

ระบบจัดการแบตเตอรี่  
BATTERY MANAGEMENT SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2563

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.

# BATTERY MANAGEMENT SYSTEM



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น 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.

ปีการศึกษา 2563

ระบบจัดการแบตเตอรี่

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM



อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ **ดร. สมภพ ผลไม้** 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.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบจัดการแบตเตอรี่

ผู้จัดทำ

1. นาย กฤตยชญ์ หรุปานวงษ์
2. นางสาว เกศินี อินทร์ไตรรัตน์
3. นาย เกื้อกุล ฤกษ์วัฒนากุล
4. นาย คณพศ ตรีบุบผา





..... อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น (ดร. สมภพใจ ผลไม้) ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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.

## ระบบจัดการแบตเตอรี่

นาย กฤตยชญ์ หรุปานวงษ์  
นางสาว เกศินี อินทร์ไตรรัตน์  
นาย เกื้อกูล ฤกษ์วัฒนากุล  
นาย คณพศ ตริบุบผา  
ดร.สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2563

### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประมาณสถานะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความแม่นยำโดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ประโยชน์ของการประมาณสถานะที่แม่นยำคือ ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น มีประสิทธิภาพและช่วยในการวางแผนการชาร์จและการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ใช้งาน การประมาณสถานะแบตเตอรี่นั้นมียุ่สามขั้นตอน ซึ่งเริ่มต้นจากการหาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและคุณสมบัติของสถานะประจุด้วยการชาร์จและดิสชาร์จที่กระแสต่ำ ๆ จากนั้นคือการหาแบบจำลองของวงสมมูลของแบตเตอรี่โดยใช้เทคนิค state-space ของ system identification และสุดท้ายคือการประมาณสถานะประจุโดยใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้พารามิเตอร์จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ ในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้การประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์จะดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะถูกตรวจวัดผ่าน LTC6813-1 ที่อยู่ภายในบอร์ดสวิตช์ DC2350B และจากผลการทดลองในกรณีที่มีข้อผิดพลาดของออฟเซตในการวัดกระแส จะเห็นได้ว่าตัวกรองคาลแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีการประมาณสถานะประจุที่แม่นยำเหนือกว่าเทคนิคตัวนับคูลอมบ์แบบดั้งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>i</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## Battery Management System

Mr.Kritayod Rupanwong

Ms.Kaesinee Intrairat

Mr.Kueakun Reokwattanakun

Mr.Khanaphot Treebubpha

Dr.Sompob Polmai Advisor

### ABSTRACT

This thesis proposes battery management system based on an accurate lithium-ion battery state estimation using extended Kalman filter. The benefit of accurate state estimation is a longer battery life, good performance and helping to provide an optimal charging and travel planning for users. The state estimation involves three steps procedure. The first step is the obtaining open-circuit voltage and state of charge characteristic by low C-rate charging and discharging tests. The next step is to find the battery equivalent circuit model using state-space system identification technique. Finally, the state of charge estimation using extended Kalman filter is performed using the parameters from the previous steps. In this thesis, real-time battery state of charge estimation is carried out in MATLAB. The cell voltage and current are monitored using LTC6813-1 IC on the DC2350B demonstration board. The experimental results in the case of intended current measurement offset error show that the extended Kalman Filter has superior state of charge estimation accuracy comparing with the conventional Coulomb counting technique.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>ii</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถจากดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิดในการทำโครงการ และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำโครงการ และแรงกระตุ้นเพื่อให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้สั่งสอนและมอบความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ รวมทั้งบุคลากรประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์ และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ร่วมภาควิชาทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำโครงการตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use <sup>iii</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	4
2.2 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM)	5
2.3 สถานะประจุ (STATE OF CHARGE – SOC)	6
2.4 INTERNAL RESISTANCE MEASUREMENT	8
2.5 WARBURG IMPEDANCE	11
2.6 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่	13
2.7 ตัวกรองคาลมาน (KALMAN FILTER)	14
2.8 วงจรควบคุมชุดแบตเตอรี่ 18 เซลล์ด้วยการเชื่อมต่อเครือข่ายวิธี DAISY CHAIN LTC6813-1	16
2.9 บอร์ดสาคิต DUAL MASTER ISOSPI ADAPTER DC2792B	18
2.10 LINDUINO ONE (DC2026C)	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่ออกจากรั้วมหาวิทยาลัย ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การหาเส้นโค้งแรงดันเปิดวงจร (OCV CURVE)	23
3.2 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วย SYSTEM IDENTIFICATION	25
3.3 การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วย EXTENDED KALMAN FILTER	30
3.4 วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่	34
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	40
4.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ	40
4.2 การทดลองหาสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	50
5.1 สรุปผลการทดลอง	50
5.2 ปัญหาและข้อจำกัด	51
5.3 ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	54
ประวัติผู้เขียน	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>v</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	กลไกการคายประจุ (ซ้าย) และกลไกการอัดประจุ (ขวา) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	4
รูปที่ 2.2	กราฟความสัมพันธ์แรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ	8
รูปที่ 2.3	1ST ORDER BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT	8
รูปที่ 2.4	DC PULSE MEASUREMENT	9
รูปที่ 2.5	BATTERY IMPEDANCE METER BT4560	10
รูปที่ 2.6	COLE-COLE PLOT FOR A LITHIUM-ION BATTERY	10
รูปที่ 2.7	RANDLE CIRCUIT	11
รูปที่ 2.8	MODIFIED RANDLE CIRCUIT	11
รูปที่ 2.9	FOSTER'S CIRCUIT	12
รูปที่ 2.10	BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT MODEL	13
รูปที่ 2.11	3RD ORDER BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT MODEL	13
รูปที่ 2.12	กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน	15
รูปที่ 2.13	กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น	16
รูปที่ 2.14	LTC6813-1	17
รูปที่ 2.15	บอร์ด DC2350B	18
รูปที่ 2.16	การเชื่อมต่อระหว่าง DC2026 LINDUINO ONE และ DC2792B ด้วยสาย RIBBON	19
รูปที่ 2.17	การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI ระหว่าง MASTER และ SLAVE หลายตัว	20
รูปที่ 2.18	การเชื่อมต่อแบบ ISOSPI ที่ MASTER สามารถควบคุม SLAVE ได้หลายตัว	21
รูปที่ 2.19	บอร์ด LINDUINO ONE	22
รูปที่ 3.1	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน LGGBMJ11865 และคุณสมบัติที่สำคัญ	23

รูปที่ 3.2 DC ELECTRIC LOAD DP3021 และ DC ELECTRIC POWER SUPPLY DL811- 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้ว และสถานะประจุ (SOC)	24
รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันเปิดวงจร (OCV)	25
รูปที่ 3.5 BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT, (A) MODIFIED RANDLE CIRCUIT,	25
รูปที่ 3.6 การหาค่าพารามิเตอร์จาก MATLAB CURVE FITTING TOOL	27
รูปที่ 3.7 NON-LINEAR BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT MODEL	28
รูปที่ 3.8 LINEAR BATTERY EQUIVALENT CIRCUIT MODEL	29
รูปที่ 3.9 กราฟเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้วระหว่างค่าที่ได้จากการวัด และค่าที่ได้จาก SYSTEM IDENTIFICATION	30
รูปที่ 3.10 โมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ EXTENDED KALMAN FILTER	30
รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรม EXTENDED KALMAN FILTER เพื่อใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่	31
รูปที่ 3.12 ฟังก์ชัน STATE TRANSITION สำหรับใช้ในบล็อกไดอะแกรม EXTENDED KALMAN FILTER	32
รูปที่ 3.13 ฟังก์ชัน MEASUREMENT สำหรับใช้ในบล็อกไดอะแกรม EXTENDED KALMAN FILTER	32
รูปที่ 3.14 EV REFERENCE APPLICATIONS MODEL	33
รูปที่ 3.15 รูปแบบของกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับขี่ตาม DRIVING CYCLE	33
รูปที่ 3.16 รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับขี่ตาม DRIVING CYCLE ในการอัดและคายประจุ	34
รูปที่ 3.17 SCHEMATIC DIAGRAM ของโมดูลแบตเตอรี่	34
รูปที่ 3.18 การออกแบบโมดูลแบตเตอรี่ลงแผ่น PCB	35
รูปที่ 3.19 โครงสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่	35
รูปที่ 3.20 M-FILE RUN.M (1)	36
รูปที่ 3.21 M-FILE RUN.M (2)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น 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 3.23 M-FILE RECORD.M (2)	39
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SOC 10%	41
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SOC 50%	42
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SOC 90%	43
รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับเวลา	44
รูปที่ 4.5 กราฟกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซตเทียบกับเวลา	44
รูปที่ 4.6 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีออฟเซตเทียบกับเวลา	45
รูปที่ 4.7 กราฟ SOC จากการ COULOMB COUNTING โดยใช้กระแสที่มีออฟเซตเทียบกับเวลา	45
รูปที่ 4.8 กราฟ SOC จากการ COULOMB COUNTING โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซตเทียบกับเวลา	46
รูปที่ 4.9 กราฟ SOC จากการประมาณโดยใช้ EXTENDED KALMAN FILTER เทียบกับเวลา	46
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SOC จากการ COULOMB COUNTING โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซตกับ SOC จากการ COULOMB COUNTING โดยใช้กระแสที่มีออฟเซตและ SOC จากการประมาณโดยใช้ EXTENDED KALMAN FILTER	47
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความผิดพลาดของการประมาณค่า SOC โดย EXTENDED KALMAN FILTER และโดย COULOMB COUNTING กรณีที่ตัวตรวจจับกระแสมีออฟเซต	47
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันระหว่างขั้วจากการวัดกับแรงดันระหว่างขั้วจากการประมาณโดยใช้ EXTENDED KALMAN FILTER	49
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลต่างระหว่างแรงดันระหว่างขั้วจากการวัด กับแรงดันระหว่างขั้วจากการประมาณโดยใช้ EXTENDED KALMAN FILTER	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>viii</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบบเตอร์ที่ SOC 50%	27
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์จาก SYSTEM IDENTIFICATION ของวงจรสมมูลแบบเตอร์ที่ SOC 50%	29
ตารางที่ 4.1 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SOC 10%	40
ตารางที่ 4.2 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SOC 50%	41
ตารางที่ 4.3 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SOC 90%	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use<sup>ix</sup> only, not allowed for commercial use.

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

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ในปัจจุบันทั่วโลกได้ประสบปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งนั่นคือ ปัญหามลพิษทางอากาศ สาเหตุสำคัญนั้นเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรม การผลิตไฟฟ้า การเกษตร ส่วนครัวเรือน และการคมนาคม จากการรายงานของ Environmental Protection Agency (EPA) ในปี 2019 ที่ว่า “แหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากที่สุดในสหรัฐอเมริกา คือ การคมนาคม” [1] ดังนั้นการคมนาคมจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การคมนาคมส่วนใหญ่นั้นล้วนเกี่ยวข้องกับรถยนต์หรือยานยนต์น้ำมันที่มีการใช้น้ำมันชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล เพื่อนำมาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดการเผาไหม้ซึ่งเป็นสาเหตุของก๊าซเรือนกระจก ทำให้ในปัจจุบันรัฐบาลประเทศต่าง ๆ ได้ร่วมมือกันเพื่อสนับสนุนให้ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นยานยนต์หลักแทนยานยนต์น้ำมัน โดยที่ข้อดีของยานยนต์ไฟฟ้าคือการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สู่มอเตอร์ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ ซึ่งในแบตเตอรี่นั้นไม่เกิดการเผาไหม้เหมือนกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจึงช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศได้ และแบตเตอรี่ที่เป็นส่วนสำคัญภายในยานยนต์ไฟฟ้านี้ส่วนมากจะเลือกใช้ “แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน”

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราการคายประจุต่ำ และสามารถให้พลังงานได้สูง [2] แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเสียหายได้ง่ายหากใช้งานได้ไม่ถูกวิธี ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจึงต้องมีระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ แบตเตอรี่จึงจะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยระหว่างการใช้งาน

ระบบจัดการแบตเตอรี่ประกอบด้วย การประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่มีความจำเป็นต่อการใช้งานของแบตเตอรี่ได้แก่ สถานะประจุ สถานะกำลัง สถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ ระบบป้องกันและสมดุลแรงดันเซลล์แบตเตอรี่ โดยการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำสามารถช่วยให้วางแผนการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การคำนวณระยะทางคงเหลือสำหรับแบตเตอรี่ภายในยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสถานะของประจุ ซึ่งในปริภูมิตฤษฎีนี้เลือกใช้วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman - Filter) ในการประมาณสถานะประจุเนื่องจากมีความแม่นยำและไม่มีข้อผิดพลาดจากผลของสถานะประจุช่วงเริ่มต้นเหมือนวิธี Coulomb Counting

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่
2. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ และนำตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended- Kalman Filter) มาใช้ในการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
3. เพื่อสร้างและพัฒนาระบบการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่
2. ออกแบบและสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเปิดวงจรของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ

## 1.4 แผนการดำเนินโครงการ

### ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
ทำการทดลองหา OCV - SoC Curve ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน										
ทำการทดลองหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน										
ออกแบบตัวกรองคาลมานเพื่อประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยโปรแกรม MATLAB										
ออกแบบโปรแกรมสำหรับวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่										
ออกแบบวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่										

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงาน	ช่วงเวลา									
	พ.ศ. 2563					พ.ศ. 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ทดลองวงจรประมาณสถานะ แบตเตอรี่										
ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันเปิดวงจรกับอุณหภูมิ										
สรุปผลงานวิจัย										
จัดทำรูปเล่มปริยญาานิพนธ์										
นำเสนอผลงานวิจัย										

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้
2. สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ได้
3. สามารถสร้างวงจรประมาณสถานะของแบตเตอรี่ได้
5. สามารถสร้างระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพได้

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

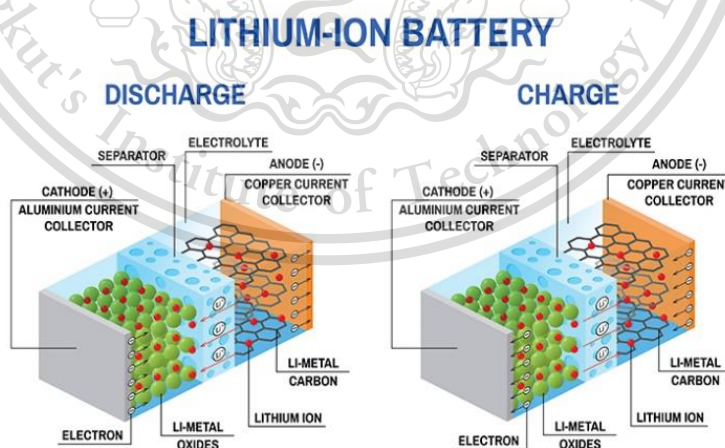
### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์เคมีไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเคมีที่อยู่ในเซลล์แบตเตอรี่ แบตเตอรี่ประกอบด้วยส่วนหลักๆ สามส่วนคือ แคโทด (cathode) หรือ ขั้วบวก แอโนด (anode) หรือ ขั้วลบ และอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)

แบตเตอรี่แบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (primary batteries) และแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (rechargeable batteries) แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง เมื่อปฏิกิริยาเคมีเกิดไปบ้างแล้ว (ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วบวกและปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วลบ) จะไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้จึงใช้ได้เพียงครั้งเดียว ส่วนแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟใหม่ได้ ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดไปข้างหน้า และย้อนกลับได้เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ (ชาร์จแบตเตอรี่) จึงใช้ได้หลายครั้ง [3]

โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจัดเป็นแบตเตอรี่ประเภททุติยภูมิหรือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งขั้วแคโทดโดยทั่วไปเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์ ( $\text{Li}_x\text{MO}_2$  - โดยที่ M แทน Fe Co Mn หรือ Ni) ขั้วแอโนดมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน เช่น แกรไฟต์ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น  $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$  และ  $\text{LiClO}_4$



รูปที่ 2.1 กลไกการคายประจุ (ซ้าย) และกลไกการอัดประจุ (ขวา) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

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.

### 2.1.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ในขณะที่อัดประจุไฟ (Charge) อิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วบวกไปสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่จากขั้วบวกผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปสู่ขั้วลบ จากนั้นลิเทียมไอออนไปเกาะอยู่กับคาร์บอนมากขึ้นตามความสามารถในการชาร์จ

ในขณะที่คายประจุ (Discharge) ลิเทียมไอออนจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์กลับไปยังขั้วบวก เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนที่ไหลกลับขั้วบวกผ่านวงจรภายนอก และให้พลังงานไฟฟ้าออกมา จนกว่าลิเทียมไอออนที่ไปเกาะอยู่กับคาร์บอนจะหมดไป แบตเตอรี่ก็จะหมดลงด้วยเช่นกัน [4]

### 2.1.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องด้วยประกอบไปด้วยข้อดีมากมาย ดังนี้

- ช่วงแรงดันในการใช้งานสูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดหุติยภูมิอื่น ๆ แรงเฉลี่ยอยู่ที่ 3.7 V เมื่อเทียบกับแรงดันเฉลี่ยของแบตเตอรี่ NiMH ที่ 1.2 V
  - มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ประมาณ 50-260 Wh/kg
  - มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา
  - อัตราการคายประจุตัวเองต่ำ (Low Self-discharge) ประมาณ 0.03-0.1% ต่อวัน
  - วงรอบการใช้งานสูง (Life Cycle) ประมาณ 1,000 รอบขึ้นไป
- แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนก็ยังข้อด้อยอยู่เช่นกัน ดังนี้
- มีการเสื่อมอายุตามเวลา แม้จะไม่ถูกใช้งาน อายุการใช้งานประมาณ 2-3 ปี
  - ลิเทียมเป็นธาตุที่ติดไฟง่าย จึงทำให้แบตเตอรี่ต้องมีวงจรป้องกันเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถทำงานได้ในช่วงแรงดันปกติ โดยป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจร แรงดันที่สูงหรือต่ำเกินไป จนทำให้แบตเตอรี่ได้รับความเสียหายถาวร
  - อุณหภูมิมีผลต่อการใช้งาน หากอุณหภูมิสูงจะทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพไวยิ่งขึ้น
  - ราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นหากเทียบราคาต่อ Wh [5]

## 2.2 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System) หรือ BMS คือวงจรที่สร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

1. ตรวจสอบ แจ้งเตือนและตัดวงจรแบตเตอรี่ออกจากโหลด เมื่อพบความผิดปกติในการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในสภาวะปกติ

ระบบจัดการแบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนสมองของมนุษย์หรือซีพียูของคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเป็นศูนย์กลางของระบบแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยจะรวบรวมข้อมูลของแบตเตอรี่ผ่านเซนเซอร์จากนั้นประมวลผลผ่านอัลกอริทึมของระบบ หรือ แสดงผลออกมา ฟังก์ชันพื้นฐานของระบบจัดการแบตเตอรี่ หรือ BMS ประกอบไปด้วย

1. การวัดแรงดัน อุณหภูมิ และกระแสของแบตเตอรี่ รวมถึงตรวจจับฟอลต์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น
2. ระบบป้องกัน เพื่อป้องกันระบบและแบตเตอรี่ ที่อาจเกิดขึ้นได้จาก overcharge, overdischarge, overcurrent, กระแสลัดวงจร, และอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่กำหนด
3. แสดงแบตเตอรี่คงเหลือ ในรูปแบบสถานะประจุ (State of Charge - SoC) ของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ รวมถึงคำนวณพลังงานคงเหลือภายในแบตเตอรี่ อาจมีการสมดุลแรงดันแบตเตอรี่เพื่อความแม่นยำในการอ่านค่า
4. วิเคราะห์คำนวณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health - SoH) [5]

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

สถานะประจุ (State of Charge) หรือ SoC คือระดับประจุของแบตเตอรี่โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบระหว่างความจุคงเหลือของแบตเตอรี่กับค่าความจุพิกัดของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าความจุพิกัดของแบตเตอรี่จะสามารถทราบได้จากผู้ผลิต เมื่อแบตเตอรี่เต็มค่าสถานะประจุมีค่าเท่ากับ 100% และเท่ากับ 0% เมื่อแบตเตอรี่ไม่มีประจุคงเหลืออยู่ การประมาณค่าสถานะประจุจึงมีความสำคัญมาก เมื่อแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพ ค่าความจุพิกัดของแบตเตอรี่จะลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีประมาณค่าสถานะประจุอย่างมีประสิทธิภาพ

สถานะประจุไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณจากตัวแปรจากการวัดโดยตรง (Direct Measurement Variables) ได้สองรูปแบบ คือแบบขณะไม่ใช้งาน (Offline) และแบบขณะใช้งาน (Online) โดยขณะไม่ใช้งานแบตเตอรี่จะต้องทดสอบอัดและคายประจุในอัตราคงที่ เช่น Coulomb-counting วิธีนี้ให้การประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ที่แม่นยำ แต่ใช้เวลาการทดสอบนาน มีค่าใช้จ่ายสูง และรบกวนประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะไม่สามารถนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอื่นได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการประมาณแบบขณะใช้งาน [6]

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.

