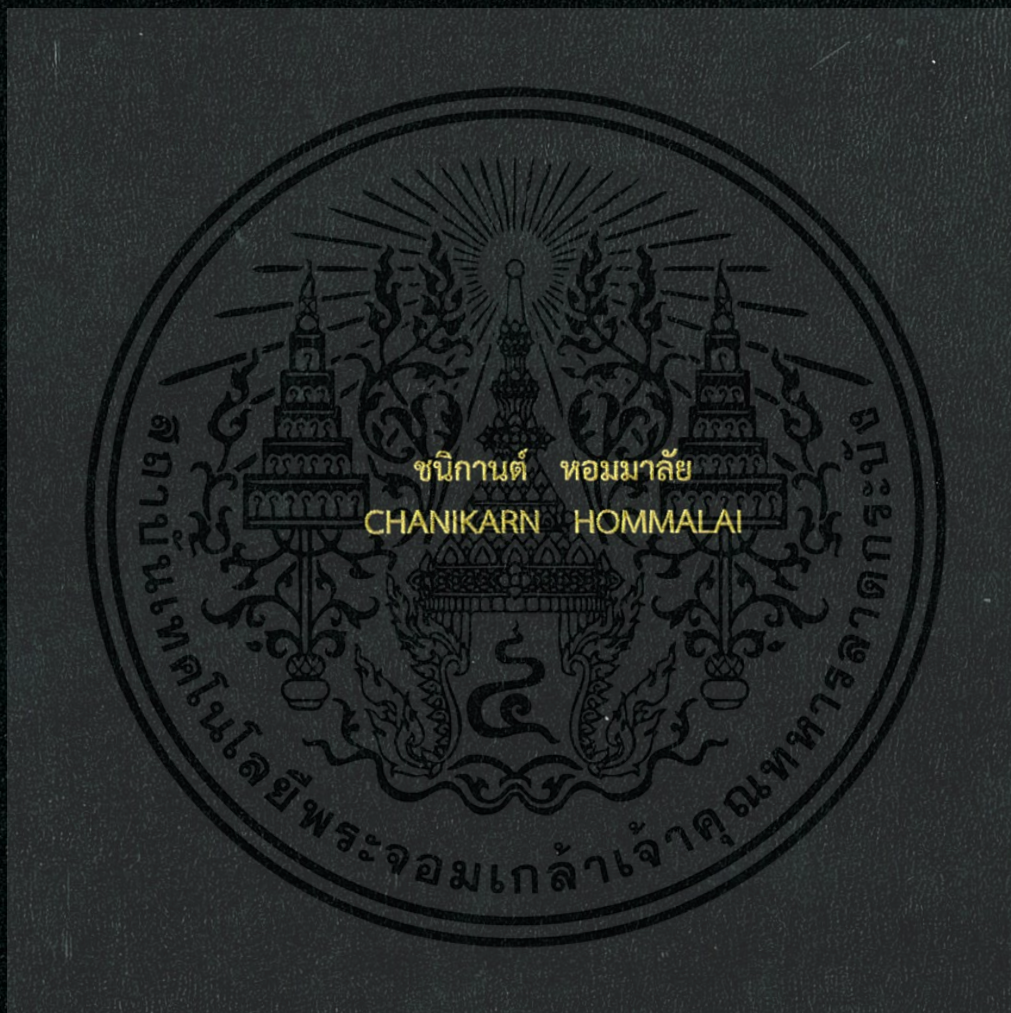


การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะ
ทางอุณหภูมิจนขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

THE STUDY OF LITHIUM ION BATTERY ELECTRICAL MODEL WITH
THERMAL CHARACTERISTIC DURING CONSTANT CURRENT CHARGING



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-020-060

การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะ
ทางอุณหภูมิมิขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

THE STUDY OF LITHIUM ION BATTERY ELECTRICAL MODEL WITH
THERMAL CHARACTERISTIC DURING CONSTANT CURRENT CHARGING



ชานิกานต์ หอมมาลัย
CHANIKARN HOMMALAI



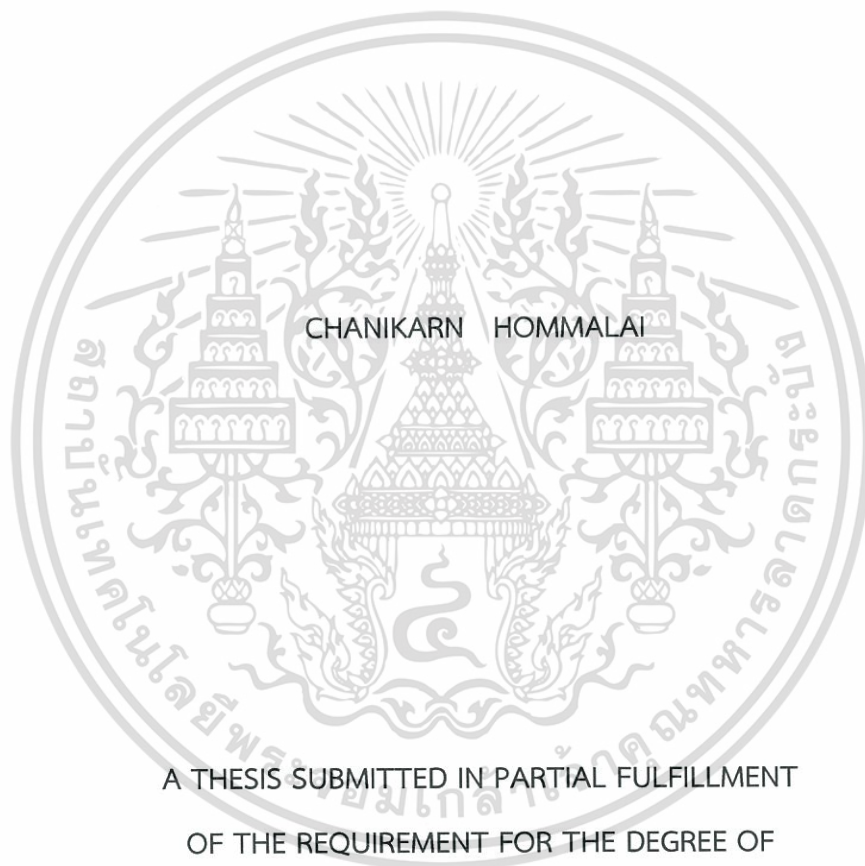
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148257
วันเดือนปี 18 ต.ค. 2560

108 68000

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-020-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF LITHIUM ION BATTERY ELECTRICAL MODEL WITH
THERMAL CHARACTERISTIC DURING CONSTANT CURRENT CHARGING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-020-060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

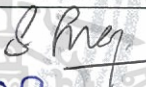




FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

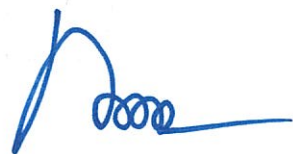
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่
Thesis Title The Study of Lithium Ion Battery Electrical Model with Thermal Characteristic During Constant Current Charging
นักศึกษา นางสาวชนิกานต์ หอมมาลัย
รหัสประจำตัว 57601114
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-020-060

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรพงศ์	สุวรรณกวิน	
รศ.ดร.วิจิตร	กนิเรศ	
รศ.ดร.อนุวัฒน์	จางวนิชเลิศ	
ดร.สมภพ	ผลไม้	
รศ.ดร.สุรินทร์	คำฝอย	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ฉบับดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม
ไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้า
ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

ชื่อนักศึกษา

นางสาวชนิกานต์ หอมมาลัย

รหัสประจำตัว

57601114

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ เพื่อหาตัวแปรทางความร้อนที่ช่วยในการประเมินอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแบตเตอรี่และกำลังสูญเสียจากความร้อนเมื่ออัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ในสภาวะที่อุณหภูมิห้องแตกต่างกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ เพื่อนำไปสู่การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้เป็นตัวแปรสำคัญที่จะใช้ในการคำนวณคุณลักษณะทางอุณหภูมิ ในการศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ได้ทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ และนำผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่มาคำนวณร่วมกับพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการออกแบบฟังก์ชันควบคุมอุณหภูมิในเครื่องอัดประจุไฟฟ้า และปรับปรุงการอัดประจุไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

Thesis Title	The Study of Lithium Ion Battery Electrical Model with Thermal Characteristic during Constant Current Charging
Student	Ms. Chanikarn Hommalai
Student ID.	57601114
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surin Khomfoi

ABSTRACT

The study of Lithium ion battery electrical model with thermal characteristic during constant current charging method is presented in this thesis in order to find thermal parameter for temperature evaluation and power loss identification during constant current charging in different ambient temperature. This thesis presents electrical model of lithium ion battery with it's parameters that has been investigated by pulse charging method. These parameter are an important key to calculate thermal characteristic of battery. Thermal characteristic of lithium ion battery is analyzed over constant current charging method. Thermal characteristic of battery and electrical parameter are used to calculate thermal resistance of lithium ion battery. In the end, the simulation results of lithium ion battery under constant current charging conditions show that the characteristic of temperature allow good comparison with data from an actual experiment. The results of this study can be used to design function of charger in temperature controlling and to improve efficiency of charging method.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิที่ต่ำกว่าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยการสนับสนุนในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านความรู้ทางด้านวิชาการ ด้านเทคนิคการดำเนินงาน รวมถึงคำแนะนำต่างๆ ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณในความอนุเคราะห์ที่ได้รับเหล่านี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ คำฝอย ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณภูมิพัฒน์ จำปีทอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือทางด้านการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และความช่วยเหลือทางด้านการสั่งซื้ออุปกรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบิด พี่เล็ก พี่บอย พี่หมู ปิง ฮิม ตู๊ ตั้ว ตู๋ น้องแจน น้องปอดัน น้องแพม น้องพอร์ช น้องแม็ค ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้อุปการะเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนตลอดจนให้การสนับสนุนและเต็มกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยในด้านต่างๆ ได้ต่อไป

ชนิกันต์ หอมมาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	I
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	5
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
บทที่ 2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 ชนิดของแบตเตอรี่.....	7
2.3 การอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่	10
2.4 การหาวงจรสมมูลและวงจรสมมูลแบบต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์เชิงความถี่	13
2.5 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	15
2.6 การหาวงจรสมมูลด้วยการวิเคราะห์เชิงเวลา	17
2.7 การสื่อสารแบบ CAN (Control Area Network: CAN Bus)	18
2.8 การสื่อสารอนุกรม.....	20
2.9 บทสรุป	22
บทที่ 3 อุณหพลศาสตร์	23
3.1 บทนำ.....	23
3.2 อุณหพลศาสตร์	23
3.3 กฎของอุณหพลศาสตร์.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์	24
3.5 คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิจึง 27	27
3.6 การถ่ายเทความร้อน	28
3.7 บทสรุป	31
บทที่ 4 การออกแบบการทดลอง	32
4.1 บทนำ.....	32
4.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง	32
4.3 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองของแบตเตอรี่.....	35
4.4 บทสรุป	39
บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่.....	40
5.1 บทนำ.....	40
5.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่.....	40
5.3 การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์	47
5.4 การทำนายอุณหภูมิเมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่	49
5.5 การคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน	51
5.6 บทสรุป	53
บทที่ 6 บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา	54
6.1 บทสรุป	54
6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง.....	54
6.3 แนวทางการพัฒนา.....	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก ก	59
ประวัติผู้เขียน	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6
5.1 ผลการทดลองการคายประจุไฟฟ้า.....	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 พลังงานทดแทน	1
1.2 ระบบจัดเก็บพลังงาน	2
1.3 รถพลังงานไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้า	2
1.4 เมืองอัจฉริยะ	3
1.5 ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า	4
2.1 ปฏิกริยาของกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า	8
2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	9
2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอรอนฟอสเฟต	10
2.4 คุณสมบัติของการอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่	11
2.5 คุณสมบัติของการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่	12
2.6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส	13
2.7 แผนภาพไนควิสต์ของวงจร RC	13
2.8 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ ONE-RC BRANCH	14
2.9 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ TWO-RC BRANCH	14
2.10 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ FINITE WARBURG IMPEDANCE	14
2.11 วงจรสมมูลแบบ ONE-RC BRANCH EQUIVALENT	15
2.12 วงจรสมมูลแบบ TWO-RC BRANCH EQUIVALENT	16
2.13 วงจรสมมูลแบบ FINITE WARBURG IMPEDANCE MODEL	16
2.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์	17
2.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงพัก	18
2.16 การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารแบบ CAN	19
2.17 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232	21
2.18 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485	21
3.1 การถ่ายเทความร้อนจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ	25
3.2 งานที่เกิดจากการขยายตัวของอากาศในกระบอกสูบ	26
3.3 การนำความร้อนผ่านวัตถุ	29
4.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลอง	32
4.2 ข้อมูลเชิงเทคนิคของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	33
4.3 แผนผังเซลล์ภายในแบตเตอรี่และเซ็นเซอร์อุณหภูมิ	34
4.4 วงจรสมมูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 การเชื่อมต่อเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่.....	35
4.6 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์.....	36
4.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	36
4.8 แรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองเซลล์แบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์.....	36
4.9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์	38
4.10 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของแบตเตอรี่	38
4.11 หน้าต่างแสดงผลข้อมูลของแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบ	39
5.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C	41
5.2 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C	41
5.3 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C	42
5.4 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C	42
5.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C	43
5.6 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C	43
5.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C	44
5.8 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C	44
5.9 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35 °C.....	45
5.10 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35 °C.....	45
5.11 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35 °C.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35 °C.....	46
5.13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์.....	47
5.14 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์	48
5.15 ความต้านทาน R0 ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ %SOC ต่างๆ	48
5.16 ความต้านทาน R1 ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ %SOC ต่างๆ.....	49
5.17 แบบจำลองแบตเตอรี่ลิเทียม	49
5.18 อุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 1C หรือ 40 แอมแปร์.....	50
5.19 อุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 2C หรือ 80 แอมแปร์.....	51
5.20 ความต้านทานทางความร้อนที่ค่า SOC ต่างๆ.....	53



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

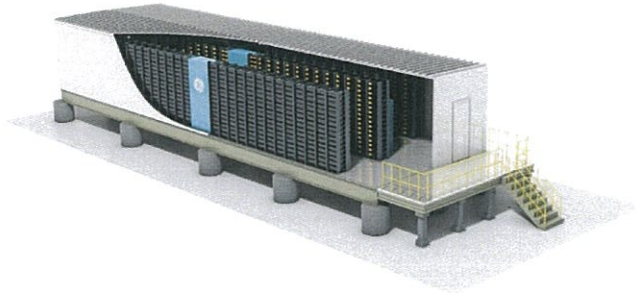
ปัจจุบันพลังงานเข้ามามีความสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของคนทั่วไปและมีส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศ การขยายตัวของประชากร การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มปริมาณมากขึ้น ในปี 2559 รัฐบาลได้ออกนโยบาย Thailand 4.0 ในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งกระทรวงพลังงานก็รับนโยบายเพื่อพัฒนาพลังงานของประเทศไทยให้ก้าวไปสู่ Energy 4.0 ให้ได้ ประกอบด้วย 4 แผนงาน ดังนี้

1. พลังงานทดแทน คือพลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก ดังรูปที่ 1.1 โดยกระทรวงพลังงานมีแผนการปรับสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงให้พึ่งพาก๊าซธรรมชาติลดลง และเพิ่มการใช้พลังงานทดแทนในการผลิตไฟฟ้า ตัวอย่างพลังงานทดแทนได้แก่ พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานความร้อนใต้พิภพ, เชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 พลังงานทดแทน [1]

2. ระบบจัดเก็บพลังงานมีความจำเป็นสำหรับระบบไฟฟ้าในอนาคตเป็นอย่างมาก ประโยชน์หลักของระบบจัดเก็บพลังงาน คือ การสนับสนุนการรักษาสมดุลของระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะในระบบที่มีพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนสูง รวมถึงช่วยรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยระบบจัดเก็บพลังงานมีหน้าที่เก็บพลังงานที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าส่วนเกินไว้เพื่อนำออกมาใช้ในยามที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ เมื่อมีการใช้พลังงานทดแทนซึ่งไม่สามารถผลิตพลังงานได้ตลอดเวลา ระบบจัดเก็บพลังงานจะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดทางไฟฟ้าต่างๆ เพื่อใช้งาน ถึงแม้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานทดแทนจะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในเวลานั้น ทำให้สามารถใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าบางส่วนได้ตามปกติ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า โดยเทคโนโลยีของอุปกรณ์จัดเก็บพลังงานที่นิยมใช้คือ แบตเตอรี่ ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งจะเก็บพลังงานในรูปของพลังงานเคมีชนิดของแบตเตอรี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 1.2 ระบบจัดเก็บพลังงาน [1]

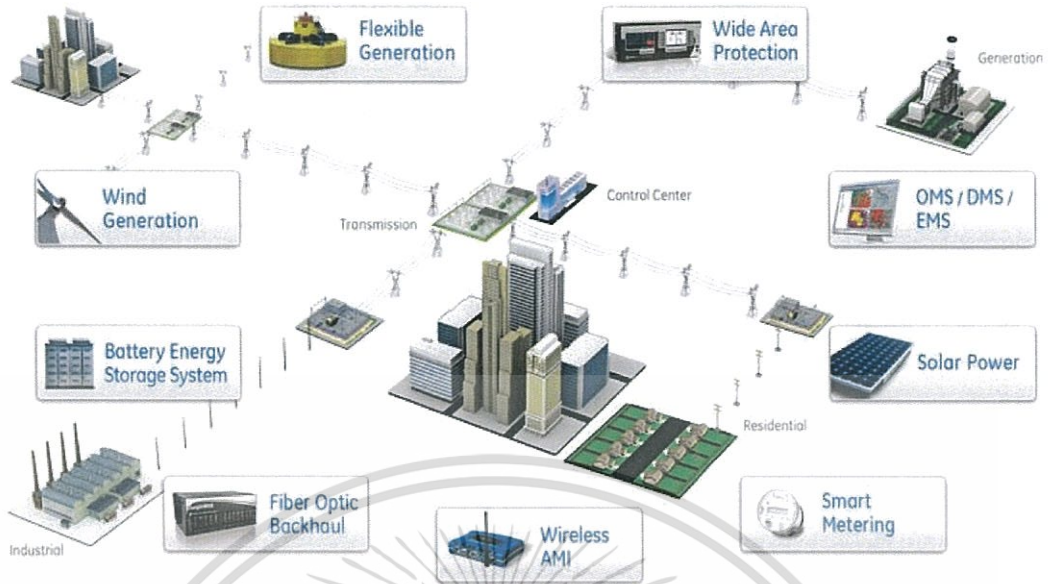
3. รถพลังงานไฟฟ้า คือรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งเก็บอยู่ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นๆ โดยมีการชาร์จไฟแบตเตอรี่จากระบบไฟฟ้ามาใช้ ไม่ต้องพึ่งพาเครื่องยนต์ในการสันดาป ทำให้รถยนต์ไฟฟ้ามีศักยภาพที่จะลดมลพิษในเมือง โดยที่ไม่มีการเผาไหม้เลย ระบบภายในรถพลังงานไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือ มอเตอร์ไฟฟ้า , ระบบควบคุมมอเตอร์ , แบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า และด้วยข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้รถพลังงานไฟฟ้ามีอัตราเร่งที่เรียบและรวดเร็ว ปัจจุบันกระทรวงพลังงานมีนโยบายให้สร้างสถานีอัดประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นองค์ประกอบที่จำเป็นต่อรถพลังงานไฟฟ้าในการให้พลังงานตามแหล่งสำคัญต่างๆ เพื่อรองรับการใช้รถพลังงานไฟฟ้าในอนาคต รูปที่ 1.3 แสดงรถพลังงานไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้า



รูปที่ 1.3 รถพลังงานไฟฟ้าและสถานีอัดประจุไฟฟ้า [1]

4. เมืองอัจฉริยะ คือการพัฒนา รูปแบบและโครงสร้างของเมืองที่สอดคล้องกับแนวคิดของ การส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม และการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน ประกอบกับการนำเทคโนโลยีสารสนเทศ และข้อมูลมาช่วยในการบริหารจัดการทรัพยากรของเมืองให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่น ระบบบริหารจัดการเครือข่ายพลังงานอัจฉริยะ ระบบมิเตอร์อัตโนมัติ ระบบควบคุมการจราจรอัจฉริยะ ระบบควบคุมอาคารอัจฉริยะ และระบบตรวจวัดมลภาวะ โดยการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาปรับใช้มากขึ้น ประชาชนสามารถเข้าถึงบริการสาธารณะของเมืองได้อย่างรวดเร็ว การเชื่อมโยงข้อมูลถึงกันเพื่อช่วยพัฒนา ระบบบริการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีการพัฒนาคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

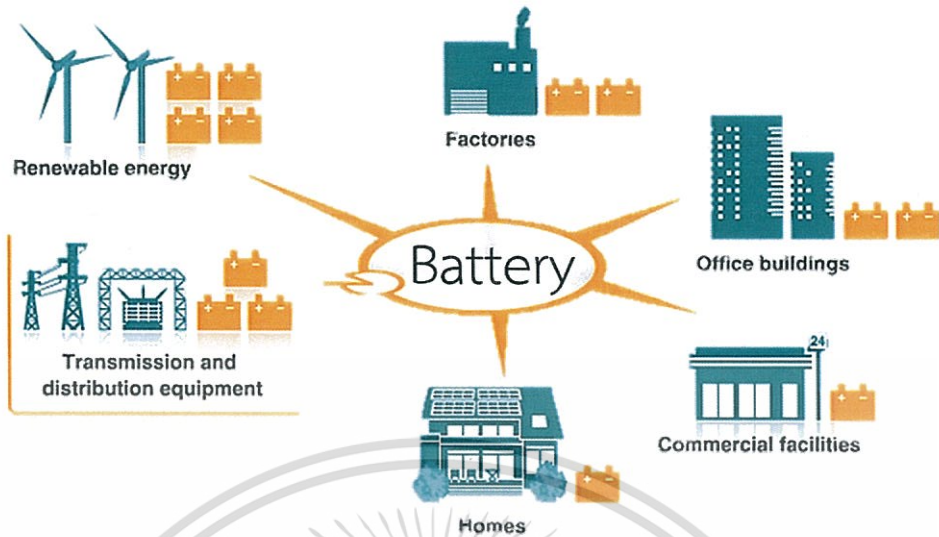


รูปที่ 1.4 เมืองอัจฉริยะ [1]

ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนจึงได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้า เพื่อรองรับการขับเคลื่อนพลังงานของประเทศไทยตามนโยบาย Energy 4.0 การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนที่มีข้อจำกัดในการผลิตไฟฟ้าคือไม่สามารถผลิตได้คงที่และเพียงพอต่อความต้องการตลอดเวลา ส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมการผลิตให้ได้ตามความต้องการใช้ไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการบริหารจัดการพลังงานทดแทนให้มีความเสถียรจากการพัฒนาระบบจัดเก็บพลังงานมาใช้เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการผลิตในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 1.5 แล้วนำมาใช้ในยามจำเป็นที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยซึ่งไม่เพียงพอ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟที่มีความสำคัญสูงในสถานะที่ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเกิดความขัดข้องได้ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต้องการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบฐานข้อมูลและคอมพิวเตอร์ การนำระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าไปใช้งานในสถานที่ที่มีภาระทางไฟฟ้าที่สำคัญ เช่น โรงพยาบาล ท่าอากาศยาน โรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องมีการใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความเสียหายต่อกระบวนการผลิต

แต่เนื่องจากในปัจจุบันแบตเตอรี่ยังมีราคาสูง การนำมาใช้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆจะทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และแน่นอนก็ทำให้ราคาต้นทุนของระบบสูงขึ้นเช่นกัน ส่งผลต่อระยะเวลาคืนทุน ผลกำไรที่จะได้รับและความคุ้มค่าในการลงทุน นอกจากนี้แบตเตอรี่ยังมีอายุการใช้งานจำกัด จึงต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการสะสมพลังงานไฟฟ้าเพื่อกักเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินไว้เป็นการตอบสนองความต้องการในการใช้พลังงานที่คุ้มค่าต่อการลงทุนโดยหากสามารถลดราคาของระบบกักเก็บพลังงานลงได้ จะช่วยลดต้นทุนของระบบส่งผลให้มีกำไรเพิ่มขึ้น และทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่างๆมีระบบสะสมพลังงานที่มีคุณภาพและราคาประหยัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.5 ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า [2]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน พิกัด 27.6 โวลต์ 40 แอมแปร์-ชั่วโมง เพื่อนำไปสู่การศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ โดยหาตัวแปรที่สามารถวิเคราะห์อุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยตัวแปรดังกล่าวสามารถใช้ในการทำนายอุณหภูมิ ซึ่งสามารถพัฒนาต่อเยื่อไปสู่การควบคุมการอัดประจุแบตเตอรี่ที่เหมาะสม อีกทั้งยังเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ที่สูงเกินค่าที่คู่มือกำหนด ปัจจุบันมีการนำแบตเตอรี่มาใช้ในงานในระบบจัดเก็บพลังงาน ทั้งด้านการเก็บพลังงานจากพลังงานทดแทน และในรถพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรใช้งานแบตเตอรี่ให้เหมาะสม เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ และลดความเสียหายต่อระบบจัดเก็บพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งยังช่วยลดมลภาวะจากการกำจัดขยะอันตรายประเภทแบตเตอรี่

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน
2. เพื่อศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน
3. เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนขณะทดสอบด้วยการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่
4. เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการแสดงสถานะอุณหภูมิของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนขณะทดสอบด้วยการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวงจรสมมูลแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน พิกัด 27.6 โวลต์ 40 แอมแปร์-ชั่วโมง และศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออนในช่วงการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ (SOC 0% ถึง SOC 80%) เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนในช่วง SOC ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน
2. เพื่อนำองค์ความรู้เกี่ยวกับลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน ไปพัฒนาต่อยอดในการออกแบบฟังก์ชันแสดงผลอุณหภูมิของเครื่องอัดประจุไฟฟ้า
3. เพื่อช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้าสูงเกินค่าที่คู่มือกำหนด
4. เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการอัดประจุไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ และแผนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน กล่าวถึง ชนิดของแบตเตอรี่ การอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ การหาจรรยาบรรณด้วยการวิเคราะห์เชิงความถี่ การหาจรรยาบรรณด้วยการวิเคราะห์เชิงเวลา วจรรยาบรรณของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน และการสื่อสารแบบ CAN (Control Area Network: CAN Bus)

