

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  
COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION THE EQUIVALENT  
CIRCUIT PARAMETER FOR A LI-ON BATTERY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา หรือทำซ้ำหรือถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION THE EQUIVALENT CIRCUIT  
PARAMETER FOR A LI-ON BATTERY



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING วิชาการนี้เป็นการนำเสนองานวิจัยขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2020  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  
COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION THE EQUIVALENT CIRCUIT  
PARAMETER FOR A LI-ON BATTERY



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ผู้ศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาโทปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ผู้จัดทำ

1. นายสิรภพ จำภา
2. นายสุทัศน์ ปะเริบรมย์
3. นายอัฟฟาน แวชู
4. นายเอกรัตน์ บุตรศิริ



.....

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โปธิ์พงศ์วิวัฒน์)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

นายสิรภพ จำภา  
นายสุทัศน์ ปะเริรัมย์  
นายอัฟฟาน แวชู  
นายเอกรัตน์ บุตรศิริ  
ผศ.ดร.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2563

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อจำลองแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแบตเตอรี่ โดยใช้วงจรมูลทางไฟฟ้าแบบลำดับสอง โดยใช้วิธีการทดสอบคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในวงจรมูล โครงการนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ วิธี Multiple Linear Regression วิธี Exponential Curve Fitting วิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแต่ละวิธีจะถูกนำไปจำลองการทำงานที่เงื่อนไขโหลดต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในเงื่อนไขโหลดของกระแสในการคายและอัดประจุต่างกัน และรอบการทดสอบต่างกัน ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ต่างกันด้วย จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีใดเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ทั้ง 4 วิธี มีข้อดี ข้อเสียต่างกัน ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETER FOR A LI-ON BATTERY

Mr.Sirapop            Japa  
Mr.Sutad             Paroebram  
Mr.Affan             Waesu  
Mr.Aeakarath        Bootsiri  
Assistant.Prof.Dr.Teeraphon    Phophongviwat Advisor

## ABSTRACT

The study of comparison of methods for identification the equivalent circuit parameter for a li-on battery is presented in this thesis in order to simulate the voltages between battery terminals by using a second-order electrical equivalent circuit. Pulse constant current discharge test is used as a data for estimating the equivalent electric parameters. This project studied four parameter estimation methods: Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting, Recursive Least Squares Estimator, and Simulink Design Optimization. The testing of the accuracy of the parameters obtained from each method is simulated at different dynamic conditions. The results show that the dynamic current conditions of different discharging, charging, and test cycles produce different accuracy in simulating voltage at battery terminals so it cannot be concluded which method of parameterization is the best, but the four methods have different advantages and disadvantages, which can be selected as appropriate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรมูลของแบตเตอรี่เทียมไอออนเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากการช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ดูแลเอาใจใส่ คอยให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการด้วยดีตลอดมา และได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณณัฐพล มฤคทัต หรือพี่แป ที่ได้ประสานงาน ติดต่อกับทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อขอใช้ห้องปฏิบัติการการทดลอง ECC-506 และขอใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการ

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี หรือพี่ตัวเล็ก ผู้ดูแลห้องปฏิบัติการ ECC-506 ที่ช่วยเปิดและปิดประตูห้องปฏิบัติการให้ตั้งแต่เช้า จนถึงค่ำ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการ

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบคุณ บิดามารดา ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจ และอยู่เคียงข้างตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่ได้ให้กำลังใจ ปลอบใจ และให้การช่วยเหลือจนกระทั่งปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จะมีคุณค่าและโยชน์แก่ผู้ที่สนใจอื่น ๆ ต่อไป

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป .....	VIII
สัญลักษณ์และตัวย่อ .....	XVIII
<b>บทที่ 1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	3
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ .....	3
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ .....	3
1.5 แผนการดำเนินโครงการ .....	4
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ .....	5
<b>บทที่ 2 เนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>6</b>
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	6
2.2 แบบจำลองสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	22
2.3 ระบบการจัดการแบตเตอรี่ .....	29
2.4 อันตรายและการระงับเหตุเพลิงไหม้จากการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	35
<b>บทที่ 3 ออกแบบการทดสอบ .....</b>	<b>42</b>
3.1 การเลือกแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบ .....	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ .....	43
3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ .....	44
3.4 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้า .....	54
3.5 การจำลองการทำงานของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า .....	79
<b>บทที่ 4 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ .....</b>	<b>81</b>
4.1 การทดสอบความจุแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	81
4.2 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ .....	82
4.3 ผลการทดสอบรอบที่ 1 .....	83
4.4 ผลการทดสอบรอบที่ 2 .....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.5 ผลการทดสอบรอบที่ 3 .....	121
4.6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 รอบการทดสอบ .....	140
<b>บทที่ 5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา .....</b>	<b>151</b>
5.1 บทสรุป .....	151
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	152
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	153
<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>154</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>157</b>
ภาคผนวก ก บทความวิชาการ.....	158
ภาคผนวก ข การทดสอบ.....	164
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>168</b>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	4
3.1 ข้อมูลจำเพาะของ LG18650MH1 .....	42
3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ และการใช้งาน .....	43
3.3 รายละเอียดการตั้งค่าในการอัดประจุของ LG18650MH1.....	46
3.4 รายละเอียดการตั้งค่าในการทดสอบคายประจุกระแสคงที่แบบพัลส์ของแบตเตอรี่.....	48
3.5 การตั้งค่าการทดสอบความจุของแบตเตอรี่ LG18650MH1.....	48
4.1 ผลการทดสอบความจุของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ทั้งหมด 5 ครั้ง.....	81
4.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ทั้ง 3 รอบ.....	82
4.3 ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1.....	84
4.4 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1.....	88
4.5 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1.....	91
4.6 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1.....	94
4.7 ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	100
4.8 ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	100
4.9 ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	101
4.10 ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	101
4.11 ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2.....	103
4.12 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2.....	107
4.13 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.14	ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 2.....	113
4.15	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	119
4.16	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	119
4.17	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	120
4.18	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	120
4.19	ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3.....	122
4.20	ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3.....	126
4.21	ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3.....	129
4.22	ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 3.....	132
4.23	ร้อยละของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	138
4.24	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	138
4.25	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	139
4.26	ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การประมาณค่าสถานะของการอัดประจุในระบบการจัดการแบตเตอรี่.....	1
1.2 เทคนิคการประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ .....	2
1.3 การประมาณ SoC ด้วยเทคนิคโมเดลพื้นฐาน .....	2
2.1 ความหนาแน่นและความจำเพาะด้านพลังงานของแบตเตอรี่แบบอัดประจุชนิดต่าง ๆ .....	7
2.2 กระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	8
2.3 เวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุจนเต็มที่ C-rate ค่าต่าง ๆ .....	11
2.4 ตัวอย่างกราฟการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ C-rate ค่าต่าง ๆ .....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง SoC และ SoH ของแบตเตอรี่.....	12
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความจำเพาะด้านกำลังและความจำเพาะด้านพลังงาน .....	13
2.7 โครงสร้างลิเทียมโคบอลต์ .....	14
2.8 ภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์โดยเฉลี่ย .....	14
2.9 โครงสร้างลิเทียมแมงกานีส .....	15
2.10 ภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสที่บริสุทธิ์ .....	16
2.11 ภาพรวมของลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ .....	17
2.12 ภาพรวมทั่วไปของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต .....	18
2.13 ภาพรวมของลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ .....	19
2.14 ภาพรวมของลิเทียมไททาเนต .....	20
2.15 การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ .....	21
2.16 การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ .....	21
2.17 การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันคงที่ .....	22
2.18 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับ P2D .....	23
2.19 แบบจำลองโครงข่ายประสาท สามชั้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง SoC กับแรงดันไฟฟ้า และกระแสที่ขั้วของแบตเตอรี่ .....	25
2.20 แบบจำลองความต้านทานภายใน .....	26
2.21 แบบจำลองเทวินิน .....	27
2.22 แบบจำลอง PNGV .....	27
2.23 แบบจำลองคูออลโพลาร์ไรซ์เซชัน .....	28
2.24 แบบจำลองเชิงความร้อน .....	29
2.25 ส่วนที่ทำงานอย่างปลอดภัยของกระแส/เซลล์ลิเทียมไอออนฟอสเฟต .....	30
2.26 ภาพรวมของโครงสร้างต่าง ๆ ของระบบการจัดการแบตเตอรี่ .....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้อัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.27	ฟังก์ชันหลักของระบบการจัดการแบตเตอรี่.....	33
2.28	ตราของ National Fire Protection Association ( NFPA ).....	36
2.29	ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดมาจากไฟลิตีเอ็มไอออนในไนต์บัค.....	37
2.30	สารดับเพลิงใหม่ประเภท D และตัวอย่างการไหม้ของลิเทียม.....	39
2.31	ตัวอย่างการฉีกตมแห่งดับไฟในคลาสตี.....	39
2.32	เมดแอลเอ็กพาวเดอร์.....	40
2.33	อเมเล็กคลาสตีคอปเปอร์พาวเดอร์.....	40
2.34	เอนซ์วลิตเอ็กคลาสตีเอ็กตึงเกอร์เซอร์.....	41
3.1	ตัวอย่างแบตเตอรี่ LG18650MH1.....	43
3.2	การต่อวงจรสำหรับทดสอบ.....	45
3.3	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ และกระแสพัลส์.....	47
3.4	ฟังก์ชัน Battery test ใน DL3021.....	49
3.5	กระแสพลวัตตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012.....	50
3.6	EV Reference Applications.....	50
3.7	กระแสจากการจำลองการทดสอบการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน WLTP Class 3....	51
3.8	ลำดับขั้นตอนการหาค่าประมาณพารามิเตอร์.....	53
3.9	ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล.....	54
3.10	แบบจำลองดูออลโพลาริเซชัน (แบบจำลอง RC ลำดับสอง).....	55
3.11	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ณ ตำแหน่ง SoC ต่าง ๆ.....	56
3.12	ตัวอย่างผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น.....	57
3.13	ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ และกระแสพัลส์.....	58
3.14	การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการทดสอบคายประจุกระแสคงที่แบบพัลส์ [4].....	63
3.15	การฟิตเส้นโค้งด้วยสมการเลขชี้กำลัง.....	64
3.16	แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าขอบบน และขอบล่าง.....	65
3.17	Recursive Least Squares Estimator block.....	66
3.18	ตัวอย่างการสร้างระบบในการประมาณค่า $\theta$ .....	69
3.19	ตัวอย่างการสร้างระบบสำหรับคำนวณค่า a, b, c, d, f และค่า time constants.....	70
3.20	ตัวอย่างการสร้างระบบสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูล.....	70
3.21	ตัวอย่างการกำหนดค่าใน Recursive Least Squares Estimator block.....	71
3.22	Simulink Design Optimization Tool.....	73
3.23	วงจรมูลค่าลำดับสองสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์.....	73
3.24	ภายใน RC Branch.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้ใช้ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.25 การสร้างและกำหนดค่าเริ่มต้นค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสำหรับ Lookup Table บน Model Explorer .....	74
3.26 ตัวอย่าง Lookup Table .....	75
3.27 ตัวอย่างการตั้งค่าอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์.....	76
3.28 การใช้ parallel pool ระหว่างการประมาณค่าพารามิเตอร์ .....	77
3.29 ตัวอย่างผลลัพธ์การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ Simulink Design Optimization Tool.....	77
3.30 ภาพรวมระบบจำลองแบตเตอรี่สำหรับจำลองแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่.....	79
3.31 แบบจำลองการคำนวณ SoC.....	80
4.1 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) เทียบกับร้อยละของ SoC .....	82
4.2 กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 1.....	83
4.3 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 1 .....	84
4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1.....	85
4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1.....	85
4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	86
4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1.....	86
4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1.....	88
4.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	89
4.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุตบแต่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

4.11	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	90
4.12	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	92
4.13	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1.....	92
4.14	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1.....	93
4.15	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	93
4.16	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1.....	95
4.17	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	95
4.18	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1.....	96
4.19	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1 .....	96
4.20	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	97
4.21	ความต้านทาน $R_i$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกกรณีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.22 ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	98
4.23 ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี.....	99
4.24 ความเก็บประจุ $C_2$ ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ .....	99
4.25 กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 2.....	102
4.26 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 2 .....	103
4.27 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2.....	104
4.28 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2.....	104
4.29 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2.....	105
4.30 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2.....	105
4.31 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2.....	107
4.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2 .....	108
4.33 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2.....	108
4.34 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2.....	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่เชิงพาณิชย์ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มีการขออนุญาตเป็นอย่างชัดแจ้งจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.35	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2.....	111
4.36	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2.....	111
4.37	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2.....	112
4.38	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2 .....	112
4.39	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2 .....	114
4.40	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2.....	114
4.41	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2 .....	115
4.42	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2 ...	115
4.43	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	116
4.44	ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	117
4.45	ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	117
4.46	ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ทางเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่นำมาตีพิมพ์ลงนิตยสาร และห้องอ้างอิงเชิงวิชาการ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.47	ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี.....	118
4.48	กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 3.....	121
4.49	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 3 .....	122
4.50	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3.....	123
4.51	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3.....	123
4.52	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3 .....	124
4.53	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3.....	124
4.54	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3.....	126
4.55	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3.....	127
4.56	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3 .....	127
4.57	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3.....	128
4.58	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3.....	130

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น มิย่ให้ผู้ใดเห็นแก่ประโยชน์ส่วนตัวในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.59	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3.....	130
4.60	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3.....	131
4.61	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3 .....	131
4.62	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3 .....	133
4.63	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3.....	133
4.64	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3 .....	134
4.65	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3 ...	134
4.66	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	135
4.67	ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	136
4.68	ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	136
4.69	ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	137
4.70	ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี.....	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่นำมาเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.71	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression .....	140
4.72	ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression .....	141
4.73	ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression .....	141
4.74	ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression .....	142
4.75	ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression .....	142
4.76	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting.....	143
4.77	ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting.....	143
4.78	ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting.....	144
4.79	ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting.....	144
4.80	ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting.....	145
4.81	ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator .....	145
4.82	ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator .....	146
4.83	ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator .....	146
4.84	ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator .....	147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย โดยผู้เผยแพร่เห็นชอบที่จะเผยแพร่โดยไม่คิดค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.85 ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator .....	147
4.86 ความต้านทาน $R_s$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool .....	148
4.87 ความต้านทาน $R_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool .....	148
4.88 ความต้านทาน $R_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool .....	149
4.89 ความเก็บประจุ $C_1$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool .....	149
4.90 ความเก็บประจุ $C_2$ สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool .....	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สัญลักษณ์และตัวย่อ

## ตัวย่อ

ASIC	Application-specific integrated circuits
ASoC	Absolute state-of-charge
ASoH	Absolute state-of-health
BCU	Battery cluster-management unit
BMS	Battery management system
BV	Butler – Volmer
CC	Constant current
CV	Constant voltage
FCC	Full charge capacity
ICE	Internal combustion engine
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LFP	Lithium Iron Phosphate
LMO	Lithium Manganese Oxide
LTO	Lithium titanate oxide
MAE	Mean Absolute Error
MCU	Microcontroller unit
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
NN	Neural network
PNGV	Partnership for a New Generation of Vehicles
P2D	Pseudo-two-dimensional
RMSE	Root Mean Square Error
RSoC	Relative state-of-charge
RSoH	Relative state-of-health
SEI	Solid electrolyte interface
SoC	State of charge
SoH	State of health
SPI	Serial peripheral interface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
WLTP World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## สัญลักษณ์

$C_p$	Polarization capacitance
$C_1$	Activation polarization capacitance
$C_2$	Concentration polarization capacitance
$C_{cap}$	Usable battery capacity
$E_{ff}$	Efficiency
$I_{bat}$	Battery current
$n$	Number of data
$R_p$	Polarization resistance
$R_s$	Internal series resistor
$R_1$	Activation polarization resistance
$R_2$	Concentration polarization resistance
$SoC_0$	Initial of state of charge
$T$	Sampling time
$t$	Time
$V_{bat}$	Terminal voltage of battery
$V_{Measured}$	Measured terminal voltage
$V_{Model}$	Simulated terminal voltage
$V_{oc}$	Open circuit voltage
$V_1$	Voltage drop of RC branch set 1
$V_2$	Voltage drop of RC branch set 2
$\tau_1$	Time constant of RC branch set 1
$\tau_2$	Time constant of RC branch set 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

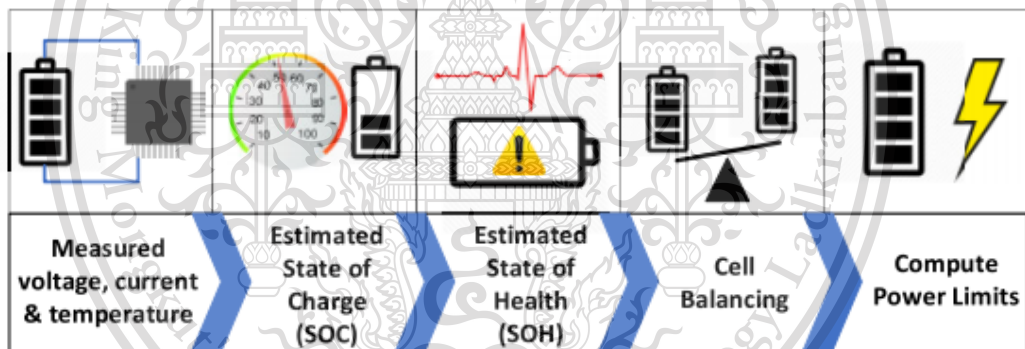
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเติบโตทางเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนกลายเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของระบบต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน ยานยนต์ไฟฟ้า เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน ระบบดาวเทียม เป็นต้น ส่งผลให้เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว

สิ่งที่จำเป็นเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ตั้งแต่ 2 เซลล์ขึ้นไป คือ ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) พารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ คือ การประมาณค่าสถานะของการอัดประจุ หรือ SoC สำหรับสร้างระบบการจัดการความสมดุลของเซลล์แบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์หรือแต่ละโมดูลเมื่อมีการใช้งานอัดและคายประจุ ตรวจสอบสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ หรือใช้เป็นข้อมูลในออกแบบระบบป้องกันในระบบการจัดการแบตเตอรี่ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การประมาณค่าสถานะของการอัดประจุในระบบการจัดการแบตเตอรี่ [1]

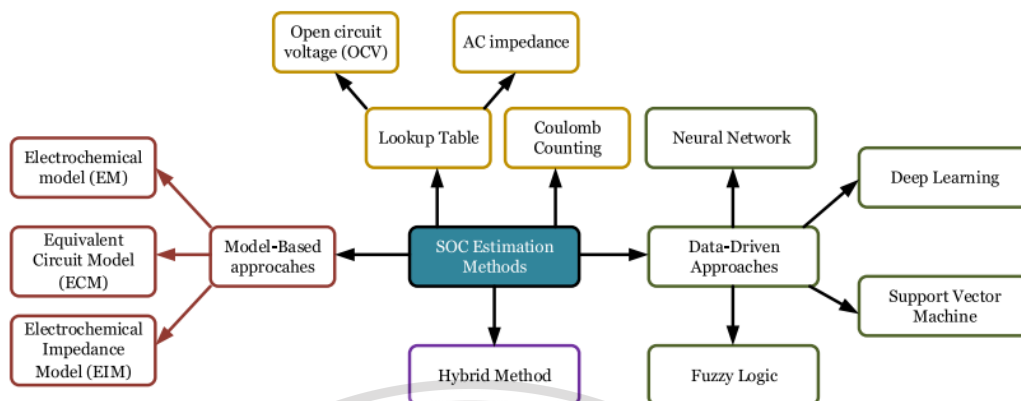
เทคนิคการประมาณ SoC ของแบตเตอรี่ที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีอยู่หลากหลาย ดังรูปที่ 1.2 แต่เทคนิคที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ เทคนิคการนับประจุ (Coulomb Counting) เนื่องจากสามารถออกแบบได้ง่ายและราคาถูก แต่มีข้อด้อยในการใช้งานหลายด้าน ได้แก่ ความผิดพลาดของค่า SoC เริ่มต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเสื่อมของแบตเตอรี่ ความผิดพลาดของตัวตรวจจับกระแส ส่งผลสะสมต่อค่า SoC ความผิดพลาดจากการเสื่อมความจุของแบตเตอรี่ ค่า FCC ที่ลดลงทำให้ SoC มีความคลาดเคลื่อน ความผิดพลาดจากการคายประจุด้วยตัวเอง (Self Discharge) เนื่องจากไม่มี

กระแสไหลผ่านตัวตรวจจับกระแส จึงไม่มีการปรับปรุงค่า SoC ที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งความผิดพลาดดังกล่าวถือว่าเป็นปัญหาอย่างมากเมื่อมีการใช้งานในระบบแบตเตอรี่ที่มีความซับซ้อน เช่น ในยานอวกาศไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

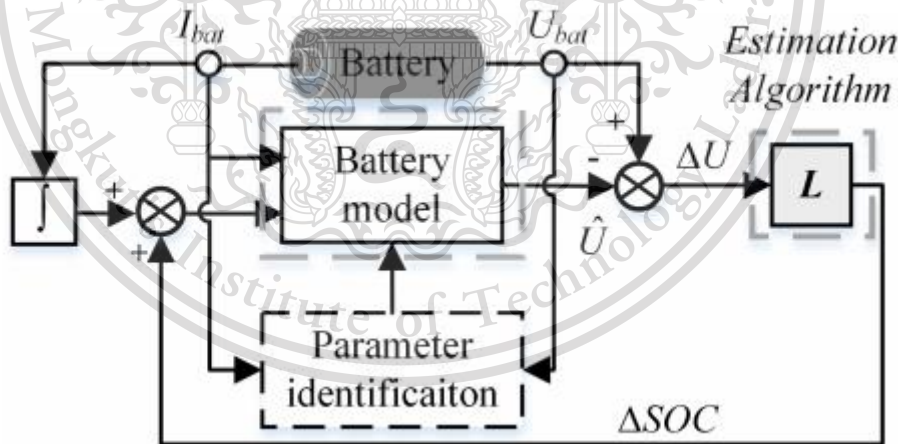
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ยนต์ไฟฟ้า ทำให้มีการพัฒนาเทคนิคการประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ที่เรียกว่า โมเดลพื้นฐาน (Model-based) เพื่อแก้ไขปัญหาจากการใช้งานเทคนิคคูลอมป์เคาท์



รูปที่ 1.2 เทคนิคการประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่แบบต่าง ๆ [1]

เทคนิคโมเดลพื้นฐานดังรูปที่ 1.3 เป็นเทคนิคการประมาณ SoC ที่มีการใช้งานร่วมกับวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ เพื่อใช้ในการประมาณแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) ของแบตเตอรี่ จากนั้นนำค่า  $V_{OC}$  ไปประมาณค่า SoC ซึ่งในการประมาณ  $V_{OC}$  ของแบตเตอรี่จำเป็นต้องสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลที่ใช้งานได้อย่างแม่นยำและเลือกใช้งานวงจรสมมูลได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้การประมาณค่า SoC ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำที่สุด



รูปที่ 1.3 การประมาณ SoC ด้วยเทคนิคโมเดลพื้นฐาน [2]

ระบบการจัดการแบตเตอรี่และเทคนิคการประมาณ SoC แบบ Model-based เริ่มมีการใช้งานและถูกพัฒนาขึ้นมาในระบบการจัดการแบตเตอรี่ในปัจจุบันมากขึ้น ผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็น

ความสำคัญของเทคนิคดังกล่าว และเลือกการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการต่าง ๆ ในการระบุพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ที่มีส่วนสำคัญในการประมาณค่า  $V_{OC}$  ที่จำเป็นสำหรับการประมาณ SoC ด้วยเทคนิค Model-based ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาวิธีการหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรมุมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
2. เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรมุมด้วยเทคนิคต่าง ๆ

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้ศึกษาวิธีการหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคต่าง ๆ สำหรับวงจรมุมชนิดดูลโพลาริเซชัน ซึ่งเป็นแบบจำลอง RC ลำดับสอง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาด 18650

สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่เลือกใช้การทดสอบพลวัต 4 แบบ ได้แก่ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ (Pulse constant current discharge test) การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง (Constant Current Discharge Test) การทดสอบพลวัตของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน BS ISO120405 – 2 : 2012 และการทดสอบพลวัตของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน WLTP Class 3 เพื่อเก็บข้อมูลผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage :  $V_{oc}$ ) ขณะที่มีการคายประจุ

เปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้ทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ วิธี Multiple Linear Regression วิธี Exponential Curve Fitting วิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธี Simulink Design Optimization Tool

## 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. รวบรวมข้อมูลและเอกสารอ้างอิง

ศึกษาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรมุมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจากเอกสารทางวิชาการเพื่อนำมาใช้สำหรับการออกแบบการทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ

2. ออกแบบการทดสอบแบตเตอรี่

3. ทดสอบและเก็บข้อมูล

4. ทำการทดสอบแบตเตอรี่และเก็บข้อมูลผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรมุมด้วยเทคนิคต่าง ๆ และจำลองการทำงานของวงจรมุมในโปรแกรม MATLAB SIMULINK

5. จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK และเก็บข้อมูล

การจำลองระบบการทำงานของวงจรมุมในการสร้างผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองที่ได้จากการทดสอบจริง

6. วิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงและข้อมูลการจำลองการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB SIMULINK นำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความแม่นยำของเทคนิคการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบต่าง ๆ

### 7. สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

รายละเอียดงาน	เดือนที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. รวบรวมเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการ								
2. ศึกษาวิธีการระบุพารามิเตอร์จากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ที่รวบรวมไว้เพื่อออกแบบวิธีการทดสอบแบบเตอร์								
3. สำรองและเรียนรู้เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับการทดสอบ								
4. จัดทำเอกสารรายงานโครงการบทที่ 1-3 และเตรียมความพร้อมสำหรับการนำเสนอโครงการในภาคเรียนที่ 1/2563								
5. ทดสอบแบบเตอร์ และเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์								
6. เขียนรายงานโครงการบทที่ 4-5 และจัดทำรูปเล่มรายงาน								
7. เตรียมความพร้อมสำหรับการนำเสนอโครงการในภาคเรียนที่ 2/2563								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้
2. เป็นข้อมูลในการตัดสินใจ เมื่อต้องการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ที่มีประมณค่า SoC ด้วยเทคนิค Model-based



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

# เนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

#### 2.1.1 ประวัติและความเป็นมา [3]

แบตเตอรี่ลิเทียมเริ่มถูกค้นพบขึ้นในปี 1912 โดยผู้ค้นพบคือ G.N. Lewis แต่ยังไม่ถึงต้นทศวรรษ 1970 แบตเตอรี่ลิเทียมที่ไม่สามารถอัดประจุกลับใหม่ได้รุ่นแรกก็มีวางจำหน่ายทั่วไป และได้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ลิเทียมแบบอัดประจุใหม่ได้ตามมาในทศวรรษ 1980 แต่ล้มเหลวเนื่องจากความไม่เสถียรของลิเทียมโลหะที่ใช้เป็นวัสดุแอโนด (แบตเตอรี่ลิเทียมเมทัลลิกใช้ลิเทียมเป็นแอโนดส่วนลิเทียมไอออนใช้แกรไฟต์เป็นแอโนดและวัสดุที่ใช้งานอยู่ในแคโทด)

ลิเทียมเป็นโลหะที่เบาที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหมดมีศักยภาพทางเคมีไฟฟ้ามากที่สุดและให้พลังงานเฉพาะต่อน้ำหนักมากที่สุด แบตเตอรี่แบบอัดประจุใหม่ได้ ที่มีโลหะลิเทียมบนขั้วบวกสามารถให้พลังงานที่มีความหนาแน่นสูงเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตาม มันถูกค้นพบในช่วงกลางทศวรรษที่ 1980 ว่ารอบการทำงานทำให้เกิดเดนไดรต์ที่ไม่ต้องการบนแอโนด อนุภาคที่โตเหล่านี้ทะลุผ่านตัวคั่นแยกระหว่างขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งทำให้เกิดการลัดวงจร อนุภาคของเซลล์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าใกล้จุดหลอมเหลวของลิเทียมทำให้เกิดการระบายความร้อนเกิดเป็นไฟลุกไหม้

ความไม่เสถียรโดยธรรมชาติของโลหะลิเทียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการอัดประจุทำให้การวิจัยเปลี่ยนไปใช้วิธีการแก้ปัญหาที่ไม่ใช่โลหะเมทัลลิกและเปลี่ยนมาใช้ลิเทียมไอออนแทน ในปี 1991 Sony ได้ขายลิเทียมไอออนตัวแรกและในปัจจุบันได้กลายเป็นแบตเตอรี่ที่มีแนวโน้มและเติบโตเร็วที่สุดในตลาด แม้ว่าพลังงานจำเพาะจะต่ำกว่าลิเทียมเมทัลลิก แต่ลิเทียมไอออนก็ปลอดภัยหากมีการกำหนดขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแส

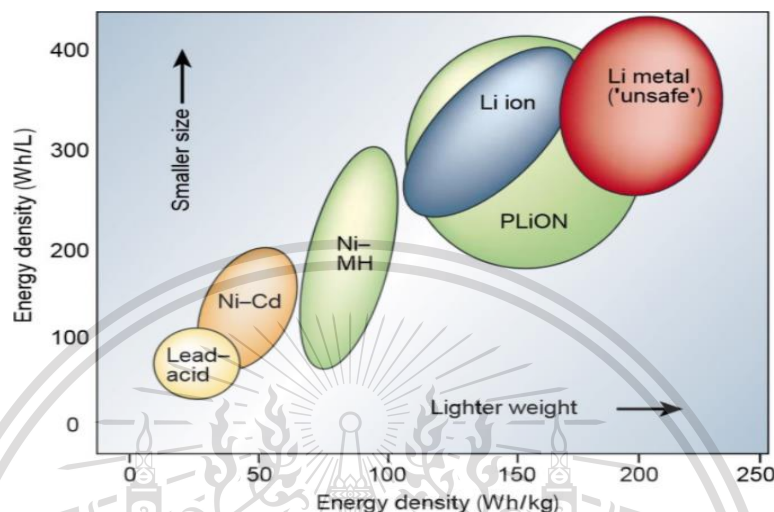
สำหรับการสร้างแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ผู้พัฒนาคือ John B. Goodenough (1922) เขาพัฒนามันขึ้นในระหว่างการเป็นนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของ Nippon Telephone & Telegraph (NTT) ได้ทำงานกับ Goodenough ในสหรัฐอเมริกา หลังจากประสบความสำเร็จไม่นานก็เดินทางกลับไปญี่ปุ่นพร้อมกับการค้นพบของเขา จากนั้นในปี 1991 บริษัท Sony ได้ประกาศสิทธิบัตรระหว่างประเทศเกี่ยวกับแคโทดลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ เกิดการฟ้องร้องขึ้นเป็นเวลาหลายปี แต่บริษัท Sony สามารถรักษาสหสิทธิบัตรไว้ได้และ Goodenough ไม่ได้รับอะไรเลยสำหรับความพยายามของเขา การมีส่วนร่วมในการพัฒนาลิเทียมไอออน Goodenough ได้รับรางวัลของสถาบัน

วิศวกรรมแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา และผู้มีส่วนร่วมอื่น ๆ ได้รับรางวัล Charles Stark Draper Prize ในปี 2014 ในปี 2015 Goodenough ได้รับรางวัลฮิวโก เป็นเงิน 1 ล้านดอลลาร์สหรัฐซึ่งเขาจะบริจาคให้กับสถาบันแมททีเรียลทีเกอซัส (Texas Materials Institute) เพื่อช่วยในการวิจัยวัสดุ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กุญแจที่นำไปสู่ความจำเพาะด้านพลังงานที่เหนือกว่า คือ แรงดันไฟฟ้าเซลล์สูง 3.60 โวลต์ การปรับปรุงวัสดุและอิเล็กทรอนิกส์ในการใช้งาน มีศักยภาพในการเพิ่มความหนาแน่นของพลังงาน คุณลักษณะภาระทางไฟฟ้าที่ดีและเส้นโค้งการคายประจุแบบแพลตฟอร์มได้นำเสนอการใช้พลังงานที่เก็บไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในสเปกตรัม แรงดันไฟฟ้าแพลตฟอร์มที่ต้องการอยู่ที่ 3.70–2.80 โวลต์ / เซลล์



รูปที่ 2.1 ความหนาแน่นและความจำเพาะด้านพลังงานของแบตเตอรี่แบบอัดประจุชนิดต่าง ๆ [4]

ในปี 1994 ต้นทุนในการผลิตลิเทียมไอออนในเซลล์ทรงกระบอก 18650 สูงกว่า 10 เหรียญสหรัฐและมีความจุ 1,100 mAh ในปี 2001 ราคาตกลงต่ำกว่า 3 เหรียญสหรัฐ ในขณะที่ความจุเพิ่มขึ้นเป็น 1,900 mAh ปัจจุบันเซลล์ 18650 ที่มีพลังงานความหนาแน่นสูงให้พลังงานมากกว่า 3,000 mAh และค่าใช้จ่ายก็ลดลง ต้นทุนของความจำเพาะด้านพลังงานที่ลดลง และการไม่มีวัสดุที่เป็นพิษทำให้ลิเทียมไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการใช้งานแบบพกพา อุตสาหกรรมหนัก ระบบส่งกำลังไฟฟ้า และดาวเทียม ลิเทียมไอออน 18650 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มม. และยาว 65 มม.

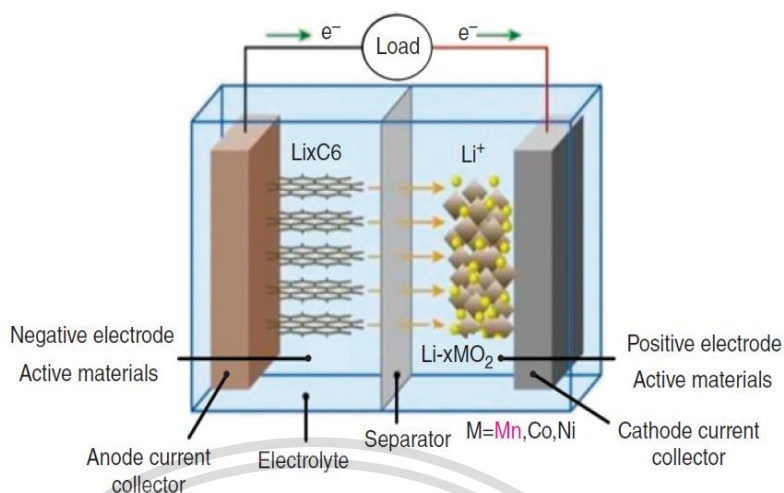
ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีการบำรุงรักษาต่ำ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่นักเคมีส่วนใหญ่ไม่สามารถอ้างสิทธิ์ได้ การคายประจุด้วยตัวเองน้อยกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้นิกเกิลและช่วยในการใช้งานกับมาตรวัดน้ำมันเชื้อเพลิง แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ที่ระบุที่ 3.60 โวลต์ สามารถจ่ายไฟให้กับโทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต และกล้องดิจิทัลได้โดยตรงช่วยลดความซับซ้อนและลดต้นทุนได้มากกว่าการออกแบบแบบหลายเซลล์ ข้อเสีย คือ วงจรป้องกันเพื่อป้องกันมีราคาที่สูง [3]

### 2.1.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [5]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่พลังงานสูงซึ่งลิเทียมไอออนฝังเข้าไปและเคลื่อนที่จากวัสดุที่เป็นบวกและลบเมื่อมีการอัดและคายประจุ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากซ้ายไปขวา แบตเตอรี่ประกอบด้วย ตัวเก็บกระแสแคโทด วัสดุที่ใช้งานอิเล็กโทรดขั้วลบ อิเล็กโทรไลต์ตัวคั่น วัสดุที่ใช้งานอิเล็กโทรดขั้วบวกและตัวเก็บกระแสแอโนด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 กระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [5]

วัสดุอิเล็กโทรดที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วไป คือ  $\text{LiCoO}_2$  ,  $\text{LiNiO}_2$  ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  ,  $\text{LiFePO}_4$  และ  $\text{LiNi}_x\text{Co}_{1-2x}\text{Mn}_x\text{O}_2$  เป็นต้น วัสดุอิเล็กโทรดที่ขั้วลบมักเป็น  $\text{Li}_x\text{C}_6$  ,  $\text{TiS}_2$  ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  และอื่น ๆ อิเล็กโทรไลต์เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายในเกลือลิเทียม เช่น  $\text{LiPF}_6$  ,  $\text{LiBF}_4$  ,  $\text{LiClO}_4$  ,  $\text{LiAsF}_6$  และอื่น ๆ ตัวทำละลายส่วนใหญ่ ได้แก่ เอทิลีนคาร์บอนเนต ( EC ) , โพรพิลีนคาร์บอนเนต ( PC ) , ไดเมทิลคาร์บอนเนต ( DMC ) , คลอรีนเมทิลคาร์บอนเนต ( CLMC ) และอื่น ๆ บทบาทหลักของตัวคั่นในแบตเตอรี่ คือ ช่วยในการแยกขั้วบวกและขั้วลบในขณะที่เคลื่อนย้ายไอออน ปัจจุบันมีการใช้เมมเบรนชนิดไมโครพอลิเอทิลีน ( PE ) หรือโพลีโพรพิลีน ( PP ) เป็นตัวคั่น

ลิเทียมไอออนดิอินเทอร์คาเลต (deintercalated) จากสารประกอบแคโทด และอินเทอร์คาเลต (intercalate) เข้าไปในตาข่ายของแอโนดในระหว่างกระบวนการอัดประจุ แคโทดมีศักย์ไฟฟ้าสูงและมีลิเทียมอยู่ไม่มาก ในขณะที่แอโนดมีศักย์ไฟฟ้าต่ำและมีลิเทียมอยู่สมบูรณ์ เมื่อคายประจุ  $\text{Li}^+$  จะออกจากแอโนดและวิ่งเข้าไปฝังในแคโทดทำให้เกิดลิเทียมขึ้นที่แคโทด ดังนั้นกระบวนการอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่จึงเป็นกระบวนการดิอินเทอร์คาเลชัน (deintercalation) และอินเทอร์คาเลชัน (intercalation) ของลิเทียมไปมาระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่า ราวคิงแชร์แบตเตอรี่ (rocking chair batteries) เพื่อรักษาสถิตของการอัดประจุ ในระหว่างกระบวนการอัดประจุและการคายประจุ อิเล็กตรอน และ  $\text{Li}^+$  จำนวนที่เท่ากัน จะเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแคโทดและแอโนดผ่านวงจรภายนอก ดังนั้นปฏิกิริยารีดอกซ์จึงเกิดขึ้นระหว่างแคโทดและแอโนด

### 2.1.3 ประเภทของแบตเตอรี่ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

#### 1) ลิเทียมเซลล์ปฐมภูมิ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ลิเทียมเป็นโลหะที่เบาที่สุดและลอยอยู่ในน้ำ นอกจากนี้ยังมีศักยภาพทางไฟฟ้าเคมีสูง เป็นโลหะที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้ดี และด้วยคุณสมบัติของลิเทียมที่มีศักยภาพในการให้พลังงานและความหนาแน่นของพลังงานที่สูงมาก อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีรูปทรงที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด

เนื่องจากลิเทียมทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับน้ำเช่นเดียวกับไนโตรเจนในอากาศจึงต้องใช้เซลล์ที่ปิดสนิท เซลล์ลิเทียมอัตราสูงจะสร้างอุณหภูมิและความดันขึ้นหากมีการลัดวงจรหรือถูกใช้งานอย่างไม่เหมาะสม ดังนั้นการออกแบบเซลล์จึงจำเป็นต้องมีช่องระบายอากาศที่ปลอดภัยซึ่งจะปล่อยแรงดันหรือการแตกออกเพื่อป้องกันการระเบิดที่ไม่สามารถควบคุมได้

ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียมเซลล์ปฐมภูมิทั่วไป ได้แก่ ลิเทียมแมงกานีสไดออกไซด์ ลิเทียมซิลเฟอร์ไดออกไซด์ ลิเทียมไทโอนิลคลอไรด์ และลิเทียมออกซิเจน แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมลิเทียมอยู่ในช่วงระหว่าง 3 ถึง 4 โวลต์ บรรจุภัณฑ์หรือลักษณะรูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมประกอบด้วยเซลล์แบบเหรียญและแบบทรงกระบอก นอกจากนี้ยังมีเซลล์ฟิล์มบางที่ใช้พื้นผิวเซรามิกหรือวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

## 2) ลิเทียมเซลล์ทุติยภูมิ (Rechargeable Batteries)

พื้นฐานโครงสร้างทางเคมีของลิเทียมหลายรูปแบบได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์สำหรับการใช้งานเฉพาะหรือในบางกรณีเพื่อหลีกเลี่ยงการจดสิทธิบัตรในเทคโนโลยีดั้งเดิม โลหะลิเทียมทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรุนแรงและสามารถถูกเป็นไฟได้ เซลล์เชิงพาณิชย์รุ่นแรกที่มีลิเทียมเมทัลลิกเป็นแคโทดถือว่าไม่ปลอดภัยในบางสถานการณ์ อย่างไรก็ตามเซลล์สมัยใหม่ไม่ได้ใช้ลิเทียมอย่างเดียว แต่ลิเทียมจะผสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นสารประกอบที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ

เซลล์ลิเทียมไอออนทั่วไปใช้คาร์บอนเป็นแอโนดและลิเทียมโคบอลต์ไดออกไซด์หรือสารประกอบลิเทียมแมงกานีสเป็นแคโทด อิเล็กโทรไลต์มักจะเป็นเกลือลิเทียมในตัวทำละลายอินทรีย์

ปัจจุบันนี้แบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุใหม่ได้ สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา แม้ว่าจะมีราคาแพงเมื่อเปิดตัว แต่การผลิตในปริมาณมากก็ทำให้ราคาลดลง

### 2.1.4 ข้อดี - ข้อเสีย [3]

#### ข้อดี

1. ความจำเพาะด้านพลังงานสูงและความสามารถของเซลล์กำลัง ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง
2. รอบการทำงานยาวนานและไม่ต้องบำรุงรักษา
3. ความจุสูง ความต้านทานภายในต่ำ มีประสิทธิภาพคุลอมบิกที่ดี
4. อัลกอริทึมการอัดประจุที่เรียบง่ายและเวลาในการอัดประจุสั้นพอสมควร
5. การคายประจุด้วยตัวเองต่ำ (น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของนิกเกิลแคดเมียม และนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### ข้อเสีย

1. ต้องมีวงจรป้องกันเพื่อป้องกันการไหลของความร้อนที่เกิดจากความเค้น
2. ประสิทธิภาพลดลงที่อุณหภูมิสูงและเมื่อเก็บไว้ที่ไฟฟ้าแรงสูง
3. ไม่สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ ( $< 0^{\circ}\text{C}$ ,  $< 32^{\circ}\text{F}$ )
4. ข้อบังคับการขนส่งมีความจำเป็น เมื่อมีการขนส่งในปริมาณมาก

### 2.1.5 คำศัพท์ที่ควรรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่ [3]

#### 1) แรงดันไฟฟ้า (Voltage)

แรงดันไฟฟ้าโดยปกติของแบตเตอรี่จะเป็น แรงดันไฟฟ้าแบบนามินัล (nominal) อย่างไรก็ตามแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) บนแบตเตอรี่ที่อัดประจุจนเต็มจะสูงขึ้นร้อยละ 5–7 ชนิดเซลล์เคมีและจำนวนเซลล์ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม เรียกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตรงนั้นว่า  $V_{OC}$  แรงดันไฟฟ้าวงจรปิด (CCV) คือ แรงดันไฟฟ้าขณะที่ทำงาน ควรตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่ข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่ให้ถูกต้องเสมอก่อนเชื่อมต่อแบตเตอรี่

#### 2) ความจุ (Capacity)

การแสดงความจุของพลังงานเฉพาะในหน่วยแอมแปร์ - ชั่วโมง (Ah) ซึ่งก็คือความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่ง เมื่อมีการต่อภาระทางไฟฟ้าที่มีการดึงกระแสต่ำกว่าอัตราความจุในหน่วยแอมแปร์ - ชั่วโมง จะทำให้สามารถใช้งานได้ยาวนานมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อต่อกับภาระทางไฟฟ้าที่มีการดึงกระแสมากกว่าอัตราความจุในหน่วยแอมแปร์ - ชั่วโมง จะทำให้ระยะเวลาในการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลง สำหรับการอัดประจุนั้น แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่หรือมีความจุมากกว่า จะใช้เวลาในการอัดประจุนานกว่าแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็ก โดยปกติความคลาดเคลื่อนของความจุในหน่วยแอมแปร์ - ชั่วโมง ไม่ควรเกินร้อยละ 25

#### 3) C-rate

การอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปการอัดประจุของแบตเตอรี่ที่ 1C หมายความว่า แบตเตอรี่ที่อัดประจุเต็มที่พิกัด 1 Ah ควรให้กระแส 1A เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง และการคายประจุแบตเตอรี่เดียวกันที่ 0.5C ควรให้กระแส 500mA เป็นเวลาสองชั่วโมง และที่ 2C จะให้กระแส 2A เป็นเวลา 30 นาที การสูญเสียเมื่อคายประจุแบบรวดเร็วจะลดเวลาในการคายประจุและการสูญเสียเหล่านี้ส่งผลต่อเวลาในการอัดประจุ หรือพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่า เมื่อมีการอัดประจุที่ C-rate ค่าต่าง ๆ จะมีผลต่อเวลาในการอัดประจุ โดยเวลาการอัดประจุจะแปรผกผันตรงกับค่า C-rate

C-rate 1C เรียกอีกอย่างว่าการคายประจุหนึ่งชั่วโมง 0.5C หรือ C/2 คือการคายประจุสองชั่วโมงและ 0.2C หรือ C/5 คือการปล่อย 5 ชั่วโมง แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพสูงบางรุ่นสามารถอัดและคายประจุได้สูงกว่า 1C โดยมีความเครียดปานกลาง

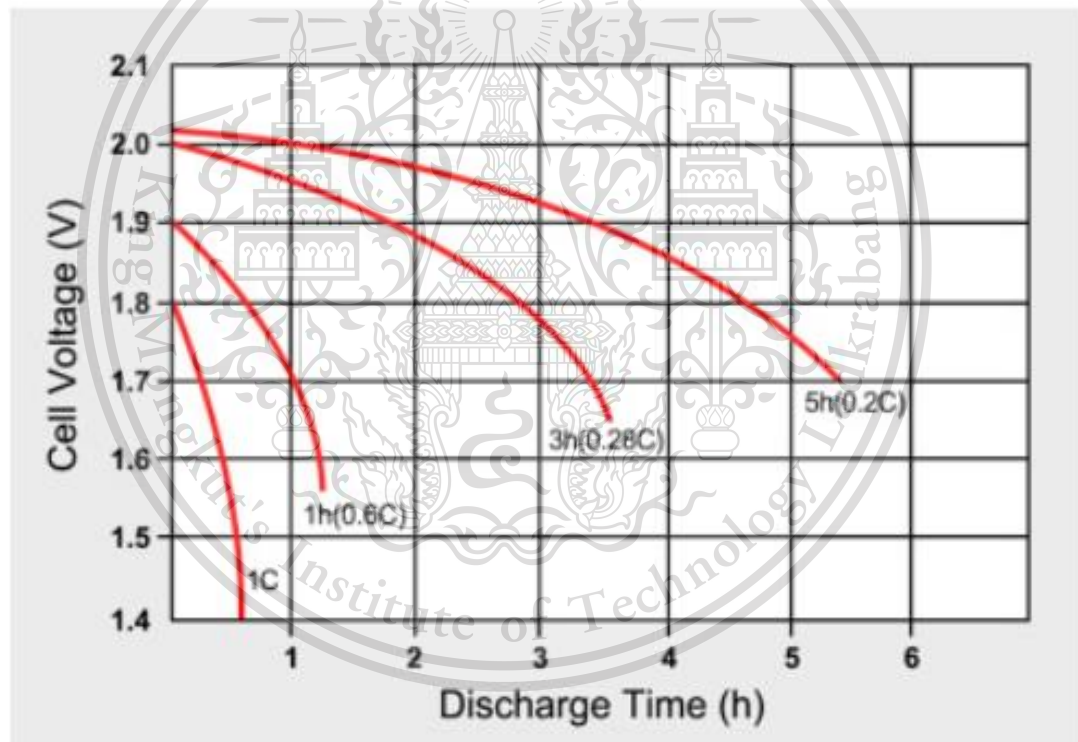
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

C-rate	Time
5C	12 min
2C	30 min
1C	1h
0.5C or C/2	2h
0.2C or C/5	5h
0.1C or C/10	10h
0.05C or C/20	20h

รูปที่ 2.3 เวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุเต็มที่มี C-rate ค่าต่าง ๆ [3]



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ C-rate ค่าต่าง ๆ [3]

#### 4) SoC (State-of-charge)

SoC (State-of-charge) สะท้อนระดับการอัดประจุของแบตเตอรี่ เป็นค่าที่บอกความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งานในแต่ละเวลา เป็นอัตราส่วนระหว่างความจุของแบตเตอรี่ที่มีอยู่ในขณะนั้น ต่อความจุของแบตเตอรี่เมื่อมีประจุเต็ม เช่น แบตเตอรี่มี SoC ร้อยละ 100 หมายความว่า แบตเตอรี่อยู่

ไม่ว่ากรณีใดในสถานะประจุเต็ม แบตเตอรี่มี SoC ร้อยละ 70 หมายความว่ามีความจุเหลืออยู่ร้อยละ 70

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 5) SoH (State of health)

SoH (State of health) เป็นตัวเลขที่บอกความเป็นสภาพดีของแบตเตอรี่ (เซลล์เดียวหรือหลายเซลล์) เมื่อเทียบกับสภาพในอุดมคติ หน่วยของ SoH คือร้อยละ (ร้อยละ 100 คือ เงื่อนไขของแบตเตอรี่ตรงกับข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่)

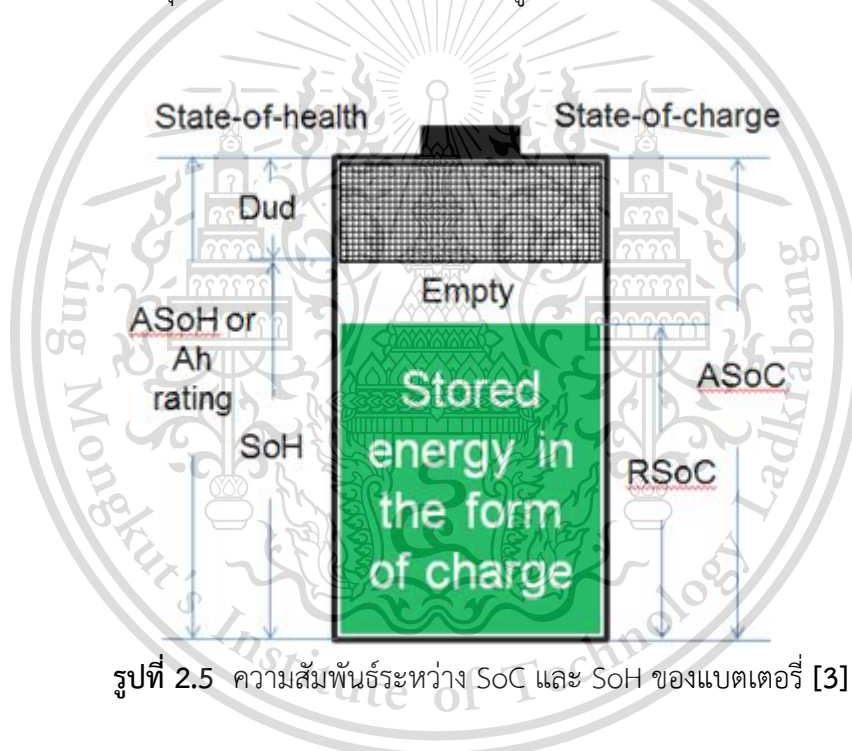
โดยปกติ SoH ของแบตเตอรี่จะเท่ากับร้อยละ 100 ในขณะที่ผลิตและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและเมื่อมีการใช้งาน อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ในขณะที่ทำการผลิตอาจไม่ตรงตามข้อมูลเฉพาะของแบตเตอรี่ ซึ่งในกรณีนี้ SoH เริ่มต้นจะน้อยกว่าร้อยละ 100

ตัวบ่งชี้ SoH ของแบตเตอรี่มีหลัก ๆ 3 ประการ ได้แก่

ความจุ และความสามารถในการกักเก็บพลังงาน

ความต้านทานภายใน และความสามารถในการส่งจ่ายกระแส

การคายประจุด้วยตัวเอง สะท้อนถึงความสมบูรณ์เชิงกลและสถานะที่เกี่ยวข้องกับความเค้น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง SoC และ SoH ของแบตเตอรี่ [3]

Absolute state-of-health (ASoH) : ความสามารถในการจัดเก็บพลังงานตามข้อมูลจำเพาะเมื่อแบตเตอรี่ยังใหม่

Relative state-of-health (RSoH) : ความสามารถในการเก็บประจุที่มีอยู่เมื่อแบตเตอรี่เสีย

Absolute state-of-charge (ASoC) : ความสามารถในการรับประจุเมื่อแบตเตอรี่ยังใหม่

Relative state-of-charge (RSoC) : ความสามารถในการอัดประจุที่ใช้ได้ โดยคำนึงถึงความจุที่ลดลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานที่อนุญาต ซึ่งหมายถึง ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

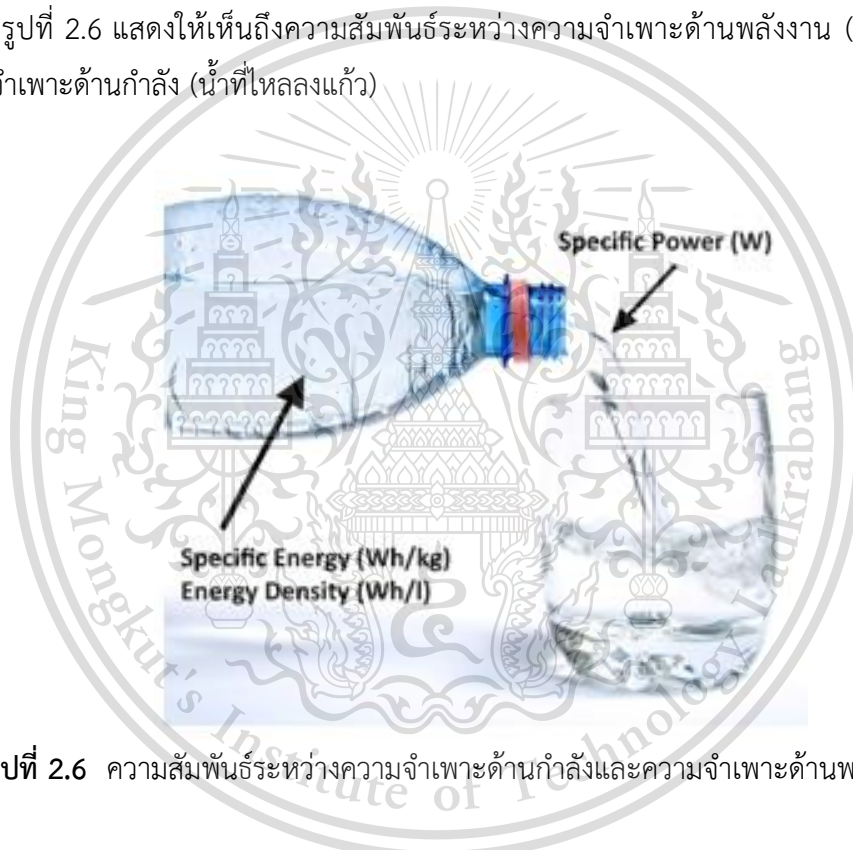
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ความจำเพาะด้านพลังงานหรือความหนาแน่นด้านพลังงาน ความจุของแบตเตอรี่ถูกกำหนดในหน่วยของน้ำหนัก (Wh / kg) ความหนาแน่นด้านพลังงานหรือความหนาแน่นด้านพลังงานเชิงปริมาตร จะแสดงปริมาตรในหน่วยของลิตร (Wh / l) ผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้เวลาทำงานนานที่ภาระทางไฟฟ้าปานกลางจะได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับความจำเพาะด้านพลังงานที่สูง และความสามารถในการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สูงสามารถละลายได้ความจำเพาะด้านกำลัง (Specific power)

#### 7) ความจำเพาะด้านกำลังหรือความหนาแน่นด้านกำลัง

แสดงถึงความสามารถในการจ่ายกำลังให้กับภาระทางไฟฟ้า แบตเตอรี่สำหรับเครื่องมือทางไฟฟ้าผลิตขึ้นเพื่อให้มีความจำเพาะด้านกำลังสูงและส่งผลให้ความจำเพาะด้านพลังงาน (ความจุ) ลดลง รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความจำเพาะด้านพลังงาน (น้ำในขวด) และความจำเพาะด้านกำลัง (น้ำที่ไหลลงแก้ว)



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความจำเพาะด้านกำลังและความจำเพาะด้านพลังงาน [3]

#### 2.1.6 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละชนิด [3]

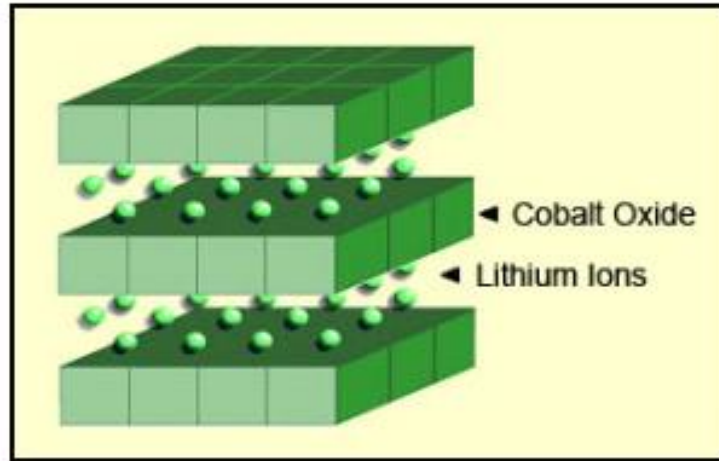
##### 1) ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO<sub>2</sub>) - LCO

ความจำเพาะด้านพลังงานที่สูงทำให้ลิเทียมโคบอลต์เป็นตัวเลือกยอดนิยมสำหรับโทรศัพท์มือถือ แล็ปท็อป และกล้องดิจิทัล แบตเตอรี่ประกอบด้วยแคโทดเป็นโคบอลต์ออกไซด์และแอโนดเป็นคาร์บอนแกรไฟต์ แคโทดมีโครงสร้างเป็นชั้น ๆ และในระหว่างการคายประจุลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทด เป็นการไหลย้อนกลับของประจุ ข้อเสียเปรียบของลิเทียมโคบอลต์ คืออายุการใช้งานที่ค่อนข้างสั้น ความเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ และความสามารถในการ

ไม่ว่าการณีได้จ่ายภาระทางไฟฟ้าที่จำกัด (ความจำเพาะด้านกำลัง) โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.7 ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

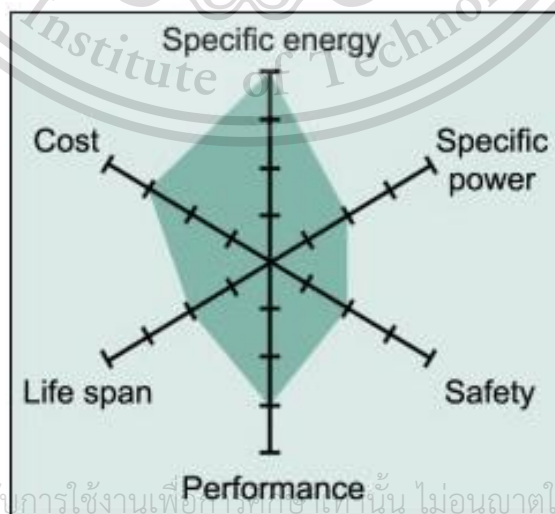
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.7 โครงสร้างลิเทียมโคบอลต์ [3]

เช่นเดียวกับลิเทียมไอออนที่ผสมโคบอลต์อื่น ๆ ลิเทียมโคบอลต์มีแอนไอออนเป็นกราฟไฟท์ที่จำกัดอายุการใช้งานโดยการเปลี่ยนเฟสไฟฟ้าอเล็กโทรไลต์ (Solid Electrolyte Interface : SEI) เพิ่มความหนาบนแอนไอออน และการซุบลิเทียมในขณะที่อัดประจุแบบเร็วและการอัดประจุที่อุณหภูมิต่ำ ระบบที่ใหม่กว่า ได้แก่ นิกเกิลแมงกานีส หรือ อลูมิเนียม เพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน ความสามารถในการรับภาระทางไฟฟ้าและต้นทุน

การอัดประจุในลิเทียมโคบอลต์ไม่ควรอัดประจุและคายประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงกว่าระดับ C-rate ซึ่งหมายความว่าเซลล์ชนิด 18650 ที่มี 2,400 mAh สามารถอัดและคายประจุได้ที่ 2,400 mA เท่านั้น การบังคับให้อัดประจุแบบเร็วหรือใช้ภาระทางไฟฟ้าที่สูงกว่า 2,400 mA ทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปและความเครียดที่ไม่เหมาะสม สำหรับการอัดประจุแบบเร็วที่ดีที่สุด ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ C-rate 0.8C หรือประมาณ 2,000 mA ข้อบังคับของวงจรป้องกันแบตเตอรี่นั้นมีการจำกัดการอัดและคายประจุให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยประมาณ 1C สำหรับเซลล์ด้านพลังงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามดัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 ภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์โดยเฉลี่ย [3]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

