

ระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า  
BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE



THE PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE 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

ระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE



โดย

นายกวินท์

กลิ่นปาน

นางสาวชนิกานต์

อิศราคาร

นางสาวนันท์ธนภัส

สิริสินญาณรุจ

นายบุญญพัฒน์

พิธกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สมภพ ผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

1. นายกวินท์ กลิ่นปาน
2. นางสาวชนิกานต์ อิศราคาร
3. นางสาวนันท์ธนภัส สิริสินภาณุรุจ
4. นายบุญญพัฒน์ พิธกิจ

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. สมภาพ ผลไม้)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

นายกวินท์            กลิ่นปาน  
นางสาวชนิกานต์    อิศราคาร  
นางสาวนันทธรรักษ์   สิริสินภาณูรจ  
นายบุญญพัฒน์      พิธกิจ  
ดร.สมภพ              ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประมาณสถานะประจุและสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความแม่นยำ โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ประโยชน์ของการประมาณสถานะที่แม่นยำคือ ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น มีประสิทธิภาพและช่วยในการวางแผนการชาร์จและการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ใช้งาน สถานะสุขภาพแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้จากความต้านทานภายใน ซึ่งสามารถหาได้จากการประมาณสถานะแบตเตอรี่ซึ่งมีอยู่สามขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการ หาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและคุณสมบัติของสถานะประจุด้วยการชาร์จและดิสชาร์จที่กระแสคงที่ในอัตรา C/30 จากนั้นหาแบบจำลองของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่อย่างแม่นยำโดยใช้เทคนิคการวัดอิมพีแดนซ์บนฐานความถี่ร่วมกับเทคนิคการระบุระบบบนฐานเวลา และขั้นตอนสุดท้ายคือ การประมาณสถานะประจุและความต้านทานภายในโดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในโครงการวิศวกรรมนี้การประมาณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ จะดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าของเซลล์และความต้านทานภายใน แบตเตอรี่จะถูกตรวจวัดผ่าน LTC6813-1 โดยกระแสวัดผ่าน ตัวตรวจจับกระแสและแรงดันเซลล์วัดผ่าน LTC6813-1 ที่อยู่ภายในบอร์ดสาคิต DC2350B โดยกระแสและแรงดันที่วัดมาจะทำให้สามารถหาความต้านทานภายในได้โดยวิธีการตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีการประมาณสถานะประจุที่แม่นยำและสามารถประมาณค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เพื่อใช้ประเมินสถานะสุขภาพได้ต่อ

# BATTERY MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRIC VEHICLE

Mr.Kawin	Kinpan
Ms.Chanikan	Issarakan
Ms.Nantanapat	Sirisinpanurut
Mr.Punyaphat	Phitthakit
Dr.Sompob	Polmai Advisor

## ABSTRACT

This thesis presents the estimation of state of charge and state of health of lithium-ion batteries using a nonlinear Kalman filter. The accurate estimation of state of charge has several benefits, including prolonging battery lifespan, improving efficiency, and assisting in optimal charging and travel planning for users. The state of health of the battery can be calculated from its internal resistance, which can be obtained through a three-step estimation process. This process begins with measuring the open circuit voltage and charge state properties through charging and discharging at a constant current of  $C/30$ . Then, an accurate model of the battery equivalent circuit is obtained using impedance spectroscopy based on frequency response measurements and system identification techniques based on time response. The final step involves estimating the state of charge and internal resistance using the nonlinear Kalman filter with a non-linear Kalman filter. In this thesis, real-time estimation of the battery's state of health is performed through MATLAB. The battery's voltage, cell current, and internal resistance are measured through the LTC6813-1, where current and voltage measurements are made via the LTC6813-1 integrated on the DC2350B board. The measured current and voltage are used to determine the internal resistance using the non-linear Kalman filter. The experimental results demonstrate that the non-linear Kalman filter provides accurate estimation of the state of charge and enables estimation of the internal resistance for assessing the state of health of the battery.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้จาก ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิดในการทำโครงการ และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำโครงการ และแรงกระตุ้นเพื่อให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนและมอบองค์ความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ รวมทั้งบุคลากรประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์ สถานที่และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆร่วมภาควิชาทุกคน รวมไปถึงบิดามารดาและครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดหาอุปกรณ์ต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำโครงการครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดโครงการ	2
1.4 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	5
2.1.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	6
2.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	6
2.2 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)	6
2.3 สถานะประจุ (State of Charge - SoC)	7
2.3.1 วิธีคำนวณคูลอมบ์ (Coulomb-Counting)	8
2.3.2 วิธีการแรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage Method – OCV Method)	8
2.3.3 วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)	9
2.4 สถานะสุขภาพ (State of Health – SoH)	9
2.5 วิธีการวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับ (AC Impedance Measurement)	10
2.6 อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก (Warburg Impedance)	12
2.7 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่	14

	หน้า
2.8 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)	15
2.8.1 ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended Kalman Filter)	16
2.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Kalman Filter	18
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรประมาณสถานะแบบเตอรี</b>	<b>19</b>
3.1 อุดหนุนภูมิกับแบบเตอรี	20
3.2 AC Measurement	21
3.3 การทำ Pulse Testing	22
3.4 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วย System Identification	24
3.5 พารามิเตอร์ Capacitance หา $C_1$	26
3.6 การประมาณสถานะแบบเตอรีด้วยตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น	30
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>38</b>
4.1 การทดลองหาสถานะแบบเตอรีแบบเรียลไทม์	38
4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในของแบบเตอรีกับอุดหนุนภูมิ	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>48</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง	48
5.2 ปัญหาและข้อจำกัด	49
5.3 ข้อเสนอแนะ	49
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>50</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>51</b>
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>56</b>

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
2.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	5
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ	9
2.3 การวัดพัลส์กระแสตรง (DC Pulse Measurement)	10
2.4 เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ BT4560	11
2.5 วงจรค่าความต้านทานที่ย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำ	11
2.6 แผนภาพโคล-โคลสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	12
2.7 วงจรแบบแรนเดิลล์	12
2.8 วงจรแรนเดิลล์แบบปรับปรุง	13
2.9 วงจรแบบพอสเตอร์	13
2.10 แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่	14
2.11 3rd Order Battery Equivalent Circuit Model	14
2.12 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน	16
2.13 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น	17
2.14 Extended Kalman Filter	18
3.1 แบตเตอรี่และคุณสมบัติของแบตเตอรี่ US18650VTC6	19
3.2 Low current (0.6) charging voltage at 40 °C, 25 °C, 0 °C	20
3.3 ตาราง Cole-Cole plot สำหรับ SoC 50%	21
3.4 Cole-Cole plot จาก SoC 50%	22
3.5 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 50 %	22
3.6 กระแสจาก Pulse Testing	23
3.7 แรงดันจาก Pulse Testing	23
3.8 Battery Equivalent Circuit, (a) Modified Randle Circuit, (b) Warburg Impedance ในรูปของ Foster's Circuit	24
3.9 ผลลัพธ์จาก เว็บไซต์ <a href="https://www.circuitfitting.net/">https://www.circuitfitting.net/</a>	26
3.10 วงจรสมมูลที่ใช้ใน Circuitfitting.net	26

รูปที่	หน้า
3.11 วงจรสมมูลที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	27
3.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จาก consultsr.net	27
3.13 Non-Linear Battery Equivalent Circuit Model	28
3.14 Linear Battery Equivalent Circuit Model	29
3.15 การเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้ว ( $\Delta V$ ) ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ	30
3.16 OCV-SoC Curve ที่ C/30	30
3.17 OCV-Temperature Curve	31
3.18 การหาสมการเกาส์เซียนจาก Curve Fitting Tool ในโปรแกรม MATLAB	31
3.19 สมการการตรวจแก้ และการทำนาย	33
3.20 โปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กราฟ $\Delta V_k$ เทียบกับเวลา	34
3.21 การเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้ว ( $\Delta V$ ) ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จาก System Identification	35
3.22 การจำลอง EV Reference Application โดยโปรแกรม MATLAB	36
3.23 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตามโปรไฟล์กระแสในการอัดและคายประจุ	36
3.24 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตามโปรไฟล์กระแสในการอัดและคายประจุ 3 รอบ	37
4.1 ข้อมูลแบบเรียลไทม์ในโปรแกรม MATLAB	38
4.2 กระแสไฟฟ้า	39
4.3 แรงดันระหว่างขั้ว	39
4.4 สถานะประจุ (SoC)	40
4.5 ความต้านทานภายใน (R0)	40
4.6 การเปรียบเทียบ SoC จากวิธีตัวนับแบบคูลอมบ์และจากตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น	41
4.7 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานภายในระหว่างค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นจาก System Identification และจากตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น	41
4.8 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 20%	42
4.9 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 50%	42

รูปที่	หน้า
4.10 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 60%	43
4.11 การเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 80%	43
4.12 ข้อมูลแบบเรียลไทม์ในโปรแกรม MATLAB	44
4.13 อุณหภูมิ	44
4.14 แรงดัน	45
4.15 กระแส	45
4.16 SoC	46
4.17 ความต้านทานภายใน (R0)	46
4.18 ความต้านทานภายในกับอุณหภูมิ	47



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	2
3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ US18650VTC6	20
3.2 ค่าพารามิเตอร์จาก System Identification ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50 % ที่ C-rate C/30	29
3.3 ค่าพารามิเตอร์จากสมการเกาส์เซียนโดยใช้ฟังก์ชัน Curve Fitting	32



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

จากกระแสเมกะเทรนด์ (Mega Trend) สู่อนาคตทั่วโลก หนึ่งในนั้นก็คือ ลิเทียมและ แบตเตอรี่ (Lithium & Battery) จาก Wood Mackenzie บริษัทที่ปรึกษาด้านพลังงานได้ให้ข้อมูลถึง ในปี 2030 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วโลกมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 5,500 GWh (Gigawatt-hour) เพิ่มขึ้นจากปี 2021 มากถึง 5 เท่า และมีโรงงานผลิตมากกว่า 300 แห่งทั่วโลก ซึ่งมาจากการขยายตัวของผู้ใช้คือรถยนต์ไฟฟ้า ทำให้กำลังการผลิตทั่วโลกในปัจจุบันไม่เพียงพอ รวมถึงในช่วงปีที่ผ่านมาสาธารณรัฐจีนเป็นผู้ผลิต แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนอันดับ 1 ซึ่งมีกำลังการผลิตถึง 90% ของกำลังการผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมทั่วโลก

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery) หรือตัวย่อคือ “Li-Ion” เป็นแบตเตอรี่ คุณภาพสูง ชนิดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Rechargeable Battery) หรือใช้ซ้ำได้สำหรับคุณสมบัติหลัก ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน คือ การจ่ายไฟที่แรง และคงที่อยู่ตลอดเวลา แม้ไฟในแบตเตอรี่ใกล้จะหมด แล้วยังมีระยะเวลาการชาร์จไฟจนเต็มความจุที่เร็วกว่าแบตเตอรี่แบบอื่นๆ และยังใช้ได้ยาวนานกว่าอีกด้วย เช่นกัน แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเสียหายได้ง่ายหากมีการใช้งานที่ผิดวิธี ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จึงต้องมีระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยระหว่างการใช้งาน

ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) มีหน้าที่ตรวจสอบสถานะ แบตเตอรี่และรับรองความปลอดภัยในการทำงาน โดยการทำงานของระบบจัดการแบตเตอรี่ประกอบไปด้วย ระบบวัดและควบคุมแรงดัน กระแส และอุณหภูมิ (Measurement and control of voltage, current and temperature) สถานะประจุ (State of Charge) สถานะกำลัง (State of Power) สถานะ สุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health) ระบบป้องกัน (Protection System) และระบบจัดเก็บข้อมูล (Data storage) โดยการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำทำให้สามารถวางแผนการใช้งานแบตเตอรี่ให้ มีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น การคำนวณระยะทางคงเหลือสำหรับแบตเตอรี่ภายในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะ คำนวณได้จากสถานะของประจุ และในปริญญานิพนธ์นี้ เลือกใช้วิธีตัวกรองแบบคาลมาน ในการประมาณ สถานะสุขภาพ เนื่องจากมีความแม่นยำสูง และยังมีข้อผิดพลาดของการประมาณผลของสถานะประจุ ช่วงเริ่มต้น เหมือนกับการประมาณสถานะสุขภาพด้วยวิธี Coulomb Counting

ความสำคัญของสถานะสุขภาพแบตเตอรี่ เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญตลอดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เมื่อรถอยู่บนท้องถนน ถ้าเจ้าของรถ EV ต้องการทราบความน่าเชื่อถือของรถของตน เมื่อเจ้าของขายต่อ ข้อมูลสถานะของแบตเตอรี่จะสามารถประเมินมูลค่าผลิตภัณฑ์ได้แม่นยำยิ่งขึ้น และผู้ซื้อสามารถเพิ่มความมั่นใจในความคุ้มค่า อายุการใช้งาน และระยะทางของ EV เมื่อเลิกใช้งานแล้ว การทราบสถานะของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการพิจารณาว่า แบตเตอรี่สามารถใช้ซ้ำและยังสามารถนำไปใช้ใหม่ได้หรือไม่ หรือควรส่งแบตเตอรี่ไปที่การรีไซเคิล

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่
2. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ และนำตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended- Kalman Filter) มาใช้ในการประมาณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion Battery)
3. เพื่อสร้างและพัฒนาระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)
4. ศึกษาและออกแบบการหาสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of health)

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดโครงการ

1. ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่
2. ออกแบบและสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ

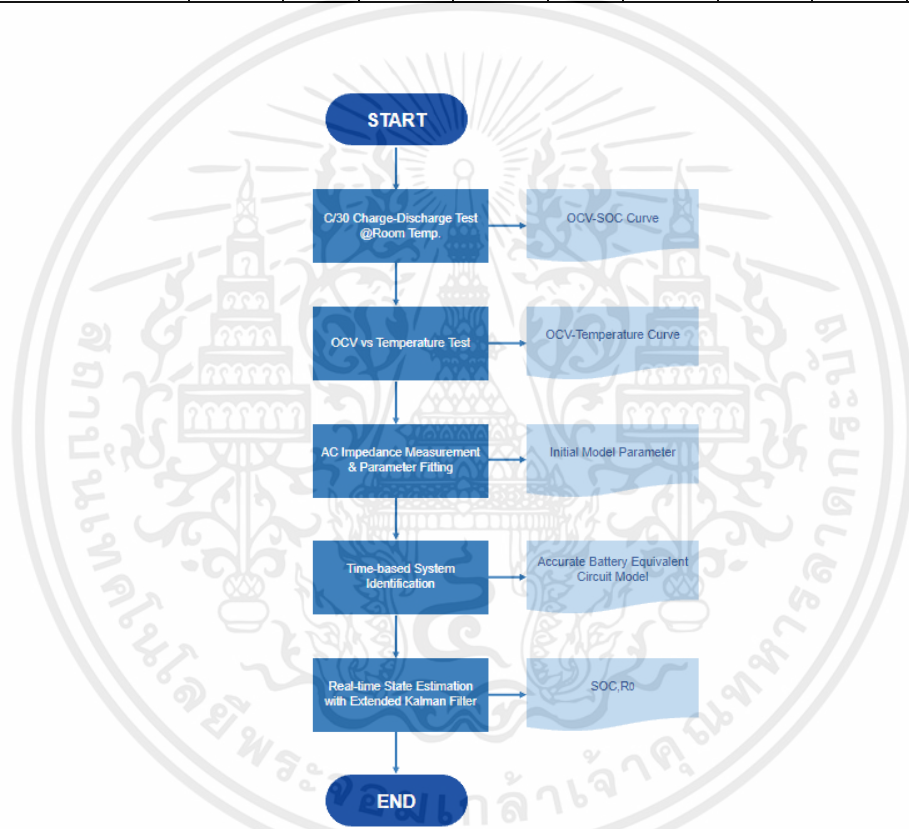
## 1.4 แผนการดำเนินโครงการ

### ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	พ.ศ.2565					พ.ศ.2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	พ.ศ.2565					พ.ศ.2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ทำการทดลองหา OCV – SoC Curve ของแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน										
ทำการทดลองหา พารามิเตอร์ของ แบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน										
ออกแบบตัวกรอง คาล-มานเพื่อ ประมาณสถานะ แบตเตอรี่โดยใช้ โปรแกรม MATLAB										
ออกแบบโปรแกรม สำหรับวงจร ประมาณสถานะ แบตเตอรี่										
ออกแบบวงจร ประมาณสถานะ แบตเตอรี่										
ทดลองวงจร ประมาณสถานะ แบตเตอรี่										
ทดลองหา ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเปิดวงจรกับ อุณหภูมิ										

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	พ.ศ.2565					พ.ศ.2566				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
สรุปผลงานวิจัย										
จัดทำรูปเล่มปริญญา นิพนธ์										
นำเสนอผลงานวิจัย										



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
2. สามารถสร้างวงจรเพื่อการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้
3. สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ได้
4. สามารถสร้างระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพและใช้งานได้

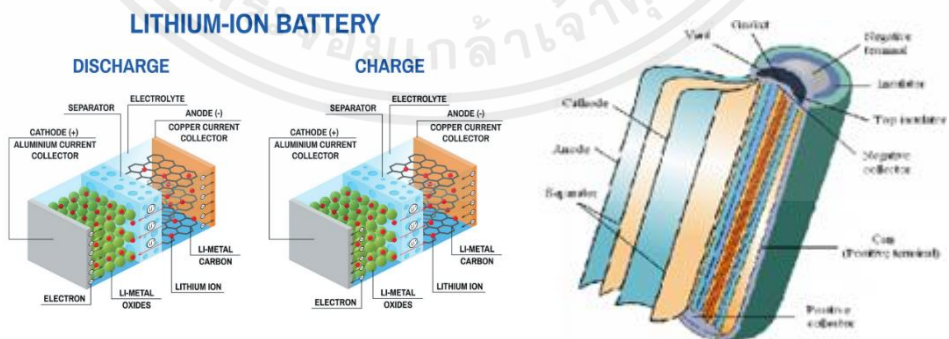
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเคมีที่อยู่ในเซลล์แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 4 ส่วนคือ 1) ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) 2) ตัวคั่น (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วแคโทดสัมผัสกับขั้วแอโนดจนเกิดการลัดวงจร 3) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายเกลือของลิเทียม ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้ไอออนไหลผ่านแต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน จึงเป็นตัวนำไอออนิกที่ดี แต่เป็นตัวนำอิเล็กตรอนิกส์ที่ไม่ดีและ 4) ตัวรับกระแส (Current collector) เป็นส่วนโลหะตัวนำที่ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอกและเกิดการนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ แบตเตอรี่ถูกผลิตออกมาหลากหลายประเภท หลายขนาดและหลายรูปแบบ เพื่อความเหมาะสมกับการใช้งานของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันออกไป โดยหลัก ๆ แล้วแบตเตอรี่สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ ชนิดปฐมภูมิ (Primary cell or non-rechargeable battery) และ แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ ชนิดทุติภูมิ (Secondary cell or rechargeable batteries) ซึ่งแบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดไปข้างแล้ว (ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วบวกและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วลบ) จะไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้จึงใช้ได้เพียงครั้งเดียว ส่วนแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟใหม่ได้ ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดไปข้างหน้า และย้อนกลับได้เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ (ชาร์จแบตเตอรี่) จึงใช้ได้หลายครั้ง