บทที่ 3 อุณหพลศาสตร์ กล่าวถึง ทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ กฎของอุณหพลศาสตร์ พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 4 กล่าวถึง การออกแบบการทดลอง แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง และการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองของแบตเตอรี่

บทที่ 5 ผลการทดสอบแบตเตอรี่ กล่าวถึง การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ การทำนายอุณหภูมิเมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าคงที่ และการคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

1.6 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	เดือนที่												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาข้อมูล คุณสมบัติ และคุณลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	■	■											
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิศาสตร์		■	■										
3. ทดสอบแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ด้วยการอัดประจุเทคนิคพัลส์				■	■								
4. นำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่					■	■							
5. ทดสอบแบตเตอรี่ลิเทียม-ไอออน ด้วยการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่					■	■	■						
6. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางความร้อน							■						
7. เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง ด้วยโปรแกรม Matlab									■	■			
8. สรุปผลงานวิจัย										■	■		
9. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์													■

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

2.1 บทนำ

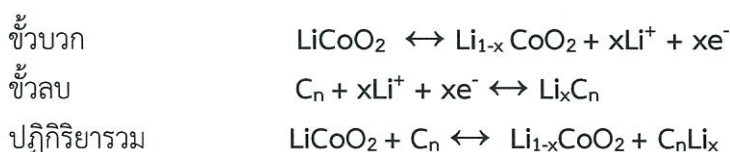
บทนี้จะเป็นการศึกษาถึงคุณลักษณะและคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดต่างๆ โดยจะมุ่งเน้นไปที่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมเป็นหลัก และได้ศึกษาการอัดประจุไฟฟ้าประเภทต่างๆ ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิภายในแบตเตอรี่แตกต่างกัน ทั้งนี้ได้กล่าวถึงวงจรสมมูลของแบตเตอรี่แต่ละแบบจากงานวิจัยวิชาการ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาระบบการสื่อสารแบบ CAN (Control Area Network) ซึ่งเป็นการสื่อสารที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแบตเตอรี่ รวมถึงการสื่อสารแบบ RS485 ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรมที่ใช้ในการนำข้อมูลของแบตเตอรี่มาแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.2 ชนิดของแบตเตอรี่

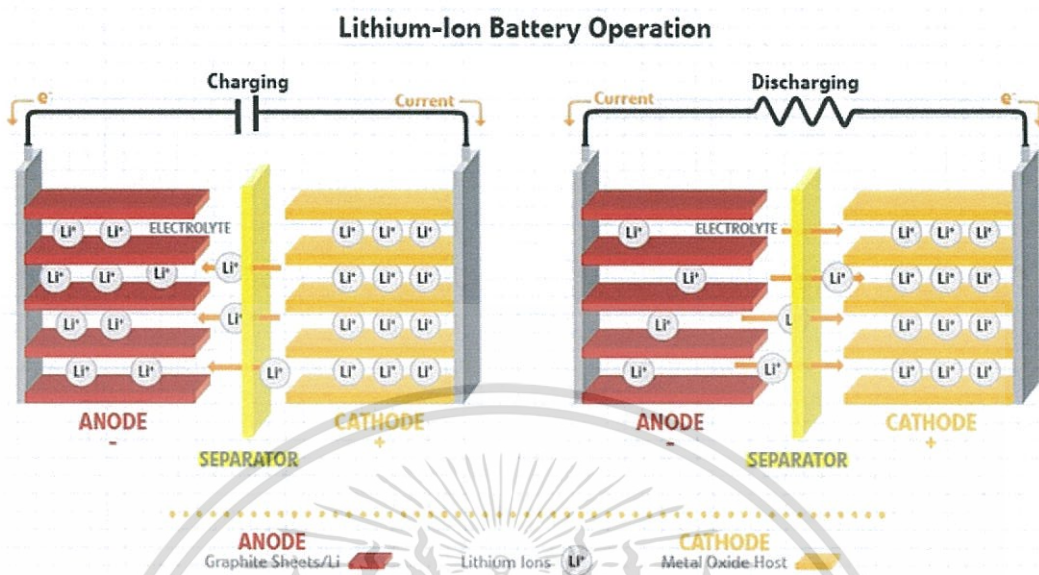
แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้อใช้งาน เนื่องจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลาย โดยหลักการของแบตเตอรี่จะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมี และจะเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก โดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งเซลล์หรือมากกว่า ที่มีการเชื่อมต่อภายนอกเพื่อให้กำลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า แบตเตอรี่มีขั้วบวกและขั้วลบ ขั้วที่มีเครื่องหมายบวกจะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วที่มีเครื่องหมายลบ ขั้วที่มีเครื่องหมายลบคือแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนที่เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้จะไหลและส่งมอบพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายนอก เมื่อแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับวงจรภายนอก สารอิเล็กโทรไลต์มีความสามารถที่จะเคลื่อนที่โดยทำตัวเป็นไอออนยอมให้ปฏิกิริยาทางเคมีทำงานแล้วเสร็จในขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างกัน เป็นการส่งมอบพลังงานให้กับวงจรภายนอก การเคลื่อนไหวของไอออนเหล่านั้นที่อยู่ในแบตเตอรี่ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากแบตเตอรี่เพื่อใช้งาน

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion) จะประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรด (Electrode) ซึ่งจะมี 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก จะเรียกว่า แอโนด (Anode) และ ขั้วลบ จะเรียกว่าแคโทด (Cathode) โดยแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองจะอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาของกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า สำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะมีใช้อิเล็กโทรดขั้วบวกเป็น LiCoO_2 และอิเล็กโทรดขั้วลบเป็น Li_xC_6 ซึ่งจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาของกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า [2]

เมื่อนำแบตเตอรี่ไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

แบตเตอรี่แบ่งได้ 2 ชนิด คือ

1. แบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ (Primary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้งานได้ครั้งเดียว เมื่อจ่ายไฟหมดแล้วไม่สามารถนำมาอัดประจุกลับเข้าไปใช้งานใหม่ได้ เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมด พลังงานไฟฟ้าก็จะหมด แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก และใช้ในที่ๆห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้า กระแสสลับ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบปฐมภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดคาร์บอนสังกะสี แบตเตอรี่ชนิดอัลคาไลน์ แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียม เป็นต้น

2. แบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ (Secondary Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้หลังจากจ่ายไฟหมดแล้ว เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการอัดประจุกลับเข้าไปใหม่ทำให้สามารถใช้งานได้นาน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีราคาแพงกว่าแบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ ตัวอย่างของแบตเตอรี่แบบทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โพลีเมอร์ เป็นต้น

2.2.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion)

แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เป็นแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง มีน้ำหนักเบา เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความปลอดภัย เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้มีวงจรป้องกัน (protection circuit) ในการจำกัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในขณะอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้า โดยวงจรป้องกันจะจำกัดค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเซลล์ขณะอัดประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำเกินไปขณะคายประจุไฟฟ้า และยังมีการตรวจสอบอุณหภูมิของเซลล์ แบตเตอรี่ไม่ให้สูงเกินไป คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือมีความหนาแน่นของพลังงานสูงเป็นแบตเตอรี่ที่มีการดูแลรักษาต่ำ นอกจากนี้ยังมีอัตราการคายประจุด้วยตนเอง (Self-discharge) ต่ำอีกด้วย

สาเหตุการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมนั้นได้แก่ การใช้งานแบตเตอรี่จนถึงจำนวนไซเคิลที่แบตเตอรี่จะเริ่มเสื่อมสภาพเองตามปกติ หรือเสื่อมสภาพเนื่องจากระยะเวลาหลังการผลิต ไม่ใช่เวลาในการใช้งาน นอกจากนี้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ก็ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพ ถ้าแบตเตอรี่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงก็จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วกว่าปกติได้



รูปที่ 2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [2]

2.2.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium iron Phosphate)

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate :LiFePO₄) เป็นแบตเตอรี่ตระกูลเดียวกับลิเทียมไอออน ถูกคิดค้นขึ้นเมื่อ ปี พ.ศ. 2534 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีข้อดีที่เหนือกว่าลิเทียมไอออนคือ ด้านความปลอดภัย แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้น แบตเตอรี่ก็อาจจะเกิดการระเบิดออกมาได้ ในขณะที่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต มีความเสถียรมากกว่า จึงปลอดภัยกว่า ข้อดีอีกประการคือแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตทนทานกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตมีวงจรอายุสูงถึง 2000 รอบจึงสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่า แต่ข้อเสียของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตคือมีความจุที่ต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน อยู่ประมาณ 40% นั้นหมายความว่า ถ้าแบตเตอรี่มีขนาดเท่ากันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะมีประจุไฟน้อยกว่า ด้วยเหตุผลนี้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจึงไม่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้กับอุปกรณ์ไอทีแบบพกพา ข้อเสียอีกประการของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต คือ แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยต่อเซลล์อยู่ที่ประมาณ 3.2 โวลต์ต่อเซลล์ ซึ่งต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นคือ 3.7 โวลต์ต่อเซลล์ ทำให้ต้องออกแบบวงจรอัดประจุใหม่ ความยุ่งยากนี้ก็เป็นอีกเหตุผลหนึ่งซึ่งผู้ผลิตอุปกรณ์ไอทีไม่นิยมใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะได้รับความสนใจในงานอื่นมากกว่า เช่น รถยนต์ไฟฟ้า จักรยานไฟฟ้า และอุปกรณ์ทำงานช่าง



รูปที่ 2.3 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต [2]

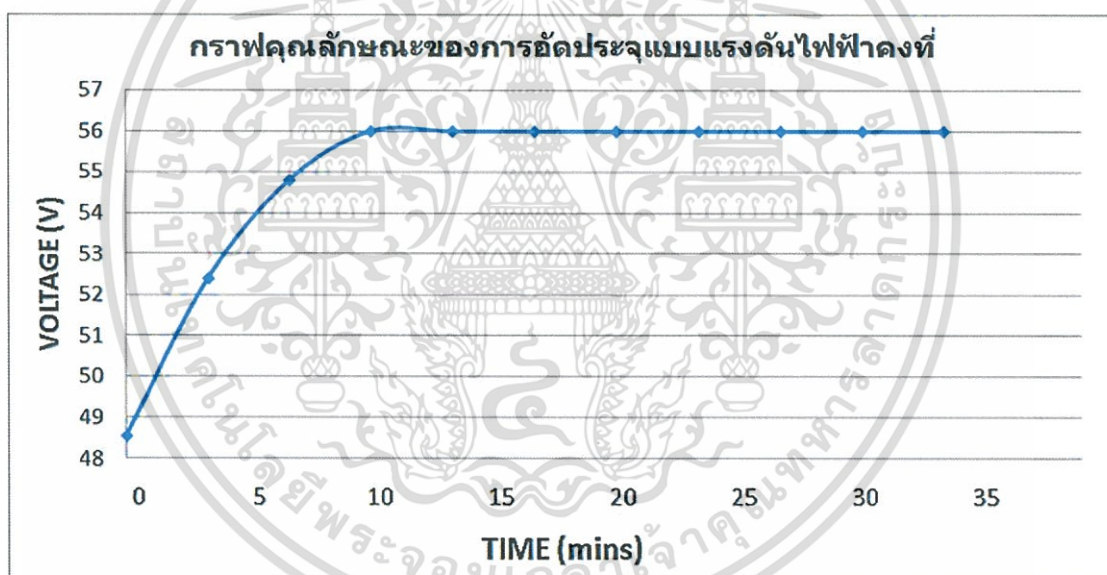
2.3 การอัดประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่ โดยการอัดประจุไฟฟ้าคือแบตเตอรี่ทุติยภูมิ ได้แก่ แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion) สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้หากนำมาอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปอีกครั้งหลังจากการใช้งาน ดังนั้นแบตเตอรี่จึงสามารถจ่ายพลังงานได้หลายๆครั้งตลอดอายุการใช้งาน ความสำคัญของการอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ก็คือ การเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับของแบตเตอรี่ทุติยภูมิอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากการอัดประจุที่เกินกว่าขีดจำกัดของแบตเตอรี่ ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้น พลังงานที่เราอัดประจุเข้าไปจะมากกว่าพลังงานที่เราได้รับออกมาจากแบตเตอรี่ นั่นเป็นเพราะว่าพลังงานในการอัดประจุแบตเตอรี่ส่วนหนึ่งจะสูญหายไปในแบตเตอรี่ เนื่องจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่และการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ใช่การเปลี่ยนรูปพลังงานไฟฟ้าไปสู่พลังงานเคมี เช่น การเกิดแก๊สในแบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) ทำให้ประสิทธิภาพของการอัดประจุไม่ถึง 100% ดังนั้นหากจะต้องการใช้แบตเตอรี่อย่างเต็มประสิทธิภาพ คือการทำให้สถานะประจุของแบตเตอรี่ที่อัดประจุ (state of charge) ของแบตเตอรี่ใกล้เคียงกับ 100% แต่หากใช้วิธีการอัดประจุที่สถานะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) จะทำให้มีความร้อนสูญเสียมากกว่าปกติ รวมไปถึงความดันที่จะเกิดขึ้นจากแก๊สที่ผลิตภายในแบตเตอรี่ จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุที่กระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) เพื่อที่จะป้องกันและควบคุมไม่ให้เกิดความเสียหายขึ้น

การอัดประจุแบตเตอรี่ทุติยภูมินั้นมีอยู่หลายวิธี หลักการของการอัดประจุก็คือการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการคายประจุ การอัดประจุแรงดันไฟฟ้าคงที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่ก็ยังมีการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ใข้อยู่ สิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกเครื่องอัดประจุก็คือการถูกคายประจุ เวลาในการอัดประจุ อุณหภูมิที่สูงขึ้นและจำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่

2.3.1 การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ หมายถึงการอัดประจุไฟฟ้าโดยคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียว ไม่คำนึงถึงกระแสไฟฟ้าขณะอัดประจุไฟฟ้า ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ใช้อัดประจุไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นอัดประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นและจะลดลงเมื่อแบตเตอรี่มีสถานะในการอัดประจุของแบตเตอรี่ (State of charge : SOC) เข้าใกล้ 100% เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่สูงขึ้น เครื่องอัดประจุที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบก็คือ แบบ fast charge จะอัดประจุที่แรงดันสูง กระแสไฟฟ้าที่อัดประจุจึงสูงตาม เวลาที่ใช้อัดประจุจะเร็วแต่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายของแบตเตอรี่ ทำให้อายุการใช้งานลดลง อีกแบบหนึ่งคือการอัดประจุแบบ float charge คือการอัดประจุที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่เล็กน้อย กระแสไฟฟ้าอัดประจุจึงไม่สูง แต่ก็ใช้เวลาในการอัดประจุนานกว่าการอัดประจุแบบ fast charge และนิยมใช้ในการอัดประจุแบบต่อเนื่องเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำรองไฟต่างๆ เช่น UPS ไฟฉุกเฉิน

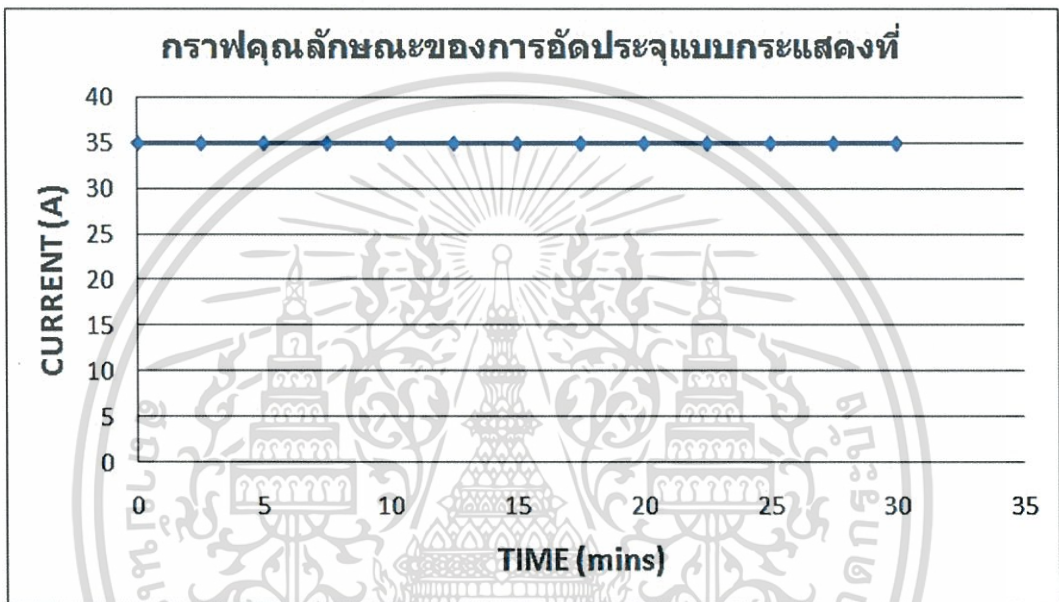


รูปที่ 2.4 คุณลักษณะของการอัดประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ [2]

2.3.2 การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นวิธีอัดประจุที่ควรที่จะนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะเป็นวิธีที่คืนพลังงานให้แก่แบตเตอรี่ได้เร็วโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ทำงานได้ดีก็กับการต่ออนุกรมกันของเซลล์แบตเตอรี่ที่ไม่สมดุล การอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่นั้นเป็นการอัดประจุที่ทำการรักษาระดับของกระแสไฟฟ้า โดยคำนึงถึงกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด (overcharge) ค่าแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความจุในแบตเตอรี่สูงขึ้น และจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อแบตเตอรี่เข้าสู่สภาวะกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด ดังนั้นในการอัดประจुरูปแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

จึงต้องมีการควบคุมการอัดประจุกรณีเกิดกระแสไฟฟ้าสูงเกินพิกัด การเลือกระดับของกระแสไฟฟ้าอัดประจุนั้นเป็นการตัดสินใจที่สำคัญมากเพราะจะส่งผลไปยังอายุการใช้งาน ซึ่งแบตเตอรี่แต่ละชนิดก็จะมีขีดจำกัดของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในการอัดประจุอยู่ โดยทั่วไปทางผู้ผลิตจะต้องบอกกระแสไฟฟ้าในการอัดประจุสูงสุดไว้เพื่อใช้ในการออกแบบหรือเลือกกระแสไฟฟ้าอัดประจุ การใช้งานจริงนั้นก็จะมีทั้งแบบกระแสอัดประจุนั้นเดียวและแบบกระแสไฟฟ้าอัดประจุหลายระดับ ในแบบหลายระดับนั้นเริ่มแรกก็จะอัดประจุที่ค่ากระแสสูง เมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็มก็จะทำการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าอัดประจุให้อยู่ในระดับต่ำ



รูปที่ 2.5 คุณลักษณะของการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ [2]

2.3.3 การอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่

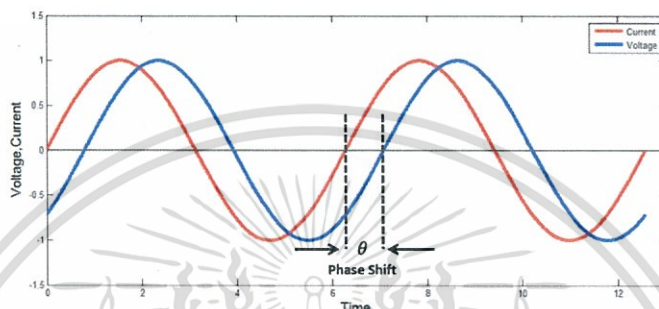
การอัดประจุด้วยวิธีนี้เป็นการผสมผสานการอัดประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ และแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่เข้าด้วยกัน โดยเกิดจากการนำข้อดีของการอัดประจุทั้ง 2 แบบ มารวมกัน โดยกระบวนการอัดประจุ จะแบ่งเป็น 2 ระยะ คือ

ระยะที่ 1: การอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าเต็มพิกัดจนเซลล์แบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าตามที่กำหนดไว้ ระยะนี้เหมือนเป็นการอัดประจุในอัตราเร่ง

ระยะที่ 2: การอัดประจุไฟฟ้าให้เซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ถึงระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ในระยะนี้กระแสไฟฟ้าของเครื่องอัดประจุที่เข้าเซลล์แบตเตอรี่จะลดลง และจะตัดการอัดประจุเมื่อกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 1% ของอัตรากระแสเฉลี่ย

2.4 การหาจรรยาสมมูลและวงจรรยาสมมูลแบบต่างๆ ด้วยการวิเคราะห์เชิงความถี่

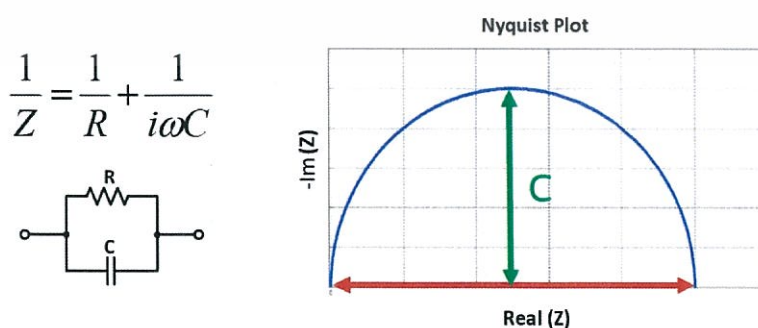
การหาจรรยาสมมูลของลิเทียมแบตเตอรี่จะใช้หลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์แบตเตอรี่ การหาค่าอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปวัดได้โดยใช้การกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปไซน์ (sine wave) ขนาดเล็กเพื่อดูผลตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ส่งออกมา จะได้รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสที่มีมุม Phase shift กัน ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแส [2]

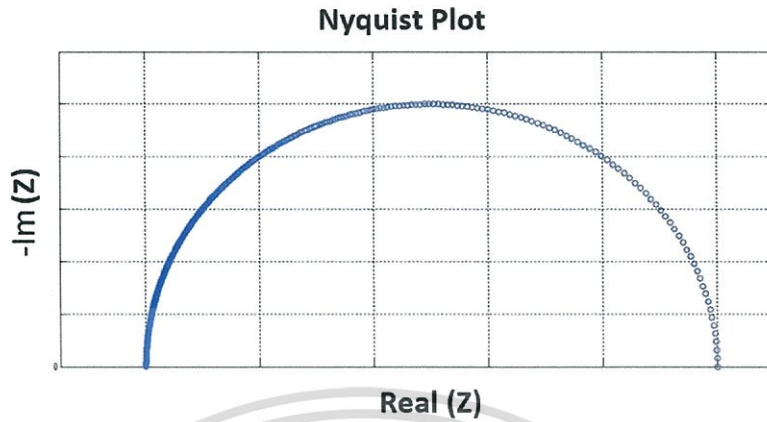
จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในแต่ละความถี่มาคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ และใช้มุมต่างเฟส (Phase shift) ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาใช้คำนวณร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อวาดแผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) ซึ่งแผนภาพดังกล่าวจะแสดงข้อมูลอิมพีแดนซ์ของแบตเตอรี่ ซึ่งจะอยู่ในรูปของส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยในแกน X จะแสดงค่าส่วนจริง และแกน Y จะแสดงค่าในจินตภาพ

แผนภาพไนควิสต์แสดงทั้งขนาดและมุมเฟส โดยที่ขนาดของอิมพีแดนซ์แสดงด้วยเวกเตอร์ขนาด $|Z|$ และมุมเฟส แผนภาพไนควิสต์มีข้อบกพร่องที่สำคัญคือ ไม่สามารถระบุค่าความถี่ที่ค่าอิมพีแดนซ์ใดๆ บนจุดข้อมูลได้ รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพไนควิสต์ของวงจรรยา RC ที่ต่อขนานกัน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 1 รูป แสดงถึงวงจรรยาที่มีค่าคงที่เวลา (time constant) ค่าเดียว รูปที่ 2.8- 2.10 แสดงตัวอย่างแผนภาพไนควิสต์ของวงจรรยาสมมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

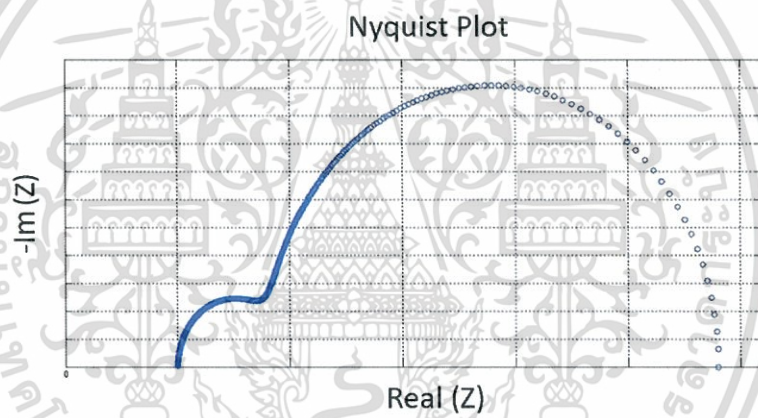


รูปที่ 2.7 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรรยา RC [2]

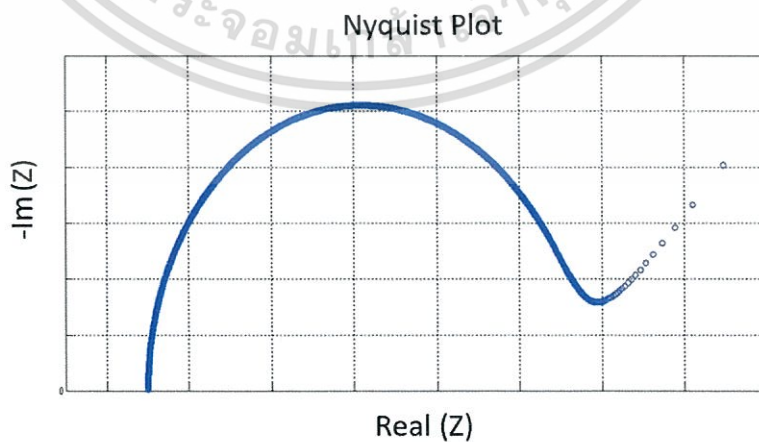
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ One-RC Branch [2]



