การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

นายณัฐวุฒิ สมพงษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

ELECTRICAL TAB DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE TO INCREASE EFFICIENCY BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD

NATTHAWUT SOMPHONG

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Docter of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร กิณเรศ)
ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. เผด็จ เผ่าละออ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร. กีรติ ชยะกุลศีรี)
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นิคม กลมเกลี้ยง)
กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชโลธร ธรรมแท้)
กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐวุฒิ สมพงษ์ : การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ (ELECTRICAL TAB DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE TO INCREASE EFFICIENCY BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 139 หน้า.

คำสำคัญ: แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน/การออกแบบแท็บ/ยานยนต์ไฟฟ้า/อุณหภูมิ/วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับจำลองผลการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ จากนั้นทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการจำลอง พร้อมทั้งออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกให้เหมาะสมกับอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรักษาและควบคุมอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พร้อมทั้งยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น

จากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ และแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD พบว่า เมื่ออัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น โดยจุดที่มีปริมาณการสร้างความร้อนและมีอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ทั้ง 2 รูปแบบอยู่ที่แท็บไฟฟ้าและบริเวณที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน (%) ของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวแกนแบตเตอรี่ระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 2 และ 4C-rate มีค่าเท่ากับ 1.72, 0.36 และ 0.41% ตามลำดับ และสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกมีค่าความคลาดเคลื่อน (%) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate เท่ากับ 0.88, 1.63 และ 2.07% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองและผลการทดสอบจริงด้วยอัตราการคายประจุไฟฟ้าแต่ละ C-rate มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกภายใต้ปริมาตรที่เท่ากันกับแท็บไฟฟ้าต้นแบบ พบว่า ความกว้างของแท็บไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและการลดระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนแผ่นตัวรับกระแส โดยการเปลี่ยนตำแหน่งและการเพิ่มจำนวนแท็บไฟฟ้าจะทำให้ค่าความต้านทานภายในแกนแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ต้นแบบและแบตเตอรี่ที่ออกแบบใหม่ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงพบว่า ที่ความ

กว้างของแบตเตอรี่เท่ากับ 40, 50 และ 75 mm. ทำให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับ -3.50, -2.32, และ 4.63 % ตามลำดับ และสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกพบว่า ที่จำนวนแท็บไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4, 6, 10 ,14 และแท็บเต็มรูปแบบ ทำให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับ 4.43, 9.45, 10.13, 10.80, 11.01 และ 11.58% ตามลำดับ จากผลการจำลองที่แสดงข้างต้นทำให้ทราบว่า ขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

NATTHAWUT SOMPHONG : ELECTRICAL TAB DESIGN OF LITHIUM-ION BATTERIES FOR ELECTRIC VEHICLE TO INCREASE EFFICIENCY BY 3-D FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. PADEJ PAO-LA-OR, Ph.D., 139 PP.

Keywords: lithium-ion batteries/tab design/electric vehicle/thermal model/3-d finite element method

Electrical tab design of lithium-ion batteries for electric vehicles aims to develop a 3D finite element program for simulating the temperature distribution effect inside pouch and cylindrical lithium-ion batteries under a constant discharge rate. After that, actual samples of pouch and cylindrical lithium-ion batteries were tested to compare obtained results with simulation output. In addition, the size, the position and number of electrical tabs for both types of batteries were also designed to be suitable for a constant current discharge rate in order to increase the capability of maintaining and controlling the internal temperature lithium-ion battery along with having long lifecycles.

From the temperature distribution simulation of batteries at various constant discharge rates, namely 1, 2, 4, and 8C-rate for pouch-type and 1, 3, and 5C-rate for cylindrical-type, the results were expressed that the average temperature on the battery surface increased once the constant discharge rate increased at a DOD of 100%. The points with the highest heat generation and temperature of both types of batteries are at the electrical tab and the region contacted with the electrical tab. When comparing the average temperature error (%) between the simulation and the test results of actual samples on the surface of battery core using thermocouple sensor with 1, 2, and 4C-rates for pouch batteries were equal to 1.72, 0.36, and 0.41%, respectively. Regarding cylindrical batteries, the error values (%) under constant discharge rates of 1, 3, and 5C-rate were respectively 0.88, 1.63, and 2.07%. The gained data was presented that the error values of the simulation and actual test results of each C-rate were similar.

For designing the size, the position and number of electrical tabs under the same volume as the prototype electrical tabs, the results show that increasing the electrical tabs width and reducing the electrons flow distance on the current collector by changing the position and increasing number of electrical tabs contribute to the diminish of the internal resistance at the battery core. As a result, the battery temperature will be also decreased. Furthermore, for the temperature reduction comparison between the prototype and the newly designed batteries, the pouch

lithium-ion batteries temperature was respectively decreased to -3.50, -2.32, and 4.63 % once the battery widths were applied at 40, 50, and 75 mm. For cylindrical-type with the number of electrical tabs being 2, 4, 6, 10, 14 and full tab, the temperature was decreased by 4.43, 9.45, 10.13, 10.80, 11.01 and 11.58%, respectively. As mentioned above, the results could be concluded that the size, the position and number of electrical tabs affected the change of lithium-ion batteries temperature.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Electrical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature .....
Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านวิธีการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลผู้มีพระคุณทุกท่าน ดังนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาที่ดีในทุกเรื่อง ซึ่งเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิต พร้อมทั้งแนะนำวิธีการอันเป็นประโยชน์สำหรับการดำเนินงานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแนะนำวิธีการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร กิณเรศ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.กีรติ ชยะกุลศีรี หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับผลงานวิจัยอย่างดียิ่ง

รองศาสตราจารย์ ดร.นิคม กลมเกลี้ยง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเสมอมา

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ กลุ่ม FEM และบัณฑิตศึกษาทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือดูแลและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนทุนการศึกษาให้แก่ผู้วิจัยตลอดทั้งหลักสูตรการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครูทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเกษม สมพงษ์ และคุณแม่เนตรนภา สมพงษ์ ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

นายณัฐวุฒิ สมพงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....ค
กิตติกรรมประกาศ.....จ
สารบัญ.....ฉ
สารบัญตาราง.....ฌ
สารบัญรูป.....ญ
บทที่
1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....4
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5
2.1 บทนำ.....5
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5
2.3 สรุป.....12
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....13
3.1 บทนำ.....13
3.2 แบตเตอรี่.....13
3.2.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....17
3.2.2 ลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....19
3.2.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....20
3.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....23
3.3.1 ความร้อน.....23
3.3.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน.....26
3.4 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....27

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 สรุป.....35
4 การคำนวณและการเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก.....36
4.1 บทนำ.....36
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก.....36
4.3 การคำนวณการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ณ เวลาต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....37
4.3.1 การออกแบบอิลลิเมนต์สำหรับพื้นที่ของปัญหา.....37
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....39
4.3.3 การสร้างสมการระดับอิลลิเมนต์.....40
4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่.....49
4.3.5 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....49
4.3.6 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย.....50
4.4 วิธีการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก.....50
4.5 สรุป.....52
5 ผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก.....53
5.1 บทนำ.....53
5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลการกระจายอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....53
5.3 รายละเอียดขนาดและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....56
5.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงของการกระจายอุณหภูมิสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่.....59
5.4.1 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงสำหรับการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (pouch cell) เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่.....59
5.4.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงสำหรับการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก (cylindrical cell) เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่.....72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 สรุป....87

6 การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก....88

6.1 บทนำ....88

6.2 การออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....88

6.2.1 วิธีการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....88

6.2.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้า....91

6.2.3 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้า....93

6.3 การออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....96

6.3.1 วิธีการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบบทรงกระบอก....96

6.3.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิจากการออกแบบแท็บไฟฟ้า สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....99

6.4 สรุป....102

7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....103

7.1 สรุปผลการวิจัย....103

7.2 ข้อเสนอแนะ....104

รายการอ้างอิง....105

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก....111

ภาคผนวก ข....117

ประวัติผู้เขียน....139

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่าง ๆ....18
3.2 ลักษณะรูปร่างของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่าง ๆ....19
3.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบตเตอรี่แต่ละประเภท....21
3.4 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์....29
3.5 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งจุดต่อ....30
5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง และทรงกระบอก....57
5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบถุงระหว่างผลการจำลอง และผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนแซอร์เทอร์โมคัปเปิลภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD)....65
5.3 ค่าอุณหภูมิจากผลการจำลองภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุต่าง ๆ ที่ 100%DOD....72
5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบทรงกระบอกระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนแซอร์เทอร์โมคัปเปิลภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD)....78
5.5 ค่าอุณหภูมิจากผลการจำลองภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุต่าง ๆ ที่ 100%DOD....87
6.1 ขนาดแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงในกรณีต่าง ๆ....91
6.2 อุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....93
6.3 ขนาดและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกในกรณีต่าง ๆ....96
6.4 อุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....98
6.5 อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก เมื่อเพิ่มจำนวนของแท็บไฟฟ้า....102

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกชนิด NMC ที่อัตรา 0.5C ถึง 5C....6
2.2 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ Galerkin....7
2.3 ลักษณะของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบในตำแหน่งต่าง ๆ ของแบตเตอรี่....7
2.4 อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ที่มีแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบในตำแหน่งต่าง ๆ....8
2.5 การจัดระยะห่างของเซลล์แบบ arithmetic ratio สำหรับโมดูลแบตเตอรี่....9
2.6 การจัดระยะห่างของเซลล์แบบ geometric ratio สำหรับโมดูลแบตเตอรี่....9
2.7 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุกับเวลา (a) จัดเรียงแบบ arithmetic ratio (b) จัดเรียงแบบ geometric ratio....10
2.8 เปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ที่การจัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกัน....10
2.9 เปรียบเทียบความแตกต่างแรงดันสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ที่การจัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกัน....11
2.10 การวางแท็บขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงรูปแบบต่าง ๆ....11
2.11 เปรียบเทียบความแตกต่างแรงดันสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ที่จัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกัน....12
2.12 การวางแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงรูปแบบต่าง ๆ....12
3.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่....13
3.2 ตัวอย่างแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในประเทศไทย....15
3.3 ตัวอย่างแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (ถ่านอัลคาไลน์)....15
3.4 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ....17
3.5 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน....18
3.6 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน....20
3.7 ปริมาตรควบคุมและทิศทางการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ....23
3.8 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 จุดต่อเมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า....29
3.9 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า....30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....38
4.2 ส่วนประกอบภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....38
4.3 แบบจำลองส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ด้วยโปรแกรม Solidworks....38
4.4 การแบ่งจุดต่อและอิลลิเมนต์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) และทรงกระบอก (Cylindrical cell) ตามลำดับ....38
4.5 แผนภาพการสร้างความร้อนภายในแกนของแบตเตอรี่....44
4.6 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรการคายและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....51
4.7 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....51
4.8 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรการคายและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบบทรงกระบอก....52
4.9 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....52
5.1 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผล....54
5.2 รายละเอียดและพิกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง....56
5.3 รายละเอียดและพิกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก....57
5.4 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ของ $LiNiMnCoO_2/C_6$ (NMC)....58
5.5 ค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ตามลำดับ....58
5.6 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ที่ 0%DOD...60
5.7 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตรา การคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 5%DOD....60
5.8 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตรา การคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 10%DOD....61
5.9 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตรา การคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD....61
5.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตรา การคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD....62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.11 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 100%DOD.....62
5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่างๆ.....63
5.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง.....64
5.14 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 1%DOD.....66
5.15 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 5%DOD.....67
5.16 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 10%DOD.....67
5.17 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 25%DOD.....69
5.18 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 50%DOD.....69
5.19 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อนภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8 C-rate ที่ 100%DOD.....71
5.20 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ที่ 0%DOD.....73
5.21 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับที่ 5%DOD.....74
5.22 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับที่ 10%DOD.....74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.23 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD.....75

5.24 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD.....75

5.25 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 100%DOD.....76

5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบบทรงกระบอกและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุ ไฟฟ้าต่าง ๆ.....77

5.27 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก.....78

5.28 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลาง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 1%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้า ด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate.....80

5.29 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลาง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 5%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้า ด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate.....81

5.30 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลาง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 10%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้า ด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate.....82

5.31 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลาง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 25%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้า ด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate.....83

5.32 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลาง ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 50%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้า ด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate.....84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.33 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว ผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน และพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกตามลำดับ ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ที่ 100%DOD.....85
6.1 กราฟแสดงความต้านทานทั้งหมดภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงแต่ละ C-rate.....89
6.2 ระยะทางของอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุดภายในตัวรับกระแส เมื่อคายประจุไฟฟ้า.....90
6.3 รายละเอียดขนาดภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง.....91
6.4 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ.....92
6.5 ตำแหน่งการวางแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงในกรณีต่าง ๆ.....94
6.6 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ.....95
6.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามแนวความยาวของแผ่นตัวรับกระแสไฟฟ้า.....97
6.8 ค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก แต่ละ C-rate.....97
6.9 ตำแหน่งการจัดวางแท็บไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Solidworks จำนวน 2, 4, 6, 10, 14 และแท็บเต็มรูปแบบ (Full tab) ตามลำดับ.....99
6.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก เมื่อออกแบบจำนวนแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ.....100

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญชิ้นหนึ่งของยานพาหนะที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้ากักเก็บพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ขั้วบวก (แคโทด) ขั้วลบ (แอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานหรือเกิดการคายประจุไฟฟ้า ขั้วลบหรือขั้วแอโนดจะเป็นขั้วที่เกิดปฏิกริยาเคมีส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น) และขั้วบวกหรือขั้วแคโทดเป็นขั้วที่เกิดปฏิกริยาเคมีที่รับอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดักชั่น) โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น จะวิ่งผ่านลวดโลหะก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยอิเล็กโทรไลต์จะต้องเป็นสารละลายที่ไม่นำอิเล็กตรอน แต่มีหน้าที่ส่งผ่านไอออนที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าแบตเตอรี่จะหมด เมื่อพิจารณาประเภทของแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (Primary batteries) หรือแบตเตอรี่แบบใช้ได้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง และแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (Secondary batteries) หรือแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าจะเป็นแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของขั้วแคโทดและแอโนดที่แตกต่างกัน

แบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมสำหรับใช้งานในยานพาหนะไฟฟ้า ได้แก่ แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด (Lead Acid Battery) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาถูก แต่มีน้ำหนักมาก เสื่อมสภาพเร็ว และตะกั่วเป็นสารที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้เร็ว แต่แบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อเสียคือ ราคาวัตถุดิบและราคาการผลิตที่สูง อีกทั้งยังมี Memory effect ซึ่งหมายถึงสภาวะที่แบตเตอรี่เสื่อมเนื่องจากการถูกใช้งานไม่หมดก่อนถูกอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้ง มีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้ามากและแคดเมียมเป็นสารมีพิษที่ค่อนข้างร้ายแรง แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดร์ด (Ni-MH Battery) เป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานสูง แต่มีราคาสูงและมีปัญหา Memory Effect นอกจากนี้หากพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ยังมีแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion Battery) ที่มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นทั้งในเชิงปริมาตร (Volumetric energy density) และเชิงมวล (Gravimetric energy density) (นงลักษณ์ มีทอง, 2553)

เมื่อพิจารณาถึงสารเคมีที่นำมาผลิตแบตเตอรี่ประเภทนี้ พบว่า ลิเทียมเป็นธาตุลำดับที่ 3 ในตารางธาตุ และมีสมบัติเป็นโลหะ ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาที่สุด นอกจากนี้ ลิเทียมยังมีศักย์ไฟฟ้าทางเคมีที่มาก รวมถึงการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่มีความว่องไว จากสมบัติต่าง ๆ ของลิเทียม เมื่อนำมาทำเป็นแบตเตอรี่จึงได้แบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานได้สูงและจ่ายพลังงานได้มาก

แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมรถยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า เช่น รถยนต์ไฮบริด รถยนต์ปลั๊กอินไฮบริด รถยนต์ไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีความพยายามนำแบตเตอรี่ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ตัวอย่างเช่น ด้านอวกาศ ด้านการทหาร ด้านการไฟฟ้าและสาธารณูประโภคและใช้สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน แบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะมีความแตกต่างกันในด้านต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้สร้างแบตเตอรี่ โครงสร้างของแบตเตอรี่ ความจุ และค่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ชนิดนั้น ๆ รวมไปถึงลักษณะการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ อัตราการคายประจุหรืออัตราการอัดประจุ (C-rate) ปริมาณประจุของแบตเตอรี่ (%SOC) ณ ขณะนั้น ส่วนอายุการใช้งานแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับความรวดเร็วในการดึงพลังงานไปใช้ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ รวมไปถึงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น มีความไวต่ออุณหภูมิในการทำงานสูง (Hu et al., 2016) ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมักจะสูญเสียพลังงานอย่างรุนแรงภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าศูนย์องศาเซลเซียส และต้องเผชิญกับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นจากการระบายความร้อนที่อุณหภูมิสูงมาก (Feng et al., 2015) ดังนั้น จำเป็นต้องมีระบบการจัดการความร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิของระบบ ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดทั้งระบบ โดยการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น ปกติแล้วจะอธิบายในรูปของสมการอนุพันธ์ (Differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (Integral equation) เป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นตรง (Exact solution) ได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สำหรับวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (Finite element method : FEM) โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติในการดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งเป็นที่นิยมมากสำหรับงานวิจัยในปัจจุบัน ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากโนด โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ นิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ก็คือ สามารถแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในขอบเขตที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายแบบผสมกันอยู่ในระบบ เพราะฉะนั้นระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อใช้จัดการหรือออกแบบระบบควบคุมให้รักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดทั้งระบบต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับจำลองผลการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) และทรงกระบอก (Cylindrical cell) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้า (Discharge) แบบคงที่ และการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการจำลอง พร้อมทั้งออกแบบขนาด ตำแหน่ง

และจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกให้เหมาะสมกับอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ ที่สามารถรักษาและควบคุมอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พร้อมทั้งยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับจำลองผลการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ที่แตกต่างกันให้สามารถคำนวณได้ถูกต้องและแม่นยำ

1.2.2 ทำการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการจำลอง

1.2.3 ออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ให้เหมาะสมกับอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ ที่สามารถรักษาและควบคุมอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อเพิ่มความสามารถในการคายประจุไฟฟ้า พร้อมทั้งยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 การออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม มีผลต่อการรักษาและควบคุมอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 พิจารณาอัตราการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยกระแสแบบคงที่

1.4.2 ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองของแบตเตอรี่บางส่วน อ้างอิงจากเอกสารการวิจัยที่มีความน่าเชื่อถือ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 พัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

1.5.2 วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบบ 3 มิติ

1.5.3 ดำเนินการทดลอง โดยการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลการจำลอง

1.5.4 ออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ให้เหมาะสมกับอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

1.6.2 ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ตลอดจนสามารถนำไปใช้เป็นสื่อประกอบการเรียนและการสอนได้

1.6.3 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการออกแบบขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ให้เหมาะสมกับอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ ที่สามารถรักษาและควบคุมอุณหภูมิภายในของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เพื่อเพิ่มความสามารถในการคายประจุไฟฟ้า พร้อมทั้งยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้มากขึ้น

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย 7 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย สมมุติฐาน ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัยตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 เสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ แบตเตอรี่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก การคำนวณการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ณ เวลาต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ และวิธีการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

บทที่ 5 กล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. อธิบายถึงเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองและทดสอบการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่

ภาคผนวก ข. แสดงถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

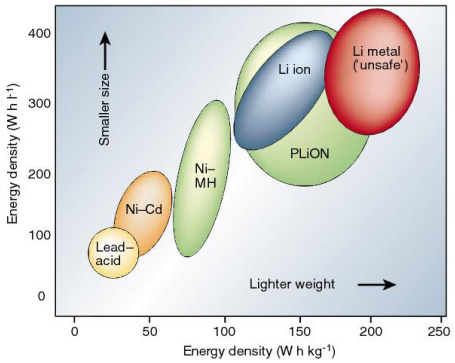
วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาโปรแกรมจำลองผลการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่างๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE และ ScienceDirect เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้วิเคราะห์และพิจารณาผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ดังนี้

Bernardi et al. (1984) ได้พัฒนาสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการเกิดความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่ เพื่อใช้สำหรับออกแบบและจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยความร้อนหรืออุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นนั้น มาจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนแปลงตามค่าอุณหภูมิและความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโลหะตัวนำ

Tarascon and Armand (2001) ได้วิเคราะห์ถึงความสามารถในการกักเก็บพลังงาน (Wh/kg และ Wh/l) ของแบตเตอรี่ต่างๆ ได้แก่ ชนิดตะกั่ว-กรด (Lead-Acid) ชนิดนิกเกิลแคดเมียม (Ni-Cd) ชนิดนิกเกิล เมทัลไฮไดร์ด (NiMH) และชนิดลิเทียมไอออน (Li-ion) พบว่า แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้มากกว่าชนิดอื่น ๆ ทั้งในเชิงปริมาตรและเชิงมวล แสดงดังรูปที่ 2.1

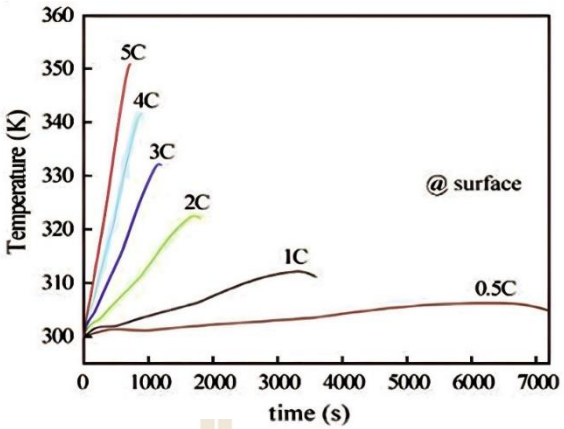


รูปที่ 2.1 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานของแบตเตอรี่

Whitehead and Schreiber (2005) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการนำโลหะผสมหลายชนิด เช่น Ti-based alloys, Cu-based alloys, Co-based alloys และเหล็กกล้าไร้สนิม มาใช้ทำตัวรับกระแส (Current collector) แทนโลหะจำพวกอลูมิเนียม (Al) และทองแดง (Cu) พบว่า มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Wh/l และ Wh/kg) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวรับกระแสที่เป็นอลูมิเนียมและทองแดง