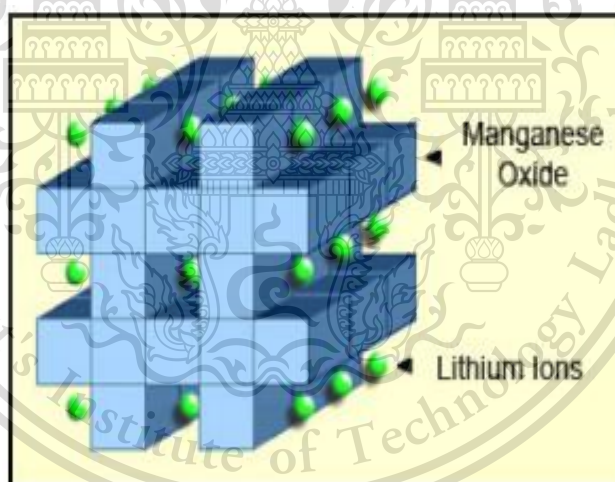
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) - LMO

ลิเทียมไอออนที่มีแมงกานีสปิเนลได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกใน Materials Research Bulletin ในปี 1983 จากนั้นในปี 1996 Moli Energy ทำการค้าเซลล์ลิเทียมไอออนโดยมีลิเทียมแมงกานีสออกไซด์เป็นวัสดุแคโทด โครงสร้างสปิเนลสามมิติที่ปรับปรุงการไหลของไอออนบนอิเล็กโทรดทำให้ความต้านทานภายในลดลง และการจัดการกระแสได้ดีขึ้น ข้อดีเพิ่มเติมของสปิเนลคือเสถียรภาพทางความร้อนสูงและเพิ่มความปลอดภัย แต่รอบการทำงานและอายุการใช้งานจะถูกจำกัด

ความต้านทานภายในเซลล์ต่ำทำให้สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วและมีกระแสสูง ในบรรดาเซลล์ 18650 ลิเทียมแมงกานีสสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 20–30 A โดยมีการสะสมความร้อนปานกลาง นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับภาระทางไฟฟ้าชั่วขณะ 1 วินาทีได้ถึง 50 A กระแสไฟฟ้าที่สูงอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดความร้อนสะสมและอุณหภูมิของเซลล์ต้องไม่เกิน  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $176\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) ลิเทียมแมงกานีสใช้สำหรับเครื่องมือทางไฟฟ้า เครื่องมือทางการแพทย์ ตลอดจนรถยนต์ไฮบริดและไฟฟ้า

รูปที่ 2.9 แสดงการก่อตัวของกรอบผลึกสามมิติบนแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีส โครงสร้างสปิเนลซึ่งมักประกอบด้วยรูปทรงเพชรที่เชื่อมต่อกันเป็นตาข่ายจะปรากฏขึ้นหลังจากการก่อครั้งแรก

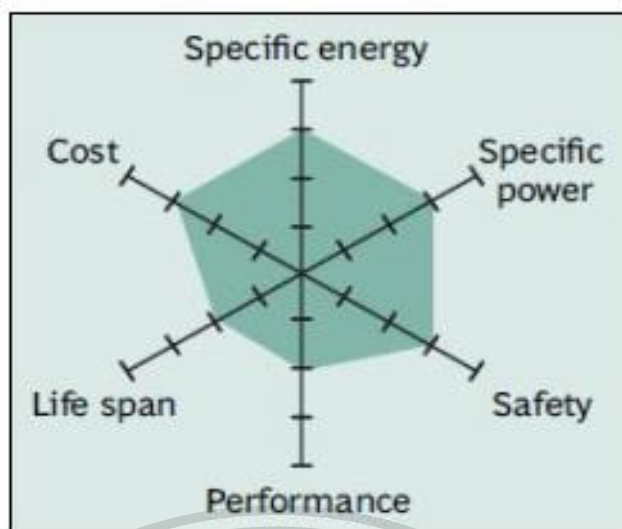


รูปที่ 2.9 โครงสร้างลิเทียมแมงกานีส [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 ภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสที่บริสุทธิ์ [3]

### 3) ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) - NMC

หนึ่งในระบบลิเทียมไอออนที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด คือ การรวมแคโทดของนิกเกิลแมงกานีส โคบอลต์ (NMC) เช่นเดียวกับลิเทียมแมงกานีส ระบบเหล่านี้สามารถปรับแต่งเพื่อใช้เป็นเซลล์ด้านพลังงานหรือเซลล์ด้านกำลังได้ ตัวอย่างเช่น NMC ในเซลล์ 18650 สำหรับสถานะที่ภาระทางไฟฟ้าปานกลาง มีความจุประมาณ 2,800 mAh และสามารถส่งจ่ายได้ 4 A ถึง 5 A

NMC ในเซลล์เดียวกันที่ปรับให้เหมาะสมสำหรับความจำเพาะด้านกำลัง มีความจุเพียงประมาณ 2,000 mAh แต่ให้กระแสอย่างต่อเนื่องที่ 20 A แอโนดที่ใช้ซิลิกอนจะอยู่ที่ 4,000 mAh ขึ้นไป แต่ความสามารถในการจ่ายภาระทางไฟฟ้าและอายุการใช้งานจะลดลง ซิลิกอนที่เพิ่มเข้าไปในแกรไฟต์มีข้อเสียเปรียบ คือ แอโนดจะโตและหดตัวตามการอัดและการคายประจุ ทำให้กลไกของเซลล์ไม่เสถียร

ความลับของ NMC อยู่ที่การรวมนิกเกิลและแมงกานีสเปรียบเทียบกับเหมือนเกลือแกง ซึ่งส่วนผสมหลักเป็นโซเดียมและคลอไรด์ที่แต่ละตัวเป็นพิษ แต่เมื่อผสมกันทำให้ได้เป็นเกลือปรุงรส และเครื่องถนอมอาหาร นิกเกิลเป็นที่ทราบกันดีว่ามีความจำเพาะด้านพลังงานสูง แต่มีความเสถียรต่ำ แมงกานีสมีประโยชน์ในการสร้างโครงสร้างสปีเนลเพื่อให้ได้ความต้านทานภายในต่ำ แต่มีความจำเพาะด้านพลังงานต่ำ การรวมโลหะช่วยเพิ่มจุดแข็งซึ่งกันและกัน

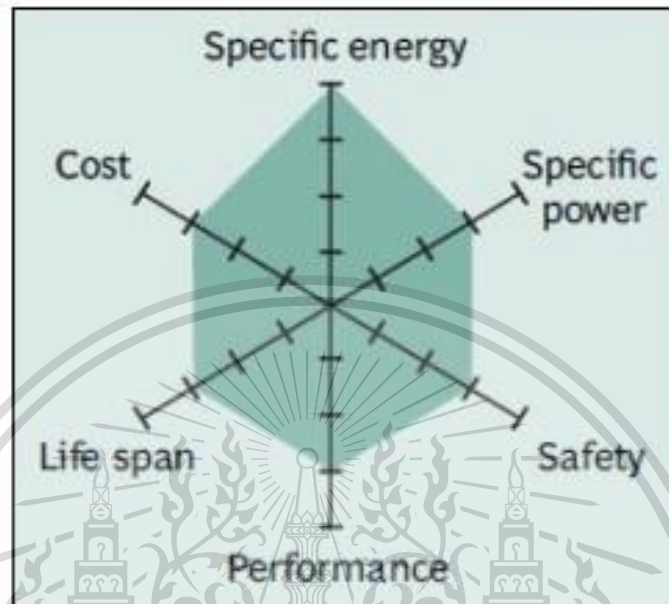
NMC เป็นแบตเตอรี่ที่เป็นตัวเลือกสำหรับเครื่องมือทางไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้าและระบบส่งกำลังไฟฟ้าอื่น ๆ การรวมกันของแคโทดมักเป็นนิกเกิลหนึ่งในสามแมงกานีสหนึ่งในสามและโคบอลต์หนึ่งในสามหรือที่เรียกว่า 1-1-1 สูตรผสมนี้มีความเป็นเอกลักษณ์และช่วยลดต้นทุนวัตถุดิบเนื่องจากปริมาณโคบอลต์ที่ลดลง สูตรผสมที่ประสบความสำเร็จอีกอย่างคือ NCM ที่มีนิกเกิลห้าส่วนโคบอลต์สามส่วนและแมงกานีสสองส่วน (5-3-2) สูตรผสมอื่น ๆ โดยใช้วัสดุแคโทดในปริมาณต่าง ๆ ที่เป็นไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ขึ้นสู่สาธารณะ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผู้ผลิตแบตเตอรี่เปลี่ยนจากโคบอลต์ไปใช้นิกเกิลเป็นแคโทดเนื่องจากโคบอลต์มีต้นทุนสูง ระบบที่ใช้นิกเกิลมีความหนาแน่นด้านพลังงานสูงกว่า ต้นทุนต่ำ และอายุการใช้งานยาวนานกว่าเซลล์ที่ใช้โคบอลต์ แต่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 2.11 ภาพรวมของลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ [3]

#### 4) ลิเทียมไอออนฟอสเฟต ( $\text{LiFePO}_4$ ) - LFP

ในปี 1996 มหาวิทยาลัยเท็กซัส (และผู้ให้ข้อมูลอื่น ๆ) ได้ค้นพบฟอสเฟตเป็นวัสดุแคโทดสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมแบบอัดประจุใหม่ได้ ลิเทียมฟอสเฟตมีประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีที่ดีและมีความต้านทานต่ำ สิ่งนี้เกิดขึ้นได้ด้วยวัสดุแคโทดฟอสเฟตระดับนาโน ประโยชน์ที่สำคัญ คือ การให้กระแสสูงและอายุการใช้งานยาวนานนอกเหนือจากความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี ความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้นและความทนทานหากถูกใช้งานแบบผิด ๆ

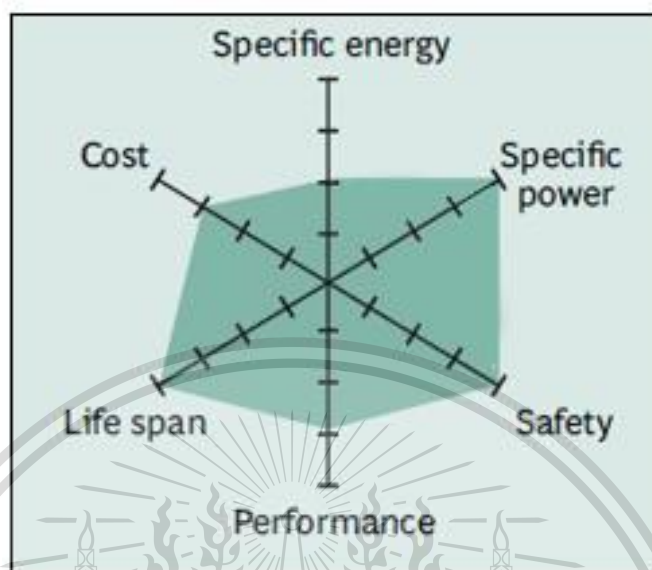
ลิเทียมฟอสเฟตทนต่อสภาวะการอัดประจุเต็มได้มากกว่าและเกิดความเค้นน้อยกว่าระบบลิเทียมไอออนอื่น ๆ หากอยู่ในสภาวะแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นเวลานาน แรงดันไฟฟ้าที่ระบุต่ำกว่า 3.2 V / เซลล์ จะลดความจำเพาะด้านพลังงานต่ำกว่าของลิเทียมไอออนที่ผสมโคบอลต์ สำหรับแบตเตอรี่ส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะลดประสิทธิภาพและอุณหภูมิในการกักเก็บที่สูงขึ้นจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงและลิเทียมฟอสเฟตก็ไม่มีข้อยกเว้นเช่นกัน ลิเทียมฟอสเฟตมีการคายประจุด้วยตัวเองสูงกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนอื่น ๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาด้านความสมดุลกับอายุการใช้งาน ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการชื้อเซลล์ที่มีคุณภาพสูง หรือใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนในการควบคุม ซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะเพิ่มต้นทุนในการบรรจุ ความสะอาดในการผลิตมีความสำคัญต่อการใช้งานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ยาวนาน หากไม่มีความทนทานต่อความชื้นทำให้แบตเตอรี่ทำงานได้เพียง 50 รอบ รูปที่ 2.12 สรุปคุณลักษณะของลิเทียมฟอสเฟต



รูปที่ 2.12 ภาพรวมทั่วไปของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต [3]

ลิเทียมฟอสเฟตมักใช้แทนแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่ใช้เป็นตัวสตาร์ท เซลล์ 4 เซลล์ที่ต่ออนุกรมสร้างแรงดันไฟฟ้าได้ 12.80 V แรงดันไฟฟ้าใกล้เคียงกับเซลล์กรดตะกั่ว 2 V จำนวน 6 เซลล์ที่ต่ออนุกรม รถยนต์จะอัดประจุกรดตะกั่วเป็น 14.40 V (2.40 V / เซลล์) และรักษาค่าการอัดประจุไว้ การอัดประจุแบบท็อปปีง (Topping) ใช้เพื่อรักษาระดับการอัดประจุเต็มและป้องกันการเกิดซัลเฟตในแบตเตอรี่กรดตะกั่ว

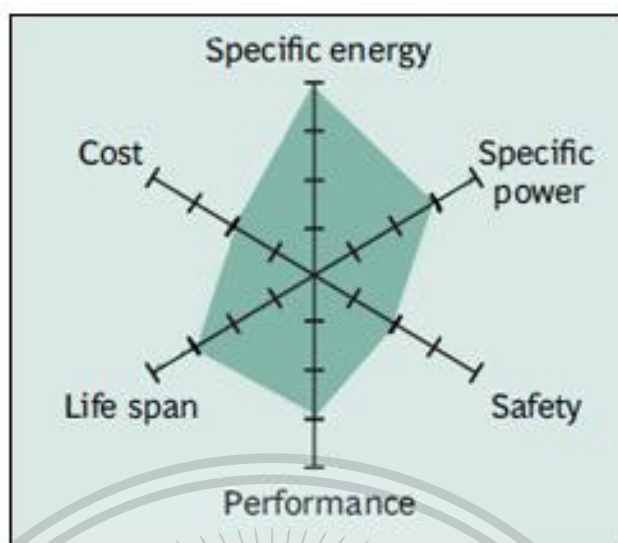
ด้วยเซลล์ลิเทียมฟอสเฟต 4 เซลล์ต่ออนุกรมแต่ละเซลล์จะอยู่ที่ 3.60 V ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ประจุเต็ม ณ จุดนี้ควรตัดการเชื่อมต่อการอัดประจุ แต่การอัดประจุไฟยังคงดำเนินต่อไปขณะมีการขับเคลื่อน ลิเทียมฟอสเฟตสามารถทนต่ออัดประจุเกินได้ดี อย่างไรก็ตามการรักษาระงับไฟฟ้าไว้ที่ 14.40 V เป็นเวลานาน เช่นเดียวกับยานพาหนะส่วนใหญ่ในการเดินทางบนถนนที่ยาวนานอาจทำให้ลิเทียมฟอสเฟตเกิดความเค้น เวลาจะบอกได้ว่าลิเทียมฟอสเฟตมีความทนทานกว่ากรดตะกั่วเพียงใดในการใช้งานระบบอัดประจุรถยนต์ทั่วไป

##### 5) ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (LiNiCoAlO<sub>2</sub>) - NCA

แบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์หรือ NCA มีมาตั้งแต่ปี 1999 สำหรับการใช้งานพิเศษ มีความคล้ายคลึงกับ NMC ที่มีความจำเพาะด้านพลังงานสูง ความจำเพาะด้านกำลังที่ดีพอสมควร และอายุการใช้งานที่ยาวนาน การเกิดแพลตตินัลด่างแสดงถึงความปลอดภัยที่มากขึ้น รูปที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะสำคัญ NCA เป็นการพัฒนาเพิ่มเติมของลิเทียมนิกเกิลออกไซด์ การเพิ่มอะลูมิเนียมทำให้เซลล์เคมีมีเสถียรภาพมากขึ้น

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.13 ภาพรวมของลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ [3]

#### 6) ลิเทียมไททาเนต ( $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ ) - LTO

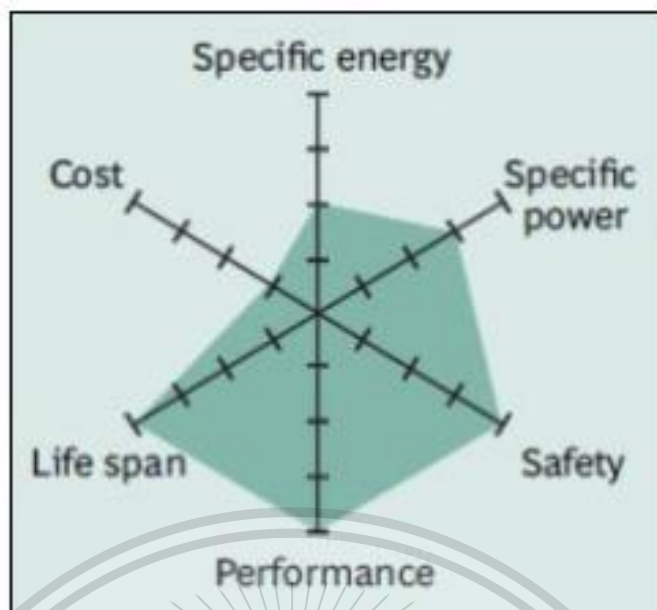
แบตเตอรี่ที่มีแอโนดเป็นลิเทียมไททาเนตเป็นที่รู้จักกันมาตั้งแต่ทศวรรษที่ 1980 ลิเทียมไททาเนตใช้แทนกราไฟท์ในแอโนดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วไป และวัสดุจะรวมกันเป็นโครงสร้างสปีเนล แคโทดสามารถเป็นลิเทียมแมงกานีสออกไซด์หรือ NMC ได้ ลิเทียมไททาเนตมีแรงดันไฟฟ้าของเซลล์โดยทั่วไปที่ 2.40 V สามารถอัดประจุได้อย่างรวดเร็วและให้กระแสออกมาสูงถึง 10C หรือ 10 เท่าของความจุที่กำหนด จำนวนรอบการใช้งานจะสูงกว่าลิเทียมไอออนทั่วไป ลิเทียมไททาเนตมีความปลอดภัย มีคุณลักษณะในการคายประจุที่อุณหภูมิต่ำที่ยอดเยียม และมีความจุร้อยละ 80 ที่  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-22\text{ }^{\circ}\text{F}$ )

LTO (โดยทั่วไปคือ  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) มีข้อได้เปรียบเหนือกว่าลิเทียมไอออนที่ผสมโคบอลต์แบบเดิมที่มีแอโนดเป็นแกรไฟต์โดยให้คุณสมบัติของความเครียดเป็นศูนย์ ไม่มีการก่อตัวของฟิล์ม SEI และไม่ต้องชุบลิเทียมเมื่ออัดประจุอย่างรวดเร็วและสามารถอัดประจุที่อุณหภูมิต่ำได้ ความเสถียรภาพทางความร้อนภายใต้อุณหภูมิสูงยิ่งดีกว่าระบบ ลิเทียมไอออนอื่น ๆ อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพง มีความจำเพาะด้านพลังงานต่ำเพียง 65 Wh/kg เมื่อเทียบกับนิกเกิลแคดเมียม ลิเทียมไททาเนตอัดประจุได้ 2.80 V/เซลล์ และจุดสิ้นสุดของการคายประจุคือ 1.80 V/เซลล์ รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต การใช้งานโดยทั่วไป ได้แก่ ระบบส่งกำลังไฟฟ้า UPS และไฟถนนพลังงานแสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.14 ภาพรวมของลิเทียมไททาเนต [3]

### 2.1.7 เทคนิคการอัดประจุ [5]

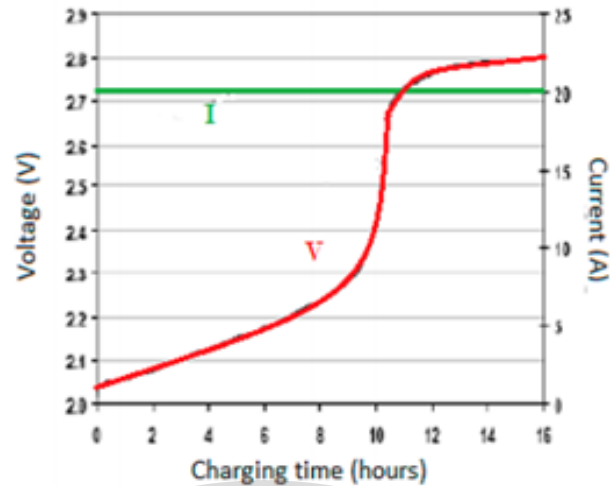
#### 1) การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ (Constant-Current: CC)

ในปัจจุบันใช้วิธีการที่ควบคุมกระแสสูงสุดแบบคงที่และช่วงเวลาเป็นหลักในการควบคุมวิธีการอัดประจุด้วยวิธีดังกล่าว การอัดประจุด้วยกระแสคงที่มีข้อเสียคือระยะเวลาในการอัดประจุนานหากใช้กระแสน้อย แต่หากอัดประจุที่กระแสสูงจะเกิดปัญหาเรื่องความร้อนและแรงดันไฟฟ้าเกิน อีกทั้งยังนำไปสู่ปัญหาการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่อีกด้วย อย่างไรก็ตามประสบการณ์ของผู้ทำงาน อัตราการอัดประจุของกระแสเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเป็นหลักกว่าควรจะใช้กระแสเท่าใด เนื่องจากแบตเตอรี่มีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ความสูงของคลื่น(amplitude) และช่วงเวลา(duration) จะสังเกตจากกราฟได้ว่าการอัดประจุด้วยกระแสคงที่นั้นจะมีค่ากระแสที่ค่าหนึ่งเสมอและแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นไปตามกราฟ ดังรูปที่ 2.15 วิธีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการอัดประจุแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม หรือ นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ รวมถึงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

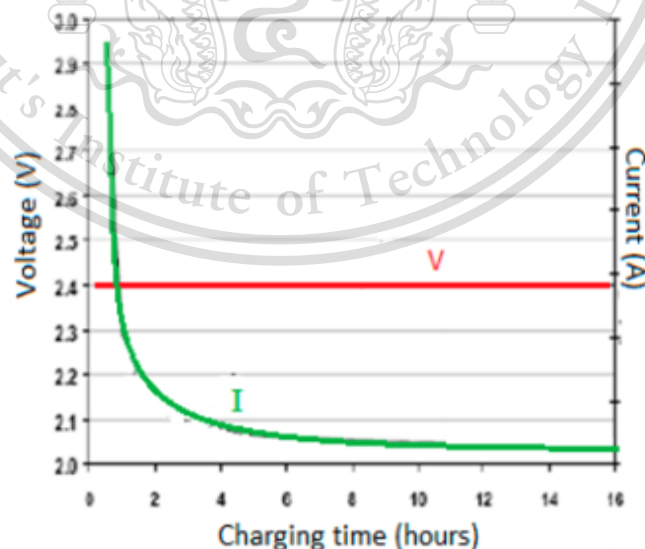
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ [7]

## 2) การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant-Voltage: CV)

เป็นวิธีการอัดประจุที่สามารถควบคุมแรงดันของการอัดประจุได้ แต่กระแสจะเปลี่ยนค่าไปสังเกตได้ว่าค่ากระแสจะลดเรื่อยๆ เมื่อความจุของแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม ข้อดีของวิธีนี้ คือ ควบคุมอุปกรณ์ค่อนข้างง่ายและหลีกเลี่ยงการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน ช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่ แต่มีข้อเสีย คือ กระแสมากเกินไปในช่วงเริ่มต้นของการอัดประจุซึ่งอาจทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ จำเป็นต้องมีกำหนดค่ากระแสเพื่อใช้สำหรับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นของการอัดประจุ เทคนิคการอัดประจุที่ดีคือการสร้างสมดุลระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับความสมดุลของอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.16 การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ [7]

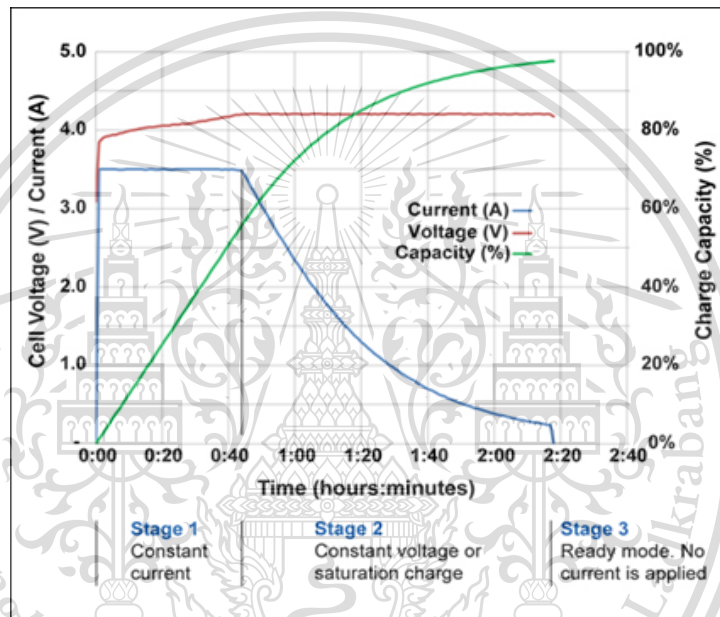
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3) การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันคงที่ (CC-CV)

การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็นกระบวนการอัดประจุมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นวิธีการผสมระหว่างการอัดประจุแบบกระแสคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรก : แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและมีค่ากระแสคงที่ หรือที่เรียกว่า การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ ขั้นที่สอง : จากนั้นจะถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ และค่ากระแสจะลดลง ขั้นที่สาม: กระบวนการอัดประจุจะสิ้นสุดลงหลังจากค่ากระแสถึงค่าที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ กระแสที่กำหนดไว้ ขึ้นอยู่กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน วัสดุที่ใช้ สามารถอัดประจุได้ตามแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามข้อมูลที่มีของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.17 การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันคงที่ [8]

## 2.2 แบบจำลองสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [9]

### 2.2.1 แบบจำลองทางไฟฟ้าเคมี

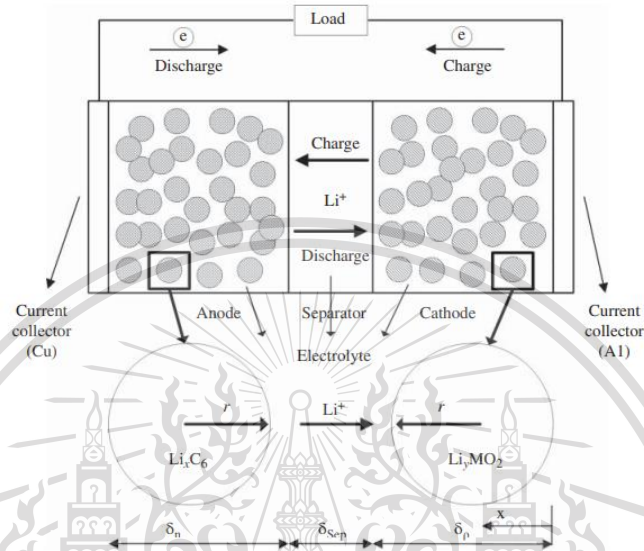
แบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีอธิบายถึงกระบวนการทางกายภาพ ไฟฟ้าเคมีในแอโนด ตัวคั่น และแคโทดของแบตเตอรี่โดยใช้หลักทางอุณหพลศาสตร์และสมการจลศาสตร์ไฟฟ้าเคมี ตามทฤษฎีพื้นฐานของอิเล็กโทรดที่มีรูและสารละลายเข้มข้นได้มีการเสนอแบบจำลองชยุโตะทูดีเมนชันแนล (pseudo-two-dimensional) หรือ P2D เพื่อใช้จำลองแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประกอบด้วยเรื่องสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ไม่เป็นเชิงเส้นคู่ (coupled nonlinear PDE) รวมถึงสมการการแพร่ของอนุภาคภายในลิเทียมไอออนที่ว่องไว และอิเล็กโทรไลต์ สมการของแข็งเฟสสมดุล และสมการอิเล็กโทรไลต์เฟสสมดุล ในสามส่วนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง P2D แสดงไว้ในรูปที่ 2.18 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบด้วยอิเล็กโทรดที่มีรูพรุน ตัวคั่น และตัวรับกระแส อิเล็กโทรดขั้วลบส่วนใหญ่ทำจากคาร์บอนแกรไฟต์และซิลิกอน อิเล็กโทรดขั้วบวกส่วนใหญ่ทำจากโลหะออกไซด์ ตัวคั่นเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน



รูปที่ 2.18 โครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับ P2D [9]

ในการอัดประจุและการคายประจุรอบแรก ตัวนำไอออนมีการป้องกัน แต่ชั้นฉนวนหุ้มฉนวนอิเล็กโทรดที่เรียกว่าซอลิดอิเล็กโทรไลต์อินเตอร์เฟส (solid electrolyte interphase) หรือ SEI จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของแอโนดเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแอโนดและอิเล็กโทรไลต์ การแพร่ของลิเทียมไอออนในอิเล็กโทรไลต์ผ่าน SEI ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในวงจรภายนอก แบบจำลอง P2D ประกอบด้วยสองมิติ มิติแรกไอออนมาจากอิเล็กโทรดขั้วลบไปทางอิเล็กโทรดขั้วบวกตามแนวแกน  $x$  และอีกมิติหนึ่ง คือ มิติรัศมีของอนุภาคทรงกลมตามแกน  $r$  อนุภาคจะถูกพิจารณาว่ากระจายไปทั่วอิเล็กโทรดและฝังอยู่ที่แต่ละตำแหน่งตามแกน  $x$  ในแบบจำลอง P2D อนุภาคที่อยู่ติดกันจะไม่ถูกจับคู่โดยตรง

ในระหว่างกระบวนการคายประจุ กระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ ที่แอโนด อนุภาคที่ว่องไวจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวหน้าของอิเล็กโทรไลต์และความเข้มข้นของลิเทียมไอออนที่ผิวของอนุภาคที่ว่องไวจะลดลง ส่งผลให้มีการไล่ระดับความเข้มข้นภายในของอนุภาคที่ว่องไวและการแพร่ของลิเทียมไอออนจากภายในอนุภาคไปยังพื้นผิวของอนุภาค จากนั้นลิเทียมไอออนจะอินเตอร์คาลาเท (deintercalated) ออกจากพื้นผิวของอนุภาคที่ว่องไว ปล่อยให้

อิเล็กโทรดลิเทียมไอออนเข้าไปในอิเล็กโทรไลต์ ลิเทียมไอออนเหล่านี้แพร่ผ่านตัวคั่นไปยังแคโทด ที่แคโทดของ

ลิเทียมไอออนจะตรึงอยู่ในพื้นผิวของอนุภาคที่ว่องไว ซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของ การไล่ระดับความ

เข้มข้นของลิเทียมไอออนภายในอนุภาคที่ว่องไว จากนั้นลิเทียมไอออนจะแพร่และโยกย้ายจาก

ภายนอกไปยังภายในของอนุภาคที่ว่องไว ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจะชดเชยสมดุลของประจุ เนื่องจากตัวคั่นที่มีรูพรุนเป็นฉนวนอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจึงต้องไหลในวงจรภายนอกผ่านโพลต์ซึ่งจะแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ในระหว่างกระบวนการอัดประจุลิเทียมไอออนและอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ในมิตีย้อนกลับ

คุณลักษณะทางด้านพลวัตของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนตามแบบจำลอง P2D สามารถหาได้โดยง่ายในสามส่วนต่อไปนี้ : ประการแรกลิเทียมไอออนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการอนุรักษ์สสาร และกฎการอนุรักษ์อิเล็กตรอนในส่วนภายในของเฟสของแข็งและเฟสของเหลว ในกระบวนการแพร่ ประการที่สองศักย์ไฟฟ้าของเฟสของแข็งในขั้วบวกและขั้วลบและเฟสของเหลวในอิเล็กโทรไลต์สามารถอธิบายได้โดยสมการการอนุรักษ์การอัดประจุ ประการที่สามปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของอนุภาคที่ว่องไว สามารถอธิบายได้ด้วยจลนศาสตร์ของบัทเลอร์-โวลเมอร์ (Butler – Volmer) หรือ BV แม้ว่าแบบจำลอง P2D สามารถอธิบายปฏิกิริยาทางกายภาพ - ไฟฟ้าเคมีภายในของแบตเตอรี่ได้อย่างสมบูรณ์ แต่แบบจำลองดังกล่าวมีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและพารามิเตอร์ของแบบจำลองมีจำนวนมาก เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองจำเป็นต้องลดลำดับและลดความซับซ้อนของแบบจำลอง P2D แบบจำลองมิติเดียว (one-dimensional) และแบบจำลองอนุภาคเดี่ยว (single particle) เป็นสองตัวอย่างของแบบจำลอง P2D ที่มีการปรับลดลง แม้ว่าแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมีจะสามารถอธิบายพฤติกรรมแบบพลวัตและสถานะแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้อง แต่ความซับซ้อนของแบบจำลองและการใช้ทรัพยากรที่มากเกินไปจะขัดขวางการใช้งานในระบบการจัดการแบตเตอรี่ (BMS) สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามแบบจำลองเหล่านั้นยังคงใช้ในการพัฒนากลยุทธ์สำหรับอัดประจุ การจัดการความร้อน และการจัดการพลังงานของแบตเตอรี่ผ่านการจำลองหรือในสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการที่มีกำลังในการประมวลผลสูง

### 2.2.2 แบบจำลองแบล็กบ็อกซ์ (Black Box)

สามารถจำลองความสัมพันธ์อันซับซ้อนระหว่างพารามิเตอร์ภายนอกของแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็นต้องทราบกระบวนการปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดภายในเช่น ความสัมพันธ์ของ SoC กับแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่และกระแสที่ปล่อยออกมา แม้ว่าภายนอกแบตเตอรี่จะมีโครงสร้างเรียบง่าย แต่เป็นระบบไฟฟ้าเคมีที่ซับซ้อนมาก เช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในแบบจำลองทางไฟฟ้าเคมี

อันดับแรก การรวบรวมชุดปฏิกิริยาทางกายภาพและกระบวนการทางเคมีซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเคมี อันดับที่สอง นอกเหนือจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหลักแล้วยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงบางอย่าง เช่นการกัดกร่อน และการคายประจุด้วยตัวเอง อันดับที่สาม ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสภาพแวดล้อม เช่นเดียวกับการอัดประจุและการคายประจุด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปแบบภายในโดเมนข้อมูลหลายมิติผ่านการฝึกอบรมอัตโนมัติ ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองโครงข่ายประสาท (neural network : NN) แบบจำลองโครงข่ายประสาท ประกอบด้วยชั้นขาเข้าหรือชั้นที่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซ่อนอยู่ และชั้นขาออกภายในโครงข่ายประสาท เซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะเชื่อมต่อกับเซลล์ประสาทอื่น ๆ ของชั้นก่อนหน้าที่ปรับน้ำหนักได้ ความรู้ทั่วไปจะถูกจัดเก็บในชุดการเชื่อมต่อน้ำหนัก การฝึกอบรมเป็นกระบวนการปรับเปลี่ยนการเชื่อมต่อน้ำหนักตามลำดับขั้นตอนโดยใช้วิธีการเรียนรู้ อัลกอริทึมซึ่งจะถูกนำเข้าไปยังโครงข่ายประสาทพร้อมกับผลลัพธ์ที่ต้องการ จากนั้นจึงปรับน้ำหนัก เพื่อให้โครงข่ายประสาทพยายามสร้างผลลัพธ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการฝึกอบรมการเรียนรู้จะหยุดลงเมื่อเกิดข้อผิดพลาดโดยเฉลี่ยระหว่างผลลัพธ์ที่ต้องการและผลลัพธ์จริงของแบบจำลองโครงข่ายประสาทในชุดข้อมูลการฝึกอบรมน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เวลาในการเรียนรู้ถูกกำหนดโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความซับซ้อนของปัญหา จำนวนข้อมูลของการฝึกอบรม โครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาท รวมไปถึงการเรียนรู้พารามิเตอร์ และเรียนรู้อัลกอริทึม รูปที่ 2.19 แสดงแบบจำลองโครงข่ายประสาท สามชั้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง SoC กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ขั้ว



รูปที่ 2.19 แบบจำลองโครงข่ายประสาท สามชั้นเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง SoC กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่ขั้วของแบตเตอรี่ [9]

ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทนี้แรงดันไฟฟ้าและกระแสจะถูกป้อนเข้าไปในชั้นขาเข้า ผ่านเซลล์ประสาทที่เซลล์ในชั้นที่ซ่อนอยู่และ ได้รับค่า SoC ในชั้นขาออก อุณหภูมิของแบตเตอรี่ กระแสและความต้านทานภายใน สามารถใช้เป็นขาเข้าได้ในขณะที่สามารถเลือกความจุของแบตเตอรี่เป็นขาออกได้ ในระหว่างขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทสำหรับความจุของแบตเตอรี่ไม่ขึ้นอยู่กับประเภทแบตเตอรี่จึงสามารถนำไปใช้กับแบตเตอรี่ประเภทอื่น ๆ ได้อย่างง่ายดายโดยมีข้อมูลการทดลองที่เกี่ยวข้องเพื่อฝึกแบบจำลองโครงข่ายประสาท นอกจากนี้แบบจำลองโครงข่ายประสาท ยังสามารถใช้รองรับการใช้งานเครื่องเวกเตอร์ และการเรียนรู้แบบฟัซซี

(fuzzy) เพื่อสร้างแบบจำลองแบล็กบ็อกซ์ได้อีกด้วย ข้อมูลการทดลองจำนวนมาก จำเป็นสำหรับการฝึกเพื่อให้ได้โมเดลแบล็กบ็อกซ์ที่ถูกต้อง ภายใต้อิทธิพลของสภาวะการทำงานที่ไม่แน่นอน เช่น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

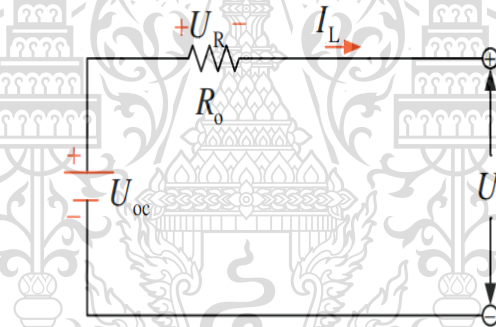
อุณหภูมิ และรอบการขับชี้ของรถยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องยากที่จะได้รับข้อมูลการทดลองที่เพียงพอเพื่อฝึกใช้งานแบบจำลองแบล็กบ็อกซ์สำหรับระบบการจัดการแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้าจริง

### 2.2.3 แบบจำลองวงจรสมมูล

#### 1) แบบจำลองความต้านทานภายใน

แบบจำลองความต้านทานภายในเป็นวงจรสมมูลที่ง่ายที่สุด ใช้เพื่อประมาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของแบตเตอรี่ตามพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด 2 พารามิเตอร์ คือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{OC}$ ) ตาม SoC ของแบตเตอรี่ และความต้านทานภายในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ อธิบายได้ว่าแบตเตอรี่ถูกจำลองเป็นแหล่งแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและตัวต้านทานแสดงถึงการสูญเสียพลังงานเมื่อปล่อยพลังงานนั้น

ข้อเสียของแบบจำลองนี้คือพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับ SoC และอุณหภูมิ เส้นโค้งพารามิเตอร์จะต้องได้มาแบบออฟไลน์โดยการทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ (CC) และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CV) และรอบการคายประจุในขณะที่อุณหภูมิคงที่ การตั้งค่าการทดลองมักประกอบด้วย ระบบทดสอบแบตเตอรี่ ห้องระบายความร้อนสำหรับการควบคุมสภาพแวดล้อม และคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.20 แบบจำลองความต้านทานภายใน [10]

#### 2) แบบจำลองเทวินิน (Thevenin) หรือ แบบจำลอง RC ลำดับ 1 (1st order RC model)

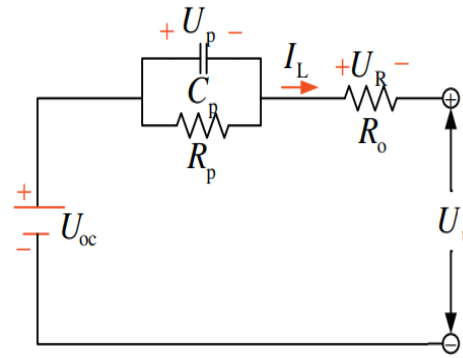
แบบจำลองเทวินินประกอบด้วยวงจรตัวต้านทานต่อแบบขนานกับตัวเก็บประจุ (RC) และมีความต้านทานต่ออนุกรม แบบจำลองนี้คล้ายกับแบบจำลองรีนด้วยการเพิ่มตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน 1 ชุด

ส่วนประกอบตัวต้านทานและตัวเก็บประจุประกอบด้วยองค์ประกอบ  $R_p$  และ  $C_p$  ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานโพลาไรซ์ และ การตอบสนองชั่วคราวระหว่างการอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ ใช้ความต้านทานโพลาไรซ์เพื่อไม่ให้แบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับระบบทันที กล่าวง่าย ๆ คือ วงจรตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแสดงถึงเวลาที่แบตเตอรี่ใช้ในการปล่อยพลังงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

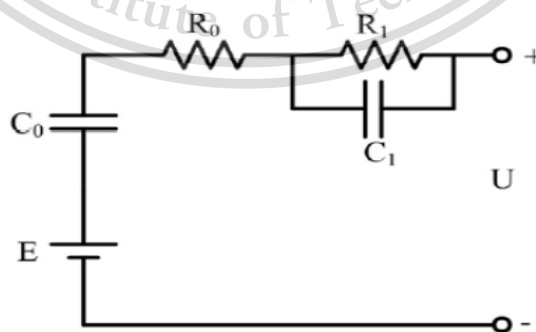


รูปที่ 2.21 แบบจำลองเทวินิน [10]

## 3) แบบจำลองพีเอ็นจีวี (PNGV)

รัฐบาลสหรัฐฯ และสภาการวิจัยยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา (USCAR) ได้สร้างแบบจำลองพาหนะพลังงานไฟฟ้ารุ่นใหม่ (Partnership for a New Generation of Vehicles) หรือ PNGV ขึ้นในปี 1993 โดยพิจารณาจากคุณลักษณะด้านการโพลาริซของแบตเตอรี่เป็นหลัก นอกจากนี้แบบจำลองยังถูกนำมาใช้ใน "คู่มือการทดสอบแบตเตอรี่ PNGV" ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบที่จะใช้กับแบตเตอรี่ โปรแกรมนี้กล่าวถึงการปรับปรุงความสามารถในการแข่งขันด้านการผลิตระดับประเทศและการนำนวัตกรรมการประหยัดพลังงานมาใช้ในรถยนต์โดยสาร

โมเดล PNGV ดังรูป โมเดลประกอบด้วย 5 พารามิเตอร์ คือ  $E$ ,  $C_0$ ,  $R_0$ ,  $R_1$  และ  $C_1$  ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของแบตเตอรี่  $E$  หมายถึง แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่  $C_1$  แสดงถึงความจุและเอฟเฟกต์การแพร่ของแบตเตอรี่  $R_1$  หมายถึงความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้นของแบตเตอรี่เนื่องจากความต้านทานการสัมผัสระหว่างแผ่นและอิเล็กโทรไลต์ ประการสุดท้าย  $C_0$  แสดงถึงรูปแบบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่เกิดจากการสะสมของกระแสไหลและปรับขนาดความจุของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.22 แบบจำลอง PNGV [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

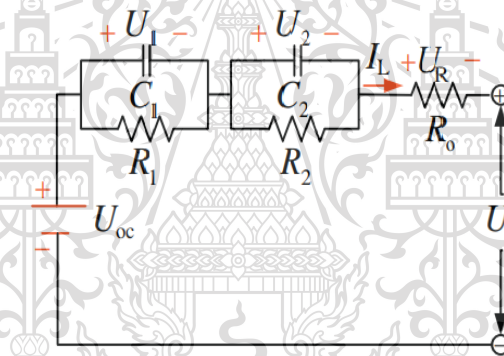
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4) แบบจำลองคู่อลโพลาไรซ์เซชัน หรือแบบจำลอง RC ลำดับ 2

แบบจำลองคู่อลโพลาไรซ์เซชันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบบจำลองเทวินินเนื่องจากแบบจำลองเทวินินไม่สามารถตรวจจับคุณลักษณะด้านการโพลาไรซ์ทั้งสองของแบตเตอรี่ได้อย่างแม่นยำโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกันชุดเดียว แบบจำลองคู่อลโพลาไรซ์เซชันจะตรวจจับโพลาไรซ์เข้มข้นและโพลาไรซ์ทางไฟฟ้าเคมีแยกกันโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน 2 ชุดที่แตกต่างกันจึงตั้งชื่อว่าโพลาไรซ์ รูปที่ 2.23 แสดงแบบจำลองวงจรคู่อลโพลาไรซ์เซชัน

ศึกษาแบบจำลองคู่อลโพลาไรซ์เซชันได้โดยการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของความต้านทาน  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  ซึ่งอธิบายถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่การโพลาไรซ์ทางไฟฟ้าเคมีและความต้านทานโพลาไรซ์ตามลำดับ ความจุ  $C_1$  และ  $C_2$  นำไปใช้เพื่อกำหนดลักษณะการตอบสนองชั่วคราวระหว่างการถ่ายโอนพลังงานไปยังแบตเตอรี่และเพื่อแยกกโพลาไรซ์ทางไฟฟ้าเคมีกับโพลาไรซ์เข้มข้น



รูปที่ 2.23 แบบจำลองคู่อลโพลาไรซ์เซชัน [10]

#### 5) แบบจำลองเชิงความร้อน (Thermal Model)

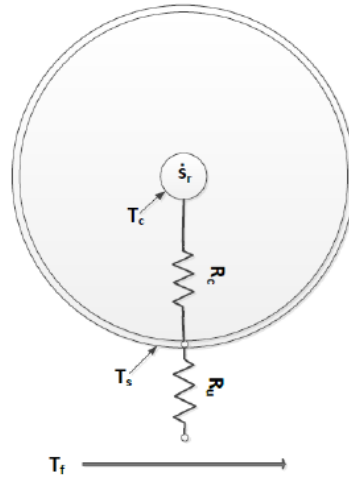
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีประสิทธิภาพดีที่อุณหภูมิห้อง หากอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงเกินไปหรือต่ำเกินไปประสิทธิภาพของแบตเตอรี่จะได้รับผลกระทบอย่างมาก ระบบจัดการความร้อนช่วยให้มั่นใจได้ว่าแบตเตอรี่ยังคงอยู่ในพื้นที่ที่ปลอดภัย เพื่อป้องกันไม่ให้ระเบิดเป็นเปลวไฟหรือลดอายุการใช้งานลงมาก

แบบจำลองเชิงความร้อนได้รับการพัฒนาเพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมความร้อน ในบรรดาแบบจำลองที่พบในทางทฤษฎี ได้แก่ แบบจำลองความร้อนความจุแบบก้อน แบบจำลองเชิงตัวเลขกับเชิงวิเคราะห์ และแบบจำลองวงจรสมมูลความร้อน

แบบจำลองเชิงความร้อนที่ใช้สำหรับกำหนดแกนและอุณหภูมิพื้นผิวของเซลล์แสดงในรูปที่ 2.24 แบบจำลองนี้ใช้แบบจำลองความร้อนแบบกระจายในแนวนอนของเซลล์แบตเตอรี่ทรงกระบอก ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสี่ นอกเหนือจากนี้หากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบคลาสสิก

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.24 แบบจำลองเชิงความร้อน [9]

### 2.3 ระบบการจัดการแบตเตอรี่ [11]

ระบบการจัดการแบตเตอรี่เป็นระบบแบบเรียลไทม์ที่ควบคุมด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ มากมายซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการทำงานอย่างถูกต้องและปลอดภัยของระบบแบตเตอรี่ในยานพาหนะไฟฟ้าและรถยนต์ในระบบปลั๊กอินไฮบริด ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า การบำรุงรักษา การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ การทำนายและป้องกันความผิดพลาดของระบบ และการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่ไม่ได้ถูกนำไปใช้เพียงยานยนต์แต่ได้ถูกนำไปใช้ในรูปแบบการทำงานอื่นอีก เช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า ระบบกำลังแบบออฟกริด (off-grid) และแบตเตอรี่สำรองสำหรับพลังงานทางทดแทน สิ่งสำคัญที่เหมือนกันในตลาดยานยนต์ คือ ต้องการให้ระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถควบคุมเซลล์ไฟฟ้าและแพ็คเกจแบตเตอรี่ได้อย่างทนทาน เชื่อถือได้และเหมาะสมที่สุด

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งหมดต้องมีระบบการจัดการแบตเตอรี่ ระบบการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะล้มเหลวเมื่อมีการอัดประจุมากเกินไป การคายประจุจนหมดหรือใช้งานนอกอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้ เซลล์ลิเทียมไอออนแต่ละชนิดมีการใช้งานอย่างปลอดภัยที่แตกต่างกัน ทำให้จำเป็นต้องตั้งโปรแกรมระบบการจัดการแบตเตอรี่ให้สอดคล้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

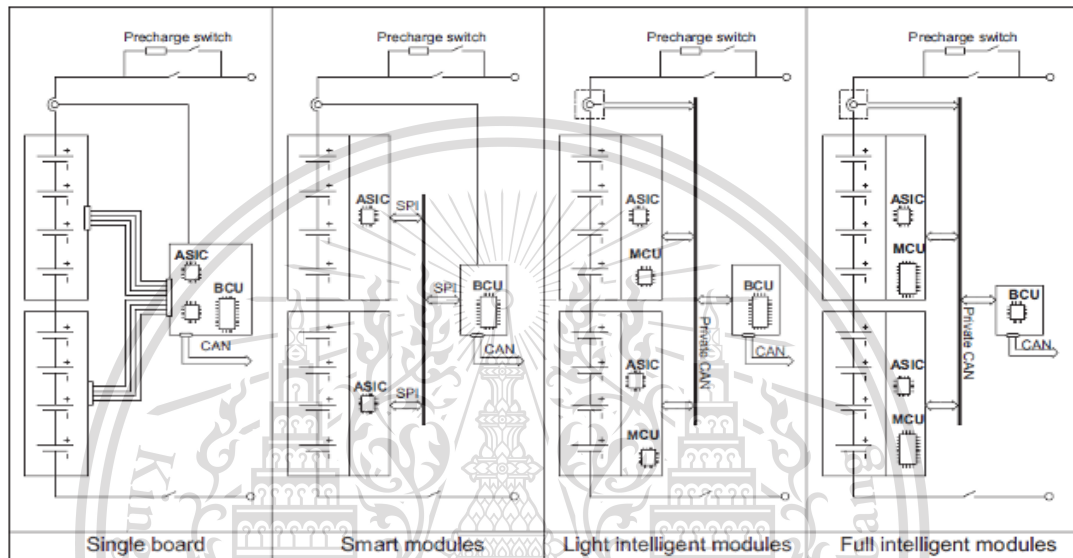
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



- การถอดแบตเตอรี่ขณะเกิดเหตุฉุกเฉินอย่างปลอดภัย
- ทำนายระยะทางที่สามารถเดินทางได้ด้วยประจุไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่
- โหมด ลิมโฮมส์ (limp home) ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด

### 2.3.1 โครงสร้างและตัวเลือกการทำงานของระบบการจัดการแบตเตอรี่

โดยทั่วไปชุดควบคุมโมดูลและชุดควบคุมแบตเตอรี่สามารถออกแบบได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความหลากหลายของระบบซึ่งจะทำให้เกิดความแตกต่างกันในหลาย ๆ ด้าน



รูปที่ 2.26 ภาพรวมของโครงสร้างต่าง ๆ ของระบบการจัดการแบตเตอรี่ [11]

จากรูปที่ 2.26 การออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ได้อธิบายไว้ดังนี้ :

#### 1) ซิงเกิลบอร์ด (Single-Board)

ซิงเกิลบอร์ดคือตัวเลือกต้นทุนต่ำเมื่อใช้จำนวนเซลล์ที่น้อยซึ่งระบบการจัดการแบตเตอรี่จะประกอบบนแผงวงจรเดียว โมดูลแบตเตอรี่ไม่จำเป็นต้องปรับให้เข้ากับอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กระแส และอุณหภูมิ แผงวงจรระบบการจัดการแบตเตอรี่ประกอบด้วย application-specific integrated circuits (ASIC) ที่ควบคุมโมดูลแบตเตอรี่ การควบคุมจะอยู่ภายใต้การดูแลของชุดควบคุมแบตเตอรี่ซึ่งจะตัดการเชื่อมต่อแบตเตอรี่ออกจากแอปพลิเคชันทันทีแม้มีเพียงค่าพารามิเตอร์เดียวของแบตเตอรี่เกินช่วงที่กำหนด

ข้อดี: ระบบการจัดการแบตเตอรี่ต้นทุนต่ำ

ข้อเสีย: สัญญาณการวัดจะต้องเชื่อมต่อกับบอร์ดของระบบการจัดการแบตเตอรี่

#### 2) สมาร์ทโมดูล (Smart Modules)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ในโครงสร้างนี้โมดูลแบตเตอรี่แต่ละโมดูลมี ASIC ที่ช่วยปกป้องโมดูลโดยตรง ASIC สามารถสื่อสารกับชุดควบคุมแบตเตอรี่ผ่าน serial peripheral interface (SPI) ดังนั้นการเชื่อมต่อทั้งหมดจากโครงสร้างบอร์ดเดียวสามารถลดลงเหลือ SPI Bus เพียงหนึ่งตัว

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ข้อดี: การเชื่อมต่อสายไฟกับโมดูลแบตเตอรี่แต่ละโมดูลน้อยกว่าแบบ Single-Board

ข้อเสีย: ชุดควบคุมโมดูลสามารถแค่ส่งข้อมูลได้เท่านั้น หากชุดควบคุมแบตเตอรี่ต้องการข้อมูล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจจะทำให้ข้อมูลสูญหายได้

### 3) ไลต์อินเทลลิเจนต์โมดูล (Light-Intelligent Modules)

ในการรวบรวมข้อเสียของโมดูลทำให้ได้รับการปรับปรุงทำให้ได้โมดูลสื่อสารผ่านแคณอินเตอร์เฟซ (CAN Interface) ด้วยชุดควบคุมแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถป้องกันข้อผิดพลาดต่างๆได้ ในการเริ่มต้นวิธีการสื่อสารแบบนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก

ชุดควบคุมโมดูลยังคงทำหน้าที่วัดและดูแลแรงดันไฟฟ้า การวัดอุณหภูมิและความสมดุลของเซลล์ การควบคุมส่วนที่เหลือเป็นส่วนหนึ่งของชุดควบคุมแบตเตอรี่ซึ่งรวมถึง SoC SoH และการจัดการความร้อน นอกจากนี้ยังต้องเชื่อมต่อระบบการจัดการแบตเตอรี่กับส่วนที่เหลือของยานพาหนะผ่านแคณอินเตอร์เฟซ

### 4) ฟูลอินเทลลิเจนต์โมดูล (Full-Intelligent Modules)

เมื่อเปรียบเทียบกับไลต์อินเทลลิเจนต์โมดูลความแตกต่างเพียงอย่างเดียวของโครงสร้างนี้คือ ฟังก์ชันบางอย่างของชุดควบคุมแบตเตอรี่จะถูกควบคุมโดยชุดควบคุมโมดูลรวมไปถึงการหาค่า SoC และ SoH ซึ่งนี่เป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับระบบแบตเตอรี่ขนาดใหญ่มาก เช่น ระบบจัดเก็บพลังงานสำหรับการเชื่อมต่อแบบกริด

สุดท้ายการเลือกโครงสร้างขึ้นอยู่กับแอปพลิเคชันเป็นหลักรวมถึงระดับความปลอดภัยและระดับความซับซ้อนที่ต้องการ

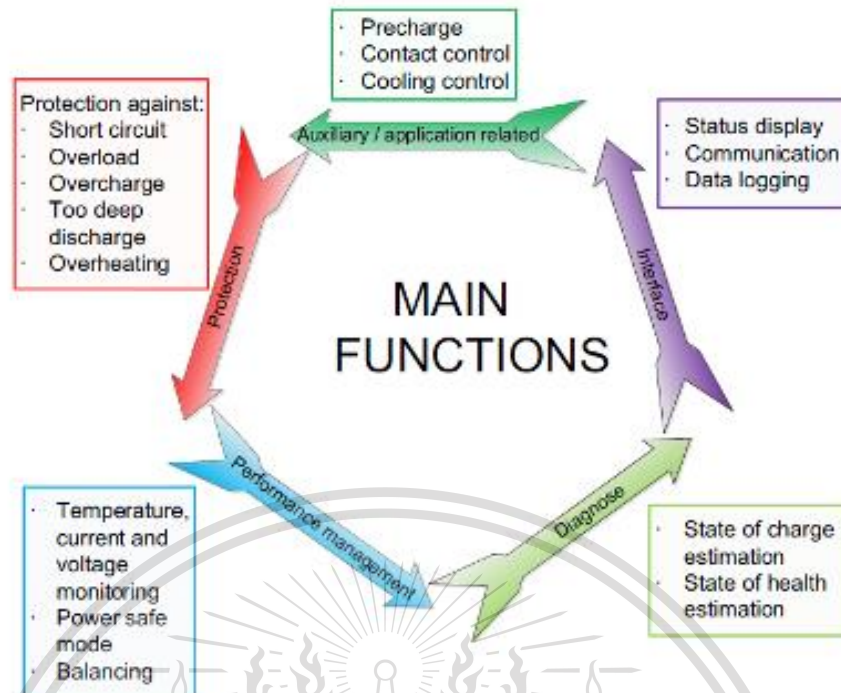
## 2.3.2 ฟังก์ชันของระบบการจัดการแบตเตอรี่

โดยทั่วไปชุดควบคุมโมดูลจะมีการวัดแรงดัน อุณหภูมิ และกระแสจากนั้นค่าเหล่านี้จะถูกประมวลผลด้วย ASIC หรือวงจรอนาล็อกขนาดเล็กซึ่งจำเป็นสำหรับการป้องกันเซลล์ใดเซลล์หนึ่งจากการทำงานผิดปกติ ชุดควบคุมแบตเตอรี่รับข้อมูลจากชุดควบคุมโมดูลและรับรู้ฟังก์ชันระดับที่สูงขึ้น ฟังก์ชันสามารถแยกออกเป็นกลุ่ม ๆ ตามภาพต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.27 ฟังก์ชันหลักของระบบการจัดการแบตเตอรี่ [11]

บางฟังก์ชัน เช่น การป้องกันและการจัดการประสิทธิภาพ เป็นข้อบังคับสำหรับระบบการจัดการแบตเตอรี่แต่มีบางฟังก์ชันขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของระบบและระดับของความซับซ้อนของแบตเตอรี่

#### 1) การจัดการประสิทธิภาพ

การตรวจสอบแรงดันไฟฟ้า กระแส และอุณหภูมิ ค่าหลัก 3 ค่าที่สามารถวัดได้โดยตรง คือ แรงดันไฟฟ้า กระแสและอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิสามารถหาค่าได้จากอุณหภูมิที่เซ็นเซอร์วัดไม่ได้ที่จะวัดภายในเซลล์ ส่วนใหญ่มักจะทำการวัดที่ด้านบนของขั้วบวกหรือตรงกลางของภายนอกเซลล์

การปรับสมดุลของเซลล์ ในแบตเตอรี่หลายเซลล์ (การเชื่อมต่อแบบอนุกรม) ความแตกต่างเล็กน้อยของความจุระหว่างเซลล์เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตหรือสภาพการใช้งานที่แตกต่างกันและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการอัดประจุในแต่ละรอบ ยิ่งไปกว่านั้นความจุของเซลล์บางส่วนจะสูญเสียไปเมื่อเวลาผ่านไปโดยการคายประจุด้วยตัวเอง (โดยทั่วไปร้อยละ 2-10 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ SoC) ถ้าอุณหภูมิการกระจายในแพ็คเกจไม่เท่ากันเซลล์ที่ร้อนกว่ามักจะมีการสูญเสียความจุที่สูงกว่าและในที่สุดก็นำไปสู่ความไม่สมดุล เซลล์ดังกล่าวจะเกิดความเค้นมากเกินไปในระหว่างการอัดประจุ ความไม่สมดุลที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องนี้ทำให้ความจุลดลงจนทำให้เซลล์เกิดความล้มเหลว

ในการทำงาน การปรับสมดุลของเซลล์เป็นวิธีการทำให้ประจุของเซลล์ทั้งหมดเท่ากันซึ่งมีวิธีการปรับสมดุลที่แตกต่างกันมากมาย ซึ่งมีการจำแนกชั้นพื้นฐานโดยการแบ่งวิธีการปรับสมดุลออกเป็นวิธีแบบแอคทีฟและแบบพาสซีฟ ในกรณีของการปรับแบบแอคทีฟ คือ ถ่ายโอนพลังงานระหว่างเซลล์ที่อยู่

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ติดกัน วิธีการปรับสมดุลแบบพาสซีฟมักจะใช้การสลับตัวต้านทานที่เปิดอยู่สำหรับเซลล์ที่มีประจุไฟฟ้ามากที่สุด เซลล์ถูกคายประจุและพลังงานจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน

**การควบคุมการอัดประจุ** การควบคุมประจุจะจำกัดอัตราการป้อนกระแสเข้าไปในแต่ละเซลล์เพื่อป้องกันแบตเตอรี่ให้อยู่ในสถานะที่ปลอดภัย ฟังก์ชันเพิ่มเติมอาจรวมถึงการสื่อสารด้วยอุปกรณ์อัดประจุอัจฉริยะภายนอกและการรายงานพารามิเตอร์การอัดประจุที่ต้องการรวมทั้งสถานะแบตเตอรี่