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

### 2.1.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

- ความจุพลังงานสูง : ความจุพลังงานต่อปริมาตรและต่อน้ำหนัก ในระดับ 500 Wh/Kg และ 230 Wh/Kg ตามลำดับและยังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ
- แรงดันต่อเซลล์สูง (~3.6 V) สูงกว่าแบตเตอรี่ Nickle ถึง 3 เท่า
- กำลังไฟฟ้าสูง : ~ 2000 W/Kg ในเวลาสั้น ๆ ได้
- การสูญเสียประจุขณะไม่ได้ใช้งานต่ำเพียง 2-3% ต่อเดือน
- อัดและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว
- ค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมบ์สูงเกือบ 100% ภายหลังรอบการใช้งานแรก
- อายุ (รอบ) การใช้งานยาวนานสามารถใช้งานได้มากกว่า 1000 รอบ ถ้าใช้งานที่ DOD ต่ำ สามารถใช้งานได้ถึง 5000 รอบ
- ทำงานได้ดีในย่านอุณหภูมิกว้าง (-25 °C ถึง +45 °C )
- ราคาสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นหากเทียบราคาต่อ Wh
- ต้องการวงจรป้องกันเป็นพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยงการอัดประจุเกิน จนทำให้แบตเตอรี่ได้รับความเสียหายถาวร

### 2.1.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ในขณะที่อัดประจุไฟ (Charge) อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วบวกเข้าไปสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปสู่ขั้วลบจากนั้นลิเทียมไอออนจะไปเกาะอยู่กับคาร์บอนมากขึ้นตามความสามารถในการชาร์จ

ในขณะที่คายประจุ (Discharge) ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์กลับไปยังขั้วบวก เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับขั้วบวกผ่านวงจรภายนอก และให้พลังงานไฟฟ้าออกมา จนกว่าลิเทียมไอออนที่ไปเกาะอยู่กับคาร์บอนจะหมดไป แบตเตอรี่ก็จะหมดลงด้วยเช่นกัน

## 2.2 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) หรือ BMS คือวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. อายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและมีประสิทธิภาพในการใช้งานแบตเตอรี่

2. แสดงสถานะในรูปแบบสถานะประจุ (State of Charge - SoC) รวมทั้งสถานะสุขภาพแบตเตอรี่ (State of Health - SoH)
3. เพื่อป้องกันระบบแบตเตอรี่ที่เกิดจากการชาร์จเกินพิกัด, การดิสชาร์จเกินพิกัดและกระแสเกินพิกัด
4. เพื่อป้องกันการทำงานของแบตเตอรี่ที่เกิดในสภาวะอุณหภูมิสูงเกินขีดจำกัดหรือพบสภาวะผิดปกติในระบบ

ระบบจัดการแบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนสมองของมนุษย์หรือซีพียูของคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะ เป็นศูนย์กลางของระบบแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยจะรวบรวมข้อมูลของแบตเตอรี่ผ่านเซนเซอร์ จากนั้นจะ ประมวลผลผ่านอัลกอริทึมของระบบ หรือ แสดงผลออกมา ฟังก์ชันพื้นฐานของระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ BMS ประกอบไปด้วย

1. การวัดแรงดัน อุณหภูมิและกระแสของแบตเตอรี่ รวมถึงตรวจจับพอลต์ต่างๆที่อาจ เกิดขึ้น
2. ระบบป้องกัน เพื่อป้องกันระบบและแบตเตอรี่ ที่อาจเกิดขึ้นได้จาก overcharge, overdischarge, overcurrent, กระแสลัดวงจร และอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่กำหนด
3. แสดงแบตเตอรี่คงเหลือ ในรูปแบบสถานะประจุ (State of Charge – SoC) ของ แต่ละเซลล์แบตเตอรี่ รวมถึงคำนวณพลังงานคงเหลือภายในแบตเตอรี่ อาจมีการ สมดุลแรงดันแบตเตอรี่เพื่อความแม่นยำ
4. วิเคราะห์คำนวณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health – SoH)

### 2.3 สถานะประจุ (State of Charge - SoC)

สถานะประจุ (State of Charge - SoC) เป็นค่าของระดับการเก็บประจุหรือการชาร์จไฟ ของแบตเตอรี่ เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างระดับความจุคงเหลือ (Q(t)) ต่อความจุพิกัด (Q<sub>n</sub>) ของแบตเตอรี่ดังสมการที่ (1) โดยค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ SoC ที่ 100% คือแบตเตอรี่ที่ค่าประจุเต็มแล้วและ ค่าที่เป็นเปอร์เซ็นต์ SoC ที่ 0% คือแบตเตอรี่ที่ไม่มีค่าประจุแล้ว ในการประมาณค่าสถานะประจุได้ให้ ความสำคัญเป็นอย่างมากในตัวของแบตเตอรี่เมื่อมีการเกิดสภาวะเสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการ ประมาณค่าสถานะประจุ

$$\text{SoC}(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (2.1)$$

สถานะประจุไม่สามารถวัดได้โดยตรงได้ แต่สามารถประมาณจากตัวแปรจากการวัดโดยตรง (Direct Measurement Variables) ได้สองรูปแบบ คือ (1) แบบขณะไม่ใช้งาน (Offline) และ (2) แบบขณะใช้งาน (Online) โดยแบบขณะไม่ใช้งาน (Offline) แบตเตอรี่จะต้องทดสอบการอัดและคายประจุในอัตราคงที่ เช่น

### 2.3.1 วิธีคำนวณคูลอมบ์ (Coulomb-Counting)

วิธีคำนวณคูลอมบ์ หรือวิธีการรวมกระแส (Current Integration Method) วิธีนี้ให้การประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ที่แม่นยำ ซึ่งใช้เวลาการทดสอบค่อนข้างนาน ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ซึ่งในขณะทำการทดสอบ จะไม่สามารถนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอื่นได้ และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการประมาณสถานะประจุแบบขณะใช้งาน

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t i_{\text{batt}}(t) dt}{Q_{\text{rated}}} \times 100 \quad (2.2)$$

โดยที่  $\text{SoC}(t_0)$  คือ ค่าเริ่มต้นของค่า SoC

$i_{\text{batt}}$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่

$Q_{\text{rated}}$  คือ ค่าความจุปกติของแบตเตอรี่

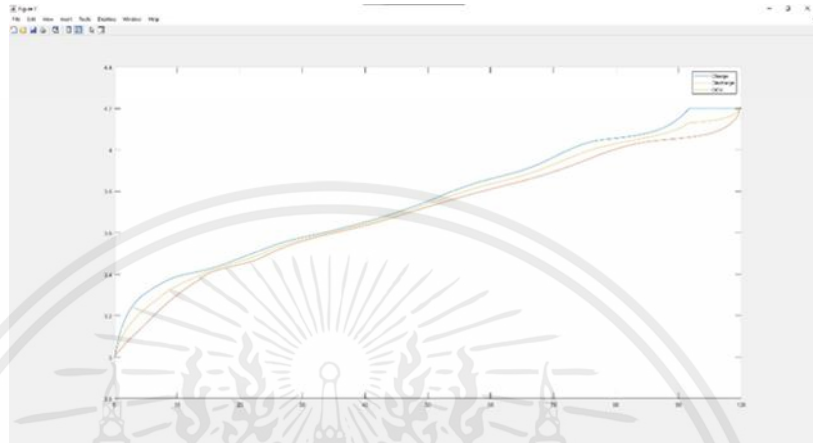
โดยการคำนวณหาค่า SoC ของวิธีนี้ มีความคลาดเคลื่อนจากการหาปริพันธ์ของกระแสที่มีการรวมค่าจากความผิดพลาดเข้าไปร่วมด้วยในขณะการใช้งาน ดังนั้นการหาปริมาณ SoC ด้วยวิธีนี้ต้องทำการปรับเทียบเป็นประจำ เช่น ต้องรีเซ็ตค่าให้ SoC เป็น 100% เมื่อแบตเตอรี่ทำการอัดประจุเต็ม วิธีนี้จึงไม่ค่อยนิยมที่จะใช้ในการคำนวณประมาณค่าสถานะประจุ

### 2.3.2 วิธีการแรงดันเปิดวงจร (Open Circuit Voltage Method – OCV Method)

วิธีแรงดันเปิดวงจรจะทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่ เป็นสถานะประจุ โดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับสถานะประจุของแบตเตอรี่ (OCV-SoC Curve) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้นจากกระแสแบตเตอรี่และอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามหากจะใช้วิธีนี้แบตเตอรี่จะต้องอยู่ในสภาวะเปิดวงจรเป็นเวลานาน

ดังนั้นในการหาแรงดันเปิดวงจรในสภาวะปกติ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของแรงดันระหว่างช่วงของการอัดประจุและคายประจุด้วยกระแสคงที่ ในสภาวะที่สามารถควบคุมได้ (Controlled

Condition) เพื่อเก็บค่าแรงดันระหว่างขั้ว (Terminal Voltage) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ โดยใช้กราฟเปรียบเทียบ (Lookup Table) ของ OCV-SoC Curve ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นตามที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ

### 2.3.3 วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

เพื่อทำการกำจัดข้อบกพร่องของวิธีนับตัวคูลอมบ์ จึงได้ใช้ตัวกรองคาลมานแบบเตอร์ ซึ่งตัวกรองคาลมานจะใช้ในการประมาณแรงดันส่วนเกิน เนื่องจากกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้ร่วมกับวิธีการรวมกระแส จะสามารถทำการประเมิน SoC และค่าความต้านทานภายใน ได้อย่างแม่นยำ โดยจุดเด่นของการใช้ตัวกรองคาลมาน คือ สามารถปรับความน่าเชื่อถือของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์ โดยจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.8

## 2.4 สถานะสุขภาพ (State of Health)

สถานะสุขภาพ (State of Health - SoH) คือ สถานะหรือสุขภาพของแบตเตอรี่ในการทำงาน โดยจะวัดความสมบูรณ์และสุขภาพของแบตเตอรี่ว่าเหลืออยู่ในสภาพที่ดี และสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพหรือไม่ การวัด State of Health นั้นสามารถใช้ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ซึ่งสามารถทำได้โดยวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น ความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ เปอร์เซนต์ความเสื่อมสภาพ หรือค่าการสูญเสียความจุ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยปกติแล้ว ค่า State of Health ที่สูงแสดงถึงสภาพแบตเตอรี่ที่ยังดีและมีประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ ในขณะที่ค่า

State of Health ที่ต่ำแสดงถึงการเสื่อมสภาพและความไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพของ แบตเตอรี่

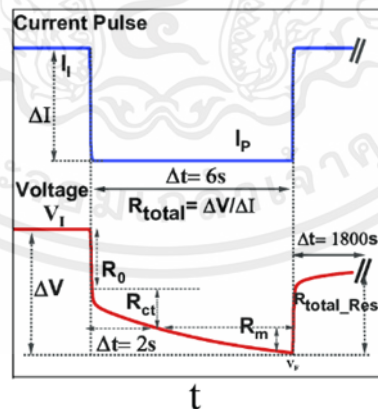
$$SoH = \frac{Q}{Q_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

โดยที่  $Q$  เป็นค่าความจุเริ่มต้น

$Q_0$  เป็นค่าความจุปัจจุบัน

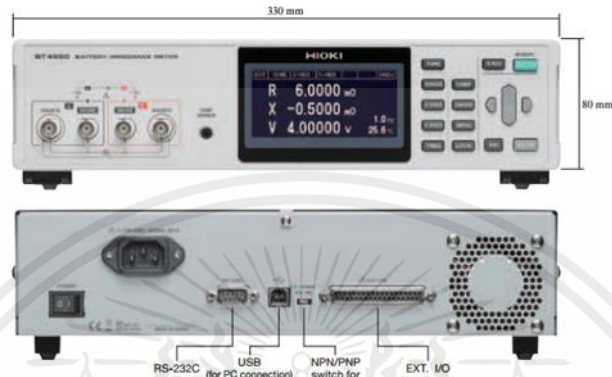
## 2.5 วิธีการวัดอิมพีแดนซ์กระแสสลับ (AC Impedance Measurement)

การหาค่าความต้านทานเริ่มต้นภายในของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบวิธีการวัด กระแสตรงที่สามารถทำได้โดยการสร้างพัลส์ของกระแส โดยขนาดความกว้างของพัลส์มีขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำให้การคายประจุของแบตเตอรี่ พักแบตเตอรี่ และอัดประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งในการอัดประจุของแบตเตอรี่จะมีผลของประสิทธิภาพคูลอมบ์ (Coulomb Efficiency) เข้ามาเกี่ยวข้องที่สามารถหาความต้านทานเริ่มต้นภายในของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.3



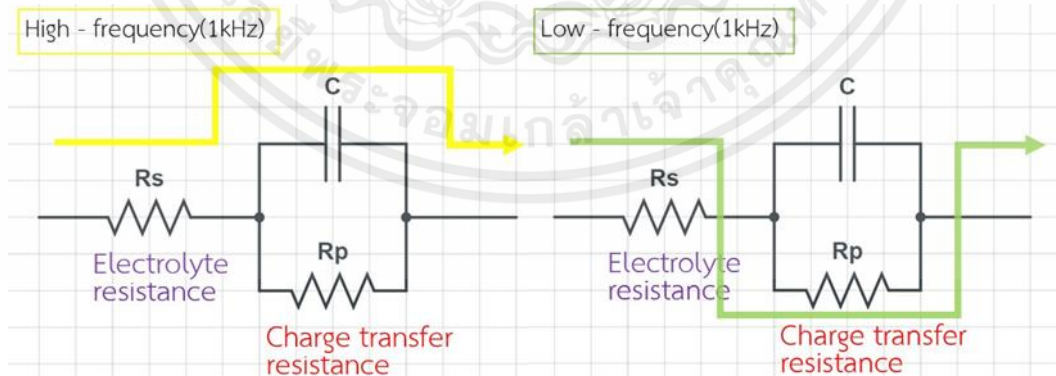
รูปที่ 2.3 การวัดพัลส์กระแสตรง (DC Pulse Measurement)

การหาค่าความต้านทานเริ่มต้นภายในของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบวิธีการวัดกระแสสลับที่สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ BT4560 ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงอยู่ที่ระหว่าง 0.1-1000 Hz

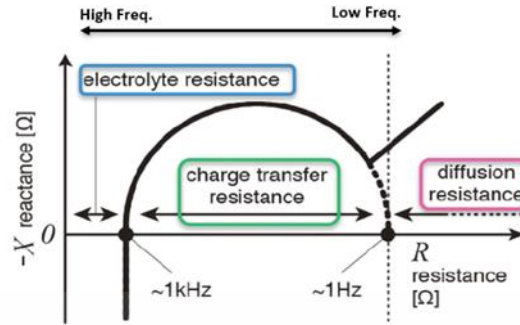


รูปที่ 2.4 เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ BT4560

เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ใช้ในการวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงในรูปแบบของแผนภาพโคล-โคล (Cole-Cole plot) โดยในย่านความถี่ต่ำค่าความต้านทานที่วัดได้คือความต้านทานภายในแบตเตอรี่ และในส่วนของย่านความถี่สูงค่าความต้านทานที่วัดได้คือ Electrolyte Resistance เนื่องจากที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุแสดงพฤติกรรมลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.6

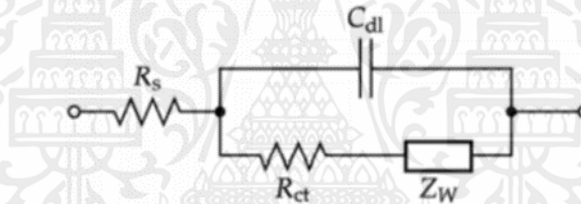


รูปที่ 2.5 วงจรค่าความต้านทานที่ย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.6 แผนภาพโคล-โคลสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

## 2.6 อิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก (Warburg Impedance)



รูปที่ 2.7 วงจรแบบแรนเดลล์

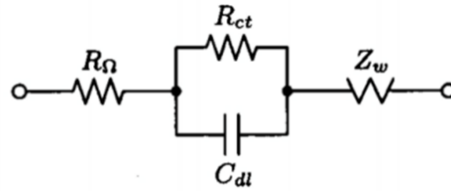
โดยที่  $R_s$  คือ ความต้านทานอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Resistance)

$R_{ct}$  คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge Transfer Resistance)

$C_{dl}$  คือ ความเก็บประจุของชั้นดับเบิลเลเยอร์ (Double-layer Capacitance)

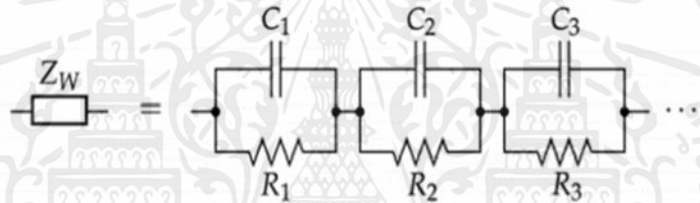
$Z_w$  คือ ความต้านทานของการแพร่ (Warburg Impedance or Diffusion Resistance)

เนื่องจากอิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์ก มีค่าคงที่เวลา (Time constant) มากกว่าตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Double-layer Capacitance) เป็นเวลามากดังนั้นจึงสามารถแยกอิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์กออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรแทนเดิลล์แบบปรับปรุง

เนื่องจากสมการอนุพันธ์แบบปกติ ไม่สามารถดำเนินการแทนอิมพีแดนซ์แบบวาเบิร์กได้ ดังนั้นจึงใช้โครงข่ายตัวต้านทาน-ตัวเก็บประจุหลายตัว (Multiple resistor-capacitor network) ที่มีการต่ออนุกรมมาอธิบายแทนซึ่งเรียกว่าวงจรแบบฟอสเตอร์ (Foster's Circuit) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรแบบฟอสเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรแบบฟอสเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

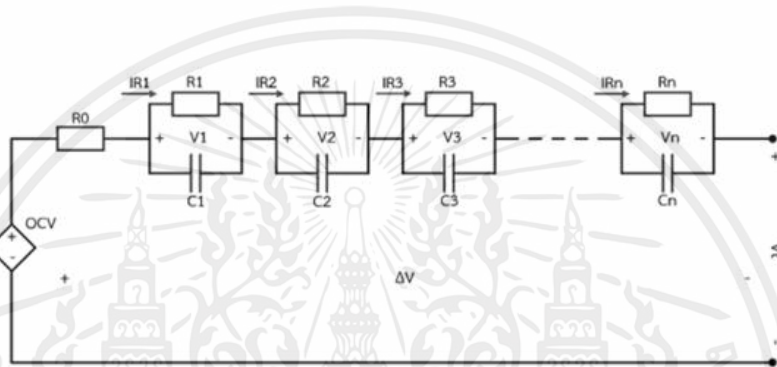
$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8R_d}{1 + \frac{(2n-1)^2 \pi^2}{4\tau_d s}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + sC_n R_n} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายในวงจรแบบฟอสเตอร์ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (2.5)$$