### 2.3.1 วิธีคำนวณคูลอมบ์ (Coulomb-counting)

วิธีคำนวณคูลอมบ์ หรือวิธีการรวมกระแส (Current Integration Method) เป็นวิธีที่ถูกใช้คำนวณ SoC โดยทั่วไป วิธีนี้อาศัยการอ่านค่ากระแส จากนั้นคำนวณการวัดอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งอัดและคายประจุและทำการหาปริพันธ์เทียบกับเวลาดังสมการที่ 2.1

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t I_{\text{batt}}(t) dt}{Q_{\text{Rated}}} \times 100\% \quad (2.1)$$

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

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

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

โดยการคำนวณหาค่า SoC ของวิธีนี้นั้น จะใช้การหาปริพันธ์ในขณะที่การใช้งาน แต่ว่ากระแสที่ทำการชาร์จขึ้นมาใหม่มีค่าน้อยกว่ากระแสที่ปล่อยออกมาในระยะเวลาเท่ากัน ทำให้เกิดการสูญเสียจากการคายประจุด้วยตัวเอง (Self-discharging) ซึ่งความสูญเสียส่วนนี้ส่งผลให้การคำนวณเกิดความผิดพลาด ดังนั้นการหาปริมาณ SoC ด้วยวิธีนี้ต้องทำการปรับเทียบเป็นประจำ เช่น ต้องรีเซ็ตค่าให้ SoC เป็น 100% เมื่อแบตเตอรี่ทำการอัดประจุเต็ม [7]

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

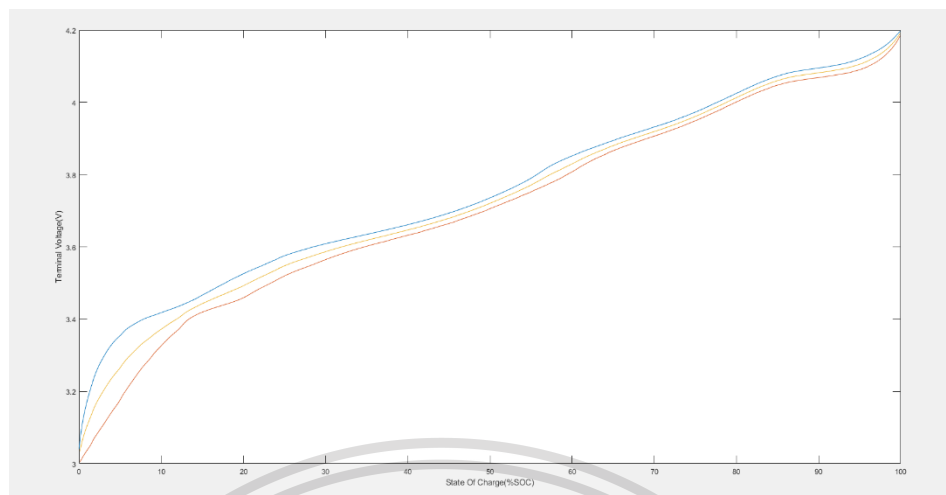
วิธีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจะทำการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแบตเตอรี่เป็นสถานะประจุโดยใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับสถานะประจุของแบตเตอรี่ (OCV-SoC curve) ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมากขึ้นจากกระแสแบตเตอรี่และอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามหากจะใช้วิธีนี้แบตเตอรี่จะต้องอยู่ในสถานะเปิดวงจรเป็นเวลานาน (Static Equilibrium) วิธีการนี้จึงไม่สามารถใช้กับแบตเตอรี่ที่ใช้งานอยู่ได้

ดังนั้นในการหาแรงดันเปิดวงจรในสภาวะปกติสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของแรงดันระหว่างช่วงของการอัดประจุและคายประจุด้วยกระแสคงที่ ภายใต้อุณหภูมิที่สามารถควบคุมได้ (Controlled Condition) เพื่อเก็บค่าแรงดันระหว่างขั้ว (Terminal Voltage) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ โดยใช้กราฟเปรียบเทียบ (Lookup Table) ของ OCV-SoC curve ซึ่งความสัมพันธ์นี้เป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 [7]

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.

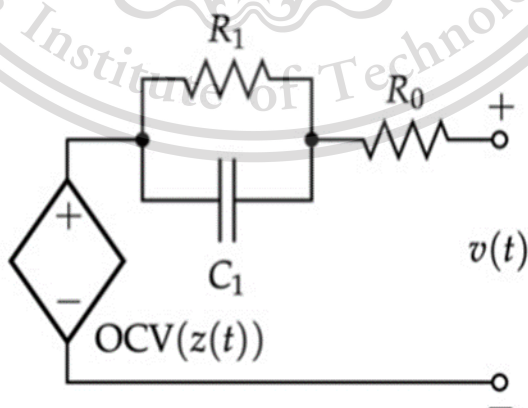


รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์แรงดันระหว่างขั้วและสถานะประจุ

### 2.3.3 วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

เพื่อทำการกำจัดข้อบกพร่องของวิธีแรงดันและวิธีการรวมกระแส จึงใช้ตัวกรองคาลมาน แบตเตอรี่สามารถสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าได้ซึ่งตัวกรองคาลมานจะใช้ในการประมาณแรงดันส่วนเกินเนื่องจากกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้ร่วมกับวิธีการรวมกระแส จะสามารถทำการประเมิน SoC ได้อย่างแม่นยำ จุดเด่นของการใช้ตัวกรองคาลมานคือสามารถปรับความน่าเชื่อถือของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์โดยจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.7 [7]

### 2.4 Internal Resistance Measurement



รูปที่ 2.3 1st Order Battery Equivalent Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

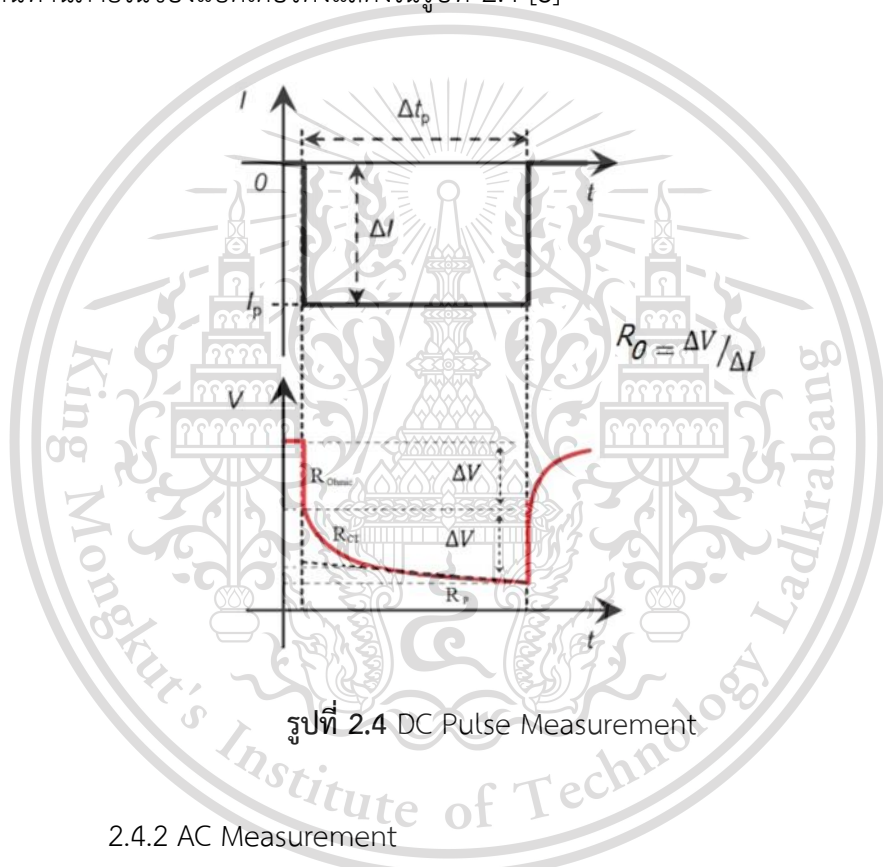
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่อันดับหนึ่งโดยแสดงดังรูปที่ 2.3 ในการหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ สามารถหาได้จาก 2 วิธีดังนี้

#### 2.4.1 DC Measurement

การหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบดีซีสามารถทำได้โดยการสร้างพัลส์ของกระแส โดยขนาดความกว้างของพัลส์มีขนาดเล็ก เพื่อใช้ในการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งจะทำการคายประจุของแบตเตอรี่ พักแบตเตอรี่ หลังจากนั้นอัดประจุของแบตเตอรี่ ในการอัดประจุของแบตเตอรี่มีผลของ Coulomb Efficiency เข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถหาความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [8]



รูปที่ 2.4 DC Pulse Measurement

#### 2.4.2 AC Measurement

การหาค่าความต้านทานภายในเริ่มต้นของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการวัดแบบเอซี สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งสามารถวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูงระหว่าง 0.1-1000 Hz [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

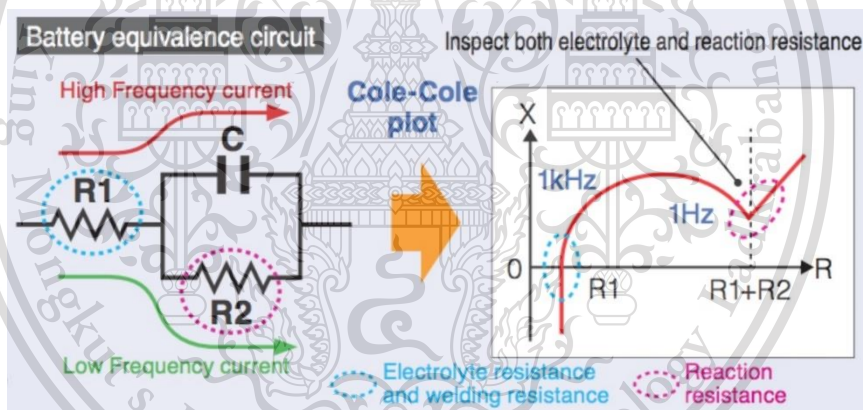
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 2.5 Battery Impedance Meter BT4560

Battery Impedance Meter ในการวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงในรูปแบบของ Cole-Cole plot โดยในย่านความถี่ต่ำค่าความต้านทานที่วัดได้คือความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ส่วนในย่านความถี่สูงค่าความต้านทานที่วัดได้คือ Electrolyte Resistance เนื่องจากที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุแสดงพฤติกรรมลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.6



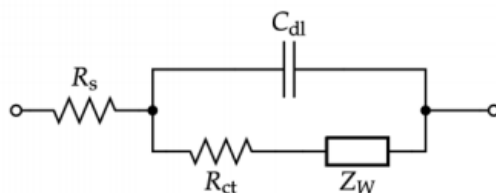
รูปที่ 2.6 Cole-Cole plot for a lithium-ion battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

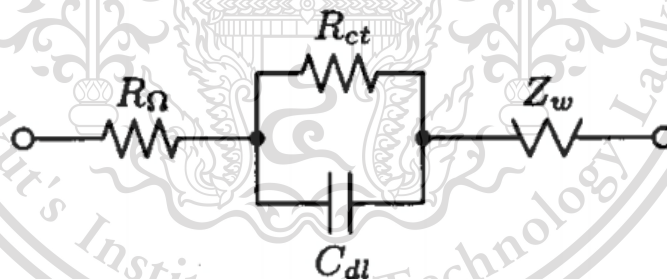
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## 2.5 Warburg Impedance



รูปที่ 2.7 Randle Circuit

โดยที่  $R_s$  คือ ความต้านทานอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte Resistance)  
 $R_{ct}$  คือ ความต้านทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge Transfer Resistance)  
 $C_{dl}$  คือ ความเก็บประจุของชั้นดับเบิลเลเยอร์ (Double-layer Capacitance)  
 $Z_w$  คือ ความต้านทานของการแพร่ (Warburg Impedance or Diffusion Resistance)  
 เนื่องจาก Warburg Impedance มีค่าคงที่ของเวลามากกว่า Double-layer Capacitance เป็นเวลามากดังนั้นจึงสามารถแยก Warburg Impedance ออกมาข้างนอกได้ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [5]



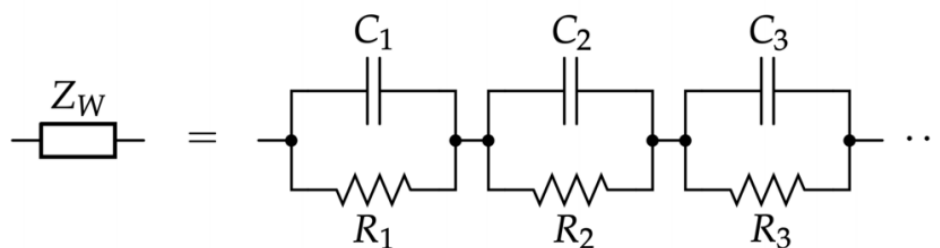
รูปที่ 2.8 Modified Randle Circuit

เนื่องจากสมการอนุพันธ์ปกติไม่สามารถดำเนินการแทน Warburg Impedance ได้ ดังนั้นจึงใช้ multiple resistor-capacitor network ที่มีการต่ออนุกรมอธิบายแทนซึ่งเรียกว่า Foster's Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 2.9 Foster's Circuit

ค่าพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2}}{1 + \frac{4\tau_d s}{(2n-1)^2 \pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + sC_n R_n} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายใน *Foster's Circuit* ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (2.3)$$

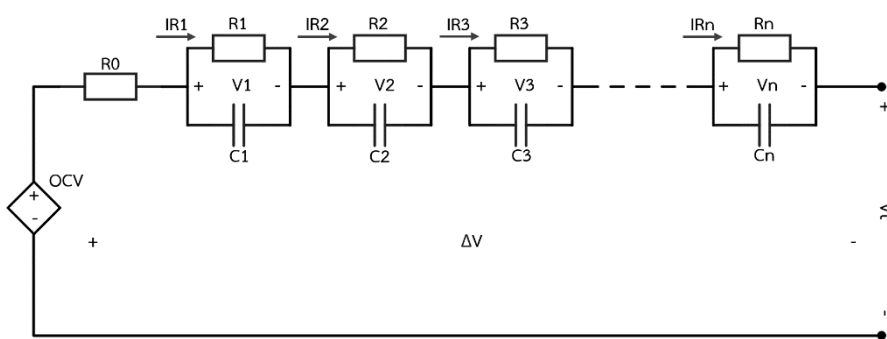
$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (2.4)$$

เนื่องจาก Double-layer Capacitance ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลกระทบต่อวงจรน้อยมากจึงสามารถละเว้นได้ ทำให้วงจรสมมูลของแบตเตอรี่สามารถแสดงดังรูปที่ 2.10 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

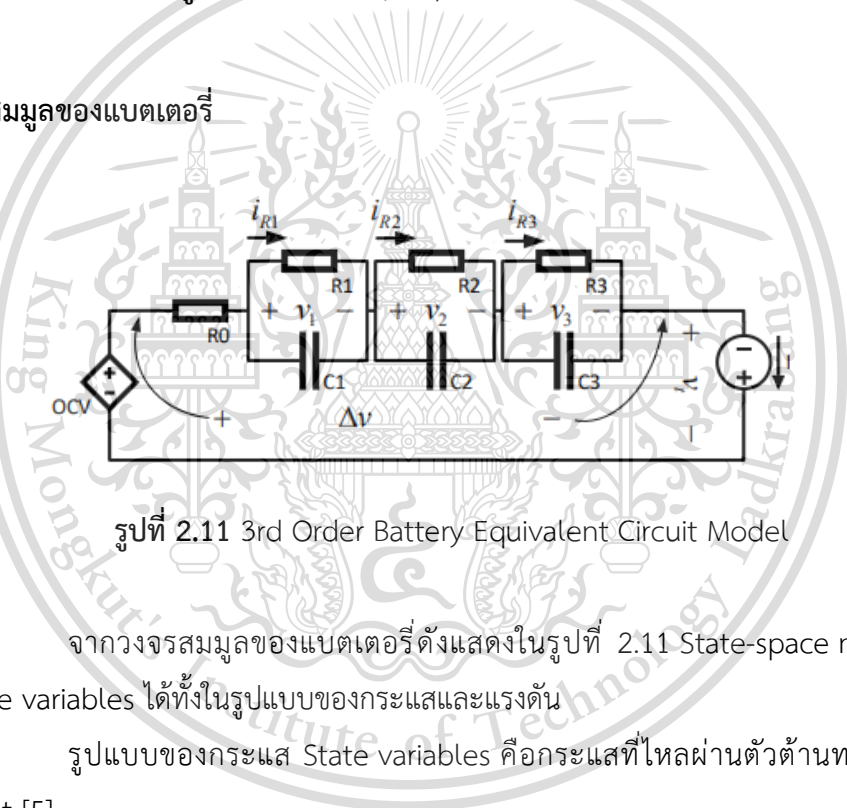
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 2.10 Battery Equivalent Circuit Model

2.6 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.11 3rd Order Battery Equivalent Circuit Model

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.11 State-space model สามารถแสดง State variables ได้ทั้งในรูปแบบของกระแสและแรงดัน

รูปแบบของกระแส State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's equivalent [5]

$$\left[ \frac{di_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [i_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} i \quad (2.5)$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - R_1 i_{R1} - R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\dot{i}_R = A i_R + B i \quad (2.7)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_t = OCV(SoC) + C i_R + D i \quad (2.8)$$

รูปแบบของแรงดัน State variables คือแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานใน Foster's – equivalent [5]

$$\left[ \frac{dv_R}{dt} \right] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} [v_R] + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \\ \frac{1}{C_3} \end{bmatrix} i \quad (2.9)$$

$$v_t = OCV(SoC) - R_0 i - v_{R1} - v_{R2} - v_{R3} \quad (2.10)$$

$$\dot{v}_R = A v_R + B i \quad (2.11)$$

$$v_t = OCV(SoC) + C v_R + D i \quad (2.12)$$

## 2.7 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

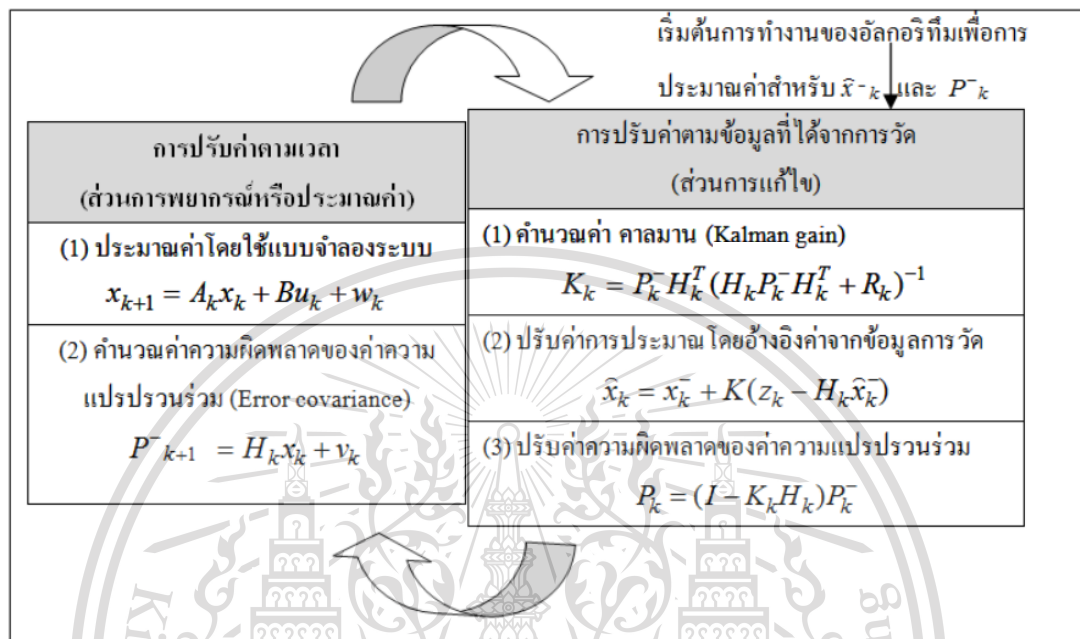
ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) คือการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Estimation) เป็นขั้นตอนวิธีแบบเวียนบังเกิดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัต โดยการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัตนี้ อาจจะถูกประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการประมาณตัวแปรสถานะที่ถูกสัญญาณรบกวนหรือเกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดตัวแปรสถานะนั้น ๆ หรือในบางกรณีก็ใช้ร่วมกับข้อมูลของตัวแปรสถานะที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์ซึ่งทำให้ข้อมูลของตัวแปรสถานะมีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้นกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว [10]

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.