**โหมดประหยัดพลังงาน** แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่สามารถคายประจุได้ต่ำกว่าขีดจำกัดที่กำหนด หากแบตเตอรี่อยู่ในสถานะคายประจุอย่างเต็มที่ที่เป็นเวลานานระบบการจัดการแบตเตอรี่ควรตรวจจับสถานการณ์นี้และเปลี่ยนเป็นโหมดประหยัดพลังงาน ในโหมดประหยัดพลังงาน ระบบการจัดการแบตเตอรี่จะเรียกใช้ฟังก์ชันพื้นฐานเท่านั้นเพื่อลดการใช้พลังงานให้เหลือน้อยที่สุดและป้องกันแบตเตอรี่หมด

## 2) ฟังก์ชันการป้องกัน

**การป้องกันโมดูล** หากพารามิเตอร์ของเซลล์ใดเซลล์หนึ่ง (แรงดันไฟฟ้า กระแสอุณหภูมิ) เกินช่วงที่อนุญาต จะมีการเปิดสวิตช์หลักทันทีหรือออกคำสั่งเตือนและอนุญาตให้มีระยะเวลาเกินสั้น ๆ ก่อนที่จะตัดการเชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะต้องมีพลังงานหลักเพื่อส่งกระแสที่สูงกว่าโหลดเล็กน้อยและควรที่จะสามารถทำลายกระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้ 2-3 ครั้ง มิฉะนั้นแบตเตอรี่ควรได้รับการป้องกันเพิ่มเติมด้วยฟิวส์

**การจัดการกระแสที่เกินขีดจำกัด** แบตเตอรี่จะมีระบบการจัดการพลังงานอัจฉริยะที่ช่วยป้องกันแบตเตอรี่จากการใช้กระแสไฟฟ้ามากเกินไปหรือกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเบรกที่มากเกินไป เมื่อ SoC สูงเกิน การรักษา SoC ให้อยู่ในช่วงที่กำหนด (เช่น ร้อยละ 30-80) อาจเพิ่มความสามารถในการเก็บพลังงานและอายุการใช้งาน ระบบการจัดการพลังงานจะต้องได้รับการปรับให้เข้ากับแอปพลิเคชันที่ระบบการจัดการแบตเตอรี่ใช้อยู่

## 3) ฟังก์ชันเสริม

**การเตรียมพร้อมก่อนการอัดประจุ (Precharge function)** จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันนี้หากเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับระบบที่มีความจุขาเข้าสูง (เช่น อินเวอร์เตอร์ของรถยนต์ไฟฟ้า) เป็นผลให้กระแสไหลเข้าสู่อาจไหลเข้าสู่โหลดและทำให้ตัวเก็บประจุขาเข้าหรือรีเลย์กำลังสูงเสียหายได้ เพื่อลดกระแสสูงสุดให้รีเลย์ 2 ตัววางขนานกัน หนึ่งในนั้นคือพรีชาร์จรีเลย์ (precharge relay) ประกอบด้วยตัวต้านทานแบบอนุกรมที่ลดทอนกระแสสูงสุด หลังจากนั้นระยะหนึ่งตัวเก็บประจุขาเข้าจะถูกอัดประจุและสามารถปิดสวิตช์หลักได้โดยไม่ต้องถูกบังคับโดยกระแสสูง

**การควบคุมความเย็น** แบตเตอรี่ที่ใช้พลังงานสูงมักจะได้รับความร้อนจำนวนมากที่กระจายอยู่ภายในเซลล์ เพื่อให้แน่ใจว่าอุณหภูมิของเซลล์อยู่ในสถานะที่ทำงานได้ แบตเตอรี่อาจติดตั้งระบบความเย็นที่ใช้พลังงานได้ภายใต้การควบคุมของระบบการจัดการแบตเตอรี่

## 4) ฟังก์ชันวินิจฉัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยบริษัท เทคโนโลยีการขนส่งทางราง จำกัด เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### การหาค่า SoC

SoC แสดงสัดส่วนของการอัดประจุที่มีอยู่ในแบตเตอรี่เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ที่อัดประจุเต็มแล้ว (ร้อยละ 100) ฟังก์ชันนี้เปรียบได้กับมาตรวัดน้ำมันเชื้อเพลิงในรถยนต์

### การหาค่า SoH

SoH แสดงสภาพจริงของแบตเตอรี่เทียบกับแบตเตอรี่ใหม่ (ร้อยละ 100) SoH สามารถคำนวณได้โดยการทดสอบความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งานและเปรียบเทียบกับค่าที่เก็บไว้ในหน่วยความจำ

#### 5) ฟังก์ชันการสื่อสาร

##### ฟังก์ชันการสื่อสารกับเจ้าของ

ระบบการจัดการแบตเตอรี่ช่วยให้มั่นใจได้ว่าการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ของเจ้าของหรืออุปกรณ์ภายนอก เป็นไปอย่างถูกต้อง

##### ฟังก์ชันบันทึก

การตรวจสอบและจัดเก็บประวัติของแบตเตอรี่เป็นอีกหนึ่งฟังก์ชันที่ของระบบการจัดการแบตเตอรี่สามารถบันทึกพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น จำนวนรอบ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดหรือต่ำสุด อุณหภูมิ และกระแสการอัดประจุและการคายประจุสูงสุด

## 2.4 อันตรายและการระงับเหตุเพลิงไหม้จากการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

### 2.4.1 สาเหตุของการล้มเหลวในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [12]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีคุณภาพปลอดภัยหากใช้ตามวัตถุประสงค์ อย่างไรก็ตามมีรายงานความร้อนและเพลิงไหม้จำนวนมากในผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภคที่ใช้แบตเตอรี่ที่ไม่ผ่านการรับรอง สิ่งนี้อาจแก้ไขได้ด้วยการใช้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ได้รับการรับรองในรุ่นส่วนใหญ่ในปัจจุบัน

การใช้แบตเตอรี่อย่างไม่ถูกต้อง เช่น การสั้นสะเทือนมากเกินไป ความร้อนสูงและการอัดประจุลิเทียมไอออนที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและตะกั่วกรดไม่สามารถคายประจุออกจนหมดได้และต้องเก็บประจุที่เหลืออยู่ ในขณะที่แบตเตอรี่ที่ใช้นิกเกิลสามารถเก็บไว้ในสถานะที่คายประจุจนหมดโดยไม่มีผลข้างเคียงที่ชัดเจน แต่ลิเทียมไอออนจะต้องไม่ลงต่ำกว่า 2 V/เซลล์ เศษทองแดงที่ก่อตัวขึ้นภายในเซลล์ซึ่งสามารถนำไปสู่การคายประจุด้วยตัวเองสูงขึ้นหรือไฟฟ้าบางส่วนลัดวงจร หากอัดประจุใหม่เซลล์อาจไม่เสถียร ทำให้เกิดความร้อนสูงเกินไปหรือแสดงความผิดปกติอื่น

ความร้อนกับการอัดประจุเต็มจะทำให้เกิดความเค้นกับลิเทียมไอออนมากกว่าการใช้งานในรอบปกติ ควรเก็บแบตเตอรี่และอุปกรณ์ให้ห่างจากแสงแดดและเก็บในที่เย็นโดยการอัดประจุเพียงบางส่วน การอัดกระแสเกินกว่าที่แนะนำโดยการอัดประจุแบบเอาตราฟาส (ultra-fast) ยังเป็นอันตรายต่อลิเทียมไอออน นิกเกิลแคดเมียมเป็นสารเคมีชนิดเดียวที่ยอมรับการอัดประจุแบบเอาตราฟาสโดยมีความเค้นน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์ของเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความเค้นอาจทำงานได้ตามปกติ แต่มีความไวต่อการใช้งานในทางที่ผิดมากขึ้น ความรับผิดชอบสำหรับแบตเตอรี่ที่ล้มเหลวจะตกเป็นของผู้ผลิตแม้ว่าความผิดปกติอาจเกิดจากการใช้งานและการจัดการที่ไม่เหมาะสม สิ่งนี้สร้างความกังวลให้กับผู้ผลิตแบตเตอรี่และพวกเขาพยายามที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของตนปลอดภัย และป้องกันไม่ให้เกิดความเค้นมากเกินไป

แบตเตอรี่ในอุตสาหกรรม เช่น แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับเครื่องมือไฟฟ้าโดยทั่วไปมีความทนทานมากกว่าในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภค นอกจากนี้โครงสร้างที่มั่นคงแล้วแบตเตอรี่ของเครื่องมือไฟฟ้ายังได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการจ่ายพลังงานและใช้พลังงานน้อยลงสำหรับการใช้งานที่ยาวนาน เซลล์ด้านกำลัง มีระดับ Ah ต่ำกว่า เซลล์ด้านพลังงาน และโดยทั่วไปแล้วจะมีความทนทานและปลอดภัยกว่า

แบตเตอรี่ชนิดหนึ่งที่เกิดอุบัติเหตุได้ง่ายที่สุดคือลิเทียมไอออนในเซลล์ชนิด 18650 ที่มีชื่อแบรนด์ที่ไม่คุ้นเคย ลิเทียมไอออนมีความปลอดภัยหากผลิตโดยผู้ผลิตที่มีชื่อเสียง นอกจากนี้ยังมีข้อกังวลด้านความปลอดภัยสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตามสถิติแสดงให้เห็นว่ารถยนต์ไฟฟ้าเกิดเพลิงไหม้ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ต่อหนึ่งพันล้านกิโลเมตรที่ขับเคลื่อน จากข้อมูลของ National Fire Protection Association (NFPA) รถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วย ICE กว่า 400,000 คันถูกไฟไหม้ในช่วงปี 1980 จำนวน 90 ครั้งต่อหนึ่งพันล้านด้วยรถ ICE ถือเป็นเรื่องปกติ รายงานกล่าวว่ารถยนต์ของบริษัท Tesla มีไฟไหม้เพียงสองครั้งต่อหนึ่งพันล้านกิโลเมตร



รูปที่ 2.28 ตราของ National Fire Protection Association ( NFPA ) [12]

#### 2.4.2 สิ่งที่ต้องปฏิบัติเมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนร้อนเกินหรือเกิดไฟลุกไหม้ [12]

หากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนร้อนเกินไป ให้รีบเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ออกจากวัสดุที่ติดไฟได้

ทันทีและวางไว้บนพื้นผิวที่ไม่ติดไฟ หากเป็นไปได้ให้ถอดแบตเตอรี่ออกและวางไว้กลางแจ้ง การถอดแบตเตอรี่ออกจากการอัดประจุเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถหยุดการเกิดเพลิงไหม้ได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ไฟที่เกิดจากลิเทียมไอออน ขนาดเล็กสามารถจัดการได้เหมือนกับไฟอื่น ๆ ที่ติดไฟได้ เพื่อผลลัพธ์ที่ดีที่สุดให้ใช้เครื่องดับเพลิงโฟม CO<sub>2</sub> สารเคมีแห้ง ABC แกรไฟต์ผงทองแดงหรือโซดา (โซเดียมคาร์บอเนต) หากเกิดเพลิงไหม้ในห้องโดยสารเครื่องบิน FAA จะสั่งให้พนักงานต้อนรับบนเครื่องบินใช้น้ำหรือโซดาป้อน ผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่หาได้ง่ายที่สุดและมีความเหมาะสมเนื่องจากลิเทียมไอออน มีโลหะลิเทียมที่ทำปฏิกิริยากับน้ำน้อยมาก น้ำยังทำให้บริเวณใกล้เคียงเย็นลงและป้องกันไม่ให้ไฟลุกลาม ห้องปฏิบัติการวิจัยและโรงงานต่าง ๆ ยังใช้น้ำในการดับไฟที่เกิดจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้

เพื่อความปลอดภัยในกรณีไฟไหม้เครื่องบินต้องพึ่งพาระบบดับเพลิง Halon เป็นสารดับเพลิงทั่วไป แต่สารนี้อาจไม่เพียงพอที่จะดับไฟลิเทียมไอออน ในช่องบรรทุกสินค้า อย่างไรก็ตามระบบป้องกันไม่ให้เปลวไฟลุกลามไปยังวัสดุไวไฟที่อยู่ติดกันเช่น กระดาษแข็งหรือเสื้อผ้า

ด้วยการใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เพิ่มขึ้นจึงมีการพัฒนาวิธีการที่ดีขึ้นในการดับไฟที่เกิดจากลิเทียมไอออน สารดับเพลิง Aqueous Vermiculite Dispersion (AVD) จะกระจายเวอร์มิคูไลต์ที่ผ่านกระบวนการทางเคมีออกมาในรูปของหมอกที่ให้ออกซิเจนได้เปรียบเหนือผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ เครื่องดับเพลิง AVD มีอยู่ในกระป๋องสเปรย์ขนาด 400 มิลลิลิตร สำหรับไฟขนาดเล็ก กระจก AVD สำหรับโกดังและโรงงาน ระบบรถเข็นใช้ AVD ขนาด 50 ลิตรสำหรับไฟขนาดใหญ่และระบบโมดูลาร์ที่สามารถบรรทุกบนรถกระบะได้

ไฟลิเทียมไอออนขนาดใหญ่ เช่น ในรถยนต์ไฟฟ้าที่เกิดการไหม้ สามารถใช้น้ำที่มีวัสดุทองแดงได้ แต่อาจไม่มีจำหน่ายและมีราคาแพงสำหรับห้องดับเพลิง ผู้เชี่ยวชาญแนะนำให้ใช้น้ำมากขึ้นแม้จะมีไฟลิเทียมไอออนมากก็ตาม น้ำช่วยลดอุณหภูมิการเผาไหม้ แต่ไม่แนะนำให้ใช้กับไฟแบตเตอรี่ที่มีลิเทียมเมทัล



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดมาจากไฟลิเทียมไอออนในโน้ตบุ๊ก [12]

เมื่อเกิดเพลิงไหม้ด้วยแบตเตอรี่ลิเทียมเมทัลให้ใช้เครื่องดับเพลิงคลาสดี(Class D) เท่านั้น ลิเทียมโลหะมีลิเทียมจำนวนมากที่ทำปฏิกิริยากับน้ำ เมื่อจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจึงต้องมีการคำนวณว่ากรณีใดในการดับไฟดังกล่าว มิให้ต้องเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 2.4.3 คำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง [12]

ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) เป็นก๊าซหรือสารเหลวไม่มีสี เป็นแหล่งสำคัญของฟลูออรีนซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับแก๊สซัลฟิวไรด์และช่วยอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ เป็นก๊าซที่มีอันตรายสูงสร้างกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและแทรกซึมด้วยความชื้น ในปริมาณมากก๊าซอาจทำให้ตาบอดได้โดยการทำลายกระจกตา

ฟอสโพรัสฟลูออไรด์ ( $\text{POF}_3$ ) เป็นก๊าซไม่มีสี ที่ไฮโดรไลซ์อย่างรวดเร็ว

ลิเทียมเฮกซาฟลูออโรฟอสเฟต ( $\text{LiPF}_6$ ) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ในรูปของผงผลึกสีขาวที่ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

### 2.4.4 คำแนะนำเบื้องต้นในการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [12]

1) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่จะหมดอายุการใช้งานหรือใช้งานไม่ได้จะเริ่มมีการแสดงการรบกวนของขั้วแบตเตอรี่และอิเล็กโทรไลต์รั่ว

2) อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยเกลือลิเทียมในตัวทำละลายอินทรีย์ ลิเทียมเฮกซาฟลูออโรฟอสเฟต (lithium hexafluorophosphate) เป็นสารที่ไวไฟสูง อิเล็กโทรไลต์ที่เผาไหม้สามารถทำให้วัสดุติดไฟได้

3) ลิเทียมไอออนติดไฟได้ในน้ำ ประเภทของเครื่องดับเพลิงให้ใช้เฉพาะเครื่องดับเพลิง Class D สำหรับใช้ดับเพลิงไหม้โลหะลิเทียมเนื่องจากปฏิกิริยาของน้ำกับลิเทียม แตกต่างจากการลุกไหม้อื่น ๆ

4) หากไม่มีเครื่องดับเพลิงคลาสดีให้ใช้น้ำผสมลิเทียมเมทัลดับเพลิงเพื่อป้องกันไม่ให้ไฟลุกลาม และ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการดับไฟ ลิเทียมไอออน ให้ใช้เครื่องดับเพลิงโฟม  $\text{CO}_2$  สารเคมีแห้ง ABC แกรไฟต์ผง ผงทองแดงหรือโซดา (โซเดียมคาร์บอเนต) ในการดับไฟ

5) หากไม่สามารถดับไฟของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ลุกไหม้ได้ให้ปล่อยให้ไหม้ด้วยวิธีการควบคุมและปลอดภัย อย่าให้ไฟลุกลามไปที่อื่น และหากสามารถเคลื่อนย้ายได้ให้ย้ายออกไปข้างนอกหรือที่โล่ง

### 2.4.5 สารดับเพลิงคลาสดี [13]

สารดับเพลิงไหม้ประเภท D ใช้กับเพลิงไหม้ที่เป็นโลหะ หรือไฟไหม้ที่เกิดจากโลหะที่ติดไฟได้ ได้แก่ แมกนีเซียม ไททาเนียม ยูเรเนียม โปแตสเซียม โซเดียม แคลเซียม ลิเทียม ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.30 สารดับเพลิงใหม่ประเภท D และตัวอย่างการไหม้ของลิเทียม [13]

ไฟประเภท D และ C มีความคล้ายกันแต่ไฟประเภท D มีความร้อนแรง และแสงสว่างจ้ากว่า ที่สำคัญยังทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศ ความชื้น และสารเคมีอื่น ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน การดับไฟประเภท D นั้นที่ถูกต้องและได้ผลคือต้องใช้เครื่องดับเพลิงประเภทผงแห้งสำหรับดับไฟไหม้โลหะโดยเฉพาะ ชนิดตัวผงแห้งทำหน้าที่ดูดซับความร้อน พร้อมทั้งกำจัดเปลวไฟ จึงทำให้ไฟดับลงได้

ตัวอย่างเครื่องดับเพลิงสำหรับดับไฟคลาสดี



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างการฉีดผงแห้งดับไฟในคลาสดี [13]

เมตแอลเอ็กซ์พาวเดอร์ (MET-L-X POWDER) หรือโซเดียมคลอไรด์ ใช้ดับการลุกไหม้ของโลหะติดไฟ ที่อยู่ในที่ลึก ยากที่จะเข้าถึงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.32 เมดแอลเอ็กพาวเดอร์ [14]

วิธีการใช้งาน ดึงสลักแล้วจับสายฉีดให้แน่น หันหัวฉีดออกจากตัว จากนั้นดึงสลักที่อยู่ ปีบออก ยกถึงดับเพลิง เมื่อเล็งหัวฉีดไปยังเป้าหมายแล้วให้บีบคันปล่อยสาร โดยทำซ้ำ ๆ แต่มั่นคง ความยาวสายฉีดรวม 6 ฟุต พยายามให้หัวฉีดอยู่ในตำแหน่งที่สามารถฉีดออกมาได้ ตั้งตัวถังขึ้นตรงเพื่อประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี และฉีดต่อเนื่องประมาณ 28 วินาที หากใช้ขนาด 30 ปอนด์ จุดอ่อนของเครื่องนี้คือมีน้ำหนักมากถึง 30 ปอนด์ เมื่อรวมกับผงแห้งแล้วจะอยู่ที่ 53 ปอนด์

อเมเล็กคลาสตีคอปเปอร์พาวเดอร์ (Amerex Class D Copper Powder) ถึงดับเพลิงคลาสตี ขนาด 30 ปอนด์ เหมาะสำหรับใช้ดับโลหะขนาดใหญ่ (Navy) 125s ถูกพัฒนามาสำหรับ ดับไฟไหม้ ลิเทียม ผงทองแดงสามารถทำให้ไหม้ดับลงได้



รูปที่ 2.33 อเมเล็กคลาสตีคอปเปอร์พาวเดอร์ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

วิธีการใช้งาน ฉีดเป็นแนวตั้ง ทั้งนี้เครื่องดับเพลิงคลาสดี รุ่นนี้มีส่วน ขยายเป็นหัวฉีดแรงดันต่ำให้การฉีดที่นิ่มนวล (Soft Flow) ป้องกันผงโลหะที่เป็นเปลวไฟและแก๊สพิษต่าง ๆ ฟุ้งกระจายขึ้นมาทำอันตรายคนฉีด อีกทั้งการฉีดที่เบาจะทำให้สารดับเพลิงก่อตัวเป็นชั้นเหนียวผิวเชื้อเพลิงได้ง่ายขึ้น

**เอนซ์วลิทเอ็กคลาสตีเอ็กติงเควียร์เซอร์ (Ansul Lith-X Class D Extinguisher)** ถูกคิดและพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ดับไฟไหม้โลหะ และโลหะชนิดอื่น ๆ ทั้งแมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม และสารที่มีส่วนผสมของเซอร์โคเนียม ยูเรเนียม โซเดียม โพแทสเซียม ผลิตภัณฑ์จากสารพื้นฐานที่เป็นแกรไฟต์ (คาร์บอน) ชนิดพิเศษพร้อมส่วนผสม เพื่อให้สารเคลื่อนไหวอิสระและไม่แข็งตัวเหมือนสารโซเดียมคลอไรด์ แต่มีคุณสมบัติดูดซับและไล่ความร้อนที่ติดเทียมกัน ขนาด 45 ปอนด์ (22.2 กก.) เพียงพอสำหรับดับไฟไหม้โลหะขนาดใหญ่ได้ แต่จะต้องมีผู้ดูแลงานเพียงพอ เพราะถังมีขนาดใหญ่และหนักมากไม่สามารถปฏิบัติงานได้ด้วยตัวคนเดียว



รูปที่ 2.34 เอนซ์วลิทเอ็กคลาสตีเอ็กติงเควียร์เซอร์ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 3

### ออกแบบการทดสอบ

#### 3.1 การเลือกแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เลือกในการทดสอบ เป็นแบตเตอรี่ขนาด 18650 ที่มีราคาไม่แพงมาก สามารถหาซื้อได้ในประเทศ และสามารถนำมาทำการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่ 1C ได้ จากเงื่อนไขดังกล่าวแบตเตอรี่ที่เลือก คือ LG18650MH1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของ LG18650MH1

Item	Condition / Note	Specification
2.1 Energy ( Power )	Std. charge / discharge	Nominal 3200 mAh Minimum 3100 mAh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.67V
2.3 Standard Charge (Refer to 4.1.1)	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.5C (1550mA) 4.2V 50mA
2.4 Max. Charge Voltage		4.2 ± 0.05V
2.5 Max. Charge Current		1.0 C (3100mA)
2.6 Standard Discharge (Refer to 4.1.2)	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (620mA) 2.5V
2.7 Max. Discharge Current		10A
2.8 Weight	Approx.	Max. 49.0 g
2.9 Operating Temperature	Charge Discharge	0 ~ 45 °C -20 ~ 60 °C
2.10 Storage Temperature (for shipping state)	1 month 3 month 1 year	-20 ~ 60 °C -20 ~ 45 °C -20 ~ 20 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างแบตเตอรี่ LG18650MH1

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ และการใช้งาน

อุปกรณ์และเครื่องมือ	การใช้งาน
 <p>DP811 programmable DC power supply</p>	<p>DP811 เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงที่สามารถควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ได้ ใช้สำหรับการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคกระแสคงที่และเทคนิคความต่างศักย์คงที่</p>
	<p>DL3021 เป็นภาระทางไฟฟ้ากระแสตรงแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ได้ ใช้สำหรับควบคุมการคายประจุของแบตเตอรี่สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสาร DL3021 Programmable DC Electronic Load นั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

 <p style="text-align: center;">แท่นวางแบตเตอรี่</p>	<p>แท่นวางแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับแบตเตอรี่ 18650</p>
 <p style="text-align: center;">TM-305U</p>	<p>TM-305U เป็นเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศแบบดิจิทัล ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของอากาศขณะทดสอบ</p>
 <p style="text-align: center;">อุปกรณ์ดับเพลิง class D</p>	<p>อุปกรณ์ดับเพลิง class D สำหรับใช้ระงับเหตุเพลิงไหม้ที่เกิดจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ที่ทำการทดสอบ</p>

### 3.3 ขั้นตอนและวิธีการทดสอบ

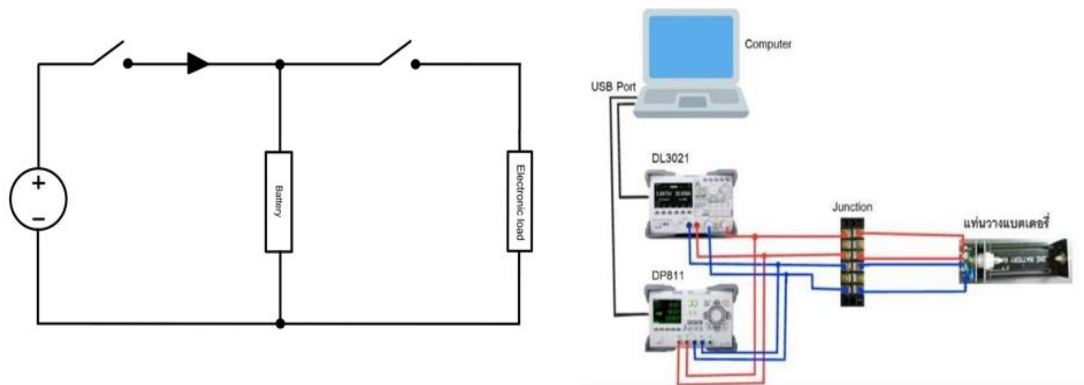
#### 3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และห้องทดสอบ

ก่อนเริ่มการทดสอบต้องปรับอุณหภูมิห้องทดสอบให้อยู่ในช่วง 23-25 องศาเซลเซียส และตรวจสอบความชื้นของห้องทดสอบต้องอยู่ที่ 45-85% ตามเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐานที่ระบุไว้ในข้อกำหนดแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จากนั้นทำการเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับทดสอบ โดยต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ แสดงเป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดจงจำได้ ดังรูปที่ 3.2 มิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.2 การต่อวงจรสำหรับทดสอบ

### 3.3.2 การอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยเทคนิค CC-CV

การอัดประจุด้วยเทคนิค CC-CV เป็นเทคนิคการอัดประจุที่ระบุไว้ในเอกสารข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ การเลือกใช้เทคนิคดังกล่าวเพื่อให้มั่นใจว่าแบตเตอรี่จะทำการอัดประจุเต็มได้หากทดสอบตามเงื่อนไขในข้อมูลจำเพาะ

เครื่องมือที่ใช้สำหรับอัดประจุ คือ เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง DP811 สามารถตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสสำหรับการอัดประจุได้ที่เครื่อง เมื่อเริ่มอัดประจุค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นถึงค่าที่ตั้งค่าไว้และจะเริ่มอัดประจุด้วยเทคนิคกระแสคงที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันไฟฟ้าที่ตั้งค่าไว้ จากนั้นเครื่อง DP811 จะเปลี่ยนเป็นการอัดประจุแบบเทคนิคแรงดันไฟฟ้าคงที่โดยอัตโนมัติ และอัดประจุต่อไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่ากระแสลดลงถึงค่าตัดออกตามที่ระบุไว้ในข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ และเครื่อง DP811 จะหยุดอัดกระแสอัตโนมัติตามค่าที่กำหนดไว้ การตั้งค่าเครื่อง DP811 สำหรับแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิดแสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการตั้งค่าในการอัดประจุของ LG18650MH1

แบตเตอรี่ที่ใช้อัดประจุ	LG18650MH1
กระแสที่ตั้งค่า (A)	1.55 (0.5C)
แรงดันไฟฟ้าเต็มที่ตั้งค่า (V)	4.2 ± 0.05
ค่ากระแส cut-off (A)	0.05
ระยะเวลาอัดประจุตามข้อมูลจำเพาะ (ชั่วโมง)	2.5
เงื่อนไขสำหรับ Auto Stop Mode	Volt > 4.2 V and Current < 0.05 A

### 3.3.3 การพักแบตเตอรี่ระหว่างการทดสอบ

การพักแบตเตอรี่ระหว่างการทดสอบอัดหรือคายประจุแต่ละครั้งเพื่อปรับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้คงที่ ไม่ให้ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากข้อมูลจำเพาะสามารถกำหนดเวลาในการพักหลังการอัดและคายประจุ คือ 30 - 60 นาที

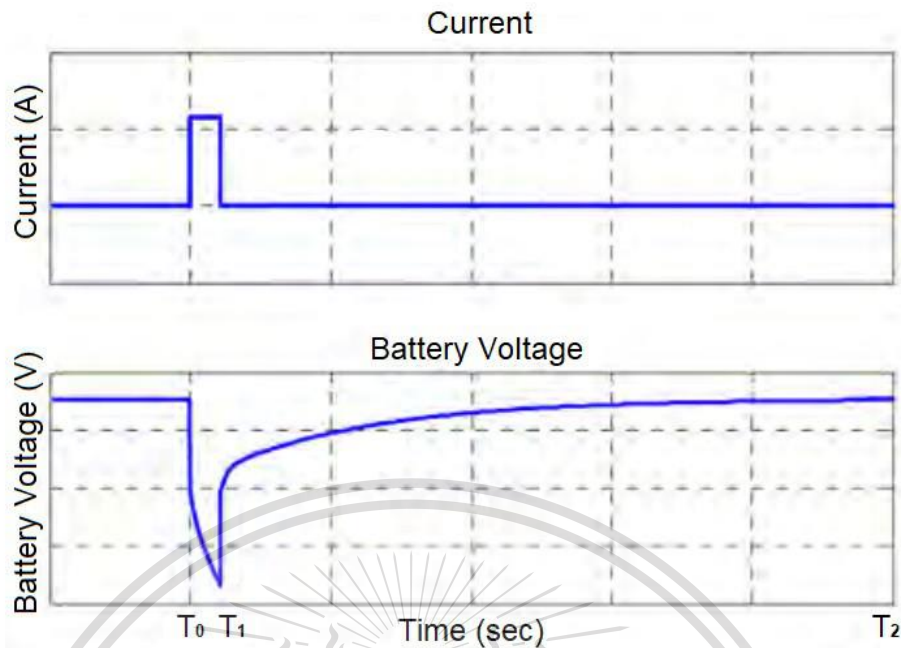
### 3.3.4 การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์

การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ จะแสดงลักษณะการตอบสนองแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (พล็อตของเซลล์) ที่ SoC และ C-rated ค่าต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ตัวอย่างดังรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่และค่า SoC เมื่อทำการทดสอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่ 1C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ และกระแสพัลส์ [17]

การกำหนดค่าการทดสอบการคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ โดยใช้เครื่อง DL3021 เชื่อมต่อและควบคุมผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้การเขียนโค้ด กำหนดเวลาในการคายประจุและช่วงพักในแต่ละรอบ

การทดสอบการคายประจุแบบพัลส์ จะตั้งค่าให้มีการคายประจุลดร้อยละ 10 ของค่า SoC เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูล สามารถคำนวณเวลาในการคายประจุและช่วงพักในแต่ละรอบได้ ดังนี้

1. คำนวณความจุในหน่วย Asec ที่ 1C เท่ากับ กระแส 1C ที่คำนวณได้จากการทดสอบความจุ คูณด้วย 3600 วินาที
2. นำค่าความจุในหน่วย Asec แบ่งออกเป็น 10 ช่วง จะได้ เท่ากับ  $\frac{A \cdot \text{sec}}{10}$  (คิดเป็นร้อยละ 10 ของค่า SoC)
3. นำค่าความจุ Asec ที่ถูกแบ่ง มาคำนวณเวลาในการคายประจุและช่วงพัก ได้จาก

$$\text{เวลาในการคายประจุ} = \frac{\text{ความจุ Asec ที่ถูกแบ่ง}}{\text{กระแสที่ใช้ในการทดสอบคายประจุ}} \quad (3.1)$$

$$\text{เวลาในช่วงพัก} = \text{เวลาในการคายประจุ} \times 4 \quad (3.2)$$

เวลาในการคายประจุและช่วงพักในแต่ละรอบ ในการทดสอบคายประจุ 1C ของแบตเตอรี่ เพื่อให้ค่า SoC ลดลงร้อยละ 10 ต่อรอบการคายประจุสามารถคำนวณเวลาคายประจุได้ 360 วินาที

ไม่ว่ากรณีใดและเวลาพักในแต่ละรอบได้ 1,440 วินาที และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การตั้งค่าการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่เครื่อง DL3021 ของแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดการตั้งค่าในการทดสอบคายประจุกระแสคงที่แบบพัลส์ของแบตเตอรี่

กระแสที่ใช้คายประจุที่ 1C (A)	(ข้อมูลจากการทดสอบความจุ)
เวลาในการคายประจุ (sec)	360
เวลาช่วงพักในแต่ละรอบ (sec)	1,440
เวลาในที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด (ชั่วโมง)	5 ชั่วโมง
จำนวนรอบในการคายประจุ	10 รอบ

### 3.3.5 การทดสอบความจุของแบตเตอรี่

การทดสอบความจุของแบตเตอรี่ เพื่อตรวจสอบค่าความจุที่กระแสดสอบ 1C ตามข้อมูลจำเพาะ จากนั้นนำมาคำนวณกระแสทดสอบที่ใช้จริง และคำนวณระยะเวลาการคายประจุและช่วงพักในแต่ละรอบสำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่ 1C โดยที่ค่า SoC ลดลงร้อยละ 10

วิธีการในการทดสอบความจุของแบตเตอรี่ จะใช้เครื่อง DL3021 ในโหมด App จะมีฟังก์ชัน Battery test สำหรับการทดสอบความจุโดยการคายประจุด้วยกระแสคงที่ ดังรูปที่ 3.4 การตั้งค่าเครื่องสำหรับทดสอบจะใช้ค่ากระแสสำหรับคายประจุที่ 1C ตามข้อมูลจำเพาะ และใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าตัดออก (cut-off) ของแบตเตอรี่ สามารถกำหนดค่าได้ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 การตั้งค่าการทดสอบความจุของแบตเตอรี่ LG18650MH1

กระแสดสอบที่ 1C ตามข้อมูลเฉพาะ	3.1 Ah
ค่าแรงดันไฟฟ้าตัดออก ( $V_{\text{cut-off}}$ )	2.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชัน Battery test ใน DL3021

### 3.3.6 การทดสอบพลวัตของแรงดันแบตเตอรี่

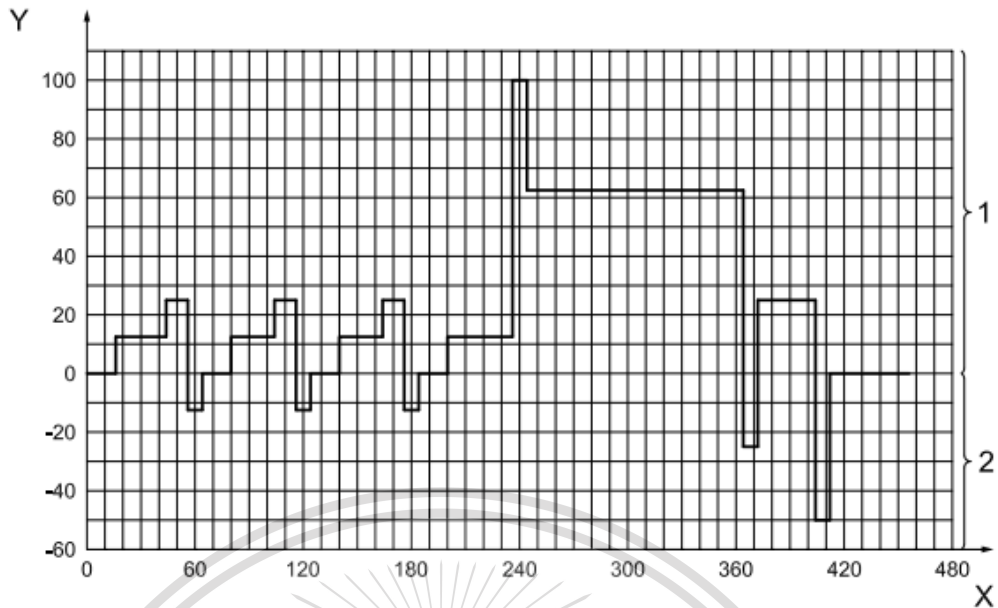
การทดสอบพลวัตของแบตเตอรี่เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาการใช้งานแบตเตอรี่ที่เงื่อนไขการอัดและคายประจุที่ค่ากระแสและเวลาต่าง ๆ รูปแบบพลวัตที่เป็นตัวอย่างการใช้งานแบตเตอรี่ที่ศึกษา มี 3 แบบ คือ

1. การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง (Constant Current Discharge Test) เป็นการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องตั้งแต่ร้อยละ 100 ของ SoC ที่แรงดันไฟฟ้า cut off 2.5 V เพื่อศึกษาการทำงานของแบตเตอรี่ในสภาวะที่ต้องดึงกระแสอย่างต่อเนื่อง
2. การทดสอบพลวัตแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ว่าด้วยเรื่องรถที่ใช้บนถนนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า - ข้อกำหนดการทดสอบสำหรับชุดแบตเตอรี่และระบบชุดลากลิเทียมไอออน ส่วนที่ 2 การใช้งานด้านพลังงานสูง โดยมีรูปแบบกระแสสำหรับการทดสอบ ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 กระแสพลวัตตามมาตรฐาน ตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 [18]

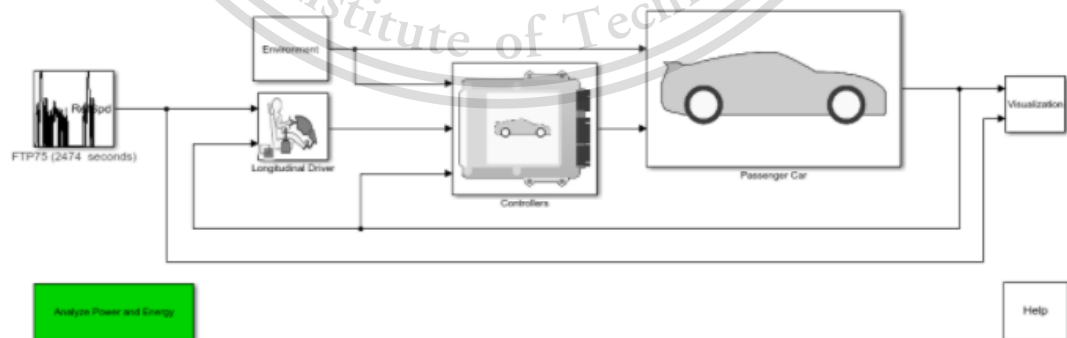
1: การคายประจุ

2: การอัดประจุ

X: เวลา (s)

Y: อัตราร้อยละของกำลังสูงสุด (%)

3. ระบบจำลองการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นการจำลองการทดสอบการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าด้วย MATLAB SIMULINK ในโครงการนี้อาศัยรูปแบบกระแสอัดและคายประจุที่ได้จากการทดสอบการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน WLTP Class 3 มาปรับให้เหมาะสมกับแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบ เพื่อใช้ในการทดสอบกระแสพลวัตที่เงื่อนไขการทำงานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

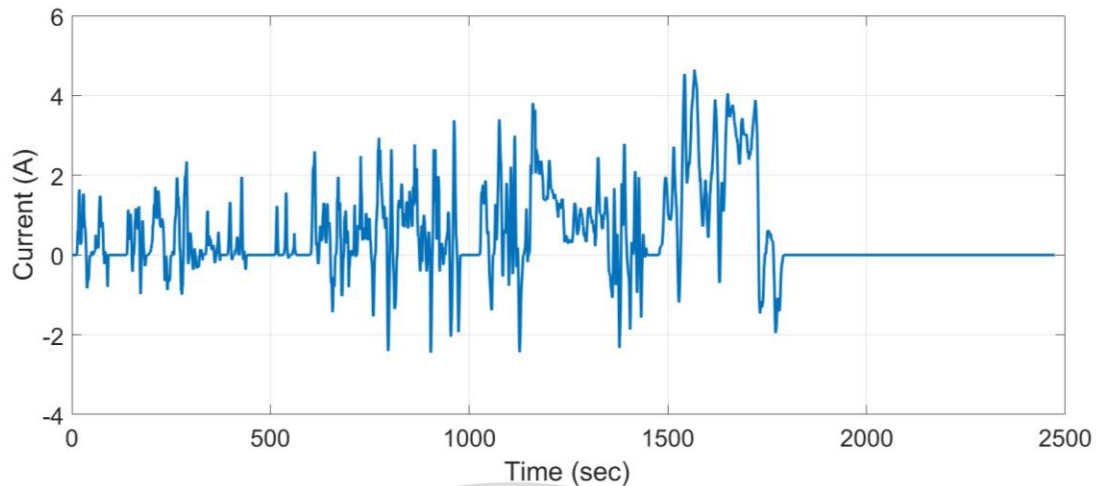


รูปที่ 3.6 EV Reference Applications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

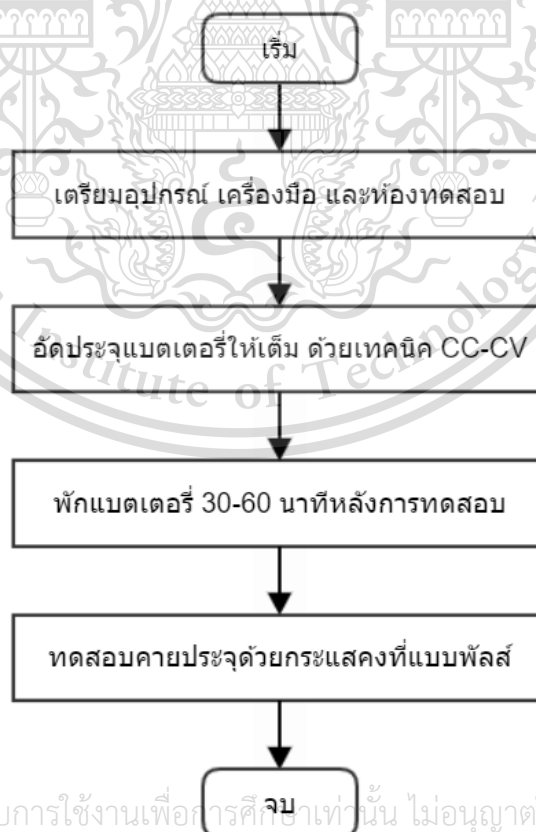


รูปที่ 3.7 กระแสจากการจำลองการทดสอบการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน WLTP Class 3

### 3.3.7 ขั้นตอนการทดสอบพลวัต

การดำเนินการทดสอบสามารถสรุปลำดับขั้นตอนเป็นผังงานได้ดังนี้

1. การทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์

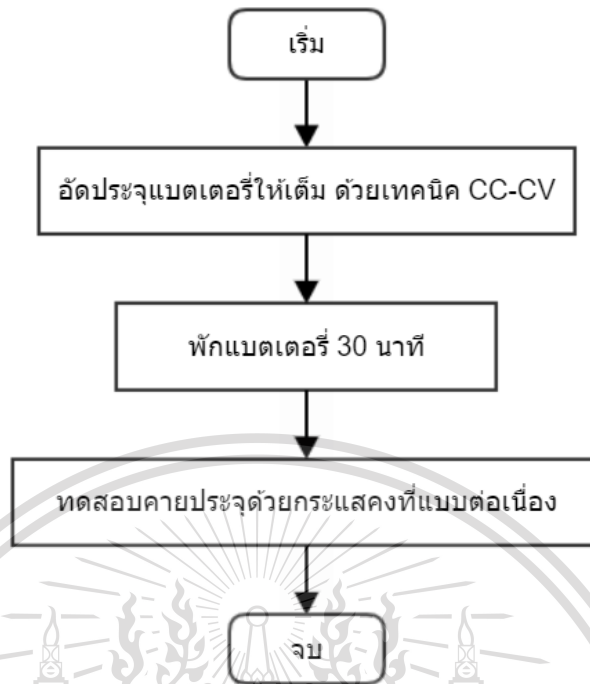


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

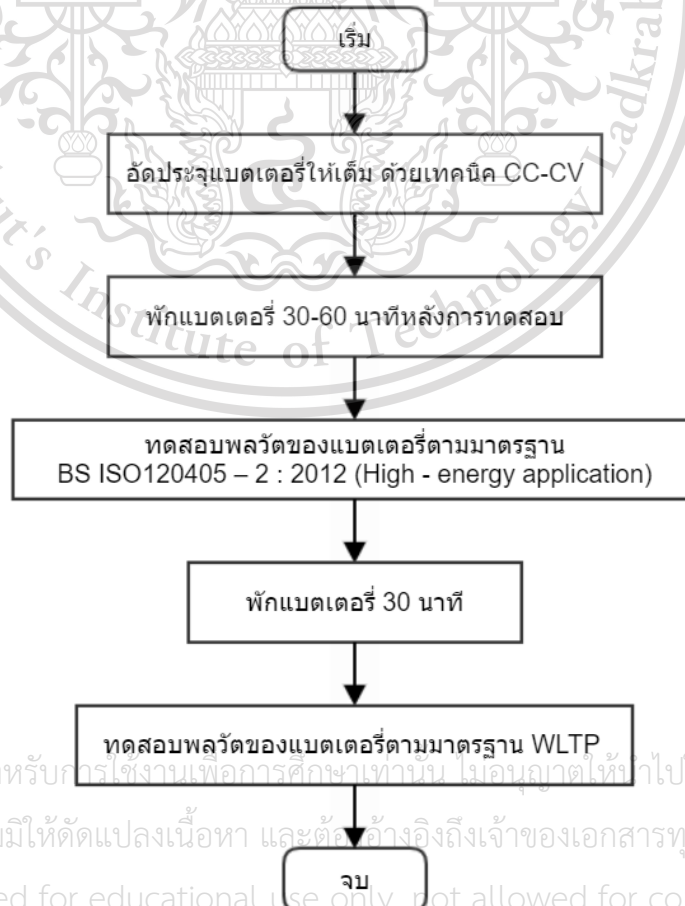
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การทดสอบพลวัตด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง



3. การทดสอบพลวัตของแบตเตอรี่ตามมาตรฐาน BS ISO120405 – 2 : 2012 (High - energy application) และมาตรฐาน WLTP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

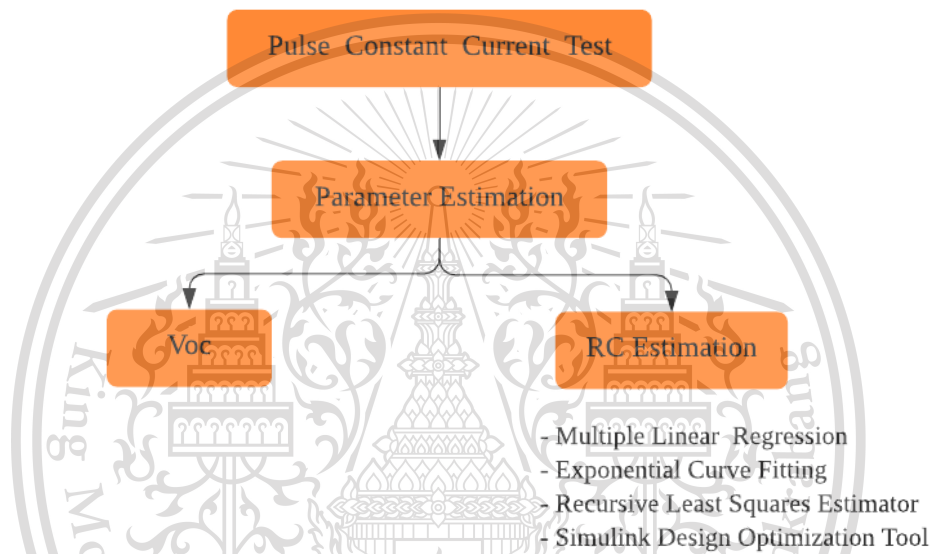
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าเตือนและข้อควรระวังในการทดสอบ ควรสังเกตเครื่องมือทดสอบที่ทำงานอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากอันตรายของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทุกเมื่อขณะทดสอบ และควรมีอุปกรณ์สำหรับความปลอดภัย เช่น อุปกรณ์ดับเพลิงคลาส D เตรียมไว้อยู่เสมอ

หากพบความผิดปกติจากการทดสอบ เช่น กลิ่น คว้น หรืออื่น ๆ ที่ไม่ปลอดภัย ให้รีบแจ้งอาจารย์ที่ปรึกษาหรือผู้ดูแลห้องและยุติการทดสอบทันทีแล้วตัดระบบไฟฟ้าออกเพื่อตรวจสอบความปลอดภัย

### 3.3.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล

ลำดับขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน สามารถดูได้ดังรูปที่ 3.8



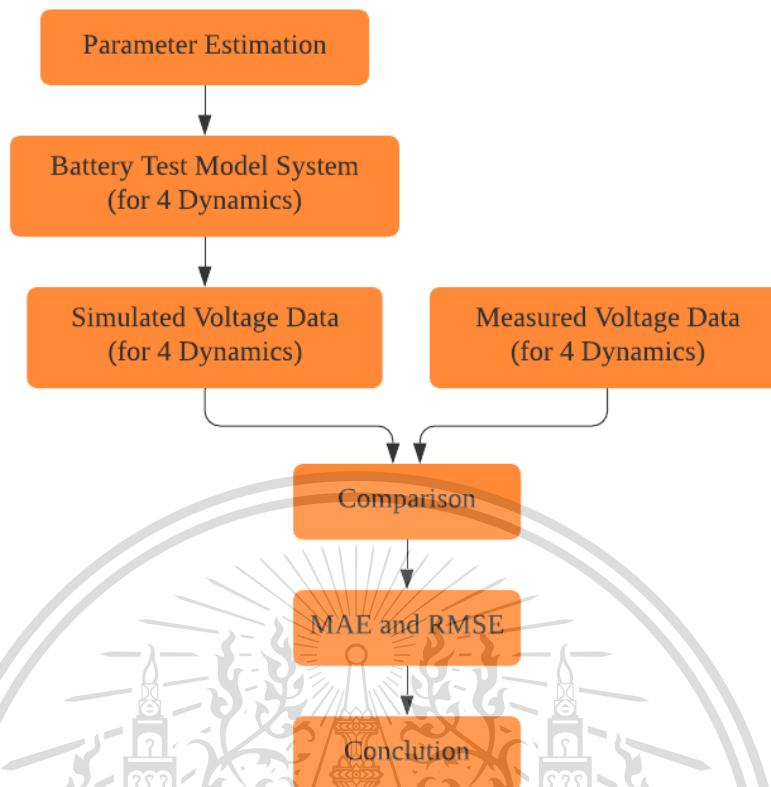
รูปที่ 3.8 ลำดับขั้นตอนการหาค่าประมาณพารามิเตอร์

นำข้อมูลจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เพื่อหาการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแรงไฟฟ้าที่ชั่วขณะเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และการประมาณค่าพารามิเตอร์ RC ซึ่งได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 วิธี คือ วิธี Multiple linear regression วิธี Exponential curve fitting วิธี Recursive least squares estimator และวิธี Simulink design optimization tool จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ใช้กับระบบจำลองการทดสอบแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

นำค่าพารามิเตอร์มาทดสอบในระบบทดสอบแบตเตอรี่กับพลวัตอื่น ๆ เพื่อจำลองการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ และนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ที่ได้จากการวัดจริง เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น และสรุปผลถึงความแม่นยำของแต่ละวิธี

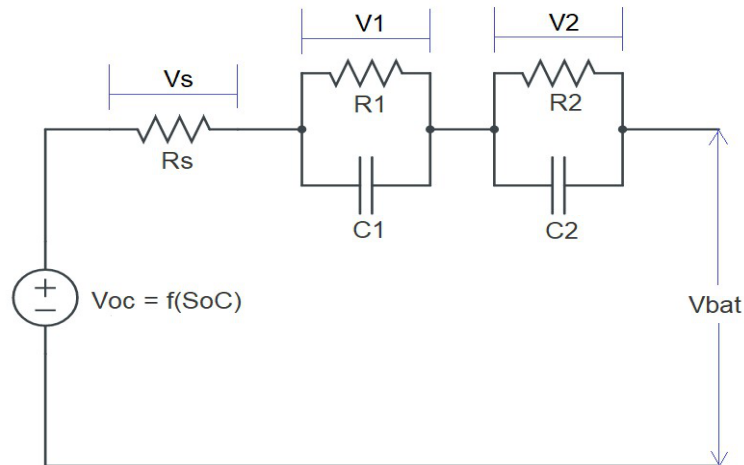
### 3.4 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมและคุณลักษณะทางพลวัตของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับการทดสอบ คือ แบบจำลองคู่อโพลาร์ไรเซชัน หรือแบบจำลอง RC ลำดับสอง เหตุผลที่เลือกใช้งานวงจรสมมูลดังกล่าว เพราะสามารถปรับแต่งคุณลักษณะที่อธิบายถึงการโพลาร์ไรซ์ได้ดี และมีการจำลองโพลาร์ไรซ์ความเข้มข้นและโพลาร์ไรซ์ไฟฟ้าเคมีแยกกัน ซึ่งทำให้วงจรสมมูลมีความแม่นยำมากขึ้น และเนื่องจากวงจรสมมูลดังกล่าวมีการใช้งานกันโดยทั่วไปและความซับซ้อนของการคำนวณไม่ยุ่งยากมากเกินไปที่จะสามารถศึกษาได้ในระดับปริญญาตรี จึงเลือกใช้งานวงจรสมมูลดังกล่าวในโครงการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.10 แบบจำลองดูลโพลาร์ไรเซชัน (แบบจำลอง RC ลำดับสอง)

จากวงจรสมมูลนี้แบบจำลองดูลโพลาร์ไรเซชันที่อิงตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$V_{bat} = V_{oc} - V_1 - V_2 - R_s \cdot I_{bat} \quad (3.1)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} V_1 + \frac{1}{C_1} \cdot I_{bat} \quad (3.2)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{R_2 \cdot C_2} V_2 + \frac{1}{C_2} \cdot I_{bat} \quad (3.3)$$

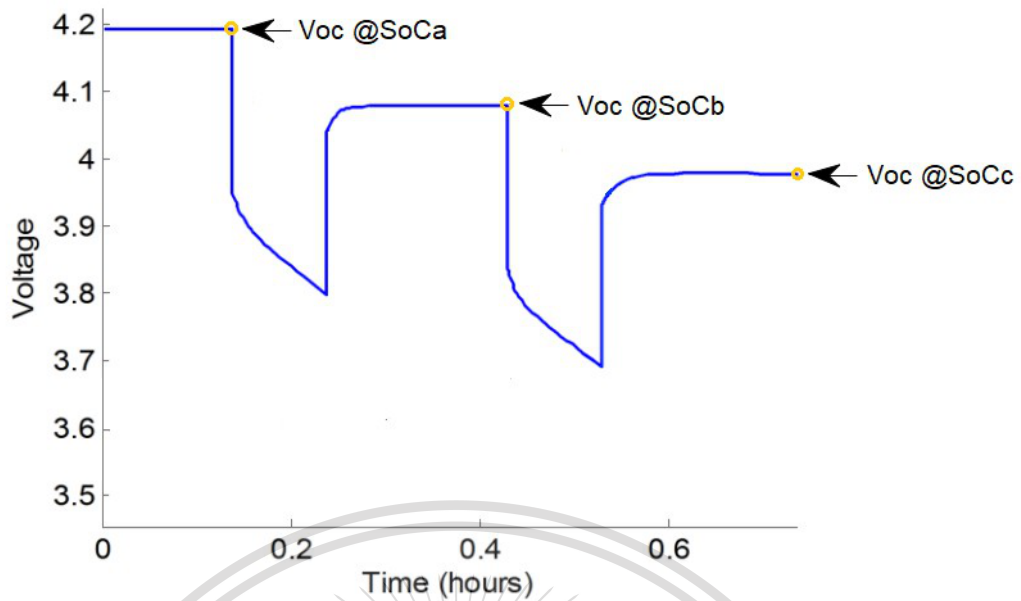
#### 3.4.1 การประมาณค่า $V_{oc}$

การประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรสามารถประมาณได้จากค่าแรงดันสุดท้ายในแต่ละช่วงพัก (Relaxation) ของการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ แสดงดังรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) ณ ตำแหน่ง SoC ต่าง ๆ

### 3.4.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

Multiple Linear Regression คือ การวิเคราะห์การถดถอย เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ประมาณการ (Predictor, X) และตัวตอบสนอง (Response, Y) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

$$B = AP + \epsilon \quad (3.4)$$

จากวงจรสมมูลเราสามารถเขียนสมการ KVL ได้ดังนี้

$$V_{bat} = V_{oc} - V_s - V_1 - V_2 \quad (3.5)$$

$$V_s = iR_s \quad (3.6)$$

$$C_1 \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_1}{R_1} = i \quad (3.7)$$

$$C_2 \frac{dV_2}{dt} + \frac{V_2}{R_2} = i \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ค่าคงที่ของเวลาของระบบมี 2 ค่า คือ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (3.9)$$

$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (3.10)$$

### 3.4.2.1 การหาค่าพารามิเตอร์ $R_s$

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างกะทันหัน เกิดขึ้นเนื่องจากการปล่อยประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นผลของ  $R_s$  ดังนั้นจึงสามารถหาได้

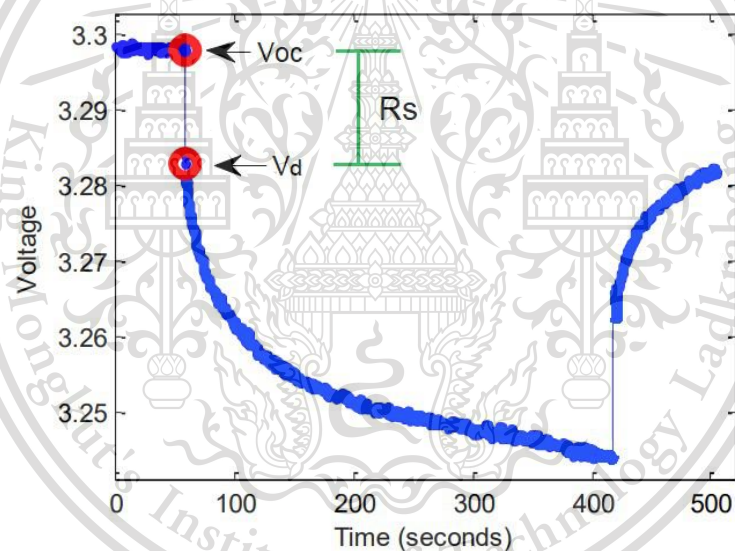
จากรูปที่ 3.10 ใช้กฎของโอห์มในการหาพารามิเตอร์  $R_s$  ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_d}{I_{bat}} \quad (3.11)$$

$V_d$  คือ แรงดันไฟฟ้าตกที่เกิดจากการคายประจุ

$V_{oc}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนเริ่มคายประจุในแต่ละรอบ

$I_{bat}$  คือ กระแสที่คายประจุ



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างผลการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น [4]

### 3.4.2.2 การหาค่า $\tau_1$ และ $\tau_2$

ในช่วงเวลาการพัก (Relaxation) แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากผลของ  $R_1$ ,  $C_1$  และ  $R_2$ ,  $C_2$  และสามารถหาค่าคงที่ของเวลา (Time Constants) ได้จาก

$$V_{10} = V_1(T_1) \quad (3.12)$$

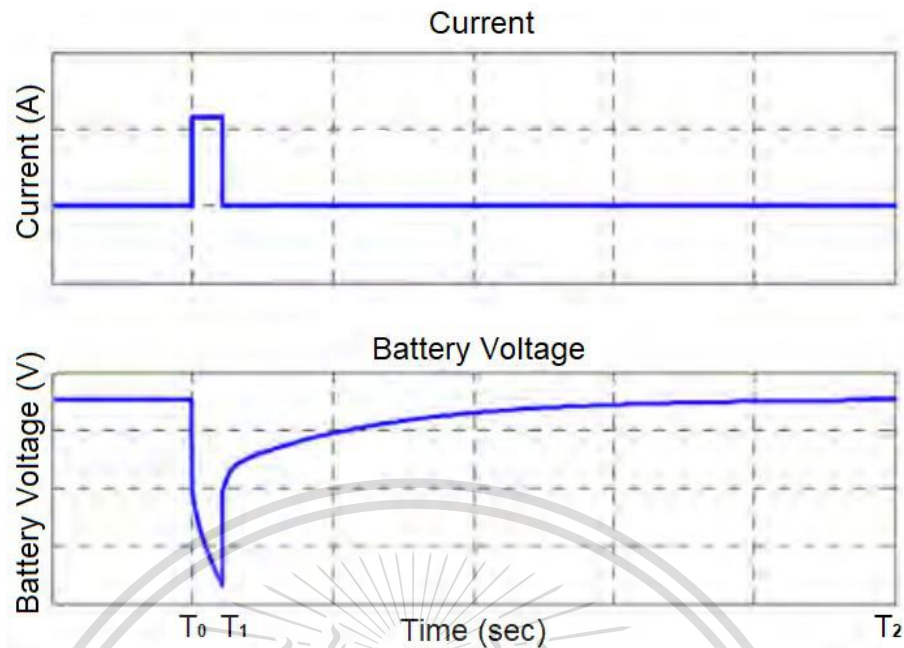
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$V_{20} = V_2(T_2) \quad (3.13)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ และกระแสพัลส์ [17]

และจากสมการที่ 3.7 และ 3.8 จะได้ว่า

$$V_1(t - T_1) = V_{10} e^{-\frac{t-T_1}{\tau_1}} \quad (3.14)$$

$$V_2(t - T_1) = V_{20} e^{-\frac{t-T_2}{\tau_2}} \quad (3.15)$$

เมื่อ  $i = 0$  และนำไปแทนค่าในสมการที่ 3.5 และ 3.6 จะได้

$$V_t(t - T_1) = V_{oc} - V_1(t - T_1) - V_2(t - T_1) \quad (3.16)$$

กำหนดให้

$$U = V_1 + V_2 \quad (3.17)$$

จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั่นเอง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$U(t - T_1) = V_{10} e^{-\frac{t-T_1}{\tau_1}} + V_{20} e^{-\frac{t-T_2}{\tau_2}} \quad (3.18)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และจากสมการที่ 3.16 เขียนใหม่ได้ว่า

$$U(t - T_1) = V_{oc} - V_t(t - T_1) \quad (3.19)$$

เนื่องจาก  $V_{oc}$  และ  $V_t(t - T_1)$  เป็นค่าที่วัดได้จากการทดสอบดังนั้น  $U(t - T_1)$  จึงทราบค่าด้วย