รูปที่ 2.9 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch [2]



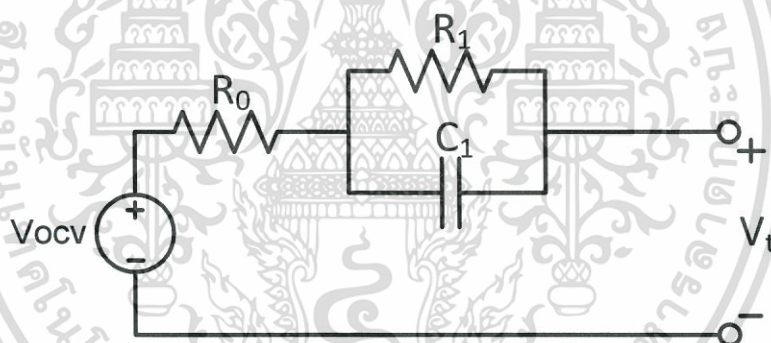
รูปที่ 2.10 แผนภาพไนควิสต์ของวงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

2.5.1 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch

วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบ One-RC Branch Equivalent เป็นวงจรสมมูลเป็น RC ขนานคู่เดียว ประกอบด้วย V_{ocv} คือแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่า SOC และอุณหภูมิ ความต้านทาน R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็น parameter ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C_1 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมในช่วงทรานเซียนต์ ซึ่งมีค่าคงที่เวลา (time constant) ในช่วง short-term โดยความต้านทาน R_1 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และตัวเก็บประจุ C_1 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่าง อิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์

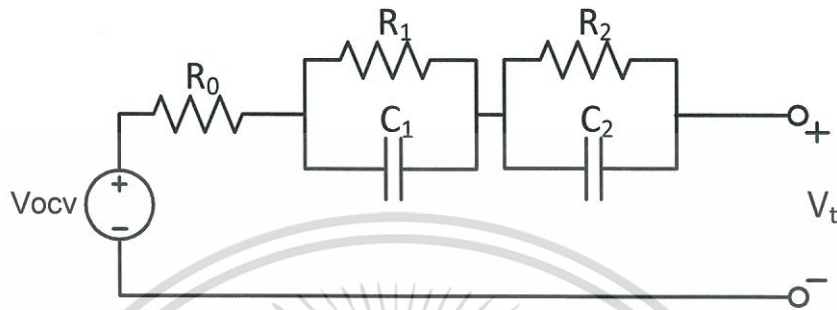


รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลแบบ One-RC Branch Equivalent [2]

2.5.2 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch

วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบ Two-RC Branch Equivalent เป็นวงจรสมมูลเป็น RC ขนานสองคู่ ประกอบด้วย V_{ocv} คือแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (Open Circuit Voltage) ความต้านทาน R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทาน R_1 และตัวเก็บประจุ C_1 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมของ Double-layer capacitance ในช่วงทรานเซียนต์ ซึ่งมีค่าคงที่เวลา (time constant) ในช่วง short-term ความต้านทาน R_2 และตัวเก็บประจุ C_2 เป็นค่าที่แสดงพฤติกรรมของ Diffusion process ในช่วง transient ซึ่งมีค่า time constant ในช่วง long-term ความต้านทาน R_1 และ R_2 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และตัวเก็บประจุ

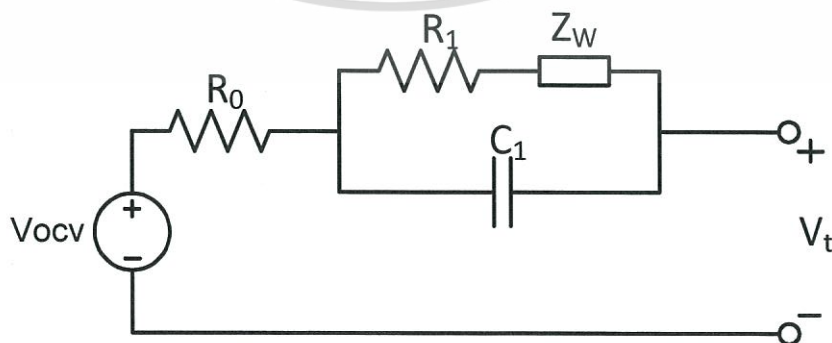
C_1 และ C_2 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลแบบ Two-RC Branch Equivalent [2]

2.5.3 วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance

วงจรสมมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนแบบ Finite Warburg Impedance Model เป็นวงจรสมมูลที่มีอิมพีแดนซ์ Z_w ต่ออนุกรมกับความต้านทาน R_1 วงจรสมมูลประกอบด้วย ความต้านทาน R_0 คือ Ohmic Resistance หรือ Electrolyte Resistance เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันตกอย่างทันทีทันใด ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมระหว่าง reference electrode และ working electrode ซึ่ง Ohmic Resistance จะขึ้นอยู่กับสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทาน R_1 คือ Polarization Resistance หรือ Charge transfer Resistance ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาถ่ายเทประจุระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ฝั่ง ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวเก็บประจุ C_1 คือ Double layer Capacitance ซึ่งคือตัวเก็บประจุที่อยู่ระหว่างอิเล็กโทรไลต์และอิเล็กโทรด โดยจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ชนิดของไอออน และชั้นของออกไซด์ ซึ่งจะสอดคล้องในย่านความถี่ปานกลาง อิมพีแดนซ์ Z_w คือ Warburg Resistance แสดงถึงการแพร่ของ Li-ion ระหว่างวัสดุที่ใช้งานกับอิเล็กโทรไลต์



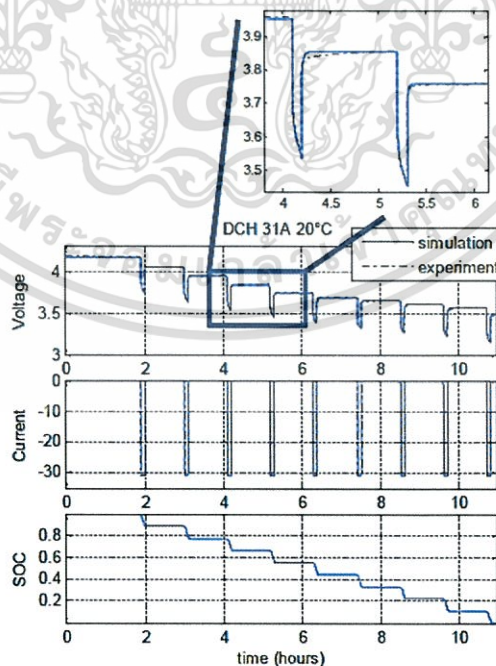
รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลแบบ Finite Warburg Impedance Model [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาวงจรมูลด้วยการวิเคราะห์เชิงเวลา

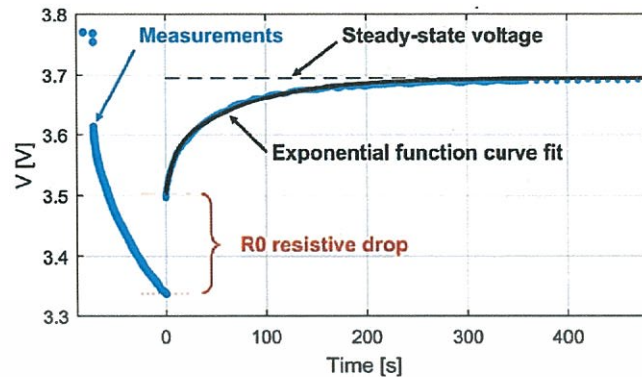
ในการหาค่าพารามิเตอร์ภายในวงจรมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น จะใช้วงจรมูลที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_{ocv} ความต้านทาน R_0 และความต้านทาน R_1 ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งจำนวน RC ที่ต่อขนานกัน 1 คู่ นั้นเพียงพอสำหรับการทำนายแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ขณะใช้งาน ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นจะทำการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ จากนั้นจะนำข้อมูลแรงดันไฟฟ้ามาวิเคราะห์เชิงเวลา (Time Domain Analysis) รูปที่ 2.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์

การทดสอบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ เริ่มจากการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่จนเต็ม จากนั้นจึงทำการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ โดยให้กระแสทดสอบคือกระแสที่พิกัดของแบตเตอรี่ ทั้งนี้จะมีช่วงพักระหว่างพัลส์ประมาณ 15 นาที เพื่อทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงพักจะนำมาใช้ในการทำนายค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ในการทดสอบจะใช้พัลส์จำนวน 10 ลูกคลื่น เพื่อทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% และ 100% รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงพัก ค่าความต้านทาน R_0 จะทำนายจากแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทันทีหลังจากเริ่มการอัดประจุไฟฟ้า ส่วนค่า R_1 และ C_1 จะทำนายจากช่วง Exponential function Curve fit โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ R_0 , R_1 และ C_1 ของแบตเตอรี่ลิเทียม คือ SOC และอุณหภูมิ



รูปที่ 2.14 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากวิธีการคายประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



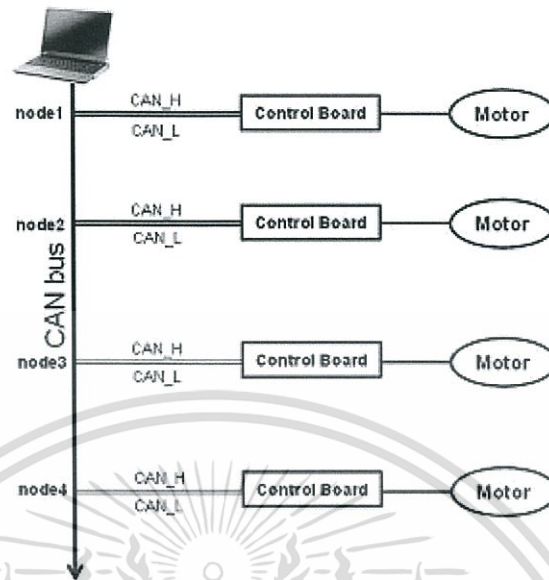
รูปที่ 2.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในช่วงพัก [3]

2.7 การสื่อสารแบบ CAN (Control Area Network: CAN Bus)

การสื่อสารแบบ CAN (Control Area Network) ถูกพัฒนาโดยบริษัท Bosch และได้รับมาตรฐาน ISO 11898 ในปี 1994 ระบบ CAN ถูกนำมาใช้ในการควบคุมและส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องยนต์ นอกจากนี้การสื่อสารแบบ CAN สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ช่วยควบคุมระบบเครือข่ายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมระบบบัส (System Bus) ที่อยู่ในเครื่องจักรและอาจมีการควบคุมการทำงานของ เซ็นเซอร์ (Sensor) หรืออุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มาตรฐานการสื่อสารแบบ CAN แบ่งตามจำนวนตัวระบุ (Identifier) ออกเป็น 2 แบบ นั่นคือ CAN 2.0A และ CAN 2.0B โดยที่ CAN 2.0A จะมีจำนวนตัวระบุ 11 บิต ซึ่งจะทำให้เกิดหรือคำสั่งที่แตกต่างกันได้ถึง 2048 ข้อความ ในส่วนของ CAN 2.0B จะมีจำนวนตัวระบุ 29 บิต ซึ่งจะทำให้เกิดหรือคำสั่งที่แตกต่างกันได้สูงสุดถึง 536 ล้านข้อความ ข้อความที่ส่งในการสื่อสารแบบ CAN (Message Type) แบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

- Data Frame: เป็นข้อมูลที่ส่งจากโหนดส่งไปยังโหนดอื่นๆ
- Remote Frame: เป็นการส่งข้อมูลจากโหนดส่งเพื่อร้องขอรับข้อมูลจากโหนดส่งที่เฉพาะเจาะจง
- Error Frame: เป็นข้อความที่ส่งจากโหนดใดๆ เพื่อรายงานความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
- Overload Frame: เป็นการรายงานความล่าช้าระหว่างข้อมูลและ Remote Frame

การสื่อสารแบบ CAN เป็นการสื่อสารแบบอนุกรม ที่มีตัวควบคุมหลักได้มากกว่าหนึ่งตัว (Multi-master) ในกรณีที่มีตัวควบคุมหลักมากกว่าหนึ่งตัว แต่ละตัวจะมีสิทธิเท่าเทียมกันและจะมีหน้าที่การทำงานเหมือนกัน มีตัวรับข้อมูลได้หลายตัว (Multicast) ข้อดีที่สำคัญของการใช้การสื่อสารแบบ CAN แบบตัวควบคุมหลักหลายตัว (Multi-Master) คือ ตัวควบคุมหลักแต่ละตัวจะสามารถทำงานและควบคุมได้ด้วยตัวของมันเอง และสามารถส่งข้อความหรือรับการร้องขอได้ การที่ใช้การสื่อสารแบบ CAN แบบ Multi-Master มีข้อดีต่อระบบเครือข่ายคือในกรณีที่เกิดข้อผิดพลาด (Error) ที่ตัวควบคุมหลักจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเครือข่ายและจะไม่ทำให้ระบบบัส (System Bus) ล้มเหลวหรือทำงานไม่ได้



รูปที่ 2.16 การเชื่อมต่อระบบด้วยการสื่อสารแบบ CAN [4]

2.7.1 หลักการทำงานของ CAN

ข้อมูลจะส่งออกมาจากทุกโหนดบนการสื่อสารแบบ CAN และจะไม่มีที่อยู่ตำแหน่ง (address) ทั้งโหนดส่งและโหนดรับ รายละเอียดของข้อความจะถูกกำหนดโดยตัวระบุ (Identifier) ที่มีลักษณะเฉพาะตัวในเครือข่าย ทุกๆ โหนดบนเครือข่ายจะรับข้อความและคำสั่งการทำงานโดยดูจากตัวระบุ และแต่ละโหนดจะตัดสินใจว่าจะรับข้อความมาประมวลผลหรือไม่ โดยดูจากตัวระบุ ถ้าข้อความนั้นตรงกับสิ่งที่โหนดนั้นๆ ต้องการมันจะรับข้อความนั้นมาประมวลผล ถ้าไม่ใช่มันก็จะหลีกเลี่ยงโดยการไม่รับข้อความนั้นมา และถ้ามีหลายๆคำสั่งเข้ามาพร้อมๆ กันมันจะตัดสินใจในการรับข้อความที่เข้ามาโดยการดูว่ามาก่อนหรือหลัง ในบางสถานการณ์ที่มีโหนดมากกว่าสองโหนดที่พยายามจะส่งข้อมูลในเวลาเดียวกัน การสื่อสารแบบ CAN ก็จะมีเทคนิคในการจัดการข้อมูล โดยมีการให้ลำดับก่อน-หลังอย่างชัดเจนซึ่งรับประกันได้ว่าไม่มีข้อมูลใดสูญหายขณะที่ส่งพร้อมกันในเวลาเดียวกัน

2.7.2 ข้อดีของระบบการสื่อสารแบบ CAN

- มีความเร็วในการสื่อสารข้อมูลทำให้การตอบสนองของแต่ละโมดูลมีประสิทธิภาพ สามารถจัดการกับอัตราการขนถ่ายข้อมูลได้สูงสุดถึง 1 เมกะไบต์ต่อวินาที
- สามารถควบคุมอุปกรณ์ต่างๆแบบทันทีทันใด (Real Time)
- รองรับวีดิโอสตรีมมิง (Video Streaming)
- สามารถใส่โมดูลต่างๆ เข้าไปได้มาก
- มีความสามารถในการตรวจจับข้อผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- มีสายไฟน้อยกว่า เพราะใช้ระบบสายเคเบิลเครือข่าย (Network Cable)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 ความเสถียรภาพในการทำงาน

CAN (Control Area Network) สามารถที่จะจัดการกับข้อมูลที่ส่งหรือรับในสถานะที่สภาวะแวดล้อมไม่ปกติและมีการขยายการตรวจจับข้อผิดพลาด เพื่อให้แน่ใจว่า การสื่อสารข้อมูลนั้นๆ เสร็จสิ้นสมบูรณ์ ค่าความผิดพลาด (Error) ถูกตรวจพบ ตามมาตรฐาน ISO 11898 ได้กล่าวสนับสนุนว่า Control Area Network (CAN) ยังคงทำงานอยู่ได้เมื่อเกิดเหตุการณ์เหล่านี้คือ สายสื่อสารระหว่างกันมีปัญหาเกิดการเสียหาย สายสื่อสารมีการช็อตกับไฟชั้วบวกรหรือสายสื่อสารมีการช็อตกันกับไฟชั้วลบ

2.8 การสื่อสารอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนับว่ามีความสำคัญต่อการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์มาก เพราะสามารถใช้แป้นพิมพ์และจอภาพของ PC เป็นอินพุตและเอาต์พุตในการติดต่อหรือควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยสัญญาณอย่างน้อยเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ สายส่งสัญญาณ TX, สายรับสัญญาณ RX และสาย GND อัตราการส่งข้อมูล (Baud rate) หรือความเร็วของการรับส่งข้อมูล เป็นจำนวนบิตต่อวินาทีเช่น 300, 1,200, 2,400, 4,800, 9,600, 14,400, 19,200, 38,400, 56,000 เป็นต้น การเลือกอัตราการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับชนิดของสายสัญญาณ, ระยะทาง, และปริมาณสัญญาณรบกวน รูปแบบการสื่อสารแบบอนุกรมมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือแบบซิงโครนัส (Synchronous) และแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) การสื่อสารแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกาเป็นตัวกำหนดจังหวะเวลาการส่งข้อมูลร่วมอยู่ด้วยอีกเส้นหนึ่ง ใช้คู่กับสัญญาณข้อมูล ตัวอย่างเช่น การส่งสัญญาณจากคีย์บอร์ด เป็นต้น การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) เป็นการรับส่งข้อมูล โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมด้วย แต่จะใช้ให้ตัวส่งและตัวรับมีอัตราส่งข้อมูลที่เท่ากัน

RS-232 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน (Common Mode) สัญญาณรับส่งแบบคอมมอนนั้นจะใช้สัญญาณกราวด์ (Ground Signal) เป็นตัวเปรียบเทียบ ปัญหาจะเกิดขึ้นเมื่อระดับสัญญาณกราวด์ของตัวรับและตัวส่งไม่เท่ากัน ยิ่งระดับสัญญาณแตกต่างกันมากเท่าไร ก็ยิ่งมีผลต่อความผิดพลาดในการสื่อสารมากขึ้นเท่านั้น เพราะการตีความข้อมูลที่รับเข้ามาว่าเป็นศูนย์หรือหนึ่งจะดูจากระดับความแตกต่างระหว่างสัญญาณกราวด์กับสัญญาณข้อมูลที่รับเข้ามา และยิ่งเมื่อมีสัญญาณรบกวน สอดแทรกเข้ามาในสายสัญญาณมากเท่าไร ก็ยิ่งทำให้การตีความสัญญาณมีโอกาสผิดพลาดสูงมากยิ่งขึ้น หรือหมายถึงระดับความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลจะสูงขึ้นจนไม่สามารถสื่อสารกันได้ หรือต้องลดระดับความเร็วในการสื่อสารลงมา

RS-485 เป็นหนึ่งในมาตรฐานการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ที่ถูกกำหนดขึ้นมาโดยกลุ่มพันธมิตรอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Electronic Industries Alliance (EIA)) เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งานที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายๆ ตัวบนขั้วสายเดียวกัน โดยมีระยะทางการสื่อสารที่ไกลขึ้น และมีความเร็วรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับมาตรฐานการสื่อสาร RS-232 เหตุผลที่การสื่อสาร แบบ RS-485 สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้น เพราะ RS-485 ใช้เทคนิคสัญญาณรับส่งแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Mode) จะไม่ใช้สัญญาณกราวด์เป็นระดับอ้างอิงหรือเปรียบเทียบ แต่จะดูที่ความต่างของสัญญาณของคู่สายเป็นสำคัญ ทำให้ปัญหาเรื่องความแตกต่างของสัญญาณกราวด์ระหว่างอุปกรณ์รับและอุปกรณ์ส่งหมดไป เพราะไม่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้อ้างอิง และถ้าหากคู่สายที่ใช้รับส่งสัญญาณพันกันเป็นเกลียวก็จะมีส่งผลให้สัญญาณรบกวนจากภายนอกที่สอดแทรกเข้ามาในคู่สายก็จะถูกกำจัดออกไปได้โดยง่าย ทำให้การสื่อสารแบบ RS-485 ทนต่อสัญญาณรบกวนภายนอกได้สูง สามารถรับส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นและเร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคสัญญาณรับส่งแบบคอมมอน

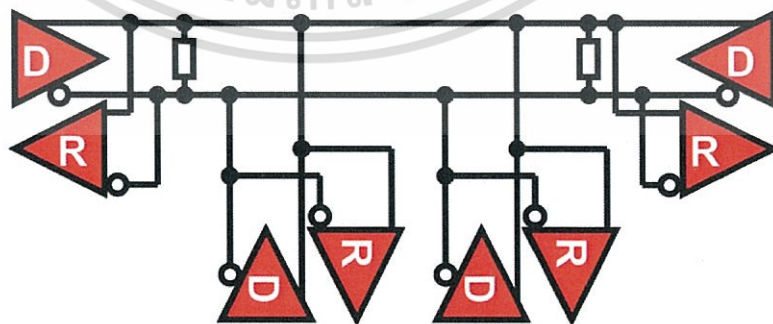
การสื่อสารแบบ RS-232 เป็นการเชื่อมต่อเป็นจุดต่อจุด (Point to point) ซึ่งจะต่ออุปกรณ์ส่งกับตัวรับข้อมูลเพียงชุดเดียวดังรูปที่ 2.17 แต่การสื่อสารแบบ RS-485 มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบหลายจุด (Multi-point) หรือ Multi-drop ดังรูปที่ 2.18 การต่อแบบหลายจุดนี้ทำให้สามารถมองสายสัญญาณเป็นบัสนำสัญญาณได้ (Signal Bus) จำนวนคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่สามารถอยู่บน RS-485 บัสหนึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 32 อุปกรณ์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มจะต้องมีตัวทวนสัญญาณ (Signal Repeater) หรือใช้ตัวส่ง-รับสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ซึ่งเราอาจเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อขึ้นได้ถึง 128 จุด ความยาวของสายสัญญาณตามมาตรฐาน RS-485 นี้สามารถยาวได้ถึง 1.2 กิโลเมตร การสื่อสารจะเป็นแบบสองทางไม่พร้อมกัน (Half Duplex) คือการส่งข้อมูลและรับข้อมูลแบบสลับกัน เมื่อด้านหนึ่งส่งข้อมูล อีกด้านหนึ่งเป็นตัวรับข้อมูล ไม่สามารถรับส่งในเวลาเดียวกันได้

Point-to-Point



รูปที่ 2.17 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-232 [5]

Multi-point



รูปที่ 2.18 การเชื่อมต่ออุปกรณ์สื่อสาร RS-485 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 บทสรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 2 นี้ ได้กล่าวถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้ในการวิจัย ประเภทของการอัดประจุแบตเตอรี่ที่แบ่งออกเป็น การอัดประจุด้วยแรงดันคงที่ (Constant Voltage Charging) การอัดประจุด้วยกระแสคงที่ (Constant Current Charging) และการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current –Constant Voltage Charging) ซึ่งเป็นแนวทางในการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่ อีกทั้งยังได้ศึกษาประเภทของการสื่อสารแบบต่างๆ ทั้งที่ใช้ภายในแบตเตอรี่ และใช้ส่งข้อมูลมาแสดงผลที่คอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาออกแบบวิธีการทดสอบซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุณหพลศาสตร์

3.1 บทนำ

บทนี้เป็นการศึกษาถึงทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ซึ่งเป็นสมบัติของสสารที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการเปลี่ยนรูปของพลังงานความร้อน โดยได้กล่าวถึงกฎของอุณหพลศาสตร์ในด้านสถานะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ และการอนุรักษ์พลังงานของระบบ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ถ่ายเทพลังงานความร้อน นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่สำคัญในการคำนวณการถ่ายเทความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า สุดท้ายนี้ได้กล่าวถึงการคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน โดยพารามิเตอร์นี้จะใช้ในการวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ในบทต่อไป

3.2 อุณหพลศาสตร์

อุณหพลศาสตร์เป็นแขนงทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของสสารที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการเปลี่ยนรูปของพลังงานความร้อนเป็นพลังงานรูปอื่นๆ เช่น พลังงานเคมี พลังงานกล พลังงานไฟฟ้า อุณหพลศาสตร์เป็นการศึกษาทางเคมีเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน เมื่อทำให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนแปลง อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีดังกล่าวจะทำให้พลังงานเปลี่ยนแปลงไป การติดตามการเปลี่ยนแปลงพลังงานสามารถใช้ทำนายทิศทางการเกิดปฏิกิริยาได้ และวิธีการทำนายทิศทางการเกิดปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยใช้กฎของอุณหพลศาสตร์

3.3 กฎของอุณหพลศาสตร์

3.3.1 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์กล่าวถึงสถานะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ โดยสามารถสรุปได้ว่า ถ้าระบบ A และ B อยู่ในภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ และระบบ B และ C อยู่ในภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์แล้ว ระบบ A และ C จะอยู่ในภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ด้วย กล่าวโดยสรุปก็คือภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์มีคุณสมบัติถ่ายทอดได้

กฎข้อนี้เป็นกฎที่ได้จากการทดลองและเป็นหลักการในการวัดอุณหภูมิของวัตถุต่างๆ ด้วยเครื่องมือวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมมิเตอร์ โดยการแทนวัตถุชิ้นที่สามเป็นเทอร์โมมิเตอร์ โดยเมื่อเทอร์โมมิเตอร์วัดระดับอุณหภูมิของวัตถุสองชิ้นนั้นแล้วพบว่าว่ามีค่าเท่ากัน จากหลักการในข้อที่ศูนย์ของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถระบุได้ว่าวัตถุสองชิ้นอยู่ในสมดุลความร้อนต่อกันได้ แม้ว่าวัตถุสองชิ้นนั้นจะไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง

3.3.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์มีพื้นฐานมาจากการอนุรักษ์พลังงาน กล่าวคือ พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ พลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ ปริมาณพลังงานความร้อนที่นำเข้าสู่ระบบ ลบด้วยพลังงานที่สูญเสียไปเป็นงานของระบบที่กระทำต่อ สิ่งแวดล้อม กล่าวคือ พลังงานในระบบอุณหพลศาสตร์หนึ่งๆ จะมีค่ารวมเท่าเดิมเสมอ ความร้อนที่เกิดขึ้น คือกระบวนการนำพลังงานเข้าสู่ระบบจากแหล่งอุณหภูมิสูง หรือสูญเสียออกจากระบบโดยส่งออกไปยัง แหล่งอุณหภูมิต่ำ กฎข้อที่หนึ่งกล่าวถึงพลังงานเหล่านี้ว่ามีผลรวมคงที่ นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของ พลังงานภายใน ย่อมจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่นำเข้าสู่ระบบ ลบด้วยปริมาณความร้อนที่สูญเสียออก จากระบบ ดังสมการที่ 3.1 ถ้าระบบได้รับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม Q จะมีเครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้า ระบบสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม Q จะมีเครื่องหมายเป็นลบ และถ้าระบบได้รับงานจาก สิ่งแวดล้อม W จะมีเครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าระบบสูญเสียงานให้กับสิ่งแวดล้อม W จะมีเครื่องหมาย เป็นลบ

$$dU = Q + W \quad (3.1)$$

โดยที่ dU คือปริมาณการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ

Q คือความร้อนที่เกิดขึ้น

W คืองานที่เกิดขึ้น

3.3.3 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์กล่าวถึงความเกี่ยวข้องระหว่างเอนโทรปีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ เอง โดยกล่าวไว้ว่า เอนโทรปีของจักรวาลมีค่าเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองและมีค่าคงที่ใน กระบวนการที่อยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งจักรวาลหมายถึงผลรวมระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

3.3.4 กฎข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่สามของอุณหพลศาสตร์กล่าวถึงเอนโทรปีและความเป็นไปได้ของสภาวะศูนย์องศา สัมบูรณ์ ความว่า เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะศูนย์องศาสัมบูรณ์ กระบวนการทั้งหมดจะหยุดนิ่ง และค่าเอนโทรปีของระบบจะมีค่าต่ำที่สุด กฎข้อที่สามนี้พัฒนาขึ้นโดย วอลเตอร์ แนนสต์ (Walther Nernst) นักฟิสิกส์ ชาวเยอรมัน เขากล่าวว่าค่าเอนโทรปีของระบบที่ศูนย์องศาสัมบูรณ์จะเป็นค่าคงที่ เนื่องจากระบบที่ศูนย์ องศาสัมบูรณ์เป็นระบบที่ ground state หรือกล่าวได้ว่าไม่มีกระบวนการใดที่สามารถลดพลังงานของ ระบบลงจนถึงศูนย์องศาสัมบูรณ์ได้

3.4 พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์

- ระบบ (System) คือสิ่งที่กำลังศึกษาอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดขึ้น จึงเป็นส่วนหนึ่งของจักรวาล หรือเอกภพ

- สิ่งแวดล้อม (Surrounding) เป็นส่วนที่เหลือของจักรวาลที่อยู่รอบระบบ นั่นก็คือส่วนนอกของระบบ โดยอาจมีผลต่อระบบหรือไม่ก็ได้
- อุณหภูมิ (Temperature: T) เป็นค่าที่บ่งถึงระดับความร้อนของสสาร พลังงานความร้อนถ่ายเทจากอุณหภูมิสูงไปต่ำเสมอ ในการคำนวณทางอุณหพลศาสตร์จะใช้หน่วย Kelvin, K เสมอ อุณหภูมินี้มีหน่วยวัด
- ความร้อน (Heat: Q) คือพลังงานรูปแบบหนึ่งที่ถ่ายเทระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมหรือระหว่างจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของระบบ โดยเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยเราให้เครื่องหมายเป็นบวกถ้าความร้อนถ่ายเทจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ และให้เครื่องหมายเป็นลบถ้าความร้อนถ่ายเทจากระบบไปยังสิ่งแวดล้อม รูปที่ 3.1 แสดงเตาอบที่มีวัตถุทรงกระบอกอยู่ข้างใน อุณหภูมิบรรยากาศในเตาสูงกว่าทรงกระบอกทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำเสมอ ดังนั้นถ้าพิจารณาให้ทรงกระบอกเป็นระบบ ความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ระบบ ดังนั้น Q เป็นบวก

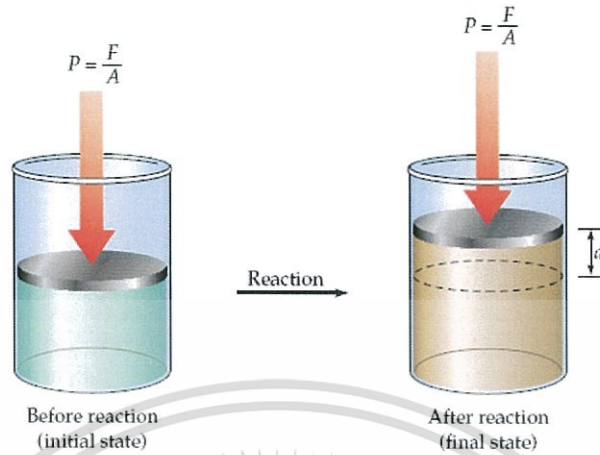


รูปที่ 3.1 การถ่ายเทความร้อนจากที่อุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ [6]

- งาน (Work: W) คือพลังงานรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถถ่ายเทหรือแลกเปลี่ยนระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อม เช่น งานทางกล งานทางไฟฟ้า เป็นต้น โดยให้เป็นเครื่องหมายบวกถ้าสิ่งแวดล้อมทำงานกับระบบ และให้เป็นเครื่องหมายลบถ้าระบบทำงานให้กับสิ่งแวดล้อมดังตัวอย่างในรูปที่ 3.2 แสดงงานที่เกิดจากการขยายตัวของอากาศภายในกระบอกสูบ ในทางอุณหพลศาสตร์เราจะพิจารณาเฉพาะงานทางกล สำหรับงานทางกลขนาดเล็กๆ ΔW ที่ระบบกระทำหรือถูกกระทำนั้นก็คือ แรงกระทำคูณกับระยะทาง ดังสมการที่ 3.2

$$\Delta W = Fdl \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 งานที่เกิดจากการขยายตัวของอากาศในกระบอกสูบ [6]

- พลังงานภายใน (Internal Energy: U) พลังงานภายในซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของสสารในระบบ เช่น ชนิด ส่วนผสม และตัวแปรแวดล้อมอื่นๆ
- พลังงานศักย์ (Potential Energy) ซึ่งคือผลรวมของแรงโน้มถ่วง แรงหนีศูนย์กลาง ศักย์ไฟฟ้า ศักย์แม่เหล็ก ที่กระทำต่อระบบ ค่าของพลังงานศักย์ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่เราเลือกให้เป็นศูนย์
- พลังงานจลน์ (Kinetics Energy) พลังงานของระบบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่สุทธิตั้งขึ้นภายในระบบ
- ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat; s) คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้สาร 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C มีหน่วยเป็น $\text{J/g}^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ไม่ขึ้นกับขนาดของระบบ
- ความจุความร้อน (heat capacity; C) คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้สารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C มีหน่วยเป็น $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนจำเพาะกับความจุความร้อนมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = ms \quad (3.3)$$

เราสามารถหาปริมาณความร้อนได้ว่าเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อนได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 3.4 เครื่องหมายของ Q เหมือนกับการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี ซึ่งหากมีค่าเป็นบวกจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและ Q มีค่าเป็นลบจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือความจุความร้อนของวัสดุภายใต้ความดันคงที่ (C_p) และความจุความร้อนของวัสดุภายใต้ปริมาตรคงที่ (C_v) ส่วนใหญ่ลักษณะของระบบที่เราศึกษาในทางโลหวิทยาและวัสดุศาสตร์นั้นอยู่ในสภาวะที่เราจะเลือกใช้ความจุความร้อนของวัสดุภายใต้ความดันคงที่ (C_p)

$$Q = ms\Delta t \quad (3.4)$$

$$Q = C\Delta t \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เอนทาลปี (Enthalpy: H) คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการที่ความดันคงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.6

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (3.6)$$

- เอนโทรปี (Entropy: S) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งทางอุณหพลศาสตร์เป็นตัวบ่งชี้ความไม่มีระเบียบของโมเลกุล การนำความร้อนไปทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งภายใต้อุณหภูมิกงที่หนึ่งๆ ซึ่งเห็นได้จากของแข็งจะมีค่าเอนโทรปีน้อยที่สุด และก๊าซจะมีค่าเอนโทรปีมากที่สุด ยิ่งระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูง เอนโทรปีก็จะยิ่งมีค่าสูง แต่ถ้าระบบมีความไม่เป็นระเบียบน้อย เอนโทรปีก็จะยิ่งมีค่าต่ำ

3.5 คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิต

ในการใช้งานวัสดุมักจะมีพลังงานความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเสมอ พลังงานความร้อนนี้อาจจะมาจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบๆ หรืออาจเกิดจากการทำงานของมันเองก็ได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานวัสดุที่ต้องใช้ความร้อนมาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ลูกรีดที่ใช้ในการรีดเหล็ก, เครื่องยนต์ ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูง พลังงานความร้อนนี้จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุเปลี่ยนไป ดังนั้นเราจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติด้านความร้อนของวัสดุ เพื่อช่วยในการเลือกใช้วัสดุได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

3.5.1 ความทนความร้อน (Heat Resistance)

ความทนความร้อนหมายถึงความสามารถของวัสดุที่จะคงสภาพและคุณสมบัติเดิมไว้เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเรียกว่า Transformation Temperature Point ในพวกโลหะอุณหภูมิหรือจุดเหล่านี้มีความสำคัญมาก เพราะเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ เช่น ความแข็ง สภาพการเป็นแม่เหล็ก เป็นต้น สิ่งที่สำคัญสำหรับการนำวัสดุมาใช้งานคือ อุณหภูมิที่จะใช้งานต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวหรือจุดอ่อนตัว (Softening Point) ของวัสดุที่จะนำมาใช้งาน ในกรณีของวัสดุที่มีการจัดเรียงอะตอมเป็นโครงสร้างผลึกที่แน่นอน (Crystalline Materials) จะมีจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน เพราะจะมีการหลอมตัวเกิดขึ้น แต่ในพวกพอลิเมอร์จะไม่เป็นเช่นนั้น มันจะเกิดการอ่อนตัวขึ้นก่อน (Softening) ซึ่งช่วงอุณหภูมิในการอ่อนตัวจะกว้างมาก และบางกรณีอาจจะเปลี่ยนสภาพ (Decompose) ไปก่อนที่จะละลายเสียอีก จุดอ่อนตัวของพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก จะเป็นจุดสูงสุดที่มันจะใช้งานได้ และใช้เป็นจุดบอกความทนความร้อนของมันว่ามีมากน้อยเพียงใด ส่วนกรณีของโลหะเราจะใช้จุดทรานซิชัน (Transition Point) คือจุดที่สารสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่งได้ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันค่าหนึ่ง ดังนั้นความทนความร้อนของวัสดุก็จะหมายถึงความทนทานของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยไม่ทำให้สภาพภายนอกและภายในเปลี่ยนไปเกินกว่าจะใช้งานได้

3.5.2 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

ค่าการนำความร้อนคือค่าที่แสดงการส่งผ่านหรือการไหลผ่านของความร้อนในวัสดุ ปกติความร้อนจะไหลผ่านวัสดุจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปหาจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนในของแข็งจะ

เกิดขึ้นโดยกลไกที่เรียกว่า การนำความร้อน (Conduction) วัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการนำความร้อนได้แตกต่างกัน คุณสมบัติที่เป็นตัววัดความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity: K) ซึ่งกำหนดไว้จากกฎการนำความร้อนของ Fourier ซึ่งกล่าวไว้ว่า อัตราการส่งผ่านพลังงานความร้อนผ่านตัวกลาง (กรณีที่วัสดุเป็นของแข็ง) จะแปรผันตรงกับค่าความชันของอุณหภูมิ (Thermal Gradient) หรืออัตราผลต่างของอุณหภูมิต่อระยะทางหนึ่งหน่วยในทิศทางของการส่งผ่านพลังงานนั้น โดยสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะเปลี่ยนไปตามชนิดของวัสดุและอุณหภูมิ วัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี (สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง) จะสามารถลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุเองได้เร็วกว่าวัสดุที่มีความสามารถในการนำความร้อนต่ำ การเลือกใช้วัสดุเราจะต้องคำนึงถึงการใช้งาน ถ้าต้องใช้ในระบบระบายความร้อนของเครื่องจักร เราจะเลือกใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง ส่วนกรณีที่ใช้นวนความร้อนเพื่อจะเก็บรักษาอุณหภูมิ เราจะเลือกใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ได้แก่ พวกที่มีเนื้อเป็นรูพรุน เพราะอากาศเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี เช่น พวกเซรามิค

3.5.3 ความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress)

ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถทำให้ขนาดของวัตถุเปลี่ยนไป ซึ่งโดยปกติแล้วถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้วัตถุมีความยาวเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจะส่งผลให้ขนาดของวัตถุลดลงตามไปด้วย ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่จะเป็นเชิงเส้นในกรณีที่วัตถุมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งวัตถุ ถึงแม้ว่าการหดตัวจากความร้อนนี้จะมีไม่มากนัก แต่มันก็ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในวัสดุได้ และถ้าความเค้นนี้มีมากพอก็อาจทำให้เกิดความเสียหายได้โดยเฉพาะกับวัสดุที่เปราะ ซึ่งไม่สามารถปรับตัวไปตามความเค้นทางความร้อน เราใช้สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Thermal Expansion Coefficient) เป็นตัวบอกว่าวัสดุจะขยายตัวมากน้อยเพียงใด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่านี้จะเท่ากับความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเริ่มต้นต่อองศาอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนนี้จะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ และโดยปกติสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับค่าความจุความร้อนจำเพาะและจุดหลอมเหลวของวัสดุด้วย โดยทั่วไปวัสดุประเภทพลาสติกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูงกว่าของโลหะมาก

3.6 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน การถ่ายเทของพลังงานเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลทางความร้อน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ โดยเมื่อความร้อนถ่ายเทจากจุดจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะทำให้จุดที่ได้รับความร้อนซึ่งมีสารอยู่จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตัวอย่างการถ่ายเทความร้อนเช่น เมื่อเราเอามือเราไปจับน้ำแข็งซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่ามือเรารู้สึกเย็น ที่เป็นอย่างนี้เพราะร่างกายสูญเสียความร้อนไปให้น้ำแข็งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เรารู้สึกเย็น วิธีการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 วิธีคือ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) การพาความร้อน (Convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การถ่ายเทความร้อนมักจะไม่เป็นวิธีหนึ่งวิธีใดโดยเฉพาะ แต่จะเป็นรูปแบบผสมของวิธีการดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อน คือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนชั้นอะตอมของอนุภาค เป็นหนึ่งในกระบวนการถ่ายเทความร้อนในโลหะ การนำความร้อนเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ กล่าวคือการนำความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านโดยตรงจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งโดยการสัมผัสกัน เช่น การเอามือไปจับกาน้ำร้อน จะทำให้ความร้อนจากกาน้ำถ่ายเทไปยังมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน เป็นต้น รูปที่ 3.3 แสดงการนำความร้อนผ่านวัตถุที่มีความหนา L โดย T_1 เป็นอุณหภูมิฝั่งแหล่งความร้อน และ T_2 เป็นอุณหภูมิของวัตถุที่ระยะ L วัตถุใดจะนำความร้อนดีหรือไม่ดี ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) พลังงานจากการนำความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$Q_{\text{cond}} = \frac{kA\Delta T}{L} \quad (3.7)$$

$$Q_{\text{cond}} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (3.8)$$

โดยที่ความต้านทานทางความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.9 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าพลังงานความร้อนจากการนำความร้อนจากความต้านทานทางความร้อนจากสมการที่ 3.10

$$R = \frac{L}{kA} \quad (3.9)$$

$$Q_{\text{cond}} = \frac{(T_2 - T_1)}{R} \quad (3.10)$$

เมื่อ Q_{cond} คือพลังงานความร้อนจากการนำความร้อน (J)

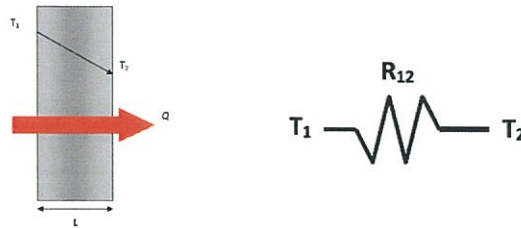
k คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)

ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกวัตถุ ($^\circ\text{C}$)

A คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

L คือความหนาของวัตถุ (m)

R คือความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance) ($^\circ\text{C/W}$)



รูปที่ 3.3 การนำความร้อนผ่านวัตถุ [6]

3.6.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อน (Heat convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นโดยมีตัวกลางนั้นคือของเหลวและก๊าซ เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจากเมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า มีความหนาแน่นสูงกว่าก็จะลงมาแทนที่ การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. การพาความร้อนแบบธรรมชาติหรือแบบอิสระ (Natural or Free Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆ ทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่เกิดจากแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหลเนื่องจากอุณหภูมิต่างกัน

2. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) คือการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบลม เป็นต้น พลังงานจากการพาความร้อนแสดงดังสมการที่ 3.11

$$Q_{\text{conv}} = h_c A \Delta T \quad (3.11)$$

$$Q_{\text{conv}} = h_c A (T_2 - T_1) \quad (3.12)$$

โดยที่ความต้านทานทางความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.13 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าพลังงานความร้อนจากการพาความร้อนจากความต้านทานทางความร้อนจากสมการที่ 3.14

$$R = \frac{1}{h_c A} \quad (3.13)$$

$$Q_{\text{conv}} = \frac{(T_2 - T_1)}{R} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q_{conv} คือพลังงานความร้อนจากการพาความร้อน (J)

h_c คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2\text{°C}$)

ΔT คือความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุกับอากาศ (°C)

A คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

R คือความต้านทานทางความร้อน (Thermal resistance) (°C/W)

3.6.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวทุกทิศทุกทาง อาศัยคลื่นความร้อนการแผ่รังสีความร้อนจะเกิดในปริมาณที่เท่ากันในทุกทิศทาง โดยมีต้องอาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายพลังงาน การแผ่รังสีสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีคลื่นสั้น วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำแผ่รังสีคลื่นยาว ทั้งนี้ เช่น ความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ถือเป็นความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี อัตราในการแผ่รังสีความร้อน ที่มีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ปริมาณอุณหภูมิที่แผ่ร่ออกจากแหล่งกำเนิด

3.7 บทสรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ซึ่งเป็นสมบัติของสสารที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการเปลี่ยนรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งประกอบด้วยกฎอุณหพลศาสตร์จำนวน 4 ข้อ โดยจะนำกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ 1 ด้านการอนุรักษ์พลังงานของระบบมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการคำนวณการถ่ายเทความร้อน ทั้งการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน และการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า สุดท้ายนี้ได้กล่าวถึงการคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน โดยจะนำไปวิเคราะห์ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ต่อไป

บทที่ 4

การออกแบบการทดลอง

4.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้งานแบตเตอรี่อย่างแพร่หลาย นับได้ว่าแบตเตอรี่ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก แต่แบตเตอรี่ยังมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นในการใช้งานแบตเตอรี่เราควรที่จะมีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้อยู่ในพิสัยที่คู่มือกำหนด เพื่อรักษาคุณภาพและช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ การใช้งานแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิหลังจากใช้งานแบตเตอรี่แล้ว สามารถนำมาอัดประจุไฟฟ้าเพื่อนำแบตเตอรี่กลับมาใช้อีกครั้ง ในการอัดประจุแบตเตอรี่นั้น หากอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงเกินขอบเขตที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด จะส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น วิธีหนึ่งที่จะช่วยตรวจสอบอุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะอัดประจุไฟฟ้านั้น สามารถทำได้โดยการศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบการทดลองที่จะนำไปสู่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบตเตอรี่

4.2 แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลอง

แบตเตอรี่ลิเทียมเป็นที่นิยมในการนำมาใช้เป็นแหล่งเก็บพลังงานไฟฟ้าทั้งในพลังงานทดแทนและรถยนต์ไฟฟ้า เพราะสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีในแบตเตอรี่เป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งไม่ปล่อยสารพิษหรือแก๊สมันตรึงสีใดๆ ออกมาทำลายสิ่งแวดล้อม ความพิเศษของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ดีกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นคือ สะสมพลังงานได้มากกว่า และอายุการใช้งานนานกว่า เพราะแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่องและมีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับทุกอุปกรณ์ ซึ่งถือว่าเป็นนวัตกรรมพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สำคัญในการสร้างระบบจัดเก็บพลังงาน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้า 27.6 โวลต์ และความจุไฟฟ้า 40Ah ความจุพลังงาน 1104 Wh ช่วงแรงดันไฟฟ้าในการใช้งานอยู่ระหว่าง 18-32.4 โวลต์ ทั้งนี้บริษัทผู้ผลิตได้กำหนดในช่วงอุณหภูมิในการใช้งานอยู่ระหว่าง -30 ถึง 55 °C เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ 1 โมดูล ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 12 เซลล์ และภายในแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 6 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOSHIBA

Secret|Authorized party only|Rank|A

SPC-KMT-E0001

2. Module specifications

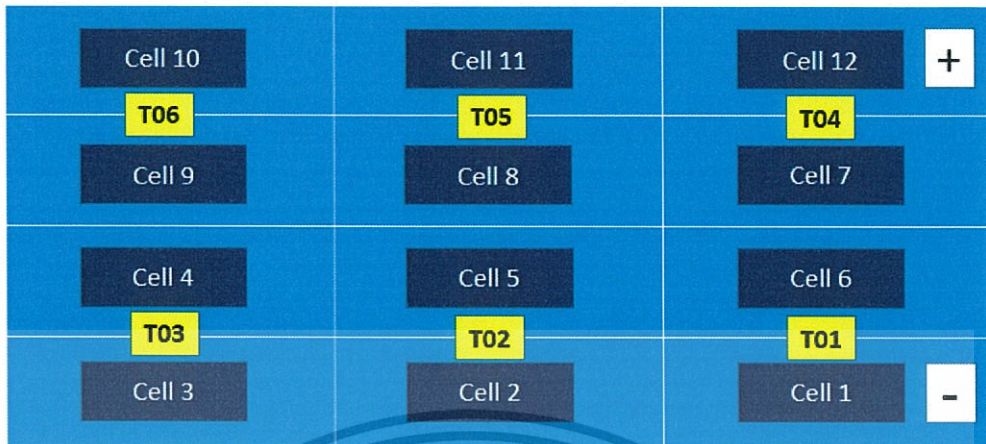
2.1. Basic configuration

Table 2.1 The outline of module specifications

Item		Specifications
Name		27.6V-40Ah secondary battery module on vehicle
Model number		AM01202CCA05A
Nominal capacity		40Ah
Nominal voltage		27.6V DC
Nominal energy		1104Wh
Weight		14kg (Approx.)
Storage temperature range (Environmental temperature)		-30 ~ 55 deg.C (No condensation)
Operating temperature range (Cell temperature)		-30 ~ 55 deg.C (No condensation)
Operating ambient humidity range		15 ~ 85%RH
Dimensions		H : 187.3mm L : 358.5mm W : 122.65mm
Main terminals		M6 Extra Low head Cap Screw (Recess: T20Hexalobular)
Type name of connector on CMU		SM08B-CPTK-1A-TB (Manufactured by JST)
High voltage system	Operating voltage range	18V ~ 32.4V (Cell: 1.5 ~ 2.7V) (Voltage threshold: 1.3V/3.0V @ cell)
	Absolute maximum rating voltage	48V (12 x 4.0V) or less (The definition of maximum rating voltage is that operating circuit on CMU doesn't become malfunction)
	Consumption current (Not operating cell balancing)	Each cell: 40mA or less (Current doesn't flow through module terminals but through each cell)
	Cell balancing current	83mA (Approx.) (When cell voltage is 2.8V)
	Dark current	270µA or less in each cell (Current doesn't flow through module terminals but through each cell)
Low voltage system	Rated supply voltage	12V
	Operating voltage	8 ~ 16V
	Consumption current	In operating (Including in cell balancing): 17mA or less
	Dark current	0mA
Damp proof		CMU board is applied damp-proof material
Insulated resistance		1Mohm and over (Applied voltage: DC1000V, between high and low voltage terminal)
Dielectric strength voltage		Applied voltage: AC2500V for 1 minute (Between high and low voltage terminal)
Operating altitude range		1,000m or less
Accessories (Specifications are out of TOSHIBA's scope)		Communication cable (Operation check: Packaged 1 pcs per 1 module)

รูปที่ 4.2 ข้อมูลเชิงเทคนิคของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

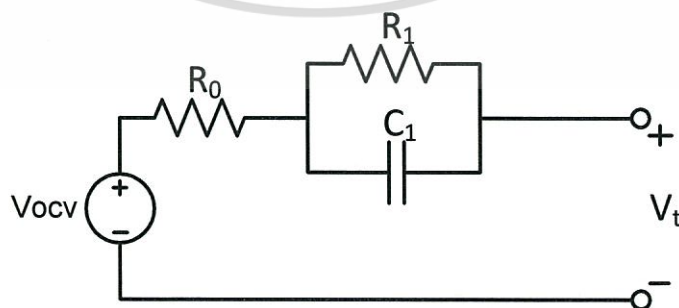
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนผังเซลล์ภายในแบตเตอรี่และเซ็นเซอร์อุณหภูมิ

แผนผังเซลล์ภายในแบตเตอรี่และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 12 เซลล์ ได้แก่ Cell01, Cell02, Cell03, Cell04, Cell05, Cell06, Cell07, Cell08, Cell09, Cell10, Cell11, Cell12 โดยแต่ละเซลล์มีขนาดแรงดัน 2.3 โวลต์ต่อเซลล์ ทั้งนี้ภายในแบตเตอรี่ยังมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 6 ตำแหน่ง เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิขณะใช้งานไม่ให้เกินค่าที่กำหนด และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ ตำแหน่งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิมีดังต่อไปนี้

1. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T01 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 1 และเซลล์ที่ 6
2. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T02 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 2 และเซลล์ที่ 5
3. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T03 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 3 และเซลล์ที่ 4
4. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T04 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 7 และเซลล์ที่ 12
5. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T05 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 8 และเซลล์ที่ 11
6. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ T06 อยู่ระหว่างเซลล์ที่ 9 และเซลล์ที่ 10



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

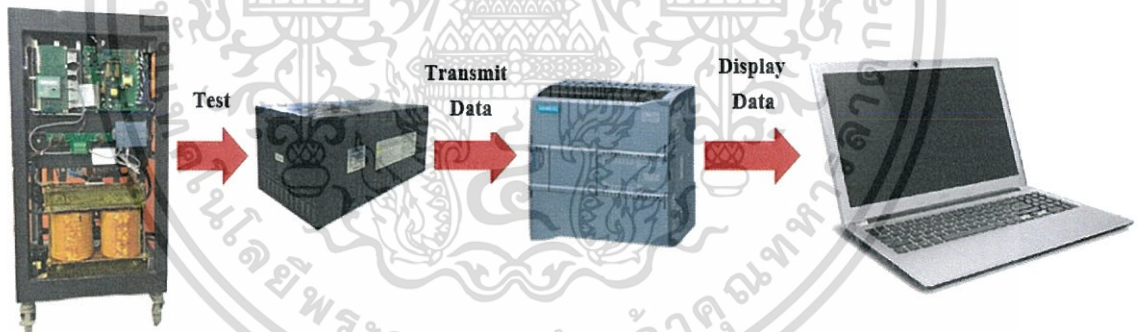
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์แบบจำลองของแบตเตอรี่

4.3.1 แบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่

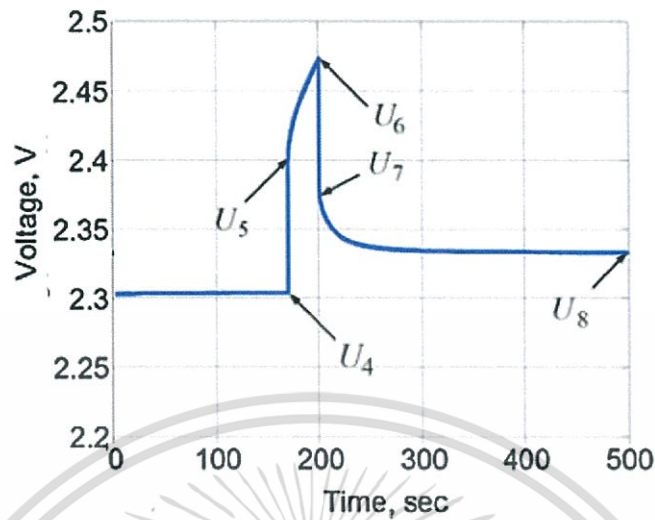
จากการศึกษางานวิจัยในการหาพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พบว่าวงจรสมมูลที่นิยมใช้แสดงดังรูปที่ 4.4 ประกอบด้วย V_{ocv} , R_0 , R_1 , C_1 โดยการหาค่าพารามิเตอร์นั้น ค่าความต้านทาน R_0 จะหาค่าจากแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทันทีหลังจากเริ่มการอัดประจุไฟฟ้า ส่วนค่า R_1 และ C_1 จะหาค่าจากช่วง Exponential function Curve fit ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่จะทดสอบด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแส 40 แอมแปร์ โดยมีช่วงเวลาอัดประจุ 6 นาที และช่วงพักระหว่างพัลส์ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ จากนั้นจะดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่เพื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เชิงเวลาเพื่อหาพารามิเตอร์และพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่

การเชื่อมต่อชุดทดสอบแบตเตอรี่ดังรูปที่ 4.5 ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์สองวงจรเชื่อมต่อกันแบบหันหลังชนกัน (Back to Back Converter) เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ที่ทำการทดสอบ โดยชุดทดสอบรองรับการอัดประจุที่กระแสสูงสุด 120 แอมแปร์ ในการทดสอบจะสามารถอัดประจุไฟฟ้าโดยดึงกระแสไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าจ่ายให้กับแบตเตอรี่ ในขณะที่ทำการทดสอบ จะนำข้อมูลแรงดันไฟฟ้าตลอดช่วงการอัดประจุไฟฟ้าส่งมาที่ PLC ด้วยการสื่อสารแบบ CAN จากนั้น PLC จะนำค่าที่ได้จากแบตเตอรี่ไปแสดงผลที่หน้าจอกอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.5 การเชื่อมต่อเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่

เมื่อเชื่อมต่อแบตเตอรี่กับเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่แล้วจะทำการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ โดยให้กระแสทดสอบคือกระแสที่พิกัดของแบตเตอรี่ รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์ ทั้งนี้จะมีช่วงพักระหว่างพัลส์ประมาณ 15 นาที เพื่อให้ระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงพักจะนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ ในการทดสอบจะใช้พัลส์จำนวน 10 ลูกคลื่น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% และ 100%



รูปที่ 4.6 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์ [7]

รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์ 1 รูปคลื่น ซึ่งจะใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1 ที่ตำแหน่ง U_4 คือช่วงที่เริ่มอัดประจุไฟฟ้าของลูกคลื่นใดๆ โดยเมื่อเริ่มการอัดประจุแล้วแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น โดยตำแหน่ง U_5 คือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดหลังจากเริ่มอัดประจุไฟฟ้า เมื่ออัดประจุตามเวลาที่กำหนดแต่ละพัลส์แล้วจึงทำการหยุดการอัดประจุ โดยตำแหน่ง U_6 คือจุดที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงสุดก่อนหยุดอัดประจุไฟฟ้า และตำแหน่ง U_7 คือช่วงที่แรงดันไฟฟ้าลดลงทันทีทันใดเมื่อหยุดอัดประจุไฟฟ้า หลังจากนั้นแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลงเป็นลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่ตำแหน่ง U_8 คือจุดที่แรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำสุด จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ได้ดังนี้

$$R_0 = \frac{U_5 - U_4}{I_{\text{batt}}} \quad (4.1)$$

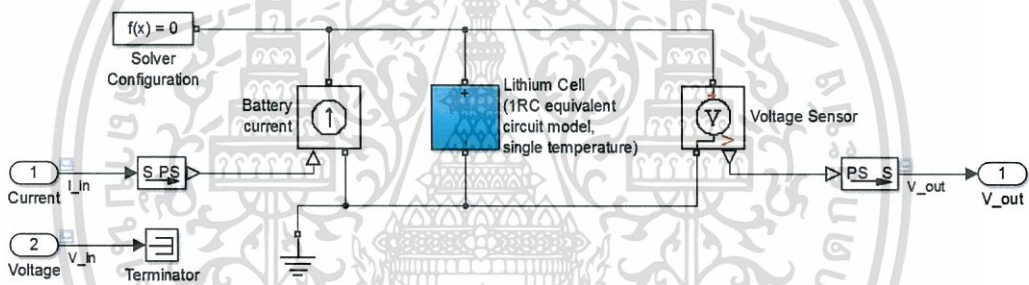
$$R_1 = R_{\text{All}} - R_0 \quad (4.2)$$

$$R_1 = \frac{(U_6 - U_8)}{I_{\text{batt}}} - \frac{(U_5 - U_4)}{I_{\text{batt}}} \quad (4.3)$$

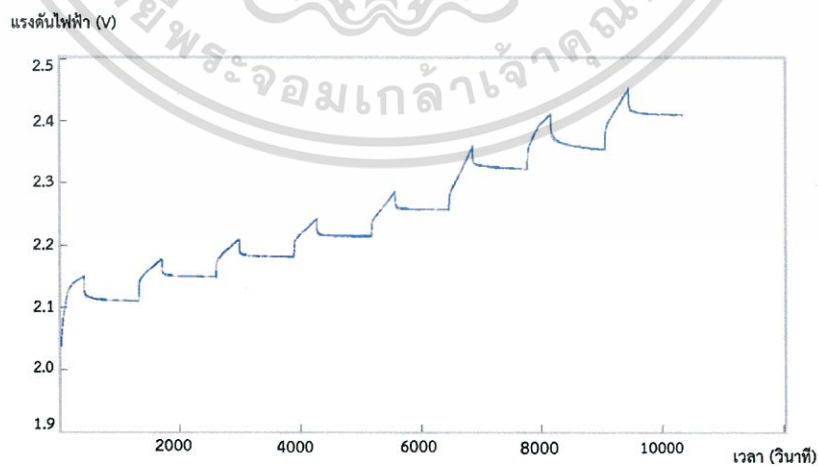
ค่าพารามิเตอร์ R_0 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นช่วงที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทันทีทันใดหลังจากเริ่มอัดประจุไฟฟ้า ค่าพารามิเตอร์ R_1 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งนำค่าความต้านทานรวม R_{All} ลบด้วยค่า R_0

ในการประมาณหาค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1 นั้นจะใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 4.7 ในโปรแกรม Matlab ซึ่งภายในแบบจำลองจะประกอบ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แบบจำลองแบตเตอรี่ เช่น เซอร์วิตต์แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และพอร์ตแรงดันไฟฟ้าขาออก โดยภายในแบบจำลองแบตเตอรี่นั้นจะประกอบด้วยวงจรสมมูลแบบ One RC Branch ซึ่งเป็นวงจรสมมูลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่นั้น จะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ที่ได้จากการทดลองขณะอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ที่พิกัดกระแสของแบตเตอรี่เข้าไปในแบบจำลอง โดยจะใช้ลูกคลื่นพัลส์จำนวน 8 ลูกคลื่น เนื่องจากงานวิจัยนี้จะทำการประมาณอุณหภูมิแบตเตอรี่ในช่วงการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ หรือช่วงระหว่าง SOC 0% ถึง SOC 80%

แบบจำลองจะสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1 ที่ค่า SOC ใดๆ โดยใช้เครื่องมือ Parameter Estimation Tool ใน Simulink Design Optimization ทั้งนี้แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้แสดงผลการจำลองของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ที่ประมาณค่าเทียบกับผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่แบบจำลองประมาณค่าได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง



รูปที่ 4.7 แบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่



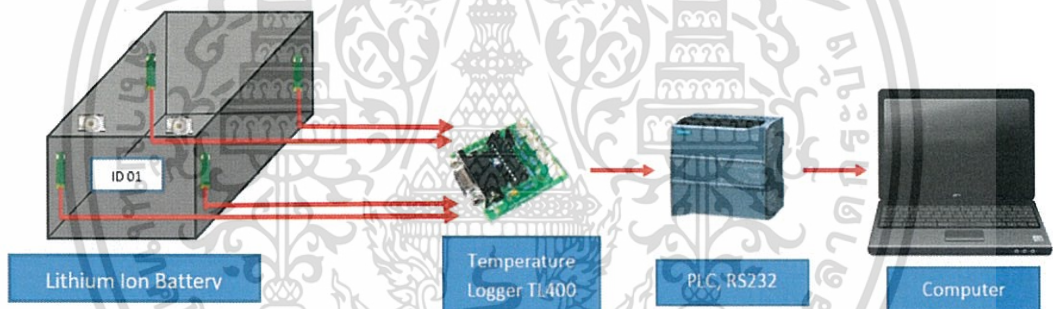
รูปที่ 4.8 แรงดันไฟฟ้าของแบบจำลองเซลล์แบตเตอรี่ขณะการอัดประจุแบบพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของแบตเตอรี่

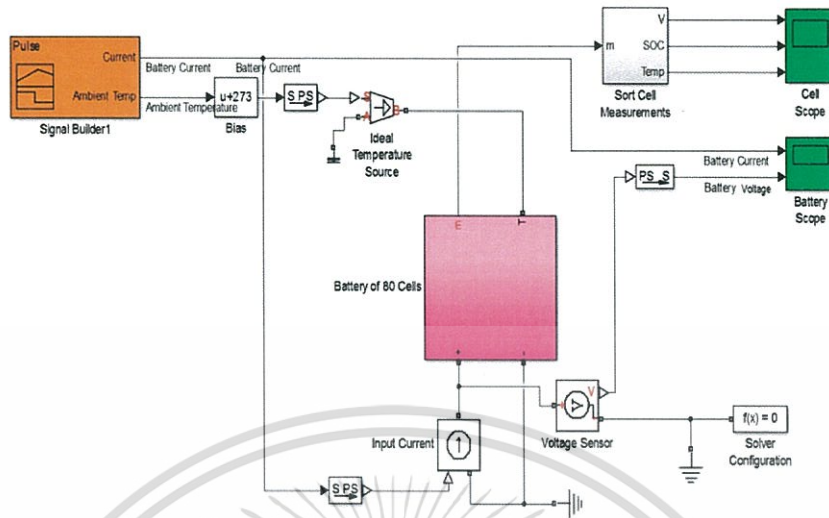
ในการทดลองเพื่อหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของแบตเตอรี่ จะทำการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging) ที่กระแสฟัด 40 แอมแปร์ ซึ่งเป็นกระแสฟัดที่ใช้งานของแบตเตอรี่ รูปที่ 4.9 แสดงการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ในการทดลองจะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายนอกแบตเตอรี่จำนวน 4 ชุด โดยใช้บอร์ดอ่านค่าอุณหภูมิ Temperature Logger TL400 โดยสามารถวัดค่าอุณหภูมิตั้งแต่ $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีความละเอียดในการวัด $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ บอร์ดอ่านค่าอุณหภูมิจะทำการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอกแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ (Real time) จากนั้นจะส่งค่าอุณหภูมิให้กับ PLC เพื่อนำไปแสดงผลบนหน้าจคอมพิวเตอร์

เมื่อทำการทดสอบด้วยการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging) ที่กระแสไฟฟ้า 40 และ 80 แอมแปร์ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในแบตเตอรี่ ทั้งนี้จะนำข้อมูลจากการทดสอบจริงมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 4.10 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน (Thermal Resistance) ต่อไป



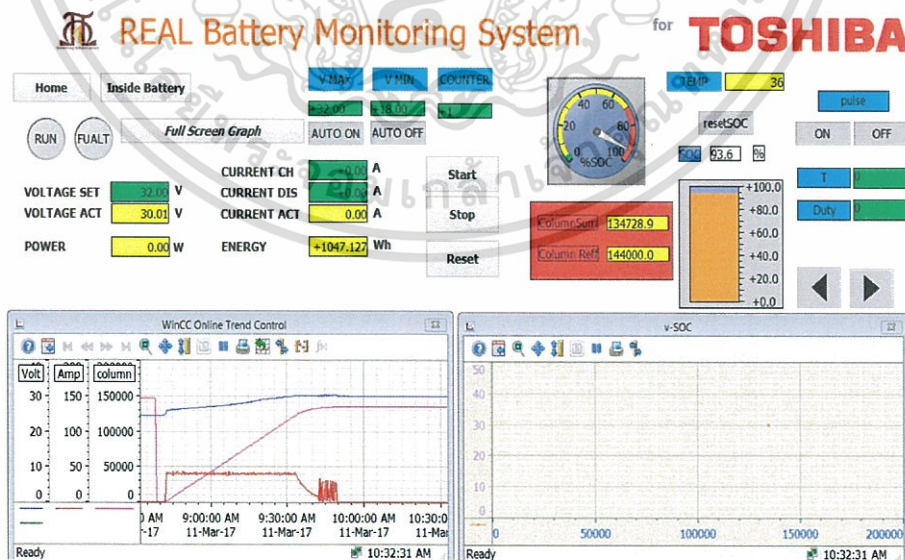
รูปที่ 4.9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์

แบบจำลองของโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยแบบจำลองประกอบด้วย Signal Builder ทำหน้าที่สร้างสัญญาณของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และกำหนดค่าอุณหภูมิห้องขณะทดสอบเข้าไปในแบบจำลอง Voltage Sensor ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่วัดค่าได้ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อนำไปแสดงผล Solver Configuration ทำหน้าที่กำหนดวิธีการในการประมาณค่า Sort Cell Measurements ทำหน้าที่นำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแปรได้แก่ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ และค่า SOC มาแสดงผลที่ Cell Scope ในส่วนของ Battery Scope จะแสดงผลแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.10 แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ของแบตเตอรี่

รูปที่ 4.11 หน้าต่างแสดงผลข้อมูลของแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าจะใช้โปรแกรม PLC ของบริษัท Siemens ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งข้อมูลของแบตเตอรี่แสดงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าขณะทำการทดสอบ แรงดันต่อเซลล์ภายในแบตเตอรี่ทั้ง 12 เซลล์ อุณหภูมิจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ อุณหภูมิจากเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิภายนอกแบตเตอรี่ ค่าสถานะ SOC (State of Charge) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลา และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา



รูปที่ 4.11 หน้าต่างแสดงผลข้อมูลของแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ในการทดลองรวมถึงข้อมูลทางเทคนิคที่จำเป็น ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ พิกัดกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานแบตเตอรี่ และโครงสร้างภายในแบตเตอรี่ รวมถึงตำแหน่งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ การออกแบบการทดสอบแบตเตอรี่ประกอบการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแส 40 และการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางอุณหภูมิศาสตร์ ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging) ที่กระแสพิกัด 40 แอมแปร์ สุดท้ายได้แสดงตัวอย่างหน้าต่างแสดงผลข้อมูลของแบตเตอรี่ขณะทำการทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดสอบแบตเตอรี่

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดสอบแบตเตอรี่ชนิด Li-ion ขนาดความจุ 40 แอมแปร์-ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้า 27.6 โวลต์ การทดลองประกอบด้วยการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแส 40 แอมแปร์ เพื่อหาพารามิเตอร์ R0, R1 และ C1 และการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging) ที่กระแสพิกัด 40 แอมแปร์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ สุดท้ายได้คำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ทดสอบ

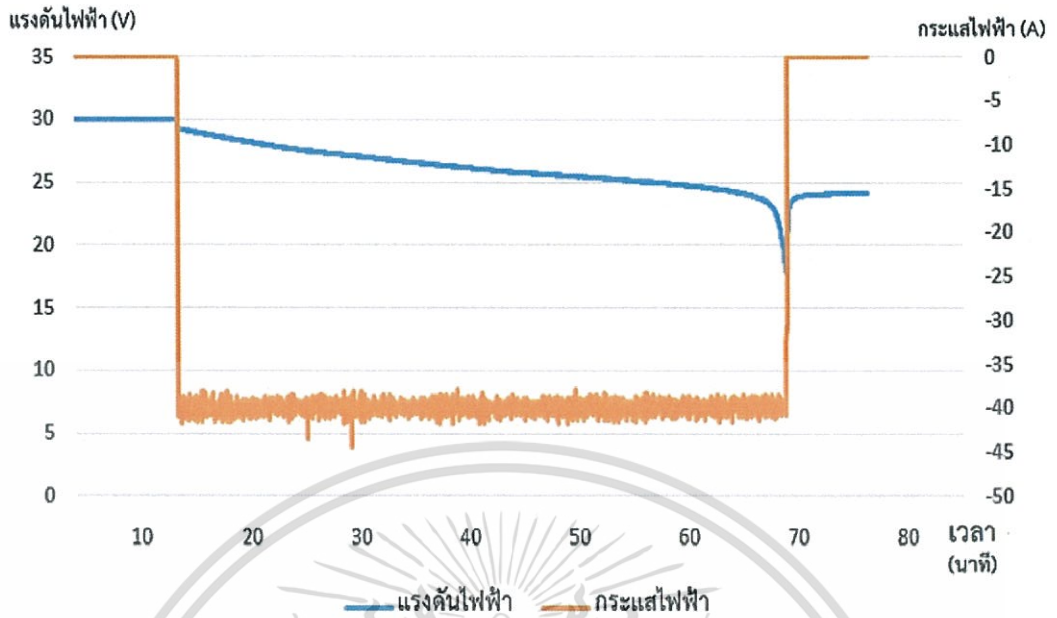
5.2 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่

การทดลองด้วยวิธีการคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้องต่างกัน ดังตารางที่ 5.1 การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแส 40 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิห้อง 32 °C ใช้เวลาในการคายประจุ 58 นาที อุณหภูมิสูงสุดภายในแบตเตอรี่ 38 °C โดยที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ 990.26 Wh การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแส 40 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิห้อง 35 °C ใช้เวลาในการคายประจุ 58 นาที อุณหภูมิสูงสุดภายในแบตเตอรี่ 40 °C โดยที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ 1019.16 Wh การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแส 80 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิห้อง 32 °C ใช้เวลาในการคายประจุ 33 นาที อุณหภูมิสูงสุดภายในแบตเตอรี่ 39 °C โดยที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ 970.24 Wh การทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแส 80 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิห้อง 35 °C ใช้เวลาในการคายประจุ 32 นาที อุณหภูมิสูงสุดภายในแบตเตอรี่ 43 °C โดยที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ 969.14 Wh

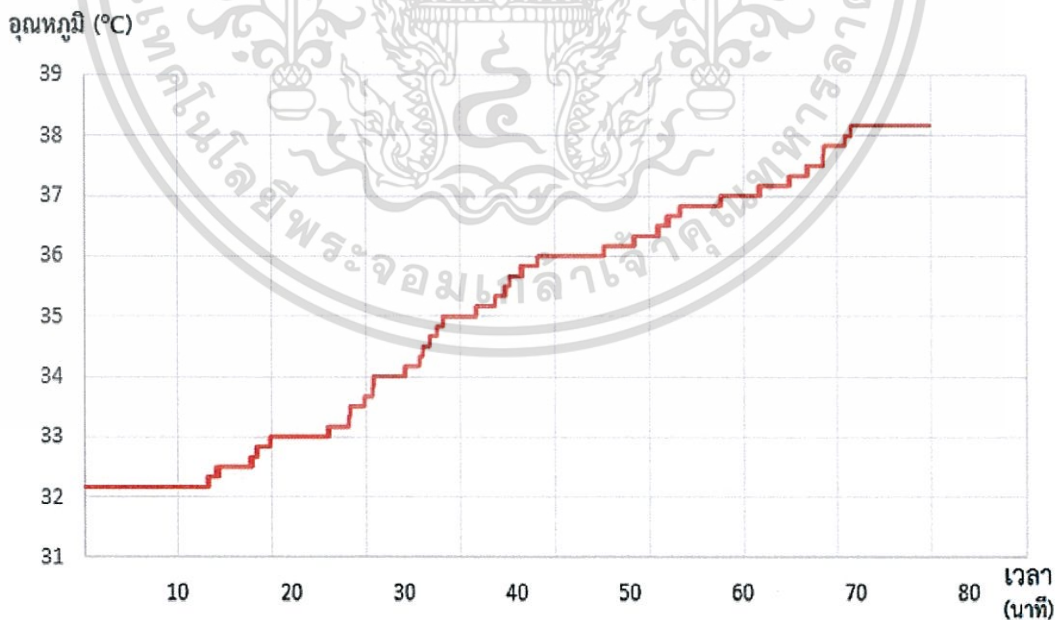
จากการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าพบว่า การคายประจุที่กระแส 80 แอมแปร์ ทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่าการคายประจุที่กระแส 40 แอมแปร์ และพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายออกมามีปริมาณลดลง เนื่องจากพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ทั้งหมดนั้น มีบางส่วนเกิดการสูญเสียทางความร้อน

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการคายประจุไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้า (A)	อุณหภูมิห้อง (°C)	อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ (°C)	เวลาที่ใช้ (นาที)	พลังงาน (Wh)
40	32	38	58	990.26
	35	40	58	1019.16
80	32	39	33	970.24
	35	43	32	969.14

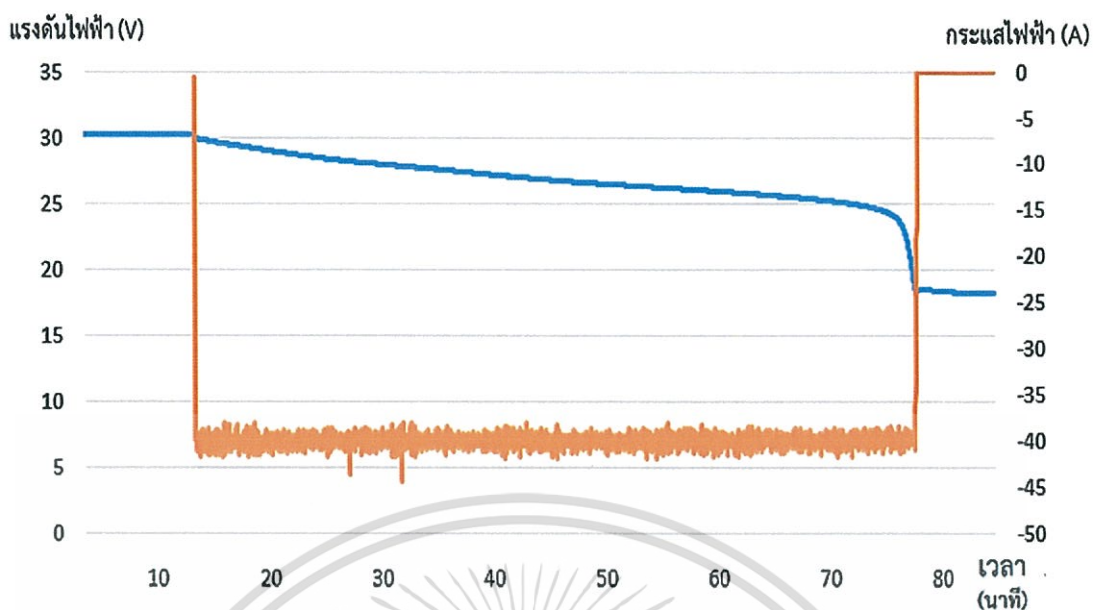


รูปที่ 5.1 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C

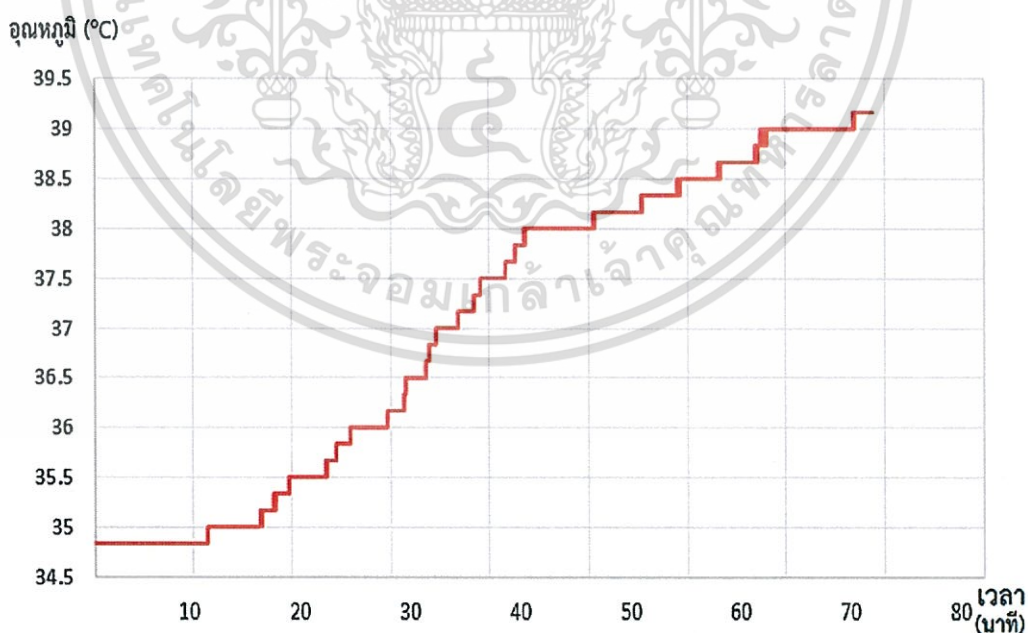


รูปที่ 5.2 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
ที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