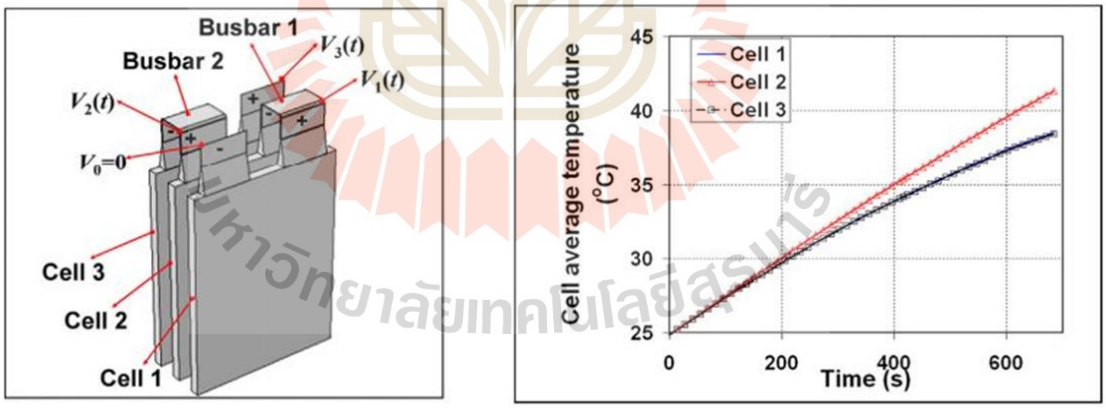
Chan et al. (2008) ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุที่มีขนาดระดับนาโนเมตร ซึ่งคือ nano silicon มาทำเป็นวัสดุขั้วลบ พบว่ามีความสามารถในการรับ LI^+ มากกว่าแกรไฟต์ถึง 10 เท่า แต่วัสดุนี้ยังประสบปัญหาเรื่องการขยายตัวอย่างมากเมื่อถูก LI^+ อัดเข้าไปในโครงสร้าง จึงทำให้วัสดุมีโอกาสเสื่อมสภาพและเสียหายได้ง่าย ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง เพราะวัสดุจะต้องทนต่อการหดและขยายของโครงสร้างทุกครั้งที่มีการอัดประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าใหม่

Jeon and Baek (2011) ได้ศึกษาแบบจำลองทางความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรูปทรงกระบอกในระหว่างการคายประจุไฟฟ้าที่อัตรา 0.5C ถึง 5C ซึ่งได้วิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยจะพิจารณาถึงแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนเนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลผ่านโลหะตัวนำ (Joule heating) และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy change) จากการตรวจสอบอัตราการคายประจุในสภาวะที่ต่างกันของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด $LiCoO_2$ (LCO) พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิจากแบบจำลองมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง และการกระจายตัวของอุณหภูมิจะขึ้นกับอัตราการคายประจุ ซึ่งอัตราการคายประจุสูงขึ้นจะทำให้แหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลผ่านโลหะตัวนำสูงขึ้นด้วย ในขณะที่อัตราการคายประจุต่ำลงส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีนั้นสูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกชนิด NMC ที่อัตรา 0.5C ถึง 5C

Guo et al. (2013) นำแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) โดยใช้ขั้วบวกเป็น $LiNiCoAlO_2$ (NCA) และขั้วลบเป็นแกรไฟต์ (LiC_6) มาเชื่อมต่อแบบอนุกรมทั้งหมด 3 เซลล์ โดยแต่ละเซลล์ห่างกัน 18 mm. และคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ Galerkin พบว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเซลล์ที่ 2 หรือเซลล์ที่อยู่ตรงกลางมีอุณหภูมิสูงที่สุดไม่ว่าจะทำการอัดประจุหรือคายประจุไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ Galerkin

Liu et al. (2014) ได้วิเคราะห์แหล่งกำเนิดความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน พบว่าอุณหภูมิในการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของยานพาหนะไฟฟ้า ในระหว่างกระบวนการอัดประจุและการคายประจุ อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะแตกต่างกันไปเนื่องจากการสร้างความร้อนภายใน ความร้อนที่เกิดขึ้นประกอบด้วยความร้อนที่เกิด

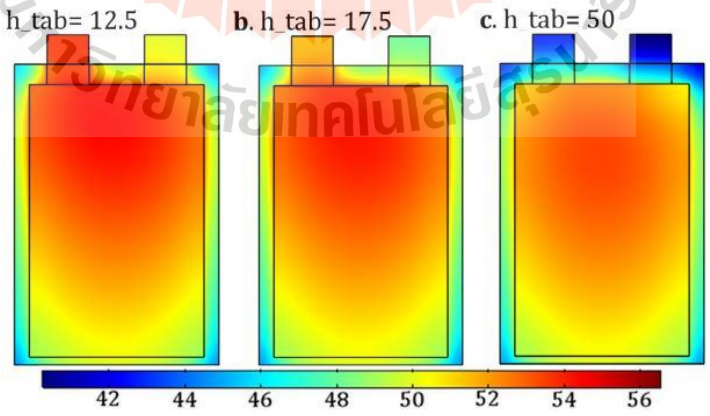
จากกระแสไหลผ่านโลหะตัวนำ (Joule heating) และความร้อนจากปฏิกิริยา (Reaction heat) และทั้งคู่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ อายุของแบตเตอรี่ สถานะของประจุที่เหลืออยู่ (state of charge, SOC) และกระแสไฟฟ้าในการทำงาน

Feng et al. (2015) ได้ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิภายนอก (Ambient temperature) ที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด $LiNiMnCoO_2$ (NMC) โดยทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิและทดสอบการคายประจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง พบว่าเกิดการสูญเสียกำลังงานขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C และสูงกว่า 50°C ส่งผลให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สถานะดังกล่าวสั้นลง

Nikolian et al. (2016) ได้พัฒนาวงจรไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent circuit model) เพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมไปถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน สามารถนำไปใช้ได้ทั้งกรณีอัดประจุไฟฟ้า (Charge) และคายประจุไฟฟ้า (Discharge)

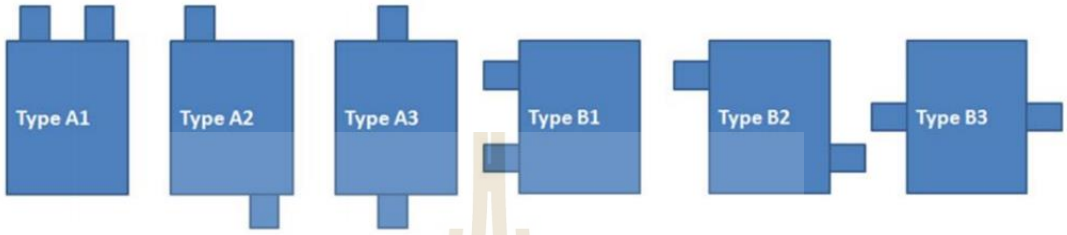
Wang et al. (2017) ได้ทำการทดลองโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์คำนวณหาอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนลักษณะทรงกระบอก (Cylindrical cell) โดยขั้วบวกเป็น $LiFePO_4$ และขั้วลบเป็นแกรไฟต์ ในขณะแบตเตอรี่ทำการคายประจุไฟฟ้า (Discharge rate) ในอัตรา C-rate ต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่จะเพิ่มมากขึ้นตามอัตราการคายประจุไฟฟ้า โดยเรียงจาก 5C, 3C และ 1C ตามลำดับ

Guatam et al. (2017) ทดลองโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์คำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) โดยเปรียบเทียบกันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient) บริเวณแท็บไฟฟ้าระหว่าง 12.5, 17.5 และ 50 $W/m^{-2}K^{-1}$ ตามลำดับ ที่อัตราการคายประจุ 5C พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ 50 $W/m^{-2}K^{-1}$ มีอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่ำที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.4

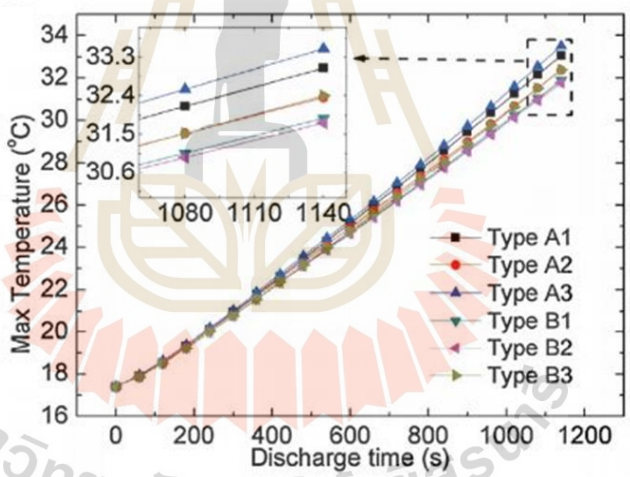


รูปที่ 2.4 การกระจายอุณหภูมิ (°C) บริเวณแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่แบบถุง
ที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่าง ๆ

Zhang et al. (2017) ได้ทำการออกแบบแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบให้อยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งหมด 6 แบบ พร้อมทั้งจำลองผลค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) ด้วยอัตราการคายประจุไฟฟ้า 2C ผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะสูงที่สุดเมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด และแท็บไฟฟ้าแบบ B2 มีอุณหภูมิต่ำที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบในตำแหน่งต่าง ๆ ของแบตเตอรี่

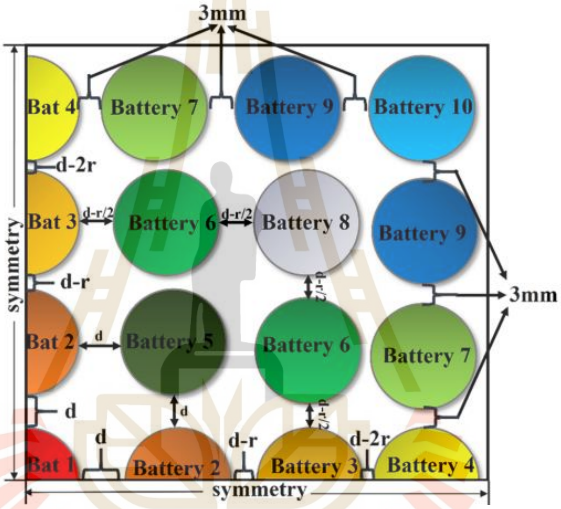


รูปที่ 2.6 อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ที่มีแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบในตำแหน่งต่าง ๆ

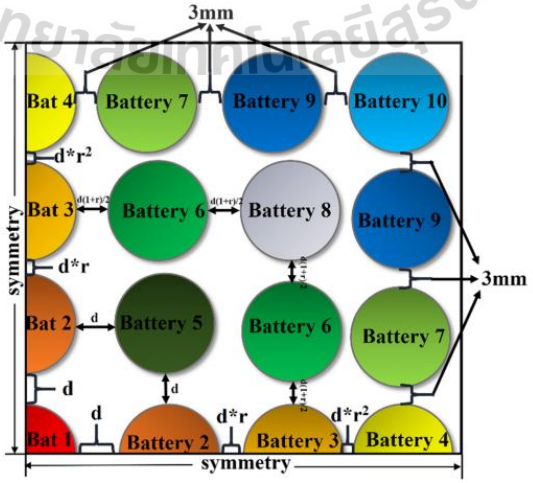
Mei et al. (2018) ได้ศึกษาขนาดของแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) ซึ่งประกอบไปด้วยขนาดของความหนา ความสูง และความกว้างที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งจำลองผลการกระจายตัวของอุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าที่ขนาดต่างกันดังที่กล่าวมาพบว่า ความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลผ่านตัวนำ (Joule heating) จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุด เมื่อพื้นที่หน้าตัดของแท็บไฟฟ้ามีขนาดมากที่สุด

Su et al. (2019) ได้วิเคราะห์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบแพ็คภายในยานยนต์ไฟฟ้า พบว่ายานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีเสถียรภาพดีที่สุด เมื่อแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าในช่วงสถานะประจุ (%SOC) อยู่ที่ 20% ถึง 80% และเมื่อสถานะของประจุต่ำกว่า 20% ความเข้มข้นของประจุ (Li^+) ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะลดลง ทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในแบตเตอรี่จะไม่เสถียร

Ji et al. (2019) ได้ศึกษารูปทรงที่จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้ระยะห่างของการบรรจุแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งการตรวจสอบความสม่ำเสมอของอุณหภูมิของโมดูลแบตเตอรี่เป็นงานที่สำคัญสำหรับการออกแบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ งานวิจัยได้นำเสนอโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกด้วยการออกแบบให้มีการกระจายเซลล์ที่แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงความสม่ำเสมอ แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติ และแบบจำลองไฟไนท์อิลลิเมนต์ทางเคมีไฟฟ้าแบบหนึ่งมิติได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดเรียงสำหรับโมดูลแบตเตอรี่ การจัดระยะห่างของเซลล์จะจัดเรียงตาม arithmetic ratio และ geometric ratio แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ พบว่า การจัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกันเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันสำหรับโมดูลแบตเตอรี่

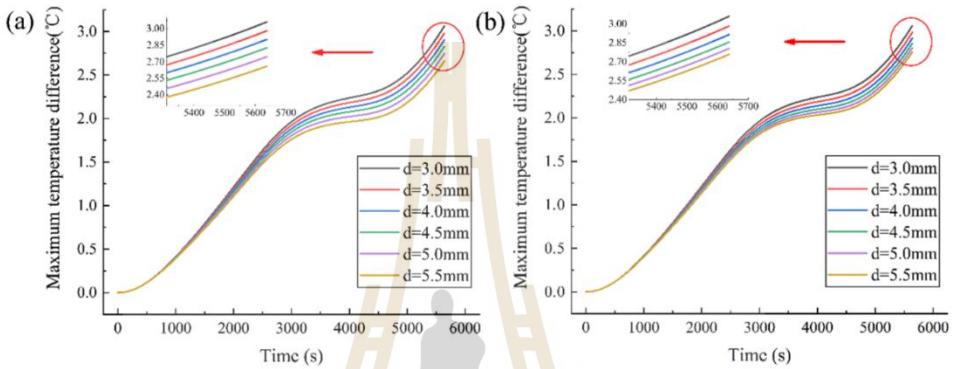


รูปที่ 2.7 การจัดระยะห่างของเซลล์แบบ Arithmetic ratio สำหรับโมดูลแบตเตอรี่

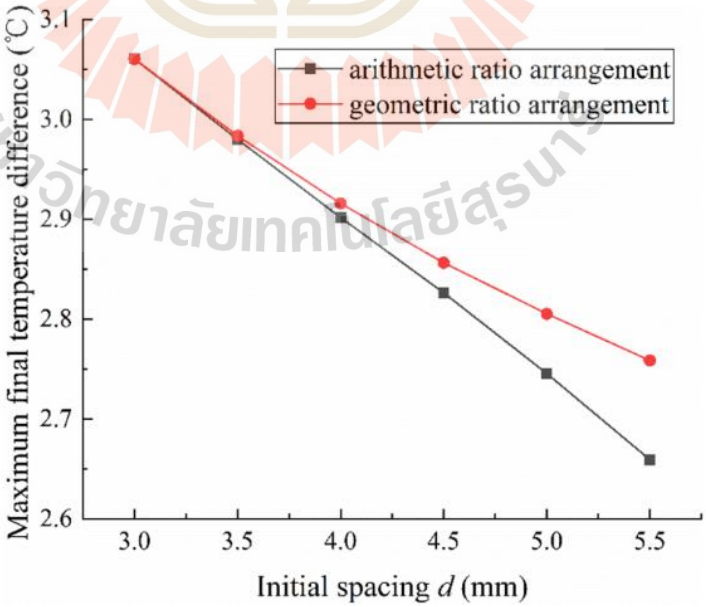


รูปที่ 2.8 การจัดระยะห่างของเซลล์แบบ Geometric ratio สำหรับโมดูลแบตเตอรี่

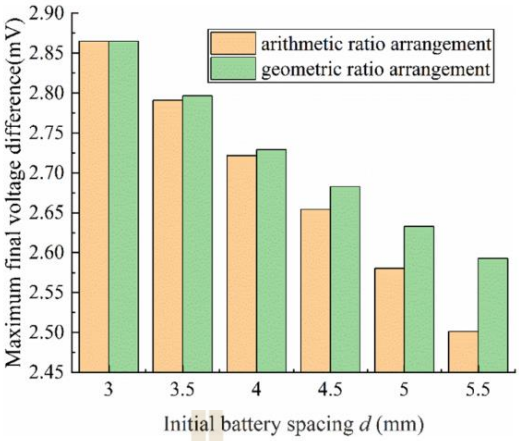
โดยเฉพาะการจัดระยะห่างของเซลล์แบบ Arithmetic ratio ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่จะลดลงเมื่อระยะห่างเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ที่มีการจัดเรียงระยะห่างของเซลล์แบบ Arithmetic ratio อาจลดลง 13% และความต่างศักย์สุดท้ายสูงสุดอาจลดลงเหลือ 2.5 mV เมื่อแบตเตอรี่เริ่มต้นระยะห่างถึง 5.5 มม. ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและการคายประจุภายในโมดูลแบตเตอรี่ที่มีการจัดเรียงแบบ arithmetic ratio นั้นดีกว่าการจัดแบบ geometric ratio แสดงได้ดังรูปที่ 2.9-2.11



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุกับเวลา (a) จัดเรียงแบบ arithmetic ratio (b) จัดเรียงแบบ geometric ratio

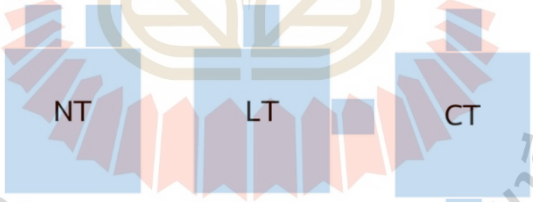


รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่ที่การจัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบความแตกต่างแรงดันสูงสุดของโมดูลแบตเตอรี่
ที่การจัดเรียงระยะห่างของเซลล์ที่แตกต่างกัน

Lee et al. (2021) ได้ออกแบบและเปรียบเทียบการวางแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) ในรูปแบบปกติ (Nominal tab) แบบตัวแอล (L-shape tab) และแบบตรงกันข้าม (Counter tab) พร้อมทั้งจำลองผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ พบว่า เซลล์แบบตรงกันข้าม (CT) มีอุณหภูมิภายในเซลล์ที่ต่ำที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการวางแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงรูปแบบต่างๆ

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE, ScienceDirect และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่นๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่างๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งต่างประเทศและในประเทศ

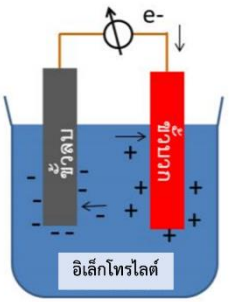
บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนับว่ามีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ได้แก่ แบตเตอรี่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายเทความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงต่อการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่สำคัญชิ้นหนึ่งของยานพาหนะไฟฟ้า เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้ากักเก็บพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ 3 ส่วนคือ ขั้วบวก (แคโทด) ขั้วลบ (แอโนด) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานหรือเกิดการคายประจุไฟฟ้า ขั้วลบจะเป็นขั้วที่เกิดปฏิกริยาเคมีส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยาออกซิเดชั่น) และขั้วบวกเป็นขั้วที่เกิดปฏิกริยาเคมีที่รับอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดักชั่น) โดยอิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นจะวิ่งผ่านโลหะตัวนำก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยอิเล็กโทรไลต์จะต้องเป็นสารละลายที่ไม่นำอิเล็กตรอน แต่มีหน้าที่ส่งผ่านไอออนที่จำเป็นต่อการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าแบตเตอรี่จะหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของแบตเตอรี่

ในช่วงปี ค.ศ. 1880 การใช้แบตเตอรี่สำหรับยานพาหนะไฟฟ้าเกิดขึ้นมาประมาณ 20 ปี หลังจากการค้นพบ แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขึ้นเป็นครั้งแรก ถึงแม้ว่ายานพาหนะไฟฟ้าจะได้รับความนิยมลดลงหลังจากมีการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีประสิทธิภาพสูงเพิ่มขึ้น ประกอบกับราคาของน้ำมันที่ถูกลงและระยะทางขับเคลื่อนที่ไกลขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงปี ค.ศ. 1970 ถูกพบว่ามีการใช้ยานพาหนะไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยประเภทแบตเตอรี่ที่ใช้ยังเป็นประเภทตะกั่วกรดเช่นเดิม จนกระทั่งวิวัฒนาการของแบตเตอรี่ได้รับการพัฒนาเพิ่มขึ้นอีกหลายประเภท เมื่อพิจารณาประเภทของแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ (Primary batteries) หรือแบตเตอรี่แบบใช้ได้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง

2) แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ (secondary batteries) หรือแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ โดยแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าจะเป็นแบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีของขั้วแคโทด และแอโนดที่แตกต่างกัน โดยแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมสำหรับใช้งานในยานพาหนะไฟฟ้าในปัจจุบัน ได้แก่

2.1) แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด (Lead-Acid Battery) แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดถูกคิดค้นขึ้นมาครั้งแรกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1859 โดย Gaston Plante และได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดยปัจจุบันเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้กันมากที่สุดในยานพาหนะ โดยใช้เป็นแบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาถูกเนื่องจากวัสดุที่ใช้สามารถหาได้ง่ายและมีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดมีขั้วลบทำจากตะกั่วที่มีลักษณะพรุน (Porous lead) ส่วนขั้วบวกเป็นตะกั่วออกไซด์ (PbO_2) ที่มีลักษณะพรุนเช่นเดียวกัน โดยมีกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดมีความจุพลังงานต่อน้ำหนักและปริมาตรที่ต่ำ ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีน้ำหนักมาก การใช้งานในยานยนต์จึงมักใช้สำหรับการติดเครื่องยนต์ในรถยนต์ขนาดทั่วไป แต่ก็เป็นที่นิยมใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็กเป็นอย่างมาก โดยแบตเตอรี่ตะกั่วกรดสามารถแบ่งประเภทย่อยได้อีก 3 ประเภท (Salkind et al., 2011) คือ

- แบตเตอรี่ตะกั่วกรด สำหรับติดเครื่องยนต์ (Starting Lighting Ignition) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่มีสัดส่วนการใช้งานมากที่สุด โดยถูกใช้สำหรับงานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง เป็นระยะ สั้น เช่น สำหรับติดเครื่องยนต์ในรถยนต์ หรือติดเครื่องยนต์สำหรับเครื่องจักร ทั้งนี้ แบตเตอรี่สำหรับติดเครื่องยนต์ จะมีอายุการใช้งานสั้นประมาณ 1.5 - 3 ปี

- แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ Deep cycle เป็นแบตเตอรี่ที่สำหรับใช้งานที่ต้องมีการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน โดยมีการใช้งานอยู่หลายประเภท เช่น สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รถกอล์ฟ อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือสำหรับเก็บไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนอื่น เช่น จากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือจากกังหันลม เป็นต้น

- แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ Stationary ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบมาให้สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ ต่างจากแบตเตอรี่ประเภท deep cycle โดยที่ มักใช้งานในสถานะประจุไฟฟ้าที่ถูกอัดอยู่เต็มตลอดเวลา และมีการใช้งานเป็นครั้งคราวเท่านั้น มักใช้เพื่อการสำรองไฟฟ้า