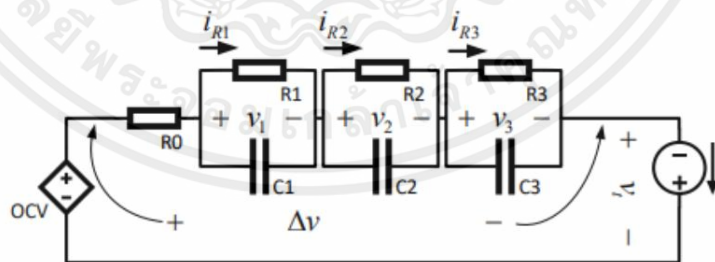
$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (2.6)$$

เนื่องจากตัวเก็บประจุดับเบิลเลเยอร์ เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะส่งผลกระทบต่อวงจรมีน้อยมาก จึงสามารถละเว้นได้ ทำให้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่สามารถแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองวงจรสมมูลของแบตเตอรี่

## 2.7 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.11 3rd Order Battery Equivalent Circuit Model

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 State-space model สามารถแสดง State variables ได้ทั้งในรูปแบบของกระแสและแรงดัน

รูปแบบของกระแส State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's equivalent

$$\left[ \frac{di_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} i \quad (2.7)$$

$$v_t = OCV(\text{SoC}) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} \quad (2.8)$$

$$i_R = A i_R + B i \quad (2.9)$$

$$v_t = OCV(\text{SoC}) + C v_R + D i \quad (2.10)$$

โดยที่ A คือ transition matrix ของ  $i_R$

B คือ transition matrix ของ  $i$

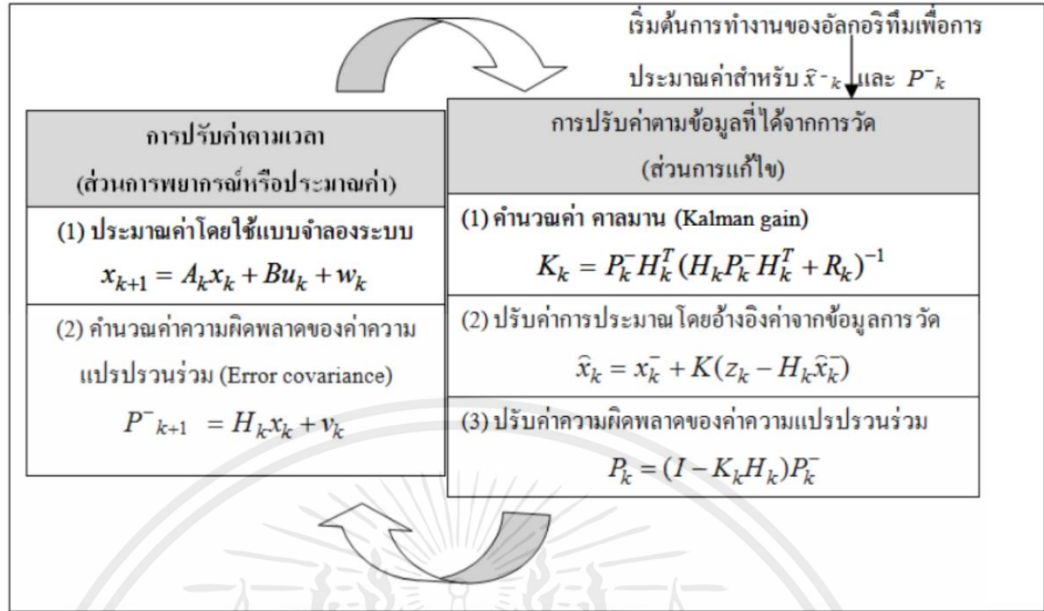
C คือ transition matrix ของ  $v_R$

D คือ transition matrix ของ  $i$

## 2.8 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) คือการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Estimation) เป็นขั้นตอนวิธีแบบเวียนบังเกิดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัต โดยการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัตนี้ อาจจะใช้ในกรณีที่ต้องการประมาณตัวแปรสถานะที่ถูกสัญญาณรบกวน หรือเกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดตัวแปรสถานะนั้น หรือในการบางกรณีก็ใช้ร่วมกับข้อมูลของตัวแปรสถานะที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์ ซึ่งทำให้ข้อมูลของตัวแปรสถานะมีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว

โดยแบบจำลองที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างตัวกรองคาลมานมี 2 ส่วนหลักคือแบบจำลองระบบ (State Transition Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน

### 2.8.1 ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended Kalman Filter)

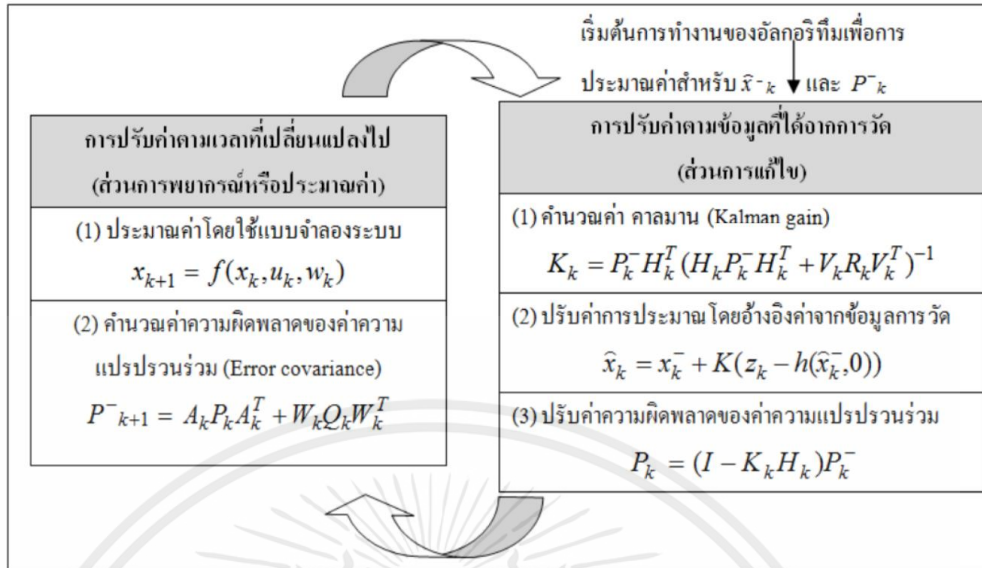
โดยหลักการทำงานของอัลกอริทึม สิ่งที่แตกต่างกันจากตัวกรองคาลมานแบบปกติก็คือ ฟังก์ชันที่ถูกนำไปใช้ใน แบบจำลองจะเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองระบบและแบบจำลองการวัดโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

แบบจำลองระบบ (State Transition Model)

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \tag{2.11}$$

แบบจำลองการวัด (Measurement Model)

$$z_k = h(x_k, v_k) \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.13 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น

โดยที่  $f$  คือ ฟังก์ชันของค่าต่างๆ

$h$  คือ ฟังก์ชันของค่าที่ได้จากเรื่องวัดพารามิเตอร์ (มี noise error)

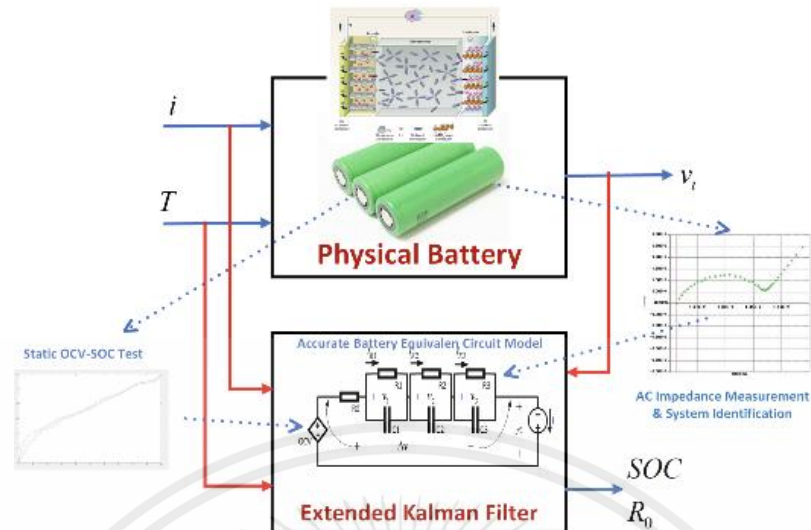
$x_k$  คือ Current state (State ที่จะทำการ predict)

$u$  คือ Known input (ค่าที่เราารู้อยู่แล้ว)

$W_k$  คือ Process noise (เกิดจากสิ่งต่างๆที่มารบกวนระบบ)

$V_k$  คือ Measurement noise (เกิดจากอุปกรณ์เครื่องวัด หรือเซนเซอร์ต่างๆ)

กระบวนการที่ถูกเพิ่มขึ้นใน Extended Kalman Filter คือการแปลงฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง  $f$  และ  $h$  ให้เป็นฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นในทุก ๆ สถานะที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปของแบบจำลองโดยใช้เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ซึ่งเป็นรูปแบบการหาอนุพันธ์ โดยจะใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Order Derivative)



รูปที่ 2.14 Extended Kalman Filter

## 2.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Kalman Filter

การประมาณค่าของตัวกรองคาลมานจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ขั้นตอน คือ การพยากรณ์ค่า และการอัปเดตค่า โดยจะเริ่มจาก สร้างระบบที่ทำการประมาณสแตตของระบบเดิมโดยใช้ค่าผลต่างระหว่างการวัดจริง ( $Z_k$ ) กับค่าประมาณ ( $X_{k+1}$ ) นำมาปรับตัวทำนายสแตต ( $X_k$ ) เพื่อให้พารามิเตอร์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด

### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

ในการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ ซึ่งใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่น US18650VTC6 โดยวิธีตัวกรองคาลมานนั้นต้องใช้ค่าเริ่มต้นคือ เส้นโค้งเปิดวงจร (OCV-SoC Curve) และค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่



Nominal Capacity at 0.2C	3130mAh 11.3Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Rated Capacity at 0.2C	3000mAh 10.8Wh	discharge 2.0V cut off at 23°C
Capacity at 1C	3007mAh 10.8Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Capacity at 10A	2940mAh 10.5Wh	discharge 2.5V cut off at 23°C
Nominal Voltage	3.6V	
Internal Impedance	12.8mΩ Typ.	measured by AC1kHz
Cycle Performance	60% Min. of Initial capacity at 500 cycles	7.5,15A discharge

**\* Standard Charge Condition**

Charge Method : constant current constant voltage  
 Charge Up Voltage : 4.2 ± 0.05V  
 Charge Current : 3.0A  
 Charge Time : 2.5h  
 Ambient Temperature: 23°C

รูปที่ 3.1 แบตเตอรี่และคุณสมบัติของแบตเตอรี่ US18650VTC6

เหตุผลที่เลือกใช้แบตเตอรี่ US18650VTC6 ในการทดลองเพื่อพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นเพราะอ้างอิงจากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเซลล์ทุติยภูมิชนิดลิเทียมไอออนสำหรับการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า เล่มที่ 1 การทดสอบสมรรถนะ กำหนดว่าอัตราความจุ (Rate Capacity) ค่าความจุของเซลล์ในหน่วย Ah (Ampere hours) สำหรับ BEV (Battery Electric Vehicle) ให้มีค่าการทดสอบ Charge ที่ 3C และทดสอบ Discharge ที่ 1/3C ซึ่งแบตเตอรี่ US18650VTC6 มีคุณสมบัติที่ครบถ้วนจึงเลือกใช้ในการทดลอง

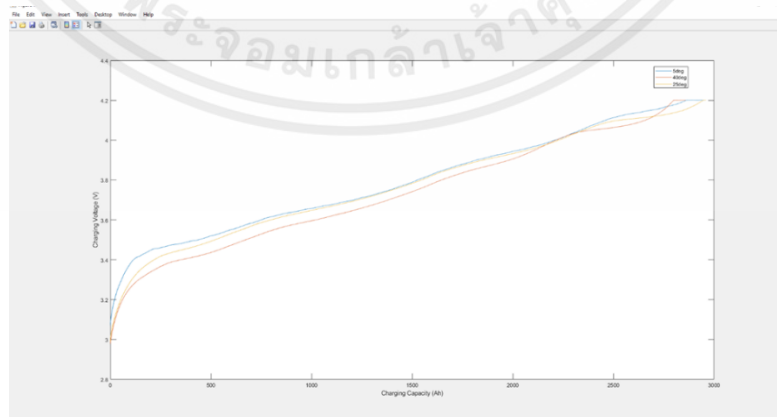
การประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery) โดยวิธีตัวกรองคาลมานนั้นต้องมีค่าเริ่มต้นคือ เส้นโค้งเปิดวงจรและค่าพารามิเตอร์ของวงจร

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ US18650VTC6

Common chemical name / General name	CAS number	Concentration / Concentration range
Lithium Nickel Cobalt Oxides	113066-89-0	38%
Graphite	7782-42-5	18%
Ethylene Carbonate	96-49-1	3%
Dimethyl Carbonate	616-38-6	7%
Lithium hexafluorophosphate	21324-40-3	3%
Aluminum	7429-90-8	4%
Copper	7440-50-8	12%
Iron	7439-89-6	12%

### 3.1 อุณหภูมิกับแบตเตอรี่

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีผลกระทบอย่างมากต่อระยะการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้า สาเหตุหลักคือ ประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิต่ำ โดยอ้างอิงจากวิจัย (Xianzhi Gong, Temperature-Dependent Performance of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles) สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ความสัมพันธ์ OCV-SoC จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ OCV เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของทั้งอุณหภูมิและ SoC



รูปที่ 3.2 Low current (0.6) charging voltage ที่ 40 °C, 25 °C, 0 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 AC Measurement

การหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบเอซี สามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงระหว่าง 0.1-1000 Hz

Battery Impedance Meter ในการวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ซึ่งแสดงในรูปแบบของ Cole-Cole plot โดยในย่านความถี่ต่ำ ค่าความต้านทานที่วัดได้คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ส่วนในย่านความถี่สูง ค่าความต้านทานที่วัดได้คือ Electrolyte Resistance เนื่องจากที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุแสดงพฤติกรรมลัดวงจร

การทดลอง AC Measurement เพื่อหาค่าพารามิเตอร์  $R_0$  มีข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Battery Impedance Meter BT4560 ดังนี้

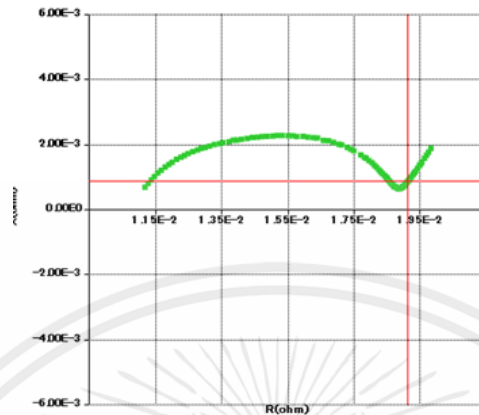
No.	FREQUENCY(Hz)	R(ohm)	X(ohm)	V(V)	T(deg C)
1	1000	1.12E-02	-6.95E-04	3.61E+00	2.40E+01
2	910	1.13E-02	-8.13E-04	3.61E+00	2.40E+01
3	830	1.14E-02	-9.22E-04	3.61E+00	2.40E+01
4	760	1.15E-02	-1.03E-03	3.61E+00	2.40E+01
5	690	1.16E-02	-1.13E-03	3.61E+00	2.40E+01
6	630	1.17E-02	-1.22E-03	3.61E+00	2.40E+01
7	570	1.18E-02	-1.32E-03	3.61E+00	2.40E+01
8	520	1.19E-02	-1.40E-03	3.61E+00	2.40E+01
9	480	1.20E-02	-1.47E-03	3.61E+00	2.40E+01
10	430	1.21E-02	-1.55E-03	3.61E+00	2.40E+01
11	390	1.23E-02	-1.62E-03	3.61E+00	2.40E+01
12	360	1.24E-02	-1.67E-03	3.61E+00	2.40E+01
13	330	1.25E-02	-1.74E-03	3.61E+00	2.40E+01
14	300	1.26E-02	-1.79E-03	3.61E+00	2.40E+01
15	270	1.28E-02	-1.85E-03	3.61E+00	2.40E+01

รูปที่ 3.3 ตาราง Cole-Cole plot สำหรับ SoC 50%

โดยแต่ละคอลัมน์สามารถอธิบายได้ดังนี้

No.	คือ	ลำดับการบันทึกข้อมูลของการทดลอง AC Measurement
FREQUENCY(Hz)	คือ	ความถี่ที่ใช้ในการทดลอง (Hz)
R(ohm)	คือ	ค่า R หรือส่วนจริงของค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
X(ohm)	คือ	ค่า X หรือส่วนจินตภาพของค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )
V(V)	คือ	แรงดันของแบตเตอรี่ (V)
T(deg C)	คือ	อุณหภูมิห้องขณะทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )

ทำการทดลองที่ SoC 50% จากการทดลองจะได้ผลลัพธ์เป็นกราฟ Cole-Cole plot ดังนี้



รูปที่ 3.4 Cole-Cole plot จาก SoC 50%



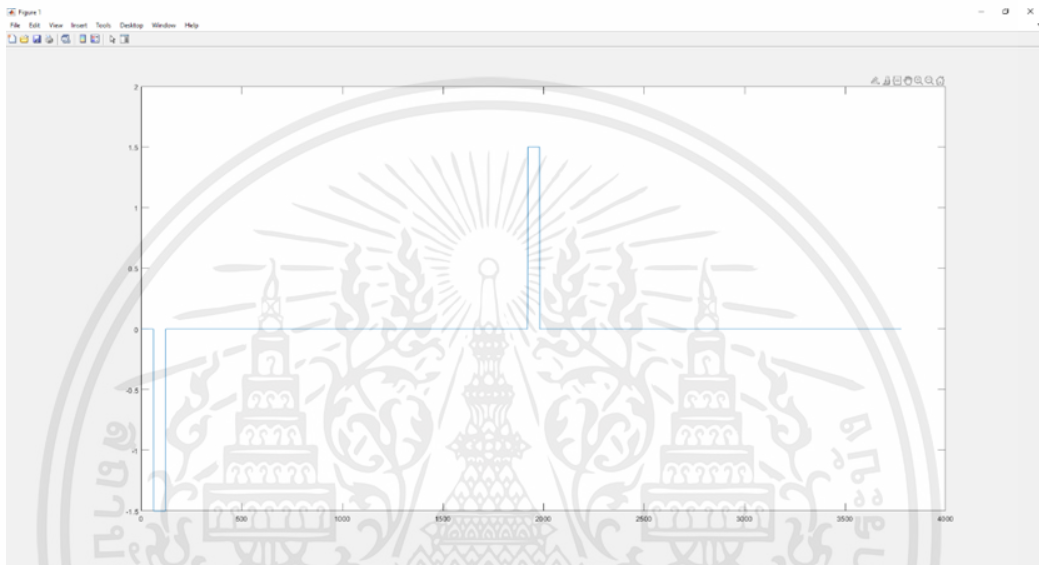
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 50 %