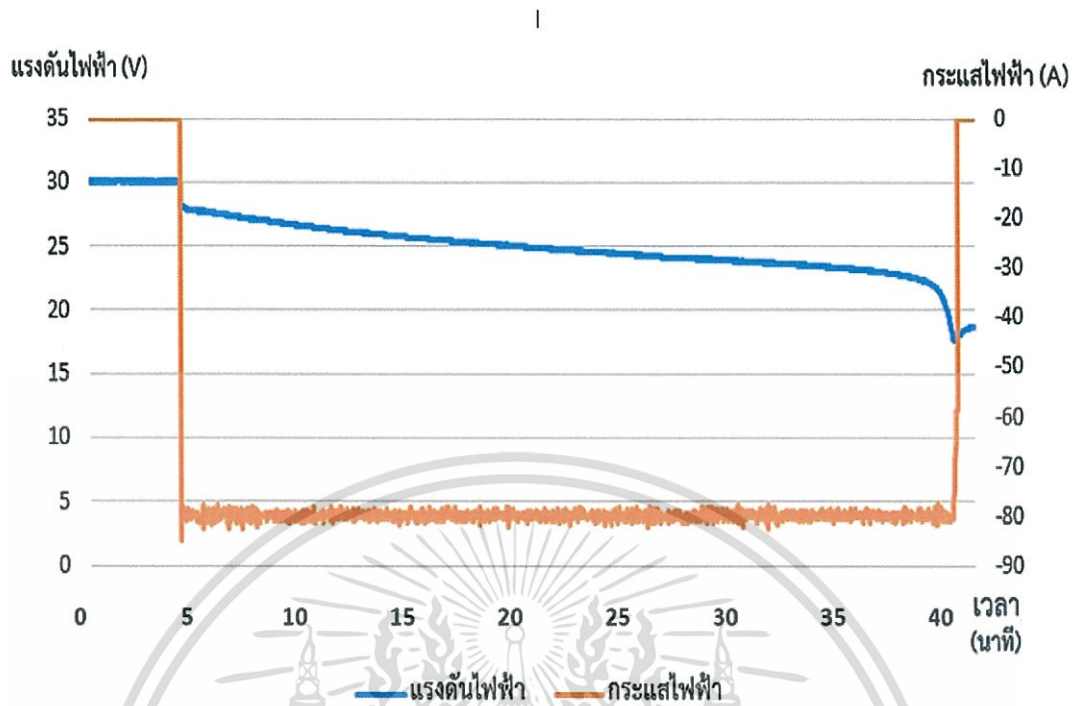


รูปที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C

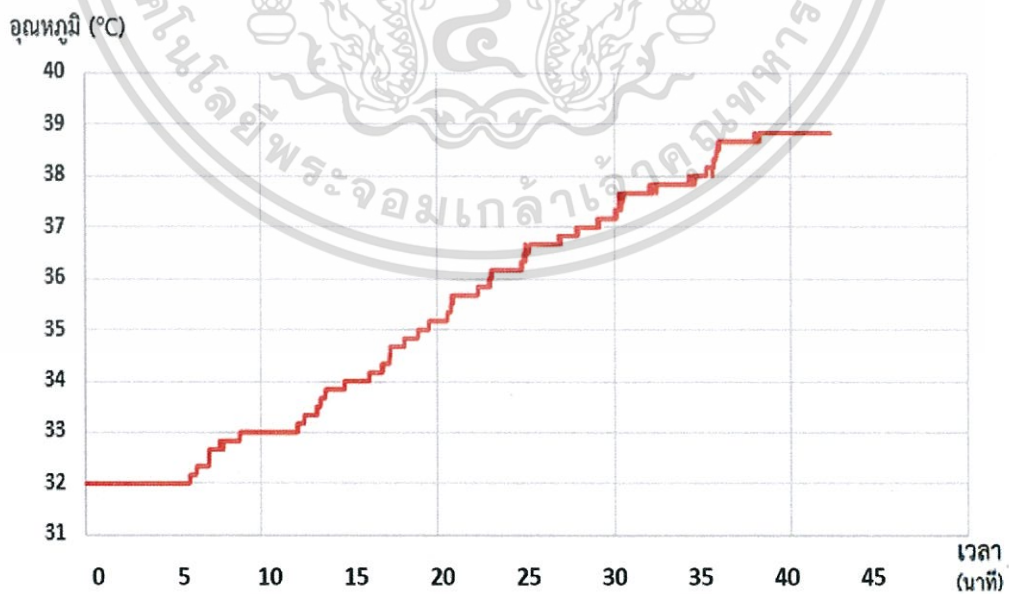


รูปที่ 5.4 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
ที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

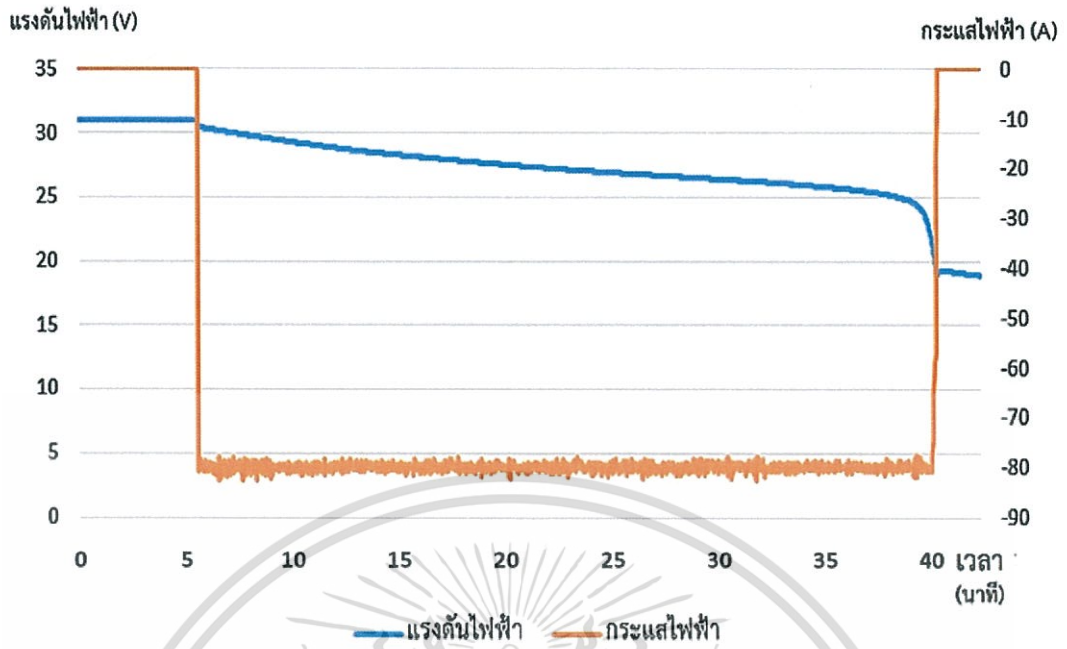


รูปที่ 5.5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C

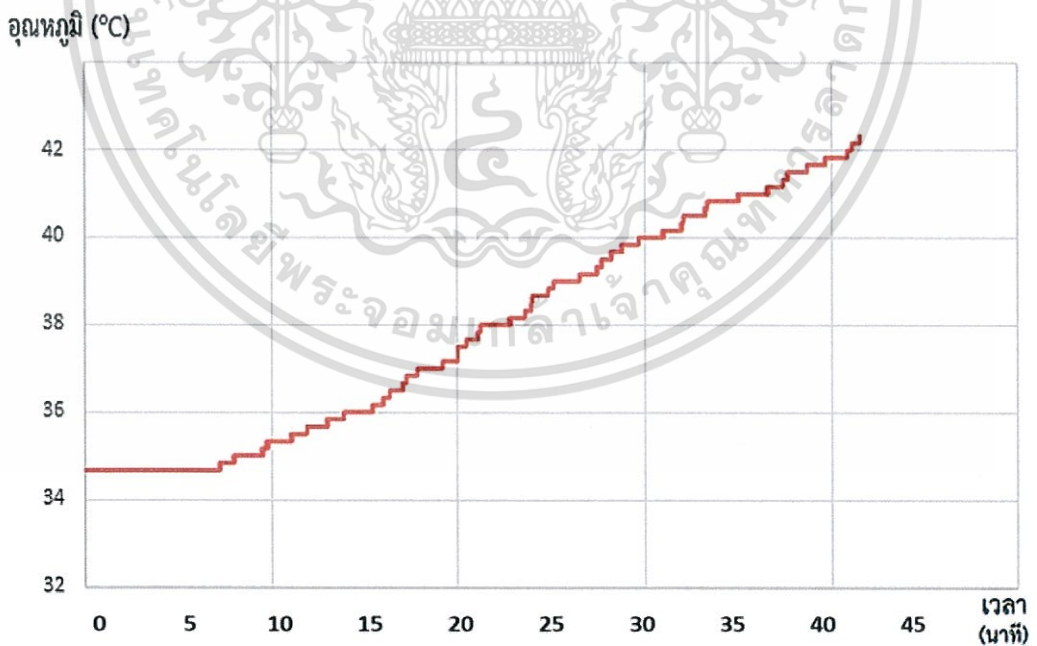


รูปที่ 5.6 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

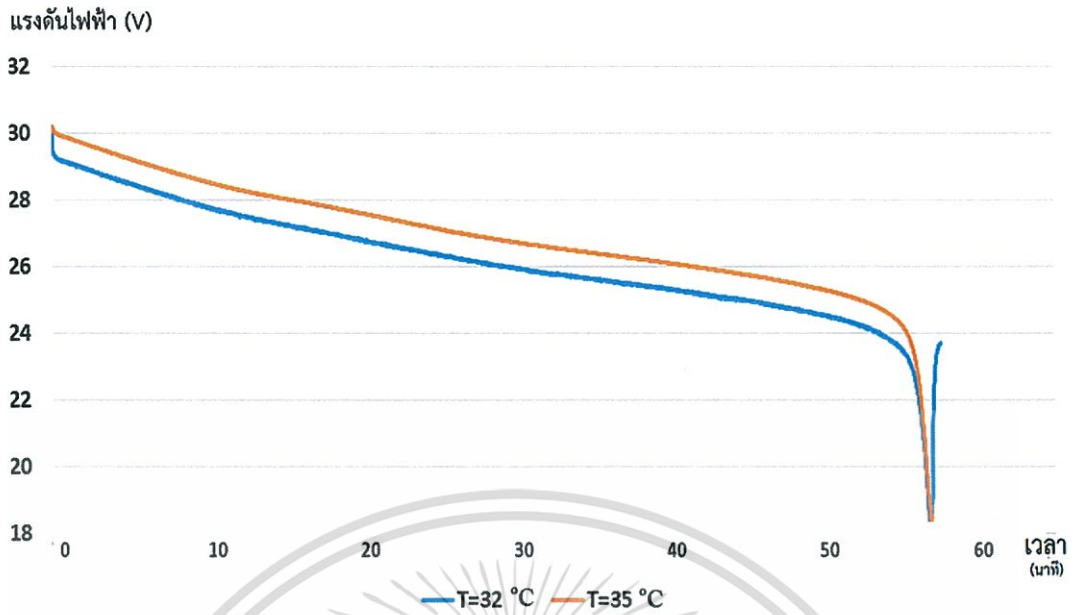


รูปที่ 5.7 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่
 ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C

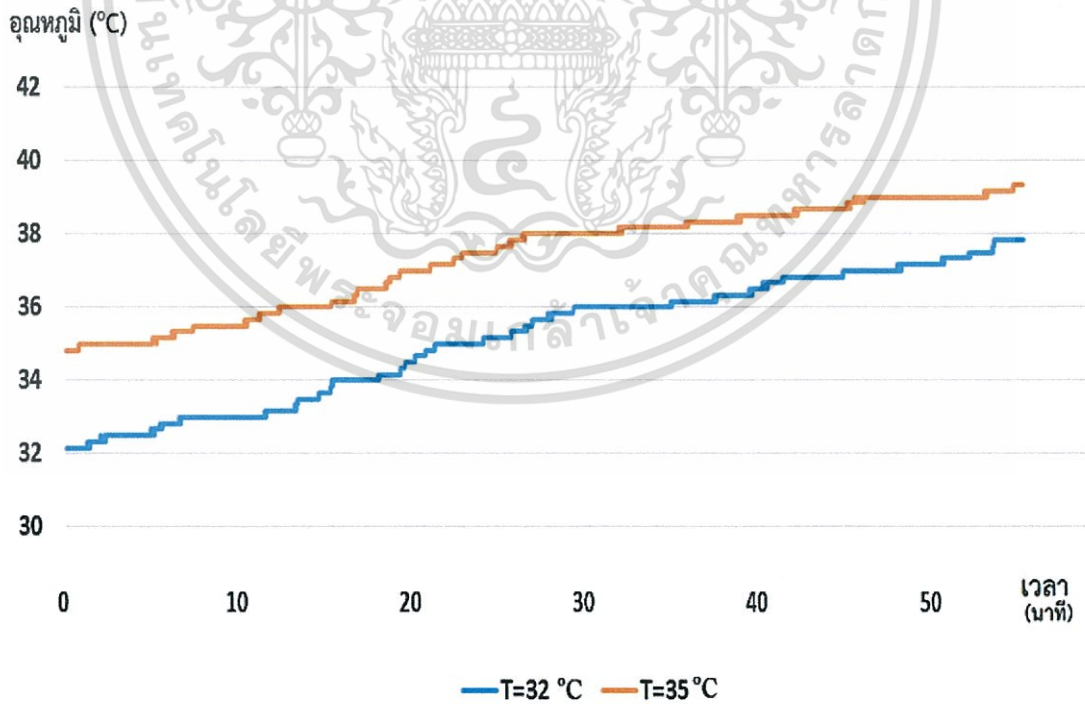


รูปที่ 5.8 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
 ที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 35°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



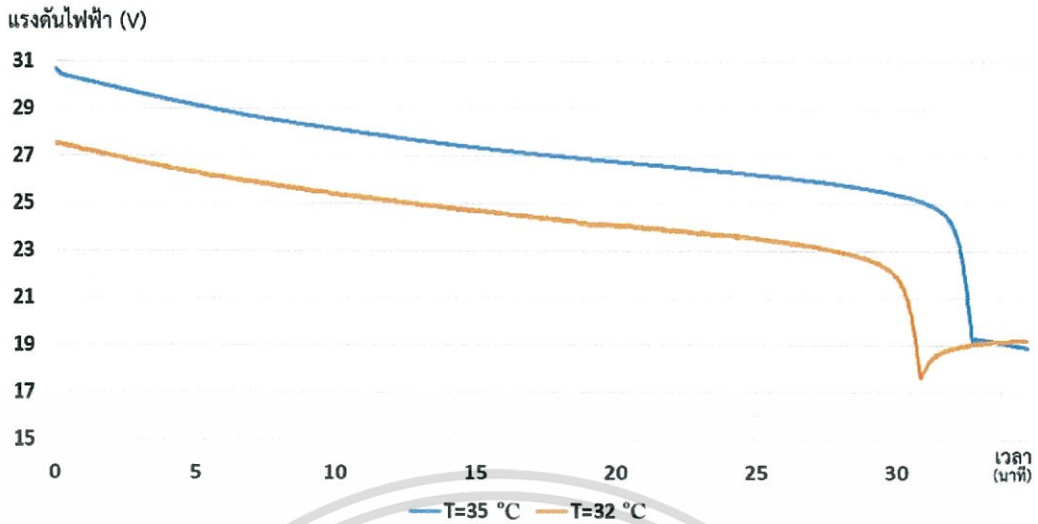
รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C



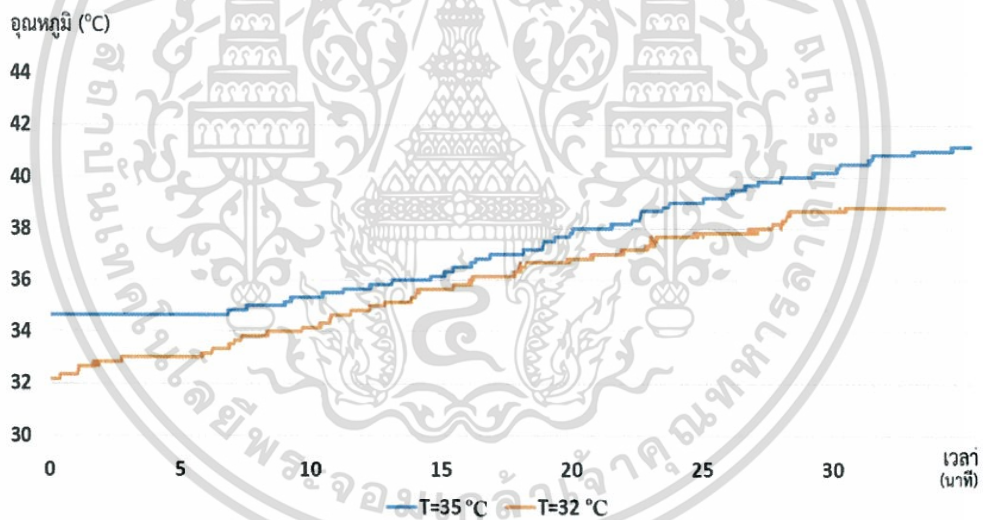
รูปที่ 5.10 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า

ที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C



รูปที่ 5.12 อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้า ที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C

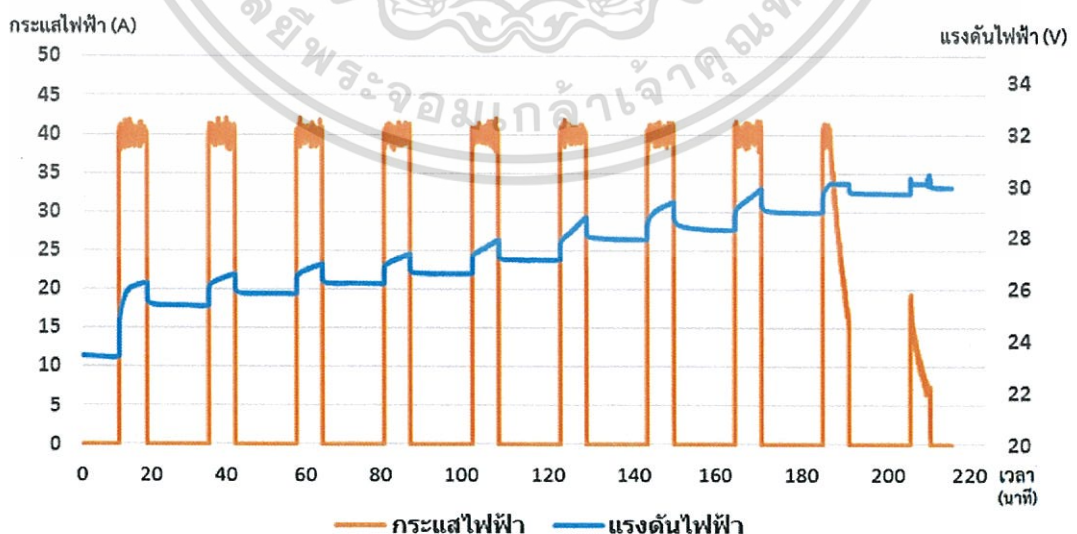
รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่ กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C โดยพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 35°C มีค่า สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 32°C รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 40 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C โดยพบว่า อุณหภูมิแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง 35°C มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง 32°C ตลอดช่วง การคายประจุไฟฟ้า รูปที่ 5.11 แสดงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C โดยพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 35°C มีค่าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 32°C รูปที่ 5.12 แสดงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่กระแส 80 แอมแปร์ อุณหภูมิห้อง 32°C และ 35°C พบว่าอุณหภูมิแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง 35°C มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิห้อง 32°C ตลอดช่วงการคายประจุไฟฟ้า

5.3 การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์

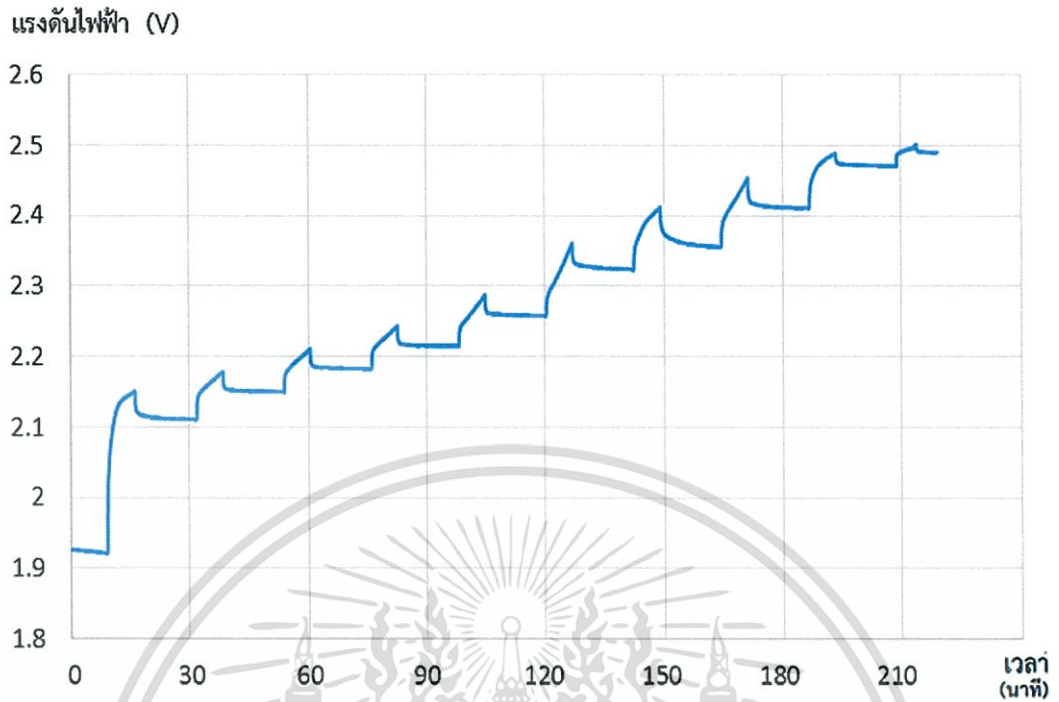
การทดสอบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ (Pulsed charge) เริ่มจากการคายประจุให้กับแบตเตอรี่จนหมด จากนั้นจึงทำการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ (Pulsed charge) โดยให้กระแสทดสอบคือกระแสที่พิกัดของแบตเตอรี่ 40 แอมแปร์ โดยมีช่วงเวลาอัดประจุ 6 นาที และช่วงพัก (Rest time) 15 นาที เริ่มทำการอัดประจุไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น 24 โวลต์ การทดลองสิ้นสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เท่ากับ 32 โวลต์ ทั้งนี้อุณหภูมิขณะทำการทดลองอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบจะใช้พัลส์จำนวน 10 ลูกคลื่น เพื่อทำนายค่าพารามิเตอร์ที่ SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% รูปที่ 5.13 แสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ จากนั้นจะนำรูปคลื่นพัลส์ที่ค่า SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ R0 และ R1 โดยที่ค่าความต้านทาน R0 จะทำนายจากแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทันทีหลังจากเริ่มการอัดประจุไฟฟ้า ส่วนค่า R1 จะทำนายจากช่วง Exponential function Curve fit รูปที่ 5.13 แสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ค่า SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% รูปที่ 5.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ ขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ ซึ่งจะนำมาใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ต่อไป รูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงค่าพารามิเตอร์ R0 และ R1 ที่ค่า SOC ต่างๆ ตามลำดับ



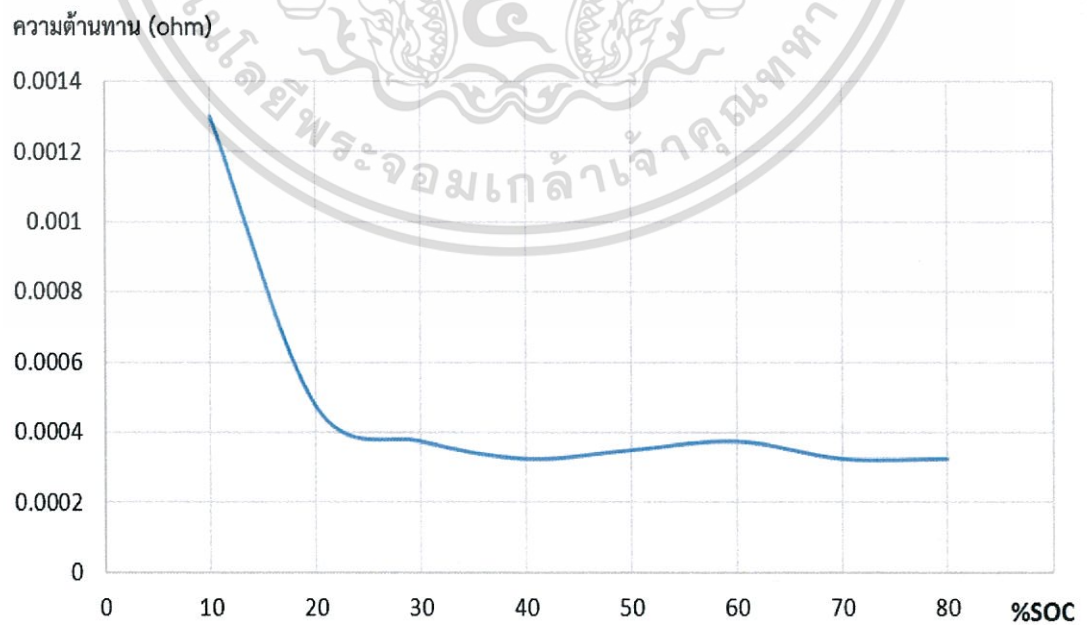
รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วงบที่อจกรรดิองบพวณไปองบชงให้น้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