โดยแบบจำลองที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างตัวกรองคาลมานมี 2 ส่วนหลักคือ แบบจำลองระบบ (State Transition Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



$x$  = state matrix       $P$  = State variance matrix       $x_k$  = current state  
 $A$  = State transition matrix       $H$  = Measurement matrix       $\hat{x}$  = Estimation state  
 $B$  = Control matrix       $K$  = Kalman gain       $x_{k+1}$  = future state  
 $u$  = Control variable       $R$  = Measurement variance matrix       $I$  = Identity matrix  
 $w$  = Gaussian white noise       $Z$  = Measurement variables       $P^-$  = previous state variance

รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน

### 2.8.1 ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended Kalman Filter)

โดยหลักการทำงานของอัลกอริทึม สิ่งที่แตกต่างกันจากตัวกรองคาลมานแบบปกติก็คือ ฟังก์ชันที่ถูกนำไปใช้ในแบบจำลองจะเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองระบบและแบบจำลองการวัดโดยใช้สมการดังต่อไปนี้ [10]

แบบจำลองระบบ (State Transition Model)

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) \quad (2.13)$$

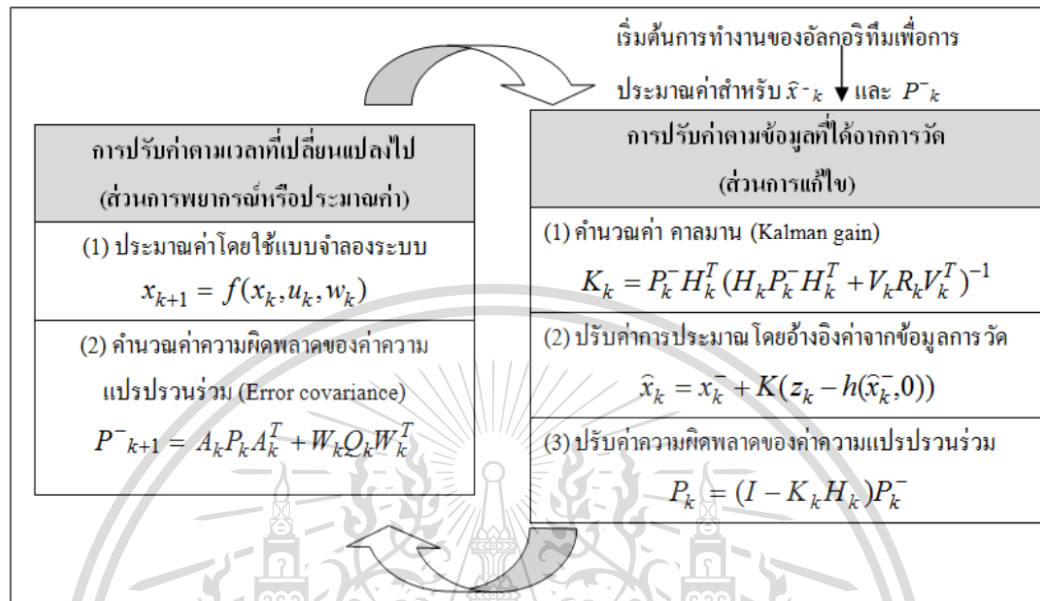
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

แบบจำลองการวัด (Measurement Model)

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.13 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น

กระบวนการที่ถูกเพิ่มขึ้นใน Extended Kalman Filter คือการแปลงฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง  $f$  และ  $h$  ให้เป็นฟังก์ชันที่เป็นเชิงเส้นในทุก ๆ สถานะที่กำลังเปลี่ยนแปลงไปของแบบจำลอง โดยใช้เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ซึ่งเป็นรูปแบบการหาอนุพันธ์ โดยจะใช้อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First Order Derivative) [10]

## 2.8 วงจรควบคุมชุดแบตเตอรี่ 18 เซลล์ด้วยการเชื่อมต่อเครือข่ายวิธี Daisy chain LTC6813-1

LTC6813-1 เป็นชุดควบคุมแบตเตอรี่หลายเซลล์ที่สามารถวัดแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันได้สูงสุด 18 เซลล์ โดยมีความผิดพลาดน้อยกว่า 2.2 mV ซึ่งแต่ละเซลล์นั้นมีช่วงของการวัดอยู่ระหว่าง 0 ถึง 5V แบตเตอรี่ทั้ง 18 เซลล์สามารถวัดได้ในระยะเวลา 290  $\mu$ s และเนื่องจากอัตราการรับข้อมูลที่ต่ำทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนความถี่สูงได้

LTC6813-1 จำนวนหลายชุดนี้สามารถเชื่อมต่อกันได้แบบอนุกรมและสามารถควบคุมได้พร้อมกันด้วยสายแบตเตอรี่แรงดันสูง โดยในแต่ละชุดมีการเชื่อมต่อแบบ isoSPI เพื่อให้มีความเร็วที่สูง มีความต้านทานต่อย่านความถี่วิทยุ (RF) และระยะทางการสื่อสารที่ไกล อุปกรณ์จำนวนหลายชุดนี้ถูก

เอกสารนี้เป็นเชื่อมต่อด้วย daisy chain โดยมีหนึ่งชุดหลักเพื่อประมวลผลการเชื่อมต่อสำหรับอุปกรณ์ทั้งหมด ซึ่งการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

daisy chain นี้สามารถใช้งานได้ทั้งสองทิศทาง เพื่อให้มั่นใจในความสมบูรณ์ของการสื่อสาร แม้ในกรณีที่เกิดข้อผิดพลาดระหว่างเส้นทางการสื่อสาร

LTC6813-1 สามารถทำงานได้โดยตรงจากชุดแบตเตอรี่หรือจากแหล่งจ่ายไฟที่มีการ isolated ซึ่งบอร์ด LTC6813-1 นี้ประกอบไปด้วย Passive balancing สำหรับแต่ละเซลล์โดยมีการควบคุม PWM duty cycle สำหรับแต่ละเซลล์ คุณสมบัติอื่นๆ ประกอบไปด้วย 5V regulator บนบอร์ด General purpose I/O (GPIO) จำนวน 9 ขาและมีโหมดพักผ่อนเมื่อการใช้กระแสไฟฟาลดเหลือ 6  $\mu\text{A}$  [11]



รูปที่ 2.14 LTC6813-1

### 2.8.1 Daisy chain

Daisy chain คือการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ต่อพ่วงหรือโหนดเครือข่ายต่อกันเป็นชุด ๆ แบบอนุกรมของคอมพิวเตอร์ซึ่งเทียบเท่ากับการต่ออนุกรมของวงจรไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีการเชื่อมต่อแบบ daisy-chainable ได้แก่ Small Computer System Interface (SCSI) และ FireWare ที่ช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถสื่อสารกับฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ต่อพ่วง เช่น Disk drives tape drives CD-ROM drive เครื่องพิมพ์และสแกนเนอร์ให้เร็วขึ้นและมีความยืดหยุ่นมากกว่าการเชื่อมต่อเครือข่ายก่อนหน้านี้

ข้อได้เปรียบหลักของ Daisy chain คือมีความเรียบง่ายและสามารถปรับขนาดได้ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเพิ่มโหนดที่ไหนก็ได้บนสายตามข้อสูงสุดที่กำหนดไว้ (16 โหนดใน SCSI-2 หรือ SCSI-3 เป็นต้น) และในเครือข่าย Daisy-chain นั้นเหมาะกับเครือข่ายที่มีความยาวตรงๆ จากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง แต่ไม่เหมาะสมกับเครือข่ายที่โหนดกระจายไปรอบๆ โดยในกรณีนี้สายเคเบิลต้องวางในลักษณะซิกแซกรอบๆ และความยาวทั้งหมดของเครือข่ายจะมีความยาวมากเมื่อเทียบกับระยะทางจริงระหว่างโหนด ซึ่งอาจจะทำให้เครือข่ายทำงานช้าสำหรับผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้กับปลายอีกด้านหนึ่งของสาย [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

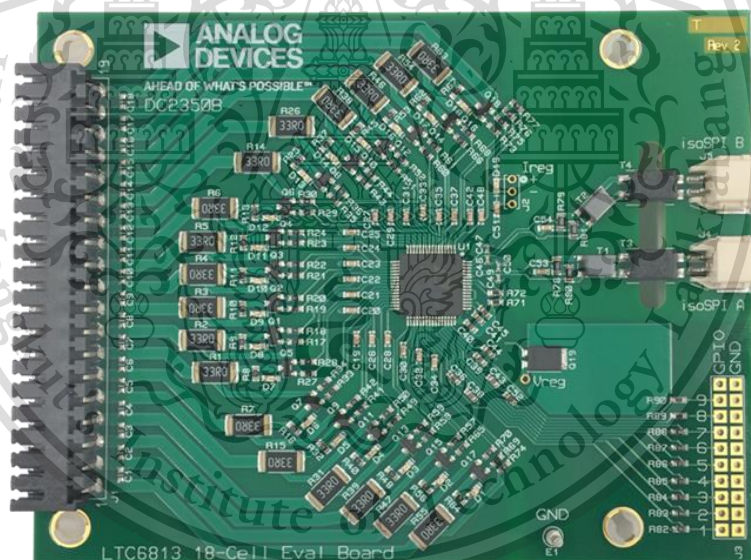
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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

## 2.8.2 บอร์ดสาธิต DC2350B

วงจรสาคิต 2350B มีคุณสมบัติของ LTC6813-1 โดยบอร์ดจำนวนหลายบอร์ดสามารถเชื่อมต่อกันผ่านสาย isolated serial interface 2 สาย (isoSPITM) เพื่อควบคุมชุดแบตเตอรี่ที่ต่ออนุกรมกันจำนวนมาก นอกจากนี้บอร์ดสาธิต DC2350B ยังมีการใช้งานเส้นทางการสื่อสารที่เข้าซ้อนของ isoSPI แบบย้อนกลับได้ และทั้งบอร์ด PCB ส่วนประกอบต่างๆ และตัวเชื่อมต่อ DuraClik ถูกเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อลดการแพร่ EMI และลดการยอมรับได้ของ EMI

บอร์ดสาธิต DC2350B สามารถสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ด้วยการเชื่อมต่อ Dual master isoSPI DC2972B ร่วมกับ Linduino One DC2026C ซึ่ง Linduino One ต้องโหลดข้อมูลด้วยโปรแกรมที่เหมาะสม (เรียกว่า sketch) เพื่อควบคุม IC ของชุดควบคุมแบตเตอรี่และรับข้อมูลผ่านซีเรียลพอร์ต USB Linduino One นั้นมีการเชื่อมต่อ SPI มาตรฐานที่สามารถแปลงเป็น isoSPI ได้จากนั้นเชื่อมต่อกับพอร์ต isoSPI ของ DC2350B (ตัวเชื่อมต่อ J4 หรือ J5) และบอร์ด DC2972B มี SPI-isoSPI สองช่องสำหรับการทำงานแบบย้อนกลับ [13]



รูปที่ 2.15 บอร์ด DC2350B

## 2.9 บอร์ดสาธิต Dual master isoSPI Adapter DC2792B

วงจรสาคิต 2792B คือตัวแปลงสัญญาณซีเรียล SPI ไปเป็น Dual-port isoSPI ที่ใช้ตัวรับสัญญาณ isoSPI แบบ Multiplex LTC6820 และตัวเชื่อมต่อ isoSPI ขนาดเล็ก (ตัวเชื่อมต่อ DuraClik 2 หน้าสัมผัส) ซึ่งบอร์ดสามารถแทนที่ DC1941 ในกรณีที่อุปกรณ์ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) กำลังถูกใช้งาน แต่จะให้ isoSPI หลักตัวที่สองใช้คุณสมบัติทำงานย้อนกลับของ isoSPI ที่สามารถใช้งาน

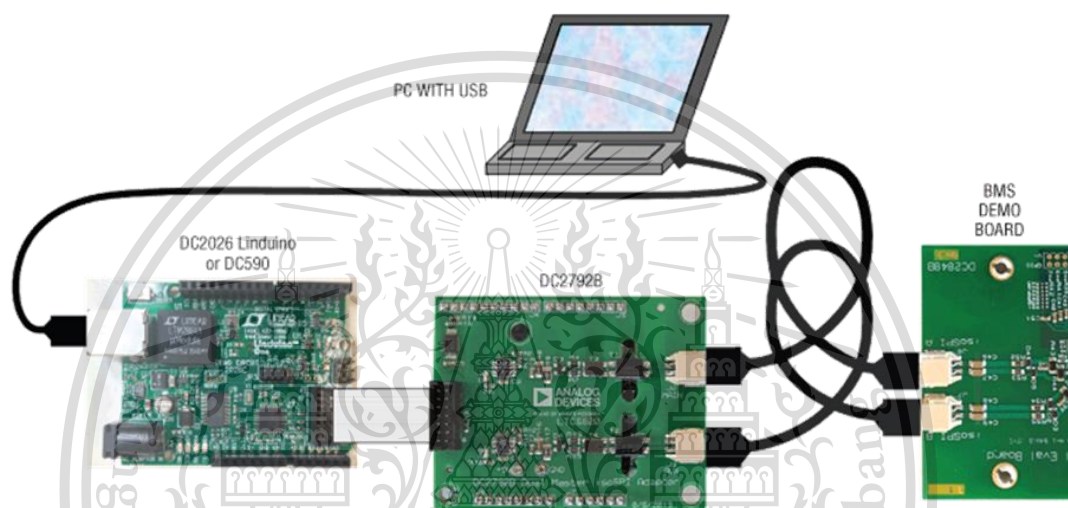
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ได้ การเชื่อมต่อ SPI สามารถทำได้ผ่านสายribbon 14 หน้าสัมผัสชนิดดั้งเดิมจากตัวแปลง USB DC590 หรือ DC2026 หรือติดตั้งโดยตรงบน DC2026 เช่นเดียวกับ Linduino shield

พอร์ต isoSPI ทั้งสองพอร์ตเป็นทั้งพอร์ตหลักและพอร์ตช่วย โดยการทำงานของแต่ละพอร์ตจะถูกแสดงผลด้วยแสง LED สีน้ำเงิน สำหรับการใช้งานแทน DC1941 หรือเครือข่าย isoSPI ที่ไม่สามารถย้อนกลับได้นั้นจะใช้งานพอร์ตหลักเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งกำลังไฟฟ้าของ DC2792B ได้รับมาจากพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์หลักโดยอ้อม โดยที่ตัวแปลง USB to serial กำลังถูกใช้งาน [14]



รูปที่ 2.16 การเชื่อมต่อระหว่าง DC2026 Linduino one และ DC2792B ด้วยสาย Ribbon

### 2.9.1 การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI

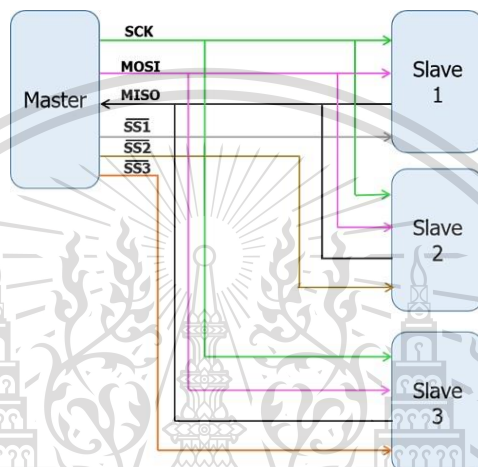
SPI ย่อมาจาก Serial Peripheral Interface คือรูปแบบของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมแบบซิงโครนัสรูปแบบหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยบริษัทโมโตโรล่าในกลางปี ค.ศ. 1980 เพื่อใช้ในการสื่อสารระยะใกล้โดยเฉพาะในระบบสมองกลฝังตัว การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะอาศัยสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะการรับส่งข้อมูล ซึ่งสามารถส่งข้อมูลไปยังปลายทางและรับข้อมูลจากปลายทางกลับมาในครั้งเดียวกัน (Full Duplex) การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI จะแบ่งอุปกรณ์ออกเป็น 2 ฝั่ง คือ Master เป็นตัวควบคุมการรับส่งข้อมูลและ Slave เป็นอุปกรณ์ที่รอรับคำสั่งจาก Master ในบัสการสื่อสารแบบอนุกรมแบบ SPI สามารถมี Slave มีได้มากกว่า 1 ตัว

การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI นั้นใช้สายสัญญาณทั้งหมด 4 สายดังนี้

1. สาย SCK Clock data ใช้สำหรับส่งสัญญาณนาฬิกาจาก Master ไปยัง Slave
2. สาย MISO Master In Slave Out ใช้สำหรับรับข้อมูลจาก slave

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3 มีสาย MOSI Master Out Slave In ใช้สำหรับรับข้อมูลจาก Master ไปยัง Slave ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สาย SS/CS (Slave Select/Chip Select) ใช้สำหรับเลือก Slave ที่ต้องการใช้งาน โดยภายในการสื่อสารระหว่าง Master กับ Slave หลาย ๆ อุปกรณ์นั้น สายสัญญาณ SCK MOSI และ MISO จะใช้งานร่วมกันในทุก Slave แต่มีเพียงสายสัญญาณ SS เท่านั้นที่ไม่ได้ใช้ร่วมกัน เนื่องจากเมื่อเวลาที่ Master ต้องการจะสื่อสารกับ Slave ตัวไหน Master จะส่งสัญญาณลอจิก LOW ให้กับ Slave ตัวนั้นผ่านสายสัญญาณ SS ทำให้สามารถเลือกสื่อสารกับ Slave ที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง [15]



รูปที่ 2.17 การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI ระหว่าง Master และ Slave หลายตัว

### 2.9.2 IsoSPI (Isolated SPI)

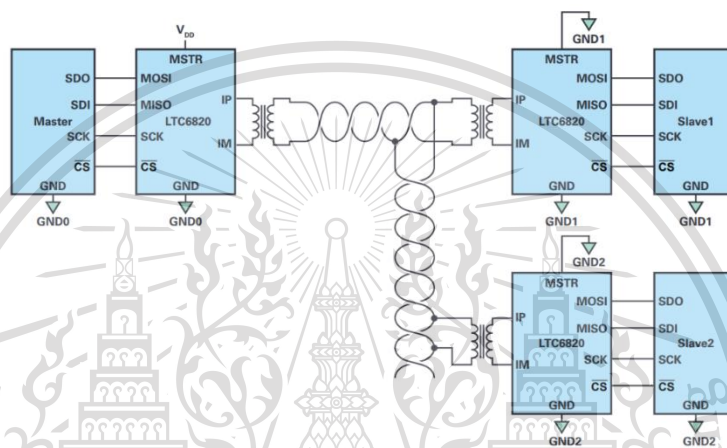
การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI โดยทั่วไปนั้นเหมาะสำหรับระยะทางไม่เกิน 10 เมตร ซึ่งหากต้องการเชื่อมต่อระยะทางที่ไกลกว่าเดิม มักจะใช้ repeater ร่วมด้วย เนื่องจากความต้านทานสายที่เพิ่มขึ้นตามความยาวของสายเคเบิลทำให้เกิดการลดทอนสัญญาณ ดังนั้นสัญญาณเหล่านี้จึงต้องได้รับการขยาย นอกจากนี้ repeater ยังช่วยให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ใหญ่กว่าสามารถทำงานในเวลาเดียวกันได้ โดย repeater นั้นหมายถึง isoSPI LTC6820 ที่สามารถใช้ในการอ่านสัญญาณ isoSPI นี้สามารถขยายสัญญาณได้อย่างง่ายดายด้วยการเพิ่มการแยกส่วนทางไฟฟ้าด้วยสายเคเบิลบิดคู่และหม้อแปลงที่เหมาะสม เนื่องจากสถานะที่รุนแรงที่มักพบในเขตอุตสาหกรรม การสื่อสารด้วยการแยกส่วนทางไฟฟ้าจึงจำเป็นเพื่อป้องกันผู้ใช้งานจากแรงดันที่เป็นอันตรายรวมถึงเพื่อให้แน่ใจว่าระบบมีความน่าเชื่อถือ นอกจากนี้การแยกส่วนยังช่วยให้สามารถวัดค่าต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ แม้จะมีแรงดัน common - mode เป็นบางครั้ง ดังนั้นตัวค้นสำหรับการแยกส่วนจึงเป็นกุญแจสำคัญในการแยกของ input stage จากส่วนที่เหลือของระบบในขณะที่การเชื่อมต่อยังคงเปิดใช้งานอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