### 3.3 การทำ Pulse Testing

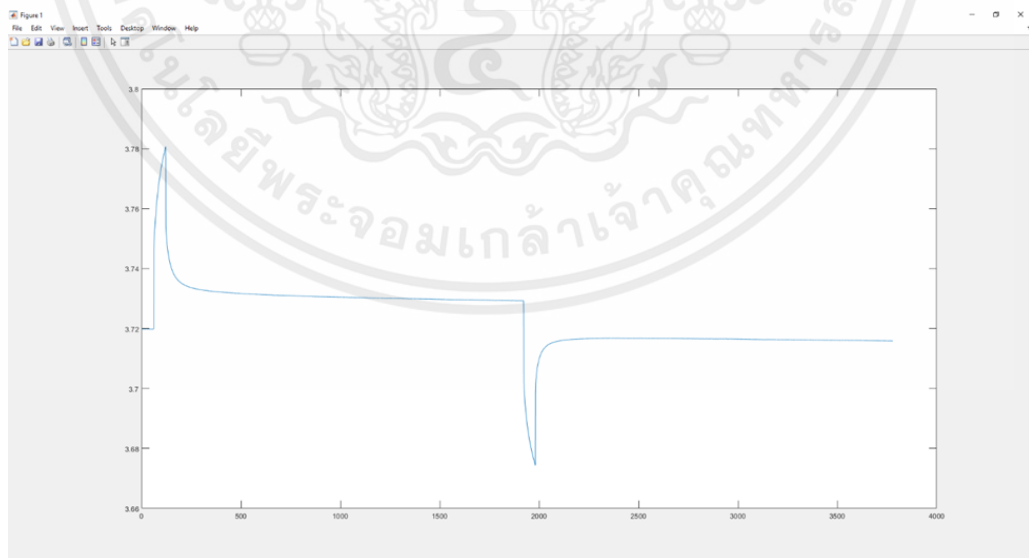
การชาร์จ / การคายประจุของพัลส์เป็นคลื่นสี่เหลี่ยมในปัจจุบันเป็นระยะ และการวิจัยและการปฏิบัติจำนวนมากได้พิสูจน์แล้วว่าทั้งประสิทธิภาพการชาร์จและอายุการใช้งานของวงจรสามารถปรับปรุงได้อย่างมากโดยใช้ฟังก์ชันพัลส์ การชาร์จ / การคายประจุแบบพัลส์ยังใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินคุณลักษณะของแบตเตอรี่โดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาของพัลส์ โดยขั้นตอนการปฏิบัติมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ขั้นตอนที่ 1 Discharge ด้วยกระแส 1.5 A เป็นเวลา 60 วินาที
- ขั้นตอนที่ 2 Rest 1800 วินาที
- ขั้นตอนที่ 3 Charge ด้วยกระแส 1.5 A เป็นเวลา 60 วินาที
- ขั้นตอนที่ 4 Rest 1800 วินาที



รูปที่ 3.6 กราฟกระแส จาก Pulse Testing

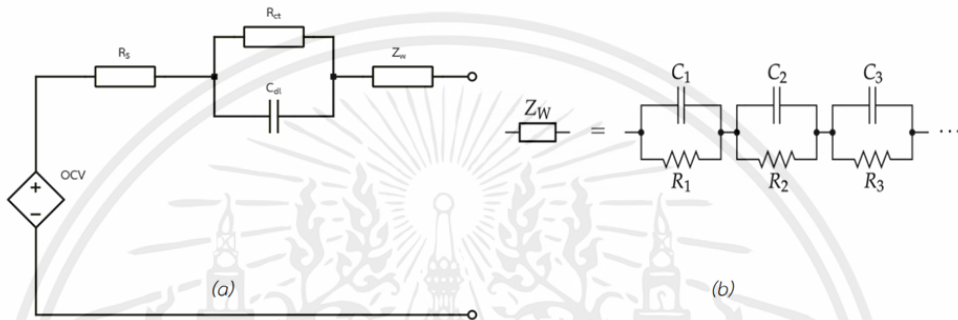


รูปที่ 3.7 กราฟแรงดัน จาก Pulse Testing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วย System Identification

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ทำการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบตเตอรี่  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ซึ่ง  $R_0$  สามารถหาค่าพารามิเตอร์จาก Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์  $R_0$  เท่ากับ  $18.5 \text{ m}\Omega$  ส่วนพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จาก Warburg Impedance ในรูปของ Foster's Circuit ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Battery Equivalent Circuit, (a) Modified Randle Circuit, (b) Warburg Impedance

ในรูปของ Foster's Circuit

โดยทั่วไปสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  $C_{dl}$ , ซึ่งคือ Double-layer Capacitance ที่เกิดขึ้นระหว่าง ขั้วอิเล็กโทรด กับ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีค่าน้อยมาก จึงไม่ต้องนำมาคิด ซึ่ง Warburg Impedance สามารถแสดงในรูปสมการที่ 3.1

$$z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2}}{1 + \frac{4\tau_d s}{(2n-1)^2 \pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + sC_n R_n} \quad (3.1)$$

จากสมการของ Warburg Impedance สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายใน Foster's Circuit ดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (3.2)$$

$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (3.3)$$

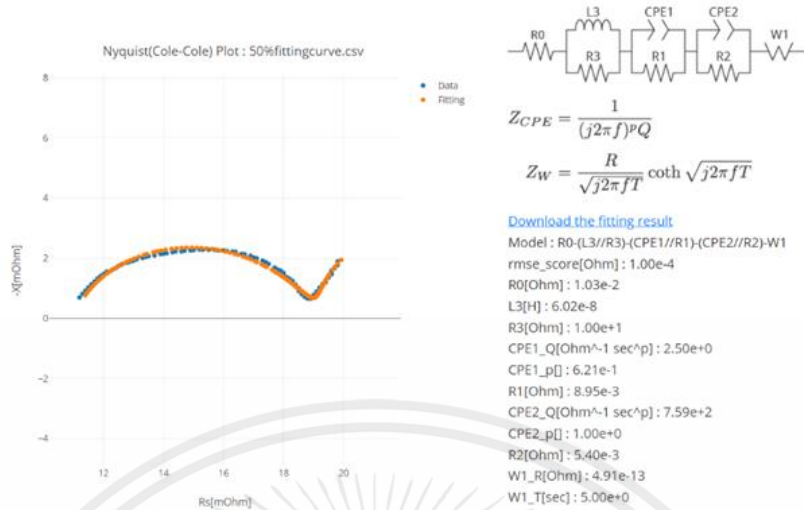
จากสมการข้างต้นสามารถแทนได้ด้วย Foster's Equivalent Circuit ดังรูป 3.8 (b) โดยค่าพารามิเตอร์  $R_d$  และ  $\tau_d$  สามารถหาค่าจากค่า Impedance ที่วัดได้จาก Battery Impedance Meter ในย่านความถี่ต่ำซึ่งมีค่าความถี่ที่ต่ำกว่า 1 Hz แล้วหลังจากนั้นจึงทำการหาค่าของพารามิเตอร์จากเว็บไซต์ <https://www.circuitfitting.net/> ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณค่าคือ

$$\text{Re}[Z_w(\sqrt{2\tau_d\omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \sinh(\sqrt{2\tau_d\omega})}{\sqrt{2\tau_d\omega}(\cos(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \cosh(\sqrt{2\tau_d\omega}))} \quad (3.4)$$

$$\text{Im}[Z_w(\sqrt{2\tau_d\omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d\omega}) - \sinh(\sqrt{2\tau_d\omega})}{\sqrt{2\tau_d\omega}(\cos(\sqrt{2\tau_d\omega}) + \cosh(\sqrt{2\tau_d\omega}))} \quad (3.5)$$

โดยในเทอมสุดท้ายของสมการข้างต้นสามารถแทนได้ด้วย Foster's Equivalent Circuit ดังรูปที่ 21 (b) โดยค่าพารามิเตอร์  $R_D$  และ  $\tau_D$  สามารถหาค่า Impedance ที่วัดได้จาก Battery Impedance Meter ในย่านความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 1 Hz) จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 3.9

Model	: $R_0 - (L_3/R_3) - (CPE_1/R_1) - (CPE_2/R_2) - W_1$	
rmse_score	: 1.00e-4	$\Omega$
$R_0$	: 1.03e-2	$\Omega$
$L_3$	: 6.02e-8	H
$R_3$	: 1.00e+1	$\Omega$
$CPE_{1\_Q}$	: 2.50e+0	$\Omega^{-1} \text{ sec}^p$
$CPE_{1\_p}$	: 6.21e-1	$\Omega^{-1} \text{ sec}^p$
$R_1$	: 8.95e-3	$\Omega$
$CPE_{2\_Q}$	: 7.59e+2	$\Omega^{-1} \text{ sec}^p$
$CPE_{2\_p}$	: 1.00e+0	$\Omega^{-1} \text{ sec}^p$
$R_2$	: 5.40e-3	$\Omega$
$W_{1\_R}$	: 4.91e-13	$\Omega$
$W_{1\_T}$	: 5.00e+0	sec

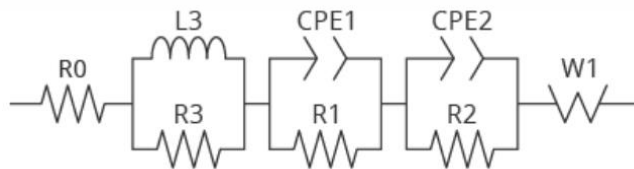


รูปที่ 3.9 ผลลัพธ์จาก เว็บไซต์ <https://www.circuitfitting.net/>

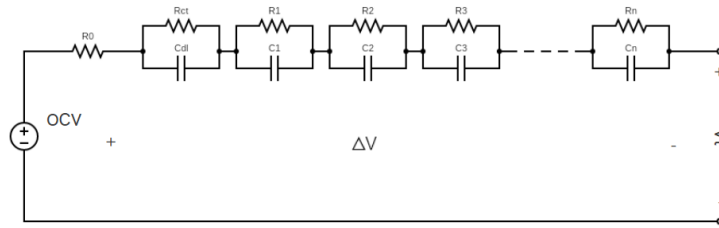
### 3.5 พารามิเตอร์ Capacitance ทา C<sub>1</sub>

ค่าที่ได้จากการที่ได้ทำการปรับเส้นโค้ง (Fitting Curve) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของ แบตเตอรี่ จากเว็บไซต์ <https://www.circuitfitting.net/> ทำให้โมเดลที่ได้มานั้นเป็นวงจรสมมูลไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Equivalent Circuit) จึงทำให้ต้องทำการแปลงค่า โดยการใช่วีปไซต์ <http://www.consultrsr.net/resources/eis/cpecalc.htm> ซึ่งเป็นเว็บไซต์แปลงค่า CPE (Constant Phase Element) เป็นค่า C (Capacitance) ซึ่งเราใช้โมเดลเป็นวงจรสมมูลเชิงเส้น (Linear-Equivalent Circuit) โดยใช้สมการที่ 3.6

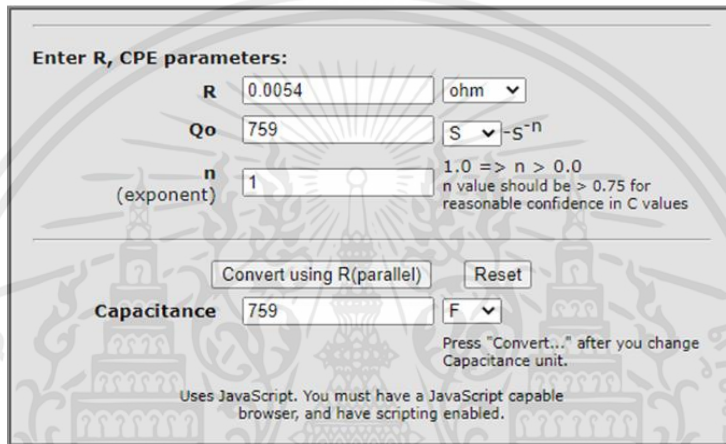
$$C = \frac{(Q_0 \times R)^{\frac{1}{n}}}{R} \tag{3.6}$$



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลที่ใช้ใน Circuitfitting.net



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 3.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จาก [consultrsr.net](http://consultrsr.net)

หาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่มีค่าดังต่อไปนี้

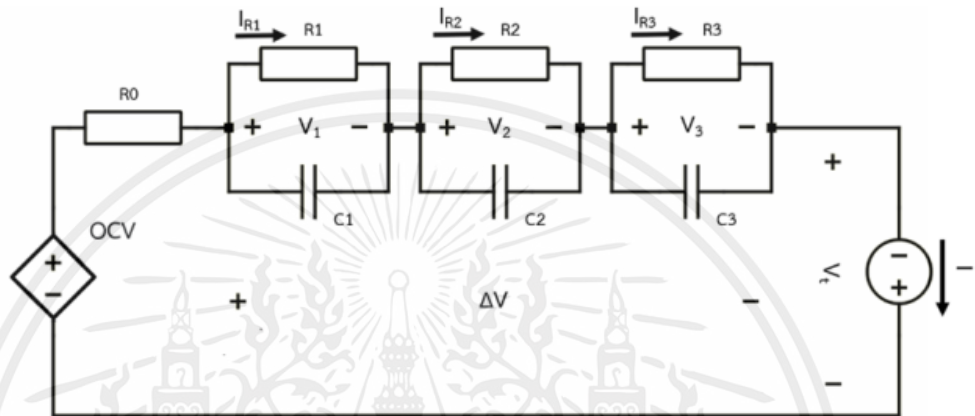
- $R_0 = 10.3e-3$
- $R_1 = 0.00894887838512659$
- $R_2 = 0.00539340637624263$
- $C_1 = 0.24591813813316$
- $C_2 = 759.981811523437$

เนื่องจากพารามิเตอร์เริ่มต้นที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน จึงใช้โปรแกรม MATLAB System- Identification Tool เพื่อให้ค่ามิเตอร์เริ่มต้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

System Identification ซึ่งอยู่ในรูปแบบ State-space Model ถูกนำมาใช้ใน Battery Equivalent-Circuit Model ดังสมการที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad (3.7)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.13 Non-Linear Battery Equivalent Circuit Model

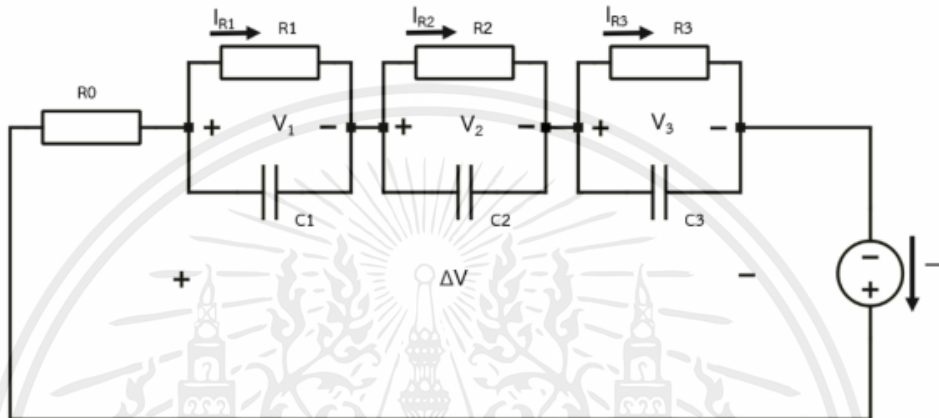
จากรูปที่ 3.13 เมื่อ State Variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's Circuit และอินพุตคือกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนสมการกระแสและแรงดันได้ดังสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$\left[ \frac{di_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} i \quad (3.9)$$

$$v_t = OCV(\text{SoC}) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} \quad (3.10)$$

เนื่องจากพจน์ของ OCV (SoC) เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ทำให้แรงดันสมการแรงดันระหว่างขั้วเป็น Non-linear Equation จึงทำให้การย้ายพจน์ OCV (SoC) ไปอยู่กับแรงดันระหว่างขั้วคือ  $\Delta V_k$  ขั้วดังสมการที่ 3.11

$$\Delta v = \text{OCV}(\text{SoC}) - V_t = R_0 i + R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} + R_3 i_{R3} \quad (3.11)$$

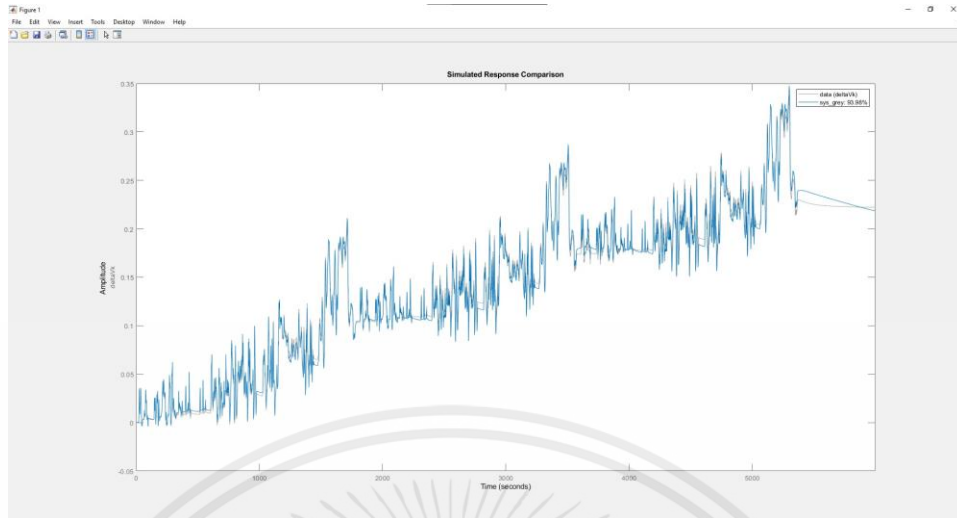


รูปที่ 3.14 Linear Battery Equivalent Circuit Model

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าเริ่มต้น จากนั้นทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นโดยใช้ฟังก์ชัน State-space Estimation จะได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่มีความถูกต้องมากขึ้นดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์จาก System Identification ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50 % ที่ C-rate C/30

ค่าพารามิเตอร์จาก System Identification ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50 %			
$R_0$	0.0312118	$C_1$	1280.71
$R_1$	0.01263	$C_2$	19458.2
$R_2$	2.41811	$C_3$	19458.2
$R_3$	0.268679		