สำหรับสมการถดถอยที่ระบุค่าพารามิเตอร์สองตัวแปรต่อไปนี สามารถคำนวณได้ ดังต่อไปนี้

$$X(t - T_1) = \int U(\tau - T_1) d\tau \quad (3.20)$$

$$Y(t - T_1) = \int x(\tau - T_1) d\tau \quad (3.21)$$

จากสมการที่ 3.16 และ 3.18 จะได้

$$X(t - T_1) = (V_{10}\tau_1 + V_{20}\tau_2) - (V_{10}\tau_1 e^{\frac{t-T_1}{\tau_1}} + V_{20}\tau_2 e^{\frac{t-T_2}{\tau_2}}) \quad (3.22)$$

และจากสมการที่ 3.21 และ 3.22 จะได้

$$Y(t - T_1) = (V_{10}\tau_1 + V_{20}\tau_2)(t - T_1) - (V_{10}\tau_1^2 + V_{20}\tau_2^2) + (V_{10}\tau_1^2 e^{\frac{t-T_1}{\tau_1}} + V_{20}\tau_2^2 e^{\frac{t-T_2}{\tau_2}}) \quad (3.23)$$

ดังนั้น จึงได้สมการถดถอยดังนี้

$$Y(t - T_1) = -X(t - T_1)(\tau_1 + \tau_2) - U(t - T_1)\tau_1\tau_2 + (V_{10}\tau_1 + V_{20}\tau_2)(t - T_1) + (V_{10} + V_{20})\tau_1\tau_2 \quad (3.24)$$

ตัวแปร  $X$ ,  $U$  และ  $Y$  นั้น สามารถหาได้จากการวัดและคำนวณตามข้างต้น ซึ่งสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$Y(t - T_1) = [-X(t - T_1) \quad -U(t - T_1) \quad (t - T_1) \quad 1] \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1\tau_2 \\ V_{10}\tau_1 + V_{20}\tau_2 \\ (V_{10} + V_{20})\tau_1\tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น [ห้ามมิให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า]

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
จากสมการที่ 22 จะได้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_1 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ -X_2 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ -X_3 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_n & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1 \tau_2 \\ V_{10} \tau_1 + V_{20} \tau_2 \\ (V_{10} + V_{20}) \tau_1 \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

กำหนดให้

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -X_1 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ -X_2 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ -X_3 & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -X_n & -U_1 & t_1 - T_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_2 \\ \tau_1 \tau_2 \\ V_{10} \tau_1 + V_{20} \tau_2 \\ (V_{10} + V_{20}) \tau_1 \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ดังนั้นสมการที่ 3.26 เขียนได้ใหม่ว่า

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{P} \quad (3.30)$$

และสามารถหา Least Squared Error จาก

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (3.31)$$

เมื่อทราบค่า  $\mathbf{P}$  จะสามารถคำนวณหาค่า  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , และ  $V_{10}$ ,  $V_{20}$  จากสมการที่ 3.29

3.4.2.3 หาคำนวณหาค่า  $R_1$ ,  $C_1$  และ  $R_2$ ,  $C_2$

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของแรงดันแบตเตอรี่ในช่วงการคายประจุ จากสมการที่ 3.7 และ 3.8

สำหรับ  $t \in [T_0, T_1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_1(t) = V_{10} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3.32)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$V_2(t) = V_{20}e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.33)$$

ดังนั้น ที่  $t = T_1$

$$V_1(T_1) = V_{10}e^{-\frac{T_1}{\tau_1}} \quad (3.34)$$

$$V_2(T_1) = V_{20}e^{-\frac{T_1}{\tau_2}} \quad (3.35)$$

ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของช่วงพัก (Relaxation) นั่นคือ

$$V_{10} = IR_1(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau_1}}) \quad (3.36)$$

$$V_{20} = IR_2(1 - e^{-\frac{T_1}{\tau_2}}) \quad (3.37)$$

เมื่อทราบค่า  $V_{10}$  และ  $V_{20}$  จะสามารถคำนวณ  $R_1$  และ  $R_2$  ได้จากสมการที่ 3.36 และ 3.37 และสามารถคำนวณ  $C_1$  และ  $C_2$  จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 ต่อไป

สรุปขั้นตอน Multiple Linear Regression

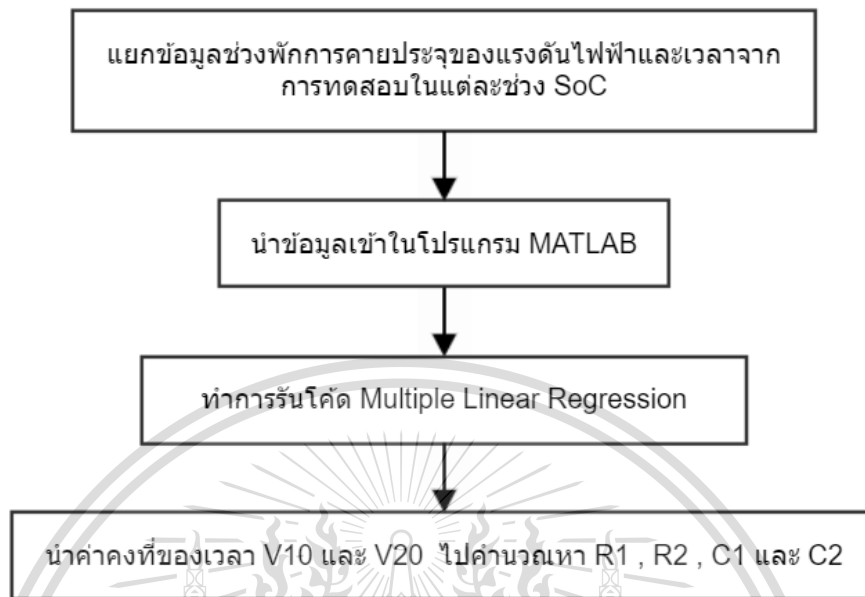
1. เขียนโค้ดการประมาณค่าและคำนวณค่าต่าง ๆ ด้วยสมการ Multiple Linear Regression ในโปรแกรม MATLAB
2. บันทึกค่าพารามิเตอร์และแยกข้อมูลของแรงดันและเวลาของแต่ละช่วง SoC
3. หาค่า  $R_s$  ช่วงที่แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด เนื่องจากการคายประจุของแบตเตอรี่จากสมการที่ 3.11
4. ทำการหาค่าตัวแปร  $\tau_1, \tau_2, V_{10}, V_{20}$
5. นำตัวแปร  $\tau_1, \tau_2, V_{10}, V_{20}$  มาหาค่า  $R_1, R_2, C_1, C_2$
6. นำค่า  $R_s, R_1, R_2, C_1, C_2$  ของ SoC 0-90 เพื่อนำไปคำนวณในระบบแบตเตอรี่สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ต่อไป [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4.2.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Multiple Linear Regression



### 3.4.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting

Exponential curve fitting เป็นการหาค่าเหมาะสมโดยใช้สมการ Exponential กับเส้นโค้งเพื่อหาค่าเหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

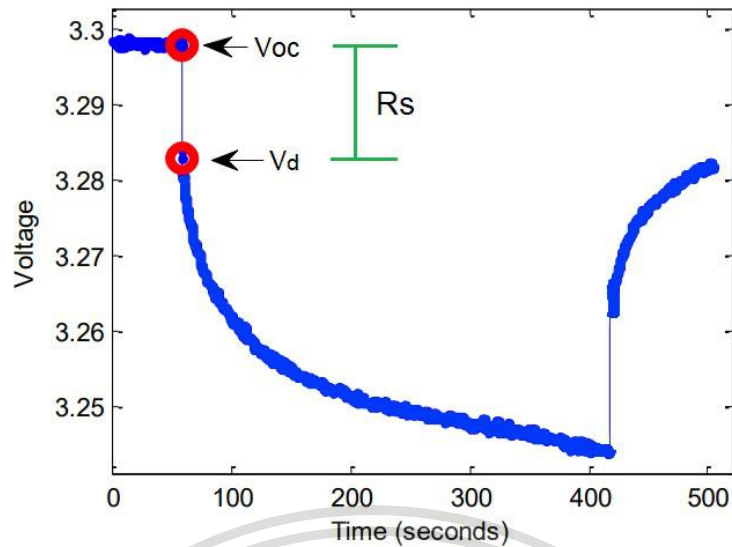
#### 3.4.3.1 การกำหนดจุดสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

การประมาณค่าพารามิเตอร์ขั้นตอนแรก คือ การกำหนดจุดสำหรับประมาณค่าของช่วงการคายประจุและช่วงพักในแต่ละรอบ โดยในข้อมูลการทดสอบจะสังเกตจากช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสที่วัดได้ ในช่วงที่มีการคายประจุกระแสจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในช่วงที่มีพักการคายประจุกระแสจะมีค่า 0 A การประมาณค่าตัวแปรแต่ละค่าในแต่ละช่วงมีความหมายและความสัมพันธ์กับกราฟแตกต่างกัน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.14 การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการทดสอบคายประจุกระแสคงที่แบบพัลส์ [4]

ในหนึ่งรอบของการทดสอบคายประจุ  $V_{oc}$  ประมาณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงก่อนการคายประจุในแต่ละรอบ  $R_s$  ประมาณได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปทันทีที่มีการคายประจุ  $R_1, R_2, C_1, C_2$  สามารถประมาณได้ในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงการพักในแต่ละรอบ

#### 3.4.3.2 การหาพารามิเตอร์ $R_s$

สามารถหาได้จากสมการที่ 3.11 ในลักษณะเดียวกันกับ Regression

#### 3.4.3.3 การหาพารามิเตอร์ $R_1, C_1, R_2, C_2$

การหาพารามิเตอร์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรสมมูล ทำได้โดยใช้เทคนิคฟิตเส้นโค้ง โดยใช้สมการชี้กำลัง (exponential) ที่อ้างอิงมาจากสมการของกฎของเคอร์ชอฟฟ์ในสมการ 3.1 ดังนี้

$$V_{bat} = a - b \cdot e\left(-\frac{t}{c}\right) - d \cdot e\left(-\frac{t}{e}\right) \quad (3.38)$$

การใช้เทคนิคฟิตเส้นโค้งจะเลือกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าในช่วงพักจากการคายประจุในแต่ละรอบ มาใช้ฟิตโดยใช้โปรแกรม MATLAB จากสมการที่ 3.38 จะได้ค่าของ a, b, c, d และ e สามารถนำไปหาพารามิเตอร์ได้ดังนี้

$$a = V_{oc} - R_s \cdot I_{bat} \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \frac{R_1}{I_{bat}} \quad (3.40)$$

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

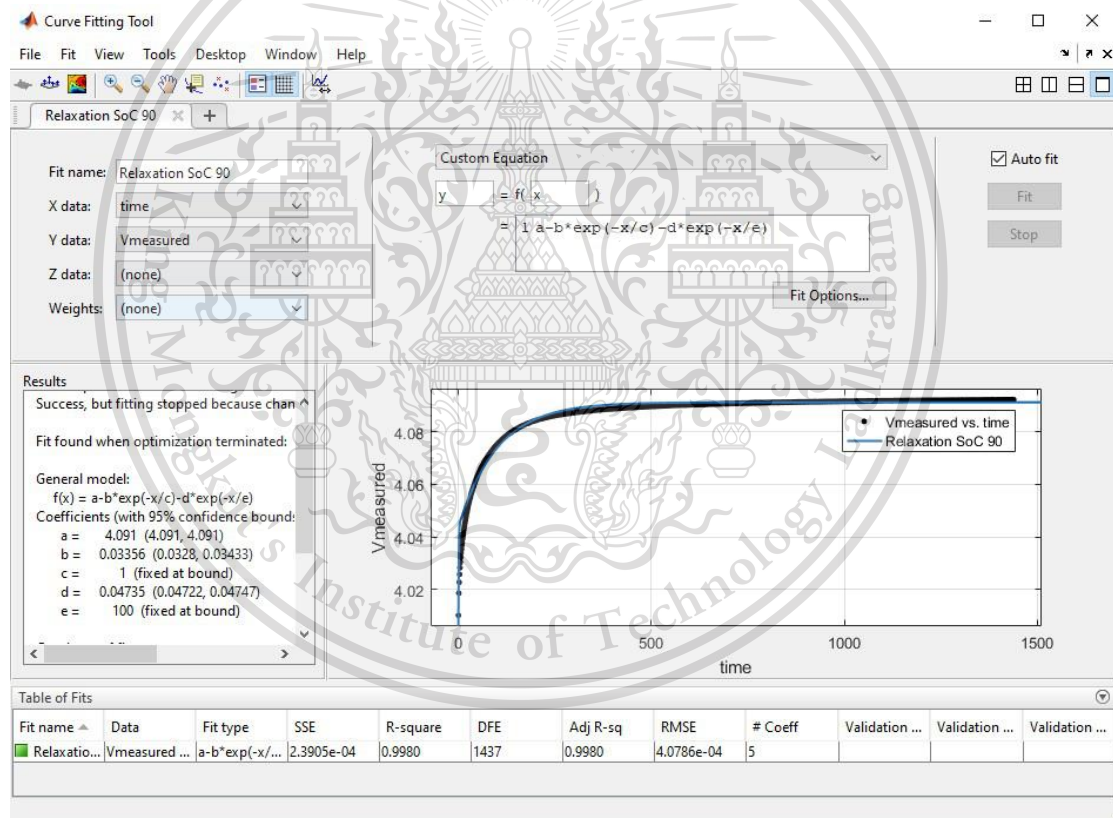
$$d = \frac{R_2}{I_{bat}} \quad (3.41)$$

$$c = R_1 \cdot C_1 \quad (3.42)$$

$$e = R_2 \cdot C_2 \quad (3.43)$$

เหตุผลที่ต้องใช้เทคนิคการฟิตเส้นโค้งแบบเลขชี้กำลังแทนที่จะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ 3.2 และ 3.3 นั้น เพราะในทางไฟฟ้าเคมี เป็นการยากที่จะแยกพจน์ของ RC ออกจากกัน [19]

Curve fitting tool สามารถปรับเส้นโค้งและพื้นผิวให้พอดีกับข้อมูลและสร้างกราฟด้วยฟังก์ชัน Curve Fitting สร้างการเปรียบเทียบของการทำ Fitting สามารถดูค่าเชิงสถิติและความคลาดเคลื่อนได้

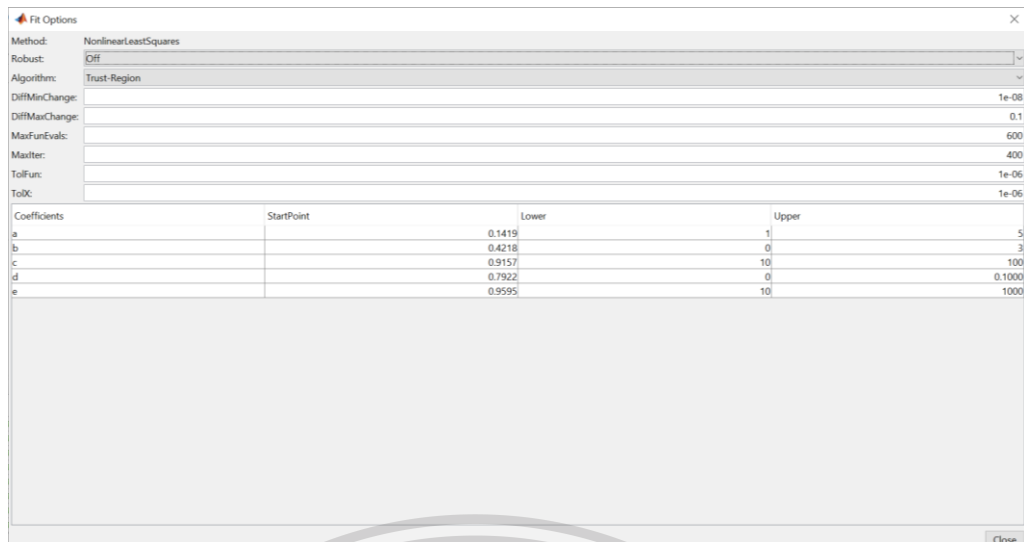


รูปที่ 3.15 การฟิตเส้นโค้งด้วยสมการเลขชี้กำลัง

การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการฟิตเส้นโค้ง จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าขอบบน (Upper) และค่าขอบล่าง (Lower) ที่เหมาะสมจึงจะได้ค่ากราฟที่เหมาะสม โดยเข้าไปที่ Fit Options ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โปรแกรม MATLAB ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าขอบบน และขอบล่าง

สรุปขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลด้วยวิธีการ Exponential Curve Fitting

1. แยกข้อมูลช่วงพักการคายประจุของแรงดันไฟฟ้าและเวลาจากการทดสอบในแต่ละช่วง SoC
2. นำข้อมูลเข้าในฟังก์ชัน Curve Fitting Tool ของโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการที่ 3.38
3. กำหนดค่าขอบบน (Upper) และค่าขอบล่าง (Lower) โดยเข้าไปที่ Fit Options
4. ตรวจสอบค่า R-Square ซึ่งควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และค่า RMSE ควรมีค่าเข้าใกล้ 0
5. นำค่า a, b, c, d, e ไปคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังสมการที่ได้กล่าวมาแล้ว

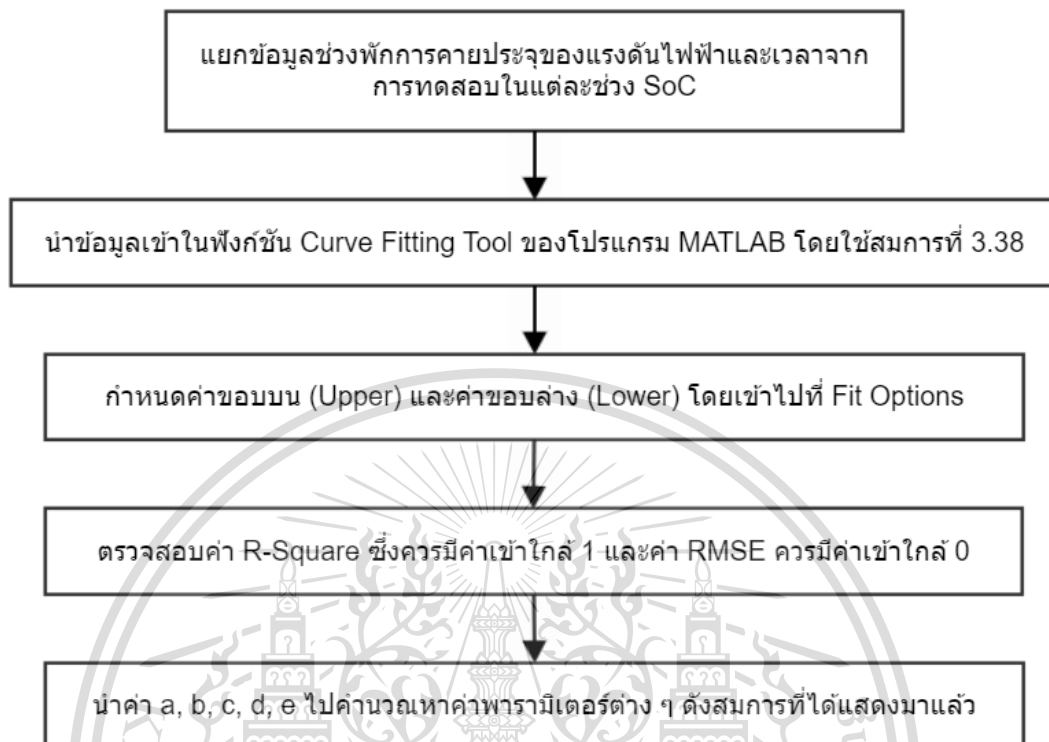
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

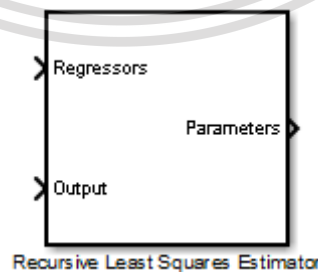
### 3.4.3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Exponential Curve

Fitting



### 3.4.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

recursive least square (RLS) เป็นวิธีการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ มีความเรียบง่ายและเสถียร ในโครงการนี้ศึกษาวิธีการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่โดยใช้ Recursive Least Squares Estimator ในโปรแกรม MATLAB SIMULINK โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.17 Recursive Least Squares Estimator block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า Recursive Least Squares Estimator ใช้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เป็นเชิงไม่ว่ากรณีใดของทั้งสี่ สิ่งทั้งหมดนี้ให้ด้วยเปล่าๆ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

$$y(t)=H(t)\theta(t) \quad (3.44)$$

$y$  และ  $H$  เป็นปริมาณที่ทราบค่าระบุไว้ในกล่องเพื่อประมาณค่า  $\theta$  โดยใช้ recursive least squares algorithm จากวงจรมุมูลของแบตเตอรี่ สามารถสร้างสมการ Recursive และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\theta$  และค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรมุมูลได้ดังนี้

จากสมการ KVL สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของโดเมนความถี่ได้เป็น

$$E=V_{bat}(s) - V_{oc}(s) = -I(s)\left(R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1C_1s} + \frac{R_2}{1 + R_2C_2s}\right) \quad (3.45)$$

จากสมการที่ 3.45 สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$G(s) = \frac{E(s)}{I(s)} = -\frac{R_s s^2 + \frac{R_s R_1 C_1 + R_s R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1 + R_1 R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{R_s + R_1 + R_2}{R_1 C_1 R_2 C_2}}{s^2 + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_1 R_2 C_2} s + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (3.46)$$

แปลง Bilinear  $s = \frac{2}{T} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  และนำมาแทนในสมการที่ 3.46 จะได้สมการที่ 3.47 และ 3.48

$$G(z^{-1}) = \frac{E(k)}{I(k)} = \frac{\theta_3 + \theta_4 z^{-1} + \theta_5 z^{-2}}{1 - \theta_1 z^{-1} - \theta_2 z^{-2}} \quad (3.47)$$

$$\theta_1 = \frac{2T^2 - 8R_1 C_1 R_2 C_2}{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) - 4R_1 C_1 R_2 C_2}$$

$$\theta_2 = \frac{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) + 4R_1 C_1 R_2 C_2}{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) - 4R_1 C_1 R_2 C_2}$$

$$\theta_3 = \frac{T^2(R_s + R_1 + R_2) + 2T(R_s R_1 C_1 + R_s R_2 C_2 + R_1 R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1) + 4R_s R_1 C_1 R_2 C_2}{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) - 4R_1 C_1 R_2 C_2} \quad (3.48)$$

$$\theta_4 = \frac{2T^2(R_s + R_1 + R_2) - 8TR_s R_1 C_1 R_2 C_2}{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) - 4R_1 C_1 R_2 C_2}$$

$$\theta_5 = \frac{T^2(R_s + R_1 + R_2) - 2T(R_s R_1 C_1 + R_s R_2 C_2 + R_1 R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1) + 4R_s R_1 C_1 R_2 C_2}{-T^2 - 2T(R_1 C_1 + R_2 C_2) - 4R_1 C_1 R_2 C_2}$$

และจากสมการที่ 3.47 จัดรูปใหม่ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$E(k) = \theta_1 E(k-1) + \theta_2 E(k-2) + \theta_3 I(k) + \theta_4 I(k-1) + \theta_5 I(k-2) \quad (3.49)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สมมติให้ a, b, c, d, f แทนเป็น

$$\begin{aligned}
 a &= R_s \\
 b &= R_1 C_1 R_2 C_2 \\
 c &= R_1 C_1 + R_2 C_2 \\
 d &= R_s + R_1 + R_2 \\
 f &= R_s R_1 C_1 + R_s R_2 C_2 + R_1 R_2 C_2 + R_2 R_1 C_1
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

นำสมการที่ 3.50 แทนในสมการที่ 3.48 จะได้

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \frac{8b - 2T^2}{4b + 2cT + T^2} \\
 \theta_2 &= \frac{4cT}{4b + 2cT + T^2} - 1 \\
 \theta_3 &= -\frac{4ab + 2fT + 2dT^2}{4b + 2cT + T^2} \\
 \theta_4 &= \frac{8ab - 2dT^2}{4b + 2cT + T^2} \\
 \theta_5 &= -\frac{4ab - 2fT + 2dT^2}{4b + 2cT + T^2}
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

จัดรูปสมการที่ 3.51 ใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{\theta_4 - \theta_3 - \theta_5}{1 + \theta_1 - \theta_2} \\
 b &= \frac{T^2(1 + \theta_1 - \theta_2)}{4(1 - \theta_1 - \theta_2)} \\
 c &= \frac{T(1 + \theta_1)}{1 - \theta_1 - \theta_2} \\
 d &= \frac{-\theta_3 - \theta_4 - \theta_5}{1 - \theta_1 - \theta_2} \\
 f &= \frac{T(\theta_5 - \theta_3)}{1 - \theta_1 - \theta_2}
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เมื่อ T คือเวลาของการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampling Time) ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

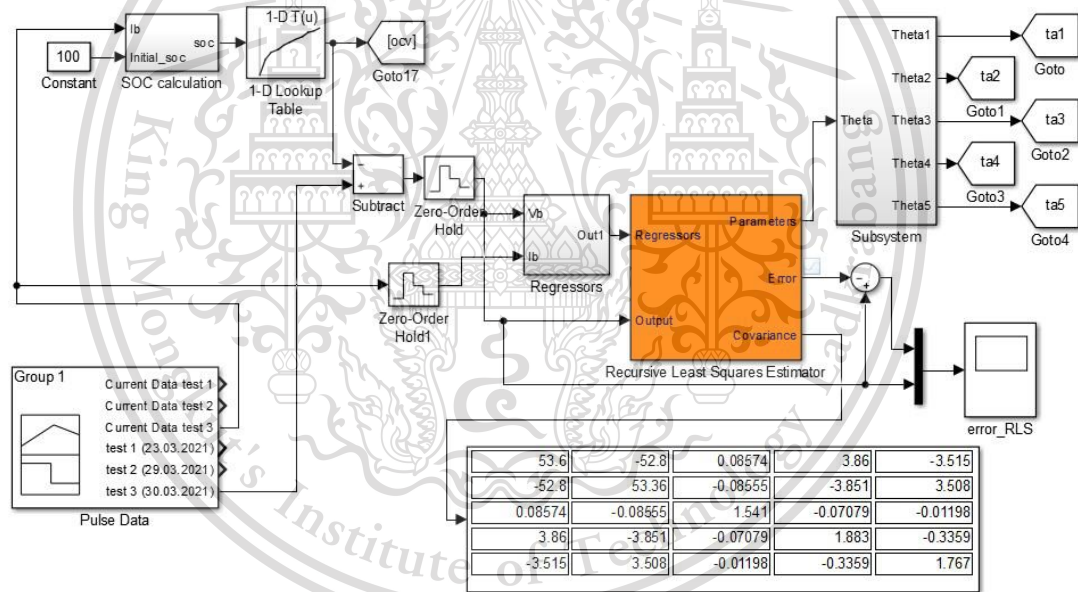
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

และสมมติว่า  $\tau_1 = \frac{c + \sqrt{c^2 - 4b}}{2}$ ,  $\tau_2 = \frac{c - \sqrt{c^2 - 4b}}{2}$  จึงสามารถหาค่าพารามิเตอร์  $R_0, R_1, R_2, C_1$  และ  $C_2$  ได้จาก

$$\begin{aligned}
 R_5 &= a \\
 R_1 &= [\tau_1(d - a) + ac - f] / (\tau_1 - \tau_2) \\
 R_2 &= d - a - R_1 \\
 C_1 &= \tau_1 / R_1 \\
 C_2 &= \tau_2 / R_2
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

การหาค่าพารามิเตอร์ด้วย Recursive Least Squares Estimator จะสร้างระบบขึ้นมาใน MATLAB SIMULINK โดยอาศัยข้อมูลกระแสที่วัดได้จากการทดสอบเป็นสัญญาณขาเข้าและข้อมูลแรงดันไฟฟ้าจากการทดสอบที่วัดได้ ใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการประมาณค่าดังรูป [17]

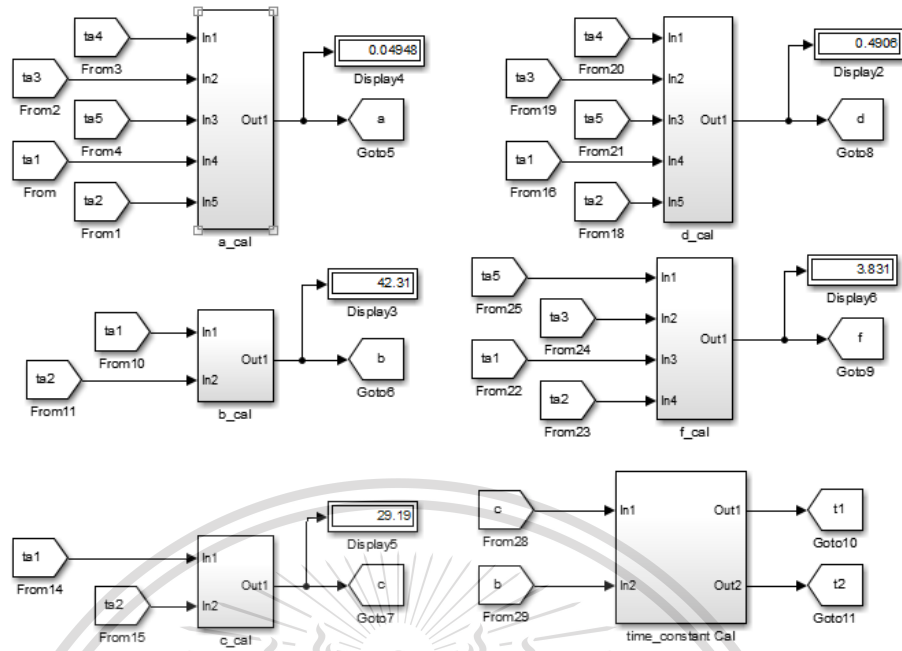


รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการสร้างระบบในการประมาณค่า  $\theta$

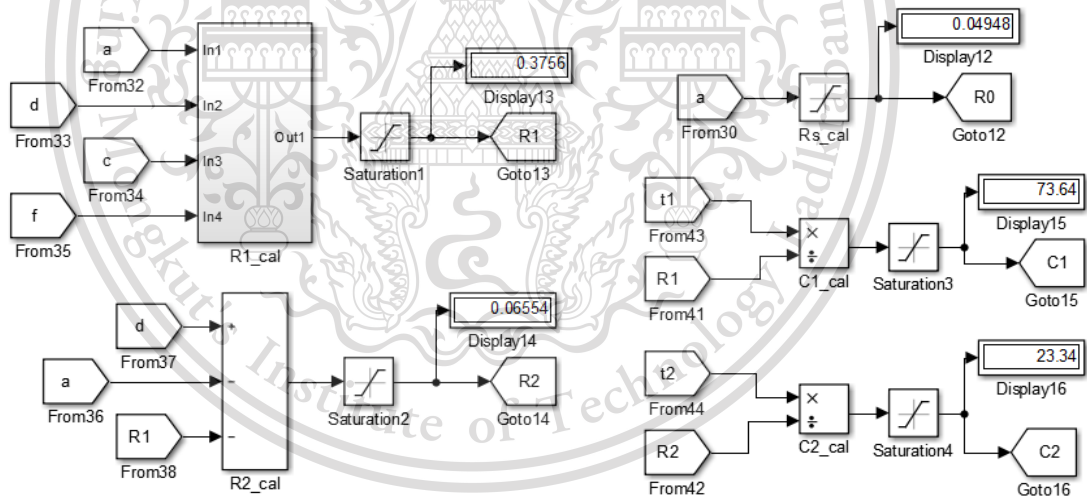
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างการสร้างระบบสำหรับคำนวณค่า a, b, c, d, f และค่า time constants



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างการสร้างระบบสำหรับการคำนวณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูล

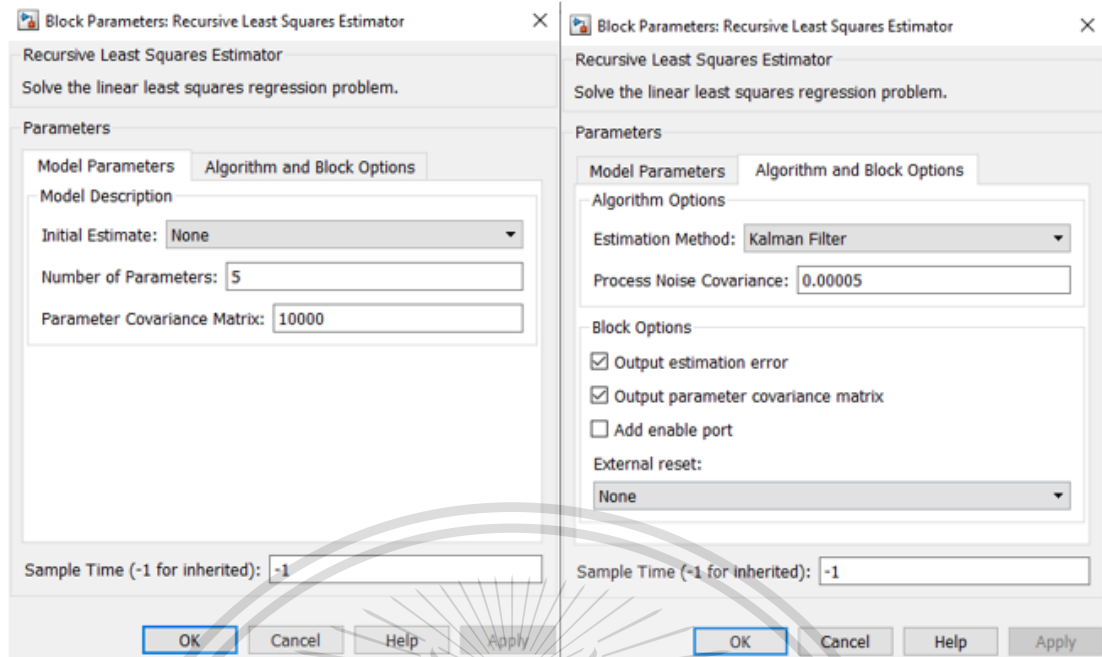
วิธีการที่เลือกใช้สำหรับการประมาณค่า  $\theta$  ใน Recursive Least Squares Estimator block คือ Kalman filter algorithm เป็นอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าสถานะของระบบ โดยทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนและประมาณค่าสถานะของระบบที่ควรจะเป็นได้อย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... การกำหนดค่าต่าง ๆ ใน Recursive Least Squares Estimator block เป็นไปดังรูปที่ 3.21

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการกำหนดค่าใน Recursive Least Squares Estimator block

สรุปขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลด้วยวิธีการ Recursive Least Squares Estimator

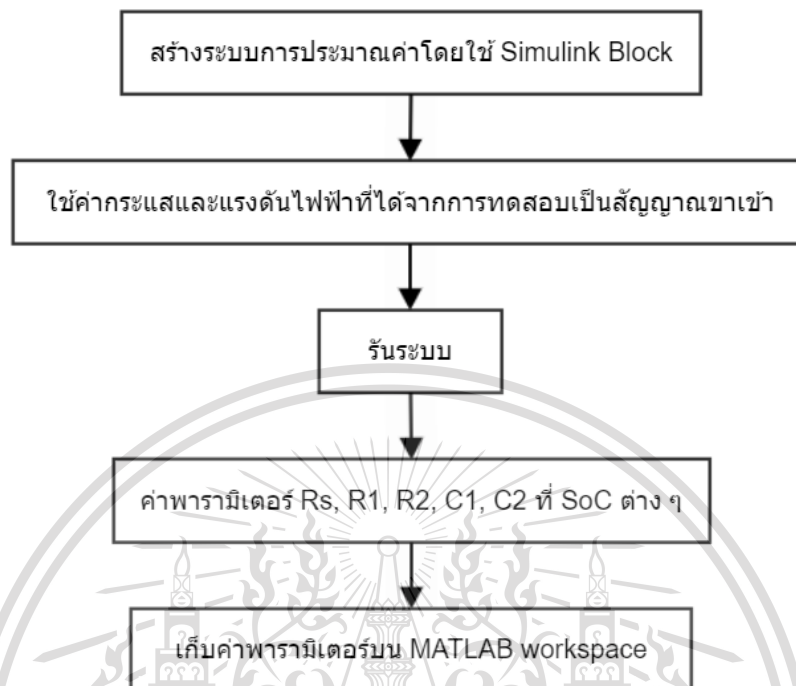
1. สร้างระบบการประมาณค่าและคำนวณค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องด้วย MATLAB SIMULINK
2. คำนวณระบบที่สร้างด้วย SIMULINK และบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่ได้ลงใน workspace
3. ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ คือ  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  ซึ่งเป็นค่าของพารามิเตอร์ที่ได้จากการ sampling ในแต่ละครั้ง
4. เลือกตัวอย่างค่าพารามิเตอร์จากการสุ่มข้อมูลที่ร้อยละ 10 ของ SoC เพื่อนำไปรันในระบบแบตเตอรี่สำหรับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4.4.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Recursive Least square Estimator



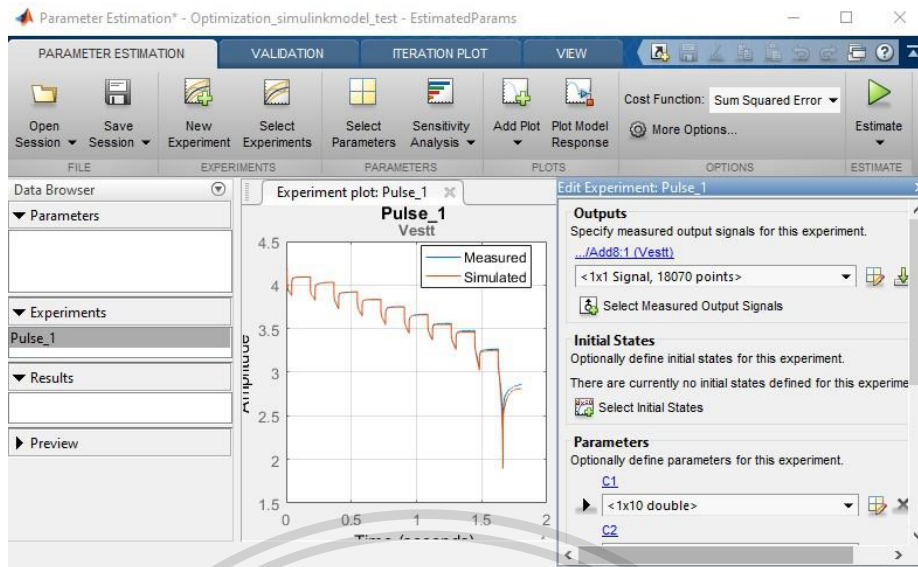
### 3.4.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool [20] [21] [22] [23]

Simulink Design Optimization Tool เป็นเครื่องมือสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบบนโปรแกรม MATLAB SIMULINK ด้วยเทคนิคทางด้าน การ Optimization โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลอ้างอิงในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลที่สร้างโดย Simulink block ให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับข้อมูลค่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด

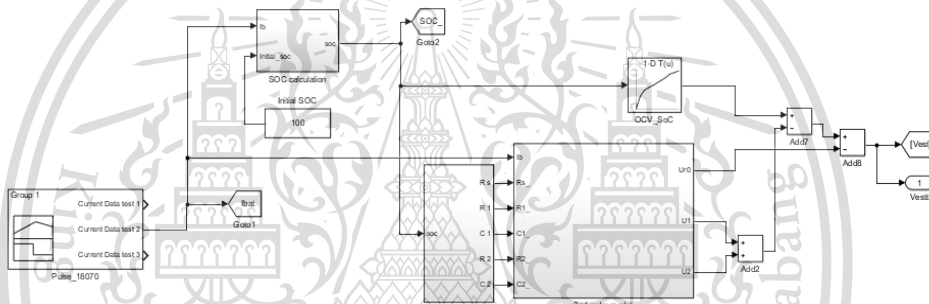
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

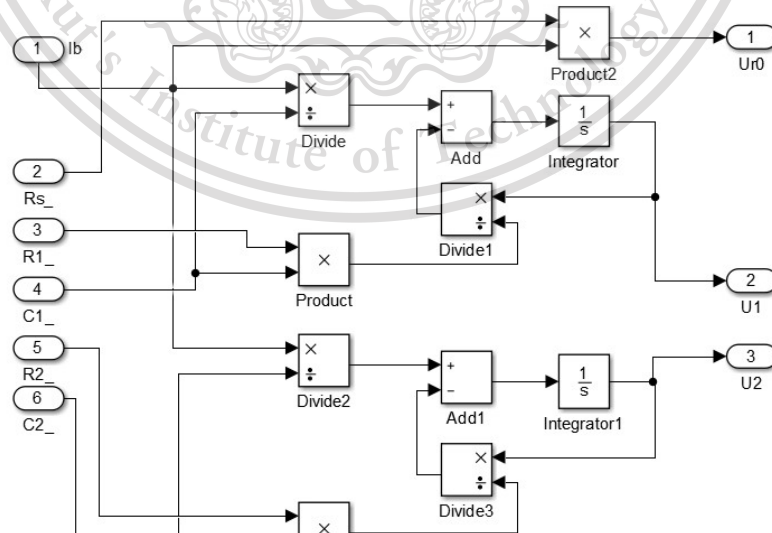
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.22 Simulink Design Optimization Tool



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลลำดับสองสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์



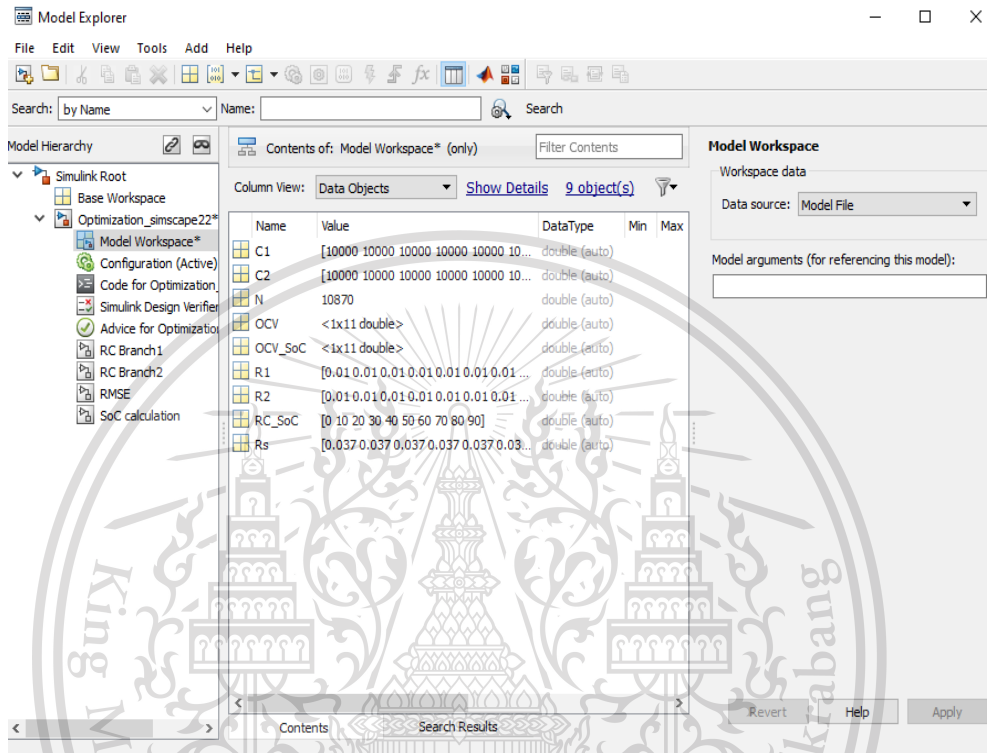
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.24 ภายใน RC Branch

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะถูกกำหนดค่าเริ่มต้นไว้ใน Lookup Table ที่มีช่วง SoC ร้อยละ 10 ตั้งแต่ 0 - 100 สำหรับ  $V_{oc}$  และ 0-90 สำหรับ R และ C การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Simulink Design Optimization Tool สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์  $V_{oc}$ ,  $R_s$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$  ของวงจรสมมูลได้

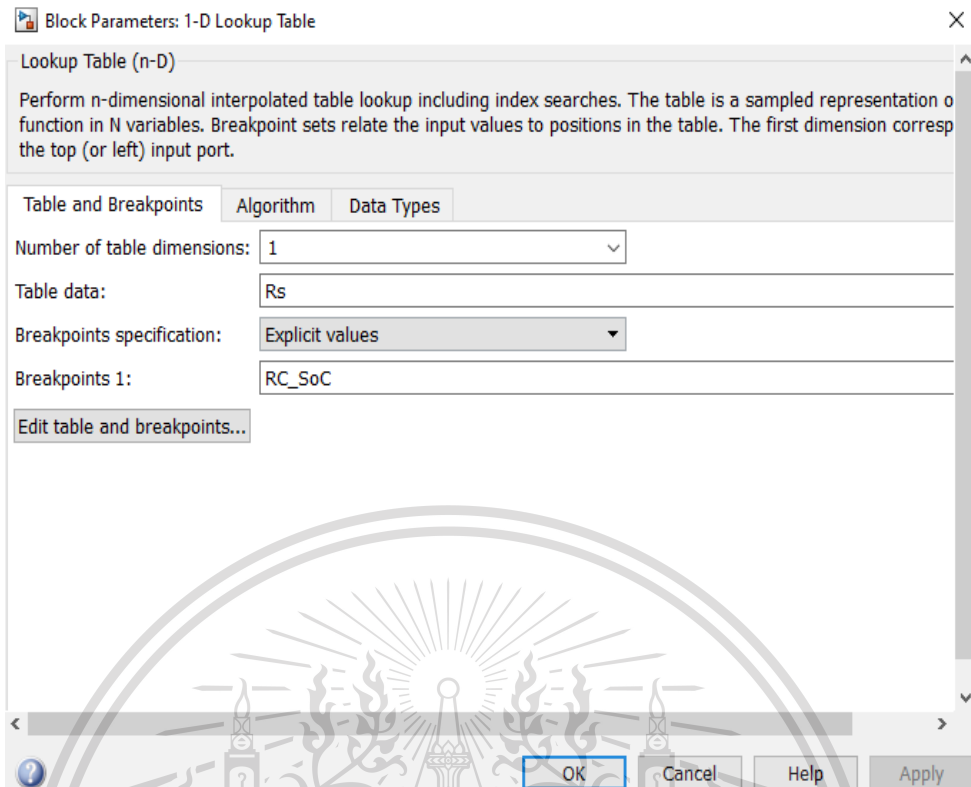


รูปที่ 3.25 การสร้างและกำหนดค่าเริ่มต้นค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลสำหรับ Lookup Table บน Model Explorer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.26 ตัวอย่าง Lookup Table

การกำหนดค่าสำหรับ Simulink Design Optimization Tool จะมีการกำหนดขอบเขตของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ไม่ติดลบและเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมได้เร็ว วิธีการสำหรับการประมาณค่าจะใช้ nonlinear least squares function (lsqnonlin) ดังสมการ

$$\min_x \|f(x)\|_2^2 = \min_x (f_1(x)^2 + f_2(x)^2 + \dots + f_n(x)^2) \quad (3.54)$$

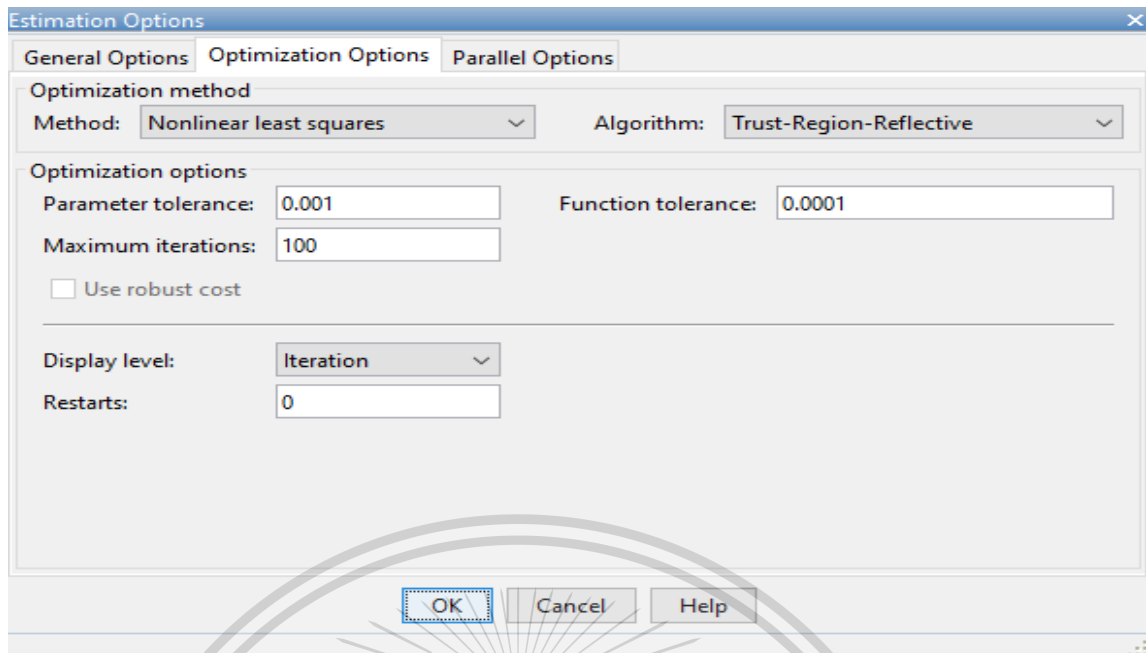
เมื่อ  $x$  คือ ขอบเขต

อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการประมาณค่า คือ Trust-Region-Reflective Least Squares Algorithm ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีการใช้งานมากสำหรับตัวแก้ปัญหใน Optimization Toolbox ซึ่งขึ้นอยู่กับ trust regions มีความเรียบง่ายแต่สามารถหาค่าเหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.27 ตัวอย่างการตั้งค่าอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์

สรุปขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลด้วย Simulink Design Optimization Tool

1. สร้างแบบจำลองวงจรสมมูลลำดับสองด้วย Simulink Block และกำหนดตำแหน่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของแบบจำลองวงจรสมมูล
2. สร้างตัวแปรพารามิเตอร์บน Model Explorer สำหรับการประมาณค่าและกำหนดเป็นค่าเริ่มสำหรับแบบจำลองวงจรสมมูลใน Lookup Table
3. เข้าไปที่ Simulink Design Optimization Tool สร้าง experiment จากนั้นนำเข้าข้อมูลการทดสอบ และนำเข้าค่าพารามิเตอร์จาก Model Explorer พร้อมกำหนดขอบเขตค่าพารามิเตอร์
4. พล็อตผลลัพธ์ค่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่าเริ่มต้นจากแบบจำลองวงจรสมมูล และพล็อตหน้าจอบอกแสดงผลค่าพารามิเตอร์ในแต่ละการวนซ้ำ
5. ตั้งค่าวิธีการและเลือกอัลกอริทึมสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์
6. ใช้ parallel pool ระหว่างการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อเร่งความเร็วในการประมาณค่าให้เร็วขึ้น

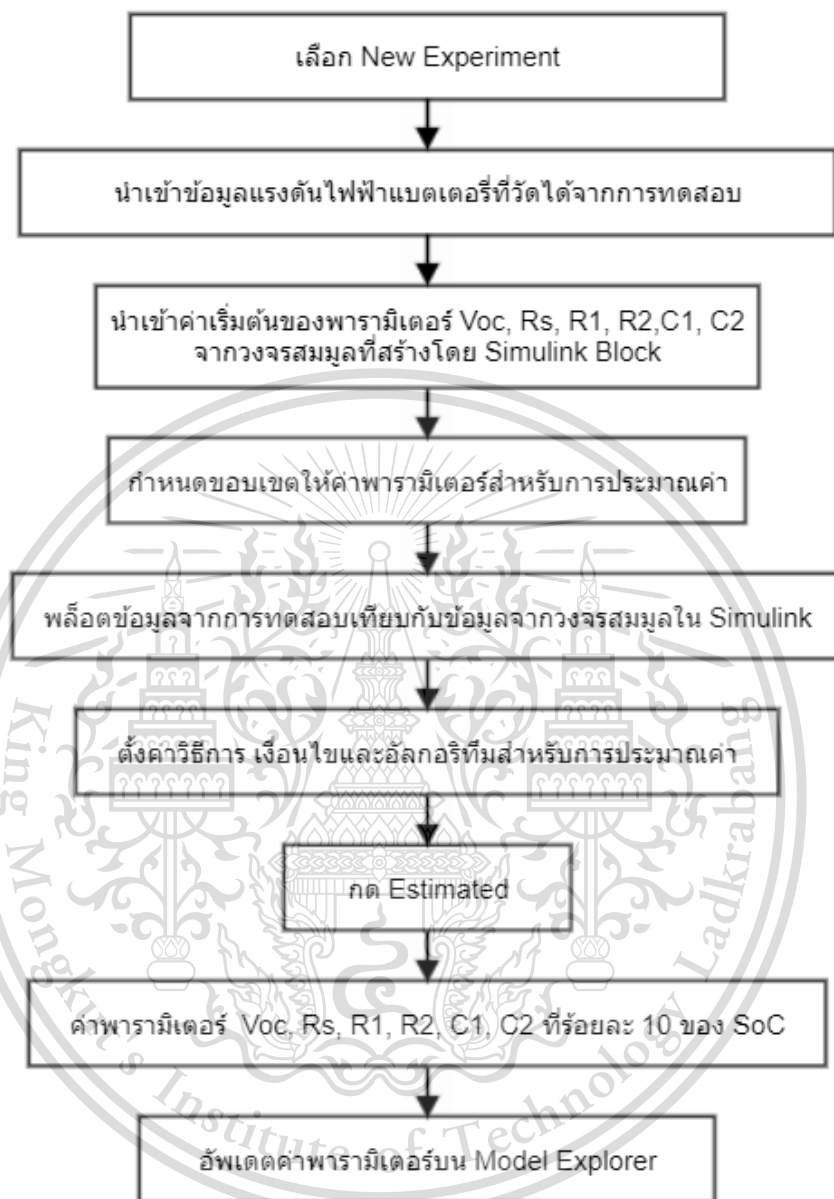
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



### 3.4.5.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วย Simulink Design Optimization tool



### 3.4.6 การคำนวณค่าความแม่นยำ

#### 3.4.6.1 การคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์

การคำนวณค่าความผิดพลาดในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่นั้น สามารถใช้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error : MAE) ดังสมการ

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |V_{measured} - V_{model}| \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูล
- $V_{measured}$  คือ แรงดันของขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการวัด
- $V_{model}$  คือ แรงดันของขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการจำลอง

3.4.6.2 การคำนวณรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง

การคำนวณค่าความผิดพลาดในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่นั้น สามารถใช้รากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error : RMSE) ดังสมการ

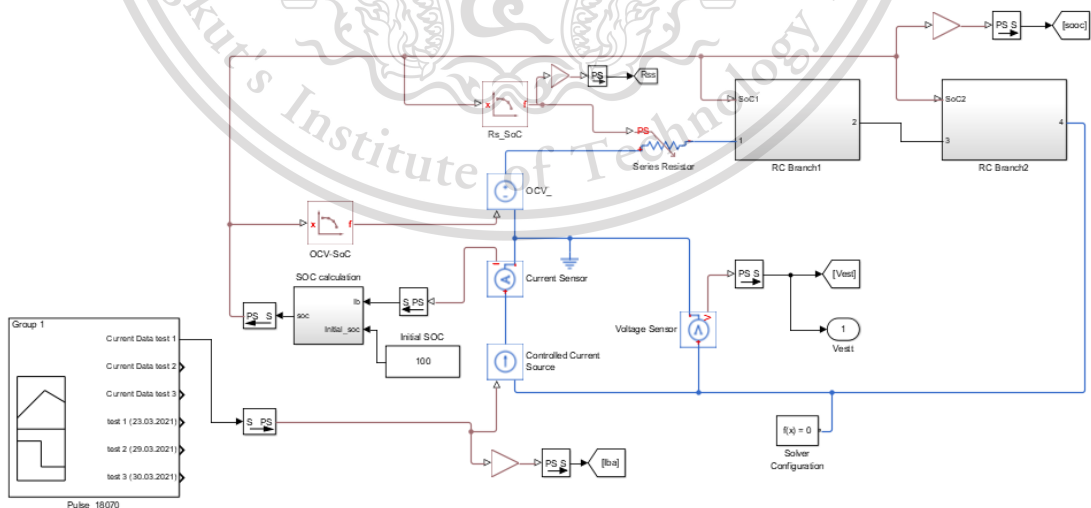
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (V_{measured} - V_{model})^2}{n}} \tag{3.56}$$

- โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูล
- $V_{measured}$  คือ แรงดันของขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการวัด
- $V_{model}$  คือ แรงดันของขั้วแบตเตอรี่ที่ได้จากการจำลอง

3.5 การจำลองการทำงานของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

การจำลองระบบการทำงานของแบตเตอรี่โดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้านั้นสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK สร้างแบบจำลองจาก Simscape Block ทำงานร่วมกับ LUT เพื่อรับค่าพารามิเตอร์ที่ SoC ต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [24]

3.5.1 ภาพรวมการจำลองแบตเตอรี่



รูปที่ 3.30 ภาพรวมระบบจำลองแบตเตอรี่สำหรับจำลองแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.5.2 แบบจำลองการคำนวณ SoC

สามารถคำนวณ SoC ได้จากสมการที่

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{E_{ff}}{C_{cap}} \int_{t_0}^t \frac{I_{bat} \times 100}{3600} dt \quad (3.57)$$

โดยที่  $SOC_0$  คือ ค่าเริ่มต้นของ SoC

$C_{cap}$  คือ ความจุของแบตเตอรี่ที่ใช้งานได้

$I_{bat}$  คือ ขนาดของกระแสที่เราใช้ในการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์

$E_{ff}$  คือ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปจะมีค่าเข้าใกล้ 1 สำหรับโครงการนี้ใช้ค่า  $E_{ff} = 1$

แบบจำลองการคำนวณ SoC ใน MATLAB/SIMULINK สามารถออกแบบได้ดังนี้



รูปที่ 3.31 แบบจำลองการคำนวณ SoC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบแบตเตอรี่

#### 4.1 การทดสอบความจุแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

การทดสอบความจุแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน LG18650MH1 ทดสอบด้วยวิธีการคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง โดยใช้ฟังก์ชันหนึ่งจากเครื่องมือทดสอบ DL3021 และสามารถดูการตั้งค่าต่าง ๆ ได้จากบทที่ 3

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบความจุของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ทั้งหมด 5 ครั้ง

ครั้งที่	ความจุแบตเตอรี่ (mAh)
1	2969
2	2943
3	2946
4	2952
5	2945
ค่าเฉลี่ย	2951

จากตารางผลการทดสอบความจุกำหนดให้ใช้กระแส 3.1 A (1C ตามข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่) ทดสอบความจุที่อุณหภูมิห้องคงที่ และกำหนดให้แรงดันไฟฟ้า cut off อยู่ที่ 2.5 V เป็นจุดที่ร้อยละ 0 ของ SoC จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถนำมาตั้งค่าความจุแบตเตอรี่ 1C ที่สามารถจ่ายได้จริง เพื่อใช้สำหรับการทดสอบอื่น ๆ โดยการหาค่าเฉลี่ยได้เท่ากับ 2.951 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

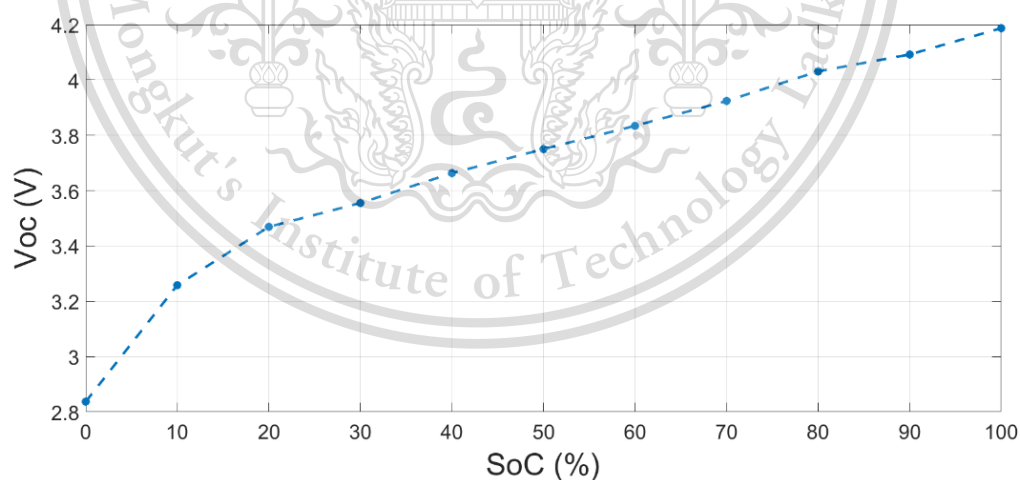
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 4.2 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์

ตารางที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ทั้ง 3 รอบ

SoC (%)	$V_{oc}$ (V)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	2.8635	2.8240	2.8225	2.837
10	3.2661	3.2530	3.2542	3.258
20	3.4766	3.4636	3.4681	3.469
30	3.5594	3.5506	3.5541	3.555
40	3.6657	3.6600	3.6618	3.663
50	3.7519	3.7488	3.7494	3.750
60	3.8358	3.8330	3.8337	3.834
70	3.9248	3.9235	3.9235	3.924
80	4.0313	4.0306	4.0308	4.031
90	4.0921	4.0927	4.0925	4.092
100	4.1884	4.1862	4.1877	4.187



รูปที่ 4.1 แรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด ( $V_{oc}$ ) เทียบกับร้อยละของ SoC

จากผลการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สามารถนำจุดข้อมูลสุดท้ายของช่วง  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (MUT) เพื่อใช้ในการ  
 ไม่ว่าการณีใด ๆ ที่มีการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ทั้งหมด 3 รอบ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดที่  
 ประมาณค่าได้จึงเป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 การทดสอบ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

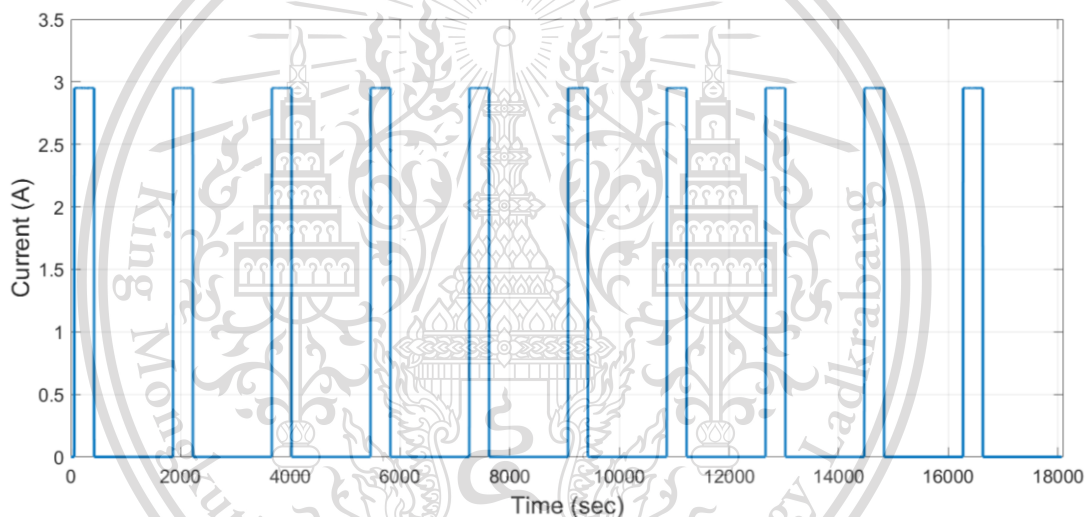
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เปิดของแบตเตอรี่ที่มีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยเฉพาะในช่วง SoC ระหว่างร้อยละ 0 - 30 ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ประมาณค่าได้จะถูกกำหนดค่าไว้ที่แบบจำลองแบตเตอรี่เพื่อใช้สำหรับจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ในลำดับถัดไป

### 4.3 ผลการทดสอบรอบที่ 1

ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้ทำการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่กระแสพลวัตต่าง ๆ ทั้งหมด 4 พลวัต ได้แก่ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะใช้การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ผลการทดสอบแสดงดังรูป

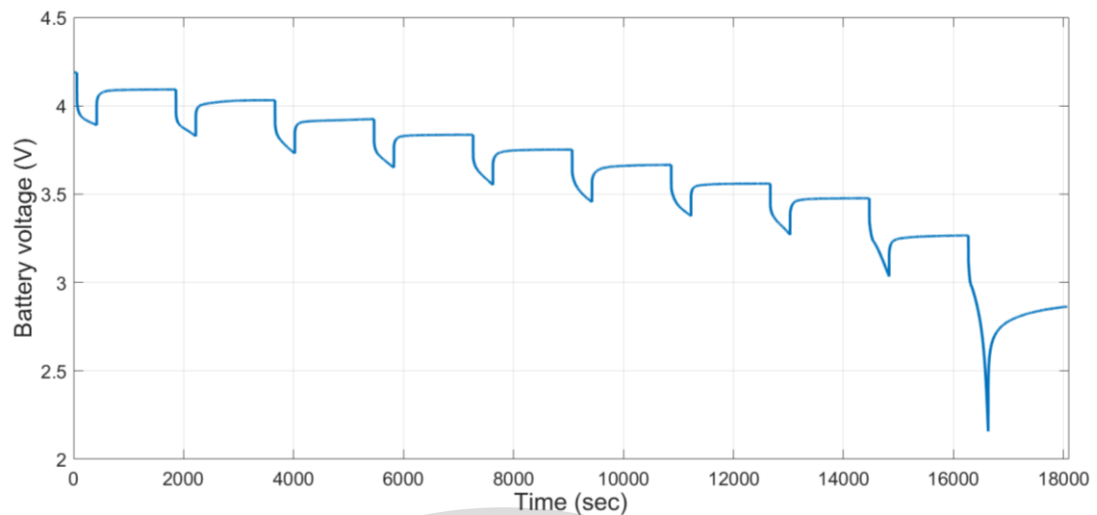


รูปที่ 4.2 กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 1

#### 4.3.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ที่ต่างๆเพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.3 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 – 90

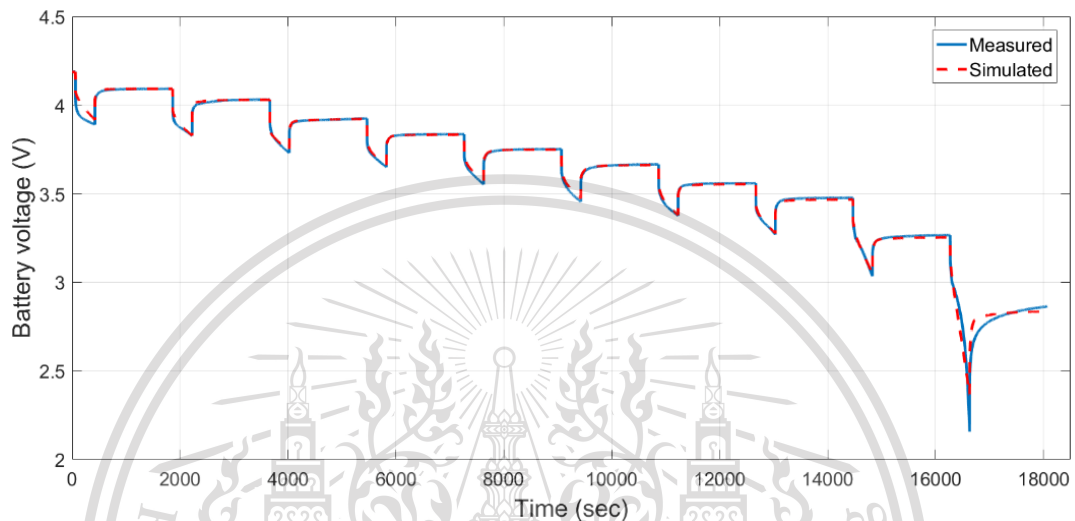
ตารางที่ 4.3 ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.073216	0.074255	0.069213	392.702303	6138.779973
10	0.043546	0.021487	0.009636	1548.352822	40333.464932
20	0.040394	0.021274	0.005249	1956.059165	57402.166592
30	0.039446	0.014283	0.005971	2012.510986	44598.442905
40	0.041195	0.017339	0.010270	3203.368496	33062.124797
50	0.039632	0.017370	0.006925	2577.622036	40378.473853
60	0.039349	0.015859	0.003908	2435.788558	81056.982551
70	0.039311	0.017963	0.007069	1553.468701	89580.336146
80	0.042413	0.020130	0.014230	349.666030	19471.693072
90	0.040666	0.017800	0.004538	2634.398194	68203.774445

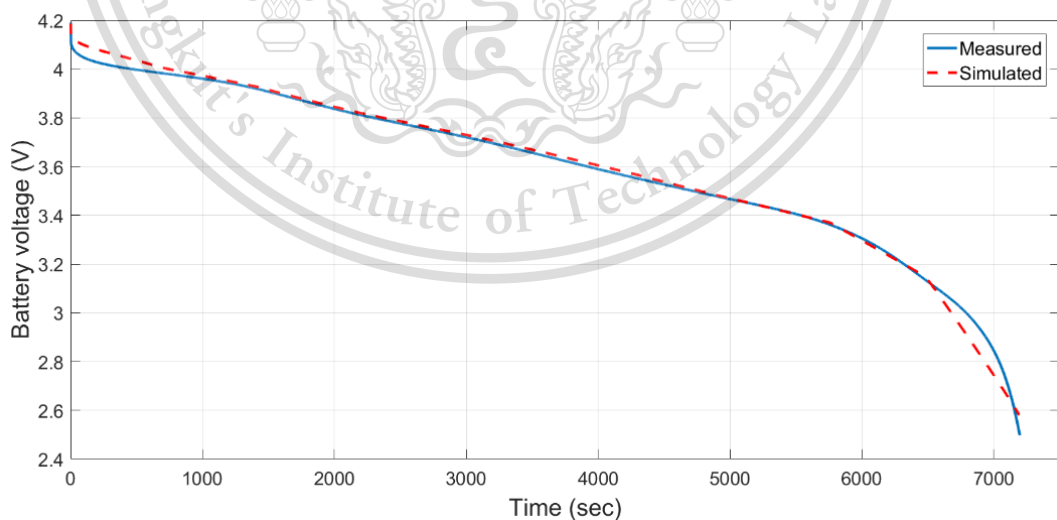
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.4 ถึง 4.7



รูปที่ 4.4 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1



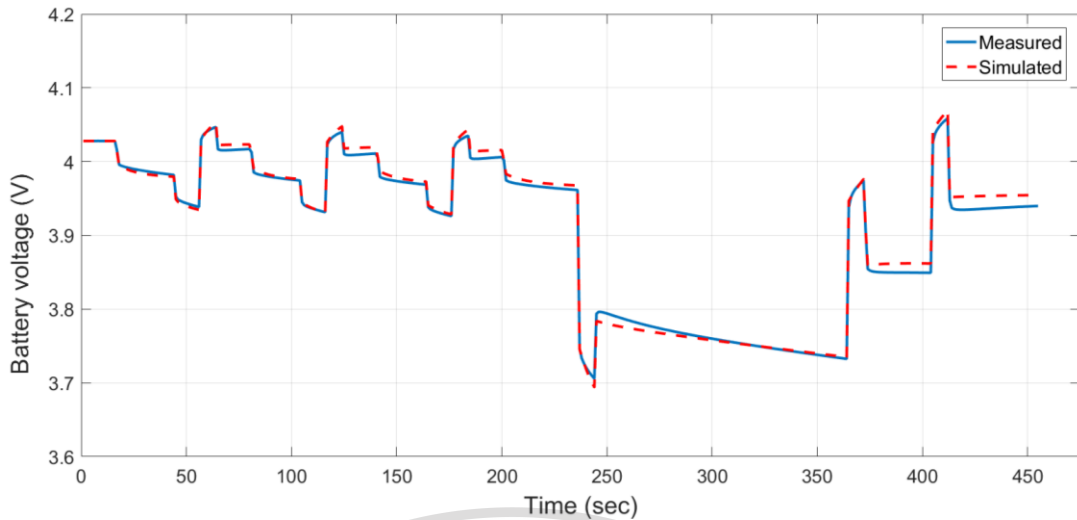
รูปที่ 4.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่

แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1

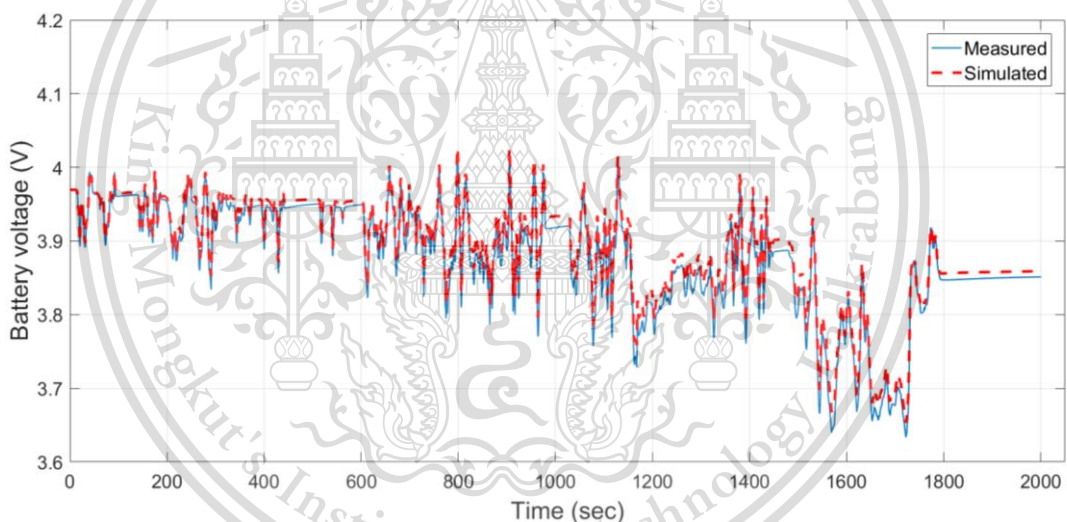
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1



รูปที่ 4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 1

กราฟรูปที่ 4.4 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วย กระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Multiple Linear Regression ที่คล้ายกับ Exponential Curve Fitting ทำให้สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักระหว่างคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ยังคงมีความผิดพลาดที่เห็นได้ชัดในช่วงพักที่เวลา 2224 - 3662 วินาที และที่เวลา 16630 - 18070 วินาที ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์เห็นได้ชัดว่ามีความผิดพลาดมากกว่าช่วงพัก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะในการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Linear Regression จะไม่ได้ใช้ข้อมูลในช่วงที่มีการคายประจุเช่นเดียวกับวิธี Exponential Curve Fitting ทำให้ในการจำลองค่าพารามิเตอร์ในช่วงคายประจุจะถูกประมาณด้วยวิธีการ Linear Interpolation ใน LUT บน MATLAB/SIMULINK

กราฟรูปที่ 4.5 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟการจำลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้นไม่มากในช่วงเวลาคายประจุ 1000 - 6500 วินาที มีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมาก และเห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.6 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดในช่วง 2 ระดับกระแสสุดท้ายจะมีค่อนข้างมาก

กราฟรูปที่ 4.7 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.3.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

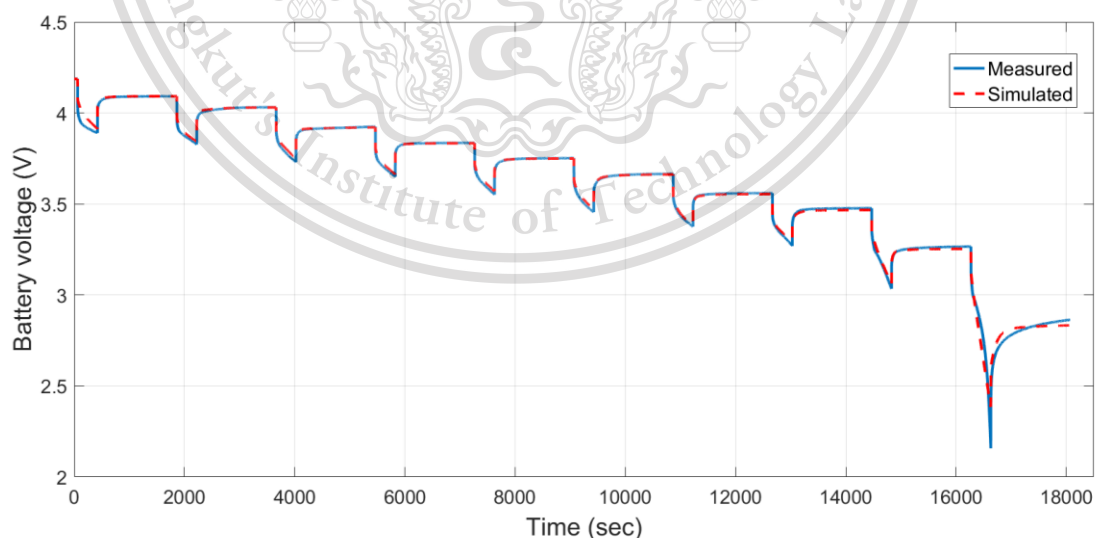
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.4 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.073216	0.084826	0.033890	1178.889333	21511.040400
10	0.043546	0.020249	0.010031	1559.121568	37433.595000
20	0.040394	0.015728	0.003738	4544.729512	101551.362901
30	0.039446	0.014004	0.006453	1851.612226	38106.531497
40	0.041195	0.017362	0.010740	3060.105473	30670.601351
50	0.039632	0.015875	0.008995	2211.083435	24625.650584
60	0.039349	0.015176	0.004609	2315.467041	57473.015647
70	0.039311	0.016075	0.007785	2371.402362	128453.069221
80	0.042413	0.014116	0.012547	1671.175637	26835.881318
90	0.040666	0.015881	0.006625	2411.090086	32661.855263

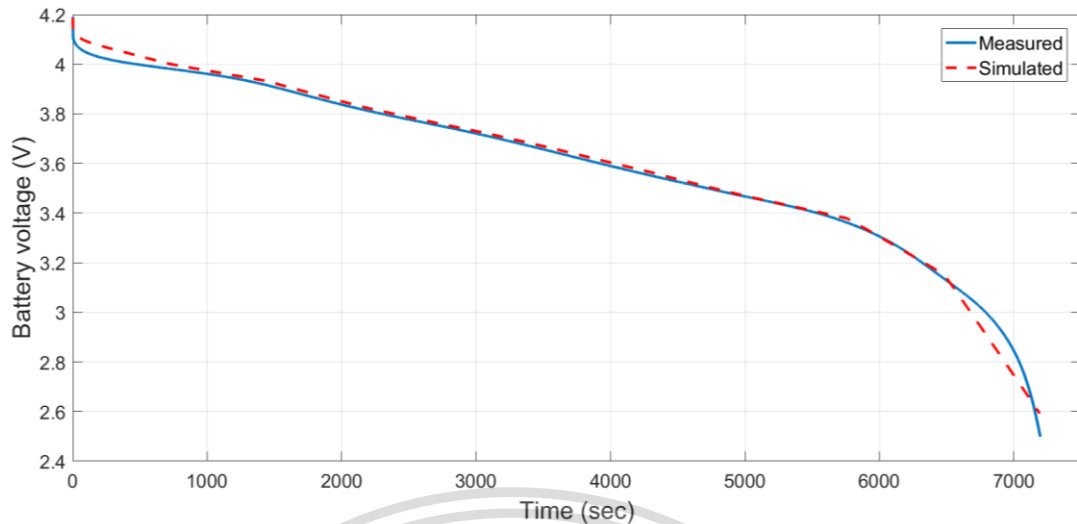
การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.8 ถึง 4.11



รูปที่ 4.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบเอกสสารนี้เป็นเอกพจน์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1

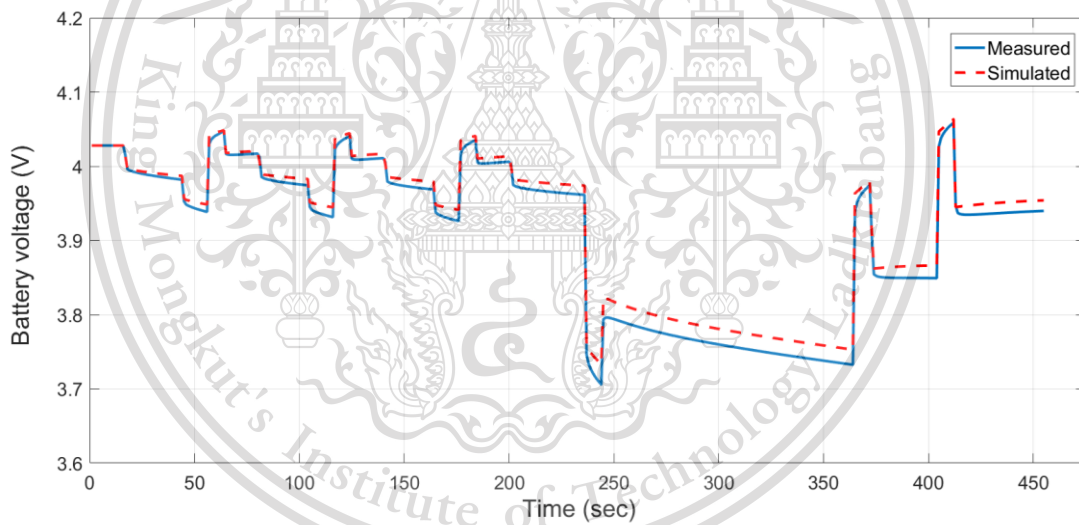
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.9 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ

Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1



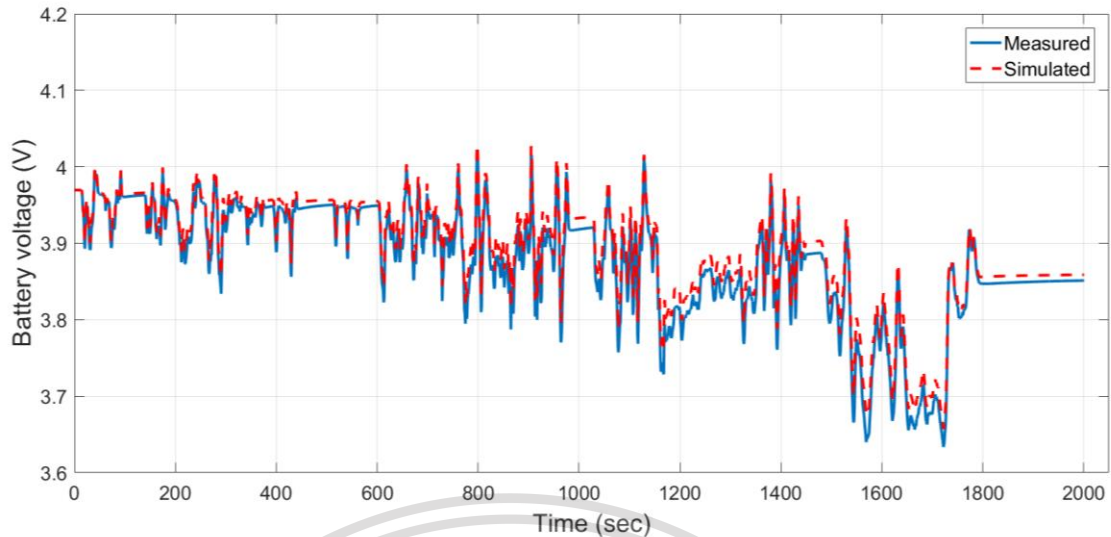
รูปที่ 4.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ

Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.11** ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 1

กราฟรูปที่ 4.8 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Exponential Curve Fitting สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์มีความแม่นยำน้อยกว่าช่วงพักโดยเฉพาะการคายประจุในพัลส์แรกและพัลส์สุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟการจำลองมีความผิดพลาดเกิดขึ้นไม่มากในช่วงเวลาคายประจุ 1000 - 6500 วินาที มีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากและเห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.10 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ หลังจากเวลาดังกล่าว ความแม่นยำในการจำลองนั้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งในช่วงที่มีการคายประจุและอัดประจุ

กราฟรูปที่ 4.11 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจันทบุรี และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 4.3.3 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆเพื่อความเหมาะสม และสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 – 90

ตารางที่ 4.5 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1

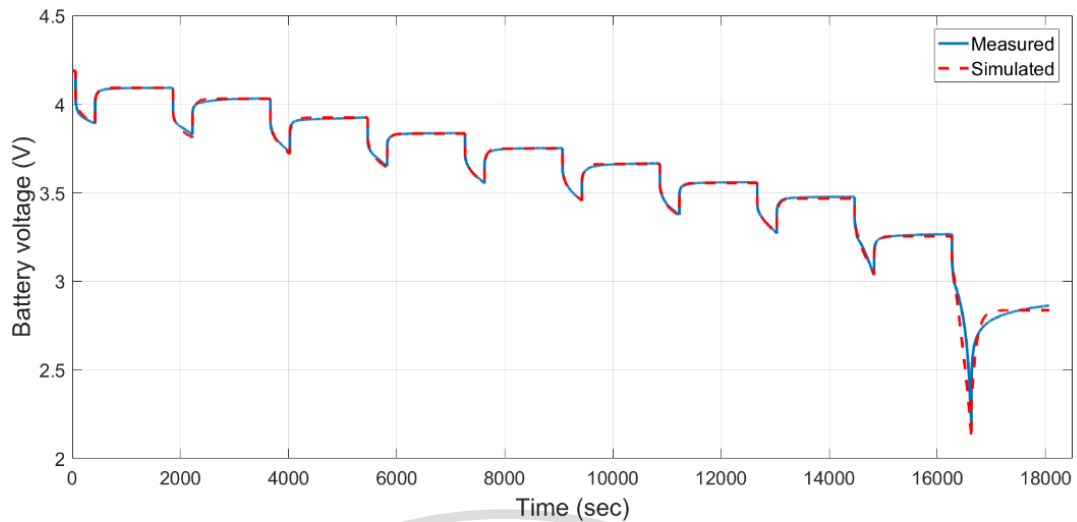
SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.036672	0.261491	0.027638	352.428239	12.809715
9.846446	0.029918	0.030092	0.014975	2036.742965	13.580498
19.865747	0.030071	0.026320	0.012952	2249.114887	16.227971
29.887950	0.031857	0.019311	0.010742	3003.665324	20.677049
39.910159	0.035553	0.028671	0.006579	2145.832803	37.617372
49.921747	0.031587	0.026315	0.011626	2088.090069	20.730670
59.943993	0.034931	0.021570	0.008671	2674.172020	35.431936
69.963341	0.038642	0.025429	0.005134	2702.733976	104.039114
79.967030	0.038746	0.029820	0.006813	2240.124998	73.537760
89.988951	0.039131	0.024910	0.009639	1891.664107	45.546593

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสดังที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.12 ถึง 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

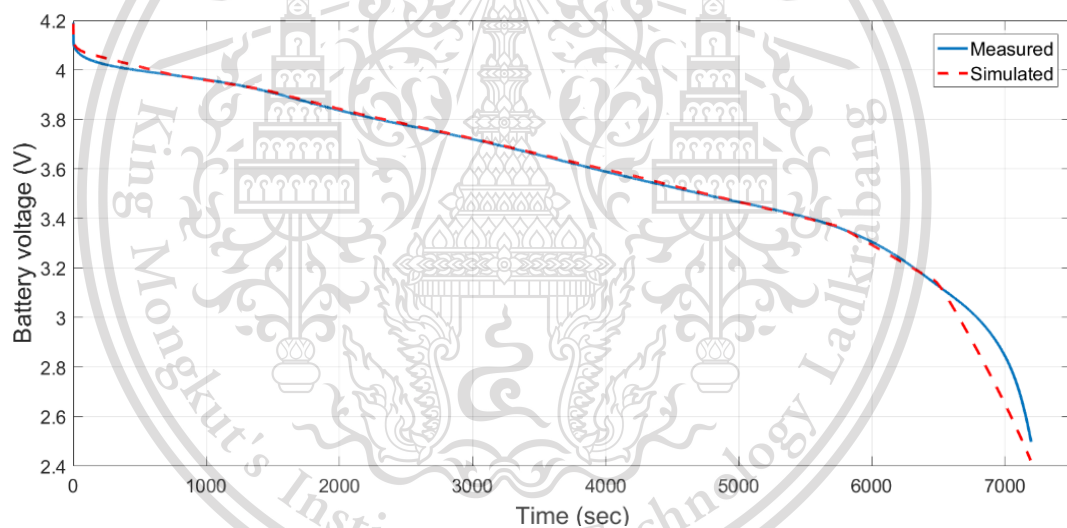
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least

Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1

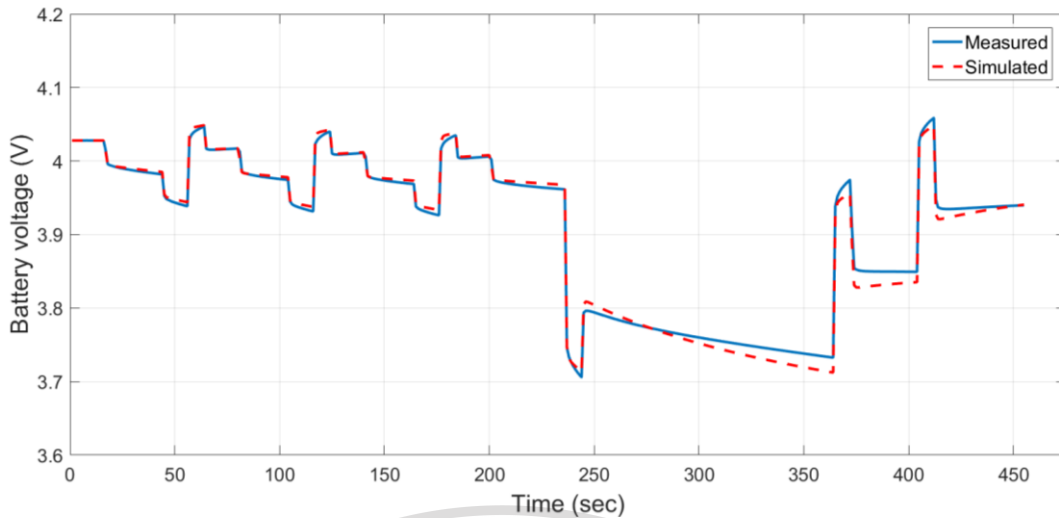


รูปที่ 4.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1

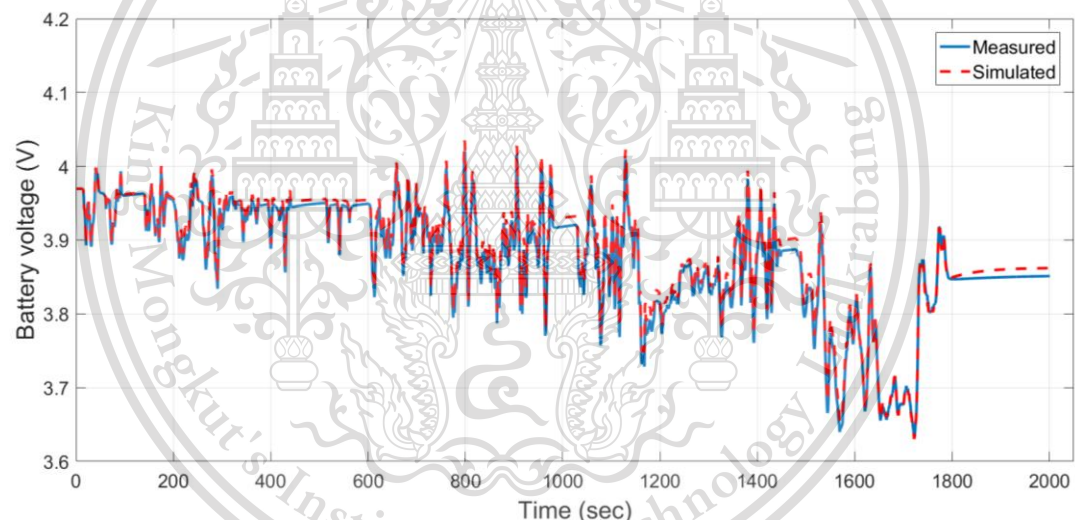
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1



รูปที่ 4.15 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 1

กราฟรูปที่ 4.12 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพัก และช่วงคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดมากและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจุ และช่วงพักรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.13 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้ค่อนข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 600 - 6500 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.14 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดจะเห็นได้ชัดในช่วงประมาณ 245 วินาที เป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.15 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.3.4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 – 90

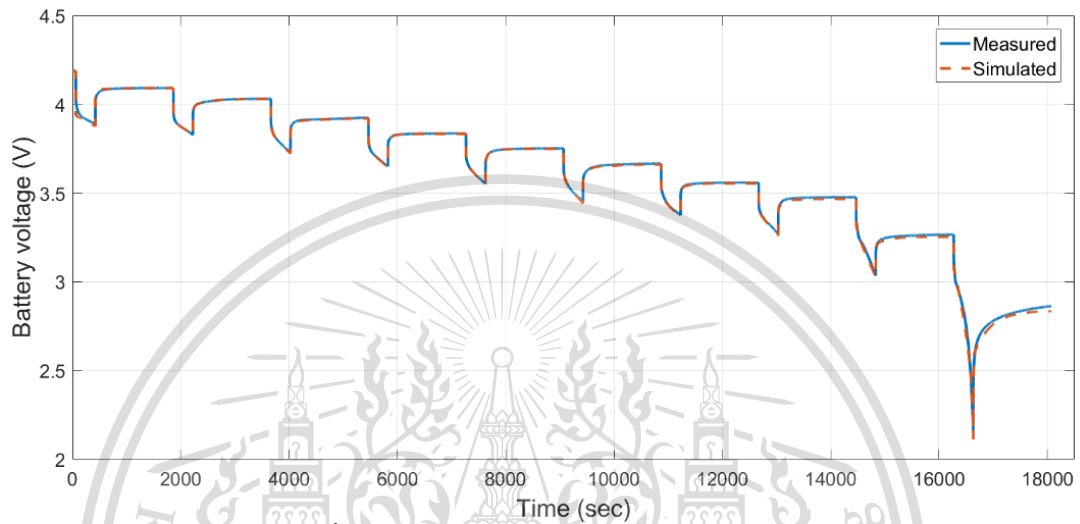
ตารางที่ 4.6 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.002173	0.658698	0.166258	470.440340	24.401458
10	0.059968	0.009795	0.009467	15549.431223	4560.925781
20	0.047306	0.019174	0.002227	1825.181499	139587.235055
30	0.040573	0.012276	0.017464	1020.399808	7249.030716
40	0.045851	0.022829	0.010652	3093.765363	56429.803445
50	0.042082	0.017843	0.010218	1505.712929	17837.594737
60	0.045164	0.012444	0.008509	8939.942265	1997.667951
70	0.043742	0.017206	0.017105	45984.473728	1685.099641
80	0.045189	0.010318	0.018825	26865.242873	11104.592430
90	0.050408	0.020103	0.008173	1226.731523	61448.816639

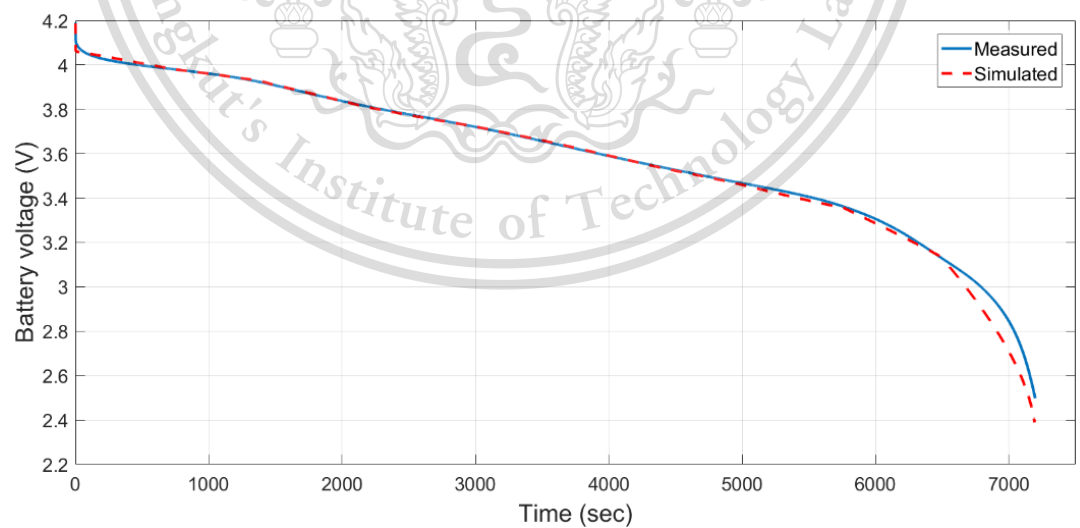
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 1 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.16 ถึง 4.19



รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1



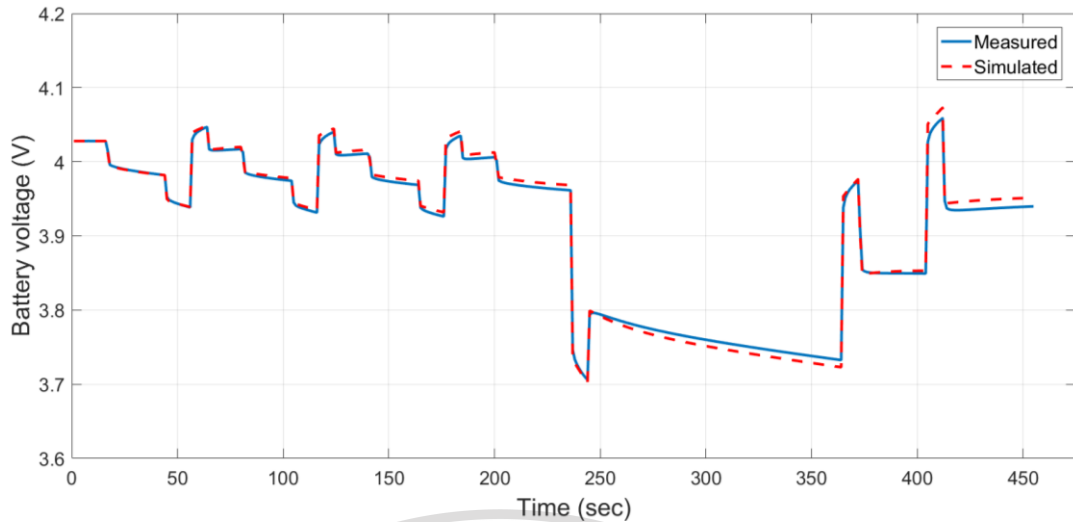
รูปที่ 4.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่

แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1

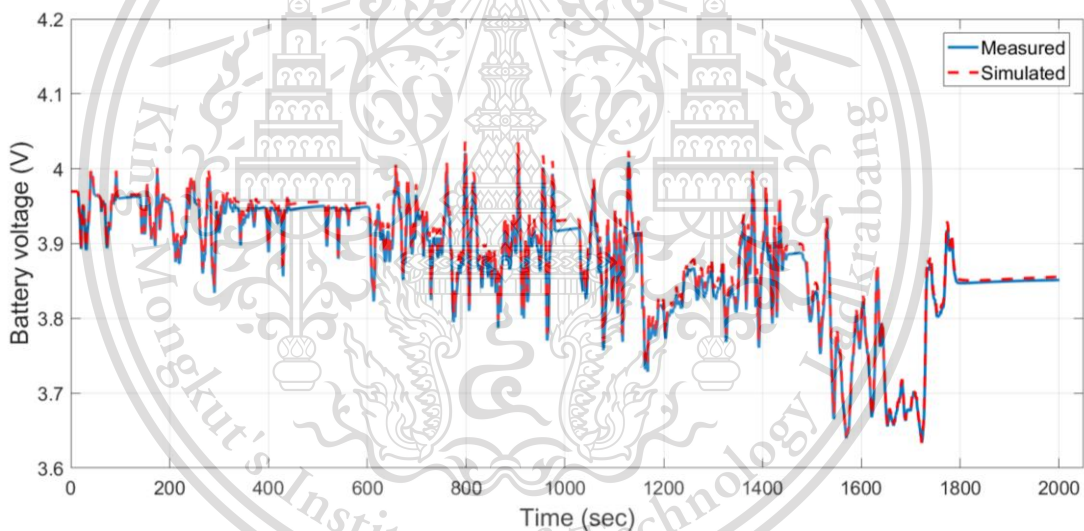
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1



รูปที่ 4.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 1

กราฟรูปที่ 4.16 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพัก และช่วงคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดเล็กน้อยและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจুরอบแรกและช่วงพักในรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.17 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น ลิขสิทธิ์งานนี้ให้อดแปลงไปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

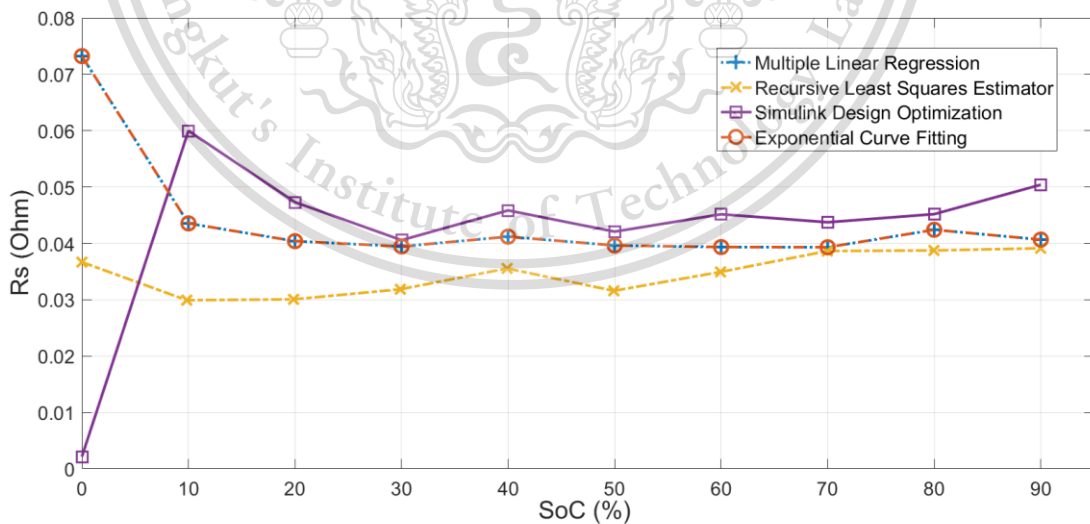
แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 500 - 5000 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงเล็กน้อยในช่วงเริ่มการคายประจุและมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.18 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 60 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากและเห็นได้ชัดในบางระดับกระแสของพลวัต

กราฟรูปที่ 4.19 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

4.3.5 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 วิธี

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ทั้ง 4 วิธีได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการเพื่อสังเกตถึงความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการ ดังกราฟที่ 4.20 , 4.21 , 4.22 ,4.23 และ 4.24 ซึ่งแสดงถึงการเปรียบเทียบค่า  $R_s$  ,  $R_1$  ,  $R_2$  ,  $C_1$  และ  $C_2$  ตามลำดับของทั้ง 4 วิธีของการหาค่าพารามิเตอร์



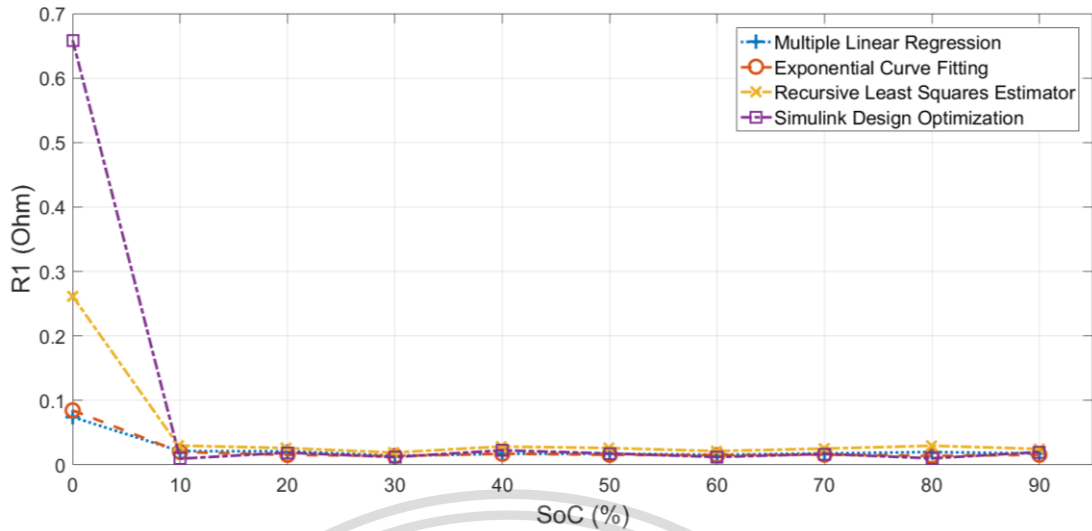
รูปที่ 4.20 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ใน

การทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

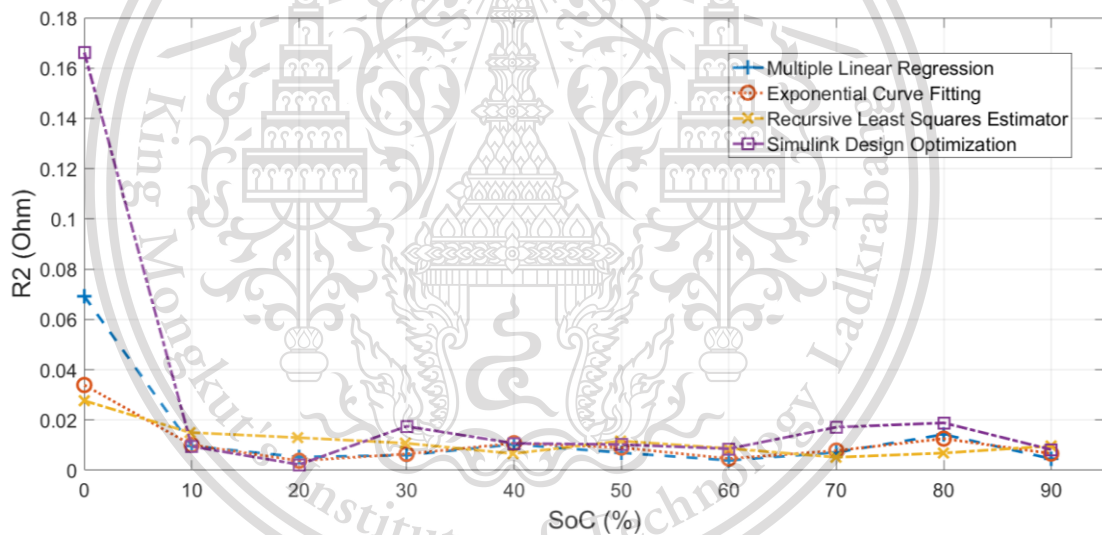
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.21 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

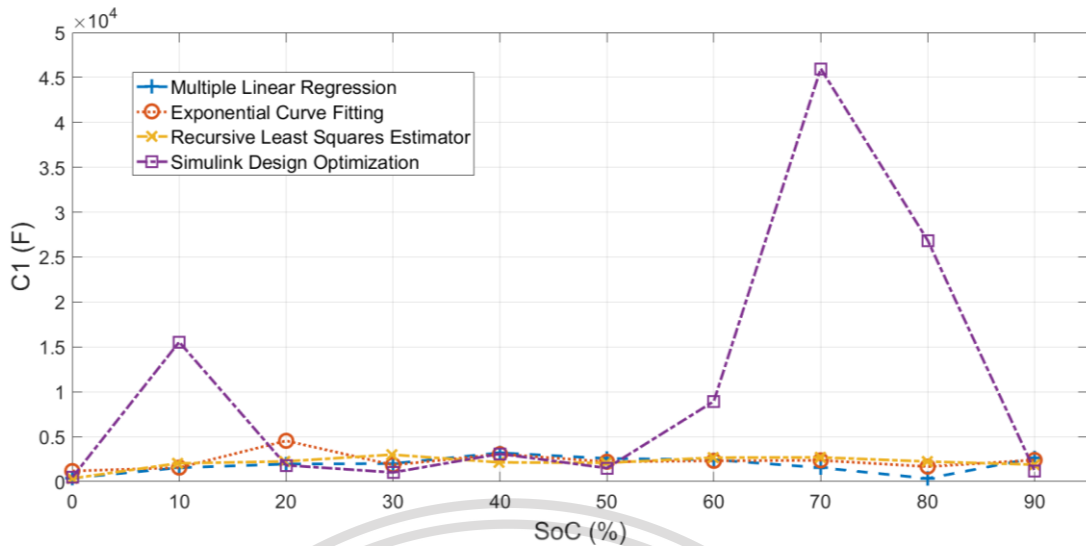


รูปที่ 4.22 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

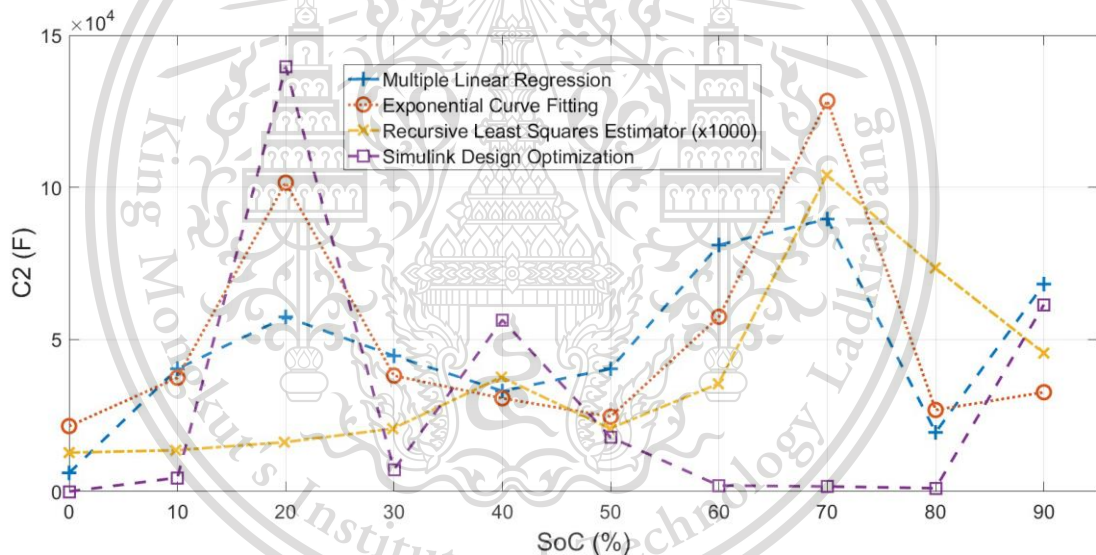
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.23 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี



รูปที่ 4.24 ความเก็บประจุ  $C_2$  ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ

จากการนำค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการไปทดสอบในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ใน MATLAB โดยทำการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ คือ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เพื่อนำไปเทียบกับค่าจริงที่ได้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แล้วไปทำการหาร้อยละของค่าความผิดพลาดซึ่งใช้วิธีคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ ตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ตารางที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละ

วิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบกายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ตารางที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ตารางที่ 4.10 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

**ตารางที่ 4.7** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบกายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.009830	0.020408
Exponential Curve Fitting	0.009855	0.018433
Recursive Least Squares Estimator	0.009225	0.024128
Simulink Design Optimization Tool	0.006105	0.009818

การทดสอบกายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ จากตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Exponential Curve Fitting, Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.8** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบกายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.017473	0.028047
Exponential Curve Fitting	0.017975	0.027483
Recursive Least Squares Estimator	0.017191	0.043303
Simulink Design Optimization Tool	0.013735	0.032147

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การทดสอบกายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง จากตารางที่ 4.8 เห็นได้ว่าการทดสอบ

รอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Exponential Curve Fitting และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Multiple Linear Regression, Simulink Design Optimization และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.9** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.006090	0.007847
Exponential Curve Fitting	0.012361	0.014177
Recursive Least Squares Estimator	0.006684	0.009024
Simulink Design Optimization Tool	0.005688	0.006804

การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 จากตารางที่ 4.9 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมา Multiple Linear Regression, Recursive Least Squares Estimator และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Multiple Linear Regression, Recursive Least Squares Estimator และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.10** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 ในการทดสอบรอบที่ 1 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.012567	0.014092
Exponential Curve Fitting	0.014181	0.016087
Recursive Least Squares Estimator	0.009232	0.010409
Simulink Design Optimization Tool	0.008437	0.009479

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

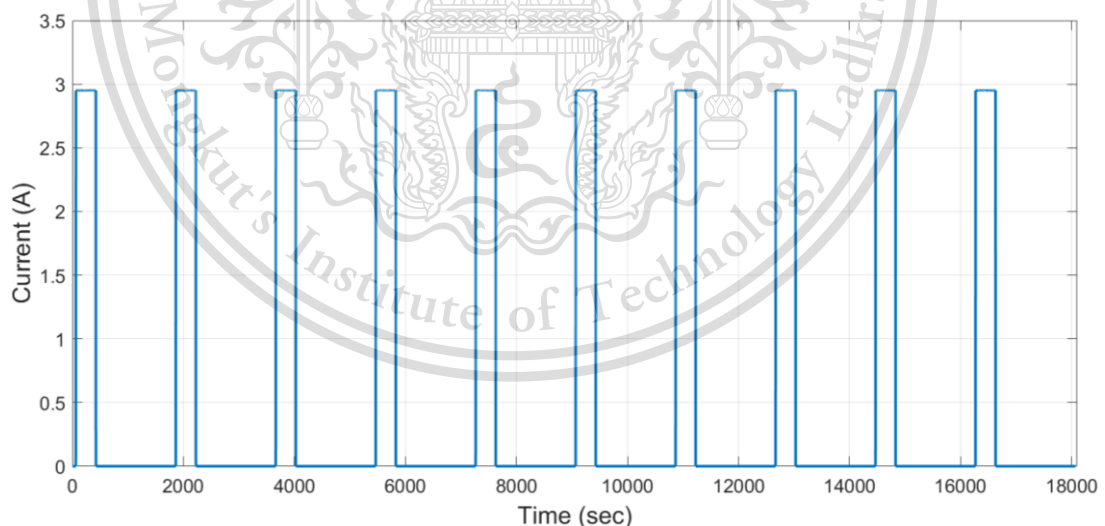
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 จากตารางที่ 4.10 เห็นได้ว่าในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression และ Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

#### 4.4 ผลการทดสอบรอบที่ 2

ในการทดสอบรอบที่ 2 ได้ทำการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่กระแสพลวัตต่าง ๆ ทั้งหมด 4 พลวัต ได้แก่ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะใช้การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ผลการทดสอบแสดงดังรูป

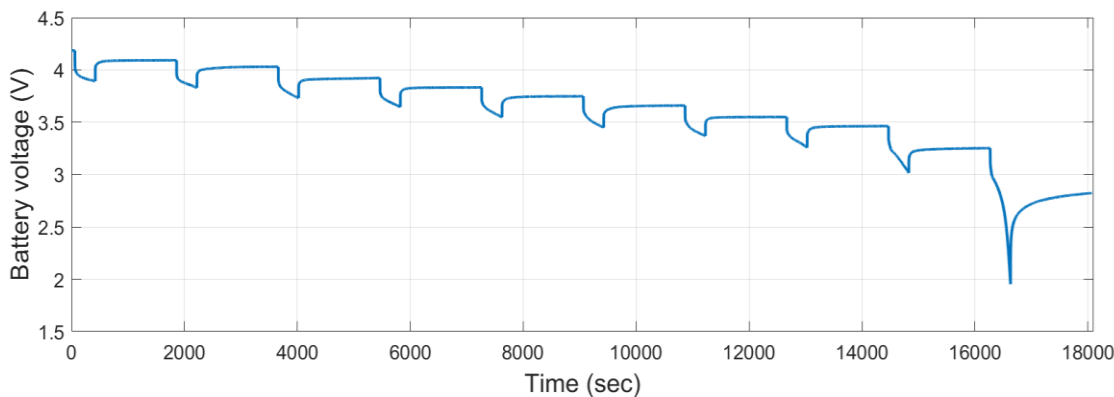


รูปที่ 4.25 กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 2

#### 4.4.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้เทคนิคหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นเทคนิค 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.11 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

ตารางที่ 4.11 ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2

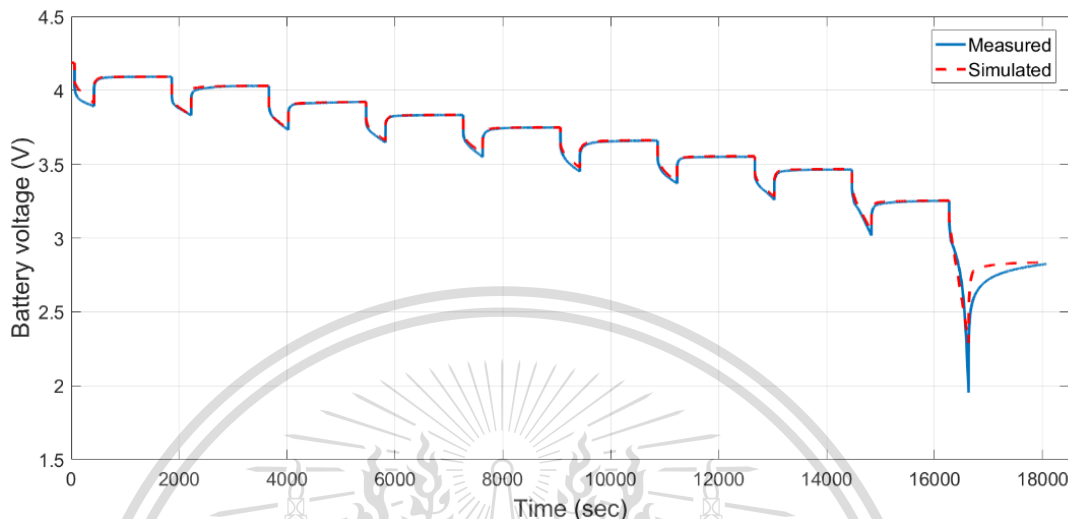
SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.077318	0.095653	0.087656	315.993944	4815.413503
10	0.043512	0.022002	0.010696	1467.612894	38043.287729
20	0.040374	0.020685	0.005474	1934.386036	57269.181365
30	0.039394	0.015747	0.003535	2078.261848	80805.326569
40	0.039423	0.017350	0.010323	3269.491388	31739.535544
50	0.039262	0.017418	0.007350	2553.077088	37915.067889
60	0.040038	0.015635	0.003822	2482.989988	78380.235542
70	0.039313	0.017510	0.006871	1535.875973	91802.889973
80	0.042411	0.019981	0.014383	279.509807	17757.902593
90	0.043792	0.016806	0.003856	2902.506987	78907.858412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2 ได้นำพารามิเตอร์

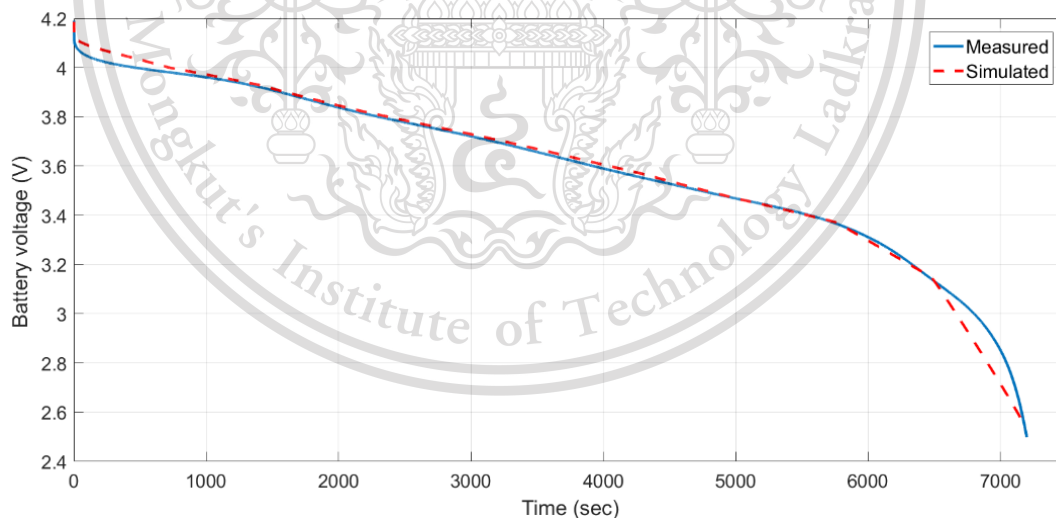
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.27 ถึง 4.30



รูปที่ 4.27 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2

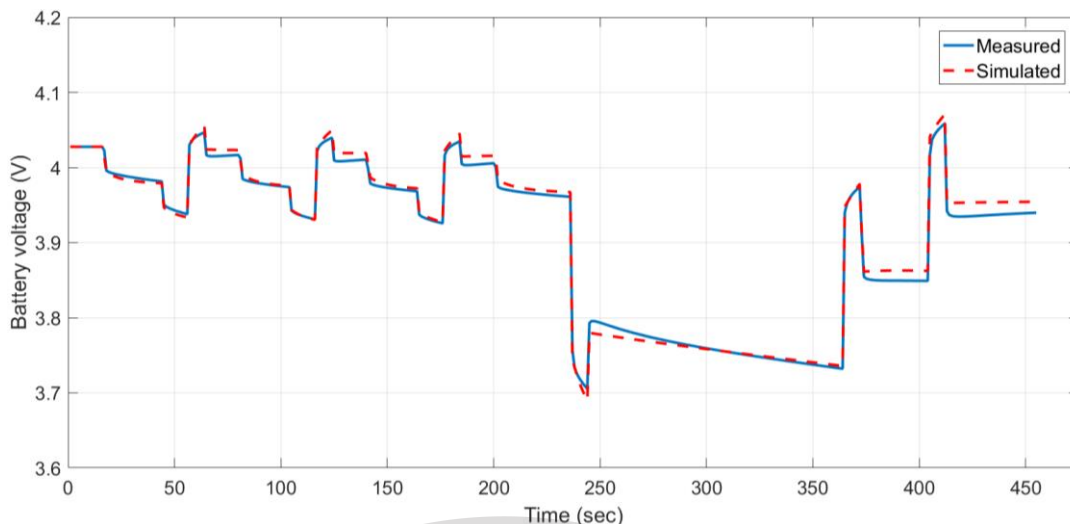


รูปที่ 4.28 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2

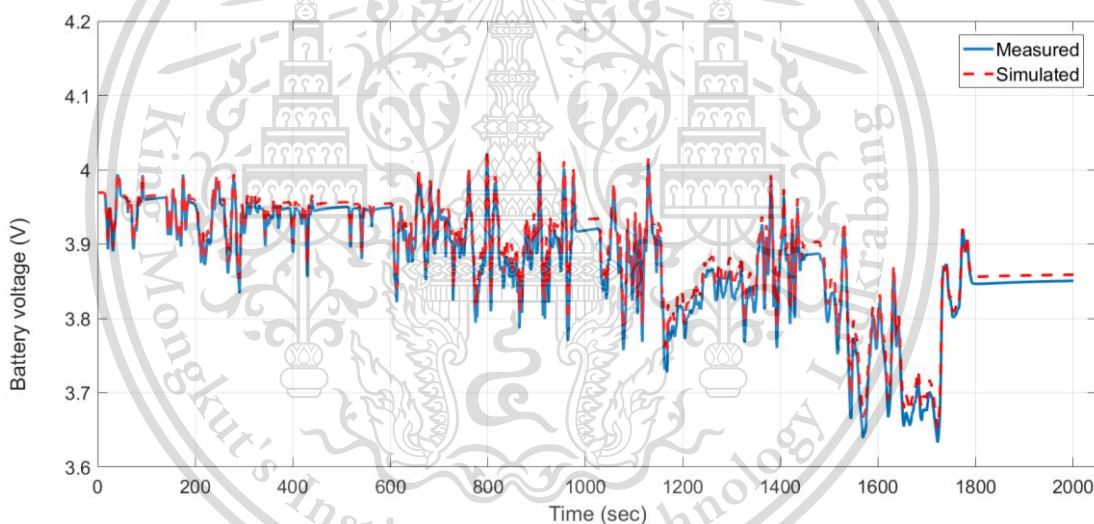
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.29 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2