จากการใช้งานการสื่อสารด้วย isoSPI ความซับซ้อนของวงจรสำหรับการส่งสัญญาณของการสื่อสาร SPI แบบแยกส่วนในระยะทางไกลสามารถทำให้ง่ายขึ้นได้ เนื่องจากสามารถละเว้นส่วนประกอบจำนวนมากที่จำเป็นในวงจรทั่วไปได้ และ isoSPI LTC6820 นั้นทำให้การเชื่อมต่อแบบ Daisy chain สำเร็จได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นอุปกรณ์ในอุดมคติสำหรับระบบควบคุมแบตเตอรี่ เนื่องจากภายในระบบควบคุมแบตเตอรี่ต้องการการสื่อสารแบบการแยกส่วนทางไฟฟ้าเพราะว่ามีประจุบางส่วนที่สามารถระเบิดได้ เช่น ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ [16]



รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่อแบบ isoSPI ที่ Master สามารถควบคุม Slave ได้หลายตัว

## 2.10 Linduino ONE (DC2026C)

Linduino One เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่คล้ายกับ Arduino UNO ซึ่งใช้ Atmel เป็นตัวประมวลผล โดยจะมีส่วนที่เพิ่มมาจากบอร์ด Arduino UNO คือ มีตัวเชื่อมต่อ QuikEval 14 ขาที่สามารถเสียบเข้ากับอุปกรณ์อนาล็อกต่าง ๆ เช่น ตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล ตัวแปลงดิจิทัลเป็นอนาล็อก การจัดการพลังงาน ระบบตรวจสอบและควบคุม ตัววัดแรงดันรวมของแบตเตอรี่ เป็นต้น และส่วนที่สำคัญคือมีการแยกส่วนการทำงานของระบบไฟฟ้าระหว่างข้อมูล USB และกำลังไฟฟ้า เพื่อให้ทั้งสองส่วนมีความปลอดภัยและลดการรบกวน โดยในโครงการนี้ใช้เพื่อทำการสื่อสารกันระหว่างบอร์ด LTC6813 เพื่อให้ LTC6813 สามารถใช้โปรแกรม Arduino IDE เพื่อทำการเขียนโปรแกรมสั่งการได้ โดยทำการเขียนโปรแกรมผ่านโปรแกรม Arduino IDE ให้แสดงค่าแรงดันของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ และกระแสที่ไหลเข้าและออกจากแบตเตอรี่โดยแสดงผลผ่านจอมอนิเตอร์ [17]

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 2.19 บอร์ด Linduino One



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

#### การออกแบบ และสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

การประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่น LGGBMJ11865 โดยวิธี ตัวกรองคาลมานนั้นต้องใช้ค่าเริ่มต้นคือ เส้นโค้งเปิดวงจรและค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของแบตเตอรี่



Item	Condition / Note	Specification
2.1 Capacity	Std. charge / discharge	Nominal 3350 mAh Minimum 3250 mAh
2.2 Nominal Voltage	Average	3.63V
2.3 Standard Charge	Constant current Constant voltage End current(Cut off)	0.3C (975mA) 4.2V 50mA
2.4 Max. Charge Voltage		4.2 ± 0.05V
2.5 Max. Charge Current		0.5C (1625mA)
2.6 Standard Discharge	Constant current End voltage(Cut off)	0.2C (650mA) 2.5V
2.7 Max. Discharge Current	-20 ~ 5°C 5 ~ 45°C 45 ~ 50°C	0.5C(1625mA) 1.5C(4875mA) 1.5C(4875mA)
2.8 Weight	Approx.	Max. 49.0 g
2.9 Operating Temperature	Charge Discharge	0 ~ 45°C -20 ~ 50°C (cell skin temperature ~60°C)
2.10 Storage Temperature (for shipping state)	1 month 3 month 1 year	-20 ~ 50°C -20 ~ 45°C -20 ~ 20°C

รูปที่ 3.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน LGGBMJ11865 และคุณสมบัติที่สำคัญ

#### 3.1 การหาเส้นโค้งแรงดันเปิดวงจร (OCV Curve)

เริ่มจากการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น อยู่ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ DC Electronic Load DP3021 ทำหน้าที่คายประจุ และ DC Electronic Power Supply DL811 ทำหน้าที่อัดประจุของแบตเตอรี่ โดยทำการอัดและคายประจุด้วยกระแสคงที่ (Constant Current) ในอัตราการอัดและคายประจุ C/30 และทำการบันทึกค่ากระแส แรงดันระหว่างชั่ว และเวลาในแต่ละวินาที ดังนี้

- ช่วงเวลา 0 – 2 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส
- ช่วงเวลา 2 – 32 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการคายประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ 0.108 A

- ช่วงเวลา 32 – 34 ชั่วโมง (0 - 7200 วินาที) พักแบตเตอรี่โดยไม่มีการจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
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.

- ช่วงเวลา 34 – 64 ชั่วโมง (0 - 108000 วินาที) ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยกระแสคงที่ 0.108 A

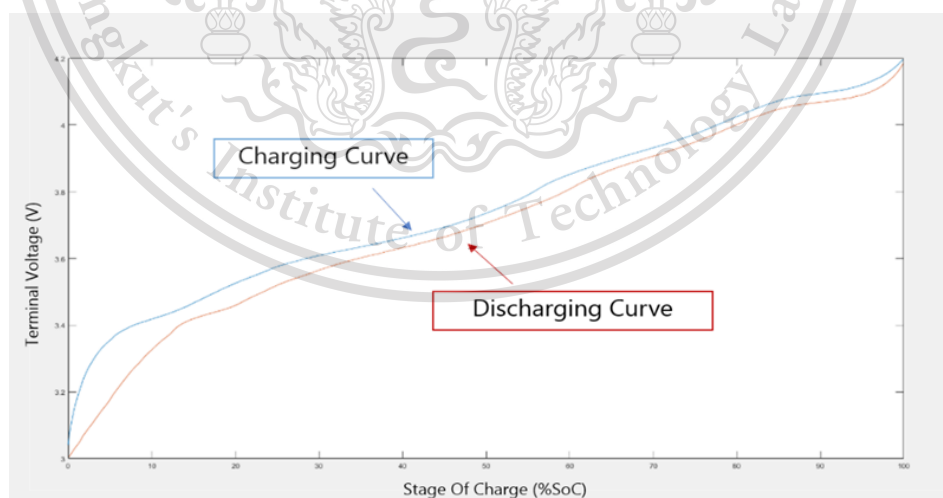


รูปที่ 3.2 DC Electric Load DP3021 และ DC Electric Power Supply DL811

จากนั้นทำการประมาณสถานะของแบตเตอรี่โดยวิธีการรวมกระแส (Coulomb Counting) สามารถคำนวณการวัดอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งอัดและคายประจุและทำการหาปริพันธ์เทียบกับเวลาดังสมการที่ 3.1

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t I_{\text{batt}}(t) dt}{Q_{\text{Rated}}} \times 100\% \quad (3.1)$$

หลังจากนั้นนำค่าแรงดันระหว่างขั้วมาพล็อตเทียบกับสถานะประจุ (SoC) ดังรูปที่ 3.3



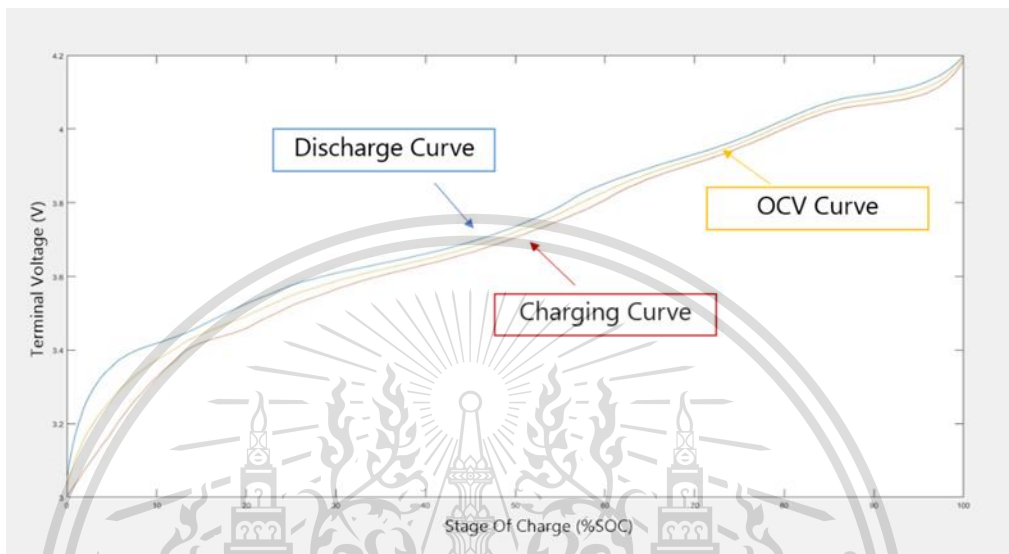
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้ว และสถานะประจุ (SoC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

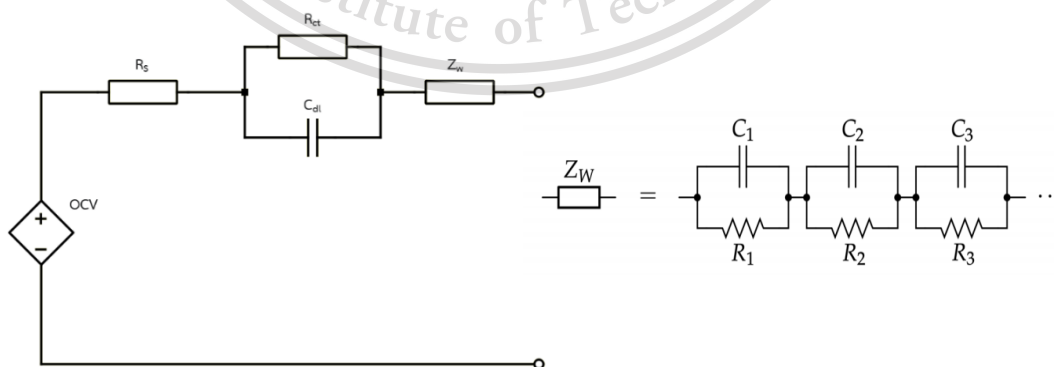
จากการพล็อตค่าแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับสถานะประจุ สามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Voltage - OCV) จากค่าเฉลี่ยของแรงดันระหว่างขั้วระหว่างการอัดและคายประจุ และแสดงกราฟแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (OCV) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 กราฟแรงดันเปิดวงจร (OCV)

### 3.2 การหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วย System Identification

จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 ทำการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแบตเตอรี่  $R_0, R_1, R_2, R_3, C_1, C_2$  และ  $C_3$  ซึ่ง  $R_0$  สามารถหาค่าพารามิเตอร์จาก Battery Impedance Meter BT4560 ซึ่งได้ค่าพารามิเตอร์  $R_0$  เท่ากับ  $33.9 \text{ m}\Omega$  ส่วนพารามิเตอร์ภายใน Foster's Circuit สามารถหาได้จาก Warburg ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Battery Equivalent Circuit, (a) Modified Randle Circuit,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
Impedance ในรูปของ Foster's Circuit (b) Warburg Impedance ในรูปของ Foster's Circuit  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน  $C_d$  ซึ่งคือ Double-layer Capacitance ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าน้อยมาก จึงไม่ต้องนำมาคิด ซึ่ง Warburg Impedance สามารถแสดงในรูปสมการที่ 3.2

$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2}}{1 + \frac{4\tau_d s}{(2n-1)^2 \pi^2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{1 + s C_n R_n} \quad (3.2)$$

จากสมการของ Warburg Impedance สามารถหาค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุภายใน Foster's Circuit ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$R_n = \frac{8R_d}{(2n-1)^2 \pi^2} \quad (3.3)$$

$$C_n = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{C_d}{2} \quad (3.4)$$

จากสมการข้างต้นสามารถแทนได้ด้วย Foster's Equivalent Circuit ดังรูป 3.5 (b) โดยค่าพารามิเตอร์  $R_d$  และ  $\tau_d$  สามารถหาจากค่า Impedance ที่วัดได้จาก Battery Impedance Meter ในย่านความถี่ต่ำ (ความถี่ต่ำกว่า 1 Hz) จากนั้นใช้ MATLAB Curve Fitting Tool โดยใช้ฟังก์ชัน cftool ในการประมาณค่า ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณค่าคือสมการดังต่อไปนี้

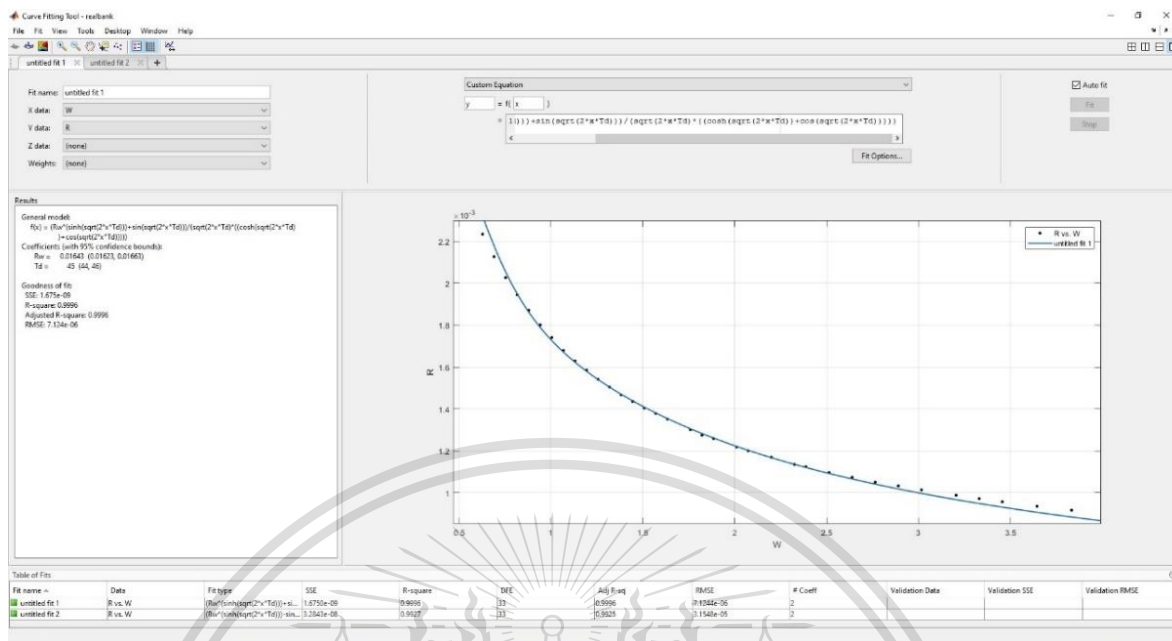
$$\text{Re}[Z_w(\sqrt{2\tau_d \omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d \omega}) + \sin h(\sqrt{2\tau_d \omega})}{\sqrt{2\tau_d \omega}((\cos(\sqrt{2\tau_d \omega}) + \cos h(\sqrt{2\tau_d \omega}))} \quad (3.5)$$

$$\text{Im}[Z_w(\sqrt{2\tau_d \omega})] = R_d \frac{\sin(\sqrt{2\tau_d \omega}) - \sin h(\sqrt{2\tau_d \omega})}{\sqrt{2\tau_d \omega}((\cos(\sqrt{2\tau_d \omega}) + \cos h(\sqrt{2\tau_d \omega}))} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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 3.6 การหาค่าพารามิเตอร์จาก MATLAB Curve Fitting tool

จาก MATLAB Curve Fitting tool จะได้ค่าพารามิเตอร์  $R_d$  เท่ากับ 0.01643 และ  $\tau_d$  เท่ากับ 45 จากนั้นนำไปหาค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2$  และ  $C_3$  ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่มีค่าดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%

ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	33.900 mΩ	C0	1,369.446 F
R1	13.310 mΩ	C1	1,369.446 F
R2	1.479 mΩ	C2	1,369.446 F
R3	0.533 mΩ		

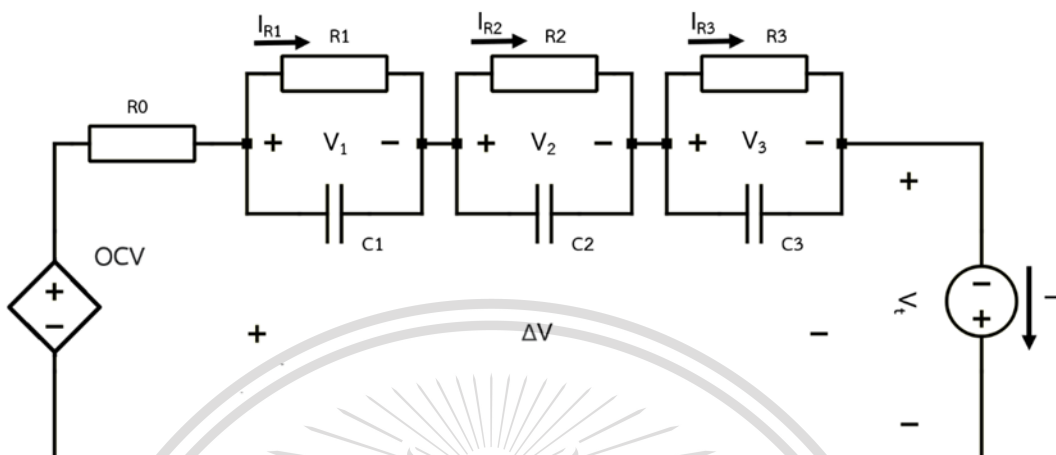
เนื่องจากค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อน จึงใช้ MATLAB System- Identification Tool เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

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

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.7 Non-linear Battery Equivalent Circuit Model

จากรูปที่ 3.7 เมื่อ State variables คือกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานใน Foster's Circuit และอินพุตคือกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนสมการกระแสและแรงดันได้ดังสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

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

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

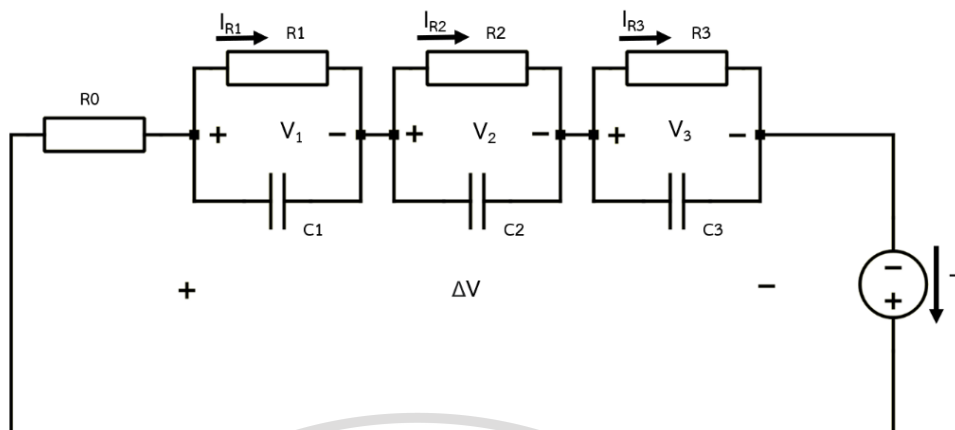
เนื่องจากพจน์ของ  $OCV(SoC)$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา ทำให้สมการแรงดันระหว่างขั้วเป็น Non-linear Equation จึงทำการย้ายพจน์  $OCV(SoC)$  ไปอยู่กัแรงดันระหว่างขั้วดังสมการที่ 3.11