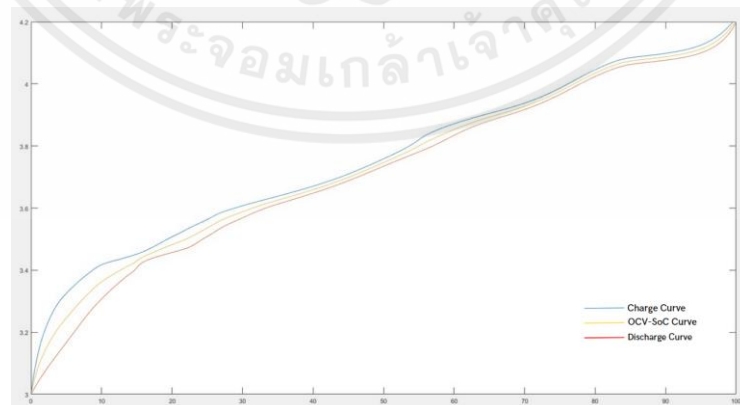


รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้ว ( $\Delta V$ ) ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด (เส้นสีเทา) และค่าที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (เส้นสีฟ้า)

### 3.6 การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วยตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น

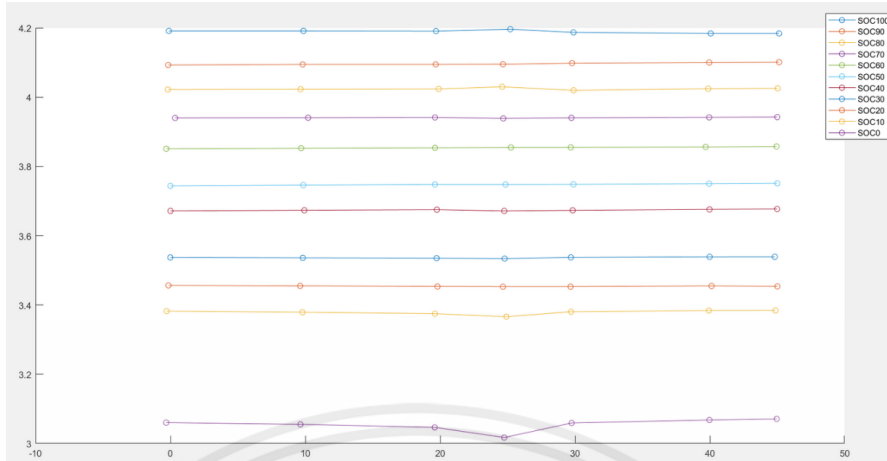
ในการสร้างฟังก์ชันดังกล่าวในการหาสมการเพื่ออธิบายเอาต์พุตของระบบโดยหมายถึงแรงดันระหว่างขั้ว จะใช้สมการที่ 3.12 ในการแสดงเอาต์พุตของระบบ

$$y[k] = \text{OCV}(\text{SoC}) - R_0 u[k] - x_2[k] - x_3[k] - x_4[k] \quad (3.12)$$



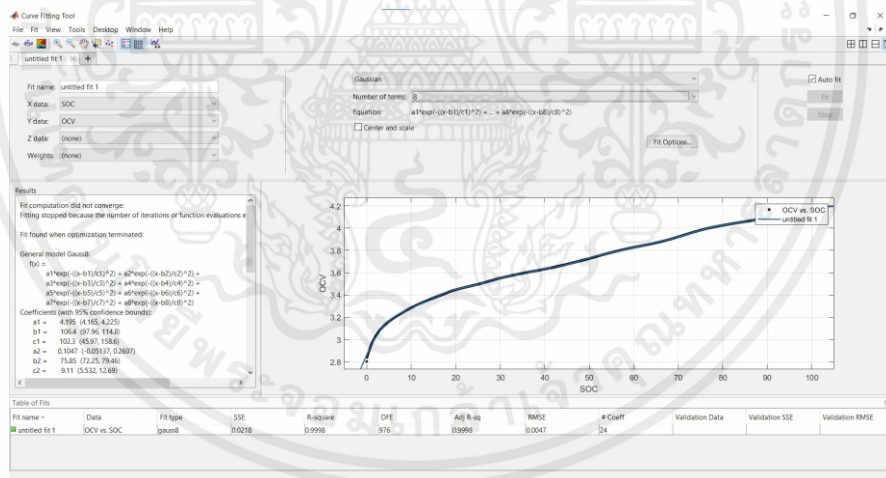
รูปที่ 3.16 OCV-SoC Curve ที่ C/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 OCV-Temperature Curve

จากรูปที่ 3.17 OCV ไม่เปลี่ยนตามอุณหภูมิ ดังนั้นจึงหาสมการ Fitting Curve ในการประมาณค่า OCV-SOC โดยฟังก์ชัน Curve Fitting Tool ในโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.18 การหาสมการเกาส์เซียนจาก Curve Fitting Tool ในโปรแกรม MATLAB

จากการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้ฟังก์ชัน Curve Fitting Tool ในโปรแกรม MATLAB โดยเลือกใช้สมการเกาส์เซียนในการทำ Curve Fitting โดยจะได้สมการเกาส์เซียน สมการที่ 3.13 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(x) = a_1 \exp(-((x(1)-b_1)/C_1)^2) + a_2 \exp(-((x(1)-b_2)/C_2)^2) + a_3 \exp(-((x(1)-b_3)/C_3)^2) + a_4 \exp(-((x(1)-b_4)/C_4)^2) + a_5 \exp(-((x(1)-b_5)/C_5)^2) + a_6 \exp(-((x(1)-b_6)/C_6)^2) + a_7 \exp(-((x(1)-b_7)/C_7)^2) + a_8 \exp(-((x(1)-b_8)/C_8)^2) - x(2) - x(3) - x(4) - u \cdot x(5) \quad (3.13)$$

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์จากสมการเกาส์เซียนโดยใช้ฟังก์ชัน Curve Fitting

ค่าสัมประสิทธิ์จากสมการเกาส์เซียน		
$a_1 = 4.562$	$b_1 = 123.6$	$c_1 = 64.5$
$a_2 = 1.215$	$b_2 = 73.86$	$c_2 = 19.38$
$a_3 = 1.072$	$b_3 = 58.55$	$c_3 = 12.25$
$a_4 = 1.347$	$b_4 = 46.47$	$c_4 = 10.84$
$a_5 = 1.367$	$b_5 = 34.64$	$c_5 = 10.42$
$a_6 = 0.1106$	$b_6 = 27.64$	$c_6 = 5.798$
$a_7 = 0.5679$	$b_7 = 21.6$	$c_7 = 9.559$
$a_8 = 3.075$	$b_8 = 6.346$	$c_8 = 26.81$

การประมาณสถานะแบบเตอร์โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีผลสัญญาณรบกวนเข้ามาเป็นส่วนเกี่ยวข้องด้วยกัน สมการที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) + w_k \quad (3.14)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) + v_k \quad (3.15)$$

โดยที่  $w_k$  คือ Process Noise และ  $v_k$  คือ Measurement Noise

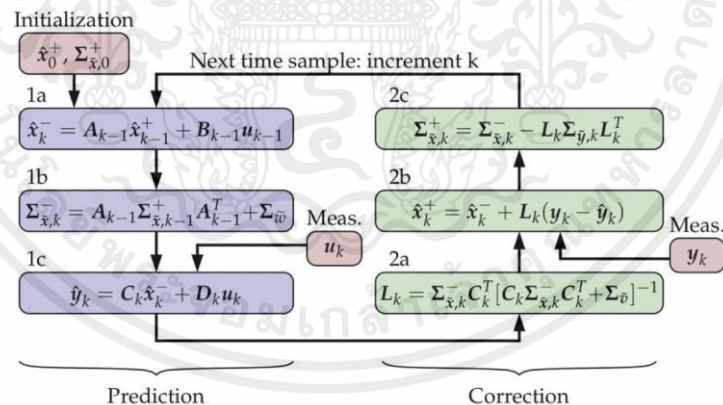
จากวงจรสมมูลของแบบเตอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14 เมื่อได้ค่าของพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ แล้วทำการใช้สมการดังต่อไปนี้ในการหาค่าของพารามิเตอร์โดยจะนำไปใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเส้นในโปรแกรม MATLAB

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \\ x_3[k+1] \\ x_4[k+1] \\ x_5[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \times C_1}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_2 \times C_2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{R_3 \times C_3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ x_3[k] \\ x_4[k] \\ x_5[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{Q \times 36} \\ R_1 \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_1 \times C_1}}) \\ R_2 \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_2 \times C_2}}) \\ R_3 \times (1 - e^{-\frac{\Delta t}{R_3 \times C_3}}) \\ 0 \end{bmatrix} U[k] \quad (3.15)$$

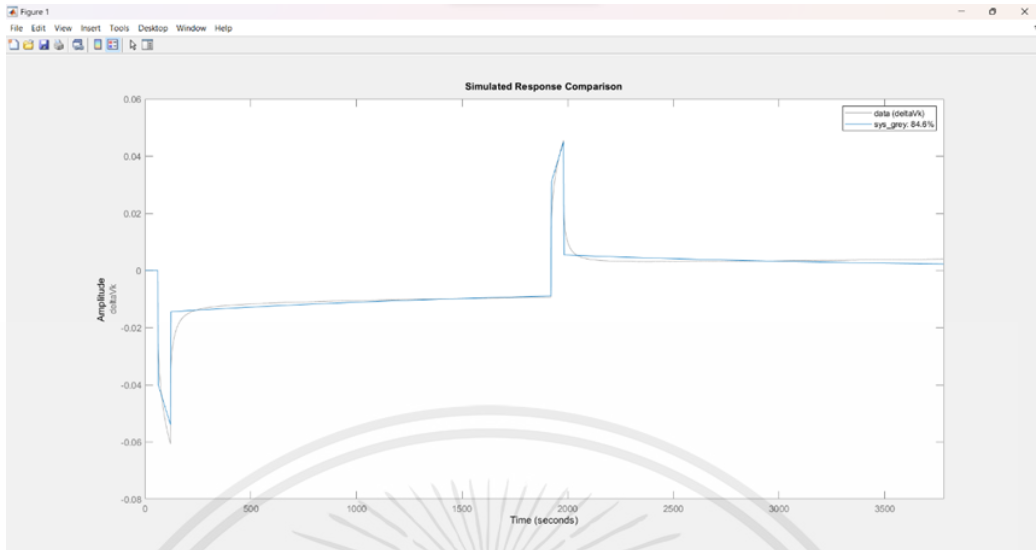
เมื่อ  $x_1[k] = \text{SoC}$ ,  $x_2[k] = v_1[k]$ ,  $x_3[k] = v_2[k]$ ,  $x_4[k] = v_3[k]$ ,  $x_5[k] = R_0[k]$

ค่าพารามิเตอร์ C สามารถหาได้จากสมการอนุพันธ์ของแรงดันเปิดวงจรเทียบกับสถานะของประจุ และค่าพารามิเตอร์ D จะมีค่าเป็นค่าคงที่ เท่ากับ 1

จากทฤษฎีตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีส่วนประกอบสำคัญ คือ การตรวจแก้ (Correction) และการทำนาย (Prediction) โดยการนำทฤษฎีนี้ไปเขียนโปรแกรมภาษา C ในโปรแกรม ArduinoIDE โดยจะมีสมการดังนี้



รูปที่ 3.19 สมการการตรวจแก้ และการทำนาย



รูปที่ 3.20 โปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าพารามิเตอร์กราฟ  $\Delta V_k$  เทียบกับเวลา

จากกราฟ  $\Delta V_k$  เทียบเวลาจะเห็นได้ວ່ามีความคลาดเคลื่อนจากพารามิเตอร์ที่เราคำนวณได้เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่คำนวณไว้ มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงได้ลองปรับพารามิเตอร์พบว่าชุดนี้ จะได้ค่าออกมาที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น

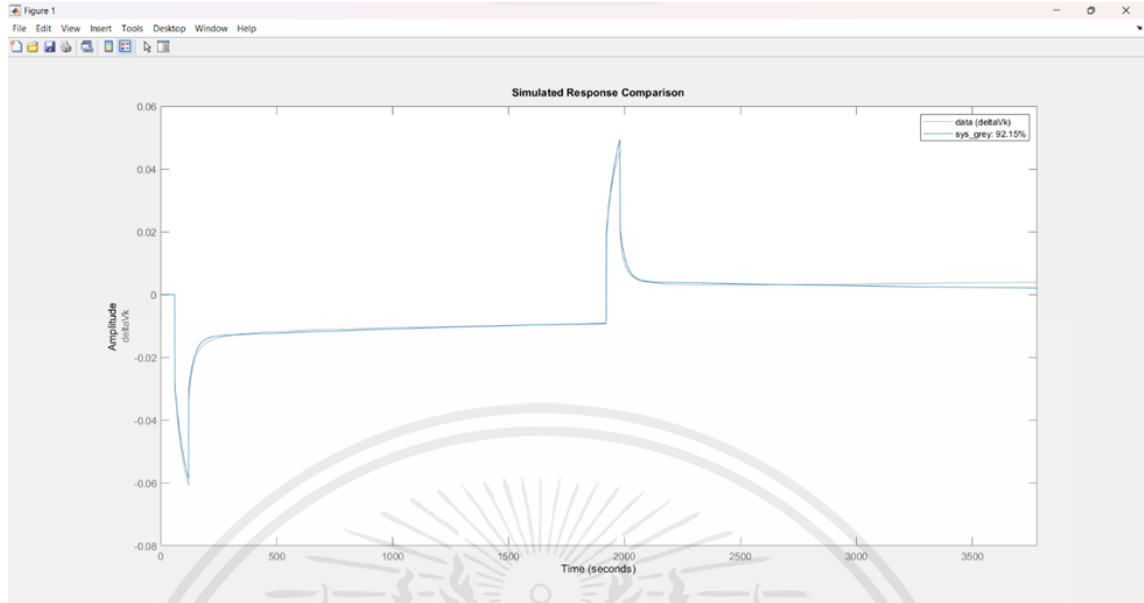
$$R_0 = 10.3e-3$$

$$R_1 = 0.009$$

$$R_2 = 0.0054$$

$$C_1 = 759$$

$$C_2 = 0.24$$



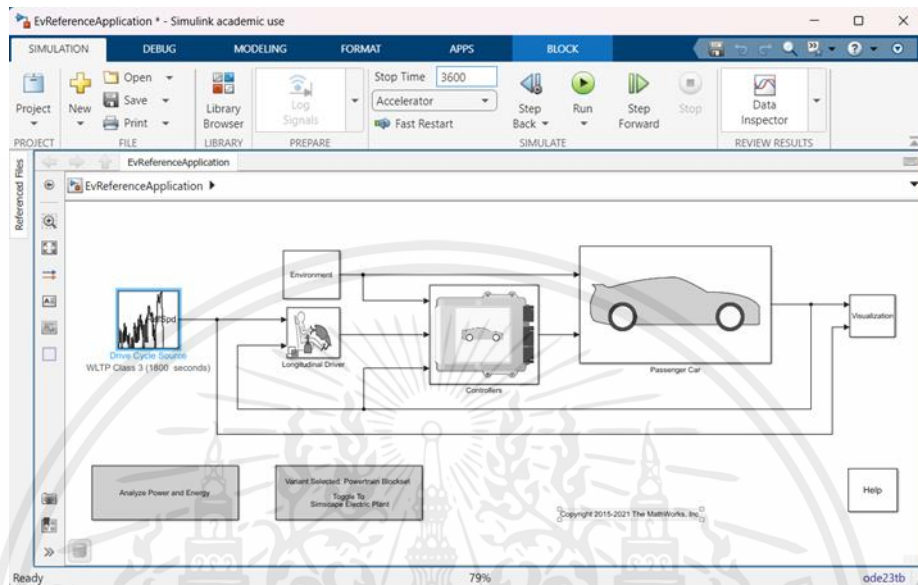
รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้ว ( $\Delta V$ ) ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด (เส้นสีเทา) และค่าที่ได้จาก System Identification (เส้นสีฟ้า)

ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น โดยการระบุเอกลักษณ์ของระบบ จะได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วยการทดลอง ที่ SoC 50% และ C-rate C/5 จะได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นดังนี้

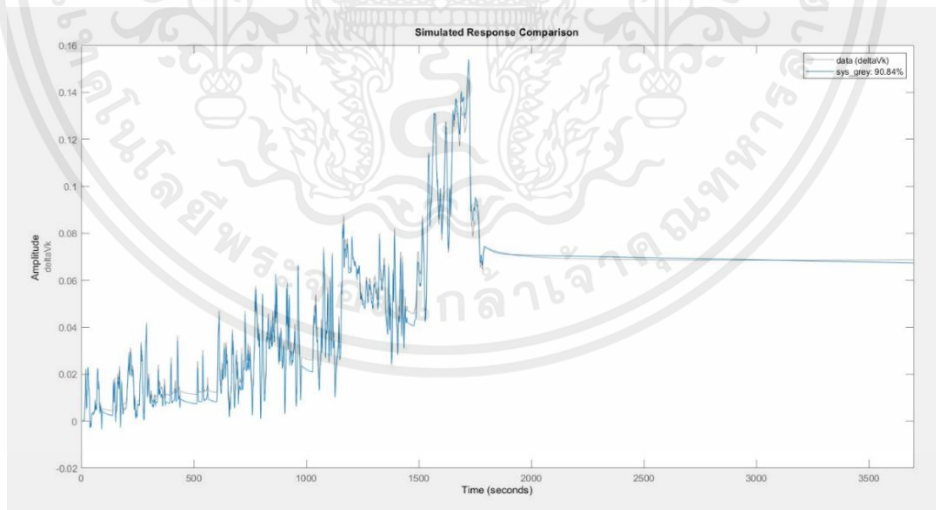
$$\begin{aligned}
 r_0 &= 0.0194993 \, \Omega & c_1 &= 2148.52 \, \text{F} \\
 r_1 &= 0.0120448 \, \Omega & c_2 &= 19877.8 \, \text{F} \\
 r_2 &= 2.27208 \, \Omega & c_3 &= 19877.8 \, \text{F} \\
 r_3 &= 0.252454 \, \Omega & c_4 &= 19877.8 \, \text{F} \\
 r_4 &= 0.0908833 \, \Omega & &
 \end{aligned}$$

จากนั้นทำการจำลอง EV Reference เพื่อดูพฤติกรรมการใช้งานแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า แล้วนำกระแสที่ได้มาเป็น อินพุต ให้กับแบตเตอรี่ที่เราใช้ทำการทดลอง โดยใช้ EV Reference Application ใน MATLAB ในการจำลอง โดยใช้ Model WLTP class 3 ซึ่ง Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) โดย WLTP ทำหน้าที่ตรวจสอบระดับของมลพิษ, คาร์บอนไดออกไซด์ และอัตราประหยัดของรถยนต์เครื่องยนต์ปกติและแบบ Hybrid และจะต้องทดสอบ