รูปที่ 4.30 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 2

กราฟรูปที่ 4.27 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Multiple Linear Regression ที่คล้ายกับ Exponential Curve Fitting ทำให้สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักระหว่างคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ยังคงมีความผิดพลาดที่เห็นได้ชัดในช่วงพักที่เวลา 2224 - 3662 วินาที และที่เวลา 16630 - 18070 วินาที ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์เห็นได้ชัดว่ามีความผิดพลาดมากกว่าช่วงพัก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะในการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple

Linear Regression จะไม่ได้ใช้ข้อมูลในช่วงที่มีการคายประจุเช่นเดียวกับวิธี Exponential Curve Fitting ทำให้ในการจำลองค่าพารามิเตอร์ในช่วงคายประจุจะถูกประมาณด้วยวิธีการ Linear Interpolation ใน LUT บน MATLAB/SIMULINK

กราฟรูปที่ 4.28 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟการจำลองมีรอยละของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยในช่วงเวลาคายประจุ 1000 - 6500 วินาที มีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากและเห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.29 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดในช่วง 2 ระดับกระแสสุดท้ายจะมีค่อนข้างมาก

กราฟรูปที่ 4.30 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.4.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.12 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

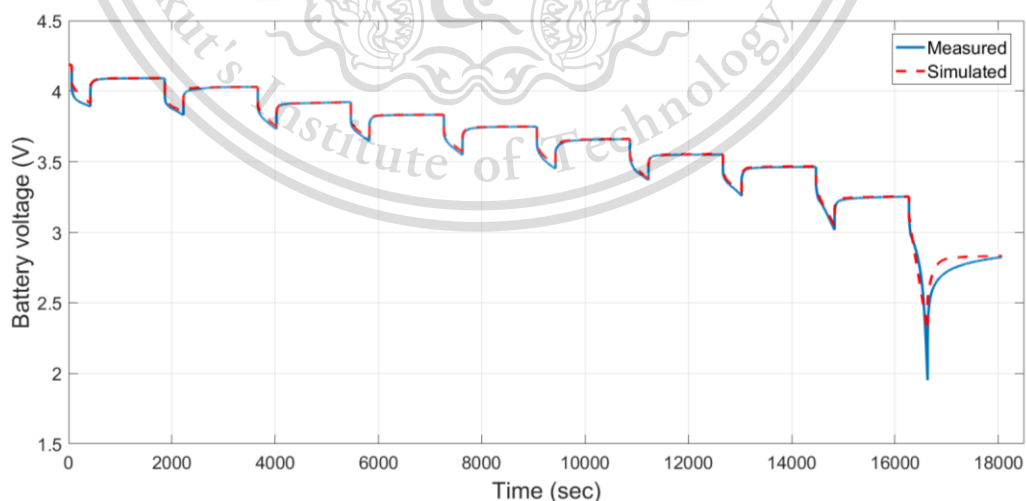
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.12 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.077318	0.117697	0.033889	849.637777	21537.830808
10	0.043512	0.020683	0.010933	1539.913839	37364.403472
20	0.040374	0.019920	0.006781	1714.332324	37116.756222
30	0.039394	0.015308	0.004253	1889.845685	55487.643028
40	0.039423	0.016413	0.011153	3243.851748	27346.980249
50	0.039262	0.015945	0.009367	2198.849935	23935.410304
60	0.040038	0.014912	0.004633	2335.086178	53207.791368
70	0.039313	0.015521	0.007561	2414.739836	132262.483191
80	0.042411	0.013177	0.012665	1655.971881	24074.584169
90	0.043792	0.015504	0.003293	3795.083541	100708.653767

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.31 ถึง 4.34

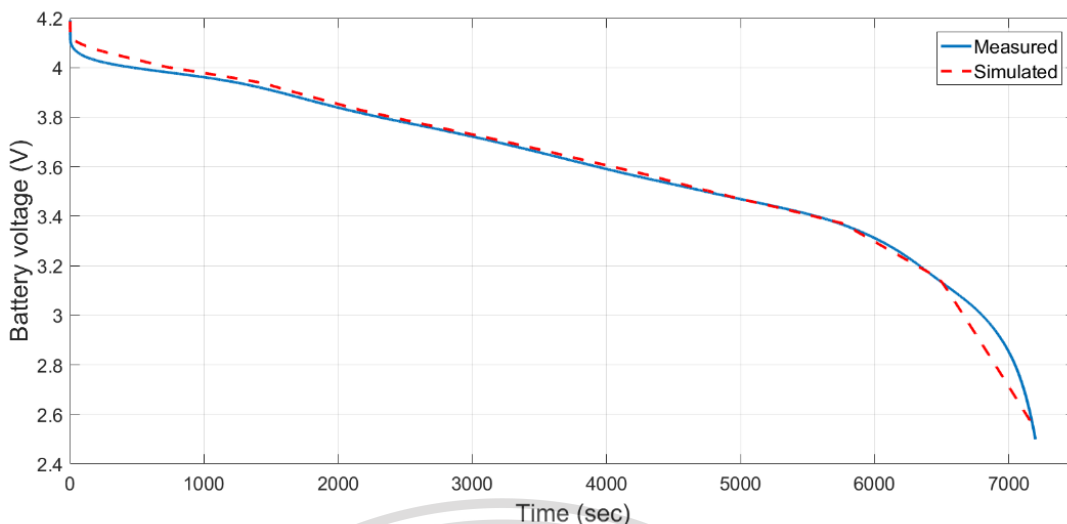


รูปที่ 4.31 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบ

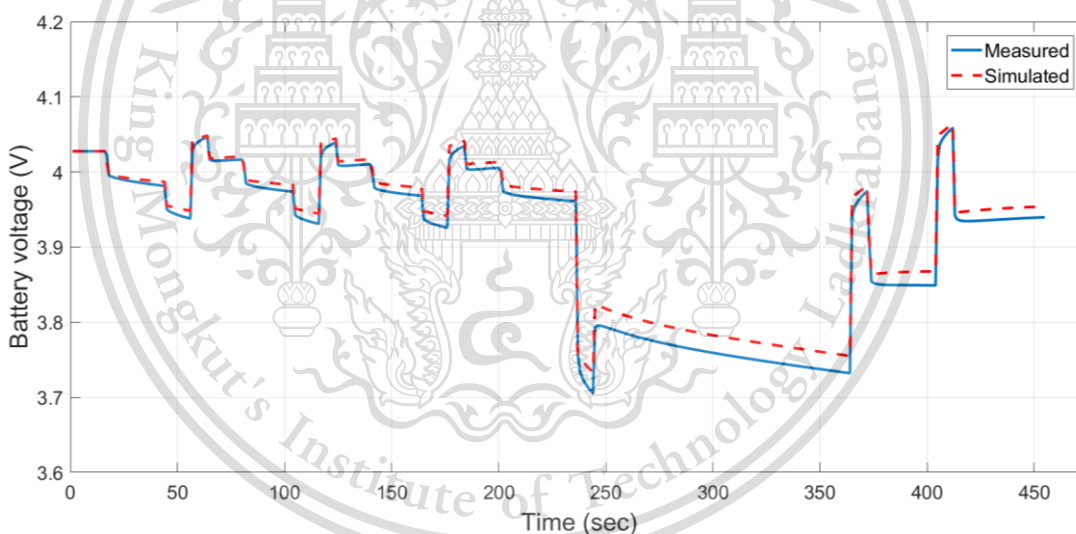
เอกสารนี้เป็นเอกพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2

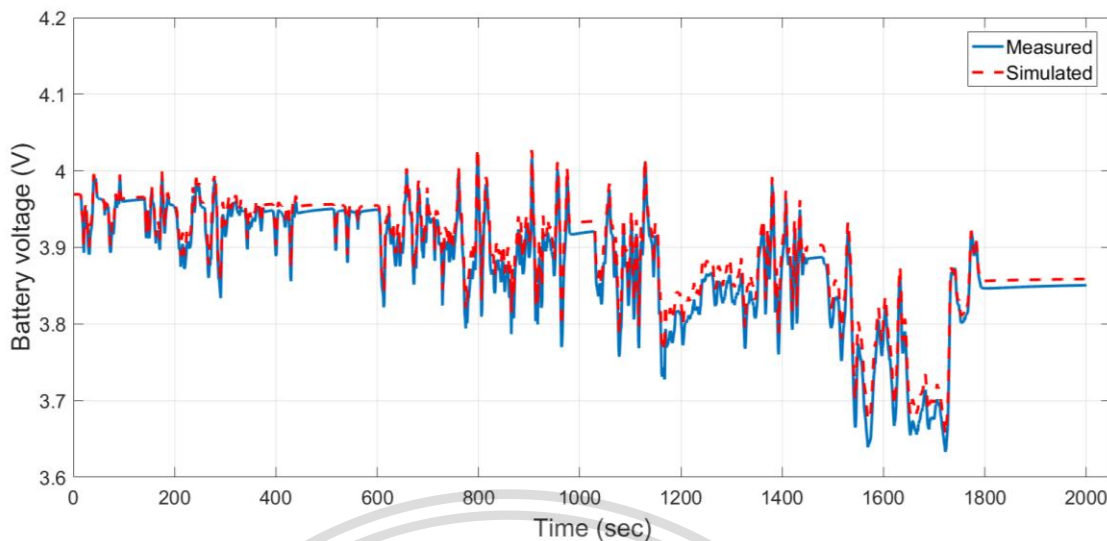


รูปที่ 4.33 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.34** ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 2

กราฟรูปที่ 4.31 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Exponential Curve Fitting ทำให้สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักระหว่างคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ยังคงมีความผิดพลาดที่เห็นได้ชัดในช่วงพักที่เวลา 2224 - 3662 วินาที และที่เวลา 16630 - 18070 วินาที ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์เห็นได้ชัดว่ามีความผิดพลาดมากกว่าช่วงพัก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะในการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ไม่ได้ใช้ข้อมูลในช่วงที่มีการคายประจุ ทำให้ในการจำลองค่าพารามิเตอร์ในช่วงคายประจุจะถูกประมาณด้วยวิธีการ Linear Interpolation ใน LUT บน MATLAB/SIMULINK

กราฟรูปที่ 4.32 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงที่เห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากหลังจาก 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.33 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ หลังจากเวลาดังกล่าว ความแม่นยำในการจำลองนั้นลดลงอย่างมากและเห็นได้ชัดทั้งในช่วงที่มีการคายและอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ กราฟรูปที่ 4.34 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตาม

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาที เป็นต้นไป

#### 4.4.3 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆเพื่อความเหมาะสม และสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.13 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

ตารางที่ 4.13 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2

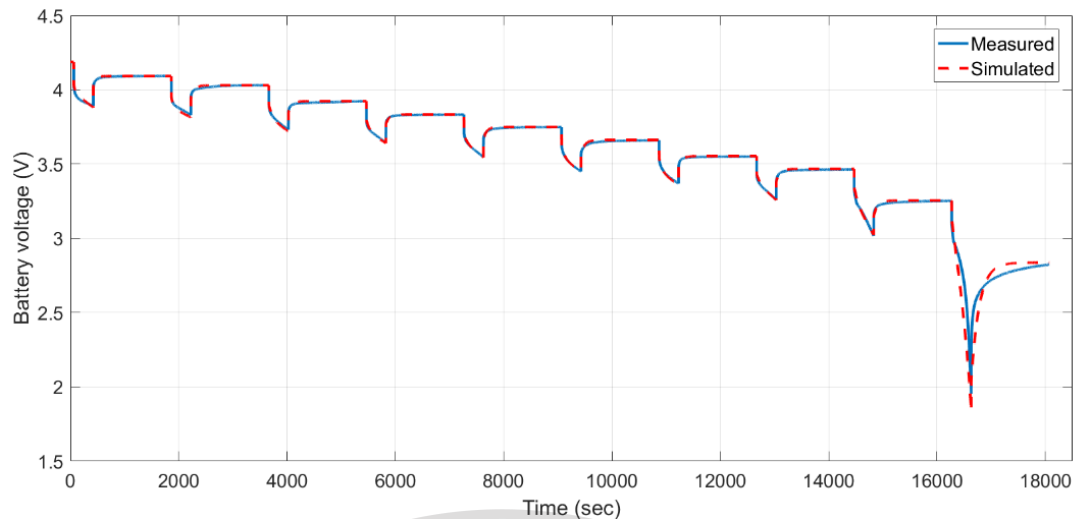
SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.046776	0.503182	0.026760	296.976127	23.864607
9.880277	0.038862	0.036727	0.004710	1805.180134	54.505988
19.883485	0.037103	0.031323	0.004624	2117.624827	53.712689
29.888190	0.035700	0.022093	0.005671	3054.215807	43.028219
39.899357	0.035127	0.031951	0.006424	2180.101538	37.237989
49.909260	0.033739	0.028558	0.008459	2048.113894	27.424330
59.923762	0.029400	0.021253	0.014215	2687.519333	15.644880
69.942025	0.032522	0.024205	0.011395	2674.741788	22.720263
79.965281	0.039099	0.029184	0.006256	2315.300420	80.737361
89.987324	0.039982	0.023310	0.008900	1946.090874	47.895732

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสดังที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.35 ถึง 4.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

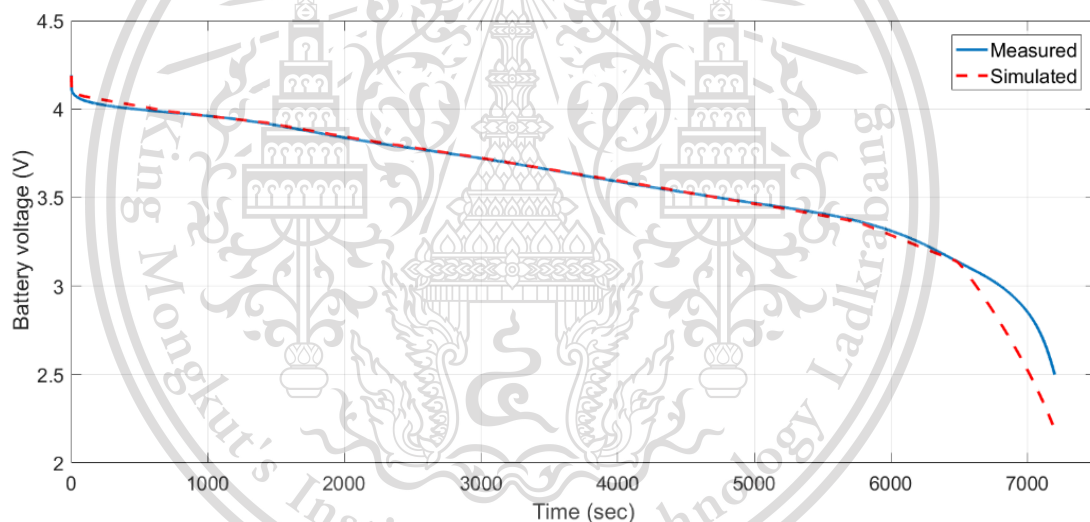
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.35 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least

Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2

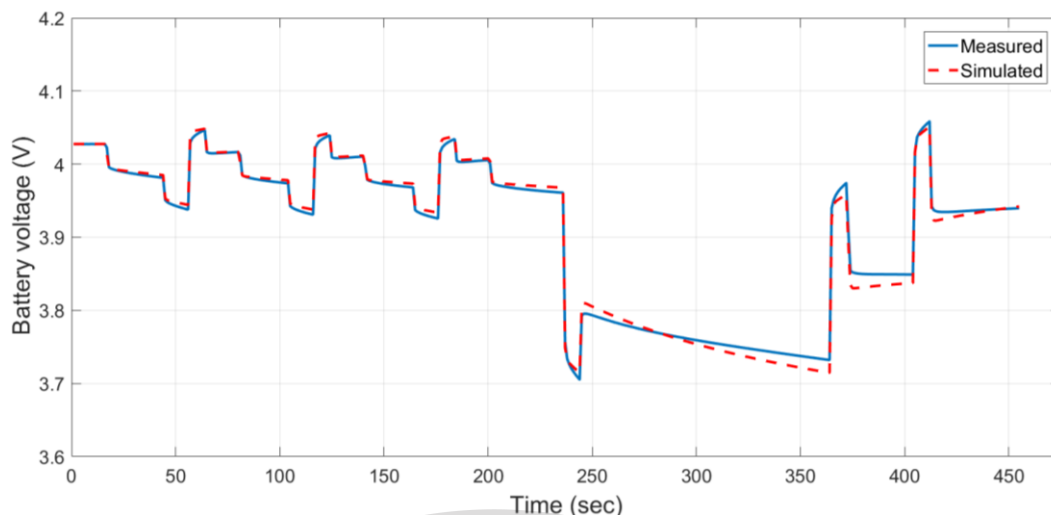


รูปที่ 4.36 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2

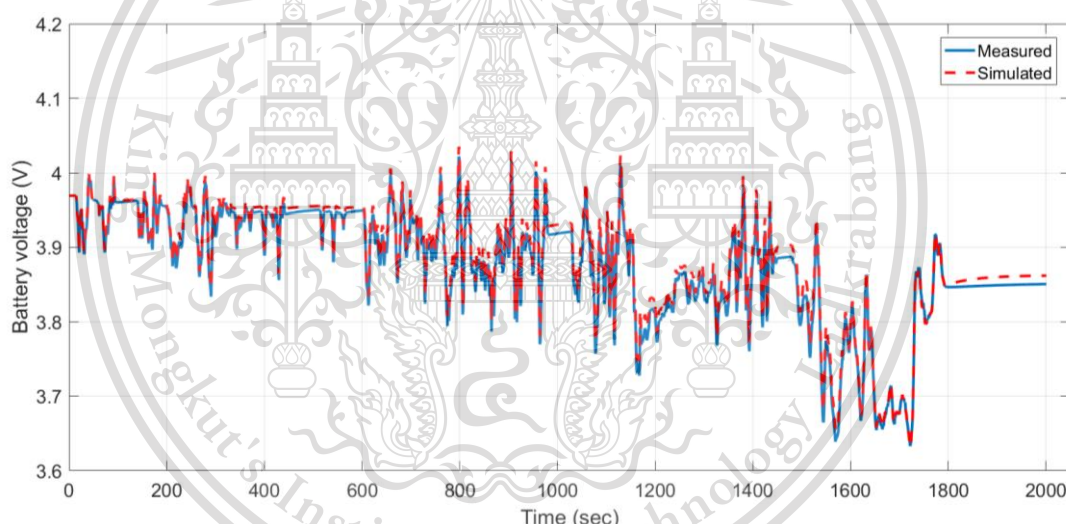
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.37 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2



รูปที่ 4.38 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 2

กราฟรูปที่ 4.35 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพักและช่วงคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดมากและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจุและช่วงพักรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.36 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้มอบให้โดยไม่มีเงื่อนไข และต้องอ้างถึงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 600 - 6500 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.37 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดจะเห็นได้ชัดในช่วงประมาณ 245 วินาที เป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.38 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.4.4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.14 ซึ่งแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

ตารางที่ 4.14 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 2

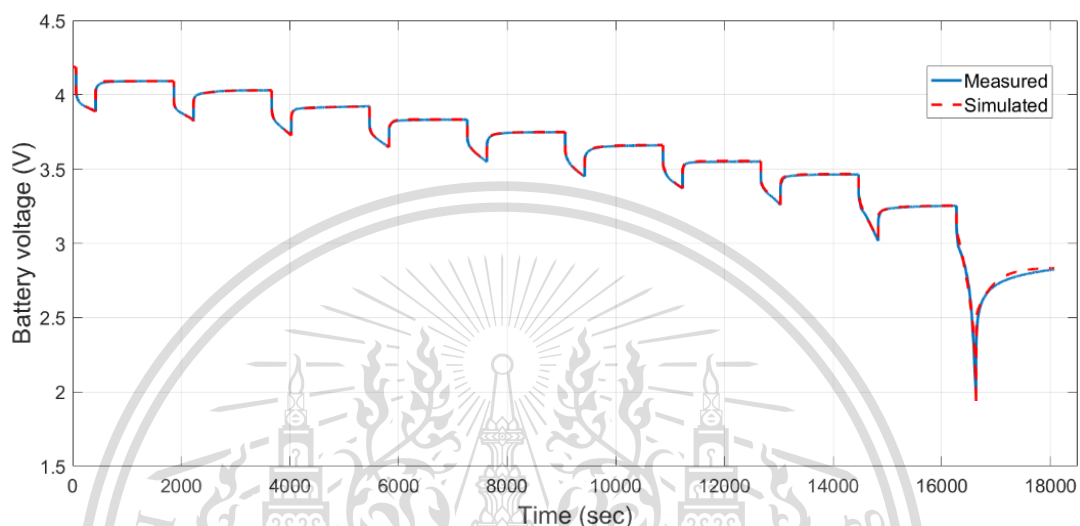
SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.000107	0.223777	0.894162	20.468914	344.071702
10	0.056392	0.008505	0.019586	4164.239419	12362.792463
20	0.041953	0.019881	0.010569	908.934825	21376.177961
30	0.042079	0.012288	0.007338	1507.049034	17843.292869
40	0.043565	0.018187	0.011981	2354.802733	25332.949205
50	0.043665	0.015118	0.020006	2055.597575	10285.104049
60	0.045378	0.017782	0.000230	3118.880676	39833.081134
70	0.043454	0.016252	0.003543	1345.920670	166672.860969
80	0.039260	0.018741	0.079037	696.203301	3308.158956
90	0.050633	0.018596	0.006615	2001.705035	87084.777848

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

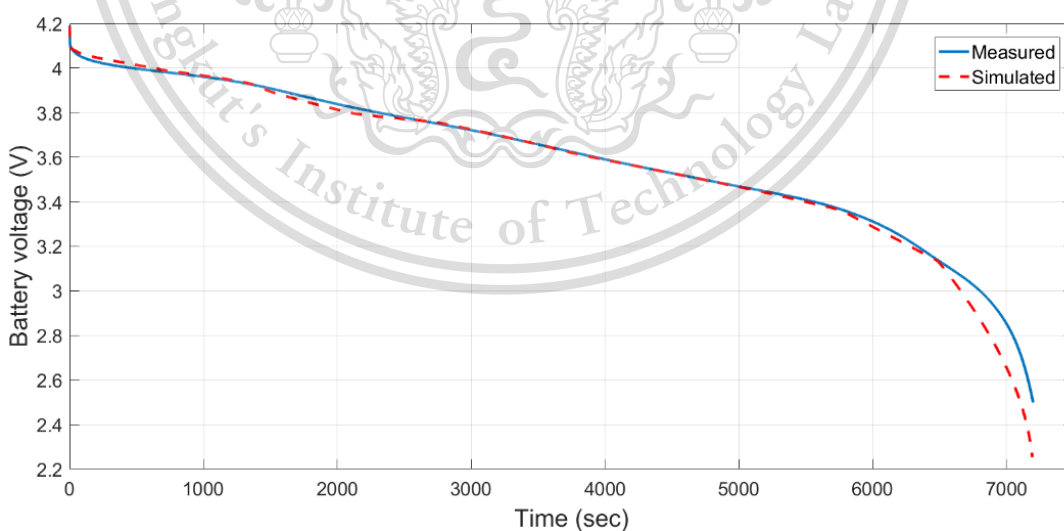
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคิงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.39 ถึง 4.42



รูปที่ 4.39 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคิงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2



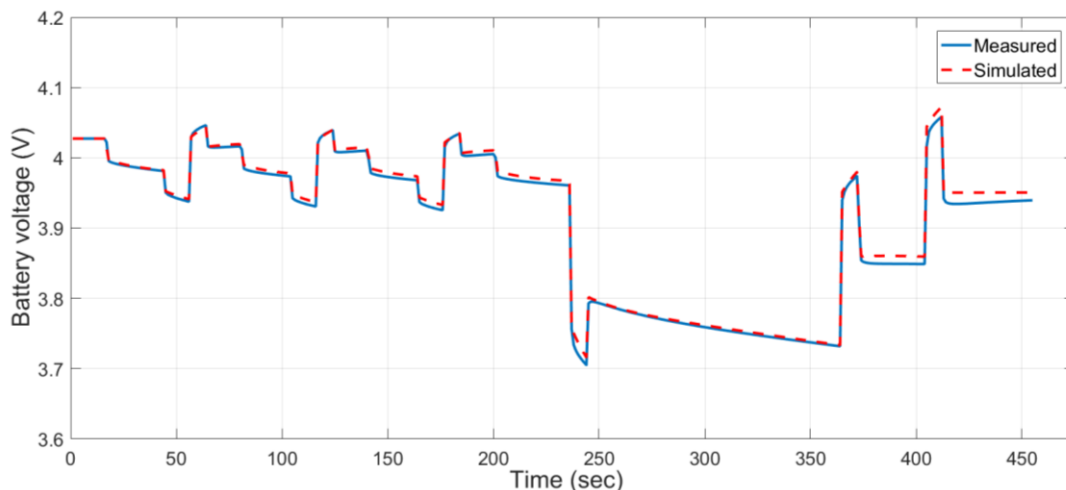
รูปที่ 4.40 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคิงที่

แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2

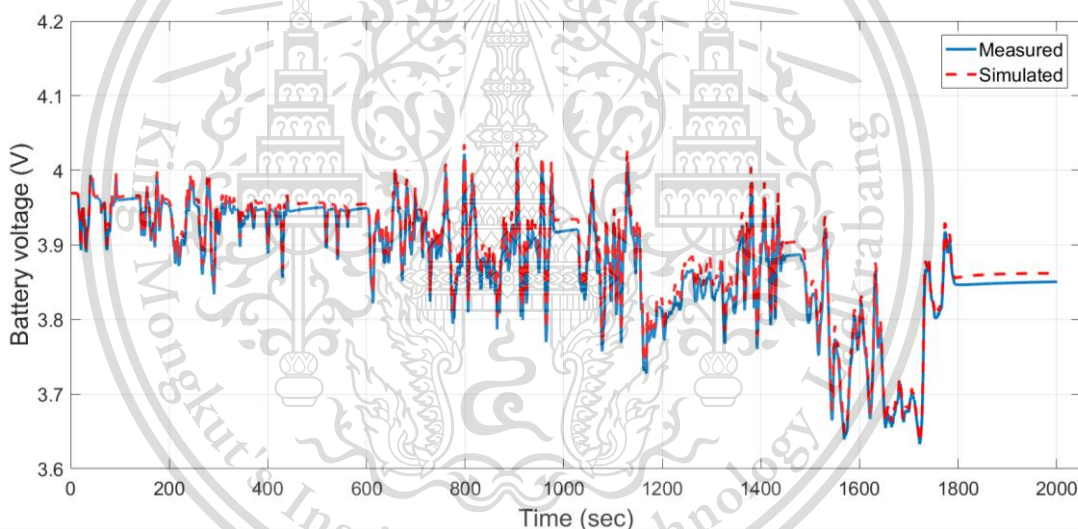
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.41 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2



รูปที่ 4.42 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 2

กราฟรูปที่ 4.39 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพัก และช่วงคายประจุได้อย่างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดเล็กน้อยและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจุ และช่วงพักในรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.40 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้อย่าง

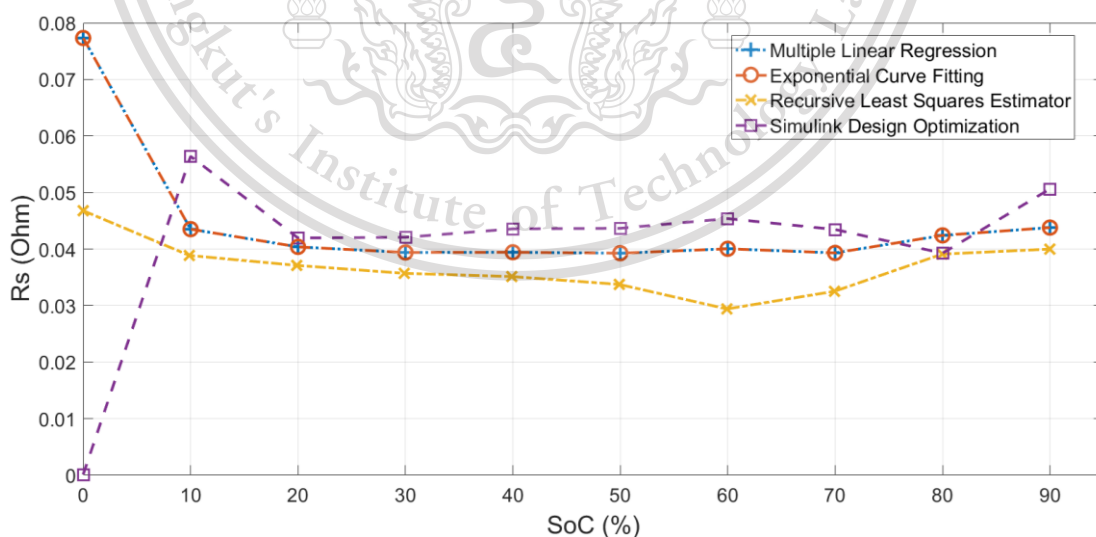
แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 2500 - 5000 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงในช่วงเริ่มการคายประจุถึงเวลาประมาณ 2500 วินาทีและมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.41 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 40 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากและเห็นได้ชัดในบางระดับกระแสของพลวัต

กราฟรูปที่ 4.42 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.4.5 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 วิธี

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ทั้ง 4 วิธีได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการเพื่อสังเกตถึงความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการ ดังกราฟที่ 4.43 , 4.44 , 4.45 ,4.46 และ 4.47 ซึ่งแสดงถึงการเปรียบเทียบค่า  $R_s$  ,  $R_1$  ,  $R_2$  ,  $C_1$  และ  $C_2$  ตามลำดับของทั้ง 4 วิธีของการหาค่าพารามิเตอร์



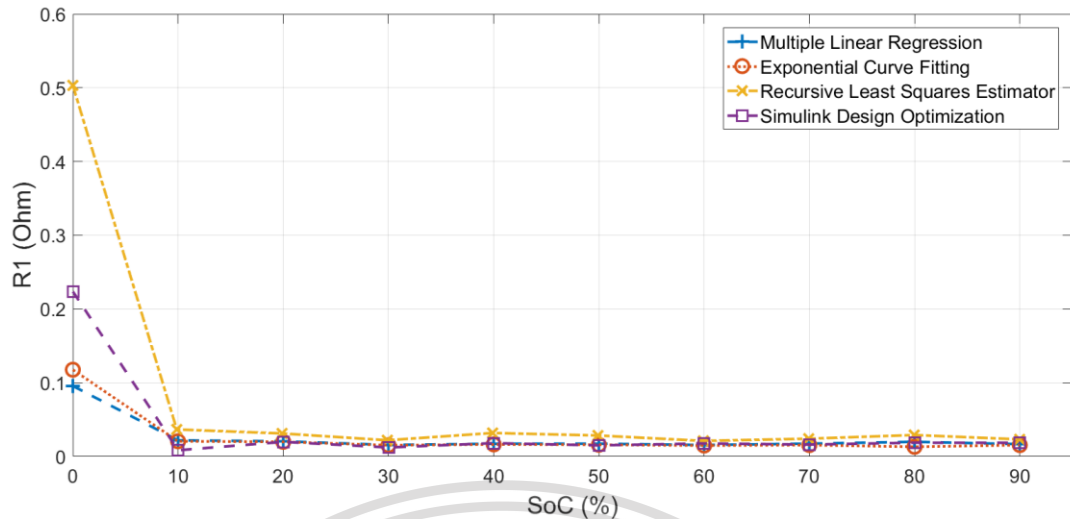
รูปที่ 4.43 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ใน

การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

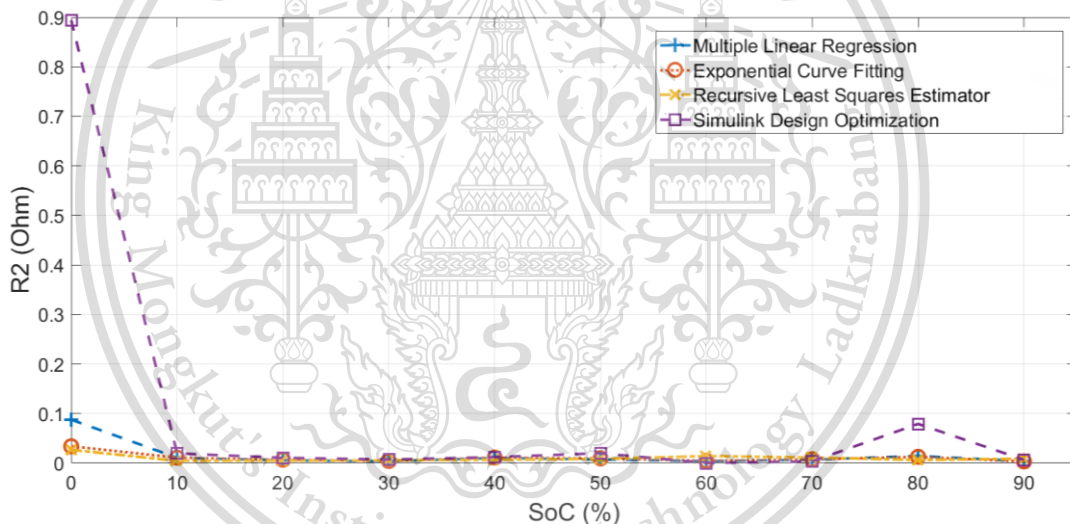
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.44 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

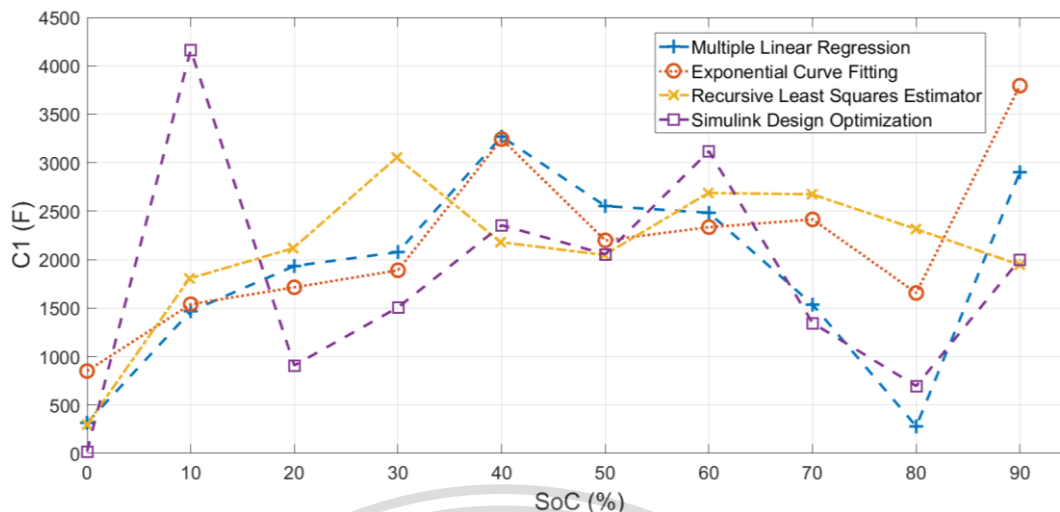


รูปที่ 4.45 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

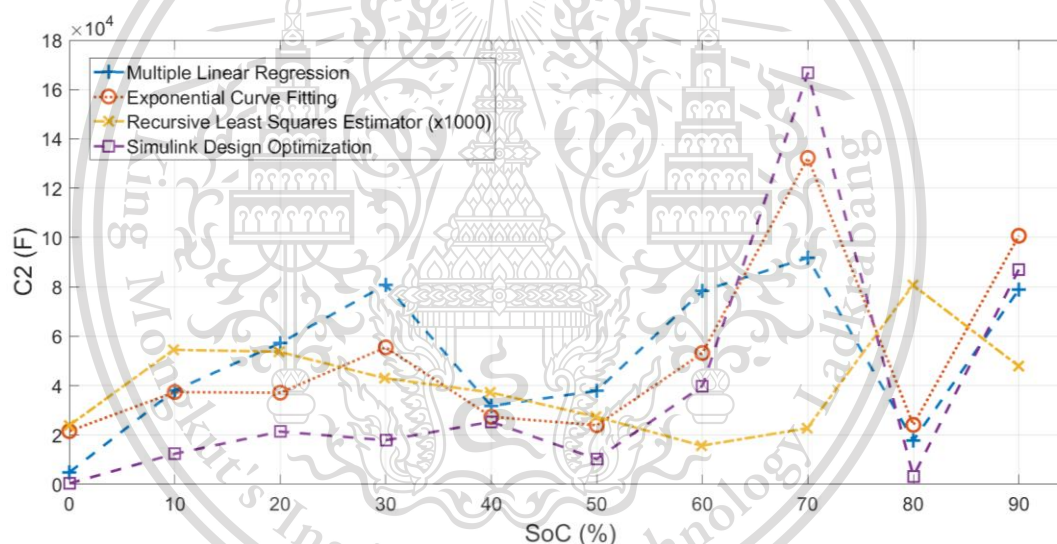
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.46 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี



รูปที่ 4.47 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

จากการนำค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการไปทดสอบในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ใน MATLAB โดยทำการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ คือ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เพื่อนำไปเทียบกับค่าจริงที่ได้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แล้วไปทำการหาร้อยละของค่าความผิดพลาดซึ่งใช้วิธีคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ ตารางที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบ

ไม่ว่ากรณีใด ร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบคายประจุ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ตารางที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ตารางที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ตารางที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

**ตารางที่ 4.15** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.013116	0.030552
Exponential Curve Fitting	0.012842	0.027252
Recursive Least Squares Estimator	0.012801	0.036166
Simulink Design Optimization Tool	0.004671	0.009749

การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ จากตารางที่ 4.15 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Exponential Curve Fitting และ Multiple Linear Regression ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Exponential Curve Fitting, Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.16** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.019124	0.033965
Exponential Curve Fitting	0.020914	0.035106
Recursive Least Squares Estimator	0.027618	0.077260
Simulink Design Optimization Tool	0.021324	0.049076

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันฯ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบกายประจักษ์ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง จากตารางที่ 4.16 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Multiple Linear Regression และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Exponential Curve Fitting, Simulink Design Optimization และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Multiple Linear Regression และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Exponential Curve Fitting, Simulink Design Optimization และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.17** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.006587	0.008412
Exponential Curve Fitting	0.013465	0.015472
Recursive Least Squares Estimator	0.006258	0.008052
Simulink Design Optimization Tool	0.005345	0.006899

การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 จากตารางที่ 4.17 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Recursive Least Squares Estimator, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.18** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 การทดสอบรอบที่ 2 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.012758	0.014298
Exponential Curve Fitting	0.014480	0.016414
Recursive Least Squares Estimator	0.009588	0.010781
Simulink Design Optimization Tool	0.011678	0.012664

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ กรุงลอนดอน ใช้ได้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

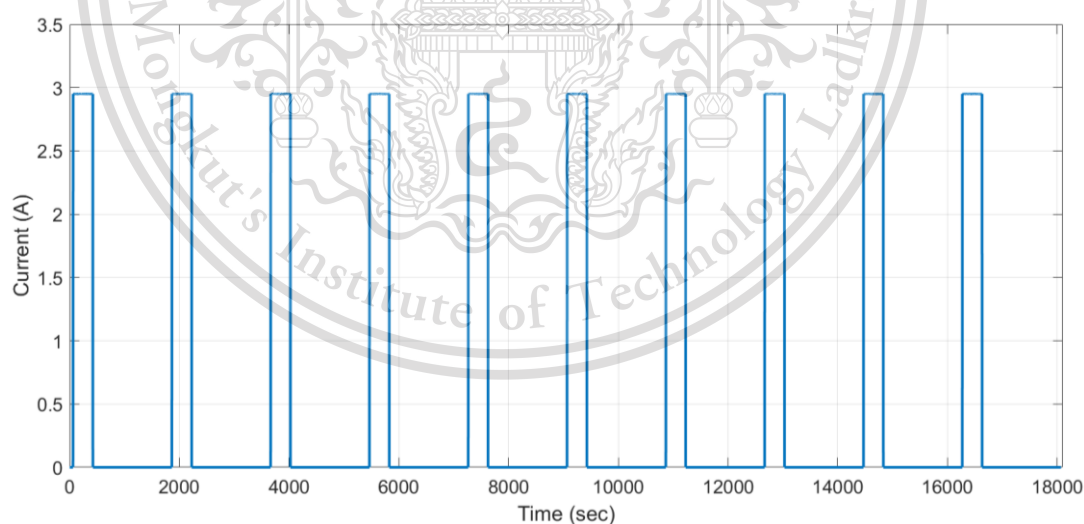
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 จากตารางที่ 4.18 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Simulink Design Optimization, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Simulink Design Optimization, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

#### 4.5 ผลการทดสอบรอบที่ 3

ในการทดสอบรอบที่ 3 ได้ทำการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่กระแสพลวัตต่าง ๆ ทั้งหมด 4 พลวัต ได้แก่ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะใช้การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ผลการทดสอบแสดงดังรูป

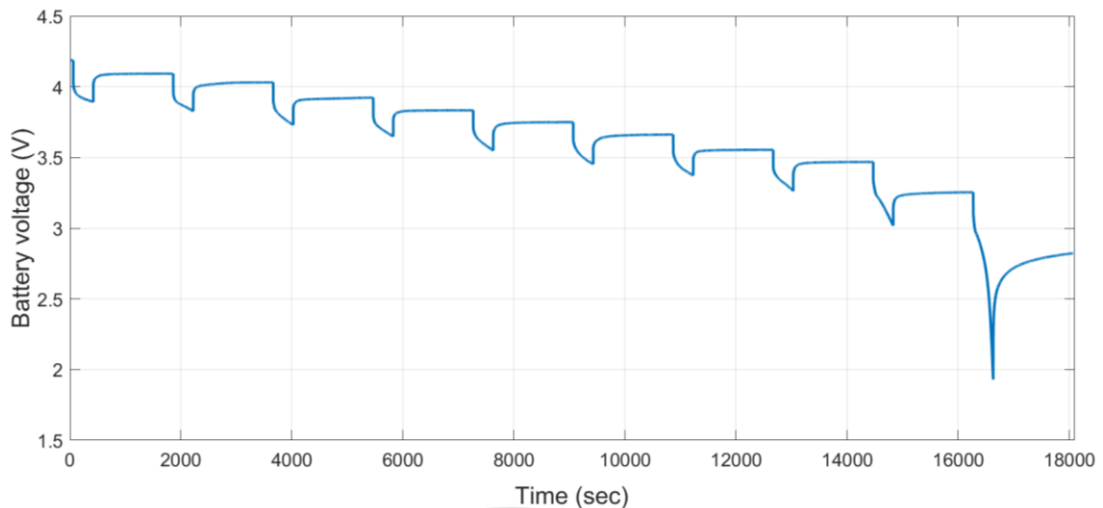


รูปที่ 4.48 กระแสจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.49 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ สำหรับการทดสอบรอบที่ 3

#### 4.5.1 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.19 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 – 90

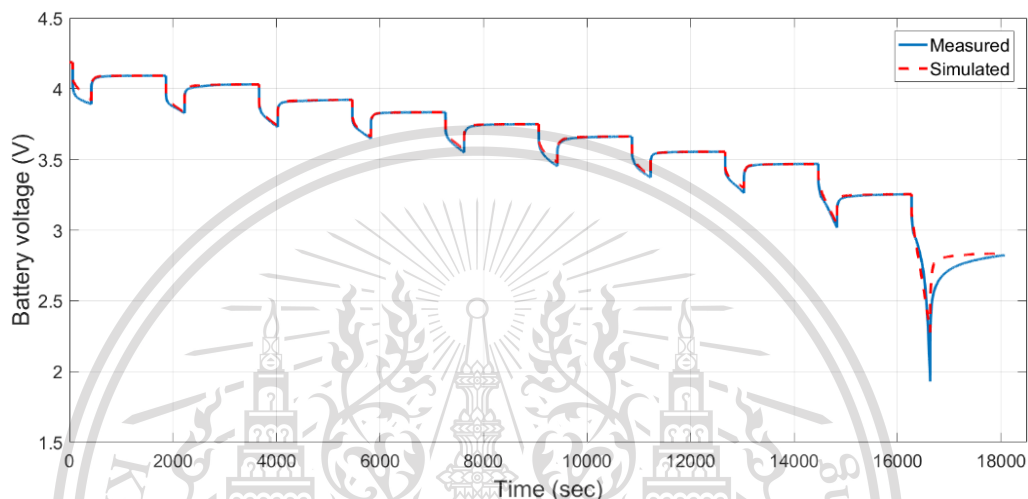
ตารางที่ 4.19 ค่าประมาณพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.080024	0.098356	0.088026	307.766913	4771.802253
10	0.046042	0.020846	0.010503	1600.013257	38851.45456
20	0.032782	0.021908	0.005786	1650.565783	49535.332189
30	0.038994	0.015159	0.004622	2005.144957	60171.734741
40	0.039289	0.017679	0.010280	3169.720569	32372.115066
50	0.039244	0.017406	0.007351	2535.035473	37131.605300
60	0.039943	0.015711	0.003762	2499.744993	79923.605524
70	0.039916	0.017690	0.006918	1605.246902	91173.744008
80	0.039798	0.021844	0.014635	287.072058	18234.050305
90	0.040783	0.017776	0.004356	2582.164284	65712.487152

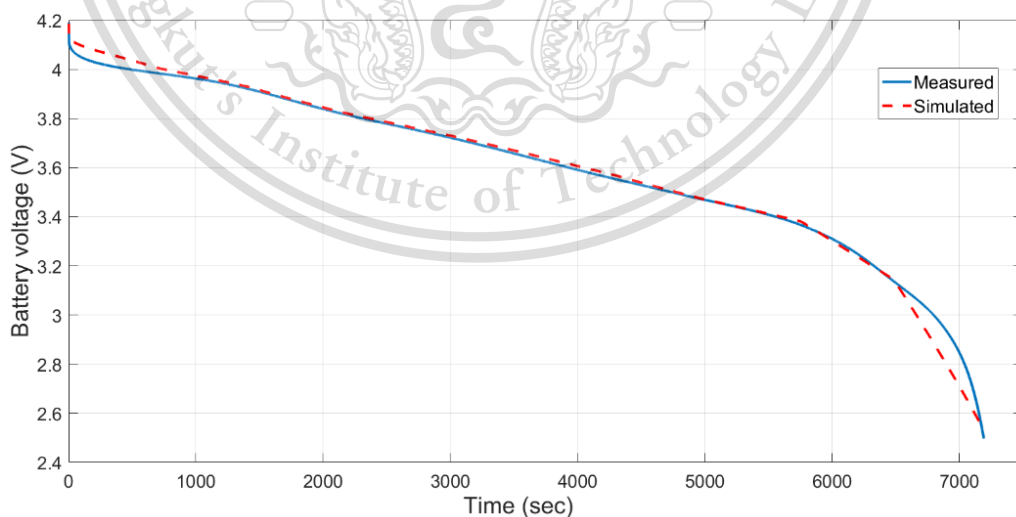
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.50 ถึง 4.53



รูปที่ 4.50 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3

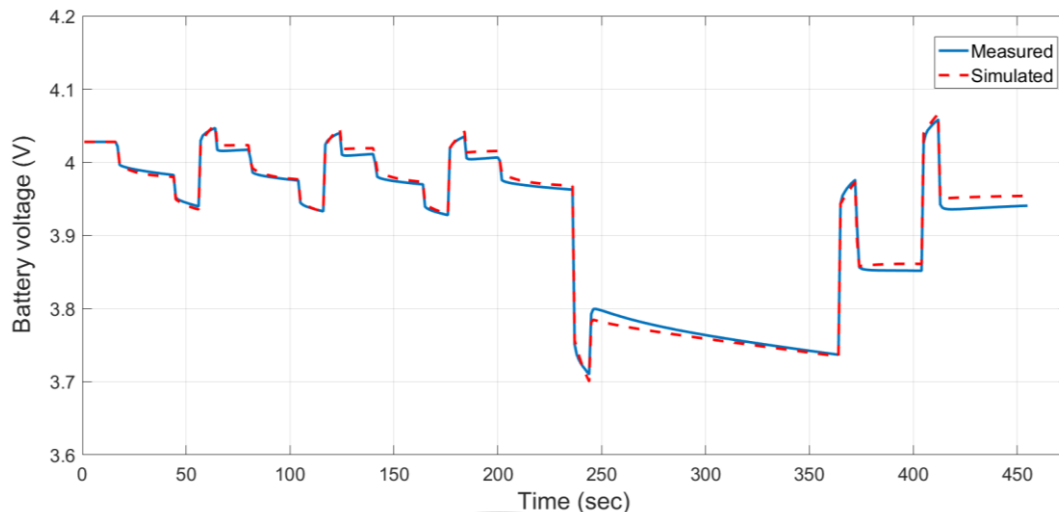


รูปที่ 4.51 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่

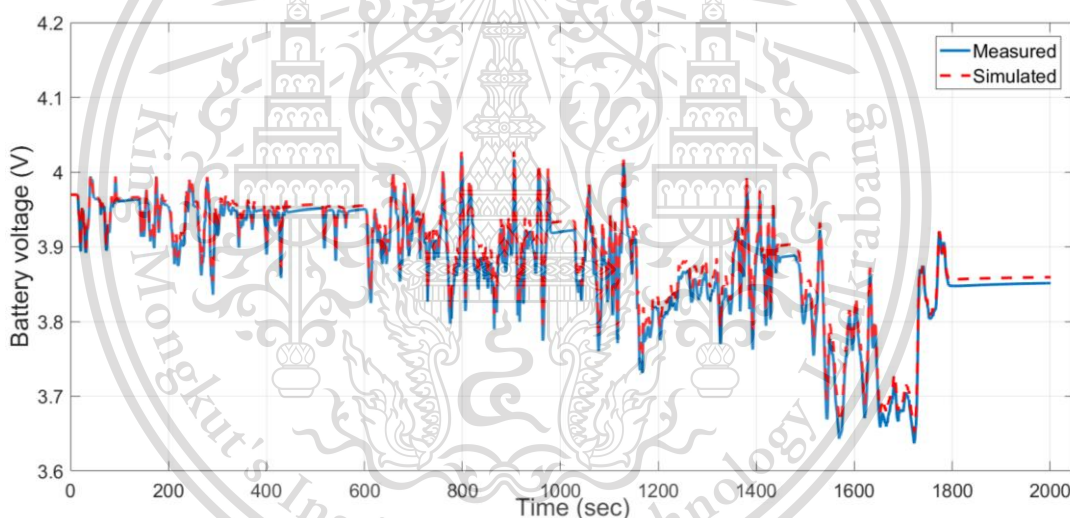
แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.52 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3



รูปที่ 4.53 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Multiple Linear Regression ในการทดสอบรอบที่ 3

กราฟรูปที่ 4.50 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Multiple Linear Regression ที่คล้ายกับ Exponential Curve Fitting ทำให้สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักระหว่างคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ยังมี ความผิดพลาดที่เห็นได้ชัดในช่วงพักที่เวลา 2224 - 3662 วินาที และที่เวลา 16630 - 18070 วินาที ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์เห็นได้ชัดว่ามีความผิดพลาดมากกว่าช่วงพัก ที่เป็นเช่นนั้นเพราะในการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Linear Regression จะไม่ได้ใช้ข้อมูลในช่วงที่มีการคายประจุเช่นเดียวกับวิธี Exponential Curve Fitting ทำให้ในการจำลองค่าพารามิเตอร์ในช่วงคายประจุจะถูกประมาณด้วยวิธีการ Linear Interpolation ใน LUT บน MATLAB/SIMULINK

กราฟรูปที่ 4.51 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบบเตอรีจากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟการจำลองมีรอยละของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยในช่วงเวลาคายประจุ 1000 - 6500 วินาที มีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากและเห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.52 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบบเตอรีจากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดในช่วง 2 ระดับกระแสสุดท้ายจะมีค่อนข้างมาก

กราฟรูปที่ 4.53 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบบเตอรีจากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.5.2 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆ เพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.20 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

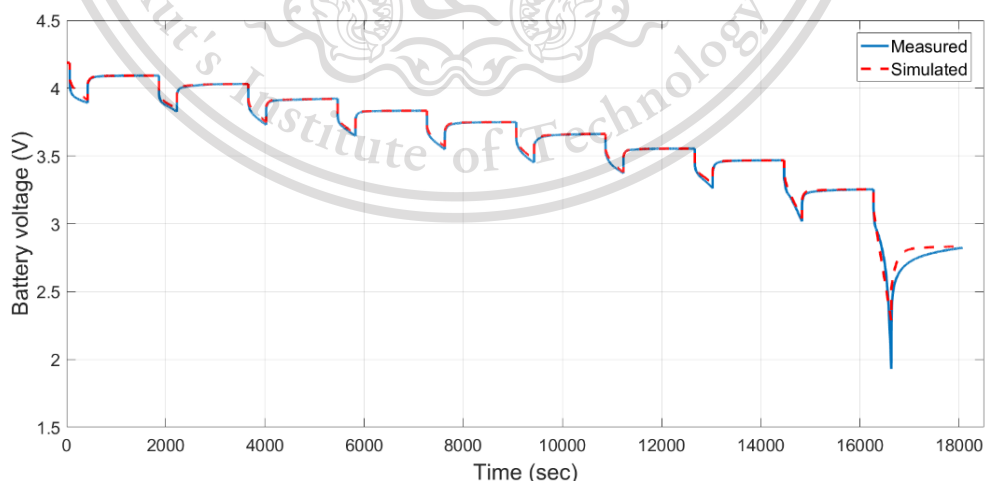
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.20 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.080024	0.121461	0.033890	823.308036	21162.678592
10	0.046042	0.021311	0.010879	1487.058794	37135.969470
20	0.032782	0.020323	0.006835	1657.206513	35096.430382
30	0.038994	0.014804	0.005152	1859.650870	48218.737974
40	0.039289	0.016969	0.010831	3185.225764	29322.151690
50	0.039244	0.015959	0.009303	2204.984177	23841.528444
60	0.039943	0.014966	0.004613	2342.592333	53007.168846
70	0.039916	0.015945	0.007612	2412.681413	131379.519145
80	0.039798	0.013821	0.012801	1651.861347	25303.399018
90	0.040783	0.015454	0.006948	2333.969467	27404.819980

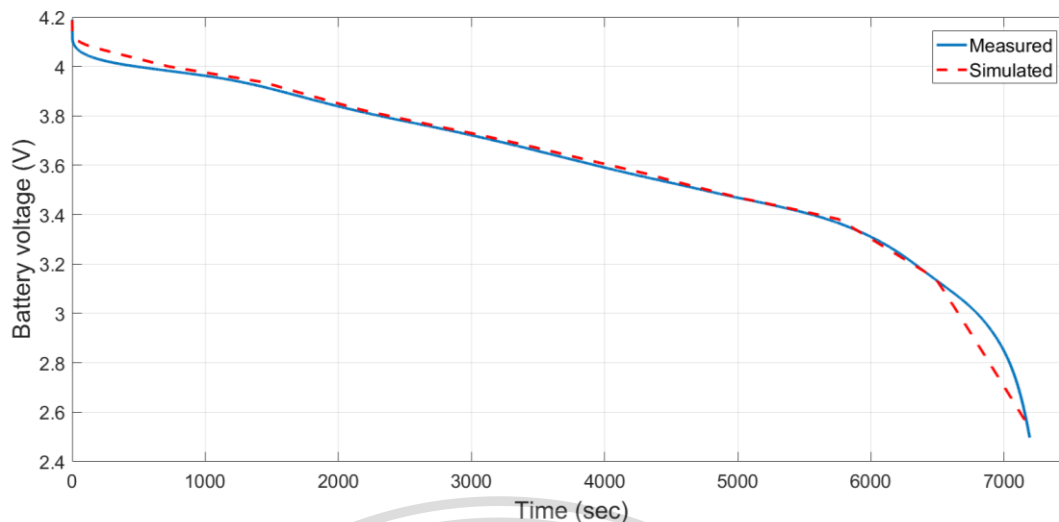
การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.54 ถึง 4.57



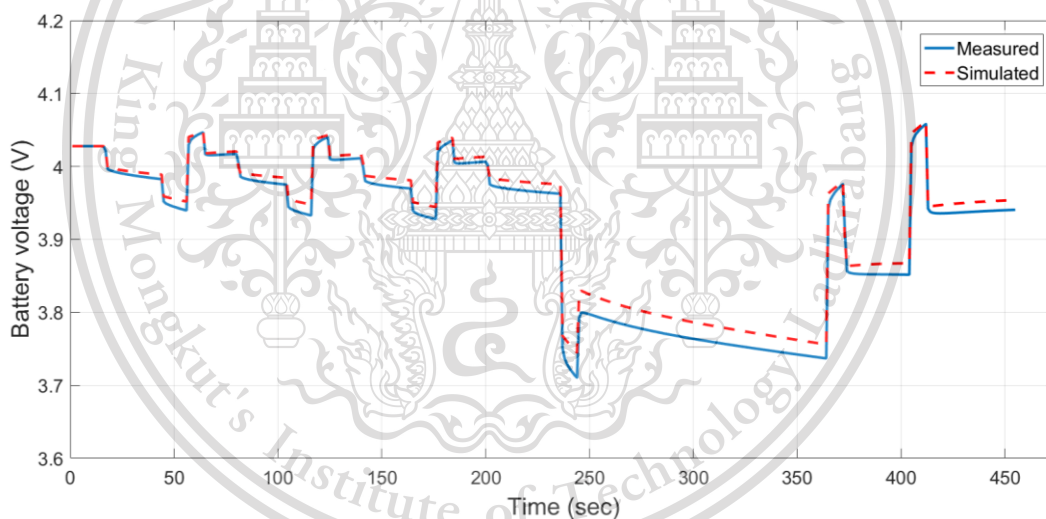
รูปที่ 4.54 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบเอกสารนี้เป็นเอกพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.55 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3

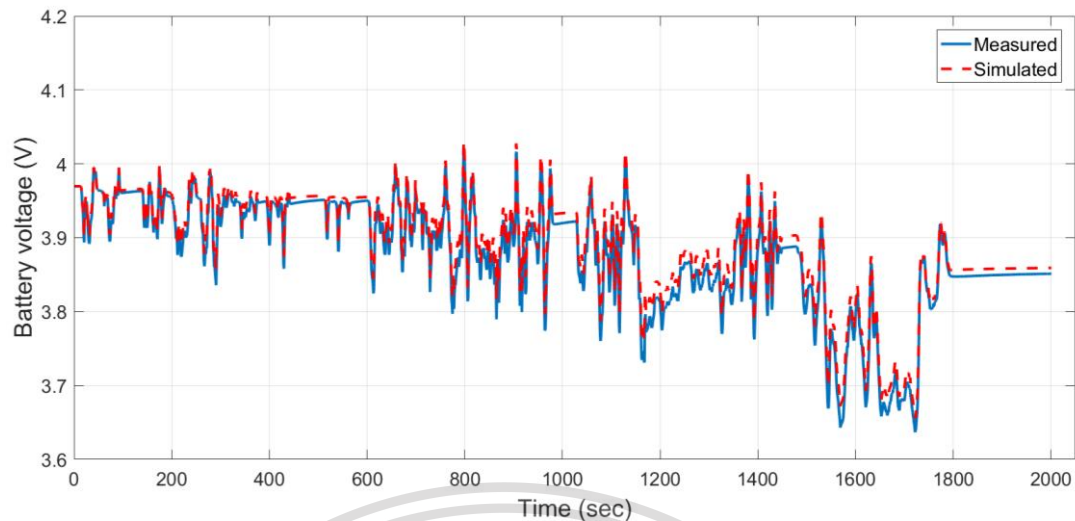


รูปที่ 4.56 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



**รูปที่ 4.57** ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Exponential Curve Fitting ในการทดสอบรอบที่ 3

กราฟรูปที่ 4.54 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ด้วยเทคนิคของ Exponential Curve Fitting สามารถจำลองส่วนโค้งของกราฟในแต่ละช่วงพักได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแต่ละพัลส์มีความแม่นยำน้อยกว่าช่วงพักโดยเฉพาะการคายประจุในพัลส์แรกและพัลส์สุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.55 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟการจำลองมีรอยละของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยน้อยในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 2000 - 6500 วินาที มีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากและเห็นได้ชัดในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.56 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ หลังจากเวลาดังกล่าว ความแม่นยำในการจำลองนั้นลดลงอย่างมากและเห็นได้ชัดทั้งในช่วงที่มีการคายและอัดประจุ

กราฟรูปที่ 4.57 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุแรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.5.3 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆเพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.21 ซึ่งแสดงถึงค่า พารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 – 90