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

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 3.8 Linear Battery Equivalent Circuit Model

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณมาเป็นค่าเริ่มต้น จากนั้นทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นโดยใช้ฟังก์ชัน State-space Estimation จะได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่มีความถูกต้องมากขึ้น (ค่าความถูกต้อง 95.86%) ดังนี้

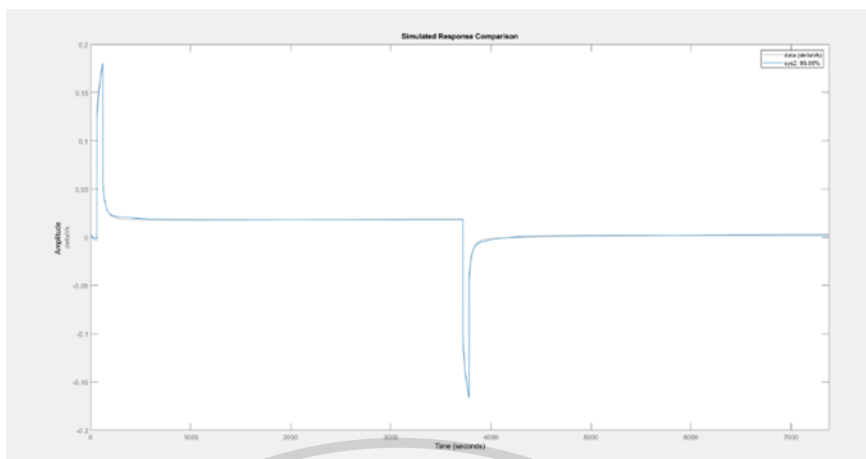
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์จาก System Identification ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%

ค่าพารามิเตอร์จาก System Identification ของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ที่ SoC 50%			
R0	36.485 mΩ	C0	16,867.900 F
R1	10.903 mΩ	C1	13,069.500 F
R2	0.923 mΩ	C2	2,238.840 F
R3	1.933 mΩ		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

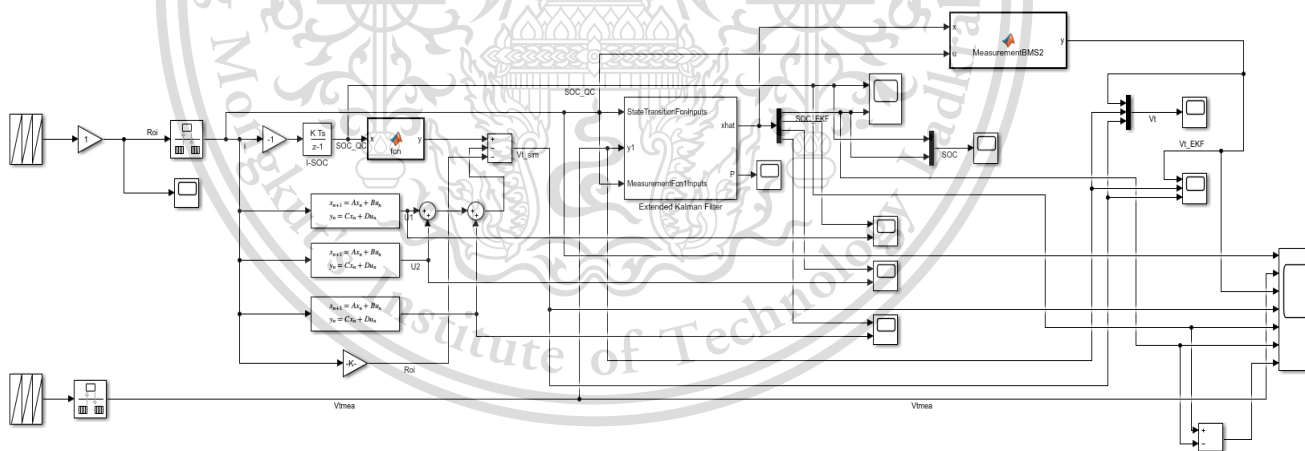
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.9 กราฟเปรียบเทียบผลต่างของแรงดันเปิดวงจรกับแรงดันระหว่างขั้ว ( $\Delta V$ ) ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด (เส้นสีเทา) และค่าที่ได้จาก System Identification (เส้นสีฟ้า)

อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  และ  $C_3$  ที่ได้ไม่เป็นไปตามสัดส่วน Foster's Circuit เนื่องจากไม่ได้กำหนดเงื่อนไขข้อจำกัดของพารามิเตอร์เอาไว้

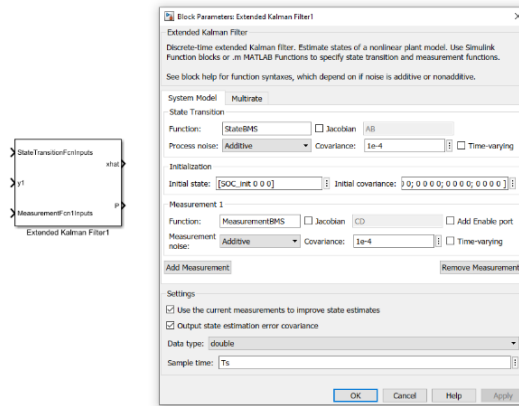
### 3.3 การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วย Extended Kalman Filter



รูปที่ 3.10 โมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter

จากโมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่ เลือกใช้บล็อกไดอะแกรม Extended Kalman Filter ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่ ซึ่งในบล็อกไดอะแกรมนี้ต้องการฟังก์ชัน State-Transition ฟังก์ชัน Measurement สัญญาณรบกวน และแรงดันที่ได้จากการวัด ซึ่งแรงดันนี้ทำหน้าที่เป็น feedback เพื่อให้สถานะแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรม Extended Kalman Filter เพื่อใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่

การประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter ซึ่งมีฟังก์ชัน State Transition และฟังก์ชัน Measurement ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k) + w_k \quad (3.12)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) + V_k \quad (3.13)$$

โดยที่  $w_k$  คือ Process Noise และ  $v_k$  คือ Measurement Noise จากวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7 เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดจาก System- Identification แล้วจะใช้สมการดังต่อไปนี้ในการสร้างฟังก์ชัน State Transition โดยจะนำไปใช้ในบล็อกไดอะแกรม Extended Kalman Filter

$$\begin{bmatrix} x_1[k+1] \\ x_2[k+1] \\ x_3[k+1] \\ x_4[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-T_s/R_1 C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-T_s/R_2 C_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-T_s/R_3 C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1[k] \\ x_2[k] \\ x_3[k] \\ x_4[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta T_s}{Q} \\ R_1(1 - e^{-T_s/R_1 C_1}) \\ R_2(1 - e^{-T_s/R_2 C_2}) \\ R_3(1 - e^{-T_s/R_3 C_3}) \end{bmatrix} u[k] \quad (3.14)$$

เมื่อ  $x_1[k]=z[k]$ ,  $x_2[k]=v_1[k]$ ,  $x_3[k]=v_2[k]$ ,  $x_4[k]=v_3[k]$ ,  $u[k]=i[k]$  โดยที่  $z[k] = \text{SoC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

```
function x = StateBMS(x,u)
r0=0.0364851;
r1=0.0109035;
r2=0.000923429;
r3=0.0019394;
c1=16867.9;
c2=13069.5;
c3=2238.84;
deltat =1;
Q=3.2157;

x(1) =x(1)+((-deltat/(36*Q)))* (u);
x(2) = exp(-deltat/(r1*c1))*x(2)+(r1*(1-exp(-deltat/(r1*c1))))*(u);
x(3) = exp(-deltat/(r2*c2))*x(3)+(r2*(1-exp(-deltat/(r2*c2))))*(u);
x(4) = exp(-deltat/(r3*c3))*x(4)+(r3*(1-exp(-deltat/(r3*c3))))*(u);
end
```

รูปที่ 3.12 ฟังก์ชัน State Transition สำหรับใช้ในบล็อกไดอะแกรม Extended Kalman Filter

การสร้างฟังก์ชัน Measurement ที่เป็นฟังก์ชันอธิบายเอาต์พุตของระบบ โดยหมายถึง แรงดันระหว่างขั้ว จะใช้สมการที่ 3.15 ในการสร้างฟังก์ชันดังกล่าว

$$y[k] = OCV(SoC) - R_0u[k] - x_2[k] - x_3[k] - x_4[k] \quad (3.15)$$

```
function y = MeasurementBMS(x,u)
r0=0.0364851;
a1 = 7.301;
b1 = 175.2;
c1 = 92.72;
a2 = 0.8438;
b2 = 83.55;
c2 = 17.68;
a3 = 2.159;
b3 = 55.68;
c3 = 22.33;
a4 = 0.179;
b4 = 47.26;
c4 = 8.685;
a5 = 1.773;
b5 = 32.66;
c5 = 13.37;
a6 = 0.3649;
b6 = 25.16;
c6 = 7.761;
a7 = 0.8468;
b7 = 17.01;
c7 = 9.461;
a8 = 2.856;
b8 = 2.761;
c8 = 18.13;

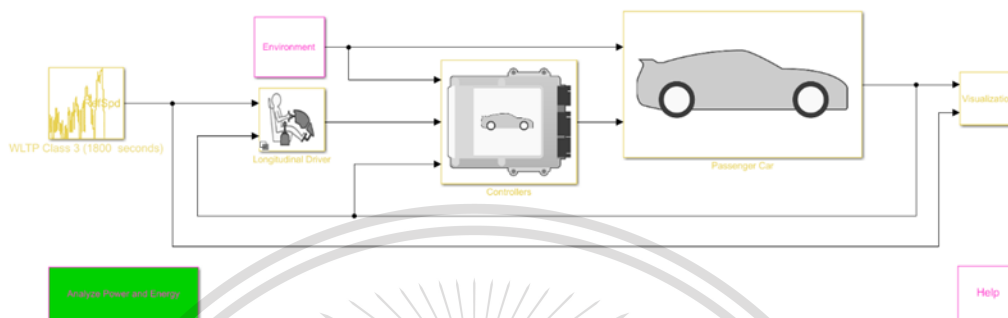
y = a1*exp(-((x(1)-b1)/c1)^2) + a2*exp(-((x(1)-b2)/c2)^2) + ...
a3*exp(-((x(1)-b3)/c3)^2) + a4*exp(-((x(1)-b4)/c4)^2) + ...
a5*exp(-((x(1)-b5)/c5)^2) + a6*exp(-((x(1)-b6)/c6)^2) + ...
a7*exp(-((x(1)-b7)/c7)^2) + a8*exp(-((x(1)-b8)/c8)^2) - (u)*r0 - x(2) - x(3) - x(4);
end
```

Fit name	Data	Fit type	RSS	R-square	RMSE	Adj R-sq	RMSE (Normalized)	Conf Int	Validation Data	Validation RSS	Validation R2
curvefit1	OCV vs SoC	Sum of Squares	0.0000	1.0000	0%	1.0000	0.0000	1%			

รูปที่ 3.13 ฟังก์ชัน Measurement สำหรับใช้ในบล็อกไดอะแกรม Extended Kalman Filter

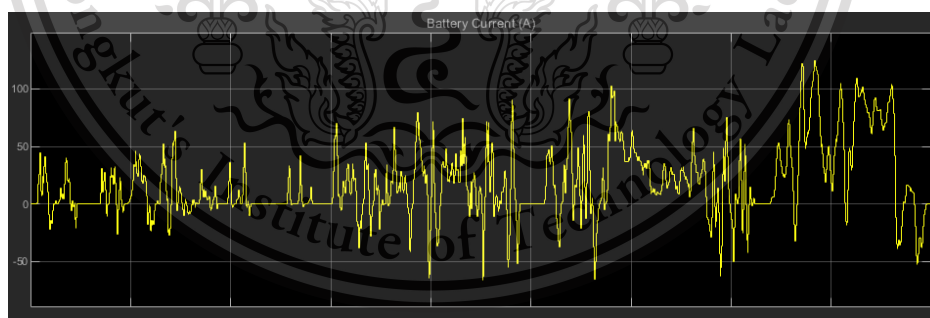
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter ใน EV Car ซึ่งใช้การจำลองการทดสอบรถยนต์ในห้องทดสอบรถยนต์โดยใช้ EV Reference Applications Model และเลือกใช้ Driving Cycle Source เป็น WLTP3 Class3



รูปที่ 3.14 EV Reference Applications Model

นำรูปแบบกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ของ WLTP3 นำไปเป็นโปรไฟล์กระแสที่ใช้ในการทดสอบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และนำกระแสที่ได้ไปใช้ในการสร้างสมการอินพุตสำหรับ Extended Kalman Filter



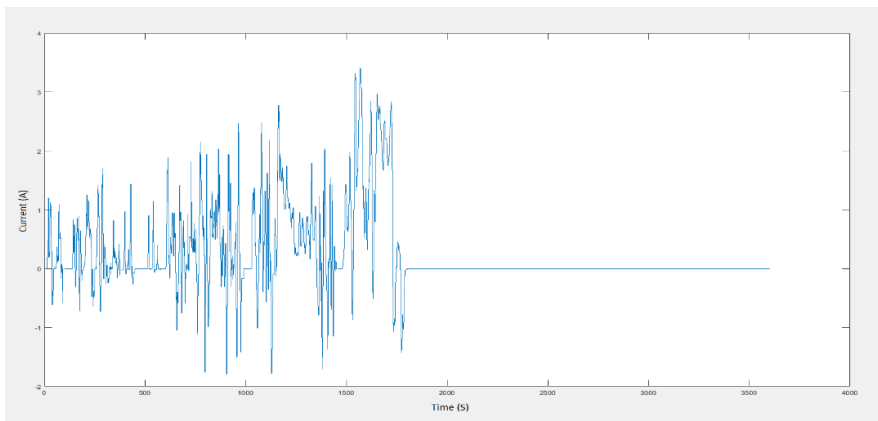
รูปที่ 3.15 รูปแบบของกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle

ทำการสเกลกระแสที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ให้กระแสสามารถอัดและคาย-ประจุให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

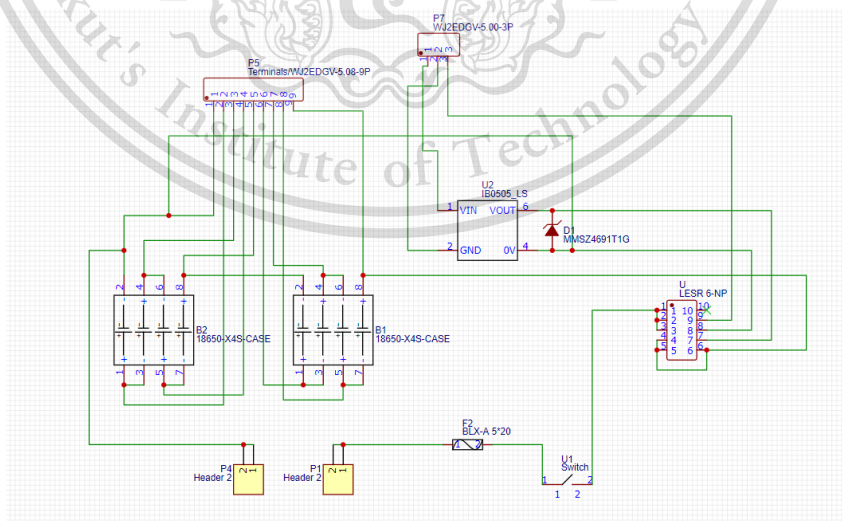


**รูปที่ 3.16** รูปแบบของกระแสของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้โปรไฟล์กระแสการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ในการอัดและคายประจุ

### 3.4 วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

การประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ โดยการใช้ MATLAB ควบคู่กับ Linduino-One โดยมี LTC6813-1 ทำหน้าที่เป็น Cell Monitoring และ Current Transducer ทำหน้าที่ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้า

หลังจากนั้นทำการออกแบบโมดูลแบตเตอรี่สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจำนวน 8 เซลล์อนุกรม โดยใช้ Current Transducer รุ่น LESR 6-NP เป็นตัววัดกระแสที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ และใช้ LTC6813-1 เป็นตัวอ่านค่าแรงดันในแบตเตอรี่แต่ละเซลล์ แล้วจึงใช้ MATLAB ในการประมวลผล

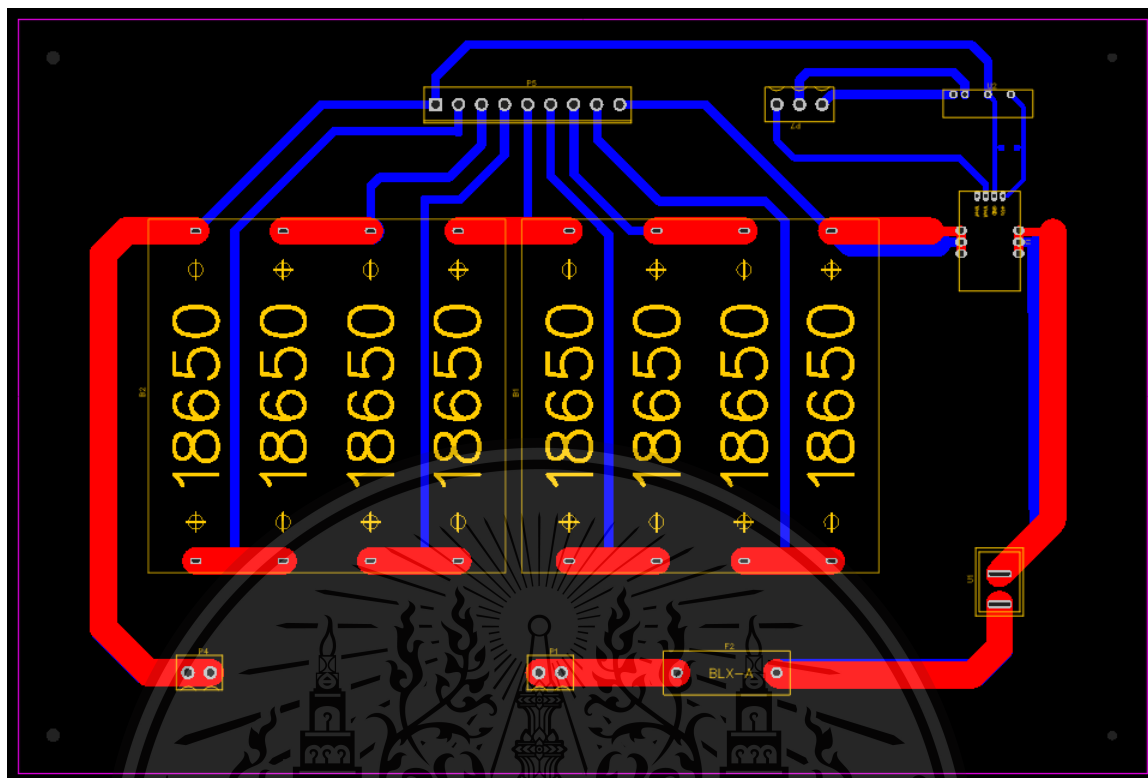


**รูปที่ 3.17** Schematic Diagram ของโมดูลแบตเตอรี่

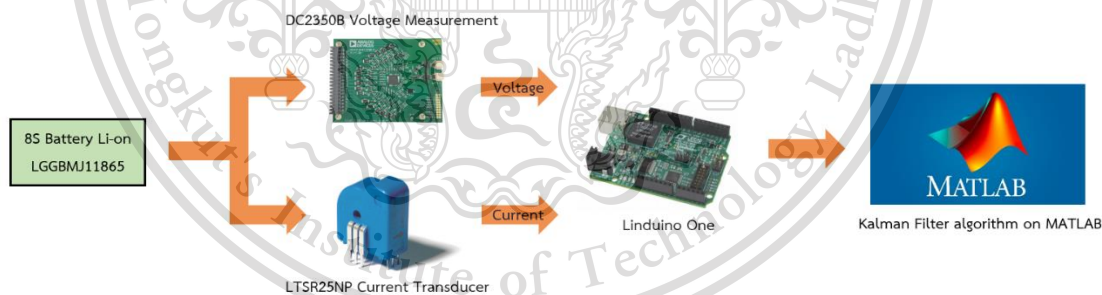
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 3.18 การออกแบบโมดูลแบตเตอรี่ลงแผ่น PCB



รูปที่ 3.19 โครงสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

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.