ระยะทางวิ่งได้ไกลของรถไฟฟ้า ซึ่ง class 3 คือรถที่มีกำลังเครื่องยนต์มากกว่า 34 วัตต์/น้ำหนักรถ 1 กิโลกรัม (รถยนต์ทั่วไป) เช่น รถ Nissan Ariya



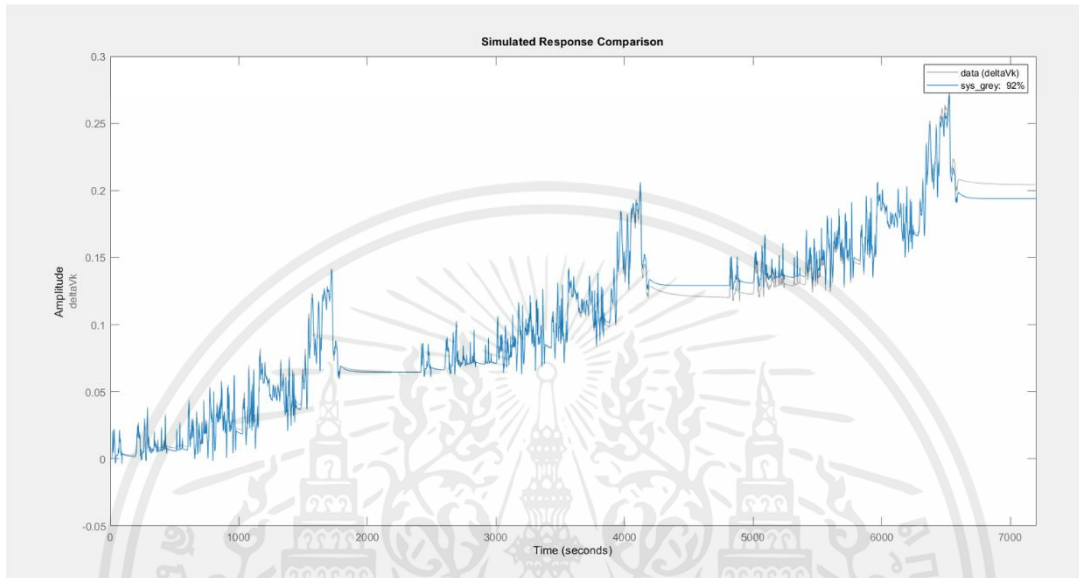
รูปที่ 3.22 การจำลอง EV Reference Application โดยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.23 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตามโปรไฟล์กระแสในการอัดและคายประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการปรับเทียบกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถแบบ WLTP3 ให้กระแสสามารถอัดและคายประจุให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ และทำการเพิ่มรอบเป็น 3 รอบ และทำการพักอีก 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.24 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตามโปรไฟล์กระแสในการอัดและคายประจุ 3 รอบ

## บทที่ 4

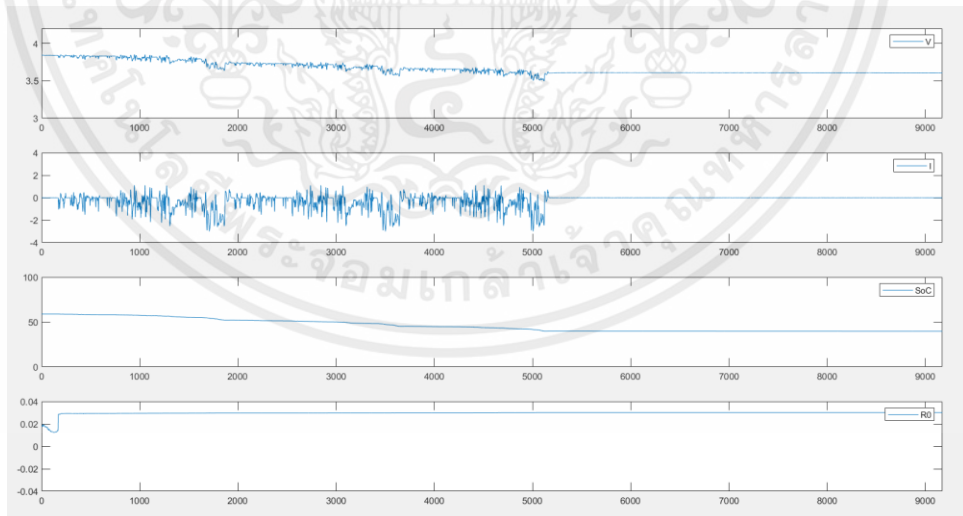
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองหาสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์

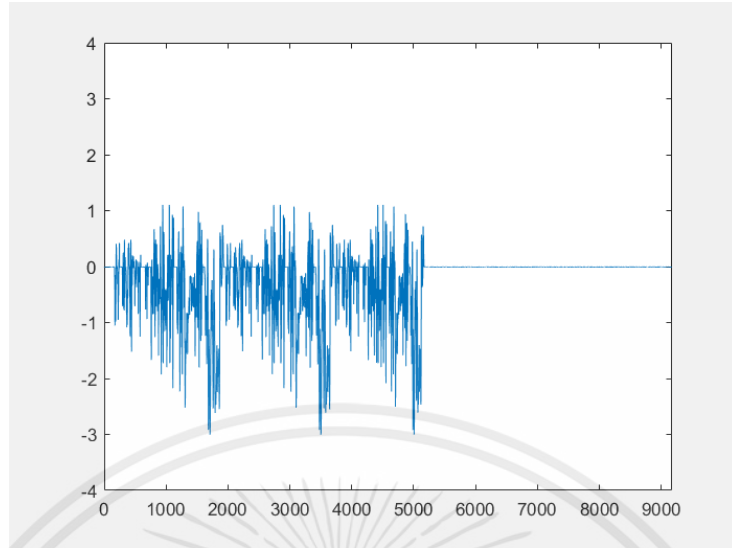
จากวงจรการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ทำการทดลอง โดยการป้อนโพรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving Cycle ของ WLTP3 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยกระแสวัดผ่าน ตัวตรวจจับกระแสและแรงดันเซลล์วัดผ่าน LTC6813-1 ที่อยู่ภายในบอร์ดสาธิต DC2350B ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซต เนื่องจากความผิดพลาดของอุปกรณ์วัดกระแส โดยมีค่าออฟเซตประมาณ 0.065 A

ในการทดลองจะใช้กระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซต และกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีออฟเซต ซึ่งได้จากการกำจัดออฟเซตทิ้ง แต่ยังคงมีค่าออฟเซตอยู่เพียงเล็กน้อย ประมาณ  $2.764 \times 10^{-4}$  A

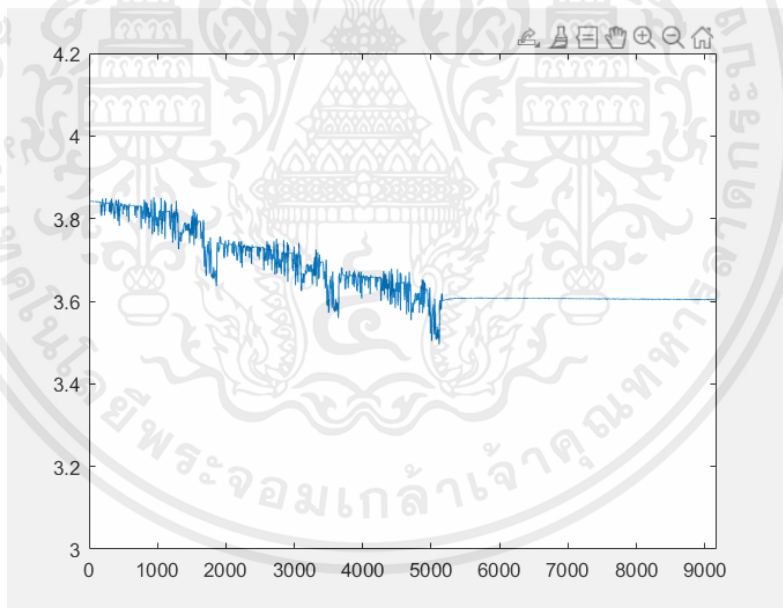
ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์จากบอร์ดสาธิต DC2350B ด้วยตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นผ่านโปรแกรม MATLAB สามารถประเมินสถานะของประจุได้อย่างแม่นยำ และสามารถประมาณค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เพื่อใช้ประเมินสถานะสุขภาพได้ต่อไปได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ข้อมูลแบบเรียลไทม์ในโปรแกรม MATLAB

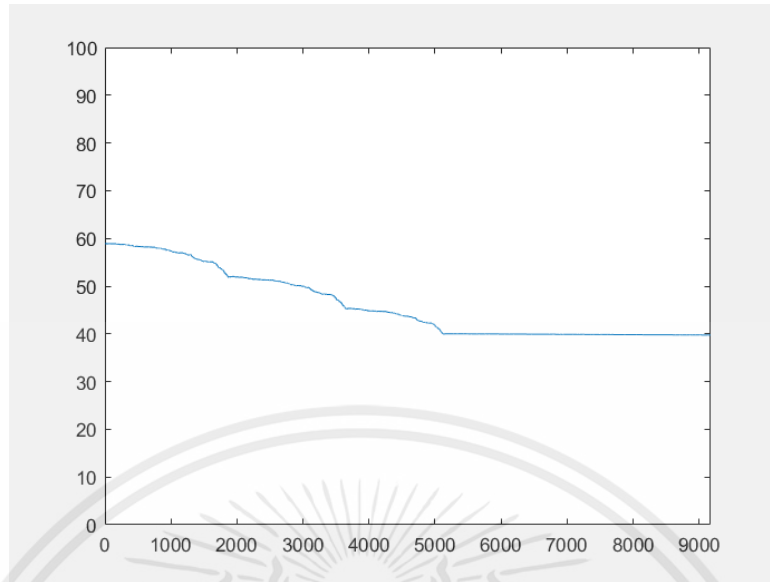


รูปที่ 4.2 กระแสไฟฟ้า

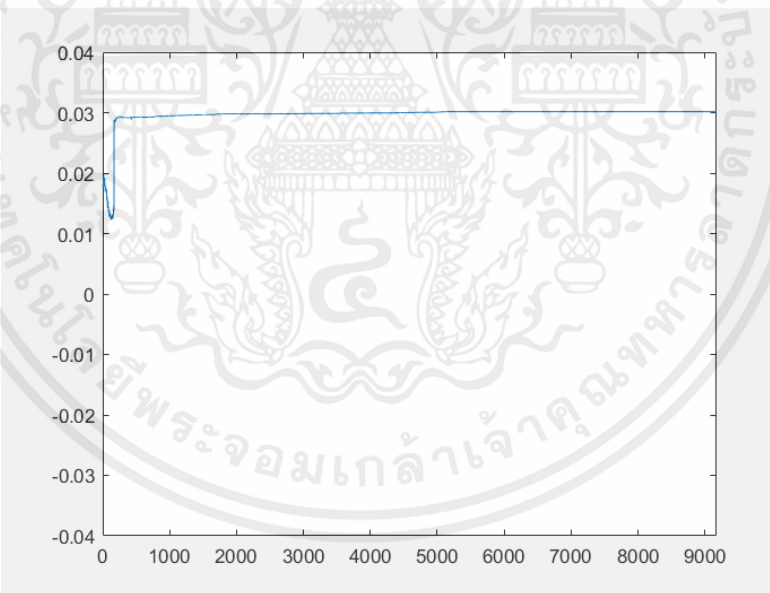


รูปที่ 4.3 แรงดันระหว่างขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

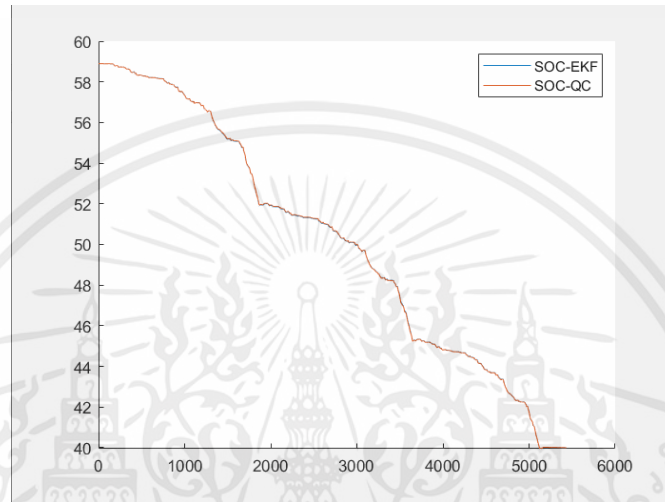


รูปที่ 4.4 สถานะประจุ (SoC)

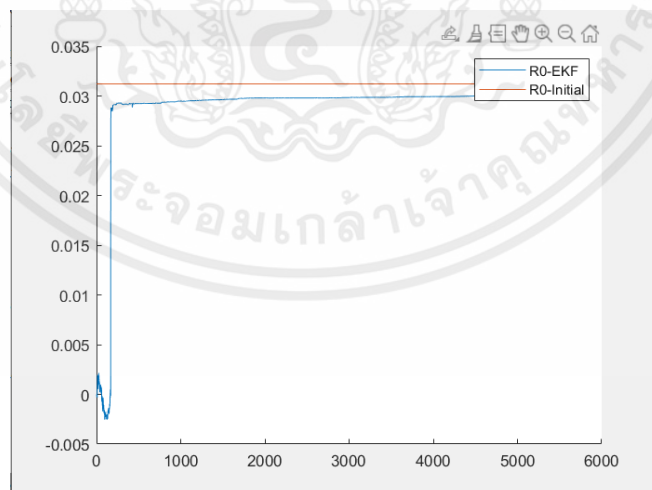


รูปที่ 4.5 ความต้านทานภายใน ( $R_0$ )

จากการทดลองประมาณสถานะของแบตเตอรี่หนึ่งเซลล์ เมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทำการประมาณสถานะของแบตเตอรี่โดยการใช้วิธีตัวนับคูลอมบ์ (Coulomb Counting) เพื่อใช้อ้างอิงเปรียบเทียบกับผลการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งมีค่าการประมาณสถานะประจุที่ใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบ SoC จากวิธีตัวนับแบบคูลอมบ์ (เส้นสีส้ม) และจากตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น (เส้นสีฟ้า)

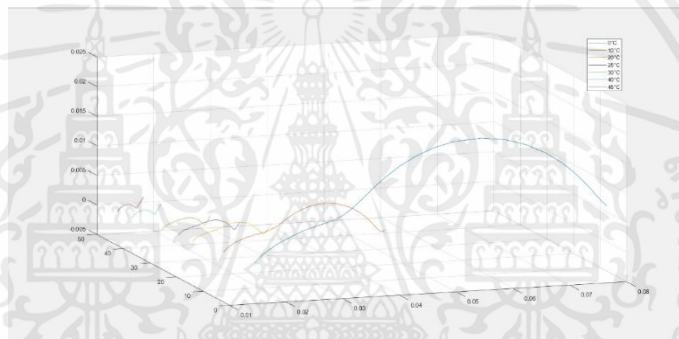


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานภายใน ระหว่างค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นจาก System Identification (เส้นสีส้ม) และจากตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น (เส้นสีฟ้า)

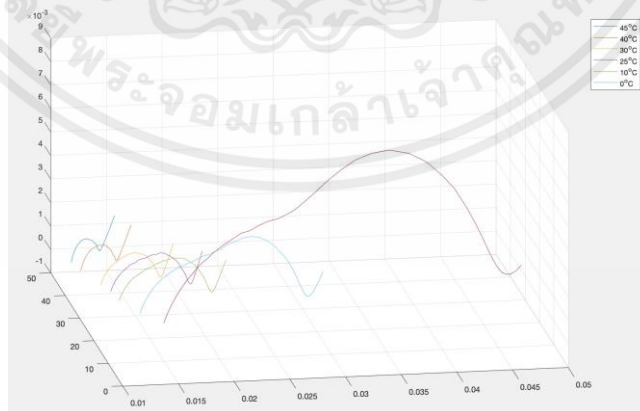
จากการทดลอง SoC และ ค่าความต้านทานภายใน ที่ได้จากตัวกรองคาบมานแบบไม่เชิงเส้นจะมีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ โดยจะเริ่มมีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแส SoC จะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่ากระแสที่ป้อนเข้ามา ในขณะที่ค่าความต้านทานภายในที่เริ่มต้นแบบให้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างคงที่หลังจากได้รับการปรับปรุงค่า

#### 4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ

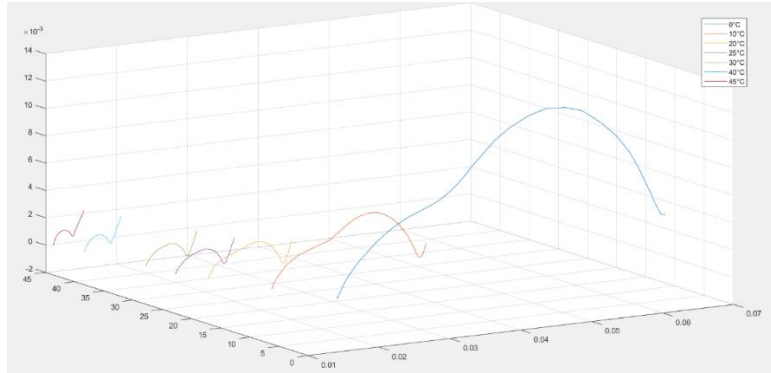
ในการทดลองนี้จึงทำการวัดความต้านทานภายในระหว่างช่วงที่ SoC ต่างๆ ในอุณหภูมิที่แตกต่างออกไป เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วกับอุณหภูมิ โดยจะทำการทดลองภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง  $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 20 %



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 50 %



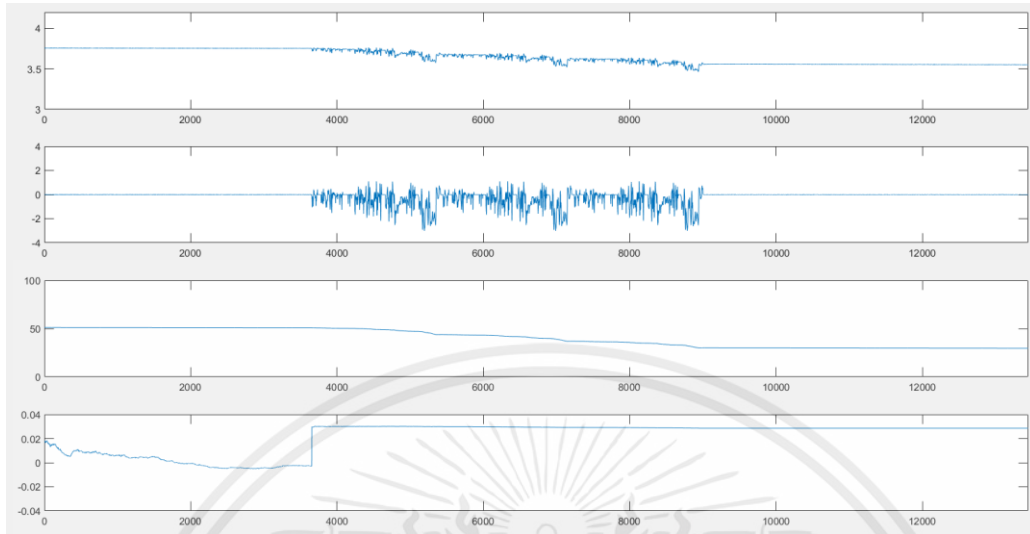
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 60 %