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในประเทศไทย

2.2) แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลแคดเมียม (Nickel-Cadmium Battery) แบตเตอรี่ชนิดนิเกิล-แคดเมียมเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดอัลคาไลน์ชนิดแรก โดยชื่ออัลคาไลน์นั้นมาจากสารอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ซึ่งมีธาตุในหมู่อัลคาไลน์เป็นส่วนประกอบ เช่น สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่รู้จักในนาม “ไนแคด” โดยข้อดีของแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ ไม่ต้องการการดูแลรักษา เช่น การเติมน้ำกลั่น เก็บไว้ได้นานไม่ว่าจะอยู่ในสถานะที่มีประจุไฟฟ้าเต็มหรือไม่ สามารถอัดประจุไฟฟ้าได้เร็ว ใช้ได้ที่อุณหภูมิต่ำและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะใช้งานคงที่ แต่แบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อเสียคือ ราคาวัตถุดิบและราคาการผลิตที่สูงกว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดมาก อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมี Memory effect ซึ่งหมายถึงสภาวะที่แบตเตอรี่เสื่อมเนื่องจากการถูกใช้งานไม่หมดก่อนถูกอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้งและมีความสูญเสียทางประจุไฟฟ้ามากกว่าแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด องค์ประกอบหลักของแบตเตอรี่ชนิดนี้มี ขั้วลบเป็นแคดเมียม (Cd) ขั้วบวกเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO(OH)) โดยมีสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตามเนื่องจากแคดเมียมเป็นสารมีพิษที่ค่อนข้างร้ายแรง การใช้งานและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงไม่ได้รับการสนับสนุนมากนัก การพัฒนายานพาหนะไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่ไนแคดจึงมีอยู่น้อย

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (ถ่านอัลคาไลน์)

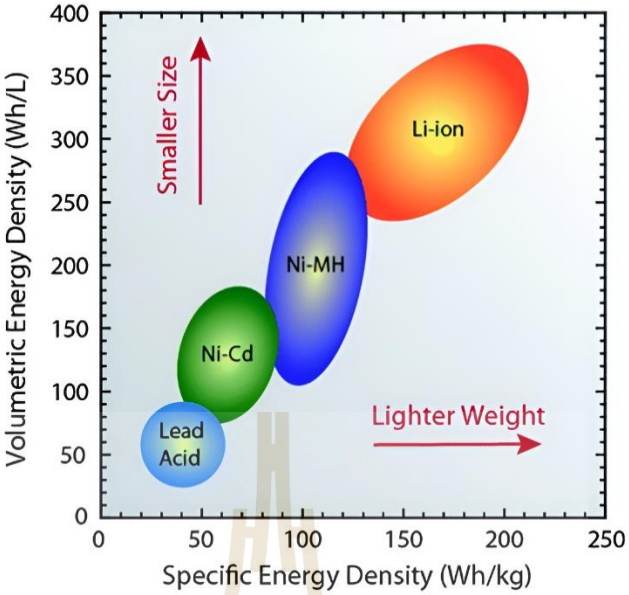
2.3) แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิลเมทัลไฮไดร์ด (Ni-MH Battery) แบตเตอรี่ชนิดนี้อาศัยปฏิกิริยาเคมีที่มีขั้วลบซึ่งเป็นโลหะผสม (M) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเกิดเป็นเมทัลไฮไดร์ดได้ ส่งผลให้แบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์มีความจุพลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรดมาก การพัฒนาด้านอายุการใช้งานและความปลอดภัยทำให้แบตเตอรี่แบบนิกเกิล-เมทัลไฮไดร์ดได้ถูกนำไปใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าประเภทไฮบริดในยุคแรกที่ผลิตโดยบริษัทโตโยต้าจำกัด ซึ่งพัฒนาร่วมกับบริษัท Panasonic EV Energy จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทลูกของบริษัทพานาโซนิคจำกัด

อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมสำหรับยานพาหนะไฟฟ้าขนาดเล็กเนื่องจากราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทตะกั่วกรด ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพโดยรวม เช่น ความจุพลังงาน อายุการใช้งาน และการบำรุงรักษานั้น ยังคงด้อยกว่า แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนซึ่งขณะนี้เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด เพราะแบตเตอรี่ประเภทนิกเกิล-เมทัลไฮไดร์ด จะเสื่อมสภาพหากไม่ถูกใช้งาน

2.4) แบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออน (Li-ion Battery)

ลิเทียมเป็นธาตุลำดับที่ 3 ในตารางธาตุ และมีสมบัติเป็นโลหะ ดังนั้นลิเทียมจึงเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบาที่สุด นอกจากนี้ลิเทียมยังมีศักย์ไฟฟ้าทางไฟฟ้าเคมีที่มาก รวมถึงการทำปฏิกิริยาทางเคมีที่ว่องไว จากสมบัติต่างๆ ของลิเทียม เมื่อนำมาทำเป็นแบตเตอรี่จึงได้แบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานได้สูงและจ่ายพลังงานได้มาก เนื่องจากโลหะลิเทียมนี้มีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ในธรรมชาติเราจึงไม่พบลิเทียมในรูปของโลหะบริสุทธิ์ แต่มักพบลิเทียมในรูปของสารประกอบ นอกจากนี้แล้วโลหะลิเทียมยังทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ ดังนั้นเมื่อนำโลหะลิเทียมมาทำแบตเตอรี่ จึงทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความเสี่ยงสูง โดยเฉพาะถ้าปิดผนึกแบตเตอรี่ไม่ดีพอ จะทำให้อากาศหรือความชื้นจากภายนอกสามารถหลุดลอดเข้าไปในเซลล์ของแบตเตอรี่ได้ เมื่อโลหะลิเทียมสัมผัสกับน้ำหรือความชื้นในอากาศ จะทำให้เกิดการทำปฏิกิริยาเคมีกันจนอาจเกิดการระเบิดหรือเกิดการลุกเป็นไฟได้ ในยุคแรกๆ เคยเกิดเหตุระเบิดขึ้น จนบริษัทผู้ผลิตต้องเลิกผลิตและหันไปพัฒนาแบตเตอรี่ที่ใช้สารประกอบของโลหะลิเทียมแทนโลหะลิเทียมบริสุทธิ์

แบตเตอรี่ลิเทียมที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันมี 2 ชนิด คือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนโพลิเมอร์ (Li-ion polymer battery) หรือที่นิยมเรียกว่า ลิโพแบตเตอรี่ (LIPO) ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมทั้งสองชนิดนี้จะใช้สารเคมีที่นำมาทำเป็นขั้วบวกหรือขั้วแคโทดและขั้วลบหรือขั้วแอโนดเป็นสารเคมีชนิดเดียวกัน จะแตกต่างกันตรงที่อิเล็กโทรไลต์และแผ่นกั้น (separator) (ชัยยศ หัตถเสรีพงษ์, 2550) โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะใช้อิเล็กโทรไลต์ที่ทำมาจากเกลือของลิเทียมละลายอยู่ในตัวทำละลายอินทรีย์ และแผ่นกั้นทำมาจากโพลิเมอร์ เช่น โพลิโพรพิลีน (PP) เป็นต้น ส่วนแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์นั้นอิเล็กโทรไลต์และแผ่นกั้นจะเป็นตัวเดียวกัน คือ เป็นสารโพลิเมอร์ ซึ่งสารโพลิเมอร์นี้จะมีสมบัติยอมให้ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุผ่านได้ แต่ไม่นำไฟฟ้า และเนื่องจากโพลิเมอร์เป็นของแข็งที่แห้ง เมื่อใช้โพลิเมอร์เป็นอิเล็กโทรไลต์แล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้ตั้วกั้นอีก เพราะโพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นไปด้วย ดังนั้นขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์จึงไม่ลัดวงจร



รูปที่ 3.4 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ

และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บพลังของแบตเตอรี่ทั้ง 4 แบบที่กล่าวมา คือ แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead-Acid) ชนิดนิกเกิลแคดเมียม (Nickel-Cadmium) ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดร์ด (Ni-MH) และชนิดลิเทียมไอออน (Li-ion) พบว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีความสามารถในการเก็บพลังงานได้มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ทั้งในเชิงปริมาตร (Volume energy density) และเชิงมวล (Gravimetric energy density) (นงลักษณ์ มีทอง, 2553) แสดงในรูปที่ 3.4

3.2.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

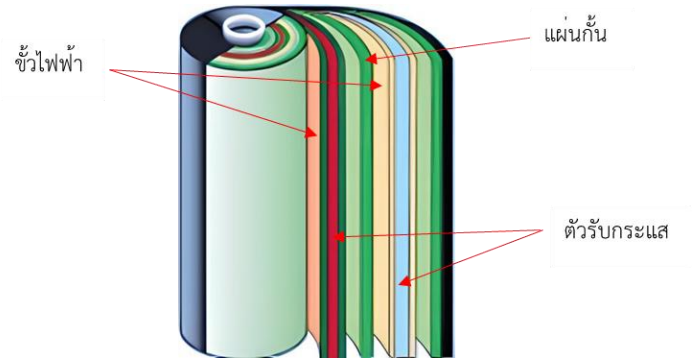
ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้

1) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในปัจจุบันใช้สารประกอบจำพวกลิเทียม หรือเกลือของลิเทียม เช่น $LiCoO_2$ (LCO) โลหะออกไซด์อื่น ๆ หรือสารประกอบฟอสเฟต$LiMn_2O_4$ (LMO), $LiNiMnCoO_2$ (NMC), $LiFePO_4$ (LFP) เป็นขั้วบวก (Positive electrode) หรือขั้วแคโทด (Cathode) และมีคาร์บอนหรือแกรไฟต์เป็นขั้วลบ (Negative electrode) หรือแอโนด (Anode)

2) แผ่นกั้น (Separator) เป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้ขั้วบวกสัมผัสกับขั้วลบจนเกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า ทำมาจากโพลิเมอร์ (PP/PE)

3) แผ่นตัวรับกระแส (Current collector) เป็นโลหะตัวนำ ทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนไหลผ่านออกสู่วงจรภายนอก เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ส่วนมากแผ่นตัวรับกระแสจะทำมาจากอลูมิเนียม (Al) และทองแดง (Cu)

4) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารละลายอินทรีย์ของเกลือที่มี Li^+ เป็นส่วนประกอบ เช่น $LiFP_6$ หรือเป็นตัวนำที่ยอมให้ไอออนของ Li^+ ไหลผ่าน แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่าน



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกวางจำหน่ายออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ. 1991 (Dahn et al., 2011) และภายในระยะเวลาอันสั้นความต้องการของตลาดได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจะแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำขั้วบวก ส่วนขั้วลบทำมาจากแกรไฟต์เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทมีสมบัติแตกต่างกัน จึงเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ

ลำดับที่	วัสดุขั้วบวก	วัสดุขั้วลบ	การใช้งาน
1	Lithium Cobalt Oxide ($LiCoO_2$, LCO)	แกรไฟต์	โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แล็ป-ท็อป กล้องดิจิทัล
2	Lithium Manganese Oxide ($LiMn_2O_4$, LMO)	แกรไฟต์	เครื่องมือไฟฟ้า (Power tools) อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า
3	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (Li(Ni, Mn, Co)O_2, NMC)	แกรไฟต์	จักรยานไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า ระบบสำรองไฟฟ้า
4	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (Li(Ni, Co, Al)O_2, NCA)	แกรไฟต์	อุปกรณ์การแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า ระบบสำรองไฟฟ้า
5	Lithium Iron Phosphate ($LiFePO_4$, LFP)	แกรไฟต์	ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า ระบบที่ต้องการกระแสและความทนทานสูง
6	LMO หรือแกรไฟต์	Lithium Titanate ($Li_4Ti_5O_{12}$, LTO)	ระบบสำรองไฟฟ้า ระบบส่งกำลังในยานพาหนะไฟฟ้า

3.2.2 ลักษณะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้สำหรับอุปกรณ์พกพา เครื่องใช้ไฟฟ้ารวมถึงยานพาหนะไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกเป็นหลายลักษณะรูปทรง ทั้งแบบกระดุม (Button cell) แบบปริซึม (Prismatic cell) แบบทรงกระบอก (Cylindrical cell) แบบถุง (Pouch cell) เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกนั้นจะมีแผ่นวัสดุซ้อนทับกัน ดังรูปที่ 3.5 และนำไปม้วนให้มีลักษณะคล้ายเจลลี่โรล (Jellyroll) ส่วนแบบถุงจะมีการซ้อนทับกันของแผ่นวัสดุคล้ายแซนวิช (Sandwich) เป็นต้น ซึ่งลักษณะของการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมในยานพาหนะไฟฟ้าต่างๆ นั้นจะนำไปบรรจุรวมกันเป็นชุดแบตเตอรี่ (Battery pack) โดยแบ่งออกเป็นแบตเตอรี่ในที่ใช้สำหรับรถยนต์ รถโดยสาร จักรยานยนต์และยานยนต์ไฟฟ้าเคลื่อนที่อื่นๆทำให้ขนาดของแบตเตอรี่ในกลุ่มยานพาหนะไฟฟ้ามีขนาดใหญ่กว่ากลุ่มอุปกรณ์พกพาและเครื่องใช้ไฟฟ้า

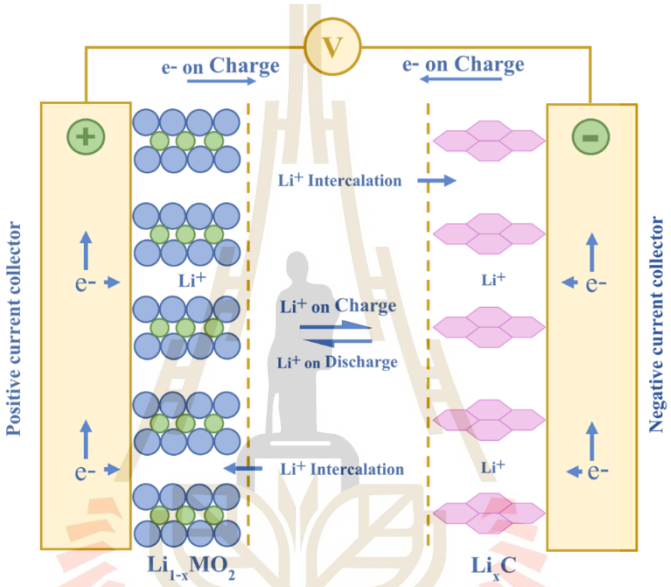
ตารางที่ 3.2 ลักษณะรูปร่างของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่าง ๆ

ลำดับที่	ลักษณะรูปร่าง	ประเภท
1		กระดุม (button cell)
2		ปริซึม (prismatic cell)
3		ทรงกระบอก (cylindrical cell)
4		ถุง (pouch cell)
5		ชุด (battery pack)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2.3 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทำงานโดยอาศัยหลักการทางไฟฟ้าเคมี คือ เมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้า (Charge) ทำให้ไอออนของลิเทียมเคลื่อนตัวออกจากโครงสร้างของขั้วบวก ไหลผ่านอิเล็กโทรไลต์ และผ่านแผ่นกั้น (Separator) เข้าไปแทรกตัว (Intercalate) ในโครงสร้างขั้วลบเกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมและคาร์บอน ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัวออกจากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และขณะเกิดการคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ปฏิกิริยาจะเกิดในทิศทางตรงกันข้ามดังรูปที่ 3.6 และด้วยหลักการดังกล่าวสามารถแสดงปฏิกิริยาทางเคมีได้ ดังนี้



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ :

$$MO_2(s) + LiC_6(s) \underset{charge}{\overset{discharge}{\rightleftharpoons}} LiMO_2(s) + 6C(s)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก :

$$MO_2(s) + Li^+(aq) + e^- \underset{charge}{\overset{discharge}{\rightleftharpoons}} LiMO_2(s)$$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ :

$$LiC_6(s) \underset{charge}{\overset{discharge}{\rightleftharpoons}} 6C(s) + Li^+(aq) + e^-$$

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแบตเตอรี่แต่ละประเภท

แบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
Lead Acid	- มีราคาถูก - มีความทนทานสูง - มี Self-Discharge ต่ำ - ไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก - ไม่เกิดปัญหา Memory Effect - Discharge ได้มาก - มีหลายขนาด	- ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ - แบตเตอรี่จะเสื่อมสภาพเร็วหากไม่มีประจุ - ตะกั่วและกรด เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
NiCd	- กำลังไฟสูง	- แคดเมียมเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม - มีปัญหา Memory Effect
NiMh	- กำลังไฟสูง - ความหนาแน่นของพลังงานสูง - อายุการใช้งานนาน มีวัฏจักรการอัดประจุคายประจุสูง	- ราคาสูง - มีปัญหา Memory Effect
Li-ion	- ความหนาแน่นของพลังงานสูง - ไม่มีปัญหา Memory Effect - มี Self-Discharge ต่ำ - กักเก็บพลังงานสูง - น้ำหนักเบา - มีหลายขนาด	- อายุการใช้งานค่อนข้างสั้น - Cell internal resistance จะเพิ่มขึ้นตามรอบการอัดประจุและอายุการใช้งาน - ต้องมีอุปกรณ์ และโครงสร้างด้านความปลอดภัย

นอกจากนี้ คำจำกัดความอื่นๆ ที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่ในยานพาหนะไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

- แอมแปร์ชั่วโมง (Ah) เป็นหน่วยพื้นฐานในการวัดความจุของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่และจับเวลาเป็นชั่วโมงจนแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าหมด โดยความจุแอมแปร์ชั่วโมงได้จากการนำค่ากระแสไฟฟ้าคูณกับเวลาเป็นชั่วโมง ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ความจุ 80 แอมแปร์ชั่วโมง หมายความว่า แบตเตอรี่ลูกนั้นสามารถจ่ายไฟฟ้าด้วยกระแสตรงคงที่ 8 แอมแปร์ได้นาน 10 ชั่วโมงหรือ 4 แอมแปร์ได้นาน 20 ชั่วโมง

- C-rate บ่งบอกถึง อัตราการอัดหรือคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่เทียบกับปริมาณความจุของแบตเตอรี่ทั้งหมด โดย (n)C หมายถึง แบตเตอรี่จะคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ออกไปโดยใช้เวลา 1/n ชั่วโมงจนกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่จะถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยอัตราคงที่ที่ทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1/n ชั่วโมง เช่น

1C หมายถึง แบตเตอรี่จะคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่โดยใช้เวลา 1 ชั่วโมงจนกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ที่จะทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลา 1 ชั่วโมง

2C หมายถึง แบตเตอรี่จะคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่โดยใช้เวลาครึ่งชั่วโมงจนกว่าจะหมด หรือแบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ที่จะทำให้แบตเตอรี่เต็มภายในเวลาครึ่งชั่วโมง

- DOD (Depth of discharge) บ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่ถูกใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมด เช่น

10% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 10% และเหลือความจุอยู่ 90%

80% DOD หมายถึง แบตเตอรี่ถูกใช้งานไป 80% และเหลือความจุอยู่ 20%

- SOC (State of charge) บ่งบอกถึงปริมาณความจุที่แบตเตอรี่เหลืออยู่ เช่น

10% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 10%

80% SOC หมายถึง แบตเตอรี่มีความจุอยู่ 80%

- Cut Off Voltage เป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ระบบของแบตเตอรี่ยอมให้มีได้ขณะคายประจุไฟฟ้า ถ้าต่ำกว่านี้จะมีการเสียหายถาวรไม่สามารถเก็บพลังงานในแบตเตอรี่ต่อไปได้ โดยค่านี้จะกำหนดเฉพาะเจาะจงที่อัตราการคายประจุไฟฟ่าต่างๆ กัน บริษัทผู้ผลิตจะเป็นผู้กำหนดแรงดันต่ำสุดหรือแรงดันสุดท้ายของการคายประจุไฟฟ้าคู่กับอัตราการคายประจุไฟฟ้า

- รอบการใช้งาน (Cycle) เมื่ออัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่จนเต็มและนำไปใช้งาน แล้วนำกลับมาอัดประจุไฟฟ้าใหม่จนเต็มอีกครั้งหนึ่งจะเรียกว่า 1 รอบการใช้งาน ในการใช้งานจะมีรอบการใช้งานสองลักษณะคือ งานที่มีการคายประจุไฟฟ้าน้อย (shallow cycle) และงานที่มีการคายประจุไฟฟ้ามาก (deep cycle) การใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละแบบนั้นขึ้นกับลักษณะของเซลล์และส่วนมากจะไม่ให้แบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าจนหมด

- ความต่างศักย์ไฟฟ้าระบุ (Nominal Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่บริษัทผู้ผลิตระบุมาให้ แต่ถ้าอัดประจุไฟฟ้าจนแบตเตอรี่มีประจุไฟฟ้าเต็ม ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

- Open Circuit Voltage คือ แรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะสมดุลหรืออีกความหมายคือ แบตเตอรี่ไม่มีการคายและอัดประจุไฟฟ้า

- P/E Ratio (Power to Energy Ratio) บ่งบอกถึงกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ให้ได้เทียบกับพลังงานของแบตเตอรี่ เช่น

P/E = 2:1 ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 2 kW

P/E = 1:3 ของแบตเตอรี่ 1 kWh หมายความว่า แบตเตอรี่จะมีศักยภาพในการให้กำลังไฟฟ้าเป็น 1/3 kW

ทั้งนี้แบตเตอรี่ที่มีค่า P/E ratio สูงจะเรียกแบตเตอรี่ชนิดนี้ว่า High power battery ซึ่งมักจะใช้สำหรับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูงเป็นช่วงสั้นๆ เช่น การติดเครื่องยนต์ หรือสำหรับการเร่งเครื่องยนต์เท่านั้น แต่ไม่ใช่เป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อน

แบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะมีความแตกต่างกันในด้านต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้สร้างแบตเตอรี่ โครงสร้างของแบตเตอรี่ ความจุ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของแบตเตอรี่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ชนิดนั้นๆ รวมไปถึงลักษณะการใช้งาน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ อัตราการคายหรืออัดประจุไฟฟ้า (C-rate) ปริมาณความจุของแบตเตอรี่ (%SOC) ณ

ขณะนั้น ชนิดของขั้วไฟฟ้า ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอายุการใช้งานแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับความรวดเร็วในการดึงพลังงานไปใช้ รวมไปถึงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ เป็นต้น

3.3 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

3.3.1 ความร้อน

แนวคิดของกฎข้อที่หนึ่งนั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับกฎของการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ซึ่งกล่าวว่า "ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ นั้น พลังงานจะไม่ถูกสร้างขึ้นมาใหม่และไม่มีการสูญหายไป แต่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปอื่นได้" ดังนั้นเมื่อพิจารณาการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม จะพบว่าพลังงานรวมของระบบกับสิ่งแวดล้อมจะมีค่าคงที่ เช่น ในกระบวนการที่ระบบได้รับพลังงานจากสิ่งแวดล้อม ปริมาณพลังงานที่ระบบได้รับจะเท่ากับปริมาณพลังงานที่ระบบสูญเสีย ซึ่งสามารถแสดงการถ่ายเทพลังงานของระบบใดๆ ได้ดังนี้