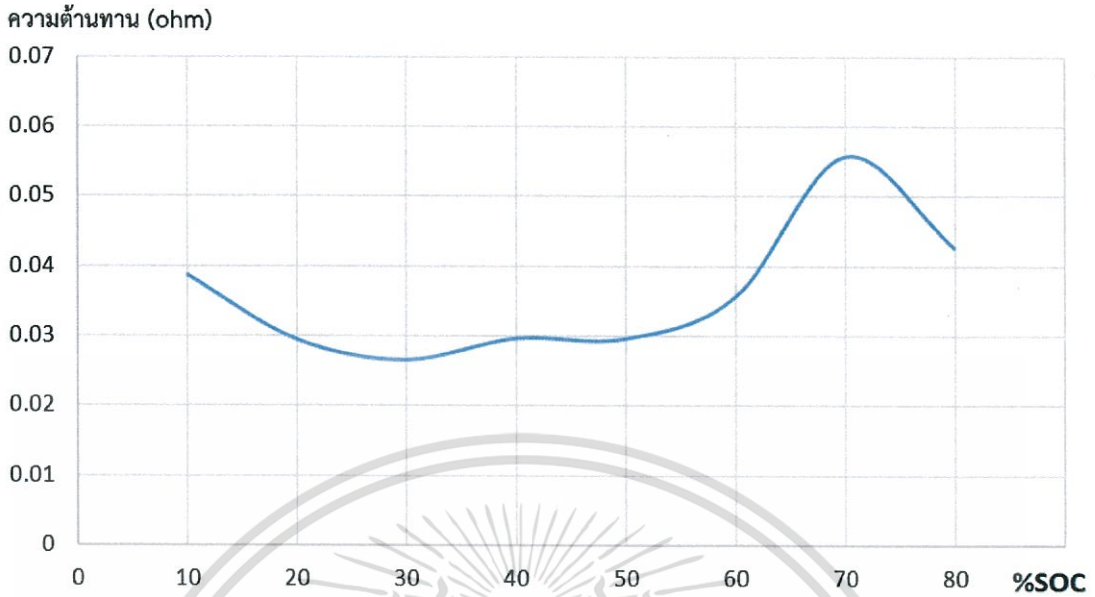


รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่
ขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์



รูปที่ 5.15 ความต้านทาน R0 ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ %SOC ต่างๆ

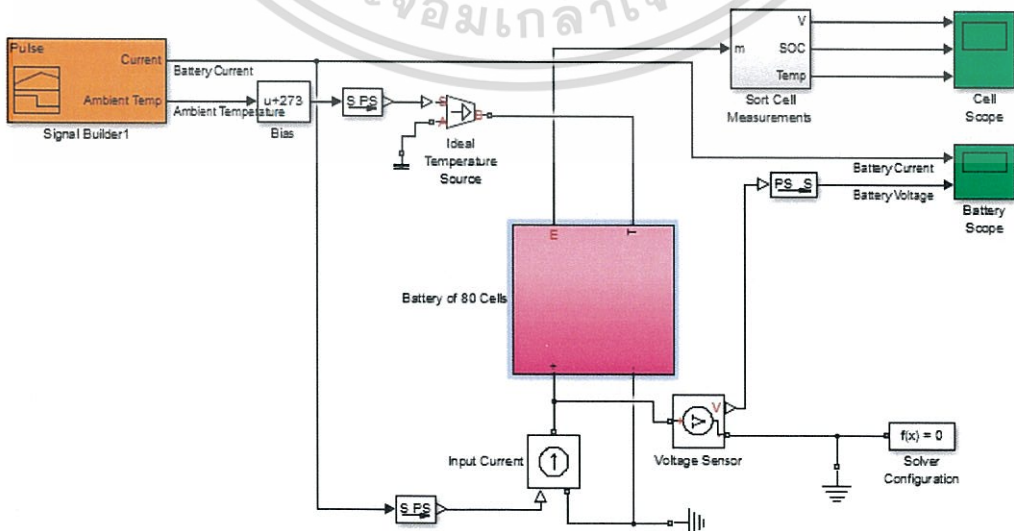
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ความต้านทาน R1 ของเซลล์แบตเตอรี่ที่ %SOC ต่างๆ

5.4 การทำนายอุณหภูมิเมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่

หลังจากหาค่าพารามิเตอร์ R0 และ R1 ของแบตเตอรี่แล้ว ต่อไปจะนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาป้อนค่าในแบบจำลองทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนดังรูปที่ 5.17 ในโปรแกรม Matlab ในการจำลองจะตั้งค่าการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 40 แอมแปร์ และ 80 แอมแปร์ โดยพิจารณาค่าอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจะนำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองแบตเตอรี่ลิเทียมมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากการทดลองจริง

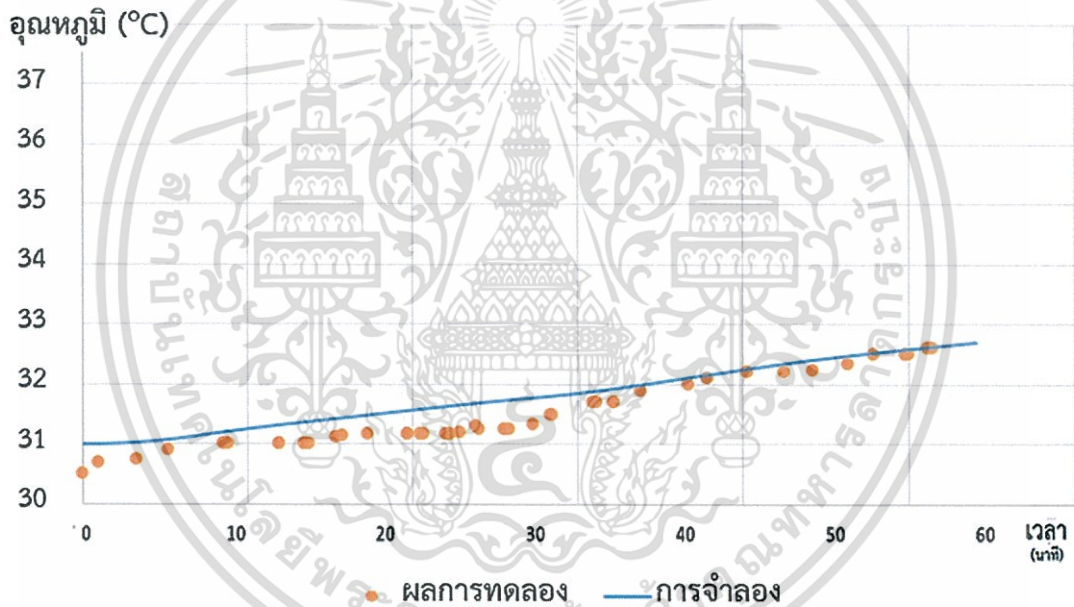


รูปที่ 5.17 แบบจำลองแบตเตอรี่ลิเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.1 การทำนายอุณหภูมิเมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 40 แอมแปร์

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแบตเตอรี่นั้น จะใช้วิธีการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยในขั้นแรกจะทดสอบด้วยกระแสไฟฟ้าปกติของแบตเตอรี่นั้นคือ 40 แอมแปร์ ก่อนทำการทดสอบต้องคายประจุแบตเตอรี่ให้มีค่า SOC 0% ก่อนแล้วจึงเริ่มทำการอัดประจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ประมาณ 24 โวลต์ จนถึง 32 โวลต์ ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 1C หรือ 40 แอมแปร์ ประมาณ 60 นาที ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าอยู่ที่ 31 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทำการอัดประจุไฟฟ้าจนแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้า 29.5 โวลต์ หรือที่ค่า SOC 80% อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 32.5 องศาเซลเซียส โดยได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในแบบจำลอง พบว่ามีแนวโน้มดังรูปที่ 5.18 โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 2% หรือประมาณ 0.6 องศาเซลเซียส

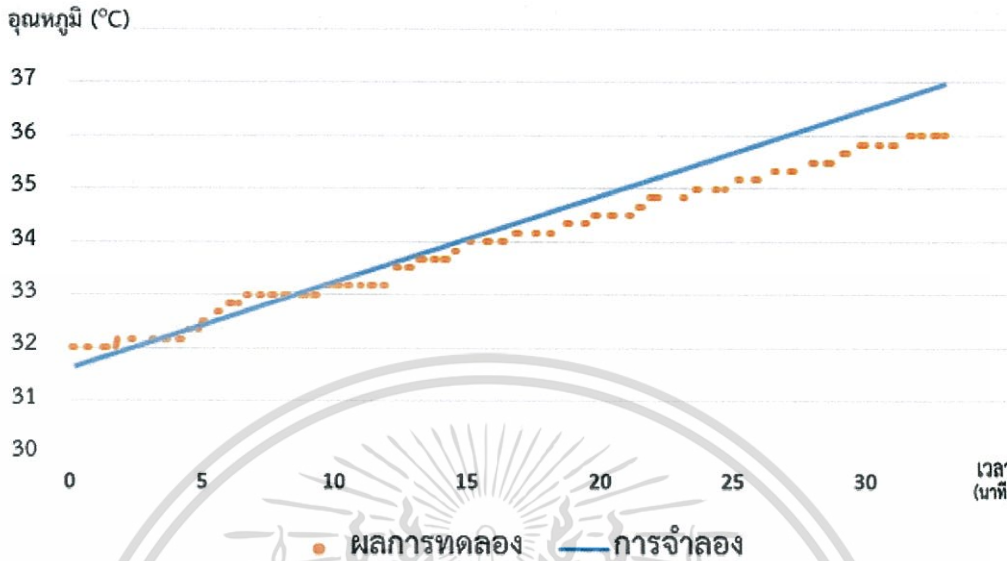


รูปที่ 5.18 อุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 1C หรือ 40 แอมแปร์

5.4.2 การทำนายอุณหภูมิเมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 80 แอมแปร์

เมื่อทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 40 แอมแปร์แล้ว ต่อไปจะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ 80 แอมแปร์ ขั้นตอนในการทดสอบนั้นเหมือนกับการทดสอบที่กระแสไฟฟ้า 40 แอมแปร์ การอัดประจุไฟฟ้าจะเริ่มที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากันคือประมาณ 24 โวลต์ จนแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้าถึง 32 โวลต์ ระยะเวลาในการอัดประจุไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้า 2C หรือ 80 แอมแปร์ ประมาณ 40 นาที ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นขณะทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าอยู่ที่ 32 องศาเซลเซียส โดยเมื่อทำการอัดประจุไฟฟ้าจนแบตเตอรี่มีแรงดันไฟฟ้า 30 โวลต์ หรือที่ค่า SOC 80% อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 36 องศาเซลเซียส โดยได้ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในเอกสารนี้แบบจำลอง พบว่ามีแนวโน้มดังรูปที่ 5.19 โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 4% หรือประมาณ 1.1 องศาเซลเซียส

องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากในการอัดประจุไฟฟ้านั้น หากแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงเกิน 5 องศาเซลเซียสทุกครั้ง จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลดลง



รูปที่ 5.19 อุณหภูมิขณะทำการทดสอบการอัดประจุไฟฟ้า 2C หรือ 80 แอมแปร์

5.5 การคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน

การคำนวณหาค่าความต้านทานทางอุณหพลศาสตร์นั้นจะใช้ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ ได้แก่ ความจุของแบตเตอรี่ น้ำหนักของแบตเตอรี่ ขนาดของแบตเตอรี่ ค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1 และข้อมูลทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะของแบตเตอรี่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ อุณหภูมิห้องที่ทำการทดสอบ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้า

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ที่กล่าวว่า พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำลายได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบหรือพลังงานภายในได้มาจากผลรวมของความร้อนที่มีการแลกเปลี่ยนกับสิ่งแวดล้อมและงานที่ทำ โดยในที่นี้จะกำหนดให้แบตเตอรี่เป็นระบบที่พิจารณา พลังงานภายในของแบตเตอรี่สามารถหาได้จากสมการที่ 5.1

$$dU = Q + W \quad (5.1)$$

แต่เนื่องจากสิ่งแวดล้อมไม่ได้ทำงานให้กับระบบ ดังนั้นพลังงานที่ระบบได้รับมาจากความร้อนเพียงอย่างเดียว ดังสมการที่ 5.2 โดยที่พลังงานความร้อนภายในแบตเตอรี่สามารถหาได้จากพลังงานความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นลบด้วยพลังงานความร้อนจากการถ่ายเทความร้อน สมการที่ 5.4

$$dU = Q \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dU = mC_p\Delta T \quad (5.3)$$

$$dU = Q_{\text{gen}}(t) - Q_{\text{lose}}(t) \quad (5.4)$$

โดยที่ Q คือพลังงานความร้อน (J)

W คือพลังงานรูปแบบอื่นๆ (J)

m คือมวลของแบตเตอรี่ (kg)

C_p คือความจุความร้อนจำเพาะภายใต้ความดันคงที่ของแบตเตอรี่ (J/kg·°C)

ΔT คืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ (°C)

$Q_{\text{gen}}(t)$ คือพลังงานที่ได้จากการอัดประจุไฟฟ้า (J)

$Q_{\text{loss}}(t)$ คือพลังงานความร้อนที่สูญเสียของแบตเตอรี่ ซึ่งเกิดจากการนำความร้อน (J)

พลังงานความร้อนทั้งหมดที่แบตเตอรี่ได้รับจากการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่สามารถหาได้จากสมการที่ 5.5 และพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการนำความร้อน สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 5.6 ดังนั้นเมื่อปรับรูปแบบสมการจะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อน (R_{cond}) ได้โดยใช้สมการ 5.9

$$\frac{Q_{\text{gen}}(t)}{dt} = R_0(I_{\text{batt}})^2 + R_1(I_{\text{batt}})^2 \quad (5.5)$$

$$\frac{Q_{\text{loss}}(t)}{dt} = \frac{Q_{\text{cond}}(t)}{dt} = \frac{T_{\text{core}} - T_{\text{crust}}}{R_{\text{cond}}} \quad (5.6)$$

$$mC_p \frac{dT_{\text{core}}}{dt} = \frac{Q_{\text{gen}}(t)}{dt} - \frac{Q_{\text{loss}}(t)}{dt} \quad (5.7)$$

$$mC_p \frac{dT_{\text{core}}}{dt} = R_0(I_{\text{batt}})^2 + R_1(I_{\text{batt}})^2 - \frac{T_{\text{core}} - T_{\text{crust}}}{R_{\text{cond}}} \quad (5.8)$$

$$R_{\text{cond}} \approx \frac{T_{\text{core}} - T_{\text{crust}}}{R_0(I_{\text{batt}})^2 + R_1(I_{\text{batt}})^2 - mC_p \frac{dT_{\text{core}}}{dt}} \quad (5.9)$$

เมื่อ I_{batt} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ (A)

$Q_{\text{cond}}(t)$ คือพลังงานความร้อนจากการนำความร้อน (J)

T_{core} คืออุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ (°C)

T_{crust} คืออุณหภูมิภายนอกแบตเตอรี่ (°C)

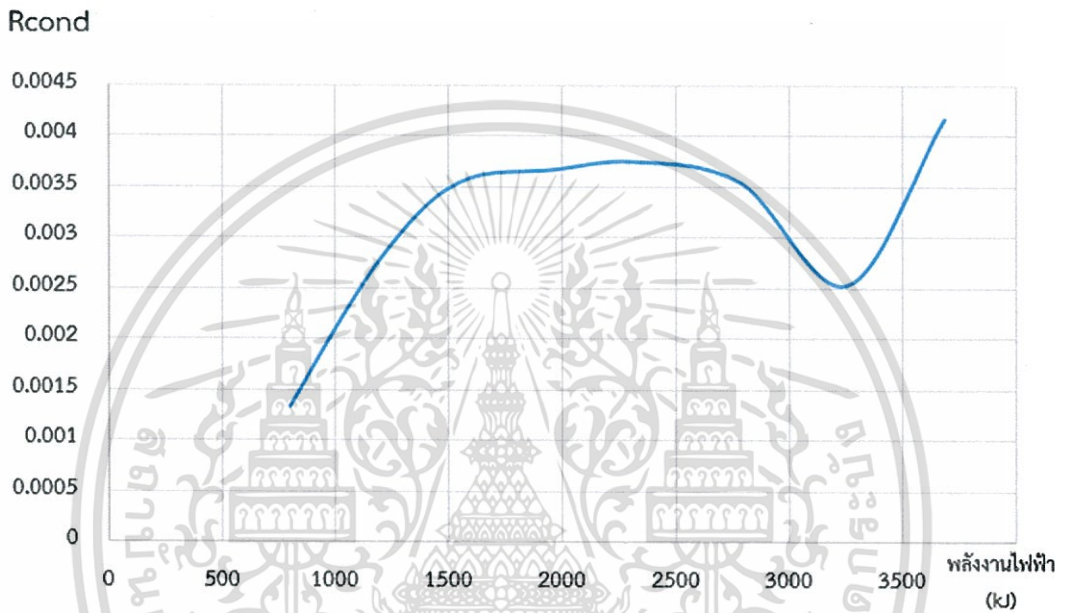
R_{cond} คือความต้านทานทางความร้อน (°C /W)

จากสมการที่ 5.9 จะสามารถหาค่าความต้านทานทางความร้อนได้โดยการแทนค่าพารามิเตอร์ R_0

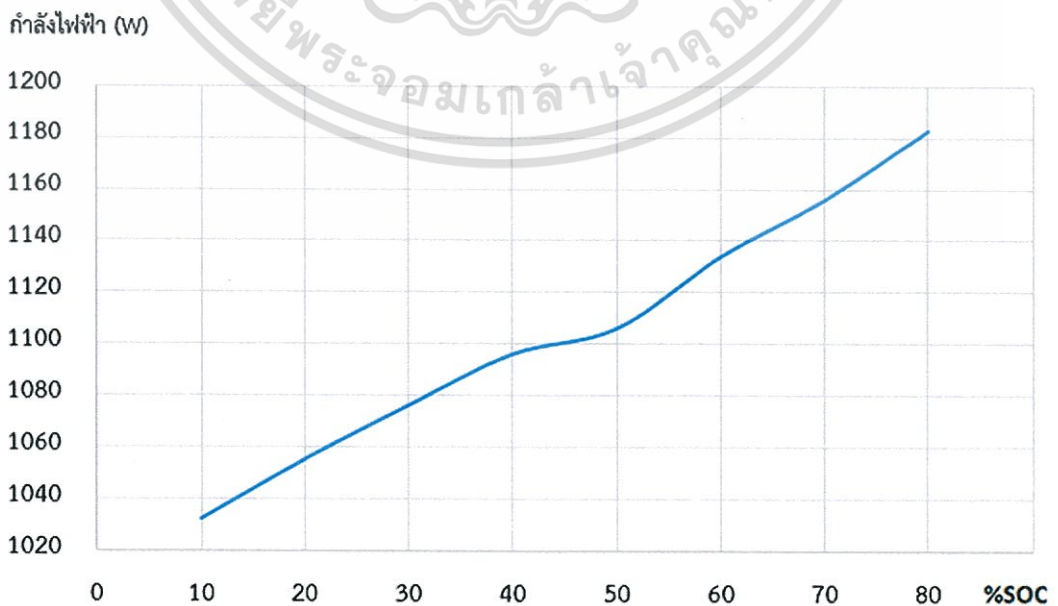
และ R_1 โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้นำผลรวมของค่าพารามิเตอร์ R_0 และ R_1 ที่คำนวณได้จากเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เช่น วิทยานิพนธ์ ค่าแบตเตอรี่ทั้ง 12 เซลล์ มาคำนวณ และค่าอุณหภูมิ T_{core} และ T_{crust} เป็นอุณหภูมิที่ SOC ใดๆ ซึ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาครั้งนี้คำนวณที่ SOC 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% และ 80% และแทนค่าความจุความร้อนจำเพาะของแบตเตอรี่ 915 J/kg. °C ซึ่งเป็นค่าที่อ้างอิงจากงานวิจัย IEEE [8] สุดท้ายจะได้ค่าความต้านทานทางความร้อนที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 5.20 โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.0014 ถึง 0.004 °C /W และกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ที่ค่า SOC ต่างๆ ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 ความต้านทานทางความร้อนที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แบตเตอรี่



รูปที่ 5.21 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ที่ค่า SOC ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้แสดงผลการทดสอบแบตเตอรี่ชนิด Li-ion ขนาดความจุ 40 แอมแปร์-ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้า 27.6 โวลต์ การทดลองเริ่มจากการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่พิกัดกระแสต่างๆ และอุณหภูมิห้องที่แตกต่าง เพื่อแสดงให้เห็นว่ากระแสที่ใช้งาน และอุณหภูมิมิมีผลต่อพลังงานของแบตเตอรี่ จากนั้นได้ทำการทดสอบแบตเตอรี่ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบพัลส์ชาร์จ (Pulse Charged) ที่พิกัดกระแส 40 แอมแปร์ เพื่อหาพารามิเตอร์ R0 และ R1 สุดท้ายได้ทำการทดสอบเพื่อหาแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ ด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าแบบกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant Current – Constant Voltage Charging) ที่กระแสพิกัด 40 แอมแปร์ ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานทางความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุป ข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนา

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาแบบจำลองทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและคุณลักษณะทางอุณหภูมิขณะอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ จากการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ พบว่าการคายประจุไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าสูงทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นสูงกว่าการคายประจุไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าสูงทำให้เกิดการสูญเสียทางความร้อน (Power loss) และส่งผลให้พลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้มีค่าลดลง

ในการหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ทำการทดสอบด้วยวิธีการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสคงที่แบบพัลส์ (Pulsed charge) โดยคำนวณค่าความต้านทานจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในช่วงพักของพัลส์ พบว่าค่าความต้านทาน R_0 มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า SOC สูงขึ้น ซึ่งความต้านทานภายใน ทั้ง R_0 และ R_1 จะส่งผลโดยตรงต่อสูญเสียทางความร้อนและทำให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในตัวต้านทานภายในของแบตเตอรี่มีค่าแปรผันตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่

ในการศึกษาคุณลักษณะทางอุณหภูมิของแบตเตอรี่นั้นจะใช้การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยนำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่มาคำนวณร่วมกับค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ทำให้ทราบค่าความต้านทานทางความร้อนของแบตเตอรี่ที่ทดสอบ ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับผลการจำลองในโปรแกรม Matlab พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี

6.2 ข้อเสนอแนะและข้อควรระวัง

1. การใช้งานแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าแตกต่างกันจะทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นต่างกัน หากใช้งานแบตเตอรี่ที่กระแสไฟฟ้าสูง อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรระวังไม่ให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงเกินค่าที่คู่มือกำหนด
2. การใช้เครื่องอัดประจุไฟฟ้าของห้องปฏิบัติการ Real lab มีข้อจำกัดในการคายประจุไฟฟ้า โดยไม่สามารถหยุดการดึงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ได้ทันที
3. ในการทดสอบควบคุมอุณหภูมิในระหว่างทำการทดลองให้คงที่ เนื่องจากอุณหภูมินั้นเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลกระทบต่อผลการทดลองของแบตเตอรี่
4. การทดสอบการอัดประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้าแต่ละครั้ง ต้องรอให้อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลดลงคงที่ก่อนที่จะทดสอบครั้งต่อไป เพื่อความแม่นยำในการวิเคราะห์ลักษณะทางอุณหพลศาสตร์

6.3 แนวทางการพัฒนา

โครงการวิจัยนี้สามารถทำการพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติม ในการออกแบบฟังก์ชันควบคุมอุณหภูมิ ขณะการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่ อีกทั้งยังสามารถประเมินค่าพลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ ซึ่งนำไปสู่ระบบจัดการแบตเตอรี่ในอนาคตต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สยามรัฐ. “Energy 4.0 บนแนวคิดประชารัฐ ต้นพลังงานอัจฉริยะพัฒนาชาติ.” [Online]. Available: <http://www.siamrath.co.th/n/4385.2559>.
- [2] จตุรงค์ ทองแกมแก้ว, จตุรัส ศรีกระจิบ, จารุพงษ์ หนูเหลือ และชญานิศ ต้นกุล. 2558. “การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] Tarun Huria, Massimo Ceraolo, Javier Gazzari, and Robyn Jackey, “High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells.” **IEEE International Electric Vehicle Conference**, April 2012. pp 1-8
- [4] Texas instruments. “Introduction to the Controller Area Network (CAN).” [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>. May 2016.
- [5] AutomationForum. “Differences between RS232 , RS422 and RS485.” [Online]. Available: <https://automationforum.in/t/differences-between-rs232-rs422-and-rs485/391>. April 2015.
- [6] โรงเรียนมหิตลวิทยานุสรณ์. “Thermodynamics.” [Online]. Available: http://www.mwit.ac.th/~t2040113/data/Thermodynamics/THERMODYNAMICS_6ed.pdf. 2012
- [7] Kirill Murashko and Juha Pyrhonen, “Three-Dimensional Thermal Model of a Lithium Ion Battery for Hybrid Mobile Working Machines: Determination of the Model Parameters in a Pouch Cell.” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, vol. 28, no. 2, April 2013. pp 335-343
- [8] Joris Jaguemont, Loic Boulon, and Yves Dube, “Characterization and Modeling of a Hybrid-Electric-Vehicle Lithium-Ion Battery Pack at Low Temperature.” **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 65, no. 1, January 2016. pp 1-14



ภาคผนวก ก.