หลักการการทำงานคือให้ MATLAB ส่งคำสั่งไปยัง Serial Interface ของ Linduino One และให้ Linduino One อ่านค่าแรงดันและกระแสจากการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ หลังจากนั้นให้ส่งค่าแรงดันและกระแสกลับมาประมวลผลที่ MATLAB เพื่อนำไปใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ โดยใช้ M-files 2 ไฟล์คือ

1. run.m ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่ และทำหน้าที่เริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม ซึ่งมีฟังก์ชัน Timer ทำให้สามารถทำงานได้แบบเรียลไทม์ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21

```

global V V2 V3 V4 V5 V6 V7 V8 Va ...
Im s Q SOCa SOC SOC_init ...
count count_end OCv Ts ...
r0 r1 r2 r3 c1 c2 c3 ...
ytrue yhat SigmaX SigmaY I Icd...
soctrue ocvsoc B A1 Chat Dhat sochat docvsoc...
a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 ...
b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 ...
C1 C2 C3 c4 c5 c6 c7 c8 ...
deltat t x u f/h obj Qv Iref Ioff Inooff...
initialStateGuess xhat xhatp SOC ref SOC QC Residual ResidualCovariance residBuf;

% ***** Before Start *****

count = 1;
count_end = 3663;
x0=0.0406354;
r1=0.0899904;
r2=0.00931594;
r3=0.00127085;
c1=735323;
c2=18197.4;
c3=62231.5;
deltat =1;
Ts = 1;
V = [];
V2 = [];
V3 = [];
V4 = [];
V5 = [];
V6 = [];
V7 = [];
V8 = [];
Im = [];
Icd = [];
Iref = [];
Ioff = [];
Inooff = [];
Q = [];
SOCa = [];
ytrue = [];
yhat = [];
residBuf = [];

```

รูปที่ 3.20 M-file run.m (1)

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.

```

Qv=diag([5e-3 5e-6 1e-4 5e-5]);%Qv=diag([5e-6 1e-5 1e-6 5e-5]);
A1 = [1 0 0 0;0 exp(-deltat/(r1*c1)) 0 0;0 0 exp(-deltat/(r2*c2)) 0;0 0 0 exp(-deltat/(r3*c3))];
B = [(-deltat/(36*3.2157)); (r1*(1-exp(-deltat/(r1*c1)))); (r2*(1-exp(-deltat/(r2*c2)))); (r3*(1-exp(-deltat/(r3*c3))))];

%new variable
x = zeros(4,1);
u = zeros(1,1);
SOC_ref=zeros(count_end-1,1);
SOC_QC=zeros(count_end-1,1);
xhat=zeros(4,count_end-1);
xhatp=zeros(4,count_end-1);
yhat=zeros(1,count_end-1);
f=@(x,u)(A1*x+B*u);
h=@(x,u)(a1*exp(-(x(1)-b1)/C1)^2) + a2*exp(-(x(1)-b2)/C2)^2) + ...
        a3*exp(-(x(1)-b3)/C3)^2) + a4*exp(-(x(1)-b4)/C4)^2) + ...
        a5*exp(-(x(1)-b5)/C5)^2) + a6*exp(-(x(1)-b6)/C6)^2) + ...
        a7*exp(-(x(1)-b7)/C7)^2) + a8*exp(-(x(1)-b8)/C8)^2)-(u)*r0-x(2)-x(3)-x(4));

%ocvsoc
a1 = 7.301; b1 = 175.2; C1 = 92.72;
a2 = 0.8438; b2 = 83.55; C2 = 17.68;
a3 = 2.159; b3 = 55.68; C3 = 22.33;
a4 = 0.179; b4 = 47.26; c4 = 8.685;
a5 = 1.773; b5 = 32.66; c5 = 13.37;
a6 = 0.3649; b6 = 25.16; c6 = 7.761;
a7 = 0.8468; b7 = 17.01; c7 = 9.461;
a8 = 2.856; b8 = 2.761; c8 = 18.13;

t = timer('StartDelay', 0,... % Delay time when timer start
          'Period', 1, ... % Time between the execution
          'TasksToExecute', inf, ... % Number of execution
          'ExecutionMode','fixedRate'); % Set execution mode

t.TimerFcn = @(~,~) record(); % Set callback function

s = serial('COM4','BaudRate',115200);%note your port and bitrate
fopen(s);
pause(2);
load('OCV_SOC_C30.mat');
start(t);

```

รูปที่ 3.21 M-file run.m (2)

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.

2. record.m ใช้ในการอ่านค่าแรงดันและกระแสจากการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ และประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และ 3.23

```
function record
global V V2 V3 V4 V5 V6 V7 V8 Va ...
Im s Q SOCa SOC SOC_init ...
count count_end OCV Is ...
SigmaW SigmaV v w ...
r0 r1 r2 r3 c1 c2 c3 ...
yhat SigmaX SigmaY I Icd...
soctrue ocvsoc B M A1 Chat Dhat sochat docvsoc...
a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 ...
b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 ...
C1 C2 C3 c4 c5 c6 c7 c8 ...
deltat t x u f h obj Qv Iref Ioff Inooff...
initialStateGuess xhat xhatp SOC_ref SOC_QC Residual ResidualCovariance residBuf;

if count < count_end
    fprintf(s,'3');
    A = fscanf(s);
    H = split(A);
    V(count,1) = str2num(H{1,1});
    V2(count,1) = str2num(H{2,1});
    V3(count,1) = str2num(H{3,1});
    V4(count,1) = str2num(H{4,1});
    V5(count,1) = str2num(H{5,1});
    V6(count,1) = str2num(H{6,1});
    V7(count,1) = str2num(H{7,1});
    V8(count,1) = str2num(H{8,1});
    Icd(count,1) = str2num(H{9,1});
    Ioff(count,1) = Icd(count,1);
    Im(count,1) = -1*Ioff(count,1);
    Inooff(count,1) = Icd(count,1)-0.06554;
    Iref(count,1) = -1*Inooff(count,1);

    if count == 1
        Q(count,1) = 0.0;
        SOC_init=interp1(OCV,SOC,V(1,1));
        SOC_ref(1,1)=interp1(OCV,SOC,V(1,1));
        SOC_QC(1,1)=SOC_init;
        initialStateGuess=[SOC_init; 0;0;0];
        obj=extendedKalmanFilter(f,h,initialStateGuess,'ProcessNoise',Qv,'MeasurementNoise',1e-4);
        xhatp(:,1)=predict(obj,Im(1));
        yhat(1,1)=h(xhatp(:,1),Im(1));
```

รูปที่ 3.22 M-file record.m (1)

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.

```

xhat(:,1)=correct(obj,V(1),Im(1));
[Residual, ResidualCovariance] = residual(obj,V(1),Im(1));
residBuf(1,:) = Residual;

else
Q(count,1) = Q(count-1,1)+Im(count,1)/3.6; % Coulomb counting in mAhr
SOCa(count,1) =SOC_init+ 100.0*Q(count,1)/3215.7; %SOC

xhatp(:,count)=predict(obj,Im(count));
yhat(1,count)=h(xhatp(:,count),Im(count));
xhat(:,count)=correct(obj,V(count),Im(count));
[Residual, ResidualCovariance] = residual(obj,V(count),Im(count));
residBuf(count,:) = Residual;
SOC_QC(count,1)=SOC_QC(count-1,1)-deltat*Im(count)/(36*3.2157);
SOC_ref(count,1)=SOC_ref(count-1,1)-deltat*Iref(count)/(36*3.2157);

end

Va=[V,V2,V3,V4,V5,V6,V7,V8];
figure(1); subplot(3,1,1); plot(Va);
axis([0 inf 3 4])
subplot(3,1,2); plot(Icd);
axis([0 inf -4 4])
subplot(3,1,3); plot(SOCa);
axis([0 inf 0 100])
count = count + 1 ;
else
count = count end;
fclose(s);
stop(t);
end
end

```

รูปที่ 3.23 M-file record.m (2)

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 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วของแบตเตอรี่กับอุณหภูมิ

จากหัวข้อ 2.3.2 การหาสถานะประจุของแบตเตอรี่สามารถหาได้โดยเปรียบเทียบกับแรงดันเปิดวงจร แต่แรงดันเปิดวงจรนั้นไม่สามารถหาได้โดยตรง จึงต้องหาจากค่าเฉลี่ยของแรงดันระหว่างขั้วของการอัดประจุและคายประจุด้วยกระแสคงที่ภายในสถานะที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการวัดแรงดันระหว่างขั้วที่ SoC ต่าง ๆ ในอุณหภูมิที่แตกต่างออกไป เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วกับอุณหภูมิ โดยจะทำการทดลองภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิระหว่าง  $0\text{ }^{\circ}\text{C} - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

โดยสำหรับการทดลองจะทดลองที่ SoC 10%, 50% และ 90% วิธีการทดลองจะเริ่มต้นจากการตั้งค่าตู้ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) จากนั้นพักแบตเตอรี่เพื่อให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วบันทึกค่าแรงดันระหว่างขั้วเป็น V1 ปรับอุณหภูมิที่ต้องทำการทดลองพักแบตเตอรี่แล้วบันทึกค่า จากนั้นปรับอุณหภูมิให้กลับมาที่อุณหภูมิห้อง พักแบตเตอรี่แล้วบันทึกเป็น V2 นำ V2 ลบ V1 และหาร 2 ได้เป็นแรงดันที่หายไปจากการคายประจุด้วยตัวเอง นำค่าแรงดันที่หายไปมาบวกกับค่าแรงดันระหว่างขั้วที่วัดได้ในอุณหภูมิที่ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ

ตารางที่ 4.1 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SoC 10%

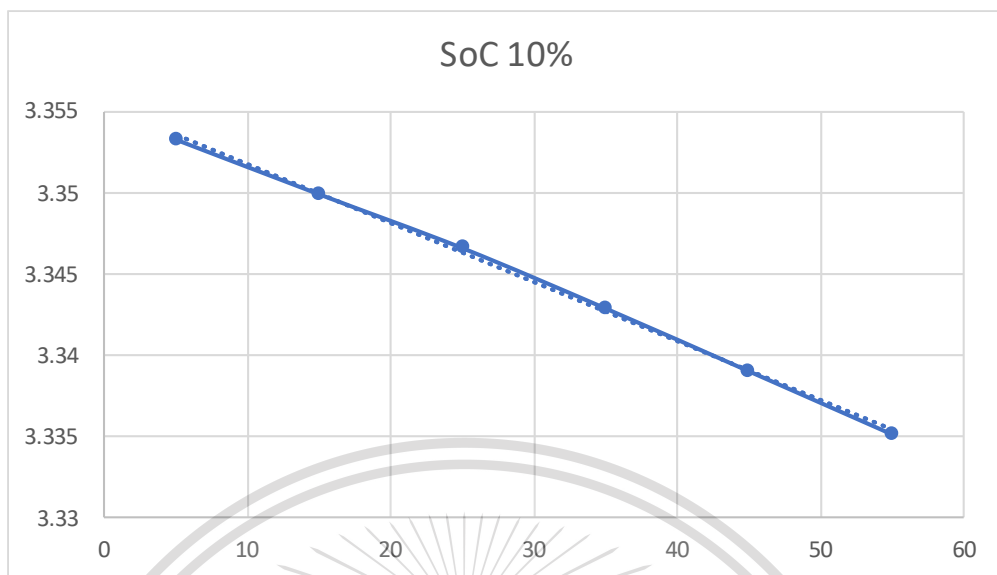
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Terminal Voltage (V)
5	3.35325
15	3.3499
25	3.3466
35	3.3429
45	3.33905
55	3.33518

(มีการคายประจุเฉลี่ย  $0.003276\text{ V}$ )

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.



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SoC 10%

ตารางที่ 4.2 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SoC 50%

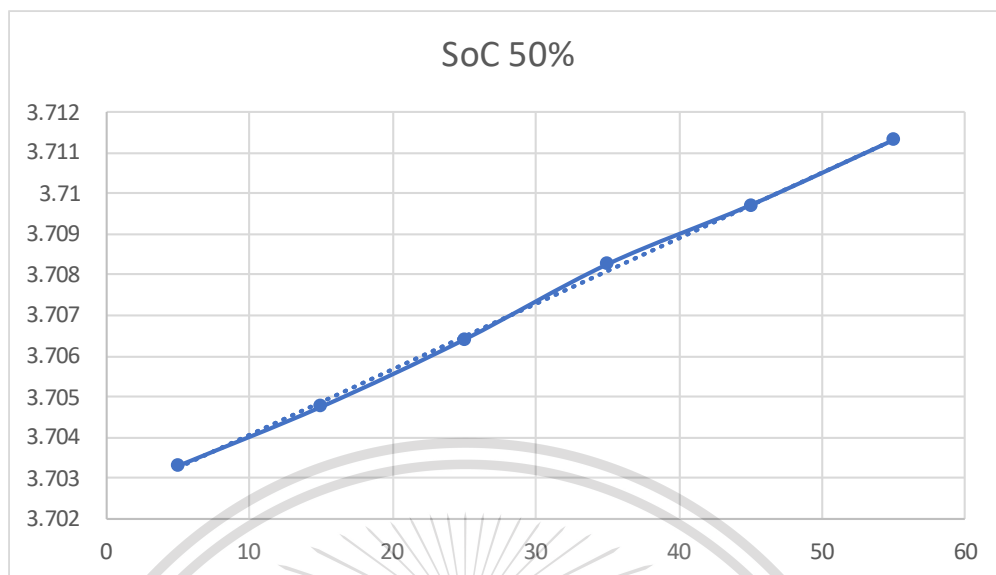
Temperature (°C)	Terminal Voltage (V)
5	3.7033
15	3.70475
25	3.7064
35	3.70825
45	3.7097
55	3.7113

(มีการคายประจุเฉลี่ย 0.00126 V)

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.



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SoC 50%

ตารางที่ 4.3 แรงดันที่เปลี่ยนไปในแต่ละอุณหภูมิที่ SoC 90%

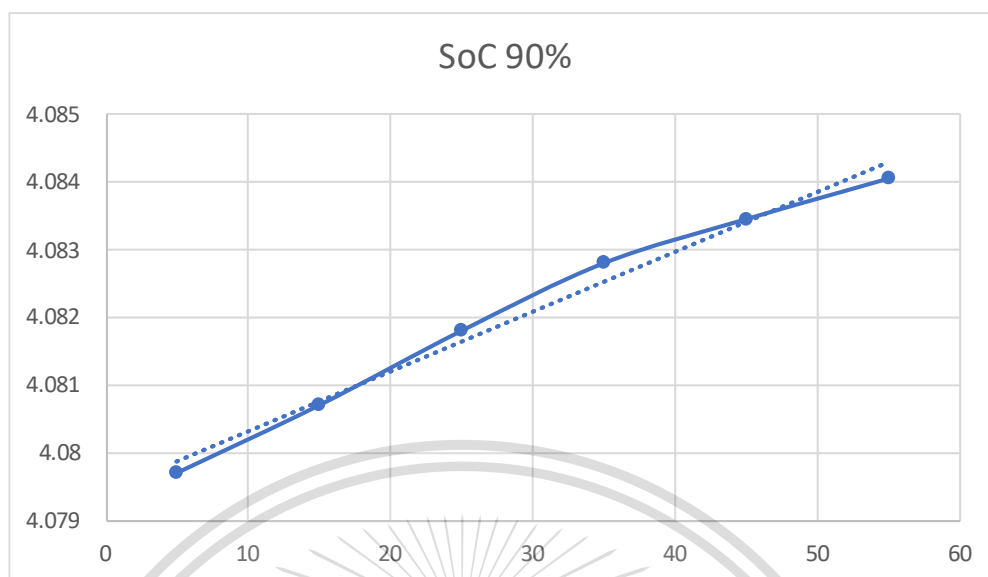
Temperature (°C)	Terminal Voltage (V)
5	4.0797
15	4.0807
25	4.0818
35	4.0828
45	4.08345
55	4.08405

(มีการคายประจุเฉลี่ย 0.00058 V)

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.



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันระหว่างขั้วและอุณหภูมิที่ SoC 90%

จะเห็นได้ว่าแรงดันระหว่างขั้วมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะแปรผันตรง คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันระหว่างขั้วจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่กราฟของ SoC 10% มีลักษณะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แรงดันระหว่างขั้วจะลดลง เนื่องจากการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ SoC ต่ำ ๆ จะมีค่าสูง

#### 4.2 การทดลองหาสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์

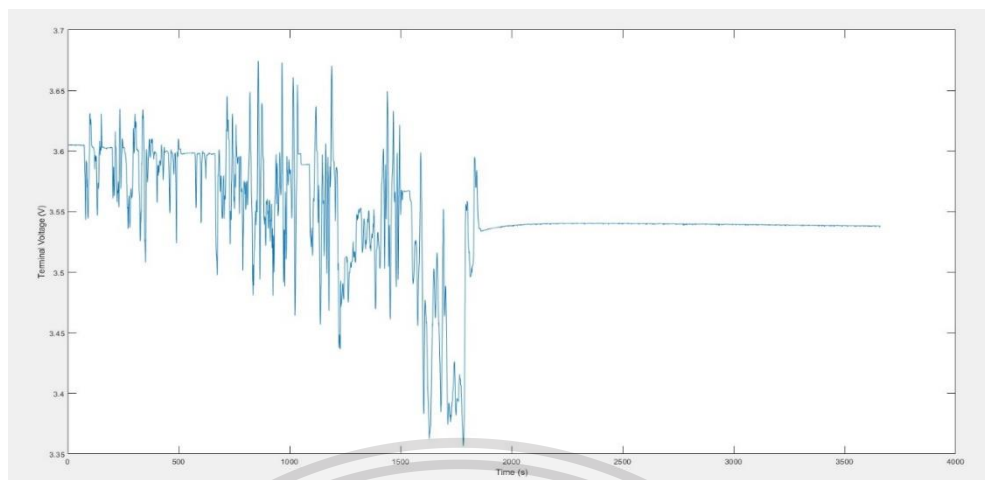
จากวงจรการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ทำการทดลอง โดยการป้อนโปรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ของ WTLP3 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเป็นกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซต เนื่องจากความผิดพลาดของอุปกรณ์วัดกระแส โดยมีค่าออฟเซตประมาณ 0.065 A

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

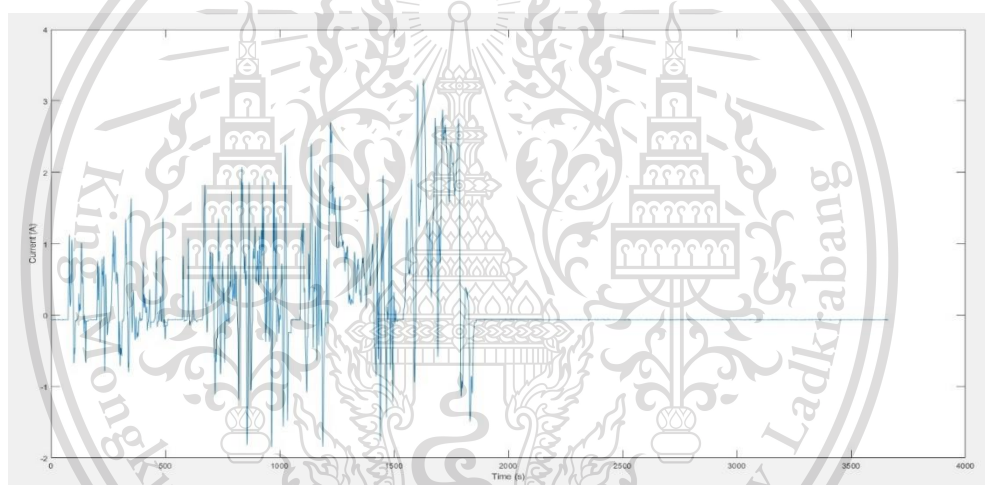
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.4 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับเวลา

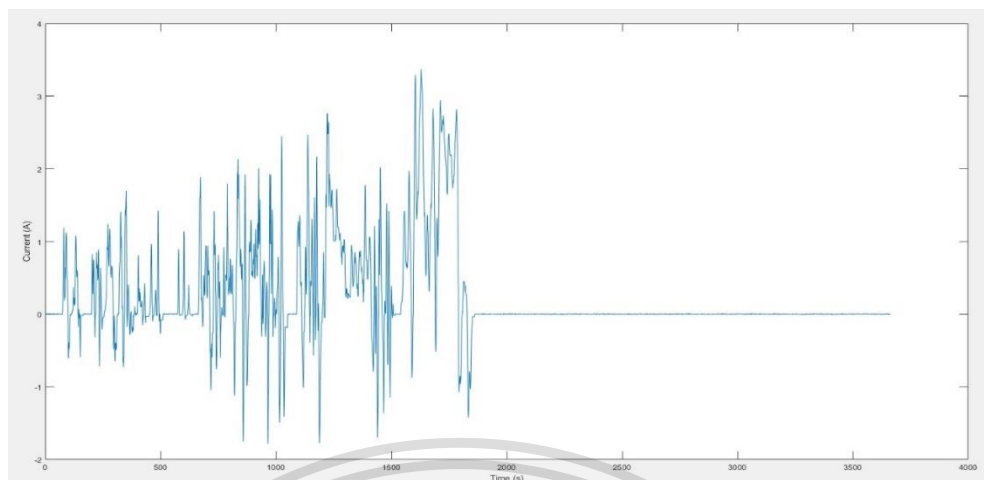


รูปที่ 4.5 กราฟกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซตเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

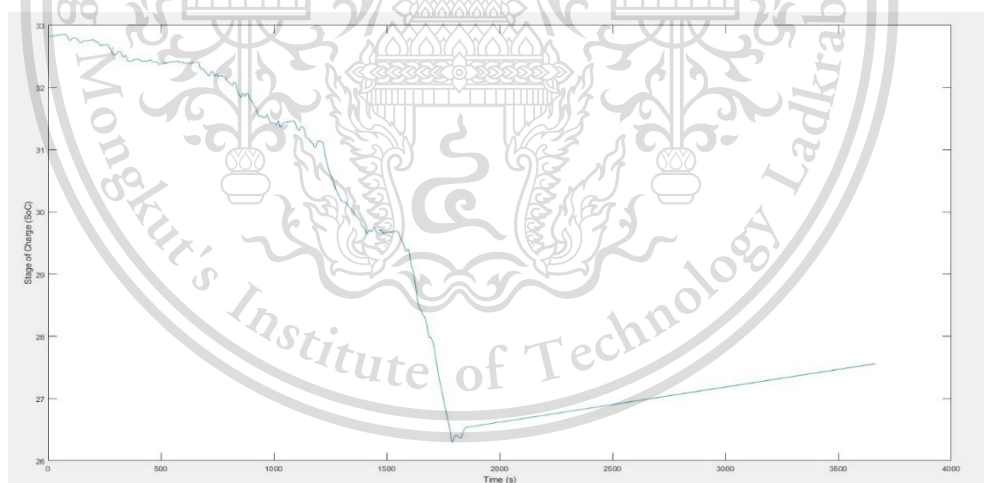
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

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



รูปที่ 4.6 กราฟกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีออฟเซตเทียบกับเวลา

จากการทดลองประมาณสถานะแบตเตอรี่หนึ่งเซลล์ เมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยการอินทิเกรตกระแส (Coulomb Counting) ทั้งกระแสที่มีออฟเซตและกระแสที่ไม่มีออฟเซต และทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter ซึ่งกระแสที่ใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่เป็นกระแสที่มีออฟเซต

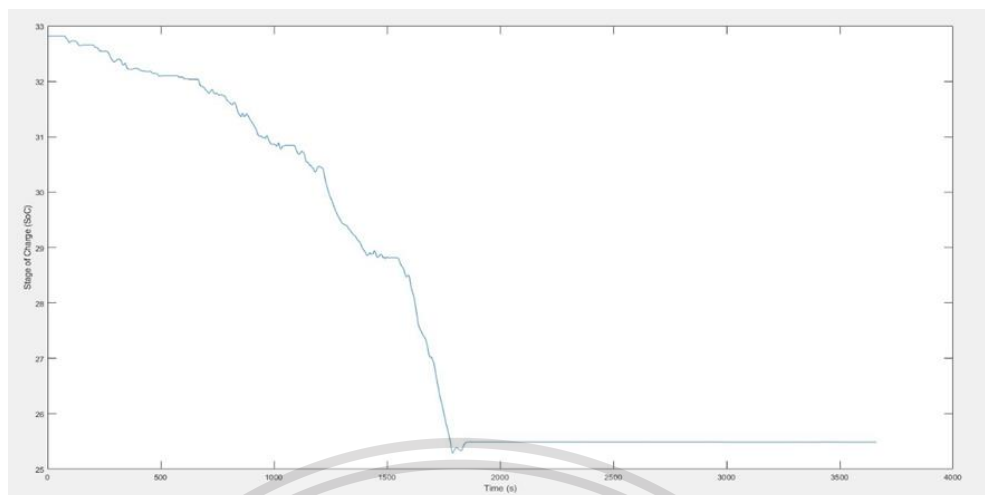


รูปที่ 4.7 กราฟ SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่มีออฟเซตเทียบกับเวลา

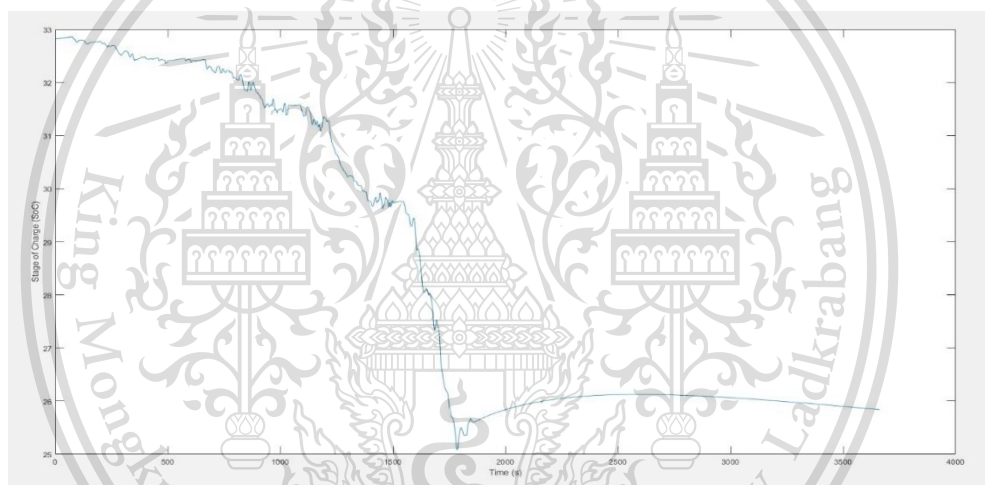
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 4.8 กราฟ SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซตเทียบกับเวลา



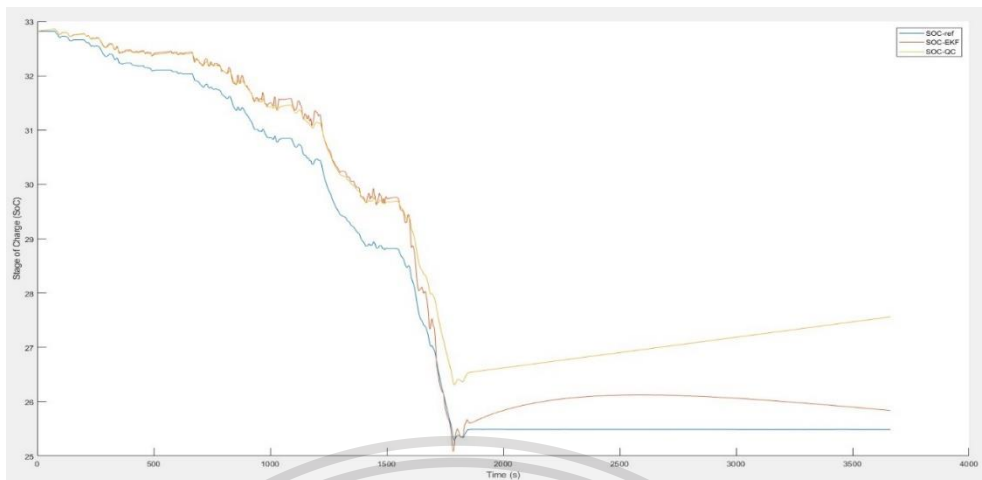
รูปที่ 4.9 กราฟ SoC จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter เทียบกับเวลา

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า SoC ที่ได้จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter ถึงแม้ว่ากระแสที่ใช้ประกอบด้วยออฟเซต ค่า SoC ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ SoC ที่ได้จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต เมื่อกำหนด Process noise เป็นดังนี้ [7e-4 5e-7 1e-5 7e-7]

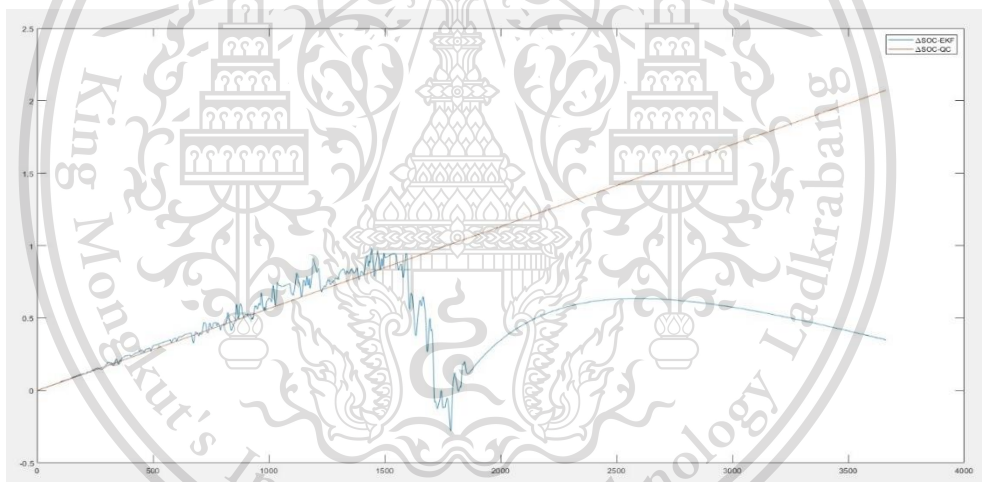
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต (เส้นสีฟ้า) กับ SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่มีออฟเซต (เส้นสีเหลือง) และ SoC จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter (เส้นสีแดง)



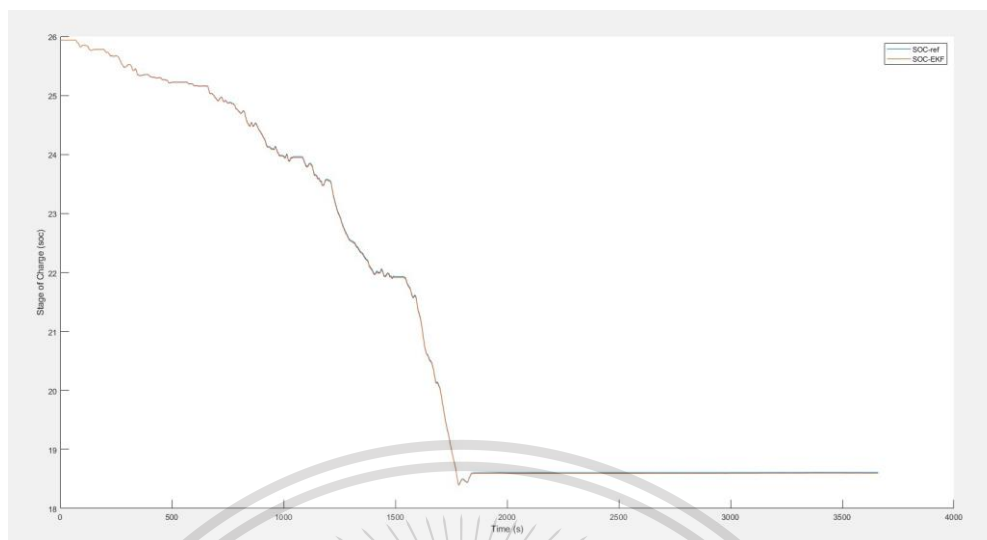
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความผิดพลาดของการประมาณค่า SoC โดย Extended Kalman Filter (เส้นสีฟ้า) และโดย Coulomb Counting (เส้นสีแดง) กรณีที่ตัวตรวจจับกระแสมีออฟเซต

ในกรณีที่ทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยการใช้ Extended Kalman Filter ซึ่งกระแสที่ใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่เป็นกระแสที่ไม่มีออฟเซต และปรับ process noise ให้มีค่าน้อยมาก

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.



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต (เส้นสีฟ้า) กับ SoC จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต (เส้นสีแดง)

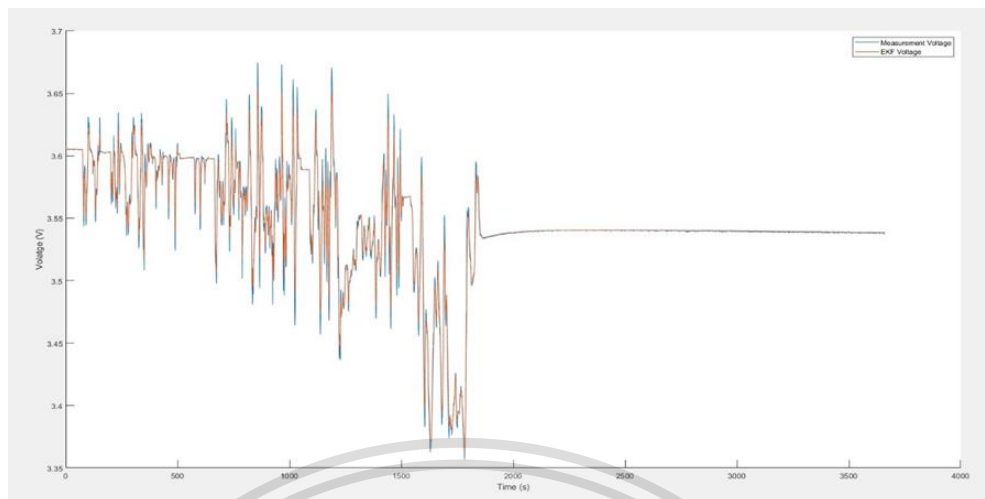
จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของ SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต กับ SoC จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต จะทับกันพอดี

นอกจากนี้ Extended Kalman filter สามารถประมาณแรงดันระหว่างขั้วได้อีกด้วย โดยมีความผิดพลาดของการประเมินไม่เกิน 44.76 mV

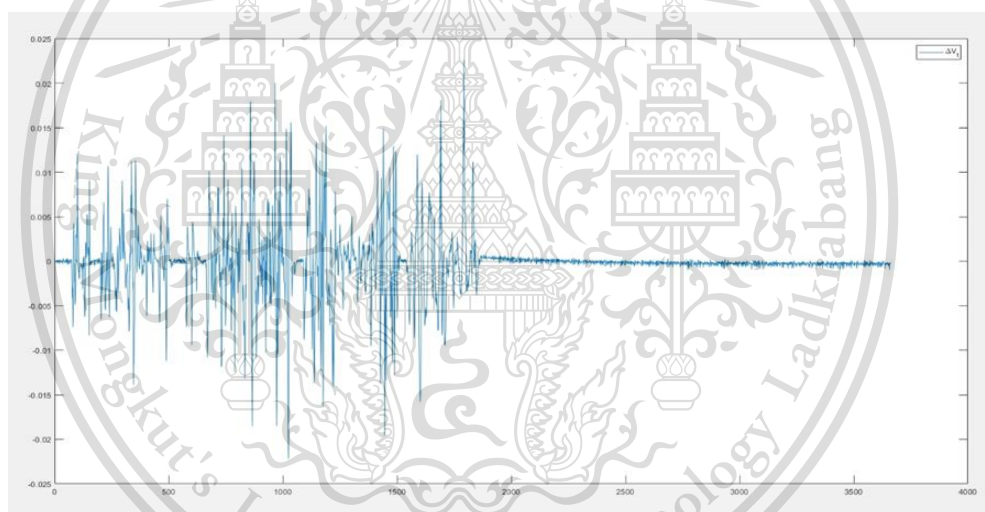
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแรงดันระหว่างขั้วจากการวัด (เส้นสีฟ้า) กับแรงดันระหว่างขั้วจากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter (เส้นสีแดง)



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลต่างระหว่างแรงดันระหว่างขั้วจากการวัด กับแรงดันระหว่างขั้วจากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter

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

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เนื่องจากปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกเลือกใช้เป็นส่วนมากในรถยนต์ไฟฟ้า แต่การวัดปริมาณคงเหลือของแบตเตอรี่ในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่มักเป็นวิธีตัวนับคูลอมบ์ (Coulomb-counting) แต่ด้วยวิธีนี้จะเกิดข้อผิดพลาดจากค่าออฟเซตและการคายประจุด้วยตัวเอง จำเป็นต้องใช้ในการปรับเทียบเป็นประจำ ซึ่งเป็นเรื่องยุ่งยากสำหรับการใช้ในชีวิตประจำวัน จึงต้องมีวิธีประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำยิ่งกว่าคือ ตัวกรองคาลมาน (Kalman-Filter) โดยจะเลือกใช้โมเดลของตัวกรองคาลมานแบบไม่เชิงเส้น (Extended Kalman-Filter) เนื่องจากคุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนหรือความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วและสถานะประจุเป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยจุดเด่นของวิธีตัวกรองคาลมานก็คือสามารถจำกัดค่าออฟเซตและผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ขั้วและสถานะประจุสามารถหาได้จากการทดลองอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนภายในอุณหภูมิคงที่เพราะแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่จะแปรผันกับอุณหภูมิและเพื่อให้ได้คุณลักษณะที่คงที่ จากนั้นทำการหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ แล้วจึงออกแบบวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman-Filter เป็นอัลกอริทึมในการประมาณ วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่นั้นออกแบบสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 จำนวน 8 เซลล์ โดยประกอบไปด้วยรางถ่านสำหรับแบตเตอรี่ ตัววัดกระแส ตัววัดแรงดันที่ขั้ว และสวิตช์จ่ายส่วนอ่านและประมวลผล ซึ่งเมื่อมีการคายประจุหรืออัดประจุจะมีการส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผลแล้วใช้ Extended Kalman-Filter ในการประมวลผลและแสดงทางจอคอมพิวเตอร์และสามารถประมาณสถานะแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น 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.

## 5.2 ปัญหาและข้อจำกัด

1. อุปกรณ์วัดกระแสมีค่าออฟเซตเปลี่ยนแปลงมาก ทำให้ค่ากระแสที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน
2. การทดลองหาค่าลักษณะของแบตเตอรี่ในแต่ละครั้งใช้เวลาในการทดลองนาน และเมื่อเหตุฉุกเฉินเช่นไฟดับหรือไฟตก ต้องทำการทดลองใหม่
3. เนื่องด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโควิด-19 ทำให้การทดลองบางอย่างล่าช้า และไม่สามารถปรับปรุงวงจรประมาณสถานะให้ดีขึ้นได้

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. หากมีเลือกใช้อุปกรณ์วัดกระแสในวงจรประมาณสถานะที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จะให้ค่ากระแสที่วัดได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. จำเป็นต้องเลือกค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อที่การประมาณสถานะแบตเตอรี่มีความใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น
3. แร่งต้นเปิดวงจรและสถานะประจุเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ดังนั้นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพื่อให้ค่าแรงดันเปิดวงจรและสถานะประจุมีความแม่นยำ

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.

## บรรณานุกรม

- [1] Environmental Protection Agency (EPA), Sources of Greenhouse Gas Emissions [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>, 2019.
- [2] ข้อดีของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.nissan.co.th/experience-nissan/Nissan-EV/lithium-ion-battery.html>
- [3] ดร.วรวริศ กอปรสิริพัฒน์, “รู้จักแบตเตอรี่ ตอนที่ 1 รู้จักแบตเตอรี่,” สารพันความรู้ด้านพลังงาน, 2557, หน้า 74-80.
- [4] ดร.วรวริศ กอปรสิริพัฒน์, “รู้จักแบตเตอรี่ ตอนที่ 4 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน,” สารพันความรู้ด้านพลังงาน, 2559, หน้า 64-70.
- [5] Gregory L. Plett, **Battery Management Systems Battery Equivalent-Circuit Methods**, Boston, Artech House, 2015.
- [6] ภูมิภวิษณ์ ไหวพริบ, วีรภัทร ลีลิตวงษ์ และ ศิวกร หอวัฒนพันธ์, “การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วยตัวกรองคาลมาน,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2562
- [7] State of Charge (SOC) Estimation Techniques for Batteries[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-techniques.pdf>
- [8] Gregory L. Plett, **Battery Management Systems Battery Modeling**, Boston, Artech House, 2015.
- [9] AC Measurement[ออนไลน์]. สืบค้นจาก [https://www.hioki.com/en/products/detail/?product\\_key=5664](https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=5664)
- [10] Greg Welch and Gary Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter”, **SIGGRAPH 2001**, 2001, pp. 24-29
- [11] 18-Cell Battery Stack Monitor with Daisy Chain Interface LTC6813-1 [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc6813-1.pdf>

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.

