail secsales@us.panasonic.com, or call (469) 362-5600.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.INR21700-48G

SAMSUNG SDI Confidential Proprietary.



| | | | |
|-----------|--------------|-------------|-----------|
| Spec. No. | INR21700-48G | Version No. | Tentative |
|-----------|--------------|-------------|-----------|

1. Scope

This product specification has been prepared to specify the rechargeable lithium-ion cell ('cell') to be supplied to the customer by Samsung SDI Co., Ltd.

2. Description and Model

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| 2.1 Description | Cell (lithium-ion rechargeable cell) |
| 2.2 Model | INR21700-48G |

3. Nominal specifications

| Item | Specification |
|---|--|
| 3.1 Standard discharge capacity | Min. 4,700mAh (Typical 4,800mAh) - Charge: 0.3C(1440mA),4.2V, 0.02C(96mA) cutoff @ RT - Discharge : 0.2C(960mA), 2.5V cutoff @ RT * 1C = 4,800mA |
| 3.2 Standard discharge energy | Min. 17.04Wh (Typical 17.4Wh) - Charge: 0.3C(1440mA),4.2V, 0.02C(96mA) cutoff @ RT - Discharge : 0.2C(960mA), 2.5V cutoff @ RT |
| 3.3 Charging voltage | 4.20V |
| 3.4 Nominal voltage | 3.6V (0.2C discharge) |
| 3.5 Charging method | CC-CV (constant voltage with limited current) |
| 3.6 Charging current | Standard charge: 1,440mA Rapid charge : 4,800mA ^{Note 1} |
| 3.7 Charging time | Standard charge : 5hours Rapid charge : 2.5hours |
| 3.8.1 Max. charge current | Refer to Fig. 1 ^{Note 1} |
| 3.8.2 Max. pulse charge current | TBD |
| 3.9.1 Max. discharge current | 9,600mA (not for cycle life) |
| 3.9.2 Max. pulse discharge current | 35A for 10sec, 25A for 30sec, 18A for 60sec (ambient temperature 23 °C) |
| 3.10 Discharge cut-off voltage | 2.50V |
| 3.11 Cell weight | Max. : 69g |
| 3.12 Cell dimension (W/O tube, W/O Washer) | Refer to cell drawing Fig. 2 Max. height to top : 70.15mm Max. height to crimping : 70.15mm Max. upper diameter : 21.1mm |

1 Samsung SDI., Energy Business Division.

4.NCR21700

| | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|----------------------|-----------|---------|
| Name | Vapcell NCR21700 4800mAh (Purple) | | | | | |
| Cell | | | | | | |
| Supplier | Vapcell | | | | Date: | 9-2017 |
| Size | Weight: | 67.7 g | Length: | 70.6 mm | Diameter: | 21.2 mm |
| Info | Top: | flat | Bottom: | metal | Rated A: | 20 |
| Test condition | Charge voltage: | | 4.2 | Termination current: | | 0,1 |
| Test current (A) | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| Measured capacity (Ah) | 4,645 | 4,613 | 4,583 | 4,552 | 4,533 | 4,513 |
| Measured energy (Wh) | 17,131 | 16,961 | 16,750 | 16,450 | 16,223 | 15,887 |
| PCB protection trip current (A) | NA | | | | | |
| Calculated internal resistance (ohm) | 0,05 | | | | | |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายกมลพัชร อินทร์เกลี้ยง รหัสนักศึกษา 62010015

22 มีนาคม 2544

ที่อยู่ 150/2 บ้านศิริสุนีย์ ซ.ลาดกระบัง52 แยก6 แขวงลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง จ.กรุงเทพฯ 10520

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงาน บริษัท สายไฟฟ้าไทย - ยาชากิ จำกัด



นายกร รัศมีปัญญาทิพย์ รหัสนักศึกษา 62010017

20 สิงหาคม 2544

ที่อยู่ 43/43-44 ถ.พานิชเจริญ ต.เมืองพล อ.พล จ.ขอนแก่น 40120

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงาน บริษัท สยามเดนกิ เอ็นจิเนียริง จำกัด



นางสาวกุลธิดา กลมเกลี้ยง รหัสนักศึกษา 62010072

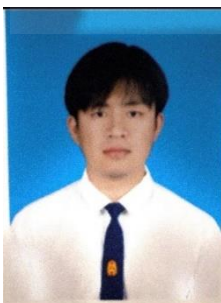
26 มีนาคม 2544

ที่อยู่ 270/74 TC Green condominium ถ.พระราม9

แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง จ.กรุงเทพฯ 10310

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงาน บริษัท สยามเดนกิ เอ็นจิเนียริง จำกัด



นายคุณากร กะการดี รหัสนักศึกษา 62010091

22 เมษายน 2544

ที่อยู่ 320 หมู่ที่ 13 ต.ท่าเกษม อ.เมืองสระแก้ว จ.สระแก้ว 27000

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงาน บจก. พี.กริม พีไอพี เพาเวอร์ 1,2