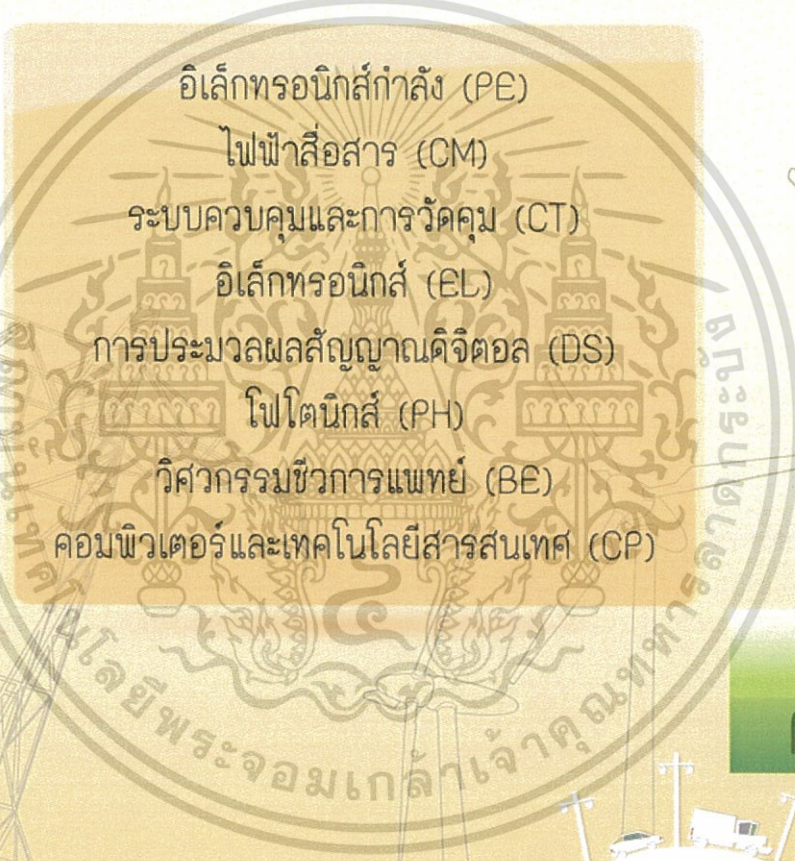
บทความวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

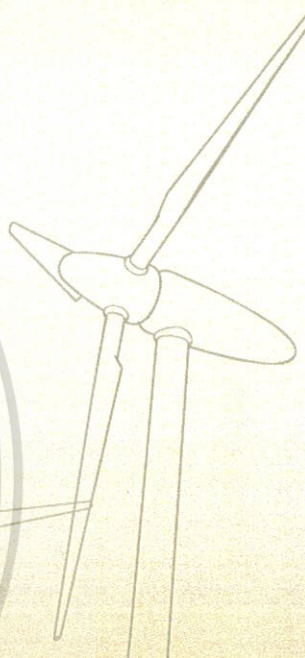
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘
The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38)



UTCC University of
the Thai Chamber
of Commerce
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย



อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
ไฟโตนิกส์ (PH)
วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)



Volume II
AEC Synergy



วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘
โรงแรมวอร์ริ์ อโยธยา คอนเวนชัน รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

PE14	การศึกษาคอนเวอร์เตอร์แบบสองทิศทางสามเฟสกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเทคนิคอินเวอร์ตีฟ เสาวนีย์ กันตะ และ บุญยัง ปลั่งกลาง	445
PE15	การศึกษาเปรียบเทียบความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในอินเวอร์เตอร์ 7 ระดับชนิดไดโอดแคสแคดป์โดยใช้เทคนิค การมอดูเลตความกว้างของพัลส์หลายคลื่นพาหะ ไพโรจน์ ทองประศรี และ ไพศักดิ์ พูลผกา	449
PE16	ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายโดยใช้อินเวอร์เตอร์โครงสร้างแอคทีฟ นิวัตรลพอยท์แคลมป์ ไพศักดิ์ พูลผกา และ ไพโรจน์ ทองประศรี	453
PE17	การศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าวงจรถิซ-ดีซี คอนเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบผสมที่มีการสวิตช์แบบนุ่มนวล โดยใช้ตัวเก็บประจุล้อยก วาทัญญู มีศรีสุข, นรงค์ฤทธิ์ เสนาจิตร และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ	457
PE18	การศึกษาวงจรสมมูลของเบตเตอร์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า ชนิกานต์ หอมมาลัย และ สุรินทร์ คำฝอย	461
PE19	อินเวอร์เตอร์แบบห้ากึ่งโดยใช้เทคนิคสเปกตรัมสำหรับควบคุมความเร็วให้คงที่เป็นอิสระต่อกันของ มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส และสองเฟส วัฒนกิจ ช้างพินิจ และ วิจิตร กิณเรศ	465
PE20	ศึกษาการควบคุมระบบจ่ายไฟแบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงร่วมกับเบตเตอร์และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ สุวัจน์ สิกบุตร, พงษ์ศิริ มุ่งพร, บุรินทร์ ขอดวงค์, อมร บุญเลี้ยง, ปฏิพัทธ์ ทวนทอง, Serge Pierfederioi และ Bernard Davat	469
PE21	การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ชนิดเหลื่อมกระแสหลายเฟสเข้ากับระบบ ไฟฟ้าหลักโดยมีโซล่าเซลล์เป็นแหล่งจ่าย พงษ์ศิริ มุ่งพร, สุวัจน์ สิกบุตร, บุรินทร์ ขอดวงค์, อมร บุญเลี้ยง, ปฏิพัทธ์ ทวนทอง และ วิบูลย์ ชื่นแขก	473
PE22	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคัปปลิงระหว่างขดลวดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย รุจิภาส เครือแก้ว, ชีร์คันย ปรมาณพล, พิสิทธิ์ ลี้วธนกุล และ นกมล วิวัชร โกศศ	477
PE23	แหล่งจ่ายกำลังแบบไฮบริดของเซลล์เชื้อเพลิงและเบตเตอร์สำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ บุรินทร์ ขอดวงค์, วัฒนา แก้วมณี, เมธิพนธ์ พัฒนศักดิ์, พงษ์ศิริ มุ่งพร, สุวัจน์ สิกบุตร และ อมร บุญเลี้ยง	481
PE24	การมอดูเลตแบบขั้วเดียวสำหรับเมทริกซ์คอนเวอร์เตอร์ ไพบุลย์ เกียรติสุขคณาธร และ สมบูรณ์ แสงวงศ์วามิชย์	485
PE25	วิธีการลดการกระเพื่อมของแรงบิดอย่างง่ายสำหรับการควบคุมแบบคาดคะเนแรงบิดล่วงหน้าของมอเตอร์ ชิงโครนัสแม่เหล็กถาวร เจษฎา ทรัพย์อุทัย และ สุขสันต์ นุ่นงาม	489

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวงจรสมมูลของแบตเตอรี่สำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า The Study of Battery Equivalent Circuit for Grid Support-Function

ชนิกานต์ หอมมาลัย และสุรินทร์ คำฝอย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง chanikarn5338@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาจอร์สมมูลของแบตเตอรี่สำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผสมผสานแบตเตอรี่เพื่อใช้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นหลักสำคัญในการใช้งานระบบแบตเตอรี่แบบผสมผสานจำเป็นต้องทราบจอร์สมมูลของแบตเตอรี่เพื่อแสดงพฤติกรรมการทำงานของแบตเตอรี่เมื่อนำมาใช้งานร่วมกัน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาจอร์สมมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน วิธีการหาจอร์สมมูลของแบตเตอรี่โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งแบบผลตอบสนองเชิงเวลาและผลตอบสนองเชิงความถี่ โดยการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และความต่างเฟสของแบตเตอรี่มาวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB / Simulink และ PSIM จากผลที่ได้สรุปว่าจอร์สมมูลที่นำเสนอมีความถูกต้องเพียงพอสามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบแบตเตอรี่แบบผสมผสานรวมทั้งระบบการตรวจวัดและแสดงผลของแบตเตอรี่ และระบบการอัดประจุในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: จอร์สมมูล, แบตเตอรี่, ระบบกักเก็บพลังงาน

Abstract

The study of battery equivalent circuit for Grid Support-Function is proposed in this paper. The hybrid battery work as one energy storage unit. The most important thing of hybrid battery system is an equivalent circuit, which represent battery behavior during supporting. The equivalent circuit of lithium ion battery is developed by using Nyquist plot. The experiment result is considered both time response and frequency response during pulse charging process. The consideration of frequency response is to analyze phase shift between voltage and current. The equivalent circuit from experimental result are validated under frequency responses by using MATLAB/ Simulink and PSIM. Moreover, the advantage of this study is to design the hybrid battery system including hybrid battery monitoring system and also hybrid battery charger in the future.

Keywords: Equivalent Circuit, Battery, Energy Storage System

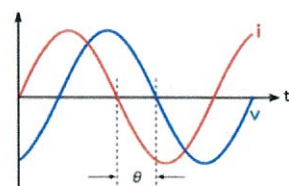
1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานได้เข้ามามีส่วนสำคัญต่อการดำเนินชีวิตการขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจของประเทศและยังมีแนวโน้มความต้องการใช้พลังงานที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า แต่เนื่องจากปัจจุบันแบตเตอรี่มีราคาที่สูงส่งผลต่อต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการลดต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานโดยการใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสาน (Hybrid Battery) คือ การใช้งานร่วมกันของแบตเตอรี่ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ก่อนที่จะนำแบตเตอรี่แต่ละชนิดมาใช้งานแบบผสมผสานนั้น จำเป็นต้องทราบจอร์สมมูลและพารามิเตอร์ภายในของแบตเตอรี่ [1] [3] เพื่อหาการทำงานร่วมกันของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ยังสามารถนำจอร์สมมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบผสมผสานที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคนิคในการหาจอร์สมมูล

การหาจอร์สมมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่จะใช้หลักการ Electrochemical Impedance Spectroscopy : EIS [2] โดยการกระตุ้นด้วยสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (sine wave) เพื่อดูผลตอบสนองของสัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วแบตเตอรี่ในช่วงความถี่ที่ทดลอง จากนั้นนำรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 1 โดยพบว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีมุมต่างเฟส (Phase Shift) ซึ่งมุมต่างเฟสนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ โดยสมการที่ 1 แสดงการหาค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ในรูปของขนาดและมุมต่างเฟส ในการหาจอร์สมมูลและค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่จะใช้แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist plot) ในการวิเคราะห์

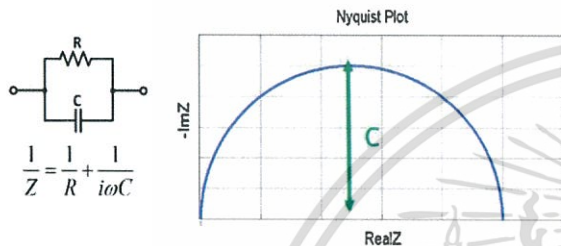


รูปที่ 1 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{V\angle 0^\circ}{I\angle \theta} = |Z_m|\angle -\theta \quad (1)$$

แผนภาพไนควิสต์เป็นการแสดงข้อมูลของอิมพีแดนซ์ โดยแกน X จะแสดงค่าส่วนจริง และแกน Y จะแสดงค่าส่วนจินตภาพ ในแผนภาพไนควิสต์ยังสามารถแสดงทั้งขนาดและมุมเฟส โดยที่ขนาดของอิมพีแดนซ์แสดงด้วยเวกเตอร์ขนาด $|Z|$ ตัวอย่างแผนภาพไนควิสต์ของวงจร RC ที่ต่อขนาดกัน โดยมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลม 1 รูป แสดงถึงวงจรนี้มีค่าคงที่เวลา (Time constant) ค่าเดียว ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพไนควิสต์ของวงจร RC

3. การออกแบบวงจร

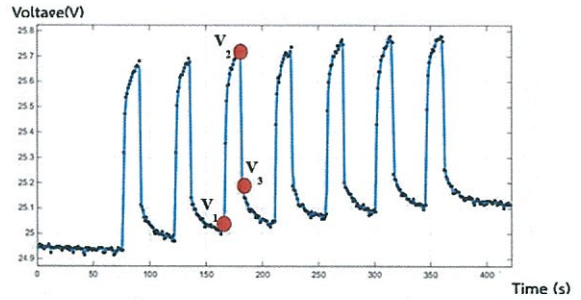
การทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาพารามิเตอร์และวงจรสมมูลของแบตเตอรี่จะใช้วิธีการวิเคราะห์ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain Response) วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น และวิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain Response) เป็นวิธีที่ใช้หาองค์ประกอบของวงจรสมมูลภายในแบตเตอรี่ โดยวิธีการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีนี้สามารถทดสอบได้กับแบตเตอรี่ที่กัดใดๆ เนื่องจากเป็นกระบวนการหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ภายในวงจรสมมูล

3.1 การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเชิงเวลา

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา [4] ได้ทำการทดลองโดยอัดประจุและคายประจุแบบพัลส์ (Pulse Charge) ที่พิคคกระแส เพื่อดูผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบตเตอรี่ รูปที่ 3 แสดงวงจรการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา ประกอบด้วยเครื่องอัดประจุไฟฟ้าต่อกับแบตเตอรี่ ขณะทำการทดลองจะใช้ออสซิลโลสโคปวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่



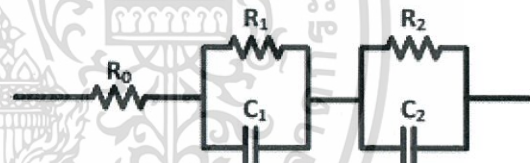
รูปที่ 3 วงจรทดสอบแบตเตอรี่เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่กับเวลา

จากนั้นจึงนำข้อมูลมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลา ดังรูปที่ 4 ในช่วงอัดประจุไฟฟ้านั้นสามารถหาค่าความต้านทานโดยรวมของแบตเตอรี่ $R_0+R_1+R_2$ และช่วงพักการอัดประจุไฟฟ้า สังเกตได้ว่าแรงดันตกทันที ซึ่งเป็นผลจากพารามิเตอร์ R_0 แล้วทำการหาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ R_0 จากสมการที่ 3 และค่าพารามิเตอร์ R_1+R_2 จากสมการที่ 5

วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา (Time Domain) ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์บางค่าได้ จึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Domain) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 5 วงจรสมมูลจากการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงเวลา

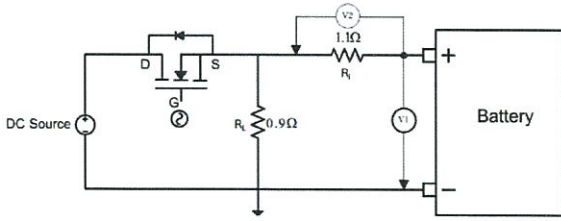
$$R_0 = \frac{V_2 - V_1}{I} \quad (3)$$

$$R_0 + R_1 + R_2 = \frac{V_2 - V_1}{I} \quad (4)$$

$$R_1 + R_2 = (R_0 + R_1 + R_2) - R_0 \quad (5)$$

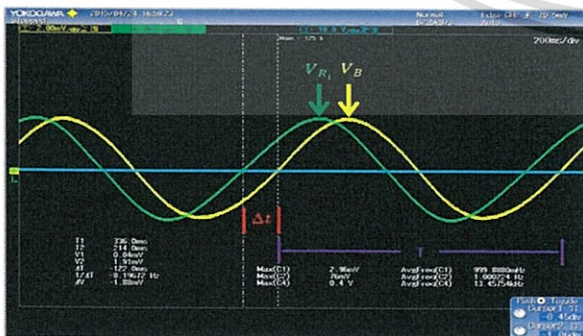
3.2 การทดลองเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่นั้นได้ทำการทดลองโดยวิธีการอัดประจุและคายประจุแบบพัลส์ (Pulse Charge) ในช่วงความถี่ 20 mHz – 1000 Hz แบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบคือแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนขนาดพิคค 20Ahr แรงดัน 3.3 V รูปที่ 6 แสดงวงจรทดสอบแบตเตอรี่เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Source) มอสเฟต ออสซิลโลสโคป ซิกแนลเจเนอเรเตอร์ ตัวต้านทานสำหรับตรวจจذبกระแสไฟฟ้า (R_c) และตัวต้านทานสำหรับแบ่งแรงดัน (R_d)



รูปที่ 6 วงจรทดสอบเบตเตอร์

หลักการในการทำงานของวงจรทดสอบเบตเตอร์ โดยต่อแหล่งจ่าย สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับมอสเฟต เพื่อควบคุมการไหลของกระแสให้เป็นสัญญาณไซน์ เพื่อให้สัญญาณที่ทดสอบเป็นแบบพัลส์ ขณะทำการทดสอบจะใช้ซอฟต์แวร์สโคปในการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมเบตเตอร์ และสัญญาณรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเบตเตอร์จากการวัดสัญญาณคร่อมตัวต้านทาน R_1 ซึ่งทำหน้าที่เป็นเป็นตัวตรวจจับกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้จะสามารถนำค่าความต่างเฟสวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ภายในของเบตเตอร์ในแต่ละความถี่ โดยค่า R_1 ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะต้องไม่กระทบต่อผลการทดลอง ในบทความนี้ได้ใช้ค่า R_1 เท่ากับ 1.1 โอห์ม ส่วนค่า R_2 จะทำหน้าที่ในการแบ่งแรงดันไฟฟ้า และช่วยให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่คร่อมเบตเตอร์เป็นรูปไซน์ตลอดช่วงความถี่ 20mHz – 1000Hz ก่อนการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่ได้ทำการตรวจสอบผลของวงจรโดยวัดความต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโหนดความต้านทาน และพบว่าความต่างเฟสในช่วง 50mHz – 10kHz เท่ากับ 0 องศา ซึ่งสรุปได้ว่าวงจรนี้ไม่มีผลต่อความต่างเฟสในช่วงความถี่ที่ใช้ในการหาพารามิเตอร์ การเตรียมสภาวะก่อนการทดสอบเบตเตอร์นั้นจะต้องควบคุมให้เบตเตอร์อยู่ในอุณหภูมิห้องก่อนที่จะทดสอบในช่วงความถี่แต่ละครั้ง รูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่เข้าของเบตเตอร์ (V_B) และแรงดันไฟฟ้าคร่อมความต้านทาน R_1 (V_{R1}) โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของเบตเตอร์สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2



รูปที่ 7 ตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์

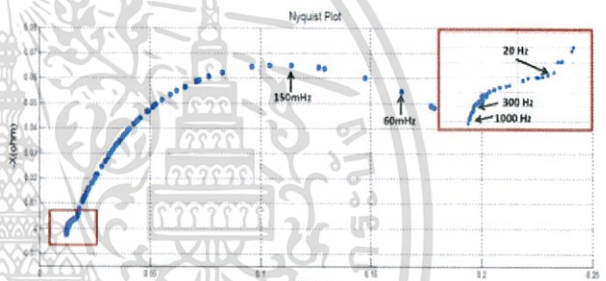
$$Z = \frac{V_B \times R_1}{V_{R1}} \times (\cos \theta + j \sin \theta) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

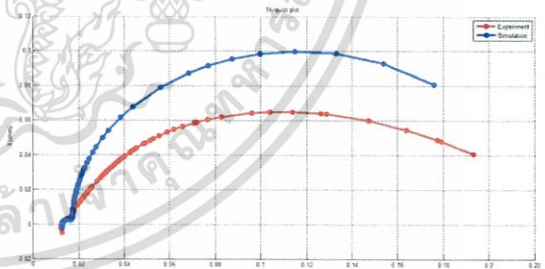
4. ผลการทดลอง

4.1 วิธีการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่

การวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่โดยทำการทดลองด้วยการอัดประจุเบตเตอร์ชนิดลิเทียมไอออนพิกัด 20 Ahr แรงดันไฟฟ้า 3.3 V ในช่วงความถี่ 20mHz – 1000Hz แล้วทำการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมตัวต้านทาน R_1 และวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันคร่อมเบตเตอร์ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างเฟสและค่าอิมพีแดนซ์ภายในของเบตเตอร์ในแต่ละความถี่ จากผลการทดลองนำมาวาดแผนภาพไนควิสต์ ดังรูปที่ 8 จากแผนภาพไนควิสต์พบว่าเกิดรูปครึ่งวงกลม 2 ลูก โดยที่ลูกใหญ่เกิดที่ความถี่ต่ำ 20mHz – 20Hz ซึ่งเป็นผลของ R_2, C_2 โดยเฟสของกระแสนำหน้าแรงดันไฟฟ้า ส่วนครึ่งวงกลมลูกเล็กเกิดที่ความถี่สูง 20Hz – 300Hz ซึ่งเป็นผลของ R_1 และ C_1 นอกจากนี้ในช่วงความถี่ 400Hz – 1000Hz นั้นแรงดันไฟฟ้านำหน้ากระแส ซึ่งเป็นผลของ L

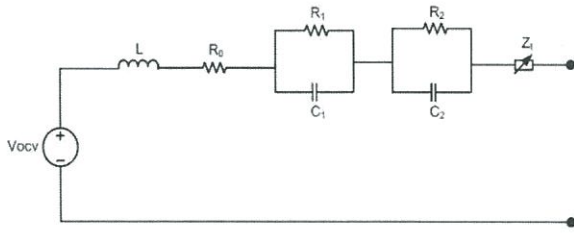


รูปที่ 8 แผนภาพไนควิสต์จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่



รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการ Simulation จาก PSIM

นำผลที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับผลการ Simulation จากโปรแกรม PSIM แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าผลการทดลองจริงมีลักษณะรูปกราฟคล้ายคลึงกับผลการ simulation แต่ค่าในแต่ละความถี่มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองจริง ซึ่งเหตุนี้ทำให้ทราบว่าต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ตัวอื่นต่ออยู่ด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ผลการ Simulation มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองจริง ทำให้สามารถวิเคราะห์เป็นวงจรสมมูลของเบตเตอร์ได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 วงจรสมมูลของลิเทียมไอออนแบตเตอรี่

จากการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ภายในแบตเตอรี่ จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $R_0 = 0.00124\Omega$, $R_1 = 0.00203\Omega$, $R_2 = 0.1845\Omega$, $C_1 = 1.234F$, $C_2 = 24.464F$ โดย Z_l ก็คืออิมพีแดนซ์ที่อยู่ในฟังก์ชันของความถี่และต่ออนุกรมกับวงจรสมมูลแบบ Two-RC-L Branch Equivalent

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการหาวงจรมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยแบ่งการทดลองเป็นการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของเวลา (Time domain) และการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์เชิงความถี่ (Frequency domain) จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าวงจรมูลของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนประกอบไปด้วยตัวต้านทานขนานกับตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันอยู่ 2 ชุด ต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทานและค่าอิมพีแดนซ์ที่แปรผันกับความถี่ ซึ่งสามารถทำการพัฒนาต่อขยายเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่นการนำแบตเตอรี่หลายชนิดมาต่อร่วมกัน (Hybrid Battery) ไปลดต้นทุนในส่วนของบริษัทเก็บพลังงาน โดยอาจออกแบบระบบเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดอื่นที่มีต้นทุนต่ำกว่ามาต่อร่วมกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยในช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ต่ำสามารถใช้แบตเตอรี่ชนิดที่รับกระแสไฟฟ้าต่ำในการเก็บพลังงาน แต่ในช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงอาจใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่รับกระแสไฟฟ้าสูงในการเก็บพลังงาน นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาออกแบบต่อไปในส่วนของการชาร์จประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ (Hybrid Battery Charger) เพื่อที่จะสามารถใช้กับไฮบริดแบตเตอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ดังกล่าวไม่สามารถใช้เครื่องอัดประจุแบบทั่วไปในการอัดประจุได้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนาต่อไป และเมื่อมีไฮบริดแบตเตอรี่แล้ว และมีเครื่องอัดประจุสำหรับไฮบริดแบตเตอรี่ ส่วนต่อไปที่จำเป็นสำหรับการไฮบริดแบตเตอรี่คือระบบ BMS (Battery Monitoring System) ซึ่งเป็นระบบที่คอยบริหารจัดการและตรวจสอบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาแล้วแต่ต้องอาศัยวงจรมูลทั้งสิ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัย ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) การทวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2557 ของชอบุคุณ รศ.ดร. สุรินทร์ คำฝอย และ รศ.ประกาย ไพรสวรรณา ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิชาการ ดูแลเอาใจใส่ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินงาน ขอขอบคุณ คุณภูมิพัฒน์ จำปีทอง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือทางด้านการออกแบบการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลอง และความช่วยเหลือทางด้านการสั่งซื้ออุปกรณ์ รวมถึงนายจตุรงค์ ทองแก้ว นายจตุรัส ศรีกระจิบ นายจรรยา หนูเหลือ และนางสาวชฎานิส ดันกุล ในห้องปฏิบัติการ Renewable Energy Application Laboratory (REAL) ที่ทำให้งานวิจัย นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmad RAHMOUN; Helmut BIECHL, "Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams" *University of Applied Sciences Kempten*
- [2] Marie-Georges Olivier; Mireille Poelman, "Use of Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) for the Evaluation of Electrocoatings Performances" *University of Mons, Materials Science Department, Materia Nova Research Centre, Mons, Belgium*
- [3] Markus Einhorn; Valerio Conte; Christian Kral; J'urgen Fleig, "Comparison of Electrical Battery Models using a Numerically Optimized Parameterization Method" *Vienna University of Technology Institute of Chemical Technologies and Analytics, Austria*
- [4] Liao Chenglin; Li Huiju; Wang Lifang, "A Dynamic Equivalent Circuit Model of LiFePO₄ Cathode Material for Lithium Ion Batteries on Hybrid Electric Vehicles" *Chinese Academy of Sciences Beijing, China*
- [5] จตุรงค์ ทองแก้ว, จตุรัส ศรีกระจิบ, จรรยา หนูเหลือ, และนางสาวชฎานิส ดันกุล, "การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า"(2557). วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวชนิกานต์ หอมมาลัย
วัน-เดือน-ปี เกิด	27 กันยายน พ.ศ.2534
ที่อยู่	59/28 หมู่บ้านโชคประชา ถนนเลียบบคลองประปา ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ.2557 สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	แบตเตอรี่
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
ปัจจุบัน	วิศวกรระดับ 5 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
บทความวิชาการ	

[1] ชนิกานต์ หอมมาลัย และสุรินทร์ คำฝอย “การใช้งานแบตเตอรี่แบบผสมผสานสำหรับระบบกักเก็บพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้า” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 38 (EECON 38) จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2558

[2] Chanikarn Hommalai, Surin Khomfoi “Battery Monitoring System by Detecting Dead Battery Cells”, ECTI-CON 2015, Hua Him, Thailand, 24-27 June 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้