- [12] Daisy chain [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://searchnetworking.techtarget.com/definition/daisy-chain>, 2005.
- [13] DEMO MANUAL DC2350B [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/dc2350b.pdf>
- [14] บทความ ESPino32 ตอนที่ 9 การสื่อสารอนุกรมแบบ SPI [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://blog.thaieasyelec.com/espino32-ch9-how-to-use-spi>
- [15] Thomas Brand, Isolated SPI Communication Made Easy [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/en/technical-articles/isolated-spi-communication-made-easy.html>
- [16] DEMO MANUAL DC2792B [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/user-guides/dc2792b.pdf>
- [17] Linduino One [ออนไลน์]. สืบค้นจาก <https://www.analog.com/en/design-center/evaluation-hardware-and-software/evaluation-development-platforms/linduino.html>



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.

# ระบบจัดการแบตเตอรี่

## Battery Management System

กฤตยชญ์ ทรูปานวงษ์ เกศินี อินทร์ไตรรัตน์ เกื้อกุล ฤกษ์วัฒนากุล และ คณพศ ศรีบุพบา

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

### บทคัดย่อ

ปัญหานี้พินิจฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการประมาณสถานะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีความแม่นยำโดยการใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ประโยชน์ของการประมาณสถานะที่แม่นยำคือ ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น มีประสิทธิภาพและช่วยในการวางแผนการชาร์จและการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ใช้งาน การประมาณสถานะแบตเตอรี่นั้นจากการหาแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและคุณสมบัติของสถานะประจุด้วยการชาร์จและคายประจุที่กระแสดำ ๆ จากนั้นก็ทำการหาแบบจำลองของวงสมมูลของแบตเตอรี่ และสุดท้ายคือการประมาณสถานะประจุโดยการใช้ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้พารามิเตอร์จากขั้นตอนก่อนหน้านี้ การประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์จะดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB ซึ่งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่จะถูกตรวจวัดผ่าน LTC6813-1 และจากผลการทดลองในกรณีที่มีข้อผิดพลาดของออฟเซตในการวัดกระแส จะเห็นได้ว่าตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้นมีการประมาณสถานะประจุที่แม่นยำเหนือกว่าเทคนิคตัวนับคูลอมบ์แบบดั้งเดิม

### Abstract

This thesis proposes battery management system based on an accurate lithium-ion battery state estimation using extended Kalman filter. The benefit of accurate state estimation is a longer battery life, good performance and helping to provide an optimal charging and travel planning for users. The first step is the obtaining open-circuit voltage and state of charge characteristic by low C-rate charging and discharging tests. The next step is to find the battery equivalent circuit model. Finally, the state of charge estimation using extended Kalman filter is performed using the parameters from the previous steps. In this thesis, real-time battery state of charge estimation is carried out in MATLAB. The cell voltage and current

are monitored using LTC6813-1 IC. The experimental results in the case of intended current measurement offset error show that the extended Kalman Filter has superior state of charge estimation accuracy comparing with the conventional Coulomb counting technique.

### 1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา มีอัตราการคายประจุต่ำและให้พลังงานสูง แต่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเสียหายได้ง่ายหากใช้งานไม่ถูกวิธี ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจึงต้องมีระบบจัดการแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ แบตเตอรี่จึงจะใช้งานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความปลอดภัยระหว่างการใช้งาน ซึ่งระบบจัดการแบตเตอรี่นั้นประกอบด้วย การประมาณสถานะแบตเตอรี่ได้แก่สถานะประจุ สถานะกำลัง สถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ ระบบป้องกันและสมดุลแรงดันเซลล์แบตเตอรี่ โดยการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่แม่นยำสามารถช่วยให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การคำนวณระยะทางคงเหลือสำหรับแบตเตอรี่ภายในยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสถานะของประจุ ซึ่งในปัญหานี้พินิจนี้เลือกใช้วิธีตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ในการประมาณสถานะประจุ เนื่องจากมีความแม่นยำและไม่มีความผิดพลาดจากผลของสถานะประจุช่วงเริ่มต้นเหมือนวิธี Coulomb Counting

### 2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System)

ระบบจัดการแบตเตอรี่จะเปรียบเสมือนสมองของมนุษย์หรือซีพียูของคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเป็นศูนย์กลางของระบบแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยจะรวบรวมข้อมูลของแบตเตอรี่ผ่านเซนเซอร์จากนั้นประมวลผลผ่านอัลกอริทึมของระบบ หรือ แสดงผลออกมา ฟังก์ชันพื้นฐานของระบบจัดการแบตเตอรี่หรือ BMS ประกอบไปด้วย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การวัดแรงดัน อุณหภูมิ และกระแสของแบตเตอรี่ รวมถึงตรวจจับพอลต์ต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้น
2. ระบบป้องกัน เพื่อป้องกันระบบและแบตเตอรี่ ที่อาจเกิดขึ้นได้จาก overcharge, overdischarge, overcurrent, กระแสลัดวงจร, และอุณหภูมิสูงเกินกว่าที่กำหนด
3. แสดงแบตเตอรี่คงเหลือ ในรูปแบบสถานะประจุ (State of Charge - SoC) ของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ รวมถึงคำนวณพลังงานคงเหลือภายในแบตเตอรี่ อาจมีการสมดุลแรงดันแบตเตอรี่เพื่อความแม่นยำในการอ่านค่า
4. วิเคราะห์คำนวณสถานะสุขภาพของแบตเตอรี่ (State of Health - SoH)

**2.2 สถานะประจุ (State of Charge)**

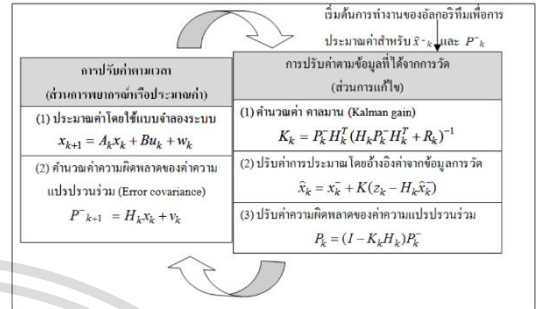
สถานะประจุ (State of Charge) คือระดับประจุของแบตเตอรี่โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบระหว่างความจุคงเหลือของแบตเตอรี่กับค่าความจุทึ่กักของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าความจุทึ่กักของแบตเตอรี่จะสามารถทราบได้จากผู้ผลิต การประมาณค่าสถานะประจุมีความสำคัญมาก เมื่อแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพ ค่าความจุทึ่กักของแบตเตอรี่จะลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีประมาณค่าสถานะประจุอย่างมีประสิทธิภาพ

สถานะประจุไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณจากตัวแปรจากการวัดโดยตรง (Direct Measurement Variables) เช่น Coulomb-Counting วิธีนี้ให้การประมาณค่า SoC ของแบตเตอรี่ที่แม่นยำ แต่ใช้เวลานาน การทดสอบนาน มีค่าใช้จ่ายสูง และระบบกวนประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งในขณะที่ทำการทดสอบจะไม่สามารถนำแบตเตอรี่ไปใช้งานอื่นได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีอื่นคือ ตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะสามารถทำการประเมิน SoC ได้แม่นยำกว่า โดยจุดเด่นของการใช้ตัวกรองคาลมานคือสามารถปรับความน่าเชื่อถือของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้แบบเรียลไทม์

**2.3 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)**

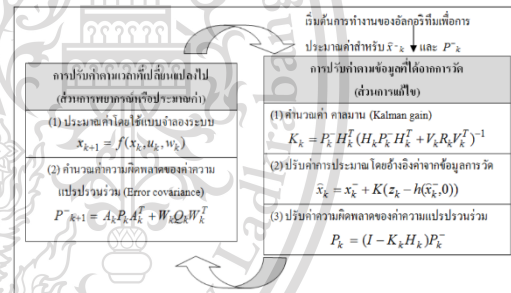
ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) คือการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Estimation) เป็นขั้นตอนวิธีแบบเวียนบังเกิดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัต โดยการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัตนี้ อาจจะประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการประมาณตัวแปรสถานะที่ถูกสัญญาณรบกวนหรือเกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดตัวแปรสถานะนั้น ๆ หรือในบางกรณีก็ใช้ร่วมกับข้อมูลของตัวแปรสถานะที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์ซึ่งทำให้ข้อมูลของตัวแปรสถานะมีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้นกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว

โดยการสร้างตัวกรองคาลมานมี 2 ส่วนหลักคือแบบจำลองระบบ (State Transition Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Extended Kalman Filter) แตกต่างจากตัวกรองคาลมานแบบปกติคือฟังก์ชันที่ถูกนำไปใช้ในแบบจำลองจะเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง OCV และ SoC ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองระบบและแบบจำลองการวัดเป็นดังรูปที่ 2



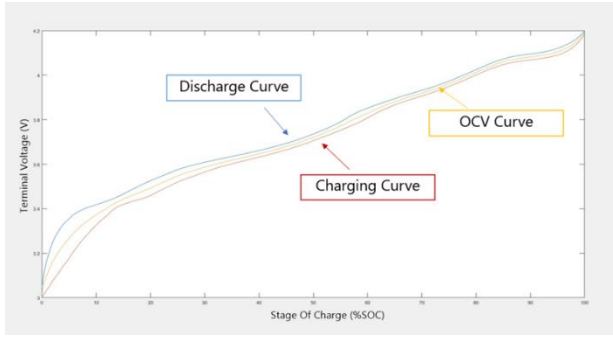
รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของตัวกรองคาลมานฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

**3. การออกแบบ และสร้างวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่**

**3.1 การหาเส้นโค้งแรงดันเปิดวงจร (OCV Curve)**

ทำการทดลองอัดและคายประจุด้วยกระแสแสดงที่ที่มีอัตราการอัดและคายประจุเท่ากับ C/30 เพื่อเก็บค่าแรงดันระหว่างขั้ว (Terminal Voltage) ค่ากระแสและเวลาในแต่ละวินาที หลังจากนั้นทำการประมาณสถานะประจุด้วยวิธีการรวมกระแสและพล็อตค่าแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับสถานะประจุเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร โดยในรูปที่ 3 เป็นกราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (OCV) โดยใช้โปรแกรม MATLAB

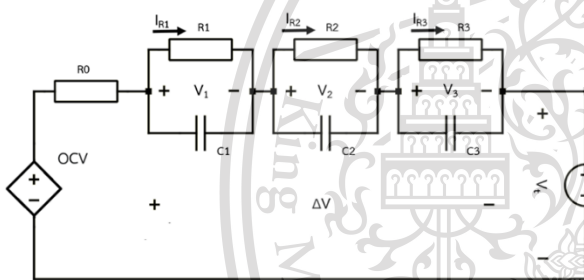
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 กราฟแรงดันเปิดวงจร (OCV)

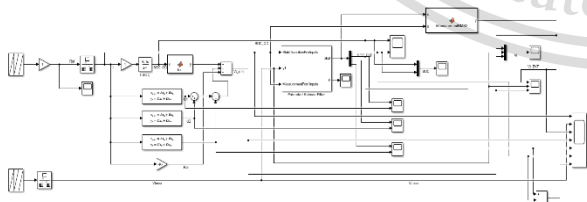
### 3.2 การประมาณสถานะแบตเตอรี่ด้วย Extended Kalman Filter

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



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่

จากนั้นวัดแรงดันที่ขั้วเพื่อนำไปใช้ในฟังก์ชัน Measurement ซึ่งแรงดันนี้ทำหน้าที่เป็น feedback เพื่อให้สถานะแบตเตอรี่ที่ได้จากการประมาณมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง โดยโมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่จะใช้ตัวกรองคาลมานดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 โมเดลการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter

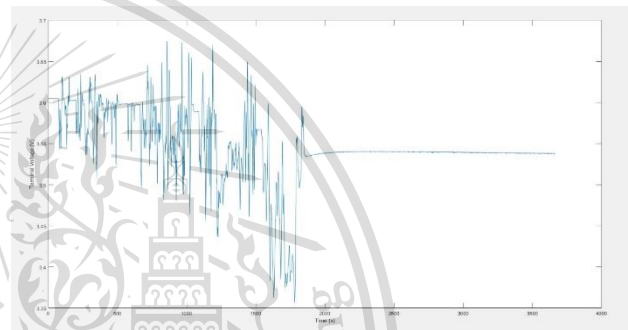
### 3.3 วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่

เป็นวงจรที่สามารถประมาณสถานะแบตเตอรี่ 8 เซลล์แบบเรียลไทม์ผ่านการใช้โปรแกรม MATLAB ควบคู่กับ Arduino Uno วงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่ประกอบไปด้วย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจำนวนไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

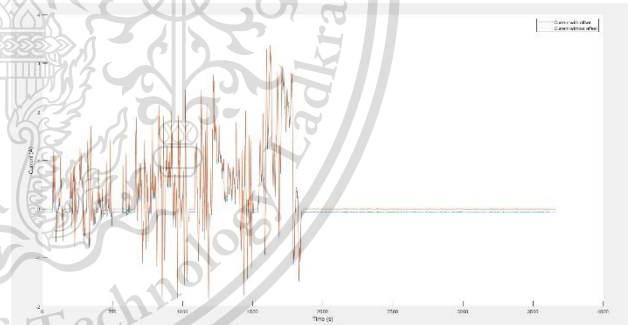
8 เซลล์อนุกรม, บอร์ดสาขา DC2350b ที่มี LTC6813-1 อยู่ภายใน โดยที่ LTC6813-1 ทำหน้าที่เป็น Cell Monitoring และ Current Transducer LTS25-NP ที่ทำหน้าที่วัดค่ากระแสไฟฟ้า

### 4. การทดลองและผลการทดลอง

จากวงจรการประมาณสถานะแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ทำการทดลอง โดยการป้อน โพรไฟล์กระแสอินพุตที่เกิดจากการจำลองการขับรถตาม Driving cycle ของ WTLP3 จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันระหว่างขั้วและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซตและกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีออฟเซต

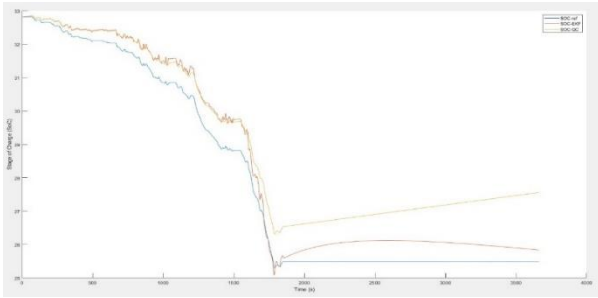


รูปที่ 6 กราฟแรงดันระหว่างขั้วเทียบกับเวลา



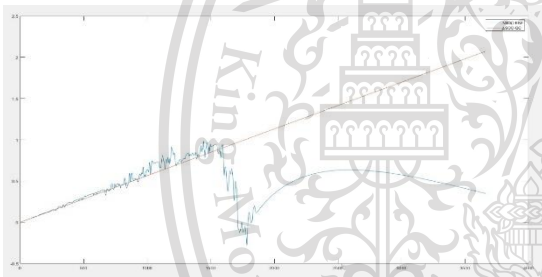
รูปที่ 7 กราฟกระแสไฟฟ้าที่มีออฟเซตเทียบกับเวลา (เส้นสีฟ้า) และกราฟกระแสไฟฟ้าที่ไม่มีออฟเซตเทียบกับเวลา (เส้นสีแดง)

จากการทดลองเมื่อทำการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่ โดยการอินทิเกรตกระแส (Coulomb Counting) ทั้งกระแสที่มีออฟเซตและกระแสที่ไม่มีออฟเซต และทำการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยใช้ Extended Kalman Filter ซึ่งกระแสที่ใช้ในการประมาณสถานะแบตเตอรี่เป็นกระแสที่มีออฟเซต



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต (เส้นสีฟ้า) กับ SoC จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่มีออฟเซต (เส้นสีเหลือง) และ SoC จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter (เส้นสีแดง)

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า SoC ที่ได้จากการประมาณโดยใช้ Extended Kalman Filter ถึงแม้ว่ากระแสที่ใช้ประกอบด้วยออฟเซต ค่า SoC ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ SoC ที่ได้จากการ Coulomb Counting โดยใช้กระแสที่ไม่มีออฟเซต



รูปที่ 9 กราฟแสดงความผิดพลาดของการประมาณค่า SoC โดย Extended Kalman Filter (เส้นสีฟ้า) และโดย Coulomb Counting (เส้นสีแดง) กรณีที่ตัวตรวจจับสนกระแสมีออฟเซต

## 5. สรุปผลการทดลอง

โครงการฉบับนี้ทำการหาสถานะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยใช้ Extended Kalman-Filter เป็นอัลกอริทึมในการประมวลผล เนื่องจากตัวกรองคาลมานเป็นสามารถจำกัดค่าออฟเซตและผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากหากเทียบกับวิธีตัวนับคูลอมบ์ที่มีข้อผิดพลาดจากค่าออฟเซต โดยในการออกแบบวงจรประมาณสถานะแบตเตอรี่จะเป็นการออกแบบสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 จากการทดลองจะพบว่าเมื่อใช้วิธี Extended Kalman-Filter จะมีค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับสถานะแบตเตอรี่จากวิธีตัวนับคูลอมบ์โดยใช้กระแสที่ไม่มี

ออฟเซต ถึงแม้ว่าแม้ว่าการประมาณสถานะแบตเตอรี่โดยการ Extended Kalman-Filter มีกระแสอินพุตเป็นกระแสที่มีออฟเซต

## กิตติประกาศ

ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากดร. สมภพ ผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ แนวคิดในการทำโครงการ และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น รวมทั้งให้การสนับสนุนในด้านงบประมาณ อุปกรณ์และสถานที่ในการทำโครงการ และแรงกระตุ้นเพื่อให้โครงการนี้เสร็จสมบูรณ์ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

## เอกสารอ้างอิง

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

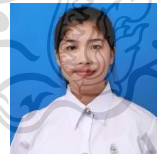
## ประวัติผู้เขียน



นาย กตฤชชญ์ หรุปานวงษ์

เกิดวันที่ 23 พฤศจิกายน 2541

นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นางสาว เกศินี อินทร์ไตรรัตน์

เกิดวันที่ 14 กันยายน 2541

นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย เกื้อกูล ดกยัวัฒนากุล

เกิดวันที่ 19 มีนาคม 2542

นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย คณพศ ดริือบหา

เกิดวันที่ 9 เมษายน 2542

นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้

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.

## ประวัติผู้เขียน



นาย กฤตยชญ์ หรุปานวงษ์  
เกิดวันที่ 23 พฤศจิกายน 2541  
ที่อยู่ : 488 ม.5 ต.ชมพู อ.เมือง จ.ลำปาง 52100  
E-mail: 60010026@kmitl.ac.th



นางสาว เกศินี อินทร์ไตรรัตน์  
เกิดวันที่ 14 กันยายน 2541  
ที่อยู่ : 494/5 ม.5 ต.บ้านสวน อ.เมืองชลบุรี จ.ชลบุรี 20000  
E-mail: 60010100@kmitl.ac.th



นาย เกื้อกุล เอกษ์วัฒนากุล  
เกิดวันที่ 19 มีนาคม 2542  
ที่อยู่ : 106 ม.8 ต.บ้านถิ่น อ.เมืองแพร่ จ.แพร่ 54000  
E-mail: 60010103@kmitl.ac.th



นาย คณพศ ตริ์บุบผา  
เกิดวันที่ 9 เมษายน 2542  
ที่อยู่ : 333/86 ม.1 ต.หัวรอ อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000  
E-mail: 60010108@kmitl.ac.th

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.