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{st} \tag{3.1}$$

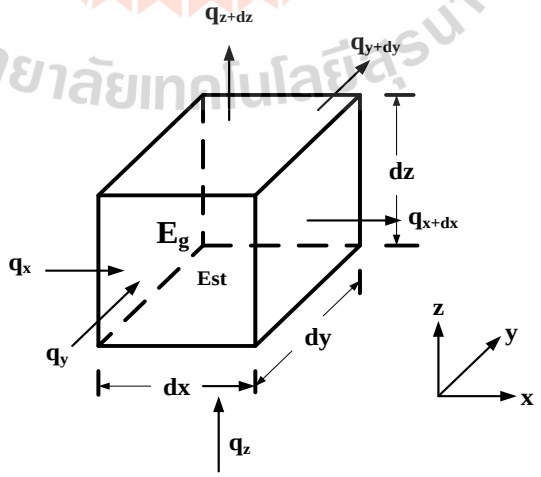
โดย E_{in} คือ พลังงานที่เข้าสู่ระบบ

E_g คือ พลังงานก่อกำเนิด

E_{out} คือ พลังงานที่ออกจากระบบ

E_{st} คือ พลังงานรวมที่สะสมในระบบ

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนต้องกำหนดปริมาตรควบคุม (Control volume) เพื่อสร้างขอบเขตของสมมติฐานในการศึกษา ดังแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ปริมาตรควบคุมและทิศทางการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ

จากการกำหนดปริมาตรควบคุมในรูปแบบ 3 มิติ พลังงานที่เข้าสู่ระบบจะได้ ดังนี้

$$E_{in} = q_x + q_y + q_z \tag{3.2}$$

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ระบบ q_x, q_y และ q_z ขึ้นอยู่กับความชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ตามกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) ดังนี้

$$q_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.3}$$

$$q_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \tag{3.4}$$

$$q_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \tag{3.5}$$

เมื่อ k_x, k_y และ k_z คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity coefficient) ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในรูปแบบ 3 มิติ ดังนั้นแทนสมการที่ (3.3), (3.4) และ (3.5) ลงในสมการที่ (3.2) จะได้สมการที่ (3.6)

$$E_{in} = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} dydz - k_y \frac{\partial T}{\partial y} dxdz - k_z \frac{\partial T}{\partial z} dxdy \tag{3.6}$$

ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบ จะได้ดังนี้

$$E_{out} = \left(q_{x+dx}\right) + \left(q_{y+dy}\right) + \left(q_{z+dz}\right) \tag{3.7}$$

พลังงานความร้อนที่ออกจากระบบ q_{x+dx}, q_{y+dy} และ q_{z+dz} เมื่อ q_x, q_y และ q_z ไหลผ่านระยะ *dx, dy* และ *dz* โดยอาศัยการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ ดังนี้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \tag{3.8}$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \tag{3.9}$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \tag{3.10}$$

ดังนั้น แทนสมการที่ (3.8), (3.9) และ (3.10) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$E_{out} = \left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) + \left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) + \left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) \quad (3.11)$$

ส่วนพลังงานก่อกำเนิดจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งถ่ายพลังงานเข้าไปในระบบ แล้วปลดปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานเคมี พลังงานไฟฟ้า พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น สามารถแสดงในรูปสมการภายใต้ปริมาตรควบคุมที่ศึกษาในรูปแบบ 3 มิติได้ดังนี้

$$E_g = Qdxdydz \quad (3.12)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้น (heat source, W/m^3)

และพลังงานรวมที่สะสมในระบบเป็นการสะสมพลังงานในรูปต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง พลังงานในรูปอื่นๆ เช่น พลังงานจลน์ พลังงานศักย์ รวมไปถึงพลังงานทางเคมี ได้แก่ พลังงานพันธะ เป็นต้น แสดงในรูปสมการภายใต้รูปแบบ 3 มิติได้ดังนี้

$$E_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \quad (3.13)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density, kg/m^3)

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity, J/kg·°C)

t คือ เวลา (time, sec.)

ดังนั้น แทนสมการที่ (3.6), (3.11), (3.12) และ (3.13) ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz - Qdxdydz \quad (3.14)$$

หรือจัดรูปใหม่โดยแทนสมการที่ (3.3), (3.4) และ (3.5) ลงในสมการที่ (3.14) จะได้

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dxdydz + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} dxdydz + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dxdydz = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz - Qdxdydz \quad (3.15)$$

หรือจัดให้อยู่ในรูปสมการความร้อน ดังนี้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (3.16)$$

3.3.2 กลไกการถ่ายเทความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการคำนวณค่าอุณหภูมิ เป็นการถ่ายเทพลังงานจากระบบที่มีการเชื่อมกันไปยังอุณหภูมิต่าง ๆ กันไป ขึ้นกับสภาวะแวดล้อม อาจเกิดขึ้นพร้อมกันหรือเกิดเฉพาะกลไกใดกลไกหนึ่งก็ได้ กลไกการถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) (สมชัย อัครทิวา และขวัญจิต วงษ์ชาลี, 2545)

3.3.2.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน เป็นปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่ง ๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ สมการที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นปี ค.ศ. 1822 โดยนักวิทยาศาสตร์ฝรั่งเศสชื่อ โจเซฟ ฟูเรียร์ (Joseph Fourier) โดยรูปสมการที่ 3.17

$$\dot{q}_{cond} = -kA\frac{\partial T}{\partial x} \tag{3.17}$$

เมื่อ $\dot{q}_{cond}$ คือ อัตราการนำความร้อน

A คือ พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน

3.3.2.2 การพาความร้อน

การพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของของแข็งกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่ หรือกล่าวได้ว่าเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงาน จากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อน ลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วย ซึ่งการพาความร้อนมี 2 แบบคือ การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ (Forced convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เช่น การใช้พัดลมเป่าอากาศให้เกิดการเคลื่อนที่ผ่านถ้วยกาแฟร้อน เป็นต้น และการพาความร้อนอย่างอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากแรงลอยตัว ทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหลในบริเวณใกล้กับของแข็ง อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล โดยความร้อนจากถ้วยกาแฟจะทำให้อากาศมีความหนาแน่นต่ำลง (เบา) จึงเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ขณะเดียวกันอากาศที่เย็นกว่า มีความหนาแน่นสูงกว่าจะเคลื่อนที่มาแทนที่

สมการในการหาอัตราการพาความร้อนจะปรากฏอยู่ในรูปกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ดังนี้

$$\dot{q}_{conv} = hA\left(T_s - T_\infty\right) \tag{3.18}$$

เมื่อ $\dot{q}_{conv}$ คือ อัตราการพาความร้อน

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat convection coefficient)

T_s คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลโดยรอบ

3.3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ความร้อนจะเคลื่อนที่ไปในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเกิดขึ้นได้ดีในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุใด ๆ จะสามารถคำนวณการแผ่รังสีความร้อนได้ ดังนี้

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon_e \sigma_s A\left(T_s^4 - T_\infty^4\right) \tag{3.19}$$

เมื่อ $\dot{q}_{rad}$ คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน

ε_e คือ ค่าสภาพเปล่งรังสี (Emissivity)

σ_s คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} W/(m^{2}K^4)

3.4 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

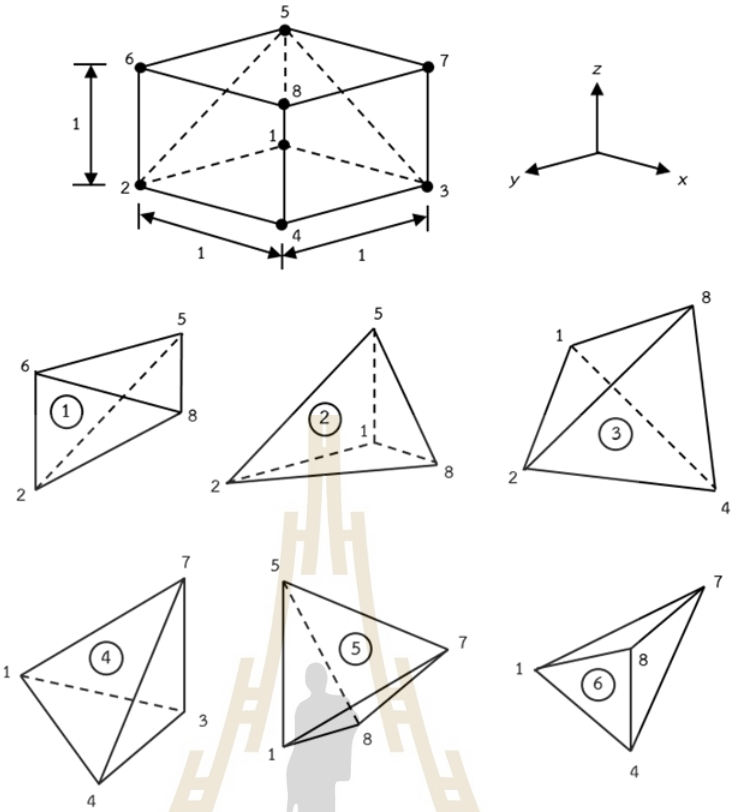
ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วมักจะต้องหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เองหากใช้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสืบเนื่องมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาจำเป็นต้องการหน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้นรวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสืบเนื่องคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้นๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องมีหลายประการเช่นความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่นโครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเตาไมโครเวฟ สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่า

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาค่าผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลายๆ ส่วนที่เรียกว่าอิลลิเมนต์ โดยที่การกระจัด และแรงภายในแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์ต่อโยงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนต์ต่างๆนี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติ อาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) รูปทรงแปดหน้า (Octahedron) หรือรูปทรงพีรามิด (Pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนดหรือจุดเชื่อมต่อน้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้านี้สามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมาได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น ซึ่งขั้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 6 ขั้นตอน (เผด็จ เผ่าละออ, 2548) ดังนี้

1) แบ่งอิลลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับการป้อนข้อมูลของทุกๆ อิลลิเมนต์ จึงขอยกตัวอย่างรูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วยอิลลิเมนต์ รูปทรงสี่หน้าทั้งหมด 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นสำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ คือ หมายเลขของอิลลิเมนต์และหมายเลขของโหนด พร้อมทั้งค่าพิกัดของแต่ละโหนด ซึ่งสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.8 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 จุดต่อ
เมื่อพิจารณาอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

ตารางที่ 3.4 ลักษณะข้อมูลของอิลลิเมนต์

หมายเลข อิลลิเมนต์	**หมายเลขจุดต่อ**			
	จุดต่อ *i*	**จุดต่อ *j***	**จุดต่อ *k***	**จุดต่อ *l***
1	2	8	5	6
2	1	2	8	5
3	1	2	4	8
4	1	3	4	7
5	1	7	8	5
6	1	8	4	7

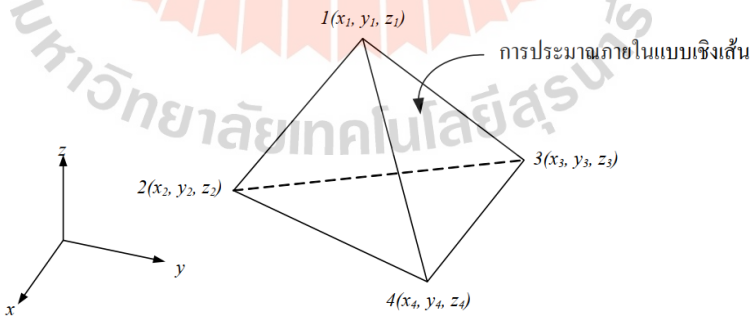
ตารางที่ 3.5 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งจุดต่อ

หมายเลขจุดต่อ	พิกัดแกน *x*	พิกัดแกน *y*	พิกัดแกน *z*
1	0	0	0
2	0	0	1
3	1	0	0
4	1	0	1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	1	0
8	1	1	1

2) เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ อย่างในกรณีอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 จุดต่อที่มีตัวห้อย 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายใน อิลลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.6 ตำแหน่งของจุดต่อ (x_n, y_n, z_n) เมื่อ n = 1, 2, 3 และ 4 เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า u_n โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์ $u_e(x, \gamma, z)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังนี้

$$u_e = \alpha + \beta x + \gamma y + \lambda z \tag{3.20}$$

โดยที่ α, β, γ และ λ เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากจุดต่อทั้งสี่ดังนี้



รูปที่ 3.9 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$u_e(x_1, y_1, z_1) = \alpha + \beta x_1 + \gamma y_1 + \lambda z_1$$

$$u_e(x_2, y_2, z_2) = \alpha + \beta x_2 + \gamma y_2 + \lambda z_2$$

$$u_e\left(x_3, y_{3,} z_3\right) = \alpha + \beta x_3 \ + \gamma y_3 + \lambda z_3$$

$$u_e\left(x_4, y_4, z_4\right) = \alpha + \beta x_4 + \gamma y_4 + \lambda z_4$$

นำค่า α, β, γ และ λ ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับลงไปในสมการที่ (3.20) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลลิเมนต์เป็น

$$u_e\left(x, y, z\right) = u_1 N_1 + u_2 N_2 + u_3 N_3 + u_4 N_4 \tag{3.21}$$

ซึ่ง N_n, n = 1, 2, 3 และ 4 คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ของรูปทรงสี่หน้า

$$N_n = \frac{1}{6V}\left(a_n + b_n x + c_n y + d_n z\right) \tag{3.22}$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$
$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$
$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$
$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$
$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$
$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$
$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$
$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$
$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$
$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$
$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$
$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$
$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{3.23}$$

ความแม่นยำของผลเฉลยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการประมาณภายในที่สมมติขึ้นมานี้ มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นตรงของปัญหามากน้อยเพียงใดด้วย

3) สร้างสมการของอิลลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \tag{3.24}$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e\ [u]_e = [f]_e$ โดย $[u]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่าเป็นเมทริกซ์ระดับอิลลิเมนต์ ซึ่งสมการของอิลลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอิลลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.24) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยับขยายเปลี่ยนแปลง เพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการสำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้นๆ ของการพัฒนาวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชัน แปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่วไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4) นำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบ จากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย *n* จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น *n* สมการ โดยแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & . & . & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & . & . & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & . & . & K_{3n} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & . & . & K_{nn} \end{bmatrix}_{sys(n\times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ . \\ . \\ u_n \end{bmatrix}_{sys(n\times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ . \\ . \\ f_n \end{bmatrix}_{sys(n\times 1)} \tag{3.25}$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{sys}[u]_{sys} = [f]_{sys}$ จากสมการที่ (3.25) เมทริกซ์ $[K]_{sys}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{sys} = [K]_{sys}^{T}$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวนโหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น

การนำสมการย่อยของแต่ละอิลลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบจำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอิลลิเมนต์ย่อยจำนวนมากๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย โดยสามารถทำความเข้าใจได้จากตัวอย่างรูปร่างของปัญหาดังรูปที่ 3.8 กล่าวคือจะทำการสร้างสมการรวมของระบบซึ่งประกอบด้วย 6 อิลลิเมนต์ 8 โหนด โดยจะแสดงการรวมของเมทริกซ์ $[K]_{sys}$ เพื่อเป็นตัวอย่าง

วิธีการนี้ทำได้โดยเขียนสมการของอิลลิเมนต์ต่างๆ พร้อมทั้งกำกับหมายเลขของโหนดทางแถวนอนและแถวตั้งของแต่ละอิลลิเมนต์ให้ถูกต้อง โดยจากรูปที่ 3.5 $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 1 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 2, 8, 5 และ 6 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 2 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1, 2, 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 3 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1, 2, 4 และ 8 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 4 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1, 3, 4 และ 7 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 5 ประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1, 7, 8 และ 5 ส่วน $[K]_e$ ของอิลลิเมนต์ที่ 6 ซึ่งเป็นอิลลิเมนต์สุดท้ายประกอบด้วยโหนดหมายเลข 1, 8, 4 และ 7 โดยสามารถเขียนแสดงให้เห็นได้ดังนี้

$$[K]_{e1} = \begin{array}{c} \\ (2) \\ (8) \\ (5) \\ (6) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (2) & (8) & (5) & (6) \end{array} \\ \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[K]_{e2} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (2) \\ (8) \\ (5) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (1) & (2) & (8) & (5) \end{array} \\ \begin{bmatrix} e_1 & f_1 & g_1 & h_1 \\ e_2 & f_2 & g_2 & h_2 \\ e_3 & f_3 & g_3 & h_3 \\ e_4 & f_4 & g_4 & h_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[K]_{e3} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (2) \\ (4) \\ (8) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (1) & (2) & (4) & (8) \end{array} \\ \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & k_1 & l_1 \\ i_2 & j_2 & k_2 & l_2 \\ i_3 & j_3 & k_3 & l_3 \\ i_4 & j_4 & k_4 & l_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[K]_{e4} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (3) \\ (4) \\ (7) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (1) & (3) & (4) & (7) \end{array} \\ \begin{bmatrix} m_1 & n_1 & o_1 & p_1 \\ m_2 & n_2 & o_2 & p_2 \\ m_3 & n_3 & o_3 & p_3 \\ m_4 & n_4 & o_4 & p_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[K]_{e5} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (7) \\ (8) \\ (5) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (1) & (7) & (8) & (5) \end{array} \\ \begin{bmatrix} q_1 & r_1 & s_1 & t_1 \\ q_2 & r_2 & s_2 & t_2 \\ q_3 & r_3 & s_3 & t_3 \\ q_4 & r_4 & s_4 & t_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$[K]_{e6} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (8) \\ (4) \\ (7) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} (1) & (8) & (4) & (7) \end{array} \\ \begin{bmatrix} u_1 & v_1 & w_1 & x_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 & x_2 \\ u_3 & v_3 & w_3 & x_3 \\ u_4 & v_4 & w_4 & x_4 \end{bmatrix} \end{array}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อมีหมายเลขกำกับทั้งทางแถวนอนและแถวตั้งกำกับสัมประสิทธิ์ทุกตัวของเมทริกซ์ของทุกอิลลิเมนต์แล้ว จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาใส่ลงในเมทริกซ์ระบบรวม $[K]_{sys}$ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งอยู่ในแถวนอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของอิลลิเมนต์ย่อยที่ 1 จะไปปรากฏอยู่ในแถวนอนที่ 5 แถวตั้งที่ 8 ของเมทริกซ์ระบบรวมดังแสดงในสมการ เป็นต้น

$$[K]_{sys} = \begin{array}{c} \\ (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \\ (8) \end{array} \begin{bmatrix} (1) & (2) & (3) & (4) & (5) & (6) & (7) & (8) \\ e_1+i_1+m_1+q_1+u_1 & f_1+j_1 & n_1 & k_1+o_1+w_1 & h_1+t_1 & 0 & p_1+r_1+x_1 & g_1+l_1+s_1+v_1 \\ c_2+i_2 & a_1+f_2+j_2 & 0 & k_2 & c_1+h_2 & d_1 & 0 & b_1+g_2+l_2 \\ m_2 & 0 & n_2 & o_2 & 0 & 0 & p_2 & 0 \\ i_3+m_3+u_3 & j_3 & n_3 & k_3+o_3+w_3 & 0 & 0 & p_3+x_3 & l_3+v_3 \\ e_4+q_4 & a_3+f_4 & 0 & 0 & c_3+h_4+t_4 & d_3 & r_4 & b_3+g_4+s_4 \\ 0 & a_4 & 0 & 0 & c_4 & d_4 & 0 & b_4 \\ m_4+q_2+u_4 & 0 & n_4 & o_4+w_4 & t_2 & 0 & p_4+r_2+x_4 & s_2+v_4 \\ c_3+i_4+q_3+u_2 & a_2+f_3+j_4 & 0 & k_4+w_2 & c_2+h_3+t_3 & d_2 & r_3+x_2 & b_2+g_3+l_4+s_3+v_2 \end{bmatrix}$$

5) ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่โหนด

6) คำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่าง ๆ แล้ว สามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย อันได้แก่ แบตเตอรี่ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งประกอบด้วยความรู้ทางด้านความร้อน กลไกการถ่ายเทความร้อน และสุดท้ายระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่อธิบายถึงขั้นตอนต่างๆ ในการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การคำนวณและการเปรียบเทียบผลการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations : PDE) ที่สามารถหาผลเฉลยของปัญหาที่ซับซ้อนและจำลองรูปแบบลักษณะได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ซึ่งผลเฉลยที่ได้สามารถนำไปคำนวณปัญหาด้านอื่นต่อเนื่องกันได้อีกด้วย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก รวมถึงขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่กระจายตัวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ณ เวลาต่าง ๆ และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองผลจึงทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกเพื่อเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่กับโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้น

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนแบบ 3 มิติ นั้นจะแสดงอยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายอุณหภูมิดังสมการที่ (4.1)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \qquad (4.1)$$

โดยที่ T คือ อุณหภูมิ (temperature, °C)

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (mass density, kg/m^3)

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity, J/kg·°C)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้น (heat source, W/m^3)

k_x, k_y และ k_z คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ (Thermal conductivity coefficient, W/m·°C)

โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่ขึ้นกับเวลา การหาผลเฉลยแม่นตรง (Exact solution) ของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่ขึ้นกับเวลา มีความยากและซับซ้อนมากในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ มาช่วยในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณนี้

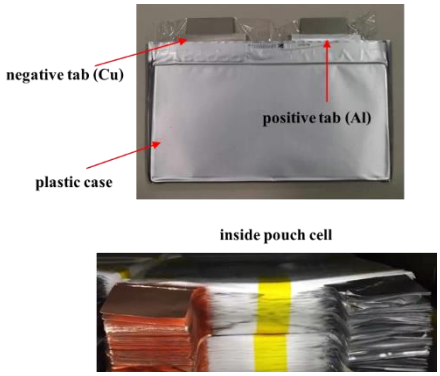
4.3 การคำนวณการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ณ เวลาต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เป็นวิธีคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการแก้ปัญหา รวมถึงเป็นวิธีคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในปัจจุบันนั้นมีความเร็วที่สูงขึ้น ทำให้การคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์มีความรวดเร็วและง่าย ซึ่งวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

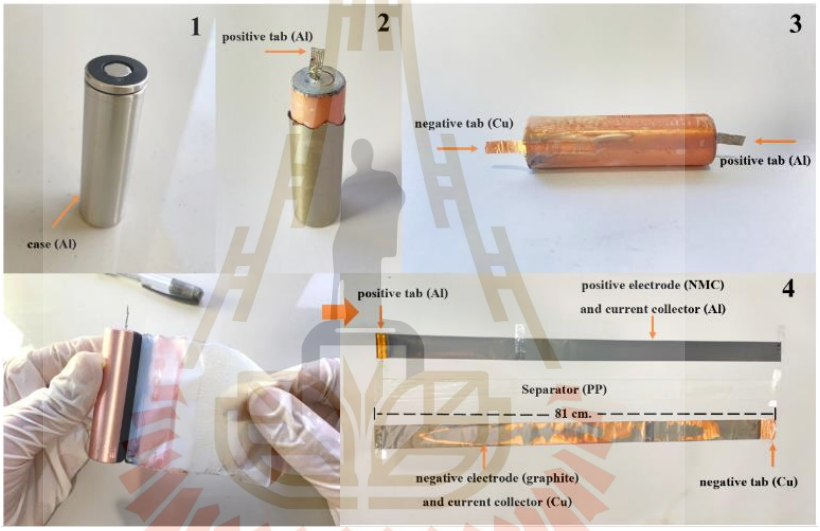
4.3.1 การออกแบบอิลลิเมนต์สำหรับพื้นที่ของปัญหา