ตารางที่ 4.21 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3

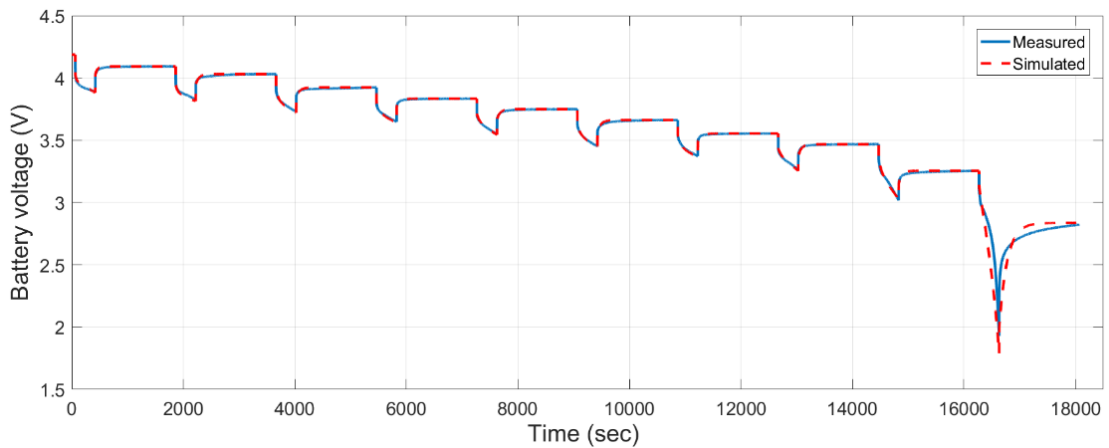
SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.046208	0.522568	0.023601	273.917499	22.537541
9.873366	0.033455	0.035153	0.009894	1617.341798	21.943970
19.873835	0.025175	0.033363	0.016199	1663.233815	13.133710
29.895004	0.033660	0.021010	0.007602	2934.908414	28.521912
39.909126	0.030181	0.031007	0.012477	2104.159557	16.861977
49.929650	0.031423	0.027963	0.011549	2043.307335	18.881098
59.950980	0.034134	0.021816	0.009223	2619.013042	25.287318
69.972333	0.035572	0.024899	0.007681	2520.004858	31.806420
79.983654	0.034798	0.029412	0.010298	1917.141948	22.481598
89.993054	0.028173	0.022574	0.021430	1543.314430	9.367305

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสดังที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.58 ถึง 4.61

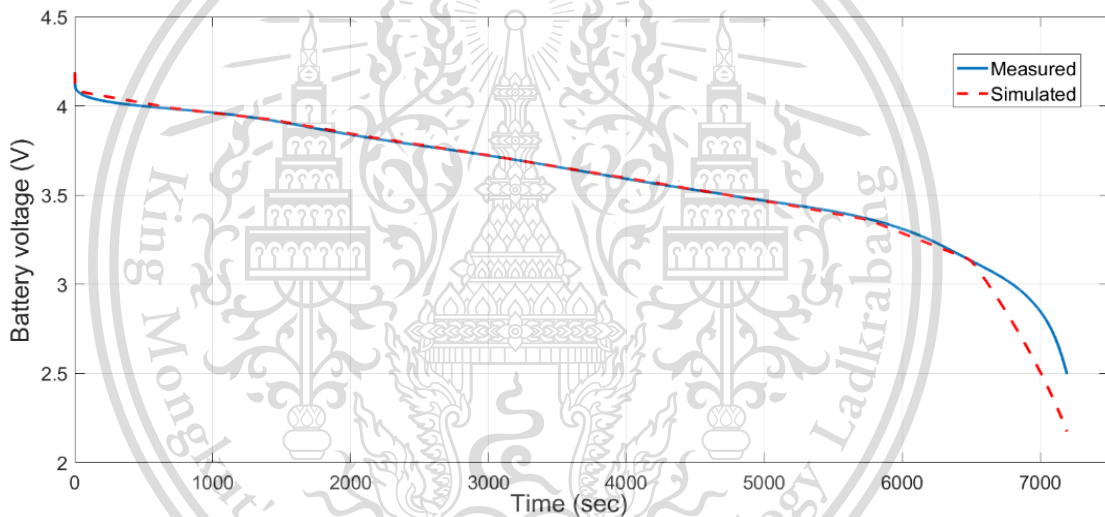
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.58 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3

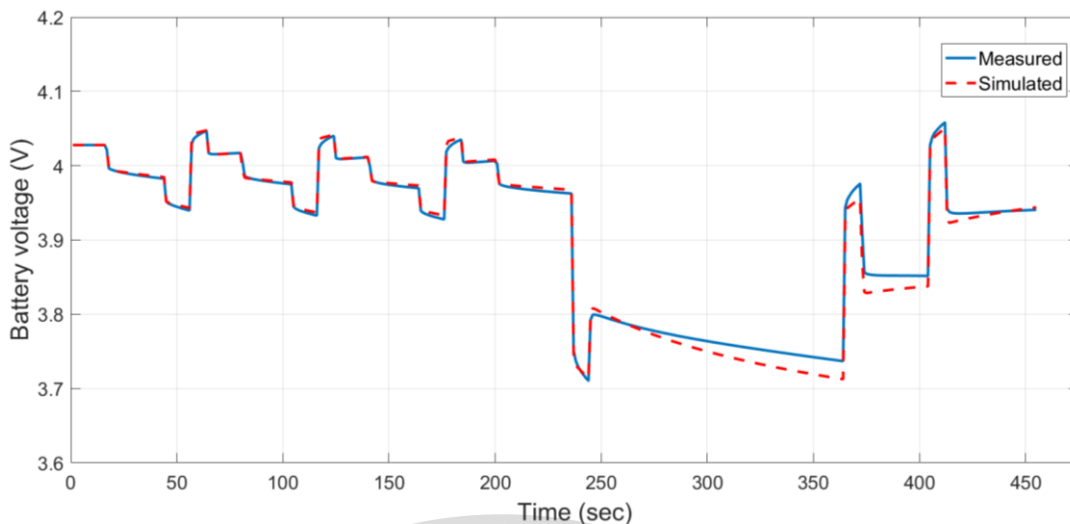


รูปที่ 4.59 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3

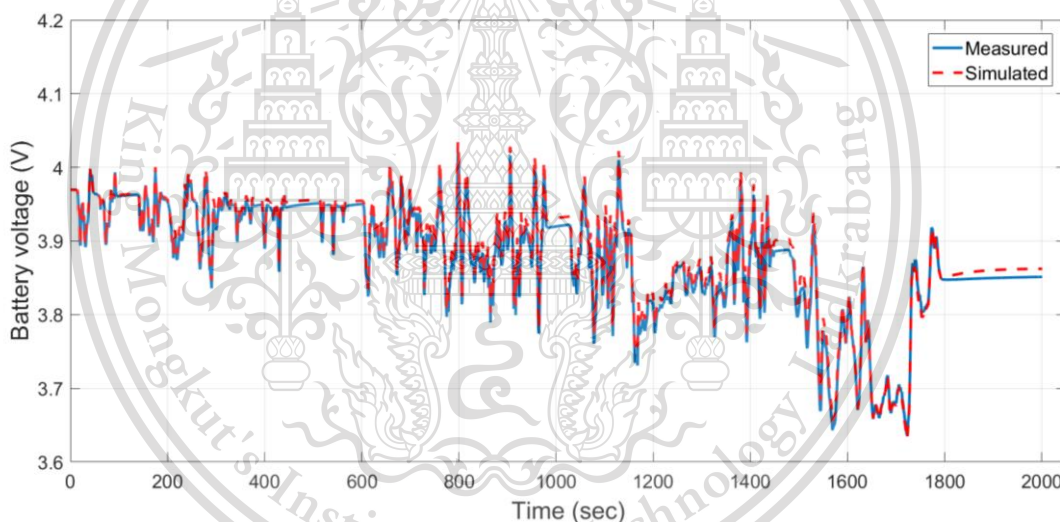
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.60 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3



รูปที่ 4.61 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Recursive Least Squares Estimator ในการทดสอบรอบที่ 3

กราฟรูปที่ 4.58 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพักและช่วงคายประจุได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดมากและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจุและช่วงพักรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.59 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้มอบให้โดยไม่มีเงื่อนไข และต้องอ้างถึงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่เราไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 600 - 6500 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากในช่วงเริ่มการคายประจุและหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.60 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 20 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นหลังจากเปลี่ยนระดับกระแส ซึ่งความผิดพลาดจะเห็นได้ชัดในช่วงประมาณ 245 วินาที เป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.61 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

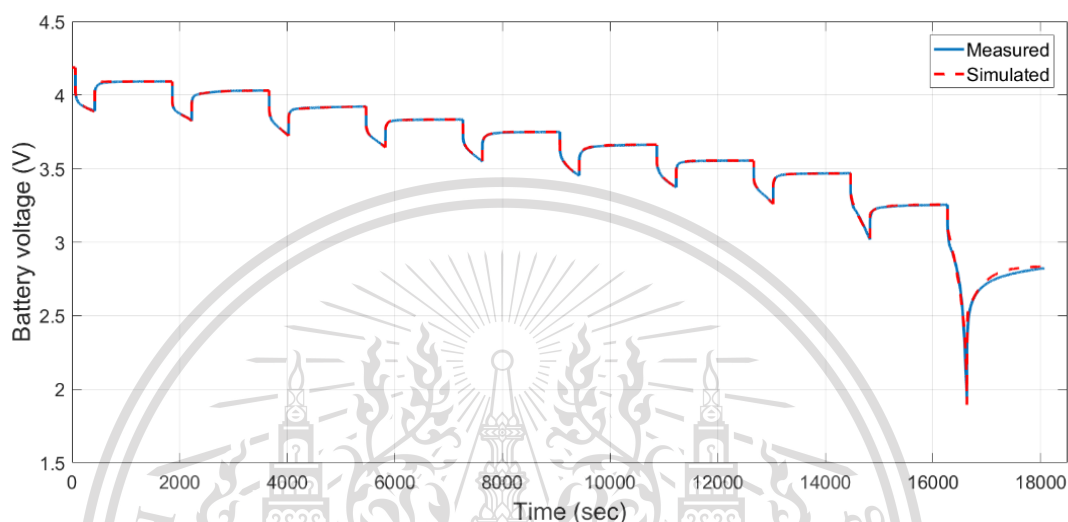
#### 4.5.4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool เนื่องจากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ได้ทศนิยมหลายตำแหน่งและพารามิเตอร์บางตัวมีค่าน้อยมากจึงได้ใช้ค่าพารามิเตอร์เป็นทศนิยม 6 ตำแหน่ง ในการวิเคราะห์ต่างๆเพื่อความเหมาะสมและสามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนได้ค่าดังตารางที่ 4.22 ซึ่งแสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สถานะของ SoC ตั้งแต่ร้อยละ 0 - 90

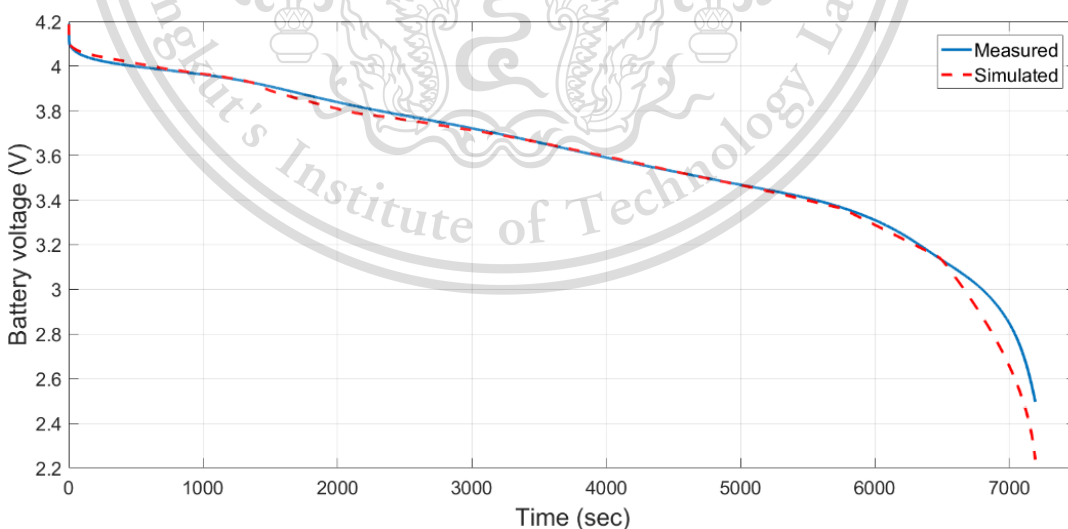
ตารางที่ 4.22 ค่าประมาณของพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการทดสอบรอบที่ 3

SoC (%)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )	$C_1$ (F)	$C_2$ (F)
0	0.000735	0.971388	0.234615	311.731334	19.501580
10	0.056386	0.012510	0.006976	12448.651443	4287.487307
20	0.045449	0.021089	0.005295	1356.811037	61627.873085
30	0.041603	0.011962	0.007556	1320.677576	17118.710137
40	0.043077	0.016032	0.015199	2195.395705	15950.047561
50	0.043240	0.016567	0.010531	6863.090510	1320.352301
60	0.044213	0.017247	0.007078	1916.782964	44723.837609
70	0.044155	0.016611	0.003738	1560.145574	183447.747921
80	0.042113	0.017489	0.101767	952.140436	2744.990875
90	0.050568	0.019412	0.006094	1765.437381	95682.821955

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า จากการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่แบบพัลส์ ด้วยวิธี Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3 ได้นำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการรันค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าด้วยพลวัตต่าง ๆ เทียบกับผลการทดสอบจริงแสดงดังกราฟรูปที่ 4.62 ถึง 4.65



รูปที่ 4.62 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3



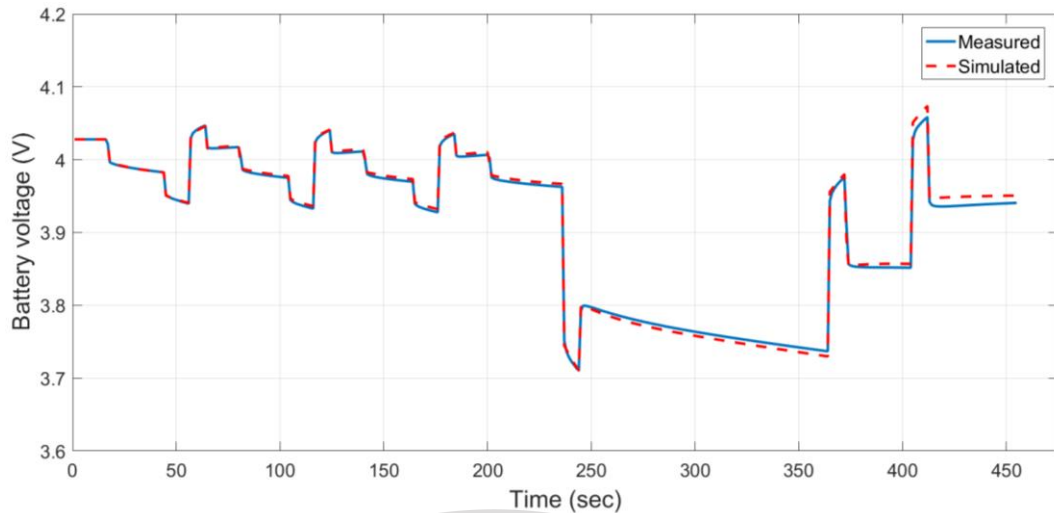
รูปที่ 4.63 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบกายประจูดัวยกระแสคคงที่

แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3

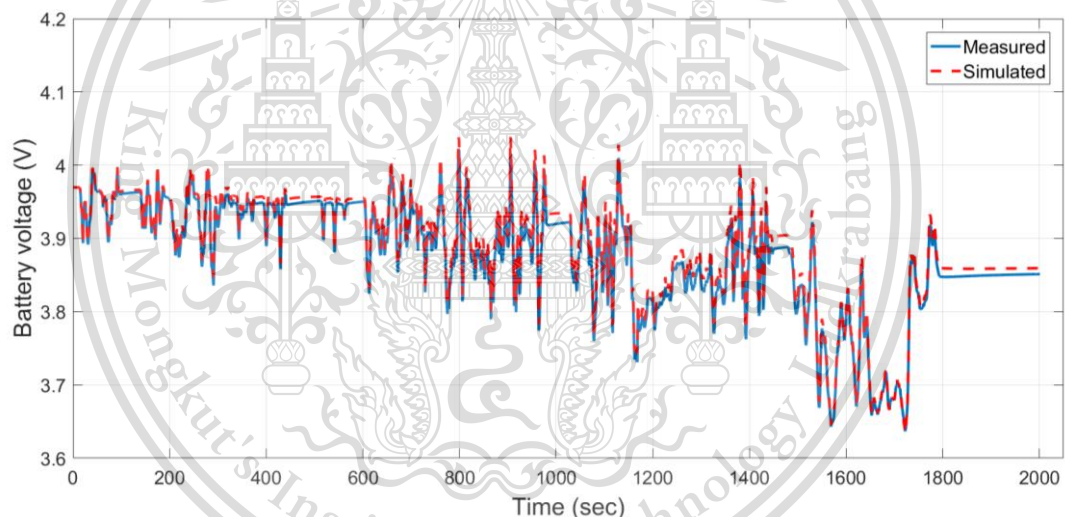
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.64 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3



รูปที่ 4.65 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง สำหรับวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์แบบ Simulink Design Optimization ในการทดสอบรอบที่ 3

กราฟรูปที่ 4.62 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองค่าในช่วงพัก และช่วงคายประจุได้อย่างแม่นยำ แต่จะมีความผิดพลาดเล็กน้อยและเห็นได้ชัดในช่วงการคายประจุ และช่วงพักในรอบสุดท้าย

กราฟรูปที่ 4.63 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบคายประจุ ด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองได้อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้สำหรับเจ้าของ และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

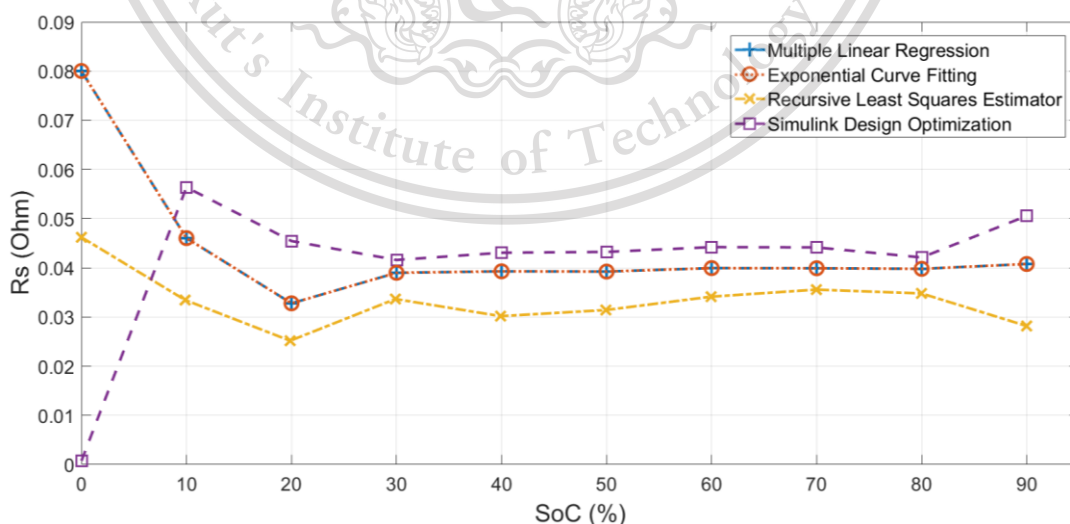
แม่นยำในช่วงเวลาคายประจุประมาณ 3000 - 5000 วินาที และมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงในช่วงเริ่มการคายประจุถึงเวลาประมาณ 3000 วินาทีและมีความผิดพลาดจากค่าการทดสอบจริงมากหลังเวลา 6500 วินาทีเป็นต้นไป

กราฟรูปที่ 4.64 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟในช่วงประมาณ 60 วินาทีแรก สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ และมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากและเห็นได้ชัดในบางระดับกระแสของพลวัต

กราฟรูปที่ 4.65 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่จากการจำลองการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง จากกราฟสามารถจำลองรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าระหว่างอัดและคายประจุได้ตามผลการทดสอบจริง แต่ในช่วงที่มีการคายประจุส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าที่ตกลงมาไม่ลึกเท่าค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าจะสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในช่วงพักการขับเคลื่อน เช่น ที่เวลา 443 - 514 วินาที และหลังรอบขับเคลื่อนที่เวลา 1800 วินาทีเป็นต้นไป

#### 4.5.5 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 วิธี

จากการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ทั้ง 4 วิธีได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการเพื่อสังเกตถึงความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการ ดังกราฟที่ 4.66 , 4.67 , 4.68 , 4.69 และ 4.70 ซึ่งแสดงถึงการเปรียบเทียบค่า  $R_s$  ,  $R_1$  ,  $R_2$  ,  $C_1$  และ  $C_2$  ตามลำดับของทั้ง 4 วิธีของการหาค่าพารามิเตอร์

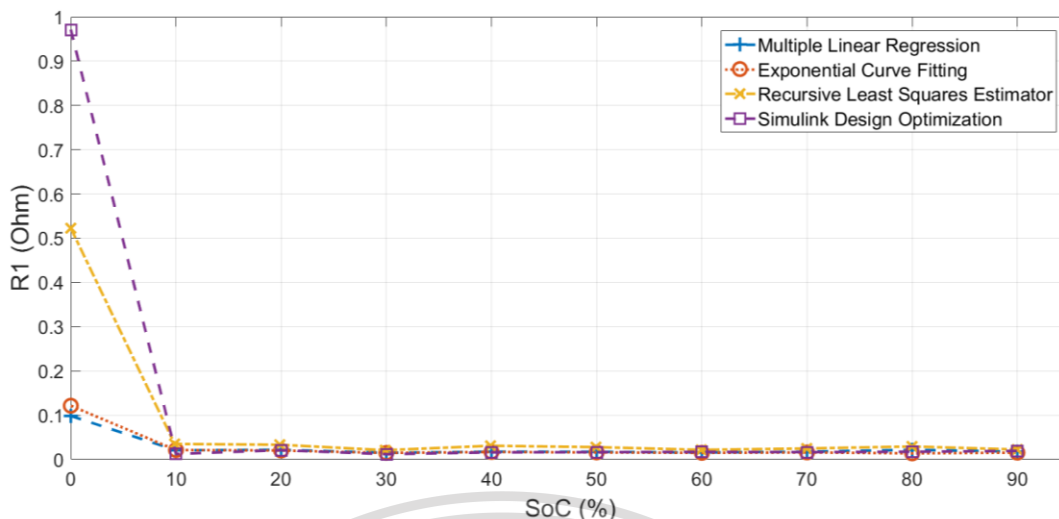


รูปที่ 4.66 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า การทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

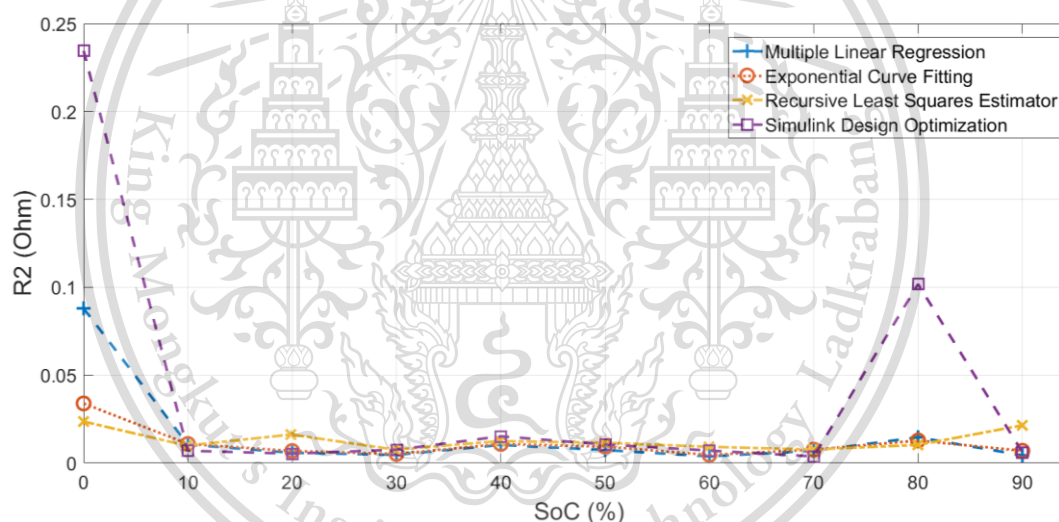
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.67 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

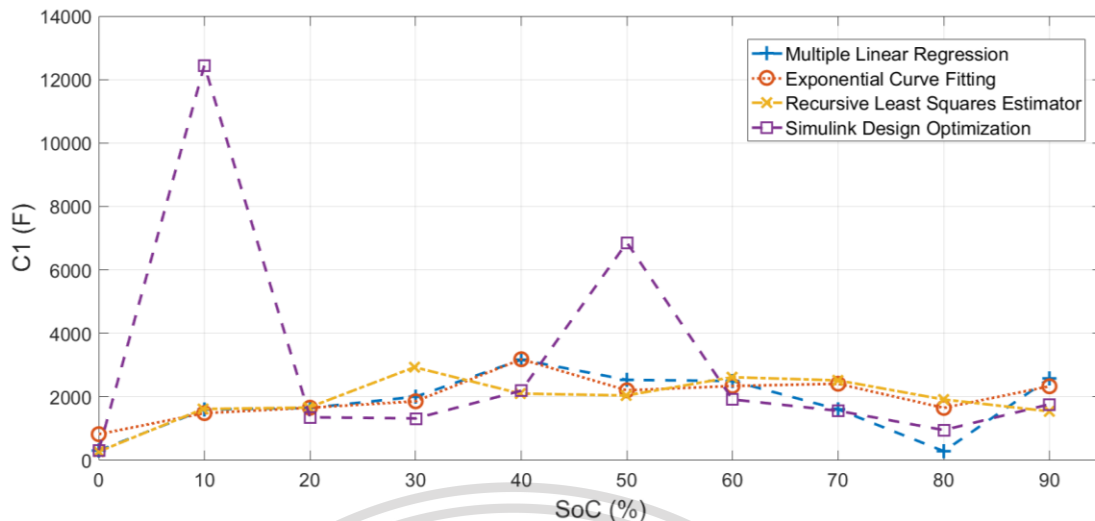


รูปที่ 4.68 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

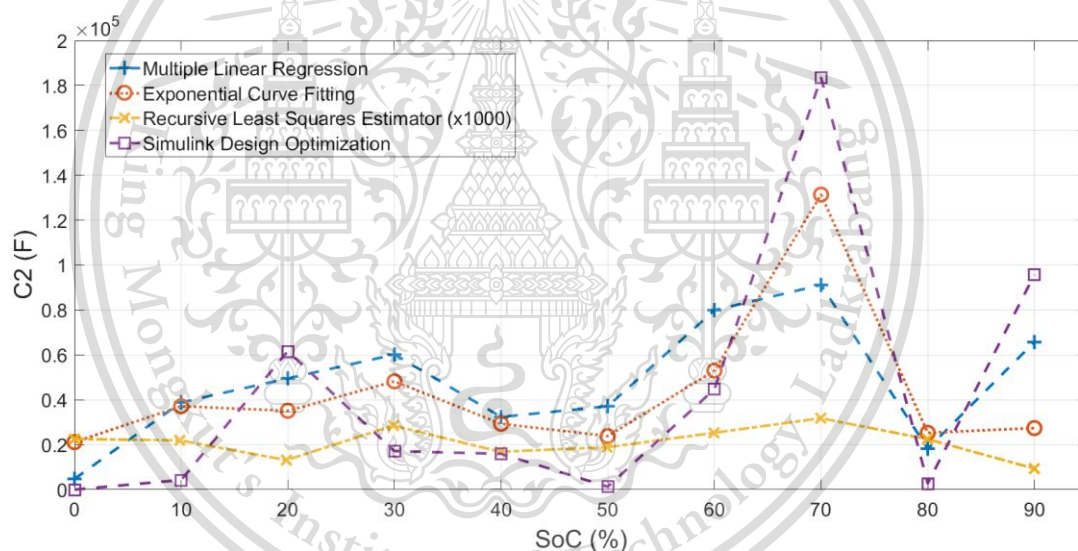
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.69 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ใน การทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี



รูปที่ 4.70 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ใน การทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

จากการนำค่าพารามิเตอร์ในแต่ละวิธีการไปทดสอบในแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ใน MATLAB โดยทำการทดสอบในรูปแบบต่าง ๆ คือ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 เพื่อนำไปเทียบกับค่าจริงที่ได้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แล้วไปทำการหาร้อยละของค่าความผิดพลาดซึ่งใช้วิธีคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ ตารางที่ 4.23 เป็นการเปรียบเทียบไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น ล้วนทำหน้าที่ให้ข้อมูลเปรียบเทียบ และต้องอ้างอิงถึงค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบคายประจุ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ตารางที่ 4.24 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบกายประจุกด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ตารางที่ 4.25 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ตารางที่ 4.26 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งเป็นการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3

**ตารางที่ 4.23** ร้อยละของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ สำหรับการทดสอบกายประจุกด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.012865	0.031545
Exponential Curve Fitting	0.012242	0.027877
Recursive Least Squares Estimator	0.012895	0.039678
Simulink Design Optimization Tool	0.004197	0.010083

การทดสอบกายประจุกด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ จากตารางที่ 4.23 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบครั้งนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมาคือ Exponential Curve Fitting, Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมาคือ Exponential Curve Fitting, Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.24** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบกายประจุกด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.019107	0.034210
Exponential Curve Fitting	0.020228	0.035321
Recursive Least Squares Estimator	0.027573	0.079578
Simulink Design Optimization Tool	0.021852	0.047810

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีการเกษตรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบคายประจูดัวยกระแสดงที่แบบตอเนื่อง จากตารางที่ 4.24 เห็นไดว้ในการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Multiple Linear Regression และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมาคือ Exponential Curve Fitting, Simulink Design Optimization และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดก่าลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Multiple Linear Regression และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดก่าลังสองน้อยลงมาคือ Exponential Curve Fitting, Simulink Design Optimization และ Recursive Least Squares Estimator ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.25** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.006122	0.007481
Exponential Curve Fitting	0.012924	0.015052
Recursive Least Squares Estimator	0.007081	0.010430
Simulink Design Optimization Tool	0.004493	0.005659

การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 จากตารางที่ 4.25 เห็นไดว้ในการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมาคือ Multiple Linear Regression, Recursive Least Squares Estimator, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดก่าลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Simulink Design Optimization และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดก่าลังสองน้อยลงมาคือ Multiple Linear Regression, Recursive Least Squares Estimator, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.26** ค่าความผิดพลาด สำหรับการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 ในการทดสอบรอบที่ 3 ทั้ง 4 วิธี

วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์	MAE	RMSE
Multiple Linear Regression	0.011437	0.012760
Exponential Curve Fitting	0.013117	0.014751
Recursive Least Squares Estimator	0.008752	0.009904
Simulink Design Optimization Tool	0.010157	0.011227

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยฯ  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

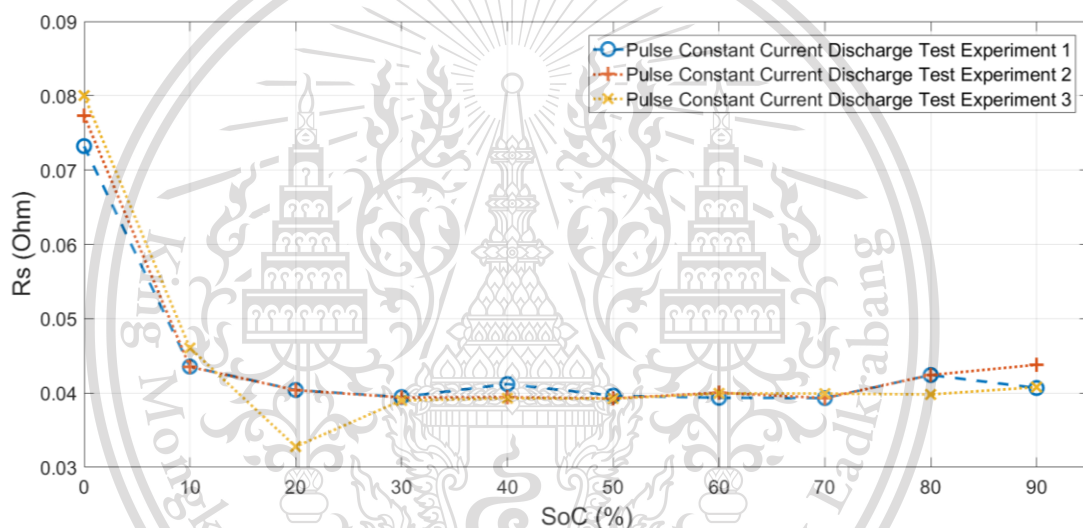
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 จากตารางที่ 4.26 เห็นได้ว่าการทดสอบรอบนี้ ในส่วนค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์วิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธีที่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยลงมากคือ Simulink Design Optimization, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ และในส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองวิธีที่มีค่าน้อยที่สุดคือวิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธีที่มีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยลงมากคือ Simulink Design Optimization, Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting ตามลำดับ

## 4.6 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 รอบการทดสอบ

### 4.6.1 กราฟการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

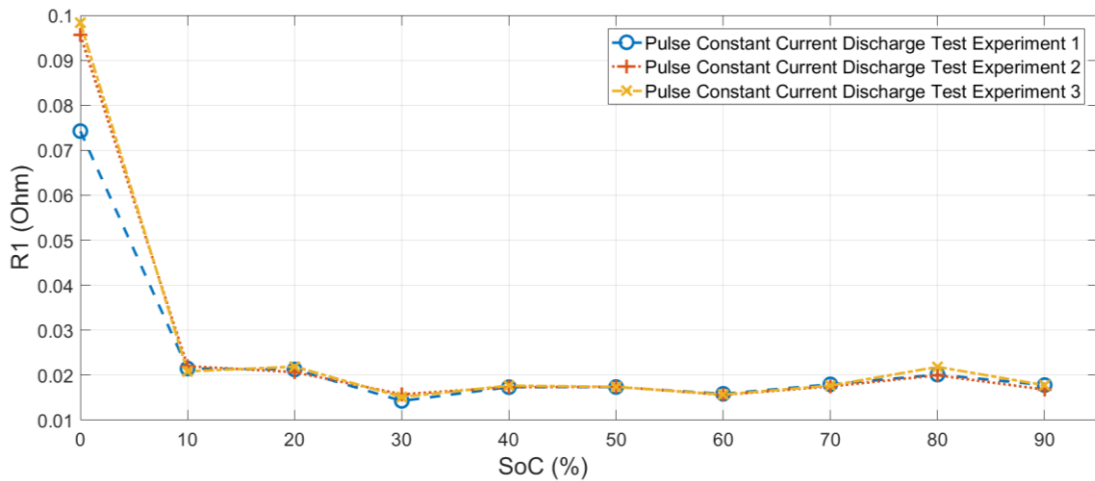


รูปที่ 4.71 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบภายใต้กระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression

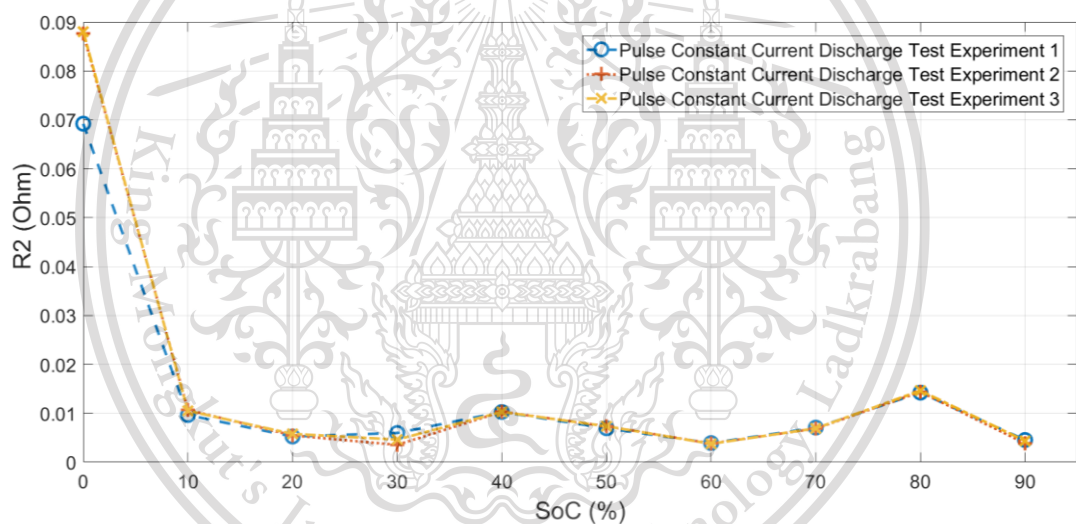
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.72 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression

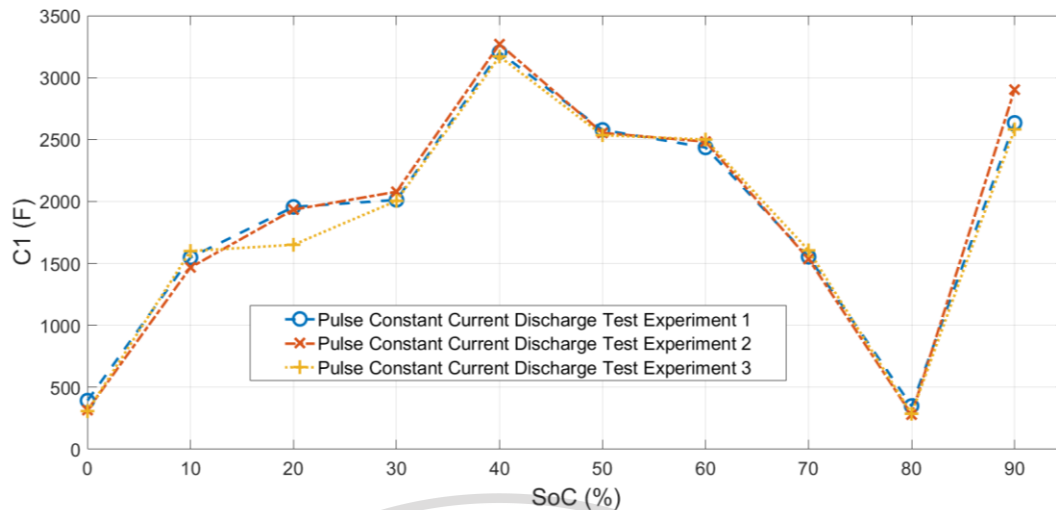


รูปที่ 4.73 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression

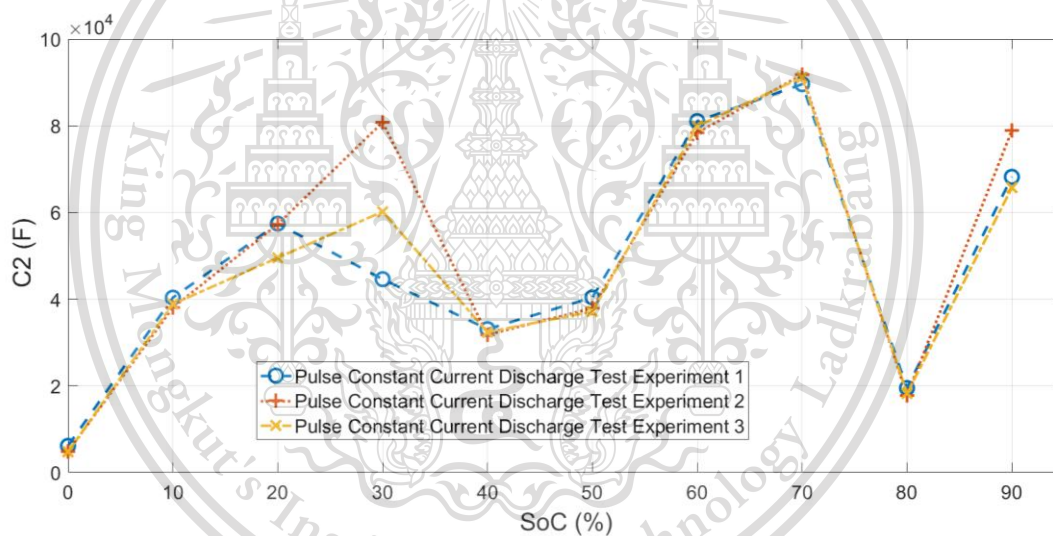
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.74 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression



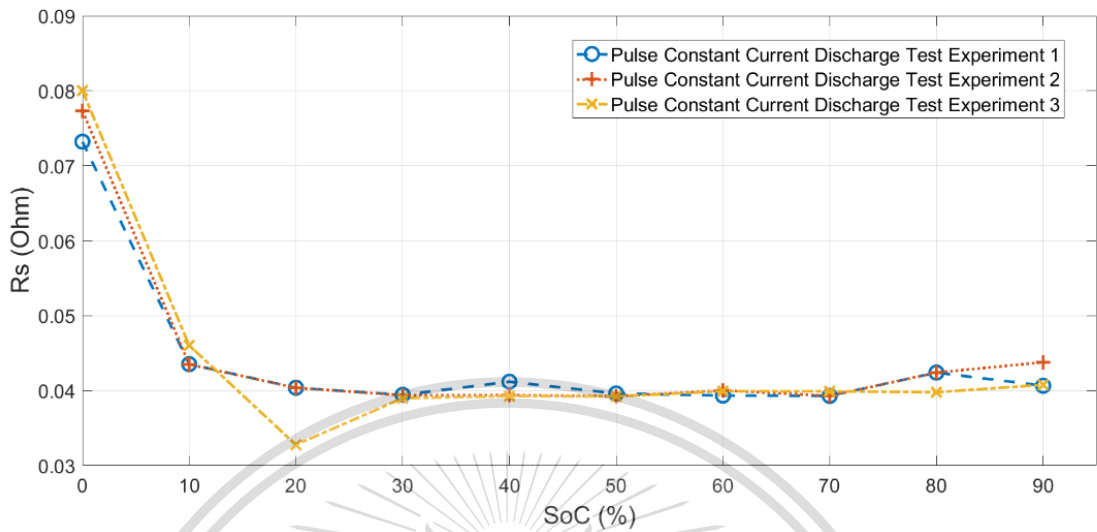
รูปที่ 4.75 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Multiple Linear Regression

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

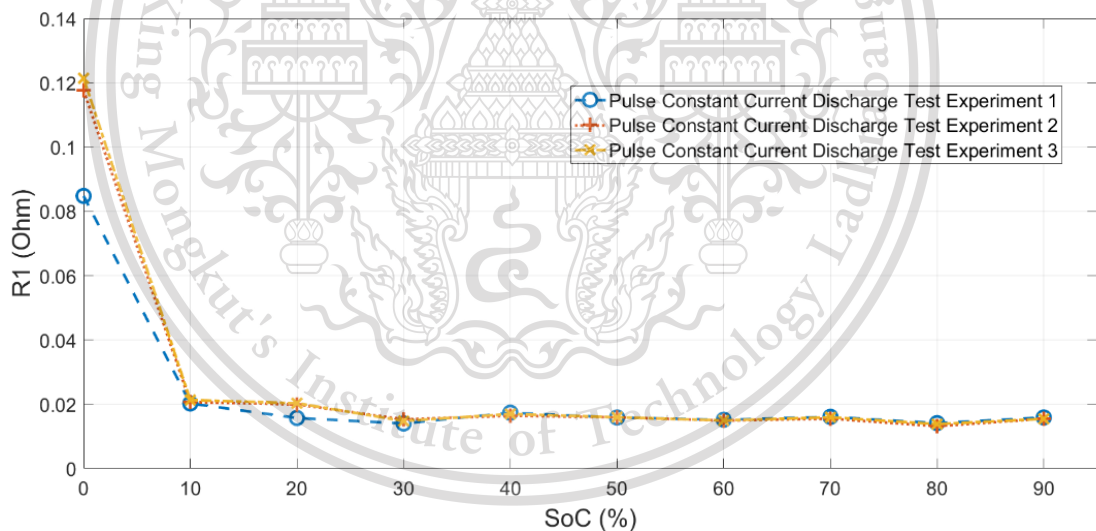
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.6.2 กราฟการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting



รูปที่ 4.76 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting

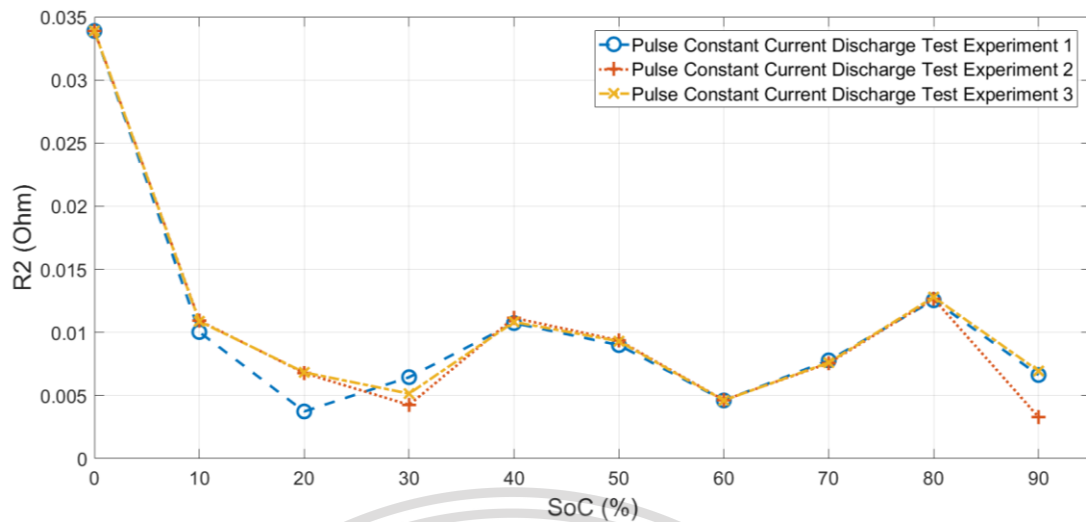


รูปที่ 4.77 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting

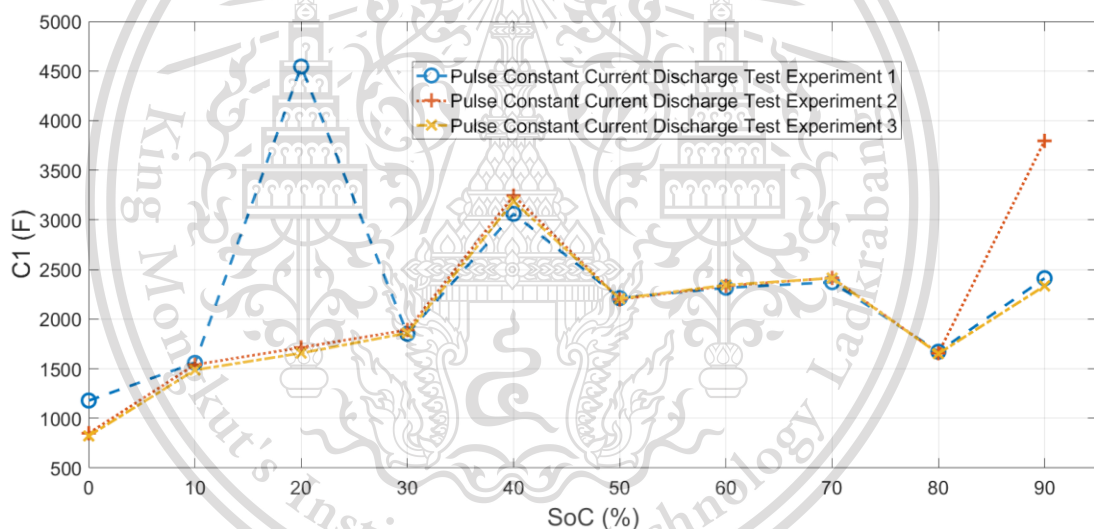
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.78 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting

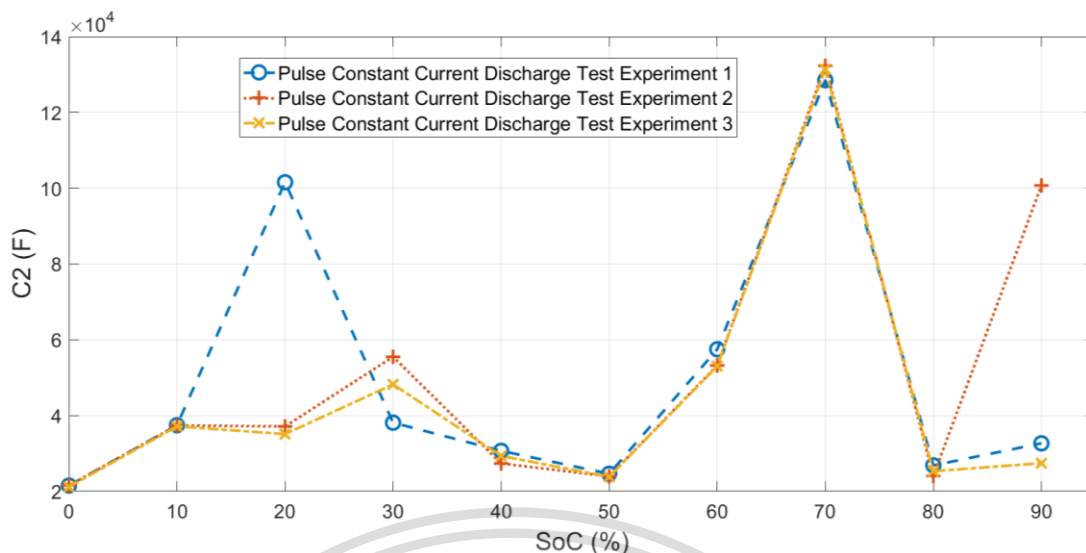


รูปที่ 4.79 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

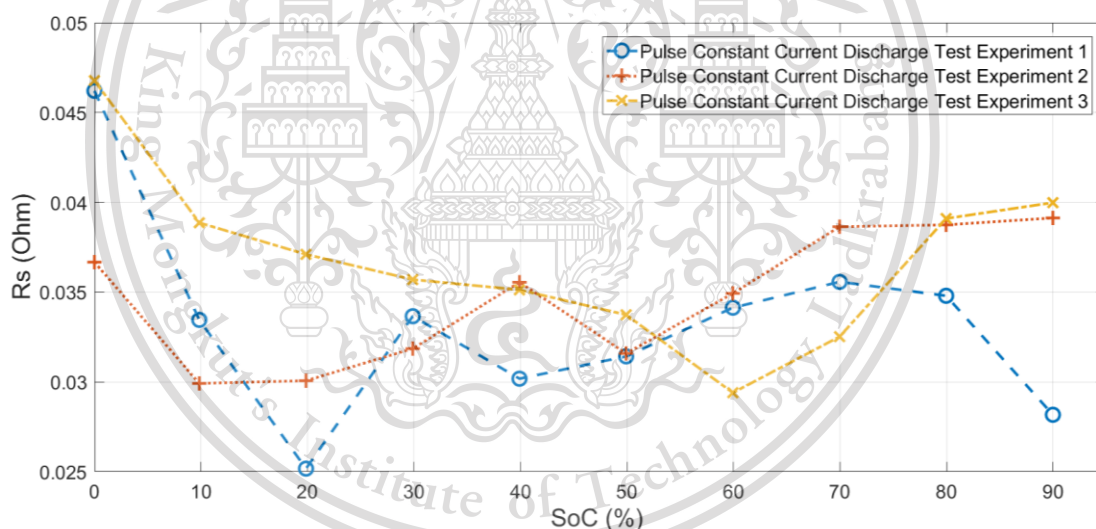
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.80 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Exponential Curve Fitting

#### 4.6.3 กราฟการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

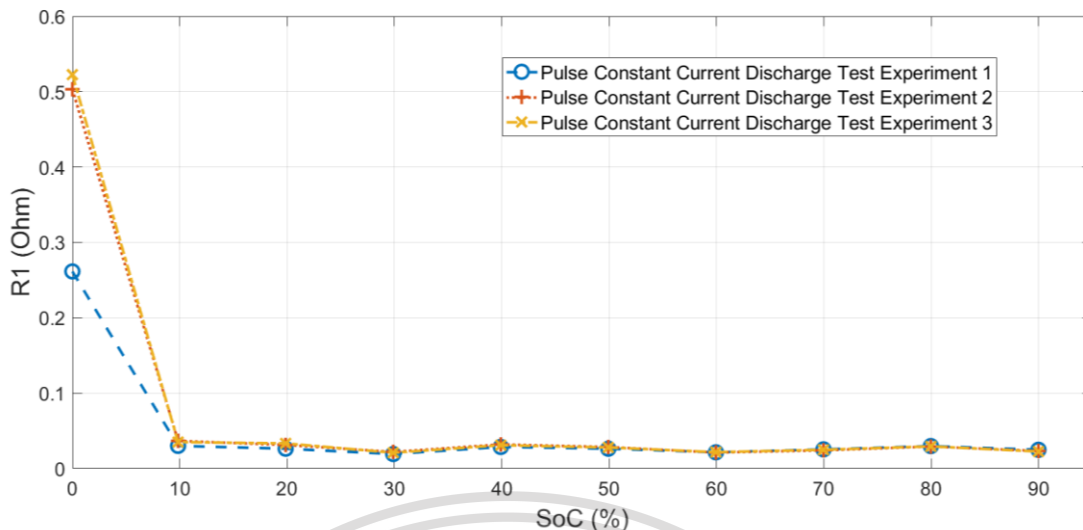


รูปที่ 4.81 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator

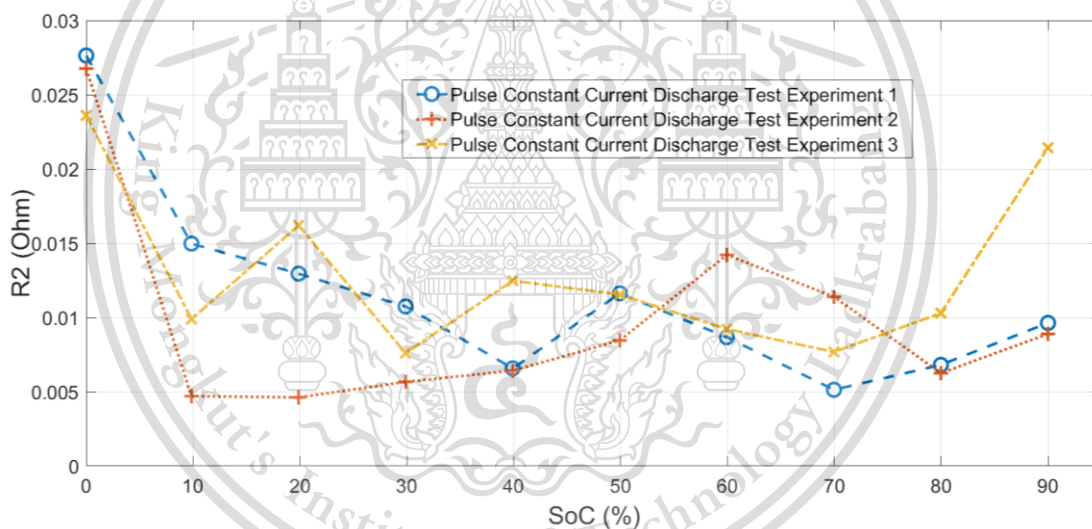
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.82 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator

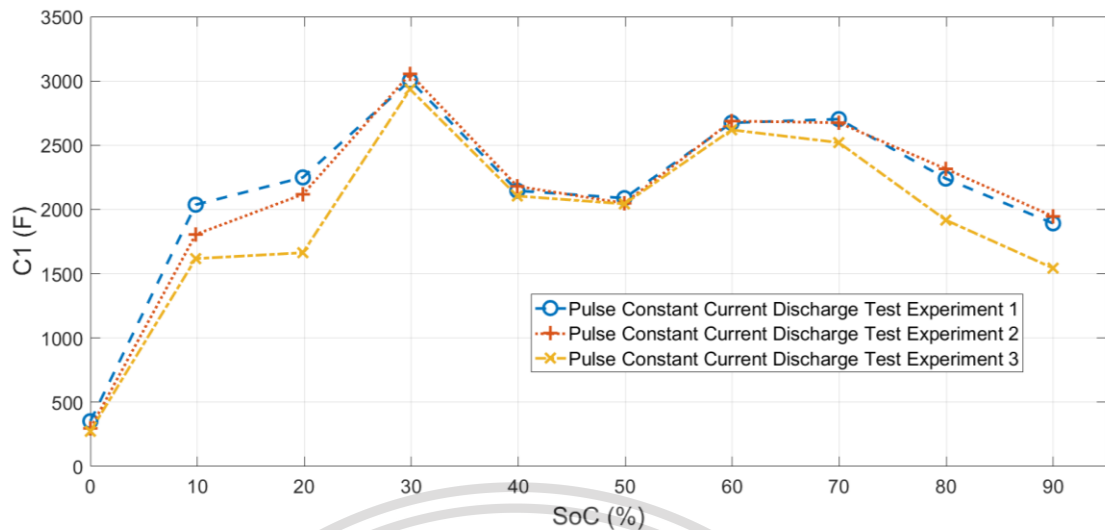


รูปที่ 4.83 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares Estimator

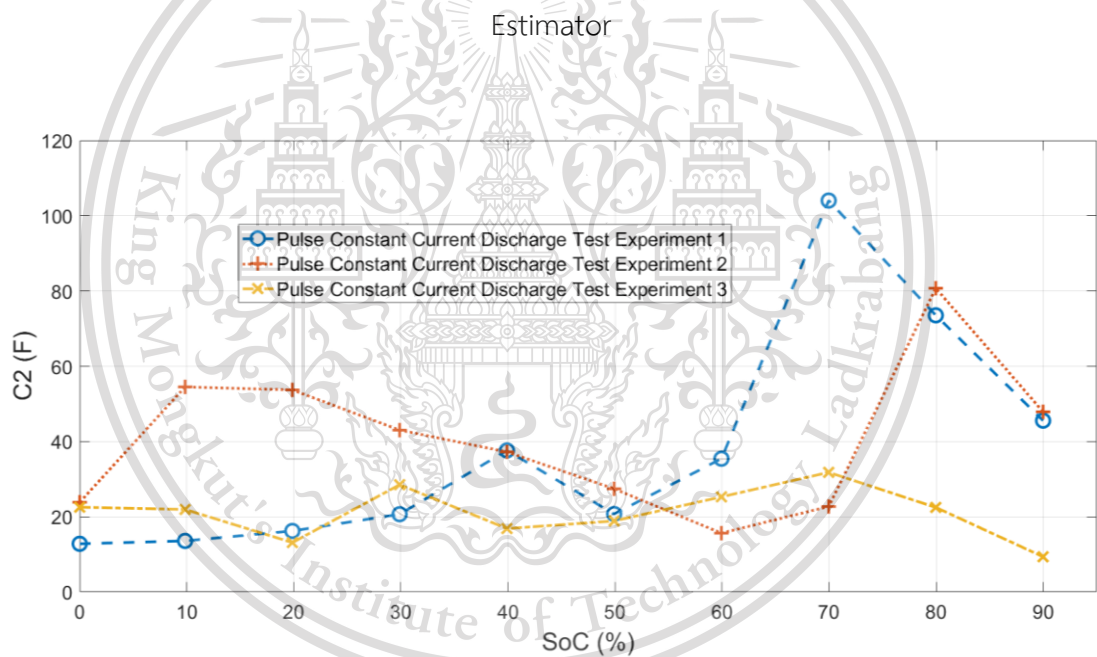
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.84 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares



รูปที่ 4.85 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Recursive Least Squares

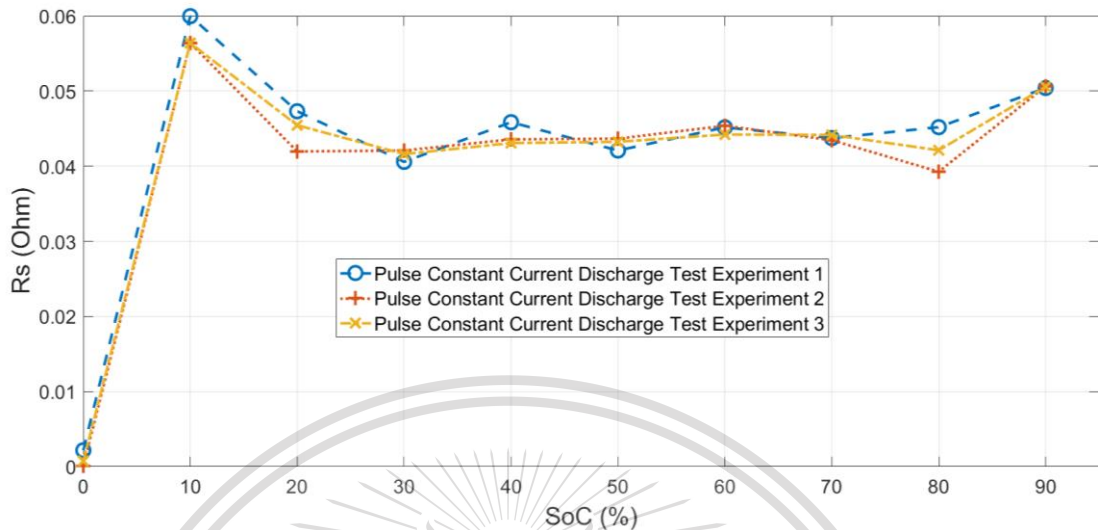
Estimator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

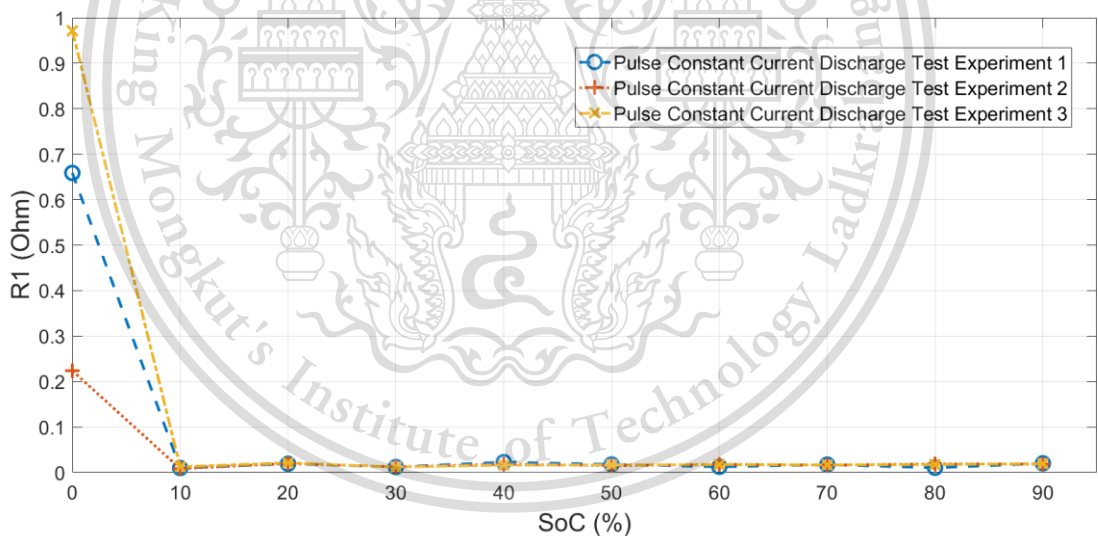
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.6.4 กราฟการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool



รูปที่ 4.86 ความต้านทาน  $R_s$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool

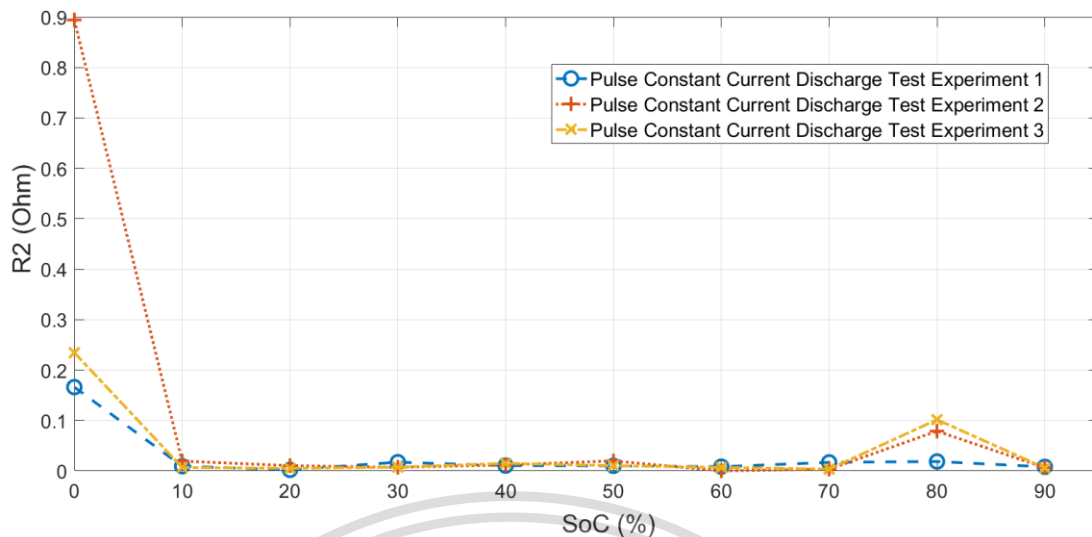


รูปที่ 4.87 ความต้านทาน  $R_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool

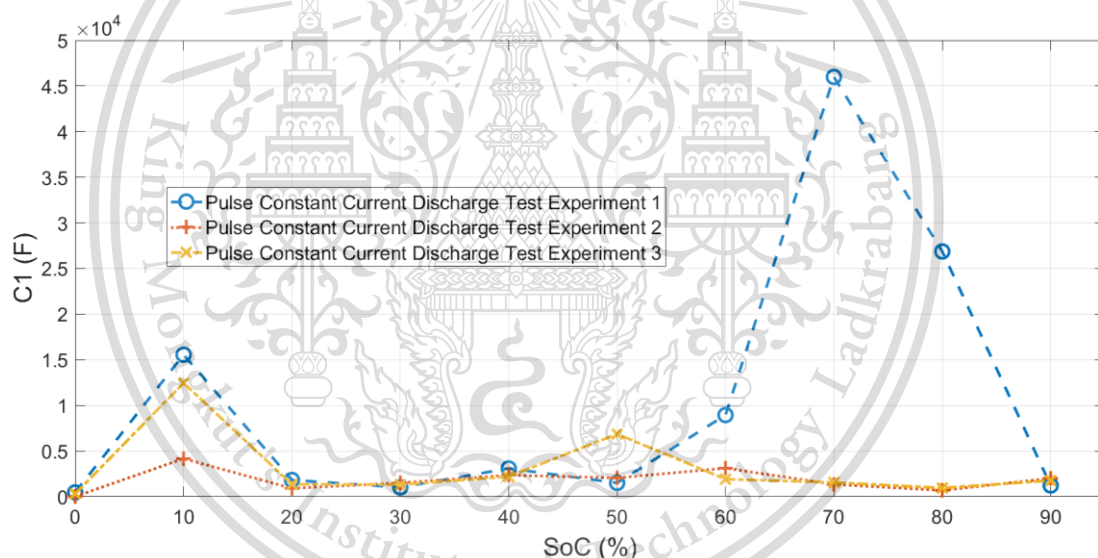
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.88 ความต้านทาน  $R_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool

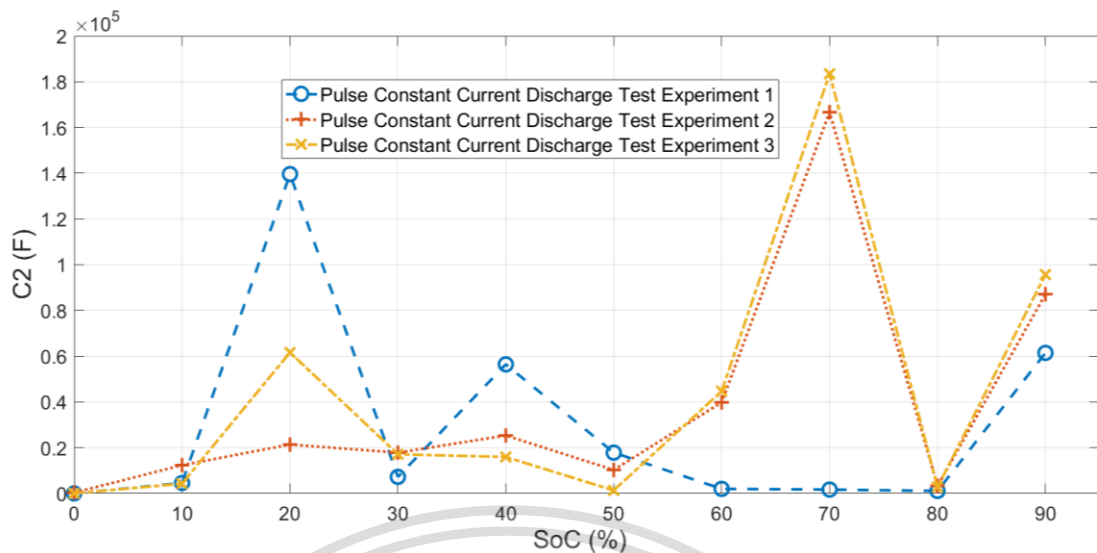


รูปที่ 4.89 ความเก็บประจุ  $C_1$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization Tool

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.90 ความเก็บประจุ  $C_2$  สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ร้อยละ SoC ต่าง ๆ ทั้ง 3 รอบการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์จากวิธี Simulink Design Optimization



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

# บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

### 5.1 บทสรุป

จากการศึกษาวิธีการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเพื่อใช้จำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่สำหรับการประมาณค่า SoC ในระบบการจัดการแบตเตอรี่ พบว่าวิธีการทั้ง 4 วิธีที่ศึกษานั้นเมื่อเงื่อนไขพลวัตของกระแสในการคายและอัดประจุต่างกัน และรอบการทดสอบต่างกัน ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่นั้นต่างกัน เช่น ในการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์และการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 วิธี Simulink Design Optimization Tool สามารถจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 1 วิธี Simulink Design Optimization Tool ยังสามารถให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุด แต่ในผลการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 วิธีที่สามารถจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุด คือ Multiple Linear Regression เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรในการคำนวณค่าความผิดพลาดที่ใช้มีผลต่อการเรียงลำดับของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เช่น การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องในผลการทดสอบรอบที่ 1 การหาค่าความผิดพลาดด้วยสูตรการคำนวณค่าความผิดพลาดแบบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAE) วิธี Simulink Design Optimization Tool มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่เมื่อใช้สูตรการคำนวณค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) วิธี Exponential Curve Fitting มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด เป็นต้น ด้วยเงื่อนไขและผลลัพธ์ดังกล่าวผู้จัดทำโครงการจึงไม่สามารถสรุปให้แน่ชัดได้ว่าวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ใดเป็นวิธีที่ดีที่สุด จึงสรุปเป็นข้อดี ข้อเสีย และข้อเสนอแนะในการใช้งานเพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถเลือกใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

#### 5.1.1 วิธี Multiple Linear Regression

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการคำนวณตามสูตรได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องจูนค่า หรือกำหนดค่าขอบเขตเหมือนกับวิธีการอื่น ๆ

ข้อเสีย คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำเฉพาะช่วงพักระหว่างพัลส์และมีขั้นตอนในการคำนวณที่ค่อนข้างเยอะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะสำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่มีช่วงพักระหว่างพัลส์มากพอ เพราะความแม่นยำในการประมาณค่าส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ประมาณได้จากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 5.1.2 วิธี Exponential Curve Fitting

ข้อดี คือ วิธีดังกล่าวใช้เครื่องมือ Curve Fitting ที่เป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปบน MATLAB ทำให้มีการใช้งานง่าย และสามารถประมาณค่าได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้สมการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเท่า Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator

ข้อเสีย คือ มีข้อจำกัดที่ต้องกำหนดขอบเขตในการ Fitting ทุกครั้ง และความแม่นยำขึ้นอยู่กับขอบเขตที่กำหนด สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำเฉพาะช่วงพักระหว่างพัลส์เหมือนกับวิธี Multiple Linear Regression

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะสำหรับการใช้งานคู่กับ Multiple Linear Regression สามารถช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณและการเขียนโค้ดของวิธี Multiple Linear Regression ได้

### 5.1.3 วิธี Recursive Least Squares Estimator

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้จุด sampling ทั้งช่วงที่มีการพักและช่วงที่มีการคายประจุ

ข้อเสีย คือ ความซับซ้อนของระบบในการประมาณค่าที่ค่อนข้างเยอะและความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ข้อมูลที่ใช้ พารามิเตอร์ของตัวประมาณค่า และเวลาในการ sampling เป็นต้น นอกจากนี้แม้จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ทุกจุด sampling แต่บางจุดก็ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดหลาย ๆ อย่างของระบบ และค่าพารามิเตอร์สามารถติดลบได้ซึ่งไม่ตรงตามค่าที่ควรจะเป็นทางกายภาพ

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ ไม่เหมาะกับการนำระบบที่ใช้งานในโครงการนี้ไปใช้งานจริง หากต้องการใช้วิธีนี้ในการใช้งานจริง ควรพัฒนาระบบและออกแบบระบบใหม่

### 5.1.4 วิธี Simulink Design Optimization Tool

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ทุก ๆ ร้อยละ SoC และทุกค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดได้แบบอัตโนมัติและมีความแม่นยำในการประมาณค่าพารามิเตอร์ค่อนข้างสูงเพื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ

ข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการประมาณค่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ อย่างน้อย 30 นาที ไปจนถึงหลายชั่วโมงหรือหลายวัน

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำ ความละเอียด ในการหาค่าพารามิเตอร์และมีเวลามากพอที่ใช้สำหรับการประมาณค่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ในแต่ละรอบ ควรทดสอบให้ต่อเนื่องกันทั้ง

3 รอบ เพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลการทดสอบที่แตกต่างกันมากในช่วงการคายประจุรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. วิธีการหาพารามิเตอร์ด้วยเทคนิค Simulink Design Optimization ควรใช้คู่กับระบบการจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่สร้างจาก Simscape Block จะมีความแม่นยำมากกว่า Simulink Block เนื่องจาก Simulink Block จะมีข้อจำกัดด้านการใช้ integral block ทำให้การประมาณค่าไม่สามารถทำได้กับทุกผลการทดสอบ

3. ก่อนการทดสอบด้วยเครื่องมือ DP811 และ DL3021 ต้องเปิดใช้งาน sensing ของทั้ง 2 เครื่องทุกครั้งเพื่อความถูกต้องในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแส

4. ในการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ที่ต้องใช้เวลาในการทดสอบนาน ผู้ทดสอบไม่ควรเปิดดูข้อมูลใน MATLAB ระหว่างการบันทึกค่า เพราะ จะไปรบกวนการบันทึกเวลาของโปรแกรมทำให้ sampling time เกิดความเพี้ยนได้

5. ข้อควรระวังในการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่ค่ากระแสสูง คือ ความจุตามข้อมูลจำเพาะอาจจะไม่สามารถใช้งานสำหรับตั้งค่าการทดสอบได้ เนื่องจากแบตเตอรี่ไม่สามารถจ่ายกระแสได้ตามข้อมูลจำเพาะ ทำให้แบตเตอรี่หมดก่อนที่ควรจะเป็น

การแก้ปัญหา สามารถทำได้โดยการทดสอบความจุ เพื่อหาความจุที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้จริงที่ค่าแรงดันไฟฟ้า cut off ใด ๆ

6. เพื่อความแม่นยำในการประมาณแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจากการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ ควรให้ช่วงเวลาที่พักระหว่างพัลส์อย่างน้อย 4 เท่าของค่าคงที่ของเวลา

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการนี้สามารถพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมได้ คือ วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สามารถนำไปพัฒนาเพื่อช่วยในการออกแบบฟังก์ชันการประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคโมเดลพื้นฐาน (Model based) ของระบบการจัดการแบตเตอรี่ได้ ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคที่ศึกษาในโครงการนี้เป็นวิธีการหาค่าพารามิเตอร์แบบออฟไลน์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธีการเหล่านี้ยังสามารถนำไปกำหนดเป็นค่าเริ่มต้นให้กับแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสำหรับการประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ด้วยเทคนิคโมเดลพื้นฐาน ในระบบการจัดการแบตเตอรี่ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องต่อไปได้

นอกจากนี้ วิธีการหาพารามิเตอร์ด้วยเทคนิค Recursive Least Squares Estimator ยังสามารถพัฒนาให้เป็นวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ได้ คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้แบบเรียลไทม์ โดยประมาณค่าพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบได้

การพัฒนาการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์สามารถเพิ่มความแม่นยำให้กับแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้โดยการกำหนดช่วงพักให้มีค่า SoC ที่ขึ้นเพิ่มเป็นช่วงพักครั้งละร้อยละ 5 หรือ ร้อยละ 1 ของ SoC ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้พัฒนาต้องการความละเอียดของข้อมูลและมีเวลาในการทดสอบมากน้อยเพียงใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Dickson N.T., "State of charge Estimation for lithium-ion batteries using-based and data-driven method," *IEEE*, 2019.
- [2] D.-I. S. M. R. G. L. R. T. Jinhao Meng, "A Simplified Model-Based State-of-Charge Estimation Approach for Lithium-Ion Battery With Dynamic Linear Model," *IEEE*, 2019.
- [3] Batteryuniversity, "Batteryuniversity," 1 6 2018. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/>. [Accessed 12 9 2020].
- [4] D. Deng, "Li- ion batteries: basics, progress, and challenges," *Energy Science & Engineering*, p. 386, 23 9 2015.
- [5] C. Z. Jiuchun Jiang, *Fundamentals and Application of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*, John Wiley & Sons Asia Pte Ltd, 2015.
- [6] Woodbank Communications, "Electropaedia," [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/lithiumP.htm>. [Accessed 12 9 2020].
- [7] M. A. M. E. B. Y. María Garcés Quílez, "Modelling, Analysis and Performance Evaluation of Power Conversion Unit in G2V/V2G Application," 2018.
- [8] batteryuniversity, "batteryuniversity," [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_charge\\_li\\_ion\\_with\\_a\\_parasitic\\_load](https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_charge_li_ion_with_a_parasitic_load). [Accessed 12 9 2020].
- [9] R. A. B. Bueno, *State of Charge and Parameter Estimation of Electric Vehicle*, Guelph, Ontario, Canada, 2018.
- [10] R. X. G. L. Hongwen He, "Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles," *ScienceDirect*, 2012.
- [11] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries*, Consultant, Rome, Italy: Elsevier, 2014.
- [12] batteryuniversity, "batteryuniversity," [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety_concerns_with_li_ion). [Accessed 12 9 2020].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [13] www.safetylifethailand.com, "safetylifethailand," [Online]. Available: <http://www.safetylifethailand.com/download/News4ClassDFire.pdf>. [Accessed 12 9 2020].
- [14] monroextinguisher, "monroextinguisher," [Online]. Available: <https://www.monroextinguisher.com/product/ansul-redline-30-lb-metal-x-dry-chemical-cartridge-fire-extinguisher/>. [Accessed 12 9 2020].
- [15] safetyemporium, "safetyemporium," [Online]. Available: <https://www.safetyemporium.com/09592>. [Accessed 12 9 2020].
- [16] safetyemporium, "safetyemporium," [Online]. Available: <https://www.safetyemporium.com/09451>. [Accessed 12 9 2020].
- [17] J. J. R. X. a. Y. Xiangdong Sun, "Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-Ion Battery," *MDPI*, 2019.
- [18] The British Standards, "Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems," in *BSI Standards Publication*, 2012.
- [19] R. N. S. C. a. C. M. Mircea Ruba, "<https://www.intechopen.com/>," 9 1 2020. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/applied-electromechanical-devices-and-machines-for-electric-mobility-solutions/parameter-identification-modeling-and-testing-of-li-ion-batteries-used-in-electric-vehicles>. [Accessed 12 9 2020].
- [20] MathWorks, "Simulink Design Optimization," 3 Apple Hill Drive, 2015.
- [21] J. G. S. O. S. H. R. J. a. K. R. J. T. J. L. Ryan Ahmed, "Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for," *sae international*, 2015.
- [22] A. d. C. J. G. Robyn Jackey, Writer, *Automating Battery Model Parameter Estimation using Experimental Data*. [Performance]. MathWorks, 2013.
- [23] *Estimating Parameters of a Battery*. [Performance]. MATLAB, 2013.
- [24] R. Y. Y. E. T. A. a. S. H. Sigit Arianto, "Development of single cell lithium ion," *aip conference proceedings*, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [25] Battery University, "Battery University," 23 11 2017. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_definitions](https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions). [Accessed 12 9 2020].
- [26] Battery University, 1 มิถุนายน 2561. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries).
- [27] S. Jiang, "A Parameter Identification Method for a Battery," *sae international*, 2011.
- [28] ช. หอมมาลัย, "การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิตั้งแต่อัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่," 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

## COMPARISON OF METHODS FOR IDENTIFICATION THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETER FOR A LI-ON BATTERY

นายสิริภพ จำภา , นายสุทัศน์ ปะริบริรัมย์ , นายอัฟฟาน แวชู และ นายเอกรัตน์ บุตรศิริ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โปธิ์พงษ์วิวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[60011062@kmitl.ac.th](mailto:60011062@kmitl.ac.th), [60011090@kmitl.ac.th](mailto:60011090@kmitl.ac.th), [60011181@kmitl.ac.th](mailto:60011181@kmitl.ac.th), [60011201@kmitl.ac.th](mailto:60011201@kmitl.ac.th)

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อจำลองแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วแบตเตอรี่ โดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าแบบลำดับสอง โดยใช้วิธีการทดสอบคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในวงจรสมมูล โครงการนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ วิธี Multiple Linear Regression วิธี Exponential Curve Fitting วิธี Recursive Least Squares Estimator และวิธี Simulink Design Optimization Tool ในการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแต่ละวิธีจะถูกนำไปจำลองการทำงานที่เงื่อนไขพลวัตต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า ในเงื่อนไขพลวัตของกระแสในการคายและอัดประจุต่างกัน และรอบการทดสอบต่างกัน ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ต่างกันด้วย จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีใดเป็นวิธีที่ดีที่สุด แต่ทั้ง 4 วิธี มีข้อดีข้อเสียต่างกัน ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม

### ABSTRACT

The study of comparison of methods for identification the equivalent circuit parameter for a li-on battery is presented in this thesis in order to simulate the voltages between battery terminals by using a second-order electrical equivalent circuit. Pulse constant current discharge test is used as a data for estimating the equivalent electric parameters. This project studied four parameter estimation methods: Multiple Linear Regression, Exponential Curve Fitting, Recursive Least Squares Estimator, and Simulink Design Optimization. The testing of the accuracy of the parameters obtained from each method is simulated at different dynamic conditions. The results show that the dynamic current conditions of different discharging, charging, and test cycles produce different accuracy in simulating voltage at battery terminals so it cannot be concluded which method of parameterization is the best, but the four methods have different advantages and disadvantages, which can be selected as appropriate.

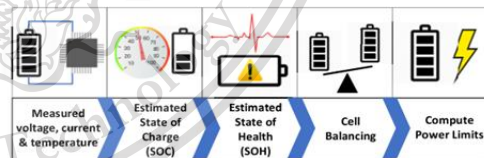
### 1. บทนำ

การเติบโตทางเทคโนโลยีในปัจจุบันทำให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนกลายเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของระบบต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน

รถยนต์ไฟฟ้า เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน ระบบดาวเทียม เป็นต้น ส่งผลให้เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว สิ่งที่เป็นเงื่อนไขเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ตั้งแต่ 2 เซลล์ขึ้นไป คือ ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) พารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญ

สำหรับการออกแบบระบบการจัดการแบตเตอรี่ คือ การประมาณค่าสถานะของการอัดประจุ หรือ SoC สำหรับสร้างระบบการจัดการความสมดุลของเซลล์ แบตเตอรี่ในแต่ละเซลล์หรือแต่ละโมดูลเมื่อมีการใช้งานอัดและคายประจุ ตรวจสอบสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่

ทั้งนี้ต้องมีวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ออกแบบผลลัพธ์ที่ต้องการจำเป็นต้องทราบค่า SoC ซึ่งในปัจจุบันมีเทคนิคในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ เช่น เทคนิคคูลอมป์เคาท์ (Coulomb Counting) ซึ่งออกแบบได้ง่ายและราคาถูกแต่มีความคลาดเคลื่อนของหลายตัวแปรที่ยังไม่สามารถนำมาออกแบบได้ จึงเกิดอีกหนึ่งเทคนิคที่เรียกว่า Model-based เพื่อแก้ไขปัญหาจากการใช้งานเทคนิคคูลอมป์เคาท์ระบบการจัดการแบตเตอรี่และเทคนิคการประมาณ SoC แบบโมเดลพื้นฐาน (Model-based) เริ่มมีการใช้งานและถูกพัฒนาขึ้นมาในระบบการจัดการแบตเตอรี่ในปัจจุบันมากขึ้น ผู้จัดทำโครงการจึงเล็งเห็นความสำคัญของเทคนิคดังกล่าว และเลือกการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับวิธีการต่าง ๆ ในการระบุพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล



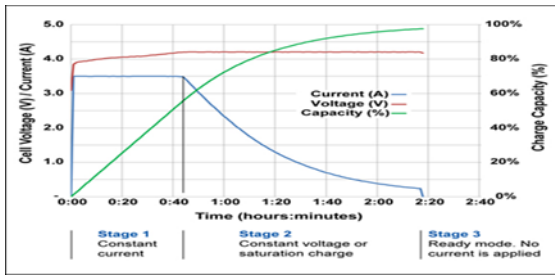
รูปที่ 1 การประมาณค่าสถานะของการอัดประจุในระบบการจัดการแบตเตอรี่ [1]

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทคนิคการอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันคงที่ (CC-CV)

การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็นกระบวนการอัดประจุมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นวิธีการผสมระหว่างการอัดประจุแบบกระแสคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ มีขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรก : แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าสูงสุด และมีค่ากระแสคงที่ หรือที่เรียกว่า การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ ขั้นที่สอง : จากนั้นจะถูกอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ และค่ากระแสจะลดลง ขั้นที่สาม : กระบวนการอัดประจุจะสิ้นสุดหลังจากกระแสลดลงถึงค่าที่กำหนดไว้ ทั้งนี้ กระแสที่กำหนดไว้ ขึ้นอยู่กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน วัสดุที่ใช้ สามารถอัดประจุได้ตามแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามข้อมูลที่มีของแบตเตอรี่ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์นี้สงวนไว้สำหรับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และต้อง  
ไอออนกลายเป็นส่วนหนึ่งที่สำคัญของระบบต่าง ๆ เช่น สมาร์ทโฟน  
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.



รูปที่ 2 การอัดประจุด้วยกระแสและแรงดันคงที่ [8]

2.2 แบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชัน หรือแบบจำลอง RC ลำดับ 2

แบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชัน แบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชันจะตรวจจับโปลาไรซ์เซชันและโปลาไรซ์ทางไฟฟ้าเคมีแยกกันโดยใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อขนานกัน 2 ชุดที่แตกต่างกันจึงตั้งชื่อว่าโปลาไรซ์เซชัน รูปที่ 3 แสดงแบบจำลองวงจรคูลอมโปลาไรซ์เซชัน

ศึกษาแบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชันได้โดยการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของความต้านทาน  $R_0, R_1, R_2$  ซึ่งอธิบายถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โปลาไรซ์เซชันทางไฟฟ้าเคมีและความต้านทานโปลาไรซ์ตามลำดับ ความจุ  $C_1$  และ  $C_2$  นำไปใช้เพื่อกำหนดลักษณะการตอบสนองชั่วคราวระหว่างการถ่ายโอนพลังงานไปยังแบตเตอรี่และเพื่อแยกโปลาไรซ์เซชันทางไฟฟ้าเคมีกับโปลาไรซ์เซชัน [5]

2.3 ระบบการจัดการแบตเตอรี่

ระบบการจัดการแบตเตอรี่เป็นระบบแบบเรียลไทม์ที่ควบคุมด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ มากมายซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการทำงานอย่างถูกต้องและปลอดภัยของระบบแบตเตอรี่ในยานพาหนะไฟฟ้าและรถยนต์ในระบบปลั๊กอินไฮบริด ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบอุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า การบำรุงรักษา การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ การทำนายและป้องกันความผิดพลาดของระบบ และการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่

2.3.1 ฟังก์ชันของระบบการจัดการแบตเตอรี่

โดยทั่วไปชุดควบคุมโมดูลจะมีการวัดแรงดัน อุณหภูมิ และกระแสเป็นอย่างน้อยจากนั้นค่าเหล่านี้จะถูกประมวลผลด้วย ASIC หรือวงจรอนาล็อกขนาดเล็กซึ่งจำเป็นสำหรับการป้องกันเซลล์ใดเซลล์หนึ่งจากการทำงานผิดปกติ ชุดควบคุมแบตเตอรี่รับข้อมูลจากชุดควบคุมโมดูลและรับรู้ฟังก์ชันระดับที่สูงขึ้นเช่น การป้องกันและการจัดการประสิทธิภาพ เป็นข้อบังคับสำหรับระบบการจัดการแบตเตอรี่แต่มีบางฟังก์ชันขึ้นอยู่กับสถาปัตยกรรมของระบบและระดับของความซับซ้อนของแบตเตอรี่ [6]

3. ออกแบบการทดสอบ

การทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล ทำการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่กระแสพลวัตต่าง ๆ ทั้งหมด 4 พลวัต ได้แก่ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่อง การทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 และการทดสอบการทำงานในรถยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานรอบการขับเคลื่อน WLTP Class 3 โดย แบตเตอรี่ลิเทียม

ไอออนที่เลือกในการทดสอบ เป็นแบตเตอรี่ขนาด 18650 เลือกใช้แบตเตอรี่ : LG18650MH1

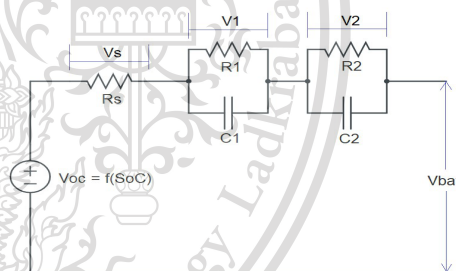
โดยใช้วิธีการหาพารามิเตอร์ 4 วิธีด้วยกัน ดังนี้

- 1.การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression
- 2.การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting
- 3.การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator
- 4.การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool

โดยทุกวิธีที่กล่าวมาสามารถหาค่าพารามิเตอร์  $R_0, R_1, R_2, C_1, C_2$  ที่ SoC ที่กำหนดไว้ในกราฟวิเคราะห์ได้ และนำมาหาค่าความผิดพลาดได้

3.1 วิธีการหาพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมและคุณลักษณะทางพลวัตของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับการทดสอบ คือแบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชัน (แบบจำลอง RC ลำดับสอง) เหตุผลที่เลือกใช้งานวงจรสมมูลดังกล่าว เพราะสามารถปรับแต่งคุณลักษณะที่อธิบายถึงการโปลาไรซ์เซชันได้ดี และมีการจำลองโปลาไรซ์เซชันและความเข้มข้นโปลาไรซ์ไฟฟ้าเคมีแยกกัน ซึ่งทำให้วงจรสมมูลมีแม่นยำมากขึ้น และเนื่องจากวงจรสมมูลดังกล่าวมีการใช้งานกันโดยทั่วไปและความซับซ้อนของการคำนวณไม่ยุ่งยากมากเกินไปที่จะสามารถศึกษาได้ในระดับปริญญาตรี จึงเลือกใช้งานวงจรสมมูลดังกล่าวในโครงการนี้



รูปที่ 3 แบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชัน (แบบจำลอง RC ลำดับสอง)

จากวงจรสมมูลนี้แบบจำลองคูลอมโปลาไรซ์เซชันที่อิงตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$V_{bat} = V_{oc} - V_1 - V_2 - R_s \cdot I_{bat} \tag{58}$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{R_1 \cdot C_1} V_1 + \frac{1}{C_1} \cdot I_{bat} \tag{59}$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{R_2 \cdot C_2} V_2 + \frac{1}{C_2} \cdot I_{bat} \tag{60}$$

3.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Multiple Linear Regression

Multiple Linear Regression คือ การวิเคราะห์การถดถอย

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ประมาณการ (Predictor, X) และตัวตอบสนอง (Response, Y) โดยเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น

$$B = AP + \epsilon \tag{61}$$

### 3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Exponential Curve Fitting

Exponential curve fitting เป็นการหาค่าเหมาะสมโดยใช้สมการ Exponential กับเส้นโค้งเพื่อหาค่าเหมาะสมในการหาค่าพารามิเตอร์ การกำหนดจุดสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ในวงจรสมมูลทางไฟฟ้า

การหาพารามิเตอร์  $R_1, C_1, R_2, C_2$  ของวงจรสมมูล ทำได้โดยใช้เทคนิคฟิตเส้นโค้ง โดยใช้สมการชี้กำลัง (exponential) ที่อ้างอิงมาจากสมการของกฎของเคอร์ชอฟฟ์ในสมการ ดังนี้

$$V_{bat} = a - b \cdot e^{-\frac{t}{c}} - d \cdot e^{-\frac{t}{e}} \quad (5)$$

### 3.4 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Recursive Least Squares Estimator

recursive least square (RLS) เป็นวิธีการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ มีความเรียบง่ายและเสถียร ในโครงงานนี้ศึกษาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่โดยใช้ Recursive Least Squares Estimator ในโปรแกรม MATLAB SIMULINK

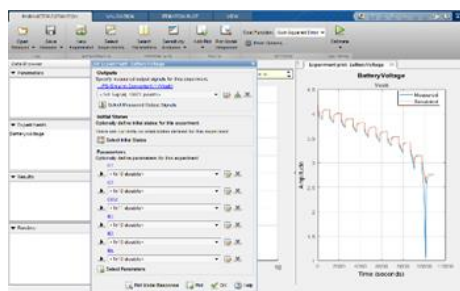
Recursive Least Squares Estimator ใช้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นในพารามิเตอร์ ระบบดังกล่าวมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$y(t) = H(t)\theta(t) \quad (6)$$

$y$  และ  $H$  เป็นปริมาณที่ทราบค่าระบุไว้ในบล็อกเพื่อประมาณค่า  $\theta$  โดยใช้ recursive least squares algorithm จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ สามารถสร้างสมการ Recursive และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\theta$

### 3.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Simulink Design Optimization Tool

Simulink Design Optimization Tool เป็นเครื่องมือสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบบนโปรแกรม MATLAB SIMULINK ด้วยเทคนิคทางด้าน Optimization โดยใช้ข้อมูลทีวัดได้จากการทดสอบเป็นข้อมูลอ้างอิงในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองวงจรสมมูลที่สร้างโดย Simscape block ให้ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับข้อมูลค่าแรงดันที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด

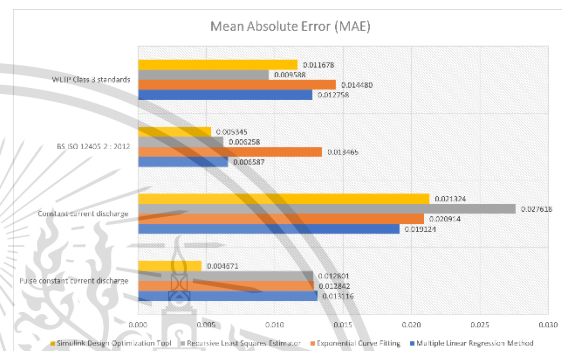


รูปที่ 4 Simulink Design Optimization Tool

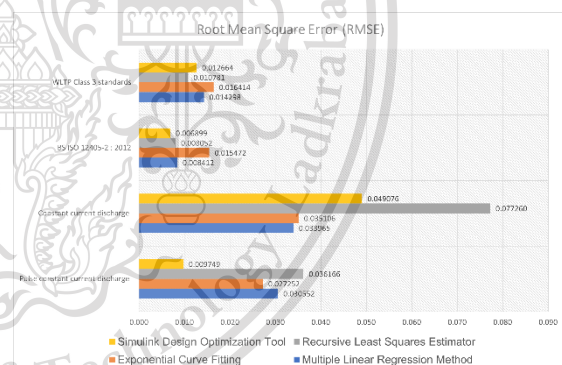
## 4. ผลการทดสอบ

### 4.1 การวิเคราะห์ความผิดพลาด

จากการทดสอบได้ใช้การคำนวณค่าความผิดพลาดโดยใช้ค่า MAE (Mean Absolute Error) และ ค่า RMSE (Root Mean Square Error) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบครั้งที่ 1,2,3 เทียบกับวิธีการหาพารามิเตอร์ทั้ง 4 วิธี และการทดสอบการทำงานของแบตเตอรี่ที่กระแสพลวัตต่าง ๆ ทั้งหมด 4 พลวัตแสดงผลเป็นค่า MAE และ RMSE ได้ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 โดยแสดงในเอกสารนี้เพียง การคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์



รูปที่ 5 ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ การคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์รอบที่ 2



รูปที่ 11 รากที่สองของความผิดพลาดกำลังสองการคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์รอบที่ 2

## 5. สรุป

จากการศึกษาวิธีการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าเพื่อใช้จำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่สำหรับการประมาณค่า SoC ในระบบการจัดการแบตเตอรี่ พบว่าวิธีการทั้ง 4 วิธีที่ศึกษานั้นเมื่อเงื่อนไขพลวัตของกระแสในการคายและอัดประจุต่างกัน และรอบการทดสอบต่างกัน ส่งผลให้ค่าความแม่นยำในการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่นั้นต่างกัน เช่น ในการทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบพัลส์และการทดสอบพลวัตตามมาตรฐาน BS ISO 12405-2:2012 วิธี Simulink Design Optimization Tool สามารถจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุด สำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบต่อเนื่อง ในการทดสอบรอบที่ 1 วิธี Simulink Design Optimization Tool ยังสามารถให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด

สัมบูรณ์น้อยที่สุด แต่ในผลการทดสอบรอบที่ 2 และ 3 วิธีที่สามารถจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ที่มีความผิดพลาดสัมบูรณ์น้อยที่สุด คือ Multiple Linear Regression เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรในการคำนวณค่าความผิดพลาดที่ใช้มีผลต่อการเรียงลำดับของค่าความผิดพลาดของแต่ละวิธีการหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า เช่น การทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบต่อเนื่องในผลการทดสอบรอบที่ 1 การหาค่าความผิดพลาดด้วยสูตรการคำนวณค่าความผิดพลาดแบบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAE) วิธี Simulink Design Optimization Tool มีความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่เมื่อใช้สูตรการคำนวณค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) วิธี Exponential Curve Fitting มีความผิดพลาดน้อยที่สุด เป็นต้น ด้วยเงื่อนไขและผลลัพธ์ดังกล่าวผู้จัดทำโครงการจึงไม่สามารถสรุปให้เห็นชัดได้ว่าวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ใดเป็นวิธีที่ดีที่สุด จึงสรุปเป็นข้อดี ข้อเสีย และข้อแนะนำในการใช้งานเพื่อให้ผู้ที่สนใจสามารถเลือกใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

#### 5.1.1 วิธี Multiple Linear Regression

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการคำนวณตามสูตรได้โดยตรง โดยไม่ต้องจูนค่า หรือกำหนดค่าขอบเขตเหมือนกับวิธีการอื่น ๆ

ข้อเสีย คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำเฉพาะช่วงพักระหว่างพัลส์และมีขั้นตอนในการคำนวณที่ค่อนข้างเยอะ

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะสำหรับการทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ที่มีช่วงพักระหว่างพัลส์มากพอ เพราะความแม่นยำในการประมาณค่าส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ประมาณได้จากกราฟทดสอบคายประจุด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์

#### 5.1.2 วิธี Exponential Curve Fitting

ข้อดี คือ วิธีดังกล่าวใช้เครื่องมือ Curve Fitting ที่เป็นฟังก์ชันสำเร็จรูปบน MATLAB ทำให้มีการใช้งานง่าย และสามารถประมาณค่าได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้สมการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนเท่า Multiple Linear Regression และ Recursive Least Squares Estimator

ข้อเสีย คือ มีข้อจำกัดที่ต้องกำหนดขอบเขตในการ Fitting ทุกครั้ง และความแม่นยำขึ้นอยู่กับขอบเขตที่กำหนด สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำเฉพาะช่วงพักระหว่างพัลส์เหมือนกับวิธี Multiple Linear Regression

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะสำหรับการใช้งานคู่กับ Multiple Linear Regression สามารถช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณและการเขียนโค้ดของวิธี Multiple Linear Regression ได้

#### 5.1.3 วิธี Recursive Least Squares Estimator

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้จุด sampling ทั้งช่วงที่มีการพักและช่วงที่มีการคายประจุ

ข้อเสีย คือ ความซับซ้อนของระบบในการประมาณค่าที่ค่อนข้างเยอะและความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ข้อมูลที่ใช้ พารามิเตอร์ของตัวประมาณค่า และเวลาในการ sampling เป็นต้น นอกจากนี้แม้จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ทุกจุด sampling แต่บางจุดก็ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดหลาย ๆ อย่างของระบบ และค่าพารามิเตอร์สามารถติดลบได้ซึ่งไม่ตรงตามค่าที่ควรจะเป็นทางกายภาพ

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ ไม่เหมาะกับการนำระบบที่ใช้งานในโครงการนี้ไปใช้งานจริง หากต้องการใช้วิธีนี้ในการใช้งานจริง ควรพัฒนาระบบและออกแบบระบบใหม่

#### 5.1.4 วิธี Simulink Design Optimization Tool

ข้อดี คือ สามารถหาค่าพารามิเตอร์ทุก ๆ ร้อยละ SoC และทุกค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดได้แบบอัตโนมัติและมีความแม่นยำในการประมาณค่าพารามิเตอร์ค่อนข้างสูงเพื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ

ข้อเสีย คือ ใช้เวลาในการประมาณค่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับวิธีอื่น ๆ อย่างน้อย 30 นาที ไปจนถึงหลายชั่วโมงหรือหลายวัน

ข้อแนะนำสำหรับการใช้งาน คือ เหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำ ความละเอียด ในการหาค่าพารามิเตอร์และมีเวลามากพอที่ใช้สำหรับการประมาณค่า

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การหาค่าพารามิเตอร์สำหรับวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เล่มนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี จากการช่วยเหลือจากหลาย ๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูง ถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพล โพธิ์พงศวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ดูแลเอาใจใส่ คอยให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำโครงการด้วยดีตลอดมา และได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข ปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลงลงเป็นอย่างดี หวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะมีคุณค่าและประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาคนอื่น ๆ ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Dickson N.T., "State Of charge Estimation for lithium-ion batteries using-based and data-driven method," *IEEE*, 2019.
- [2] D.-I. S. M. R. G. L. R. T. Jinhao Meng, "A Simplified Model-Based State-of-Charge Estimation Approach for Lithium-Ion Battery With Dynamic Linear Model," *IEEE*, 2019.
- [3] Batteryuniversity, "Batteryuniversity," 1 6 2018. [Online]. Available: <https://batteryuniversity.com/>. [Accessed 12 9 2020].
- [4] D. Deng, "Li- ion batteries: basics, progress, and challenges," *Energy Science & Engineering*, p. 386, 23 9 2015.
- [5] C. Z. Jiuchun Jiang, *Fundamentals and Application of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles*, John Wiley & Sons Asia Pte Ltd, 2015.
- [6] Woodbank Communications, "Electropaedia," [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/lithiumP.htm>. [Accessed 12 9 2020].
- [7] M. A. M. E. B. Y. Maria Garcés Quilez, "Modelling, Analysis and Performance Evaluation of Power Conversion Unit in G2V/V2G Application," 2018.
- [8] batteryuniversity, "batteryuniversity," [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/how\\_to\\_charge\\_li\\_ion\\_with\\_a\\_parasitic\\_load](https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_charge_li_ion_with_a_parasitic_load). [Accessed 12 9 2020].
- [9] R. A. B. Bueno, *State of Charge and Parameter Estimation of Electric Vehicle*, Guelph, Ontario, Canada, 2018.
- [10] R. X. G. L. Hongwen He, "Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles," *ScienceDirect*, 2012.
- [11] G. Pistoia, *Lithium-Ion Batteries*, Consultant, Rome, Italy: Elsevier, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สงวนการใชงานเพื่อการศึกษารองาน ใบอนุญาตสงวนลิขสิทธิ์สงวนการค

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นผู้มีสิทธิพิเศษเฉพาะบุคคล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] batteryuniversity, "batteryuniversity," [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety_concerns_with_li_ion). [Accessed 12 9 2020].
- [13] www.safetylifethailand.com, "safetylifethailand," [Online]. Available: <http://www.safetylifethailand.com/download/News4ClassDFire.pdf>. [Accessed 12 9 2020].
- [14] monroextinguisher, "monroextinguisher," [Online]. Available: <https://www.monroextinguisher.com/product/ansul-redline-30-lb-metal-x-dry-chemical-cartridge-fire-extinguisher/>. [Accessed 12 9 2020].
- [15] safetyemporium, "safetyemporium," [Online]. Available: <https://www.safetyemporium.com/09592>. [Accessed 12 9 2020].
- [16] safetyemporium, "safetyemporium," [Online]. Available: <https://www.safetyemporium.com/09451>. [Accessed 12 9 2020].
- [17] J. J. R. X. a. Y. Xiangdong Sun, "Adaptive Forgetting Factor Recursive Least Square Algorithm for Online Identification of Equivalent Circuit Model Parameters of a Lithium-ion Battery," *MDPI*, 2019.
- [18] The British Standards, "Electrically propelled road vehicles — Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems," in *BSI Standards Publication*, 2012.
- [19] R. N. S. C. a. C. M. Mircea Ruba, "https://www.intechopen.com/", 9 1 2020. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/applied-electromechanical-devices-and-machines-for-electric-mobility-solutions/parameter-identification-modeling-and-testing-of-li-ion-batteries-used-in-electric-vehicles>. [Accessed 12 9 2020].
- [20] MathWorks, "Simulink Design Optimization," 3 Apple Hill Drive, 2015.
- [21] J. G. S. O. S. H. R. J. a. K. R. J. T. J. L. Ryan Ahmed, "Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for," *sae international*, 2015.
- [22] A. d. C. J. G. Robyn Jackey, Writer, *Automating Battery Model Parameter Estimation using Experimental Data*. [Performance]. MathWorks, 2013.
- [23] *Estimating Parameters of a Battery*. [Performance]. MATLAB, 2013.
- [24] R. Y. Y. E. T. A. a. S. H. Sigit Arianto, "Development of single cell lithium ion," *ajp conference proceedings*, 2016.
- [25] Battery University, "Battery University," 23 11 2017. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_definitions](https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions). [Accessed 12 9 2020].
- [26] Battery University, 1 มิถุนายน 2561. [Online]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries).
- [27] S. Jiang, "A Parameter Identification Method for a Battery," *sae international*, 2011.
- [28] ช. หอมมัลย์, "การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิ ขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่," 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

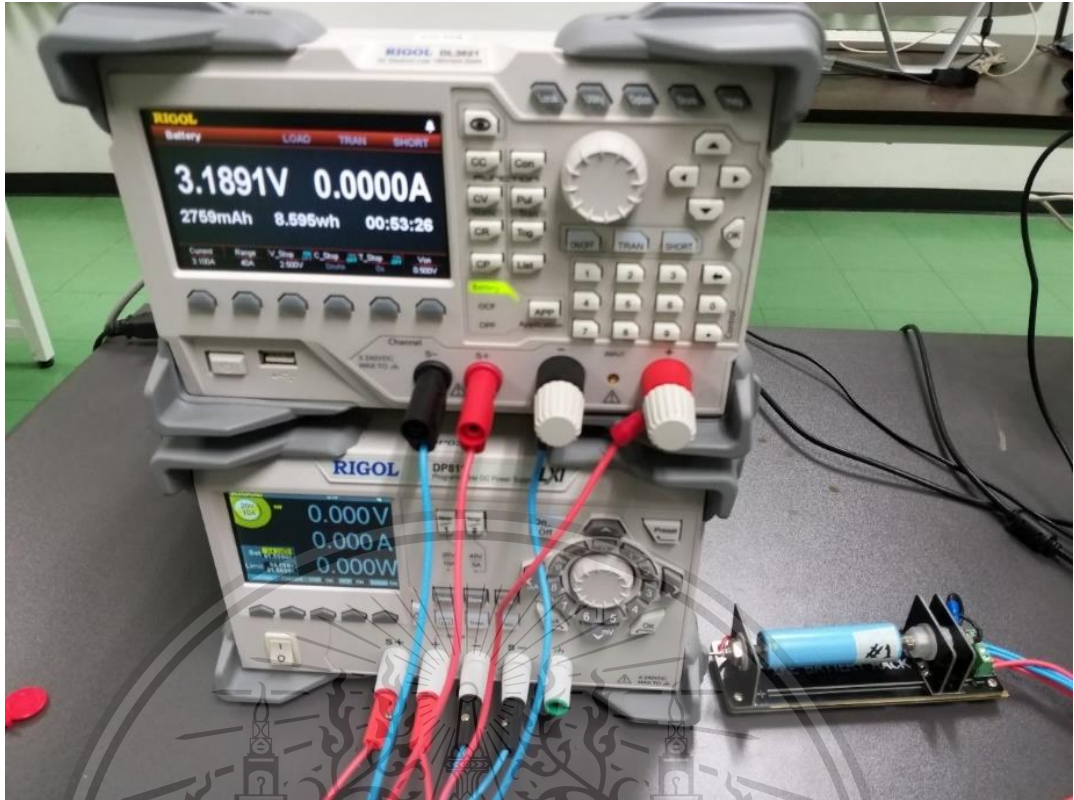
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



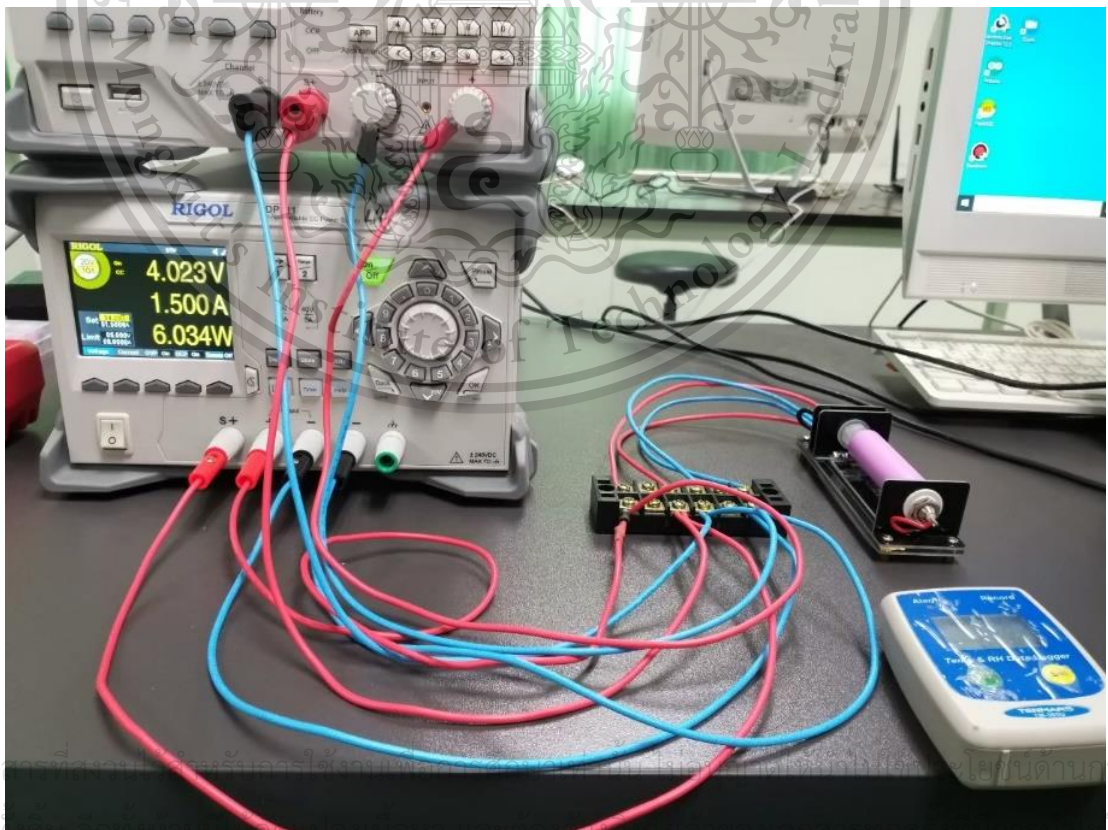
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.1 การทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบต่อเนื่อง

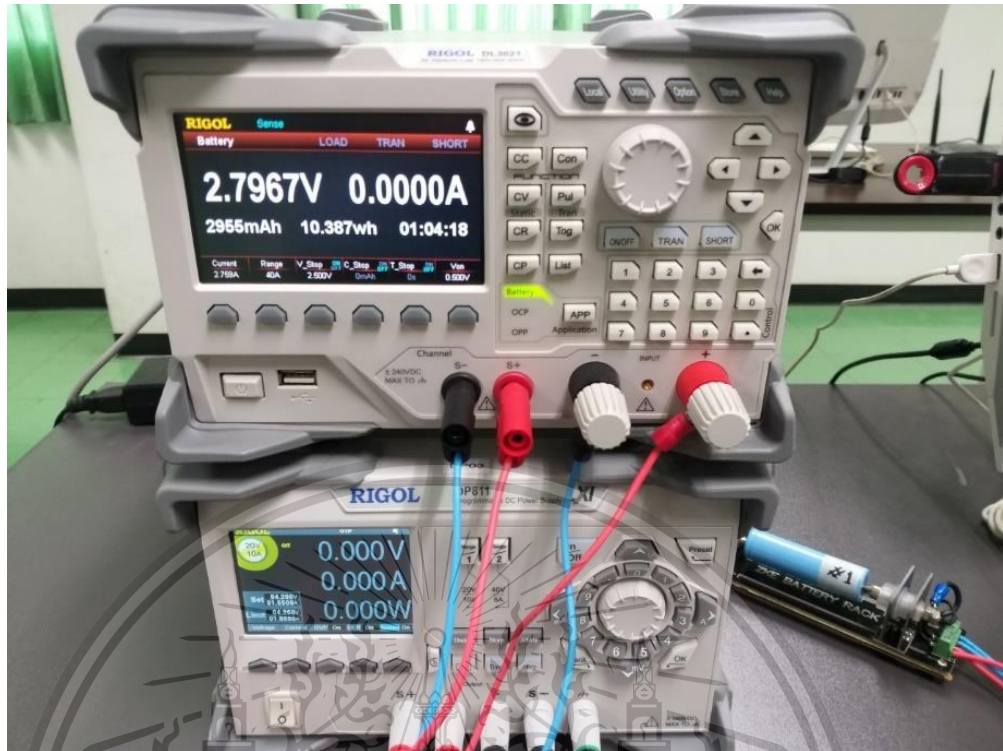


รูปที่ ข.2 การใช้งาน DP811 programmable DC power supply

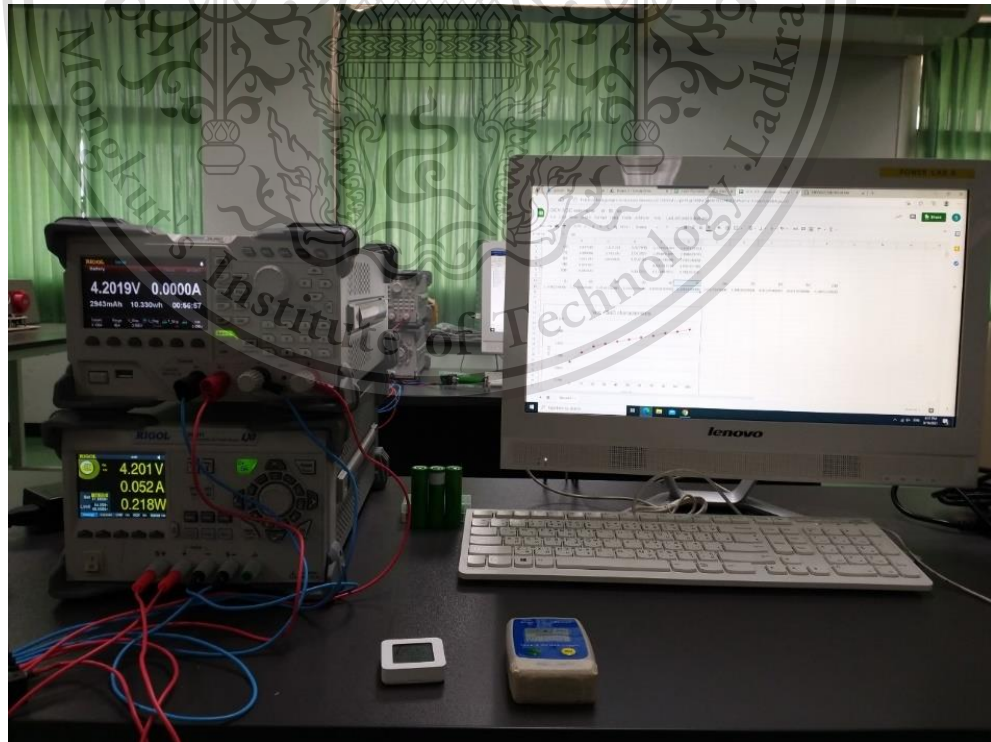
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่สามที่เปิดเผยเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้



รูปที่ ข.3 การทดสอบคายประจุด้วยกระแสที่แบบต่อเนื่อง แสดงค่าความจุของแบตเตอรี่

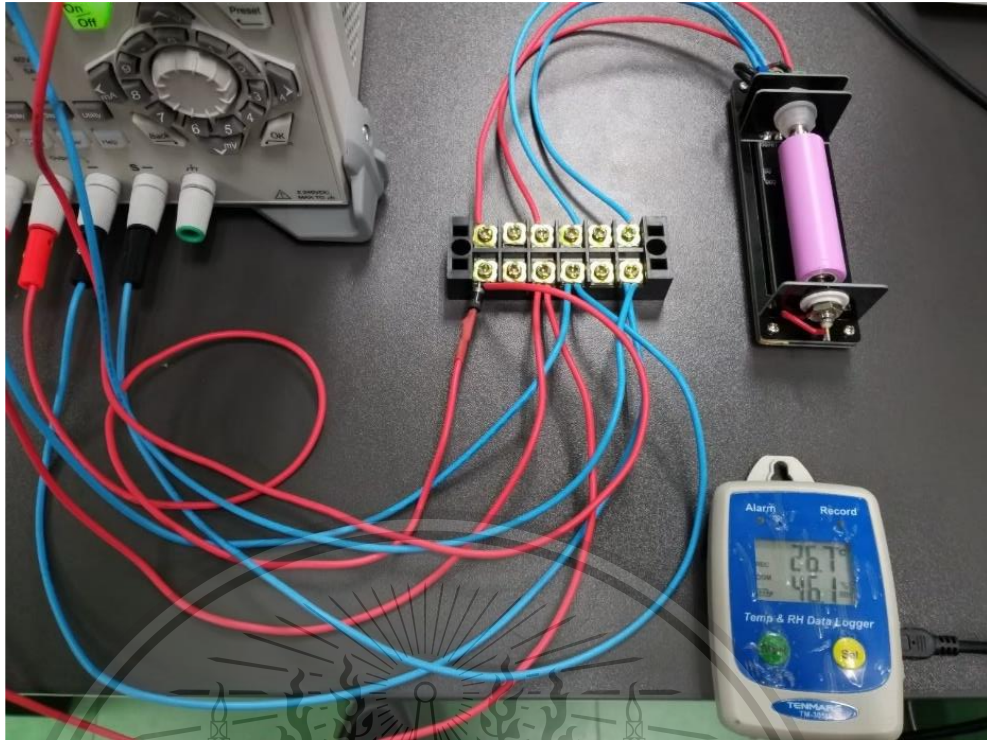


รูปที่ ข.4 วิเคราะห์ข้อมูลหลังการทดสอบเพื่อเริ่มการทดสอบครั้งต่อไป

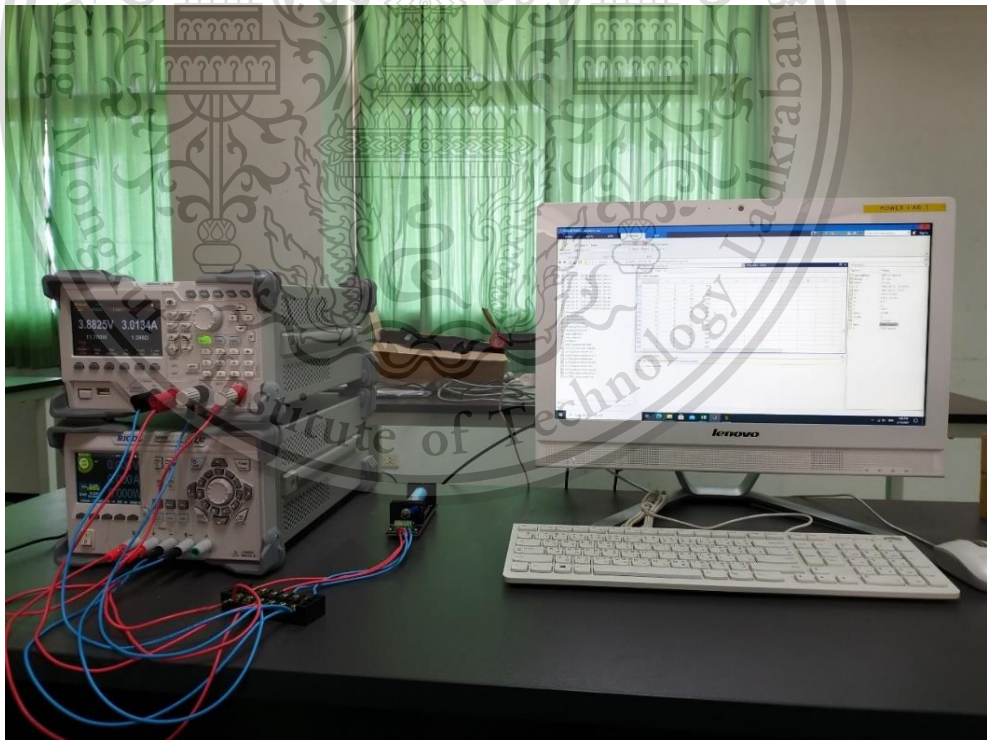
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ ข.5 แสดงการใช้งานเครื่องTM-305U เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศแบบดิจิทัล



รูปที่ ข.6 แสดงการใช้งานเครื่อง DL3021 Programmable DC Electronic Load และ การบันทึกค่า

ผ่านโปรแกรม MATLAB  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล : นายสิรภพ จำภา  
วัน - เดือน - ปี เกิด : 5 พฤศจิกายน 2541  
ภูมิลำเนา : 377/565 ตำบลหนองหอย อำเภอเมืองเชียงใหม่  
จังหวัดเชียงใหม่ 50210  
ประวัติการศึกษา : ปี 2560 เริ่มเข้ารับการศึกษาระดับวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล : นายสุทัศน์ ปะriebรัมย์  
วัน - เดือน - ปี เกิด : 26 กันยายน 2541  
ภูมิลำเนา : 71 หมู่ 15 บ้านโนนรัง ตำบลกระสัง อำเภอเมือง  
จังหวัดบุรีรัมย์ 31000  
ประวัติการศึกษา : ปี 2560 เริ่มเข้ารับการศึกษาระดับวิศวกรรม  
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ชื่อ - นามสกุล : นายอัฟฟาน แวชู

วัน - เดือน - ปี เกิด : 12 พฤษภาคม 2542

ภูมิลำเนา : 23/28 หมู่2 ตำบลสะเตงนอก อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

ประวัติการศึกษา : ปี 2560 เริ่มเข้ารับการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ - นามสกุล : นายเอกรัตน์ บุตรศิริ

วัน - เดือน - ปี เกิด : 24 ธันวาคม 2541

ภูมิลำเนา : 627/1 ตำบลปงตำ อำเภอไชยปราการ จังหวัดเชียงใหม่ 50320

ประวัติการศึกษา : ปี 2560 เริ่มเข้ารับการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.