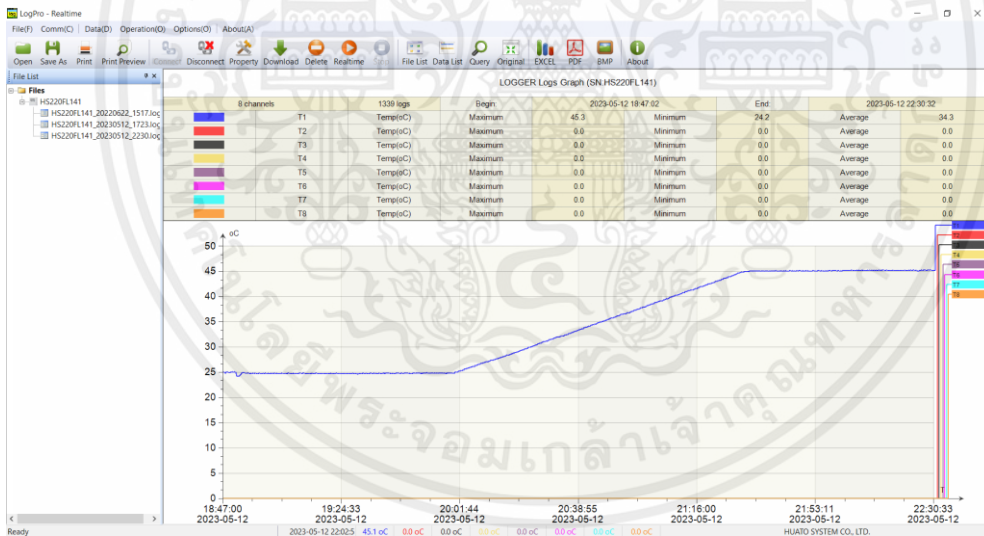
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของเซลล์กับอุณหภูมิ ณ SoC 80 %

จากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทาน  $R_{ct}$  มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเนื่องจากค่าคงที่เวลาของ  $R_{ct}$  และ  $C_{dl}$  ส่งค่าต่ำกว่าค่าคงที่เวลาฟาราเดย์มาก และต่ำกว่าคาบเวลาของแอมพลิงมาก ผลของ  $R_{ct}$  และ  $C_{dl}$  จึงไม่สามารถสังเกตได้จากการวัด ผลของ  $C_{dl}$  จึงถูกละเลย ส่วนผลของ  $R_{ct}$  จะถูกพิจารณาพร้อมกับ  $R_0$  ไปด้วยกันดังที่แสดงตามรูปที่ 4.8 ถึง 4.11

จากแนวโน้มของค่า  $R_{ct}$  ที่เปลี่ยนแปลงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงได้ทำการประเมินค่า  $R_0$  (รวม  $R_{ct}$ ) จาก EKF โดยการค่อยๆ ปรับอุณหภูมิภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิจาก 25°C เป็น 45°C ภายในเวลา 90 นาทีและสังเกตค่า  $R_0$  ที่ประเมินได้ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเหมือนกับ  $R_{ct}$  ที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง 4.17

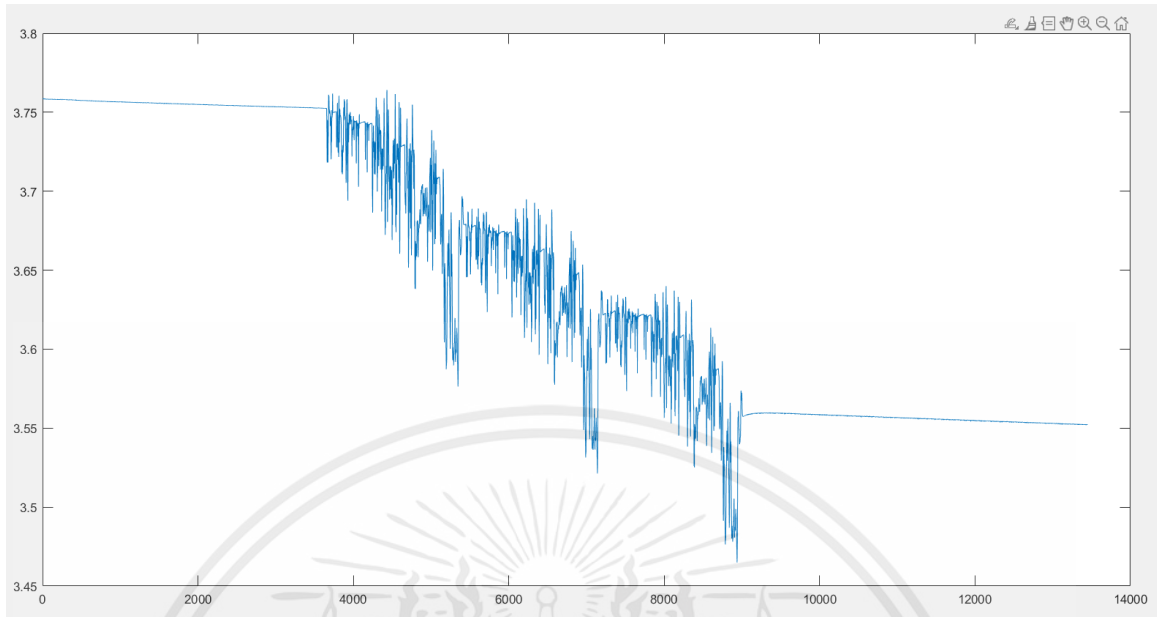


รูปที่ 4.12 ข้อมูลแบบเรียลไทม์ในโปรแกรม MATLAB

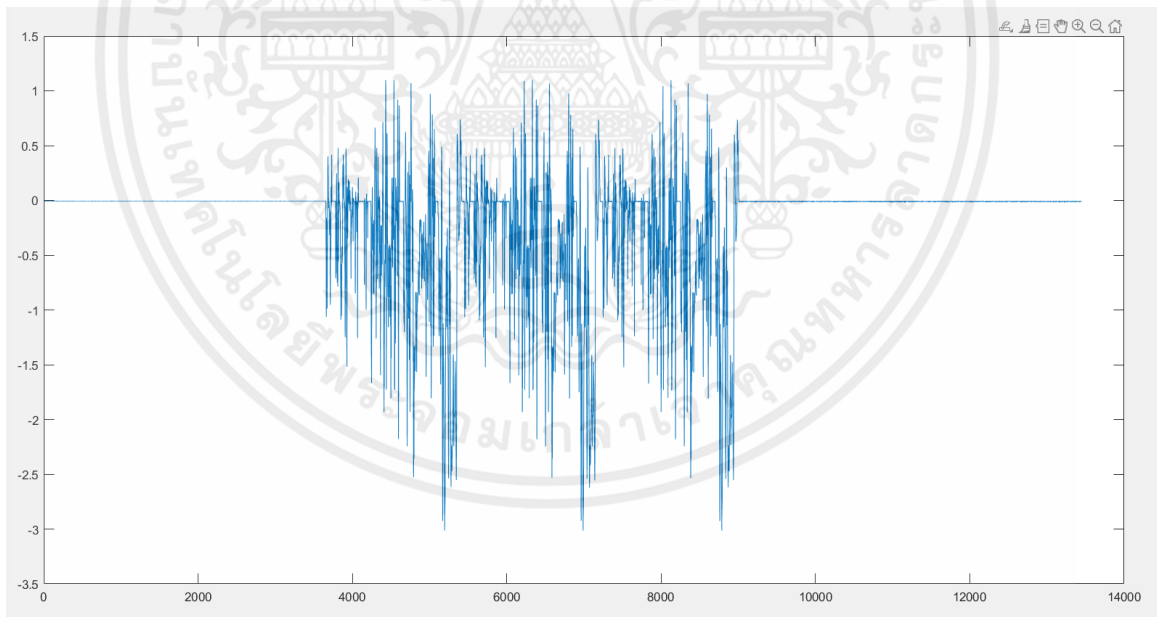


รูปที่ 4.13 อุณหภูมิของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

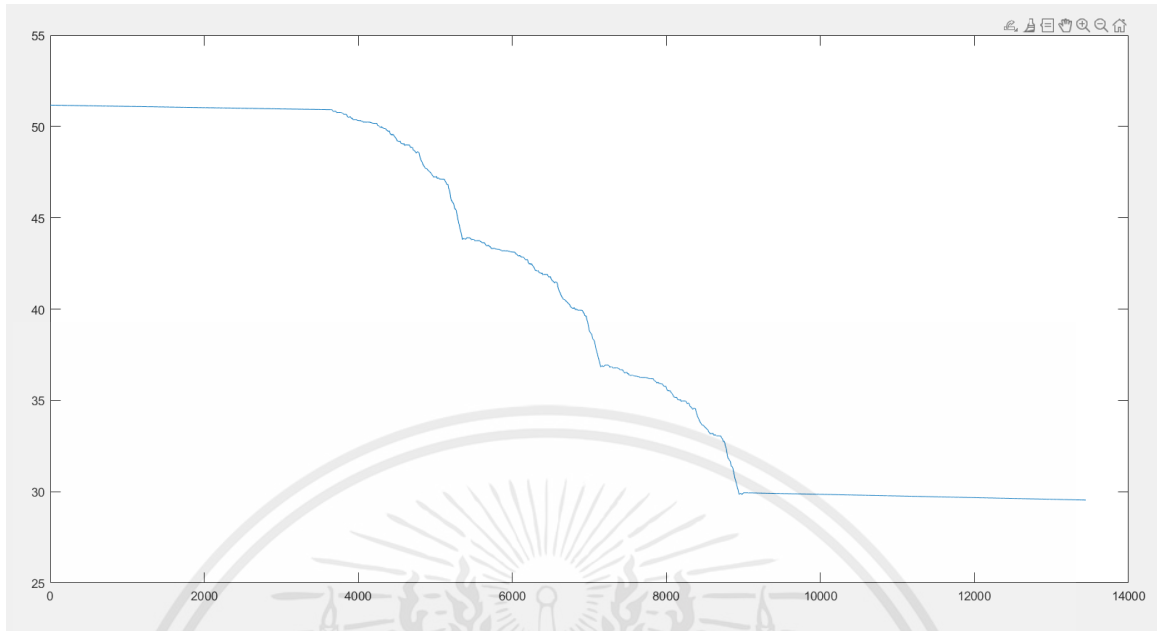


รูปที่ 4.14 แรงดันของแบตเตอรี่

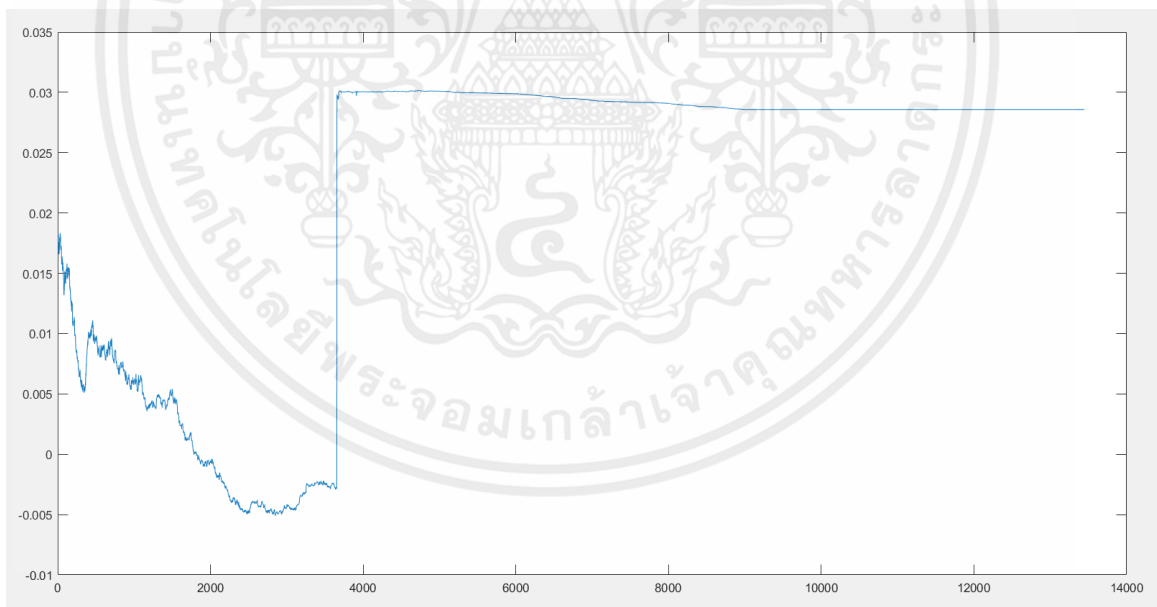


รูปที่ 4.15 กระแสทดสอบที่ป้อนเข้าไปในแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



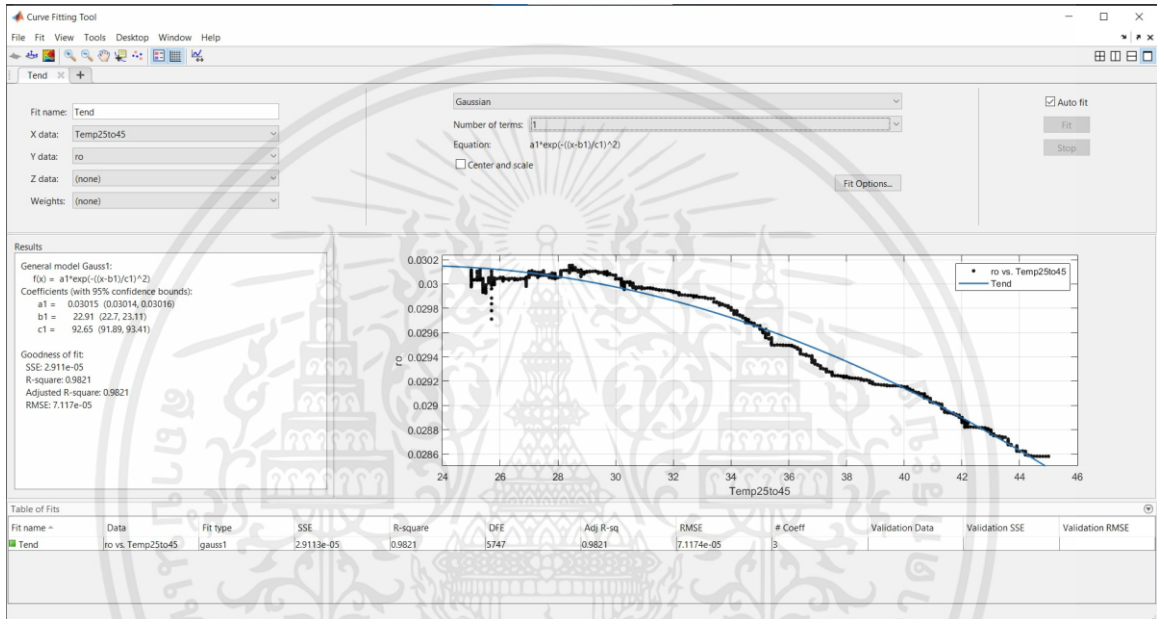
รูปที่ 4.16 SoC ของแบตเตอรี่



รูปที่ 4.17 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.17 จะแสดงให้เห็นว่า  $R_0$  ที่  $25\text{ }^{\circ}\text{C} = 30\text{ m}\Omega$ ,  $R_0$  ที่  $45\text{ }^{\circ}\text{C} = 28.6\text{ m}\Omega$   $R_0$  ลดลง 4.67% ซึ่งเป็นไปตามแนวโน้มที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนั้นการนำค่า  $R_0$  ที่ประเมินได้จาก EKF จะต้องนำไปปรับเทียบกับอุณหภูมิของเซลล์ก่อน โดยจะต้องทดสอบสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของ  $R_0$  กับอุณหภูมิโดยทำการทดสอบแบบข้างต้นนี้ ที่อุณหภูมิสุดท้ายต่างๆกัน จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปประเมินสถานะสุขภาพจากค่าความต้านทานภายในต่อไป



รูปที่ 4.18 ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_0$ ) กับอุณหภูมิ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ การพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกเลือกใช้เป็นส่วนมาก ในรถยนต์ไฟฟ้า แต่การวัดปริมาณคงเหลือของแบตเตอรี่ในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่มักเป็นวิธีตัวนับคูลอมบ์ (Coulomb-counting) แต่ด้วยวิธีนี้จะเกิดข้อผิดพลาดจากค่าออฟเซตและการคายประจุด้วยตัวเอง จำเป็นต้องใช้การปรับเทียบเป็นประจำ ซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากสำหรับการใช้ในชีวิตประจำวัน จึงต้องมีวิธีประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำยิ่งกว่าคือ ตัวกรองคาลมาน (Kalman-Filter) โดยจะเลือกใช้โมเดลของตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น (Extended Kalman-Filter) เนื่องจากคุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหรือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วและสถานะประจุเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยจุดเด่นของวิธีตัวกรองคาลมานก็คือ สามารถจำกัดค่าออฟเซตและผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วและสถานะประจุสามารถหาได้จาก การทดลองอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนภายในอุณหภูมิคงที่ เพราะแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะแปรผันกับอุณหภูมิและเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่คงที่ จากนั้นทำการหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ แล้วจึงออกแบบวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman-Filter เป็นอัลกอริทึมในการประมาณ วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่นั้นออกแบบสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 จำนวน 8 เซลล์ โดยประกอบไปด้วยรางถ่านสำหรับแบตเตอรี่ ตัววัดกระแส ตัววัดแรงดันที่ขั้ว และสุดท้าย ส่วนอ่านและประมวลผล ซึ่งเมื่อมีการคายประจุหรืออัดประจุจะมีการส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลแล้ว ใช้ Extended Kalman-Filter ในการประมวลผลและแสดงทางจอมอนิเตอร์และสามารถประมาณ สถานะแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์

เมื่อเปรียบเทียบการประมาณ สถานะแบตเตอรี่โดยการ Extended Kalman-Filter กับสถานะแบตเตอรี่จากวิธีตัวนับคูลอมบ์ (Coulomb Counting) โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต พบว่าสถานะแบตเตอรี่จากการประมาณโดยการ Extended Kalman-Filter ให้ค่าการประมาณที่แม่นยำและมีค่าใกล้เคียงกับสถานะแบตเตอรี่จากวิธีตัวนับคูลอมบ์โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต ถึงแม้ว่าการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยการ Extended Kalman-Filter มีกระแสอินพุตเป็นกระแสที่มีออฟเซต