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่า อิลลิเมนต์ (Element) โดยที่การกระจัดและแรงภายในของแต่ละอิลลิเมนต์ ณ จุดที่อิลลิเมนต์เชื่อมโยงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลลิเมนตต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่า ต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาในรูปแบบ 3 มิติ อาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) รูปทรงหกหน้า (Hexahedron) หรือรูปทรงพีรามิด (Pyramids) ก็ได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนด (Node) หรือจุดต่อน้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้านี้สามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมาได้เป็นอย่างดี ซึ่งค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนอิลลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2542)

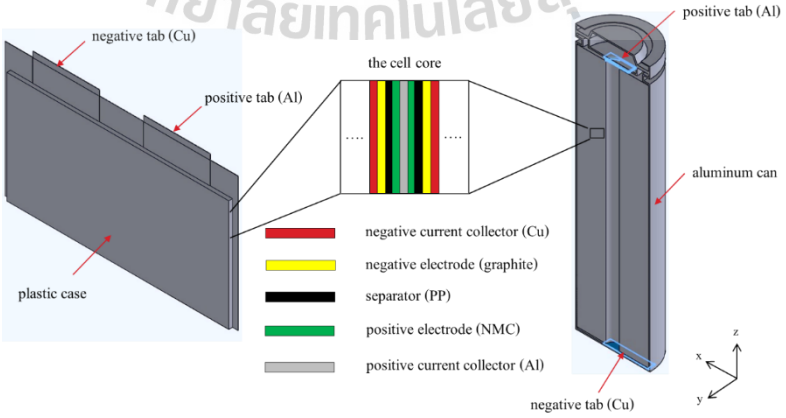
งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ ($LiNiMnCoO_2$ หรือ NMC) แบบถุง (Pouch cell) ของบริษัท Microvast Holding Inc. โดยมีขนาดของแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่เท่ากับ 3.7V/15Ah และแบบทรงกระบอก (Cylindrical cell) มีขนาดแรงดันไฟฟ้าและความจุเท่ากับ 3.7V/2.1Ah ของบริษัท Sony Energy Devices Corporation รุ่น US18650VTC4 ภายในแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยเซลล์หลาย ๆ เซลล์ซ้อนทับกันทั้งหมด 18 ชั้น โดยที่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงมีลักษณะการซ้อนทับกันของชั้นเซลล์เป็นชั้น (Sandwich) ส่วนแบบทรงกระบอกจะมีลักษณะการซ้อนทับกันของชั้นเซลล์เป็นม้วน (Jellyroll) ภายใน 1 ชั้นเซลล์จะประกอบไปด้วยตัวรับกระแสขั้วบวกที่ทำจากอลูมิเนียม (Positive current collector) ซึ่งถูกเคลือบด้วยสารประกอบ NMC (Positive electrode) ทั้งสองด้าน รวมถึงตัวรับกระแสขั้วลบที่ทำจากทองแดง (Negative current collector) ถูกเคลือบด้วยแกรไฟต์ (Negative electrode) ทั้งสองด้านเช่นกัน และแผ่นกั้นที่ทำมาจากโพลิโพรพิลีน (Separator) แสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

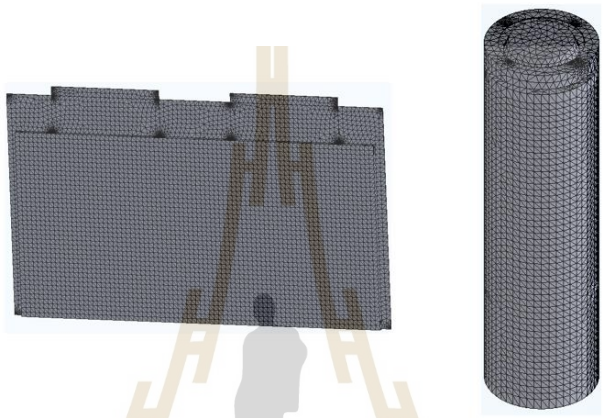


รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก



รูปที่ 4.3 แบบจำลองส่วนประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกด้วยโปรแกรม Solidworks

ในการออกแบบพื้นที่ของปัญหาที่ใช้ในการจำลองผลค่าการกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์จะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของแบบจำลอง ซึ่งจะแบ่งเป็นอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ด้วยการสร้างกริดของโปรแกรม Solidworks โดยเมื่อกำหนดความละเอียดของกริดสูงสุดแล้ว แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงจะประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ (Node) 26,031 จุดต่อ จำนวนอิลลิเมนต์ 121,552 อิลลิเมนต์ และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกประกอบด้วยจุดต่อ (Node) 18,826 จุดต่อ จำนวนอิลลิเมนต์ 89,991 อิลลิเมนต์ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแบ่งจุดต่อและอิลลิเมนต์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) และทรงกระบอก (Cylindrical cell) ตามลำดับ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ

การออกแบบอิลลิเมนต์นั้นสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ โดยรูปแบบของอิลลิเมนต์ที่แตกต่างกันจะนำมาซึ่งการเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ที่แตกต่างกันตามไปด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้พิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อและแสดงให้เห็นถึงกระบวนการดำเนินงานในการเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ที่ถูกต้องตามรูปร่างที่เลือกใช้ โดยในขั้นตอนนี้เป็นการเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณบนอิลลิเมนต์นี้เป็นแบบเชิงเส้นในกรณีของการกระจายอุณหภูมิดังนี้

$$T(x,y,z) = N_1T_1 + N_2T_2 + N_3T_3 + N_4T_4 \tag{4.2}$$

โดยที่ N_n, n = 1, 2, 3 และ 4 คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ของรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ และ T_n คือ ค่าผลลัพธ์ของอุณหภูมิแต่ละจุดต่อ 1, 2, 3 และ 4 ของแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งลักษณะฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$N_n = \frac{1}{6V}(a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \tag{4.3}$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนท์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{4.4}$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3)$$
$$a_2 = x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4)$$
$$a_3 = x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2)$$
$$a_4 = x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$
$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$
$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$
$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$
$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$
$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$
$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$
$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$
$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$
$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

4.3.3 การสร้างสมการระดับอิลลิเมนต์

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการในระดับอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถแสดงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยดังสมการที่ (4.1) ซึ่งแสดงไว้ก่อนหน้าดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+Q$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อหาระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weighted residual method) ด้วยวิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin) ซึ่งในปัจจุบันเป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ การสร้างสมการระดับอิลลิเมนต์ด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้ การแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4.1) โดยจะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ *R* แสดงได้ดังนี้

$$R=\rho c\frac{\partial T}{\partial t}-\left(k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-Q \qquad (4.5)$$

ซึ่ง *R* เรียกว่าเศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นตรงของปัญหา เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่เที่ยงตรงมากที่สุดจะกระทำได้โดย การคูณเศษตกค้าง *R* ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก *W* (Weighting function) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลลิเมนต์นั้น และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\int_V W_n R\,dV=0 \qquad n=1,\ 2,\ 3,\ \text{และ}\ 4 \qquad (4.6)$$

สำหรับอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ ซึ่งมีจุดต่อทั้งสี่ที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่านี้ โดยปกติจะเลือกให้ $W_n=N_n$ (Lerch, 1990) ซึ่งเรียกว่า บับโนฟ-กาเลอร์คิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทนค่า *R* หรือสมการที่ (4.5) ลงในสมการที่ (4.6) จะได้

$$\int_V N_n\left[\rho c\frac{\partial T}{\partial t}-\left(k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-Q\right]=0 \qquad (4.7)$$

แตกพจน์ต่างๆ เพื่อทำการพิจารณา จะได้

$$\int_V N_n\rho c\frac{\partial T}{\partial t}dV-\int_V N_n\left(k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)dV-\int_V N_n Q\,dV=0 \qquad (4.8)$$

โดยพจน์ที่สองของสมการที่ (4.8) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สอง ซึ่งยากต่อการหาค่าผลเฉลย จึงเลือกใช้วิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by parts) โดยใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองให้เป็นอันดับหนึ่ง ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\int_V u\left(\nabla\cdot\vec{V}\right)dV=\int_\Gamma u\left(\vec{V}\cdot\hat{n}\right)d\Gamma-\int_V\left(\nabla u\cdot\vec{V}\right)dV \qquad (4.9)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อ Γ คือ ขอบเขตด้านนอกของอิลลิเมนต์ V และเปรียบเทียบกับพจน์ที่สองสมการที่ (4.8) จะได้

$$u = N_n$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k}$$

$$\vec{V} = k_x \frac{\partial T}{\partial x}\hat{i} + k_y \frac{\partial T}{\partial y}\hat{j} + k_z \frac{\partial T}{\partial z}\hat{k}$$

$$\left(\nabla \cdot \vec{V}\right) = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

และเนื่องจาก $\hat{n}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ Γ

$$\hat{n} = n_x\hat{i} + n_y\hat{j} + n_z\hat{k}$$

ดังนั้น

$$\vec{V} \cdot \hat{n} = k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = -\vec{q} \cdot \hat{n}$$

$$u\left(\vec{V} \cdot \hat{n}\right) = N_n \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) = N_n \left(-\vec{q} \cdot \hat{n}\right)$$

$$\nabla u = \frac{\partial N_n}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial N_n}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial N_n}{\partial z}\hat{k}$$

$$\nabla u \cdot \vec{V} = k_x \frac{\partial N_n}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_n}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_n}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.8) จึงเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k_x \frac{\partial N_n}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_n}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_n}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z} \right) dV - \int_\Gamma N_n \left(-\vec{q} \cdot \hat{n}\right) d\Gamma - \int_V N_n Q dV = 0 \quad (4.10)$$

จากสมการที่ (4.10) เนื่องจากภายในแกนของแบตเตอรี่ (Cell core) ประกอบไปด้วยเซลล์หลาย ๆ ชั้นเซลล์ประกอบรวมกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งมีขนาดความหนาของวัสดุในหน่วยไมโครเมตร เพราะฉะนั้นพจน์ที่หนึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของมวล (Average mass density) และค่าเฉลี่ยความจุความร้อนจำเพาะ (Average specific heat capacity) ภายในแกนของแบตเตอรี่ (Wang et al., 2017) ได้ดังนี้

$$\rho_{cell} = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i v_i} \quad \text{และ} \quad c_{cell} = \frac{\sum_i \rho_i c_i v_i}{\sum_i m_i} \tag{4.11}$$

โดยที่ i คือ วัสดุ (material)

ρ_{cell} คือ ความหนาแน่นภายมวลภายในแกนของแบตเตอรี่ (Cell core mass density, kg/m^3)

c_{cell} คือ ความจุความร้อนจำเพาะภายในแกนของแบตเตอรี่ (Cell core specific heat capacity, J/kg˚C)

พจน์ที่สองของสมการที่ (4.10) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity coefficient) ตามพิกัดแกน x, y และ z ดังรูปที่ 4.2 นั้นพบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) พิกัดตามแนวแกน x และ z มีการซ้อนทับกันของวัสดุในลักษณะขนานกัน และแกน y วัสดุซ้อนทับกันในลักษณะอนุกรม ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก (Cylindrical cell) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามพิกัดแกน x, y และ z (Wang et al., 2017) หาได้ดังสมการที่ (4.12)

$$k_s = \frac{V_{cell}}{\sum_i \frac{v_i}{k_i}} \quad \text{และ} \quad k_p = \frac{\sum_i k_i v_i}{V_{cell}} \tag{4.12}$$

โดยที่ k_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุซ้อนทับกันแบบอนุกรม (Series thermal conductivity coefficient, W/m˚C)

k_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุซ้อนทับกันแบบขนาน (Parallel thermal conductivity coefficient, W/m˚C)

และพนจ์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตภายนอกของอิลลิเมนต์คือพจน์ที่สาม ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนตลอดขอบนอกของอิลลิเมนต์นั้น ๆ หากอิลลิเมนต์ที่พิจารณาอยู่ในบริเวณขอบนอกของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งมีเงื่อนไขขอบเขตของการพาความร้อน เราจึงแทนพจน์นี้ด้วยเงื่อนไขการพาความร้อน (Newton's law of cooling) ดังสมการที่ (4.13)

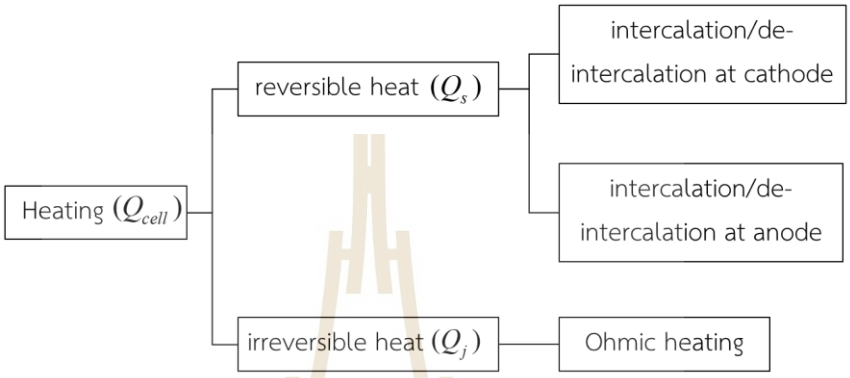
$$q = h\left(T - T_\infty\right) \tag{4.13}$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat convection coefficient, W/m^2·˚C)

T_∞ คือ อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (ambient temperature, ˚C)

และพจน์ที่สี่คือพจน์ที่เกิดจากปริมาณความร้อนที่ผลิตขึ้น ถูกพัฒนาขึ้นปี 1984 โดย Bernardi et al. ซึ่งปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นภายในแบตเตอรี่ จะพิจารณาอยู่ 3 ส่วน คือ ปริมาณ

ความร้อนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Q_s) และปริมาณความร้อนจากกระแสไฟฟ้าไหลภายในแกนแบตเตอรี่ (Q_j) โดยแผนภาพการสร้างความร้อนภายในแกนของแบตเตอรี่ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ยังมีปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นจากกระแสไหลผ่านแท็บไฟฟ้า (Q_t) เมื่อนำปริมาณความร้อนทุกส่วนมารวมกันสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.14)



รูปที่ 4.5 แผนภาพการสร้างความร้อนภายในแกนของแบตเตอรี่

$$Q = Q_s + Q_j + Q_t = -T\Delta S\frac{I}{nFV_{cell}} + \frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} + \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2 \tag{4.14}$$

โดยที่ ΔS คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (entropy change, J/mol·°C)
I คือ ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (operating current, A)
n คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน (charge number of electrons, 1)
F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday's constant, 96,485 c/mol)
V_{cell} คือ ปริมาตรของแกนแบตเตอรี่ (cell core volume, m^3)
R_{in} คือ ค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแกนแบตเตอรี่ (internal resistance, Ω)
σ_{tab} คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (electric conductivity, S/m)
A_{tab} คือ พื้นที่หน้าตัดของแท็บไฟฟ้า (cross-section tab area, m^2)

ดังนั้น จากสมการที่ (4.10) จึงกลายมาเป็น

$$\int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k_x \frac{\partial N_n}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_n}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_n}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_\Gamma N_n \left(h\left(T - T_\infty\right) \right) d\Gamma$$
$$-\int_V N_n \left(Q_s T + Q_j + Q_t \right) dV = 0 \tag{4.15}$$

จากสมการที่ (4.15) จัดรูปใหม่จะได้สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์ในระดับอิลลิเมนต์ดังนี้

$$\int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k_x \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_\Gamma N_n h T d\Gamma$$
$$- \int_V N_n Q_s T dV = \int_\Gamma N_n h T_\infty d\Gamma + \int_V N_n Q_j dV + \int_V N_n Q_t dV \quad (4.16)$$

เนื่องจากอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้ามีทั้งหมดสี่จุดต่อ ทำให้สมการระดับอิลลิเมนต์มีทั้งหมด 4 สมการ ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\int_V [N]_{4x1} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k_x \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4x1} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4x1} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4x1} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV$$
$$+ \int_\Gamma [N]_{4x1} h T d\Gamma - \int_V [N]_{4x1} Q_s T dV = \int_\Gamma [N]_{4x1} h T_\infty d\Gamma + \int_V [N]_{4x1} Q_j dV + \int_V [N]_{4x1} Q_t dV$$
(4.17)

จากฟังก์ชันการประมาณภายในแบบเชิงเส้นที่ได้แสดงดังสมการที่ (4.2) จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$T(x, y, z, t) = [N]_{1x4} [T]_{4x1}$$

ดังนั้น $\frac{\partial T}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1x4} [T]_{4x1}$, $\frac{\partial T}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1x4} [T]_{4x1}$, $\frac{\partial T}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1x4} [T]_{4x1}$

และ $\frac{\partial T}{\partial t} = [N]_{1x4} \left[\dot{T} \right]_{4x1}$ (4.18)

เมื่อแทนสมการที่ (4.18) ลงในสมการที่ (4.17) จะได้

$$\int_V \left(k_x \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{4x1} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1x4} + k_y \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{4x1} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1x4} + k_z \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{4x1} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1x4} \right) dV [T]_{4x1}$$
$$+ \int_V [N]_{4x1} \rho c [N]_{1x4} dV \left\{ \dot{T} \right\}_{4x1} + \int_\Gamma [N]_{4x1} h [N]_{1x4} d\Gamma [T]_{4x1} - \int_V [N]_{4x1} Q_s [N]_{1x4} dV [T]_{4x1} \quad (4.19)$$
$$= \int_\Gamma [N]_{4x1} h T_\infty d\Gamma + \int_V [N]_{4x1} Q_j dV + \int_V [N]_{4x1} Q_t dV$$

เขียนสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 4 สมการ ได้ดังนี้

$$[C]_{4x4} \left\{ \dot{T} \right\} + \left[[K_c]_{4x4} + [K_h]_{4x4} + [K_s]_{4x4} \right] \{T\} = \{Q_h\}_{4x1} + \{Q_j\}_{4x1} + \{Q_t\}_{4x1} \quad (4.20)$$

โดยที่ $[C]_{4x4}$ คือ เมทริกซ์ความจุความร้อน
$[K_c]_{4x4}$ คือ เมทริกซ์การนำความร้อน

$[K_h]_{4x4}$ คือ เมทริกซ์การพาความร้อน

$[K_s]_{4x4}$ คือ เมทริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี

$\{Q_h\}_{4x1}$ คือ โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการพาความร้อน

$\{Q_j\}_{4x1}$ คือ โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลภายในแกนแบตเตอรี่

$\{Q_t\}_{4x1}$ คือ โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลผ่านแท็บไฟฟ้า

เมทริกซ์ความจุความร้อน $[C]_{4x4}$

จาก $$[C]_{4x4} = \int_V [N]_{4x1} \rho c [N]_{1x4} dV \tag{4.21}$$

สมการที่ (4.21) หากค่าความหนาแน่นมวล ρ และค่าความจุความร้อนจำเพาะ c มีค่าคงที่ ดังนั้น

$$[C]_{4x4} = \rho c \int N_n N_m dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.22}$$

สมการที่ (4.22) นี้สามารถคำนวณโดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (factorial formula) (อิสราภรณ์ วัฒนา, 2558) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.23) จะได้

$$\int_V L_1^a L_2^b L_3^c L_4^d dV = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \tag{4.23}$$

จากสมการที่ (4.23) สามารถแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี $L_n = L_m$ คือ $L_n \neq L_m$ และในกรณี $L_n = L_m$ จะขอยกตัวอย่างในการพิจารณาจุดต่อที่ 2 ของรูปทรงสี่หน้า ซึ่งจะได้ b = 2 และนอกจากนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (4.23) จะได้

$$\int_V L_1^2 dV = \frac{0!2!0!0!}{(0+2+0+0+3)!} 6V = \frac{12V}{5!} = \frac{2V}{20} \tag{4.24}$$

และในกรณี $L_n \neq L_m$ จะขอยกตัวอย่างในการพิจารณาจุดต่อที่ 3 และ 4 ของรูปทรงสี่หน้า ซึ่งจะได้ c = d = 1 และนอกจากนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (4.23) จะได้

$$\int_V L_3^1 L_4^1 dV = \frac{0!0!1!1!}{(0+0+1+1+3)!} 6V = \frac{6V}{5!} = \frac{V}{20} \tag{4.25}$$

โดยที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็จะพิจารณาในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจากสมการที่ (4.22) จะได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$[C]_{4x4} = \frac{\rho c V}{20}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

เมทริกซ์การนำความร้อน $[K_c]_{4x4}$

$$[K_c]_{4x4} = \int_V \left(k_x \left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]_{4x1}\left[\frac{\partial N}{\partial x}\right]_{1x4} + k_y \left[\frac{\partial N}{\partial y}\right]_{4x1}\left[\frac{\partial N}{\partial y}\right]_{1x4} + k_z \left[\frac{\partial N}{\partial z}\right]_{4x1}\left[\frac{\partial N}{\partial z}\right]_{1x4} \right) dV \tag{4.27}$$

และจากสมการที่ (4.27) ทำการแปลงระบบสมการโดย

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \qquad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \qquad \text{และ} \qquad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \qquad n = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.28}$$

แทนสมการที่ (4.28) ลงในสมการที่ (4.27) จะได้

$$[K_c]_{4x4} = \int \left(k_x \left[\frac{b_n}{6V}\frac{b_m}{6V}\right] + k_y \left[\frac{c_n}{6V}\frac{c_m}{6V}\right] + k_z \left[\frac{d_n}{6V}\frac{d_m}{6V}\right] \right) dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4$$

$$= \frac{1}{36V^2}\left(k_x [b_n b_m] + k_y [c_n c_m] + k_z [d_n d_m] \right) \int dxdydz$$

$$[K_c]_{4x4} = \frac{1}{36V}\left(k_x [b_n b_m] + k_y [c_n c_m] + k_z [d_n d_m] \right) \tag{4.29}$$

เมทริกซ์การพาความร้อน $[K_h]_{4x4}$

จาก $$[K_h]_{4x4} = \int_\Gamma [N]_{4x1} h [N]_{1x4} d\Gamma \tag{4.30}$$

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนบนปริมาตรของอิลลิเมนต์ดังสมการที่ (4.30) จึงกลายเป็น

$$[K_h]_{4x4} = h \int N_n N_m dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.31}$$

สมการที่ (4.31) นี้สามารถคำนวณโดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตพิกัดตลอดปริมาตร จะได้

$$[K_h]_{4x4} = \frac{hV}{20}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

เมทริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี $[K_s]_{4x4}$

จาก $$[K_s]_{4x4} = -\int_V [N]_{4x1} Q_s [N]_{1x4}\, dV \tag{4.33}$$

หรือ $$[K_s]_{4x4} = I \frac{\Delta S}{nFV_{cell}} \int N_n N_m dxdydz \tag{4.34}$$

สมการที่ (4.34) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตพิกัดตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$[K_s]_{4x4} = \left(I \frac{\Delta S}{nFV_{cell}} \right) \frac{V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการพาความร้อน $\{Q_h\}_{4x1}$

$$\{Q_h\}_{4x1} = \int_\Gamma [N]_{4x1} hT_\infty d\Gamma \tag{4.36}$$

หรือ $$\{Q_h\}_{4x1} = hT_\infty \int N_n dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.37}$$

สมการที่ (4.37) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตพิกัดตลอดปริมาตร ได้ดังนี้

$$\{Q_h\}_{4x1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลภายในแกนแบตเตอรี่ $\{Q_j\}_{4x1}$

$$\{Q_j\}_{4x1} = \int_V [N]_{4x1} Q_j dV \tag{4.39}$$

หรือ $$\{Q_j\}_{4x1} = \frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} \int N_n dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.40}$$

สมการที่ (4.40) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตพิกัดตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_j\}_{4x1} = \left(\frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} \right) \frac{V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลผ่านแท็บไฟฟ้า $\{Q_t\}_{4x1}$

$$\{Q_t\}_{4x1} = \int_{\Gamma} [N]_{4x1} Q_t d\Gamma \tag{4.42}$$

หรือ $$\{Q_t\}_{4x1} = \frac{1}{\sigma_{tab}} \left(\frac{I}{A_{tab}} \right)^2 \int N_n dxdydz \qquad n,m = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \tag{4.43}$$

สมการที่ (4.43) ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตพิกัดตลอดปริมาตรได้ดังนี้

$$\{Q_t\}_{4x1} = \frac{1}{\sigma_{tab}} \left(\frac{I}{A_{tab}} \right)^2 \frac{V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.44}$$

4.3.4 การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่

การแก้ปัญหาภายใต้สถานะชั่วครู่จะใช้วิธีความสัมพันธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ ดังแสดงในสมการที่ (4.45) โดย Δt คือ ค่าของช่วงเวลา (Stepping time) โดยถ้าเลือกใช้ β = 0 จะเป็นวิธีของออยเลอร์ (Euler) ถ้า β = 1/2 เป็นวิธีของแครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson) ถ้า β = 2/3 เป็นวิธีของกาเลอร์คิน (Galerkin) และถ้า β = 1 จะเรียกว่า วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (Backward difference) ซึ่งในงานนี้เลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังดังสมการที่ (4.45) เนื่องจากวิธีนี้รับประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1-\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^{t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^{t}}{\Delta t} \tag{4.45}$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^{t}}{\Delta t} \tag{4.46}$$

จากการเลือกใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง แทนค่าสมการที่ (4.46) ลงในสมการที่ (4.20) จึงได้

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [K] \{T\}^{t+\Delta t} = \{Q\}^{t+\Delta t} \tag{4.47}$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + [K] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^{t} + \{Q\}^{t+\Delta t} \tag{4.48}$$

โดยที่ $[K] = [K_c] + [K_h] + [K_s]$ และ $\{Q\} = \{Q_h\} + \{Q_j\} + \{Q_t\}$

4.3.5 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันขึ้นเป็นสมการรวมของระบบ ซึ่งถ้าหากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย ๆ ซึ่งประกอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ไปด้วย *n* จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมขึ้น ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยทั้งหมด *n* สมการ เพราะฉะนั้นจึงได้สมการรวมของระบบดังนี้

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C]_{nxn}+[K]_{nxn}\right)\{T\}_{nx1}^{t+\Delta t}=\frac{1}{\Delta t}[C]_{nxn}\{T\}_{nx1}^{t}+\{Q\}_{nx1}^{t+\Delta t} \quad (4.49)$$

4.3.6 การประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย

ขั้นตอนการหาค่าผลเฉลยการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตบริเวณต่างๆ ให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนดังนี้

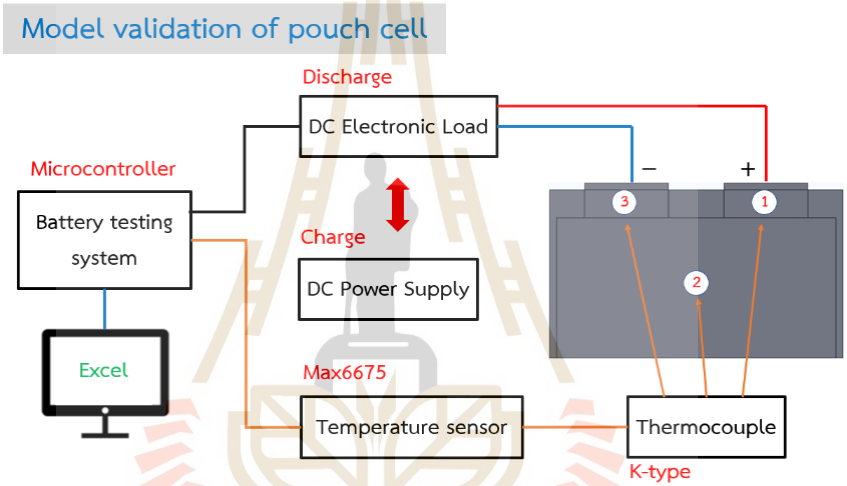
- อุณหภูมิเริ่มต้นของทุกจุดต่อ $T(t=0)=25^{\circ}\mathrm{C}$
- อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (Ambient temperature) $T_{\infty}=25^{\circ}\mathrm{C}$
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat convection coefficient) $h=$ 7.17 W/m^2·°C (Jeon and Baek, 2011)
- อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (1C) = 15A
- อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก (1C) = 2.1 A
- Δt (stepping time) = 1%DOD

4.4 วิธีการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

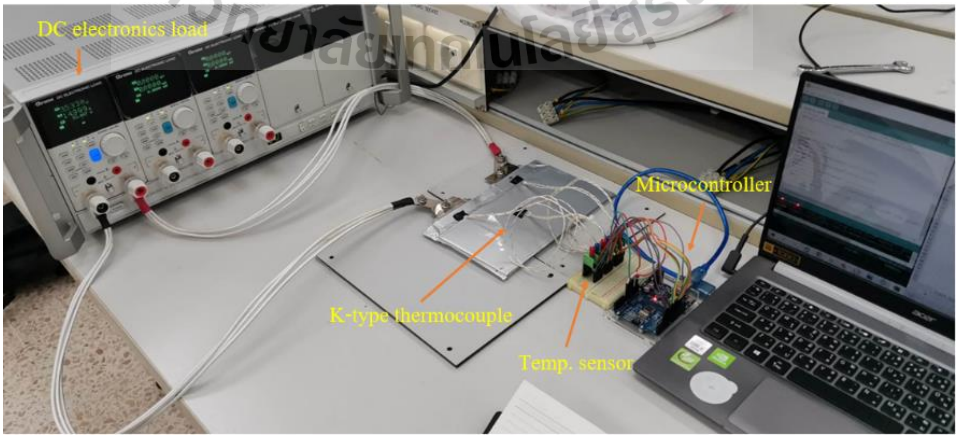
สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบการหาค่าการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกนั้นจะประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ ระบบไมโครคอนโทลเลอร์ (Microcontroller) เครื่องสร้างภาระโหลด (DC Electronic Load) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (DC Power supply) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) ทำงานร่วมกับเทอร์โมคัปเปิล (K-type thermocouple) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก ซึ่งรายละเอียดและค่าพิกัดของอุปกรณ์ที่กล่าวมาผู้วิจัยได้เขียนไว้ในภาคผนวก ก. ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทดสอบการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุด้วยกระแสแบบคงที่ที่แตกต่างกัน พร้อมทั้งตรวจวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งสองแบบ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

สำหรับการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกก่อนเริ่มการทดสอบ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต้องมีความจุไฟฟ้าอยู่ในสถานะเต็ม (100%SOC) จากนั้นตั้งค่าอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1C-rate ที่เครื่องสร้างภาระโหลดเพื่อดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่จำนวน 1 เท่าของความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ เมื่อเริ่มทดสอบการคายประจุไฟฟ้าเครื่องสร้างภาระโหลดจะปรับขนาดความต้านทานภายในตัวเครื่อง เพื่อบังคับให้แบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ด้วยอัตรา 1C-rate ทุก ๆ ปริมาณความจุที่ใช้ไปของแบตเตอรี่ 1%DOD เซนเซอร์จะตรวจวัดค่าอุณหภูมิตามจุดที่เทอร์โมคัปเปิลสัมผัส และเปลี่ยนสัญญาณทางกายภาพ (อุณหภูมิ) เป็นสัญญาณที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) จากนั้นไมโครคอนโทลเลอร์จะนำสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้ไปคำนวณเป็นอุณหภูมิ พร้อมทั้งบันทึกและแสดงค่าผลลัพธ์ของอุณหภูมิลงบน

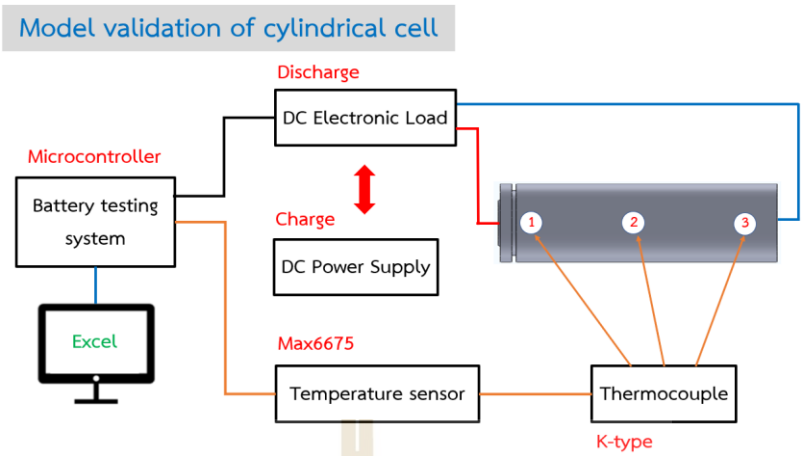
คอมพิวเตอร์จนกว่าแบตเตอรี่จะคายประจุไฟฟ้าจนหมด (Cut-off voltage 2.5V) จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการอัดประจุไฟฟ้าเพื่อนำแบตเตอรี่มาใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งสองแบบจะถูกอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ 1C-rate จนกว่าแบตเตอรี่จะมีสถานะเต็ม (100%SOC) และทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้าซ้ำ โดยการเปลี่ยนอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่เป็น 2 และ 4C-rate สำหรับแบตเตอรี่แบบถุง และอัตราคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 3 และ 5C-rate สำหรับแบตเตอรี่แบบทรงกระบอก ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวมาซ้ำเป็นจำนวน 2 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ โดยแผนภาพการเชื่อมต่อวงจรและภาพการทดสอบการคายและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6–4.9



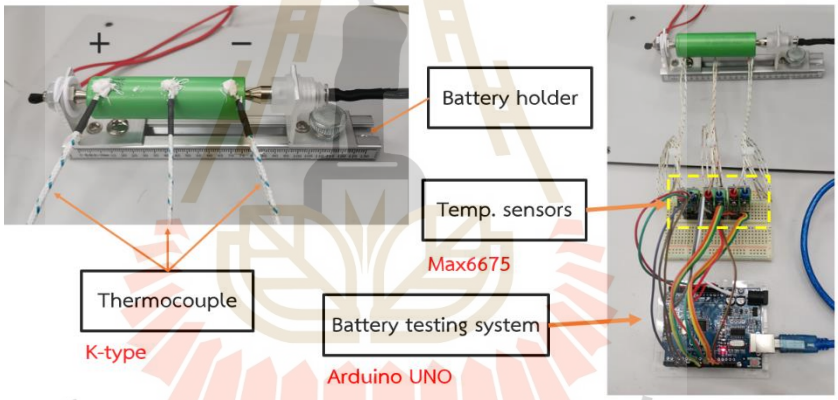
รูปที่ 4.6 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรการคายและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง



รูปที่ 4.7 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบการคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง



รูปที่ 4.8 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรการคายและอัดประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก



รูปที่ 4.9 การเชื่อมต่อวงจรทดสอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าการกระจายอุณหภูมิด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน โดยขั้นตอนต่าง ๆ จะถูกนำไปประดิษฐ์เป็นโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผล รวมถึงนำเสนอวิธีการทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จากนั้นนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับโปรแกรมจำลองผลที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

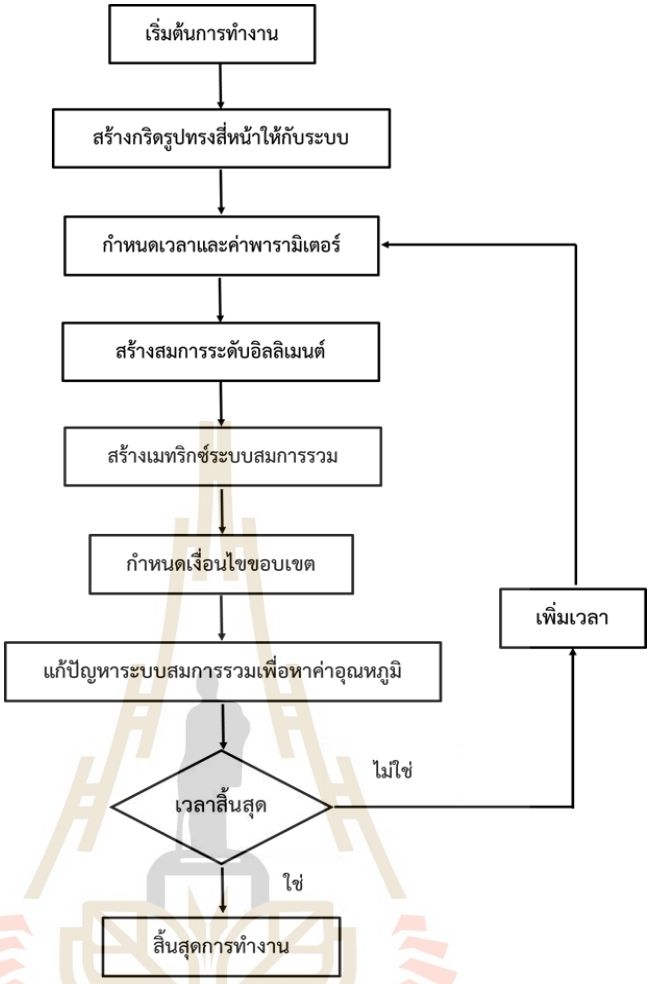
บทที่ 5
ผลการจำลองพร้อมเปรียบเทียบผลการทดสอบจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

5.1 บทนำ

ในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณและทดสอบการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริง สำหรับการคำนวณการกระจายอุณหภูมิในบทนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติในการวิเคราะห์ปัญหาภายใต้สภาวะชั่วครู่ โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดของขนาดและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองผล และอธิบายถึงการทำงานของโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งผลการทดสอบตัวอย่างจริงจะใช้กล้องตรวจจับความร้อนและเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลสำหรับการทดสอบ จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ทั้ง 2 วิธี เพื่อนำโปรแกรมจำลองผลที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ออกแบบแบตเตอรี่ในบทถัดไป

5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลการกระจายอุณหภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

โปรแกรมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก เกิดจากการประดิษฐ์ระเบียบวิธีไฟไนทอิลลิเมนตขึ้นเปนโปรแกรมคอมพิวเตอรที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB คุณลักษณะของจุดตอและอิลลิเมนตที่ปอนใหแกโปรแกรมไฟไนทอิลลิเมนตเกิดจากการสรางกริดโดยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Solidworks สำหรับโครงสรางของโปรแกรมคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิสามารถแทนไดดวยแผนภูมิดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผล

จากแผนภูมิที่ 5.1 แสดงถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลของระบบโดยรวมเพื่อให้เกิดความเขาใจถึงหนาที่ของโปรแกรมแตละสวน ไดอธิบายถึงรายละเอียดหนาที่ตาง ๆ เปนขั้นตอน ดังตอไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างกริดรูปทรงสี่หน้าให้กับระบบ : ขั้นตอนนี้จะใช้โปรแกรม Solidworks ในการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าให้กับรูปร่างของปัญหา ซึ่งก็คือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก จากนั้นดึงข้อมูลพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ ของอิลลิเมนต์รูปทรงสี่หน้ามาเก็บไว้ เพื่อใช้สร้างสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดเวลาและค่าพารามิเตอร์ : โปรแกรมจะเริ่มทำงานด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เวลา $t=0$ รวมถึงกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ขึ้นและไม่ขึ้นอยู่กับเวลาของวัสดุต่าง ๆ ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเริ่มต้นเท่ากับ 25°C

ขั้นตอนที่ 3 โปรแกรมจะใช้วิธีการคำนวณอิลลิเมนต์เมทริกซ์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อของทุก ๆ อิลลิเมนต์ดังสมการ (4.49) ที่ได้กล่าวมาจากบทก่อนหน้าและนำมาแสดงใหม่ดังสมการที่ (5.1)

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C]_{4x4}+[K]_{4x4}\right)\{T\}_{4x1}^{t+\Delta t}=\frac{1}{\Delta t}[C]_{4x4}\{T\}_{4x1}^{t}+\{Q\}_{4x1}^{t+\Delta t} \quad (5.1)$$

โดยที่ $\{T\}_{4x1}$ คือ คำตอบของสมการที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ รวมถึงความสัมพันธ์ของอิลลิเมนต์เมทริกซ์ความจุความร้อน $[C]_{4x4}$, เมทริกซ์การนำความร้อน $[K_c]_{4x4}$, เมทริกซ์การพาความร้อน $[K_h]_{4x4}$, เมทริกซ์อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี $[K_s]_{4x4}$, โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากการพาความร้อน $\{Q_h\}_{4x1}$, โหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลภายในแกนแบตเตอรี่ $\{Q_j\}_{4x1}$ และโหลดเวกเตอร์อันเนื่องมาจากกระแสไหลผ่านแท็บไฟฟ้า $\{Q_t\}_{4x1}$ แสดงดังสมการด้านล่างตามลำดับ โดยที่เมทริกซ์และโหลดเวกเตอร์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละอิลลิเมนต์ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบเมทริกซ์สมการรวมต่อไป

$$[C]_{4x4}=\frac{\rho cV}{20}\begin{bmatrix}2&1&1&1\\1&2&1&1\\1&1&2&1\\1&1&1&2\end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$[K_c]_{4x4}=\frac{1}{36V}\left(k_x[b_n b_m]+k_y[c_n c_m]+k_z[d_n d_m]\right) \quad (5.3)$$

$$[K_h]_{4x4}=\frac{hV}{20}\begin{bmatrix}2&1&1&1\\1&2&1&1\\1&1&2&1\\1&1&1&2\end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$[K_s]_{4x4}=\left(I\frac{\Delta S}{nFV_{cell}}\right)\frac{V}{20}\begin{bmatrix}2&1&1&1\\1&2&1&1\\1&1&2&1\\1&1&1&2\end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\{Q_h\}_{4x1}=\frac{hT_\infty V}{4}\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\{Q_j\}_{4x1}=\left(\frac{I^2R_{in}}{V_{cell}}\right)\frac{V}{4}\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\end{bmatrix} \quad (5.7)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\{Q_t\}_{4x1} = \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2 \frac{V}{4}\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\end{bmatrix} \tag{5.8}$$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างเมทริกซ์ระบบสมการรวม : โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมอิลลิเมนต์เมทริกซ์ย่อยเข้าเป็นเมทริกซ์ใหญ่ที่เรียกว่าระบบสมการรวม ในกรณีที่รูปร่างของปัญหามีจำนวนจุดต่อเท่ากับ n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบไปด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ แสดงดังนี้

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C]_{nxn} + [K]_{nxn}\right)\{T\}_{nx1}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}[C]_{nxn}\{T\}_{nx1}^{t} + \{Q\}_{nx1}^{t+\Delta t} \tag{5.9}$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต : ขั้นตอนนี้โปรแกรมจะประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ก่อนแก้ระบบสมการรวม โดยดัดแปลงระบบสมการรวมที่ได้แสดงก่อนหน้านี้ให้สอดคล้องกับค่าเงื่อนไข ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตต่าง ๆ ดังนี้

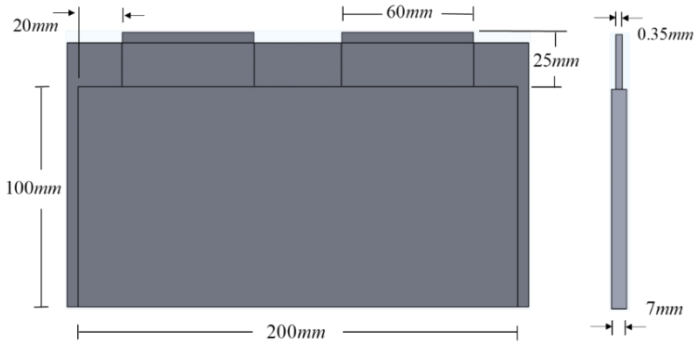
- อุณหภูมิเริ่มต้นของทุกจุดต่อ $T(t=0) = 25^{\circ}C$
- อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ (ambient temperature) $T_{\infty} = 25^{\circ}C$
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat convection coefficient) $h = 7.17$ W/m^2.°C
- อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (1C) = 15 A
- อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก (1C) = 2.1 A
- Δt (stepping time) = 1%DOD

ขั้นตอนที่ 6 แก้ปัญหาระบบสมการรวมเพื่อหาค่าอุณหภูมิ : โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นดังสมการที่ (5.9) เพื่อหาผลเฉลยของระบบสมการรวม

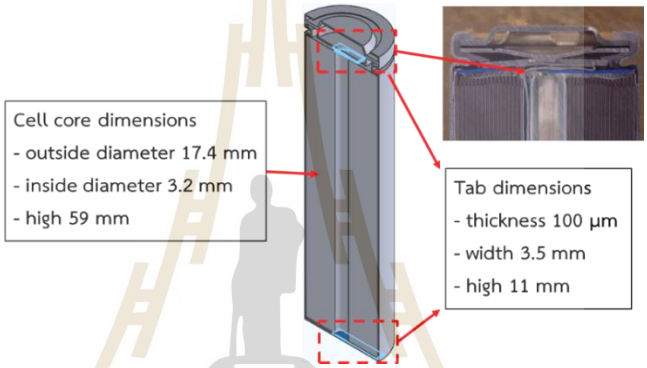
ขั้นตอนที่ 7 เวลาสิ้นสุด : เมื่อโปรแกรมพิจารณาการคำนวณผลเฉลยในรอบถัดไปแล้ว หากระยะเวลาที่กำหนดในการคำนวณผลเฉลยยังไม่สิ้นสุด โปรแกรมจะย้อนกลับไปเริ่มต้นที่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง และดำเนินการวนซ้ำจนถึงขั้นตอนที่ 7 เช่นเดิม จนสิ้นสุดเวลาการดำเนินการ

5.3 รายละเอียดขนาดและค่าพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

รายละเอียดขนาดและพิกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลของแบตเตอรี่ทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.4-5.5 (แบตเตอรี่ยี่ห้อ Microvast และ Sony ตามลำดับ)