## 5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

1. อุปกรณ์วัดกระแสมีค่าออฟเซตเปลี่ยนแปลงมาก ทำให้ค่าของกระแสที่วัดได้ จึงมีความคลาดเคลื่อน
2. การทดลองหาคคุณลักษณะของแบตเตอรี่ในแต่ละครั้ง ใช้เวลาในการทดลองค่อนข้างนาน และเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินเช่นไฟดับหรือไฟตก ต้องทำการทดลองใหม่
3. เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส Covid-19 ส่งผลทำให้การทดลองบางอย่าง ล้าช้า และไม่สามารถปรับปรุงวงจรประมาณสถานะให้ดีขึ้นได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. หากเลือกใช้อุปกรณ์วัดกระแสในวงจรประมาณสถานะที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่ากระแสที่วัดได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. จำเป็นต้องเลือกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสม เพื่อที่การประมาณสถานะแบตเตอรี่มีความใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น
3. แร่งดันเปิดวงจรและสถานะประจุเป็นฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพื่อให้ค่าแรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุมีความแม่นยำ

## บรรณานุกรม

- [1] แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://olog.bru.ac.th/wp-Content/uploads/bp-attachments/12142/แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน.pdf>
- [2] How Lithium-ion Batteries Work [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://electronics.howstuffwork.com/everyday-tech/lithium-ion-battery.htm#pt1>
- [3] รู้จักแบตเตอรี่ ตอนที่ 4 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/298\\_63.pdf](https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/298_63.pdf)
- [4] ดร.สมภพ ผลไม้, "คุณลักษณะเฉพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน" แบตเตอรี่ หลักการพื้นฐาน และ ความต้องการของยานยนต์ไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2564
- [5] Gregory L. Plett, **Battery Management Systems Battery Equivalent-Circuit Methods**, Boston, Artech House, 2015.
- [6] กสิน สุรกิจบวร ,ชิตดนัย เวชสุวรรณกิจ ,ไชยยศ สติลปราโมทย์ ,ณัฐกมล พจนารโกลม และ อัมรี เจ๊ะแลกาย, “ระบบจัดการแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า” ,วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2564
- [7] State of Charge (SOC) Estimation Techniques for Batteries [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-techniques.pdf>
- [8] Gres Welch and Gary Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", SIGGRAPH 2001, 2001, pp.24-29
- [9] AC Measurement [ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www.hioki.com/global/products/resistance-meters/oattery/id\\_5897](https://www.hioki.com/global/products/resistance-meters/oattery/id_5897)
- [10] LTC6813-1 datasheet [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc6813-1.pdf>
- [11] State of Health (SoH) Determination [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.mpoweruk.com/soh.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบจัดการแบตเตอรี่

## Battery Management System

กวินท์ กลิ่นปาน ชนิกานต์ อิศราคาร นันทชนภัส สิริสินภานุรุจ และ ปุญญพัฒน์ พิธกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 ต่อ 3925

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการประมาณสถานะประจุ และสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป้าหมายของการประมาณสถานะที่แม่นยำคือเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่และประสิทธิภาพ และช่วยในการวางแผนการชาร์จและการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ใช้งาน สถานะสุขภาพของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้จากค่าความต้านทานภายใน ซึ่งสามารถหาได้ผ่านกระบวนการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่มีสามขั้นตอน ซึ่งเริ่มต้นด้วยการหาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและคุณสมบัติของสถานะประจุด้วยการชาร์จและดิสชาร์จที่กระแสคงที่ในอัตรา C/30 จากนั้นหาแบบจำลองของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่อย่างแม่นยำ โดยใช้เทคนิคการวัดอิมพีแดนซ์บนฐานความรู้ร่วมกับเทคนิคการระบุระบบบนฐานเวลา และขั้นตอนสุดท้ายคือการประมาณสถานะประจุและความต้านทานภายใน โดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในโครงการนี้การประมาณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ จะถูกดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB

### Abstract

This thesis presents an estimation of the state of charge and state of health of lithium-ion batteries using a nonlinear Kalman filter. The accurate estimation of the battery's state allows for extended battery life, improved efficiency, and optimal charging and usage planning for users. The state of health of the battery is determined by calculating the internal resistance, which is obtained through a three-step estimation process. It starts with measuring the open-circuit voltage and charge/discharge characteristics using a controlled constant current (C/30) charge-discharge

rate. Then, an accurate model of the battery's equivalent circuit is obtained using impedance spectroscopy based on frequency response measurements combined with time-domain system identification techniques. Finally, the state of charge and internal resistance are estimated using a nonlinear Kalman filter, specifically a non-linear Kalman filter with a complementary filter structure. In this project, the real-time estimation of the state of health is performed through MATLAB

### 1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราการคายประจุต่ำและให้พลังงานสูง แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเสียหายได้ง่ายหากใช้งานไม่ถูกวิธี ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจึงต้องมีระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ แบตเตอรี่จึงจะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยในระหว่างการใช้งาน ซึ่งในระบบจัดการแบตเตอรี่นั้นประกอบด้วย การประมาณสถานะแบตเตอรี่ ได้แก่ สถานะประจุ สถานะกำลัง สถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ ระบบป้องกันและสมดุลแรงดันเซลล์แบตเตอรี่ โดยในเรื่องการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำสามารถช่วยวางแผนการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การคำนวณระยะทางเหลือ สำหรับแบตเตอรี่ภายในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้จากสถานะของประจุ ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ในการประมาณสถานะประจุเนื่องจากมีความแม่นยำสูง และไม่มีข้อผิดพลาดจากผลของสถานะประจุช่วงเริ่มต้นเหมือนกับวิธีคำนวณคูลอมบ์ (Coulomb Counting)

### 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ระบบจัดการแบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนสมองของมนุษย์หรือซีพียูของคอมพิวเตอร์ซึ่งจะเป็นศูนย์กลางของระบบแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยจะรวบรวมข้อมูลของแบตเตอรี่ผ่านเซนเซอร์ จากนั้นนำไปประมวลผลผ่านอัลกอริทึมของระบบ หรือ แสดงผลออกมา โดยฟังก์ชันพื้นฐานของระบบจัดการแบตเตอรี่หรือ BMS ประกอบไปด้วย

- 1.การ วัดแรงดัน อุณหภูมิ และกระแสของแบตเตอรี่ รวมถึงตรวจจับพลตต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น
- 2.ระบบป้องกัน เพื่อป้องกัน ระบบและแบตเตอรี่ ที่อาจเกิดขึ้นได้จาก overcharge, overdischarge, overcurrent, กระแสลัดวงจรและอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่กำหนด
- 3.แสดงแบตเตอรี่คงเหลือ ในรูปสถานะประจุ (State of Charge) ของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ รวมถึงคำนวณพลังงานคงเหลือภายในแบตเตอรี่ อาจมีการสมดุลแรงดันแบตเตอรี่เพื่อความแม่นยำในการอ่านค่า
- 4.วิเคราะห์คำนวณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health)

## 2.2 สถานะประจุ (State of Charge)

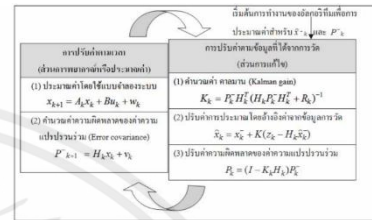
สถานะประจุ (State of Charge) คือระดับประจุของแบตเตอรี่โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบระหว่างความจุคงเหลือของแบตเตอรี่กับค่าความจุที่คิดของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าความจุที่คิดของแบตเตอรี่จะสามารถทราบได้จากผู้ผลิต การประมาณค่าสถานะประจุมีความสำคัญมาก เมื่อแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพ ค่าความจุที่คิดของแบตเตอรี่จะลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีประมาณค่าสถานะประจุอย่างมีประสิทธิภาพ

สถานะประจุไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณจากตัวแปรจากการวัดโดยตรง (Direct Measurement Variables) เช่น Coulomb-Counting วิธีนี้ให้การประมาณค่า SoC ที่แม่นยำ แต่ใช้เวลารทดสอบนาน และรบกวนประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะไม่สามารถนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอื่นได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีอื่นคือ ตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะสามารถทำการประเมิน SoC ได้แม่นยำกว่า และการใช้ตัวกรองคาลมาน สามารถปรับความน่าเชื่อถือของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์

## 2.3 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

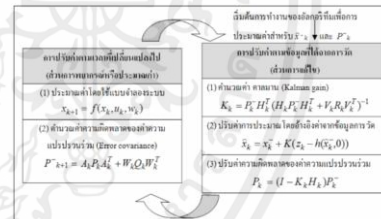
ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) คือการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Estimation) เป็นขั้นตอนวิธีแบบเวียนบังเกิดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัต โดยการประมาณ

อาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ ต้องการประมาณตัวแปรสถานะที่ถูกสัญญาณรบกวน หรือเกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดตัวแปรสถานะนั้นๆ ซึ่งทำให้ข้อมูลของตัวแปรสถานะมีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้น กว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์เพียงอย่างเดียว โดยการสร้างตัวกรองคาลมานมี 2 ส่วนหลักคือแบบจำลองระบบ (State Transition Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended Kalman Filter) แตกต่างจากตัวกรองคาลมานแบบปกติ คือฟังก์ชันที่ถูกนำไปใช้ในแบบจำลองจะเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง OCV - SoC ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองระบบและแบบจำลองการวัดเป็นดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

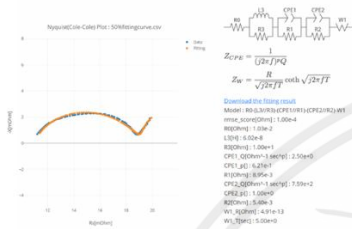
## 2.3 สถานะสุขภาพ (State of Health)

สถานะสุขภาพ (State of Health) คือสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ในการทำงาน โดยจะวัดความสมบูรณ์และสุขภาพของแบตเตอรี่ว่าเหลืออยู่ในสภาพที่ดีและสามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพหรือไม่ การวัด State of Health นั้นสามารถใช้ตรวจสอบการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถทำได้โดยวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น ความจุของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่เปอร์เซ็นต์ความเสื่อมสภาพ หรือค่าการสูญเสียความจุ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

## 3. การออกแบบ และสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

### 3.1 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วย System Identification

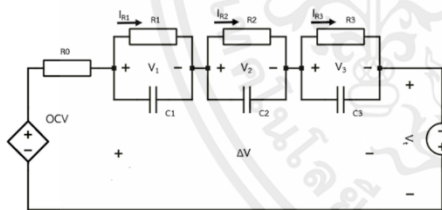
จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ทำการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบตเตอรี่  $R_0, R_1, R_2, R, R_3, C_1, C_2$  และ  $C_3$  ซึ่ง  $R_0$  สามารถหาค่าพารามิเตอร์จาก Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์  $R_0$  เท่ากับ  $18.5 \text{ m}\Omega$  ส่วนพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จาก Warburg Impedance ในรูปของ Foster's Circuit



รูปที่ 3 ผลลัพธ์จาก เว็บไซต์ [www.circuitfitting.net](http://www.circuitfitting.net)

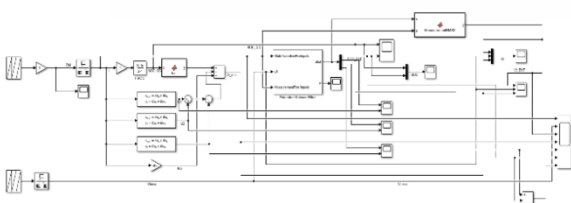
### 3.2 การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วย Extended Kalman Filter

การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วย Extended Kalman Filter นั้น ประกอบไปด้วย ฟังก์ชัน State Transition และ Measurement โดยฟังก์ชัน State Transition จะใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากวงจรสมมูลดังรูปที่ 4 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะหาได้จาก Battery Impedance Meter BT4560



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่

จากนั้นวัดแรงดันที่ขั้วเพื่อนำไปใช้ในฟังก์ชัน Measurement เพื่อให้สถานะแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณสถานะ มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง โดยโมเดลการประมาณสถานะจะใช้วิธีตัวกรองคาลมานดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้

Extended Kalman Filter

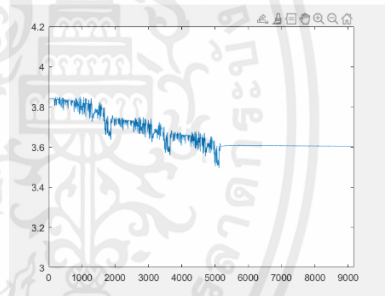
### 3.3 วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

เป็นวงจรที่สามารถประมาณสถานะของแบตเตอรี่ 8 เซลล์แบบเรียลไทม์ผ่านการใช้โปรแกรม MATLAB ควบคู่กับ Linduino One วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่ ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจำนวน 8 เซลล์อนุกรม, บอร์ดสาธิต DC2350b ที่มี LTC6813-1 อยู่ภายใน โดยที่ LTC6813-1 ทำหน้าที่เป็น Cell Monitoring และ Current Transducer LTS25-NP ที่ทำหน้าที่วัดค่ากระแสไฟฟ้า

### 4.การทดลองและผลการทดลอง

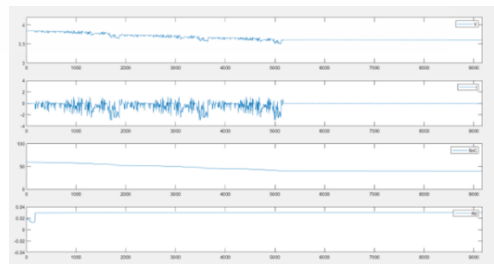
#### 4.1 การทดลองหาสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์

จากวงจรการประมาณสถานะของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ ทำการทดลอง โดยการป้อนโปรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับขี่ตาม Driving cycle ของ WTLp3 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่



รูปที่ 6 แรงดันระหว่างขั้ว

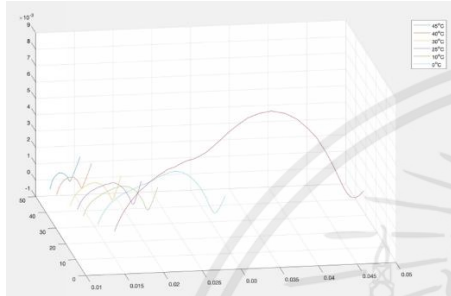
ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ จากบอร์ดสาธิต DC2350B ด้วยตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ผ่าน MATLAB สามารถประเมินสถานะของประจุได้อย่างแม่นยำและสามารถประมาณค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่เพื่อใช้ประเมินสถานะสุขภาพต่อไปได้



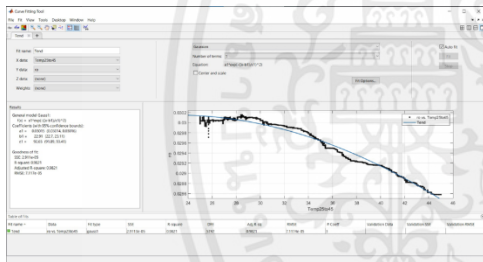
รูปที่ 7 ข้อมูลแบบเรียลไทม์ในโปรแกรม MATLAB

## 4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ

ทำการวัดความต้านทานภายในระหว่างช่วงที่ SoC ต่างๆ ในแต่ละอุณหภูมิ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วกับอุณหภูมิ โดยทำการทดลองภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 0 °C – 45 °C ดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ



รูปที่ 8 กราฟ cole-cole plot กับความต้านทานภายในที่ SoC 50 %



รูปที่ 9 ความต้านทานภายในกับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานภายในลดลงซึ่งความต้านทานภายในมีผลต่อค่าสถานะสุขภาพแบตเตอรี่

## 5. สรุปผลการทดลอง

ปรัชญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการหาสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้ Extended Kalman-Filter เป็นอัลกอริทึมในการประมวลผลเนื่องจากตัวกรองคาลมานั้นสามารถจำกัดค่าออฟเซต และผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความจริงมาก หากเทียบกับวิธีตัวนับคูลอมบ์ โดยในการออกแบบวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่ จะเป็นการออกแบบสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 จากการทดลองจะพบว่าเมื่อใช้วิธี EKF จะมีค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับสถานะแบตเตอรี่จากวิธีตัวนับคูลอมบ์โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิดในการทำโครงการ ให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ รวมทั้งให้การสนับสนุนและแรงกระตุ้น เพื่อให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง

[1] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Battery Modeling, Boston, Artech House, 2015.  
[2] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Battery Equivalent-Circuit Methods, Boston, Artech House, 2015.

## ประวัติผู้เขียน



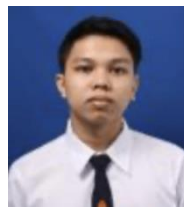
นาย กวินท์ กลิ่นปาน  
เกิดวันที่ 28 มิถุนายน 2543  
นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาว ชนิกานต์ อิศรากรณ์  
เกิดวันที่ 21 กันยายน 2544  
นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาว นันท์ชนกภัส สิริสินภาณุจรูญ  
เกิดวันที่ 31 ตุลาคม 2543  
นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย ปุญญพัฒน์ พิธกิจ  
เกิดวันที่ 10 สิงหาคม 2544  
นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล กวินท์ กลิ่นปาน

วัน/เดือน/ปี 28 มิถุนายน พ.ศ. 2543

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จระดับมัธยมตอนปลาย

โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ จังหวัดปทุมธานี

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานฤดูร้อน

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคกลางเขต 2 ตำแหน่งวิศวกร

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2565



ชื่อ-นามสกุล ชนิกันต์ อิศราคาร

วัน/เดือน/ปี 21 กันยายน พ.ศ. 2544

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จระดับมัธยมตอนปลาย

โรงเรียนพิชัยรัตนาคาร จังหวัดระนอง

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานฤดูร้อน

บริษัท โกลบอล อาร์แอนด์ดี จำกัด ตำแหน่งวิศวกร

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2565



ชื่อ-นามสกุล นันทธณภัส สิริสินภาณุรุจ

วัน/เดือน/ปี 31 ตุลาคม พ.ศ. 2543

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จระดับมัธยมตอนปลาย

โรงเรียนอัสสัมชัญ จังหวัดระยอง

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานฤดูร้อน

บริษัท ปตท. จำกัด มหาชน ตำแหน่งวิศวกร

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2565



ชื่อ-นามสกุล ปุณณพัฒน์ พิธกิจ

วัน/เดือน/ปี 10 สิงหาคม พ.ศ. 2544

ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษา 2561

สำเร็จระดับมัธยมตอนปลาย

โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาภรณราชวิทยาลัย จังหวัดสตูล

ปีการศึกษา 2565

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตภาควิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฝึกงานฤดูร้อน

บริษัท กัลป์ เอ็นเนอจี ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด ตำแหน่งวิศวกร

ระหว่างวันที่ 1 มิถุนายน ถึง 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2565