รูปที่ 5.2 รายละเอียดและพิกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

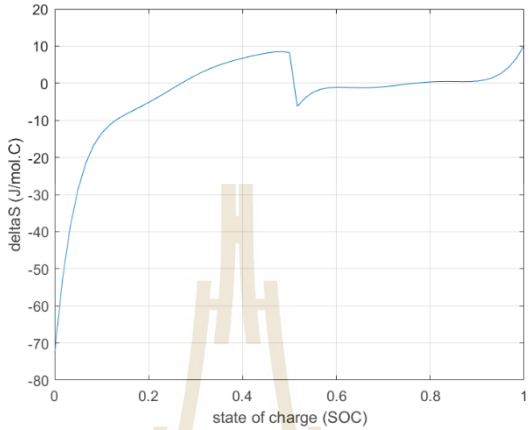


รูปที่ 5.3 รายละเอียดและพิกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

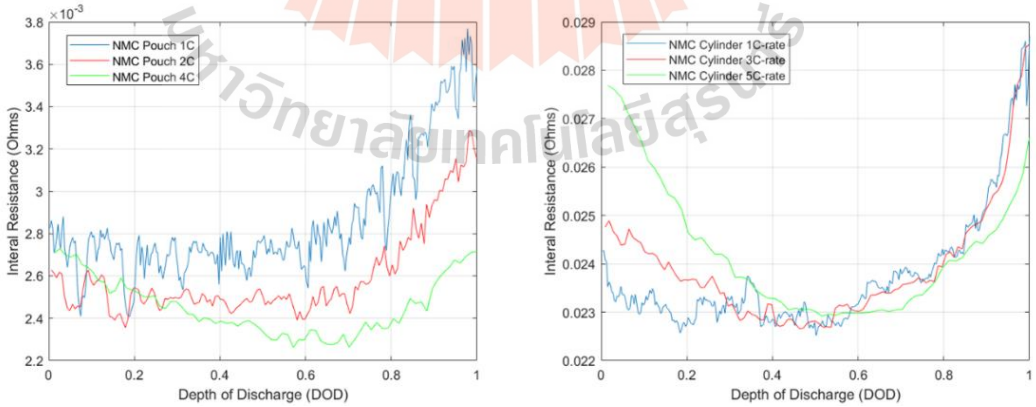
ชิ้นงาน	ρ (kg/m^3)	k (W/m·°C)	C (J/kg·°C)	σ (MS/m)	หนา (µm)
แท็บไฟฟ้าขั้วบวก (Al)	2,702	238	903	37.8	-
ขั้วบวก (NMC)	2,895	1.58	1,270	-	70
ตัวรับกระแสขั้วบวก (Al)	2,702	238	903	-	21
แท็บไฟฟ้าขั้วลบ (Cu)	8,933	398	385	59.6	-
ขั้วลบ (graphite)	1,555	1.04	1,437	-	79
ตัวรับกระแสขั้วลบ (Cu)	8,933	398	385	-	12
แผ่นกั้น (PP)	1,017	0.34	1,978	-	25
เคสแบตเตอรี่แบบถุง (พลาสติก)	1,150	55.1	1,900	-	150
เคสแบตเตอรี่แบบทรงกระบอก (Al)	2,702	238	903	-	300
แกนของแบตเตอรี่แบบถุง	2,272.38	k_x, k_z = 26.71 k_y = 0.983	1,225.35	-	-
แกนของแบตเตอรี่แบบทรงกระบอก	2,272.38	k_x, k_y = 0.983 k_z = 26.71	1,225.35	-	-

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ของขั้วไฟฟ้า $LiNiMnCoO_2/C_6$ (NMC) โดยผลรวมการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของแบตเตอรี่ในสภาสะเต็มเซลล์ (Viswanathan et al., 2010) สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ของ $LiNiMnCoO_2/C_6$ (NMC)

และค่าความต้านทานภายในทั้งหมด (R_{in}) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกวัดได้จากเครื่องมือทดสอบ Chroma Model 17020 ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. สามารถแสดงผลการวัดได้ดังนี้



รูปที่ 5.5 ค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง และทรงกระบอก ตามลำดับ

5.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงของการกระจายอุณหภูมิสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการประดิษฐ์โปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับคำนวณค่าการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก พร้อมทั้งตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรมจำลองผล โดยใช้เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลและกล้องตรวจจับความร้อนสำหรับทดสอบแบตเตอรี่ตัวอย่างจริง โดยจะแสดงผลทางกราฟิกและกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยมีหัวข้อที่จะนำเสนอดังนี้

5.4.1 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงสำหรับการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง (Pouch cell) เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

จากปริมาณความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แบบถุง 15 Ah ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ คือ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ (n)C-rate สำหรับแบตเตอรี่บ่งบอกถึง อัตราการคายประจุไฟฟ้าจนหมดด้วยกระแสแบบคงที่จำนวน n เท่า ของปริมาณความจุแบตเตอรี่ทั้งหมด โดยใช้เวลา 1/n ชั่วโมง ดังนั้น 1, 2, 4 และ 8C-rate คือ อัตราการคายประจุไฟฟ้าจนหมดด้วยกระแสแบบคงที่จำนวน 1, 2, 4 และ 8 เท่าของปริมาณความจุแบตเตอรี่ทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15, 30, 60 และ 120 A โดยใช้เวลา 60, 30, 15 และ 7.5 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าความแตกต่างของอัตราการคายประจุไฟฟ้าทั้งสี่ ส่งผลให้ระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้าไม่เท่ากัน ดังนั้นทั้งสี่ช่วงระยะเวลาที่กล่าวมาข้างต้น ถูกกำหนดใหม่ในรูปความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (Depth of Discharge (%DOD)) โดยที่ %DOD คือ อัตราส่วนของปริมาณความจุที่ใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ทั้งสี่จะแสดงการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ 25˚C รวมทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของโปรแกรมจำลองผลเท่ากับ 25˚C ซึ่งเป็นการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุกจุดต่อและกำหนดขอบเขตของช่วงอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากัน แสดงดังนี้

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ณ เวลา t=0 วินาที (0%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.6

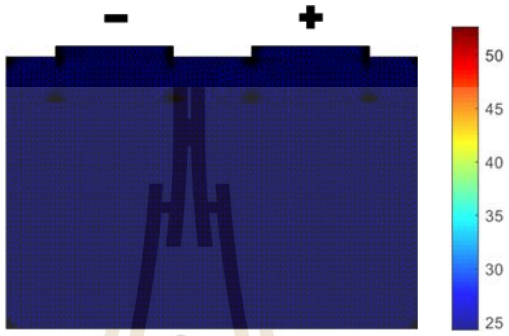
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 5%DOD แสดงดังรูปที่ 5.7

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 10%DOD แสดงดังรูปที่ 5.8

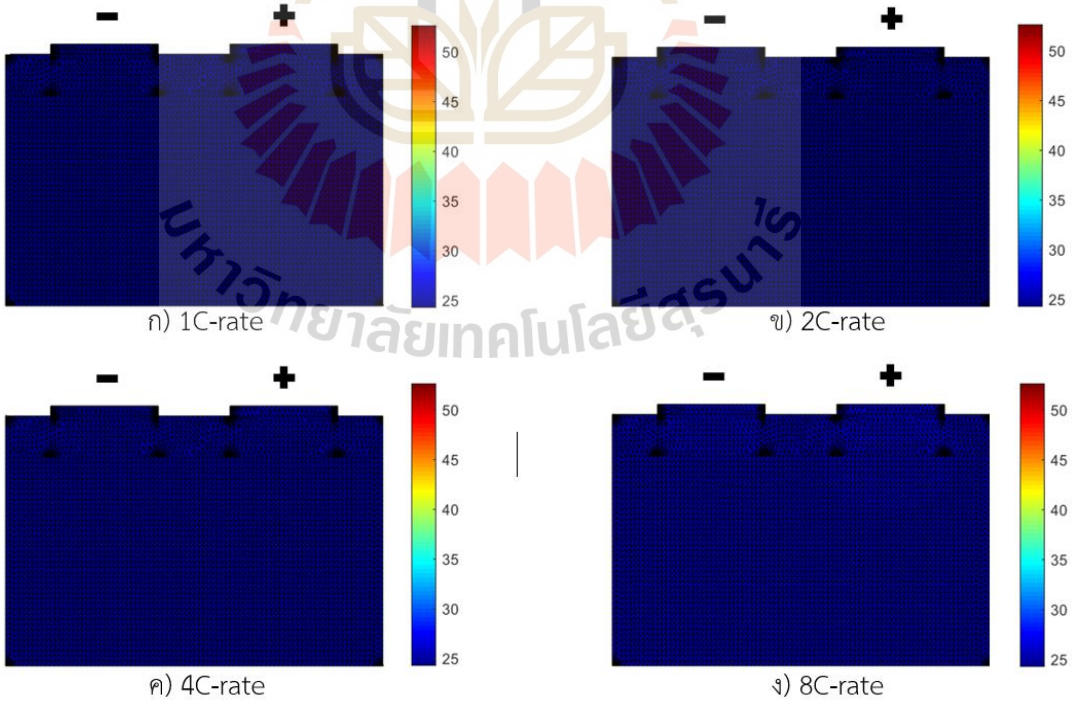
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD แสดงดังรูปที่ 5.9

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD แสดงดังรูปที่ 5.10

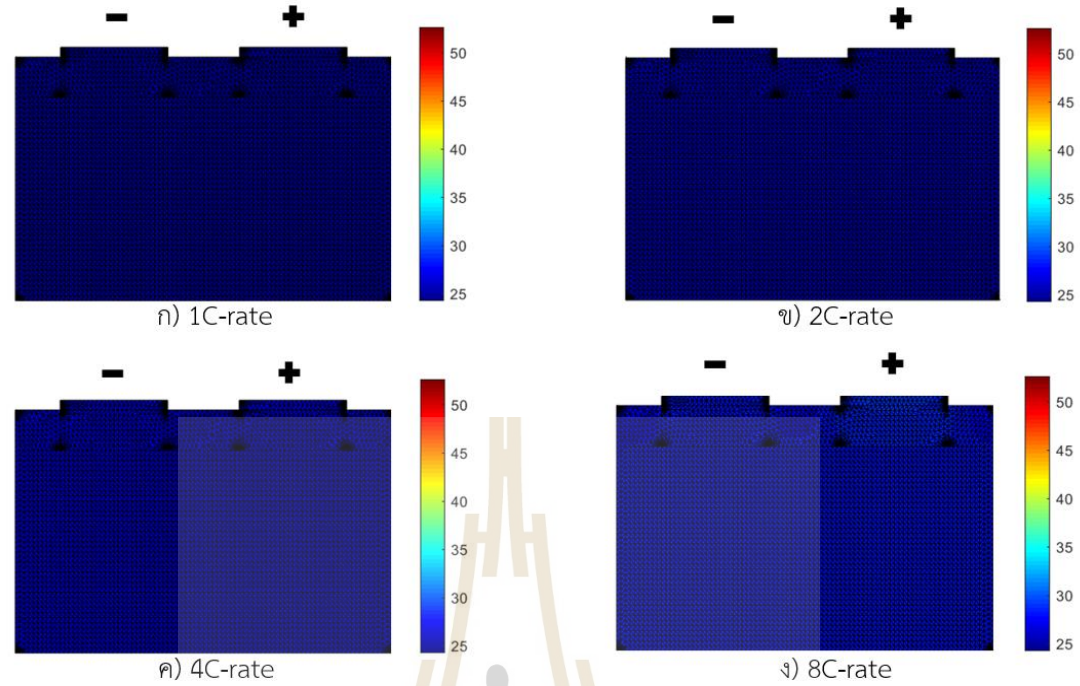
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ เมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) แสดงดังรูปที่ 5.11



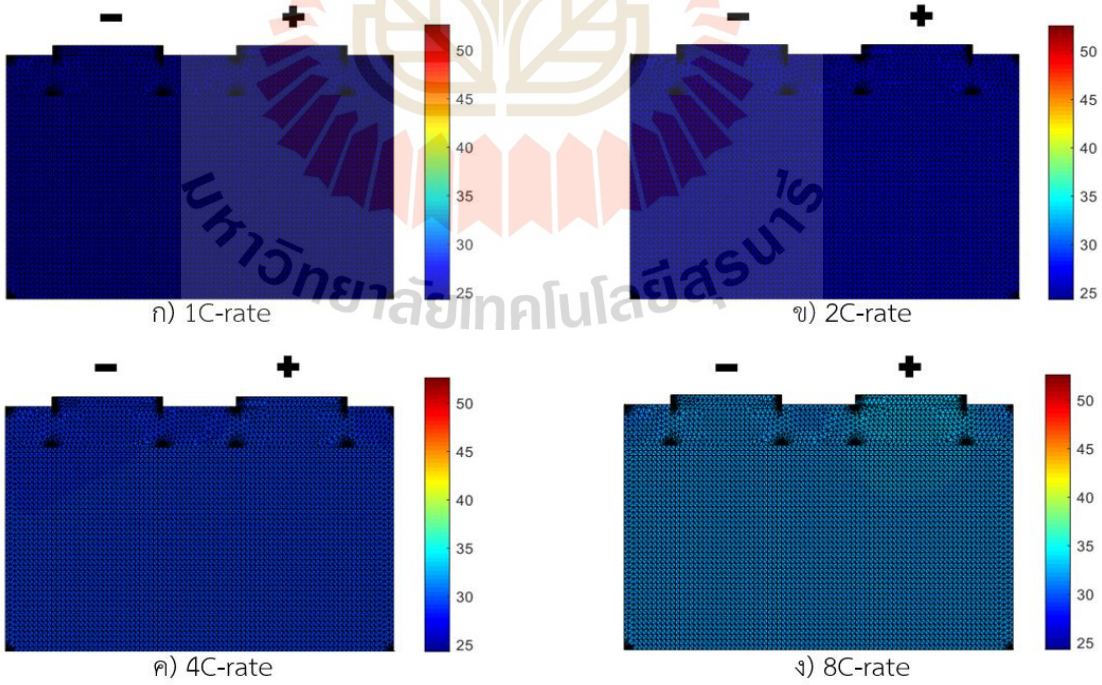
รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ที่ 0%DOD



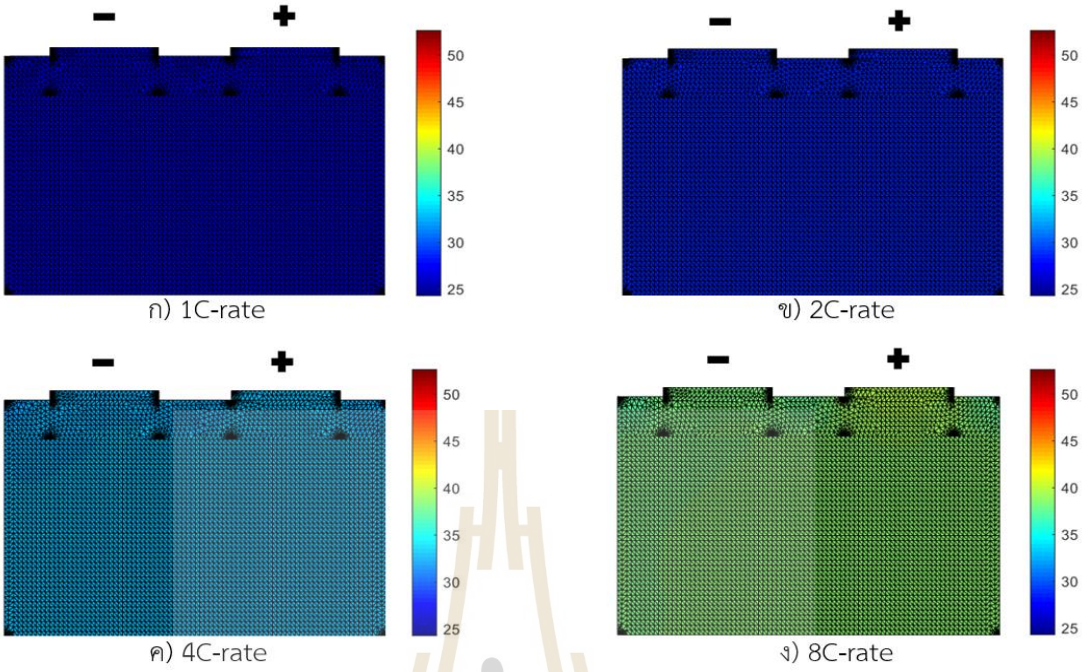
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 5%DOD



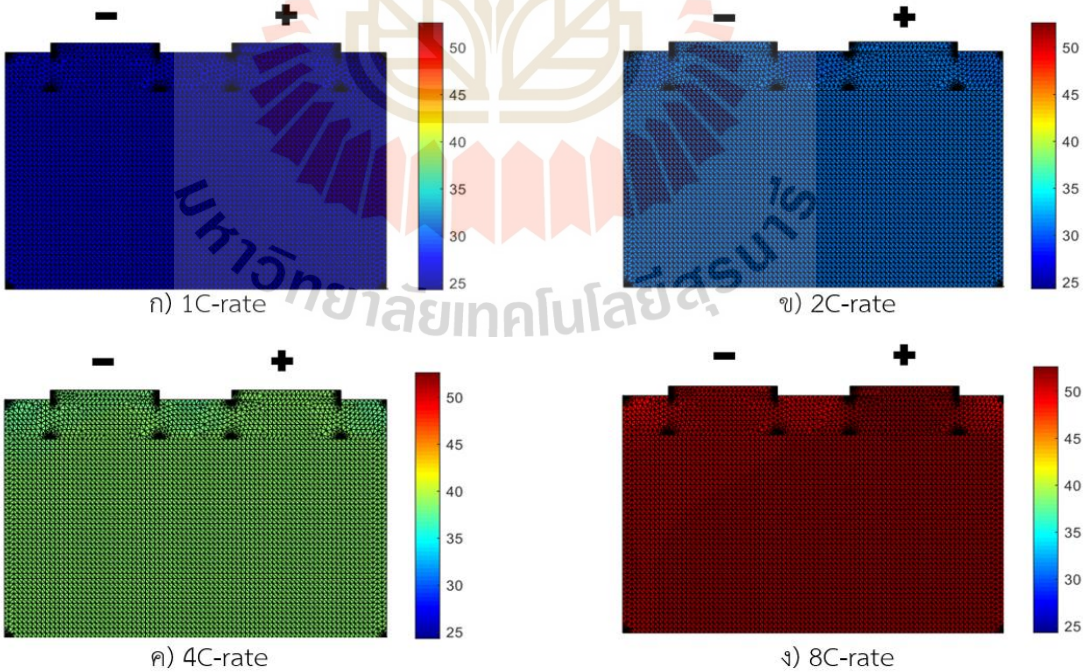
รูปที่ 5.8 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 10%DOD



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD



รูปที่ 5.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD



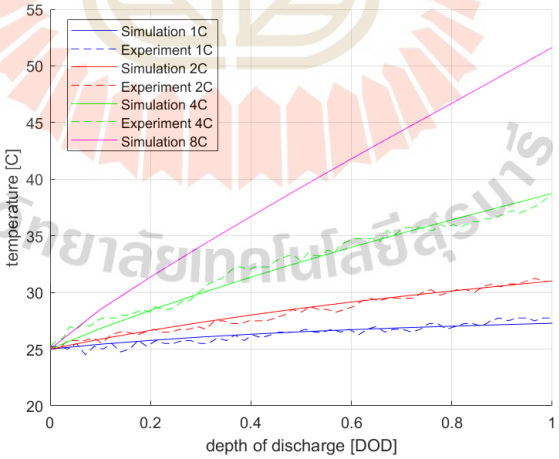
รูปที่ 5.11ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 100%DOD

จากรูปที่ 5.6 - 5.11 แสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของปริมาณความจุที่ใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ 0 - 100%DOD พบว่า อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่และ %DOD ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิทุกจุดของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น โดยที่

- เมื่อพิจารณาการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่โดยอ้างอิงสมการที่ (4.14) พบว่า ปริมาณความร้อนของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้นเกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอัตรา 1, 2, 4 และ 8C-rate ซึ่งหมายถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 15, 30, 60 และ 120 A ตามลำดับ เป็นเหตุให้แบตเตอรี่ทุกๆ จุดมีการสร้างความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน อุณหภูมิของแบตเตอรี่จึงเพิ่มสูงขึ้น

- เมื่อพิจารณาปริมาณความจุที่ใช้ไปหรือระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่แต่ละ C-rate ของแบตเตอรี่ พบว่า การสร้างความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแบตเตอรี่ถูกสะสมตามระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้น

ดังนั้นจากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ทำให้ทราบว่า อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ รวมถึงระยะเวลาของการคายประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (Depth of discharge, %DOD) และอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (depth of discharge,

%DOD) ของโปรแกรมจำลองผลและการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยการวัดอุณหภูมิจากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความแม่นยำ ±2% ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate เมื่อศึกษาอุณหภูมิในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่ควรเกิน 50°C เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง (Feng et al., 2015) ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่สูงสุดเท่ากับ 8C-rate โดยผลการจำลองเมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 51.63°C ทำให้ทราบว่าแบตเตอรี่ที่ใช้พิจารณานี้ควรมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ไม่เกิน 8C-rate

โดยการทดสอบตัวอย่างจริงในห้องปฏิบัติการได้ใช้เครื่องมือที่สร้างภาระโหลดให้แบตเตอรี่ (Chroma Model 17020) ซึ่งมีประสิทธิภาพการทนกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 67.5 A หรือประมาณ 4C-rate (60 A) โดยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดเมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด เท่ากับ 39.37°C ดังนั้นในการทดสอบตัวอย่างจริงผู้วิจัยสามารถทำการทดลองได้สูงสุดที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่เท่ากับ 4C-rate เท่านั้น โดยไม่สามารถทำการทดสอบอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่เท่ากับ 8C-rate ได้ เนื่องจากเกินขีดความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้รูปที่ 5.10 ในอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่เท่ากับ 8C-rate จึงแสดงเฉพาะผลจากการจำลองเท่านั้น

จากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลดังตารางที่ 5.2 ซึ่งกำหนดตำแหน่งการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวเฉลี่ยของแกนแบตเตอรี่สำหรับโปรแกรมจำลองผลและเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลดังรูปที่ 5.13

ก) โปรแกรมจำลองผล ข) เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 5.13 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบถุงระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนแซอร์เทอร์โมคัปเปิลภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD)

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่	1C-rate	2C-rate	4C-rate	8C-rate
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 1	27.81	30.85	38.54	-
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 2	27.71	30.97	38.52	-
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 3	27.74	30.92	38.69	-
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยการทดสอบตัวอย่างจริง	27.75	30.91	38.58	-
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโปรแกรมจำลองผล	27.28	31.02	38.74	51.63
ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	1.72	0.36	0.41	-

หมายเหตุ เนื่องจากเครื่องมือทดสอบที่ใช้สามารถคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ได้สูงสุด 67.5 A ดังนั้นจึงไม่มีผลการทดสอบที่ 8C-rate หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A

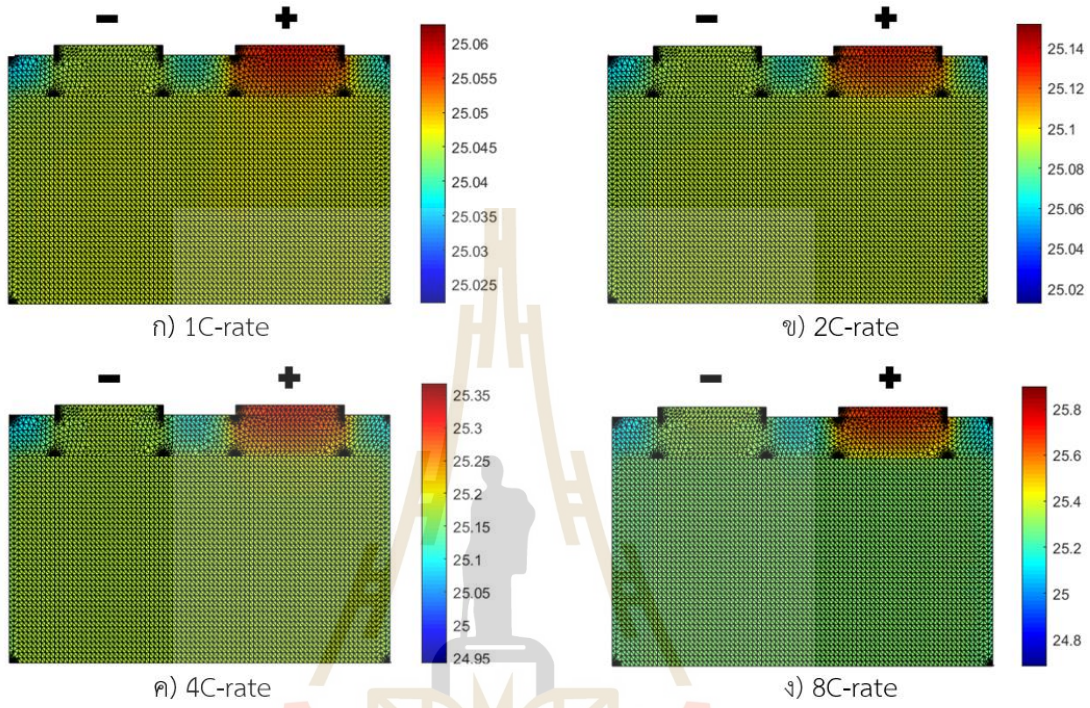
จากตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบถุงระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD) พบว่า ค่าอุณหภูมิมีเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 2 และ 4C-rate มีค่าเท่ากับ 1.72, 0.36 และ 0.41% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอัตราการคายประจุไฟฟ้าแต่ละ C-rate มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างการกระจายอุณหภูมิของรูปที่ 5.6-5.11 ผู้วิจัยจึงได้กำหนดขอบเขตของช่วงอุณหภูมิใหม่ ให้สามารถมองเห็นสีของภาพกราฟิกเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8 C-rate ที่ %DOD ต่าง ๆ ดังนี้

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ 1%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.14
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ 5%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.15
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ 10%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.16
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ 25%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.17
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ 50%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate แสดงดังรูปที่ 5.18

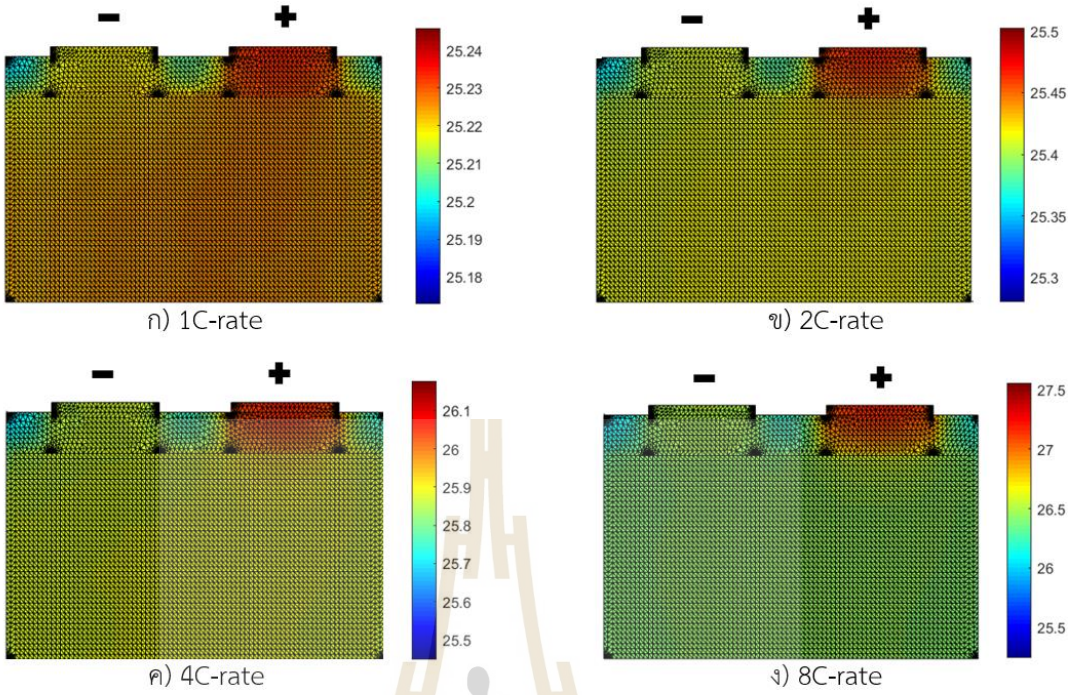
เมื่อพิจารณาจากภาพทางกราฟิกของผลจำลองการกระจายอุณหภูมิ ณ อัตราการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD เป็นสภาวะที่สามารถมองเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ได้ชัดเจนที่สุด เนื่องจากเป็นสถานะที่แบตเตอรี่สิ้นสุดการคายประจุและเป็นช่วงที่แบตเตอรี่มี

อุณหภูมิสูงที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อนภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2 และ 4C-rate ที่ 100%DOD แสดงดังรูปที่ 5.19

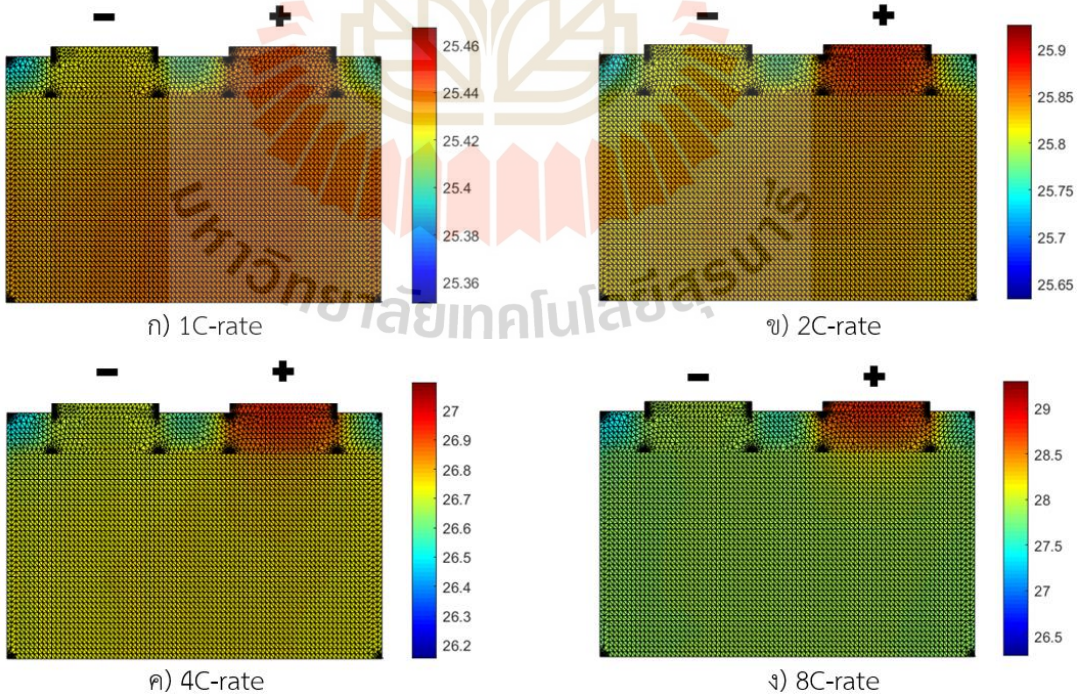


รูปที่ 5.14 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 1%DOD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.15 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 5%DOD



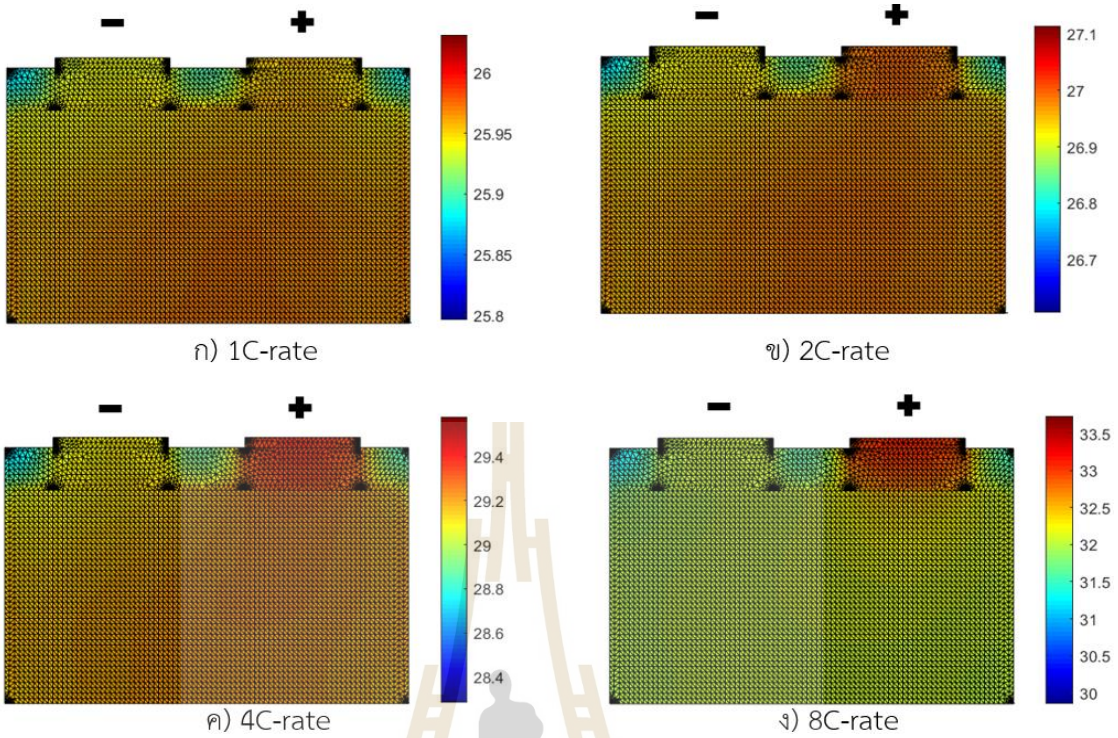
รูปที่ 5.16 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 10%DOD

จากรูปที่ 5.14 - 5.16 เมื่อเริ่มต้นคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับจนถึง 10%DOD ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ ดังนี้

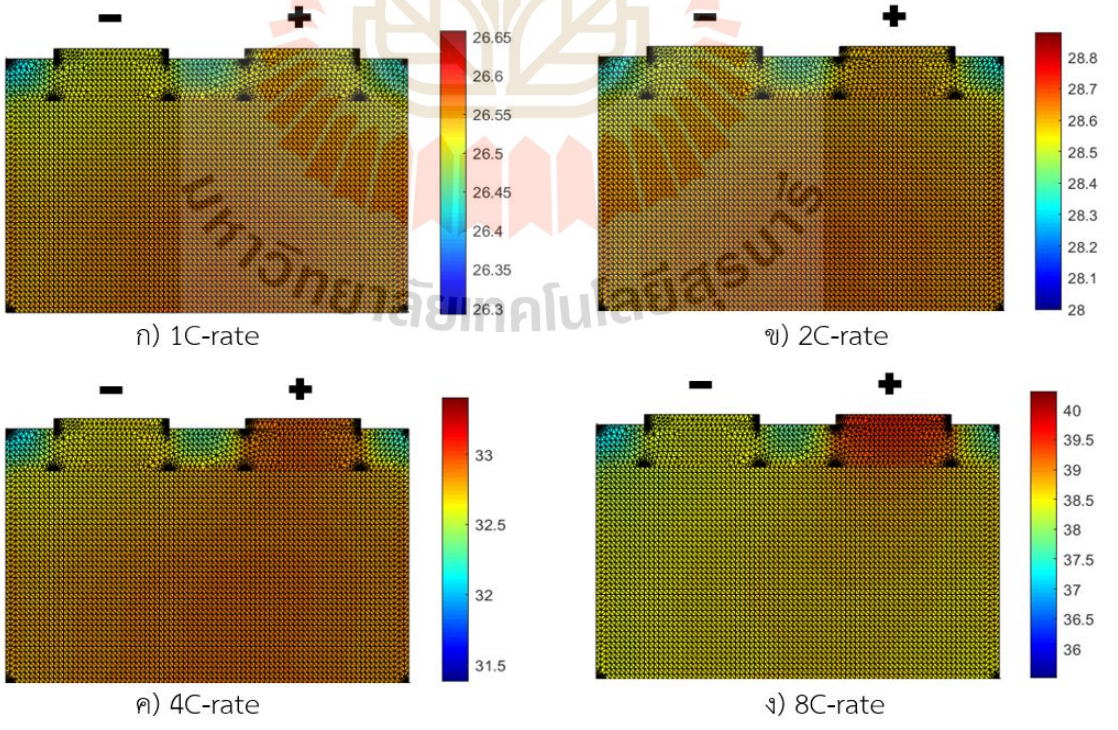
- เมื่อพิจารณาที่แท็บไฟฟ้าขั้วบวกพบว่าเป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นเกิดจากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ยกกำลังสอง ดังสมการที่ (4.14) ส่งผลให้ปริมาณการผลิตความร้อนของแท็บไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอัตราการคายประจุไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกจะเริ่มกระจายตัวไปยังแกนของแบตเตอรี่ ผลกระทบจากการสร้างความร้อนของบริเวณที่กล่าวมาเกิดการถ่ายเทความร้อนตามกฎข้อที่ 1 ของฟูริเยร์ ที่ว่าด้วยการเคลื่อนที่ของความร้อนจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น จากการผลิตความร้อนของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกนี้ทำให้แกนของแบตเตอรี่ที่มีบริเวณสัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกเกิดการสร้างความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

- เมื่อพิจารณาที่แท็บไฟฟ้าขั้วลบ อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่บริเวณที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้านี้มีการกระจายตัวไปยังแท็บไฟฟ้าขั้วลบ โดยลักษณะของการสร้างความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวก ดังนั้น จากผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ทั้งสี่ ที่ 1-10%DOD จะสังเกตุเห็นว่าจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการสร้างความร้อนน้อยที่สุดคือแท็บไฟฟ้าขั้วลบ และสาเหตุที่แท็บไฟฟ้าขั้วลบนี้มีอุณหภูมิน้อยกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวก (อะลูมิเนียม) เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำแท็บไฟฟ้าขั้วลบ (ทองแดง) มีค่ามากกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวก เมื่อนำไปคำนวณปริมาณการสร้างความร้อนตามสมการที่ (4.14) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น จะทำให้ปริมาณการสร้างความร้อนน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าขั้วลบมีค่าน้อยกว่าขั้วบวก ในขณะเดียวกันแกนของแบตเตอรี่ที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับแท็บไฟฟ้าที่สัมผัสกัน นอกจากนี้ บริเวณแกนของแบตเตอรี่ที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกจะมีอุณหภูมิสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.17 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 25%DOD



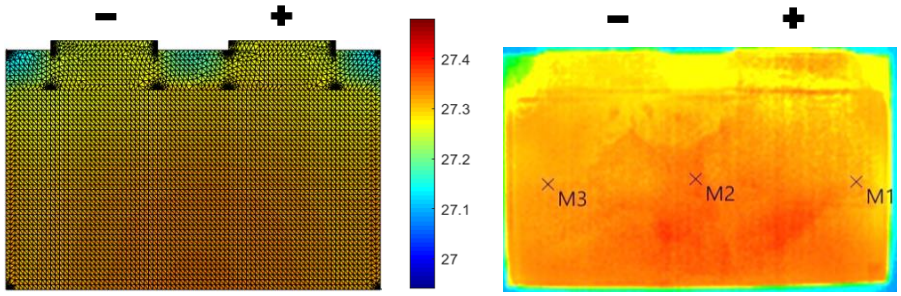
รูปที่ 5.18 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 50%DOD

จากรูปที่ 5.17-5.18 เมื่อแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ ที่ 25–50%DOD ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ ดังนี้

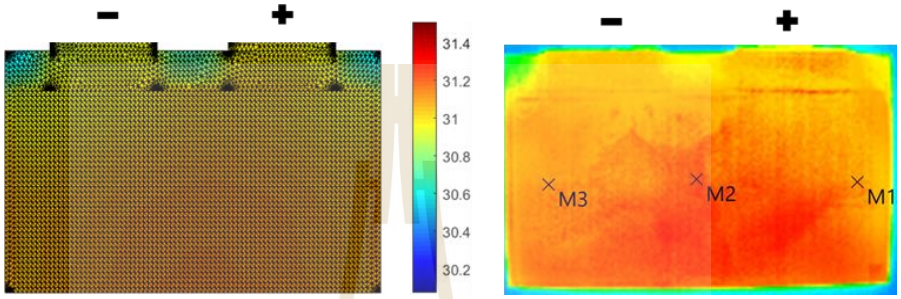
- เมื่อแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้า 25–50%DOD พบว่า ที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1 และ 2C-rate อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่เริ่มมีจุดความร้อนอยู่บริเวณกึ่งกลางของแกนแบตเตอรี่ บ่งบอกเป็นนัยว่าแกนของแบตเตอรี่เริ่มมีอุณหภูมิที่มากกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ เนื่องจากพื้นที่ในการสะสมความร้อนและคุณสมบัติของความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้ทำแกนแบตเตอรี่มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบ โดยความจุความร้อนจำเพาะ คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารหรือมวล 1 หน่วยกิโลกรัมมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป 1°C ทำให้แกนแบตเตอรี่มีอุณหภูมิมากกว่าแท็บไฟฟ้าทั้งสอง และที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 4 และ 8C-rate พบว่า ที่บริเวณแท็บไฟฟ้าขั้วบวกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณแกนของแบตเตอรี่และแท็บไฟฟ้าขั้วลบ ซึ่งมีการกระจายอุณหภูมิคล้ายกับกรณีแบตเตอรี่ที่คายประจุไฟฟ้าไป 1 - 10%DOD สามารถดูได้จากจุดความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณที่ใกล้กับแท็บไฟฟ้าขั้วบวก

เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า ที่อัตรา 8C-rate จุดความร้อนของแกนแบตเตอรี่ยังคงอยู่กึ่งกลางใกล้กับแท็บไฟฟ้าขั้วบวก บ่งบอกว่าแกนของแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วลบ นอกจากนี้ยังมีอีกปัจจัยที่ทำให้ความร้อนของแกนแบตเตอรี่บริเวณแท็บไฟฟ้าขั้วบวกยังสูงอยู่ คือ ปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่สูงและความต้านทานภายในของแกนแบตเตอรี่ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณความจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป (Nikolian et al., 2016) เป็นผลทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิทุกๆ จุดภายในแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบไปด้วย แกนแบตเตอรี่ แท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหรือคายประจุไฟฟ้าจนหมด แสดงดังรูปที่ 5.19

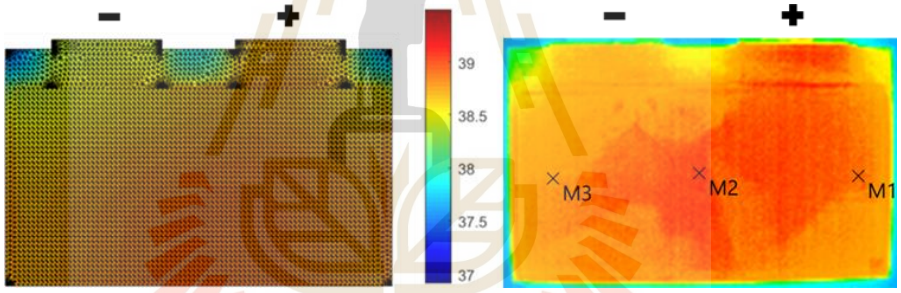
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) 1C-rate



ข) 2C-rate



ค) 4C-rate

รูปที่ 5.19 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8 C-rate ที่ 100%DOD

<u>หมายเหตุ</u> เนื่องจากเครื่องมือทดสอบที่ใช้สามารถคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ได้สูงสุด 67.5 A ดังนั้นจึงไม่มีผลการทดสอบที่ 8C-rate หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 A

จากรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน พบว่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไปในทิศทางเดียวกัน และสามารถแสดงผลการจำลองอุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ 100%DOD ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าอุณหภูมิจากผลการจำลองภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุต่างๆ ที่ 100%DOD

	1C-rate	2C-rate	4C-rate	8C-rate
อุณหภูมิสูงสุด	27.39	31.27	39.37	51.91
อุณหภูมิต่ำสุด	27.25	30.91	38.52	50.30
อุณหภูมิเฉลี่ย	27.34	31.14	39.07	51.38

5.4.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงสำหรับการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก (Cylindrical cell) เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่

จากปริมาณความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แบบทรงกระบอก 2.1 Ah ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ของแบตเตอรี่ คือ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ หรือมีค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่เท่ากับ 2.1, 6.3 และ 10.5 A โดยใช้เวลา 60, 20 และ 12 นาที ตามลำดับ จะเห็นว่าความแตกต่างของอัตราการคายประจุไฟฟ้าทั้งสามส่งผลให้ระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้าไม่เท่ากัน ดังนั้นทั้งสามช่วงระยะเวลาที่กล่าวมาข้างต้น ถูกกำหนดใหม่ในรูปความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (Depth of Discharge (%DOD)) โดยที่ %DOD คือ อัตราส่วนของปริมาณความจุที่ใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ทั้งสามจะแสดงการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ 25°C รวมทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของโปรแกรมจำลองผลเท่ากับ 25°C ซึ่งเป็นการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิทุกจุดต่อและกำหนดขอบเขตของช่วงอุณหภูมิให้มีค่าเท่ากัน แสดงดังนี้

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ณ เวลา t=0 วินาที (0%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.20

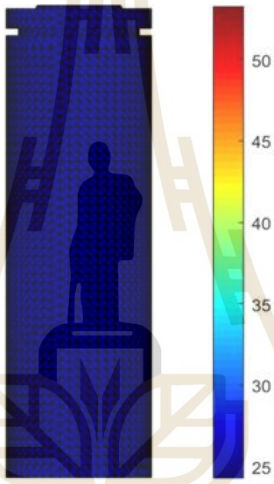
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 5%DOD แสดงดังรูปที่ 5.21

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 10%DOD แสดงดังรูปที่ 5.22

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD แสดงดังรูปที่ 5.23

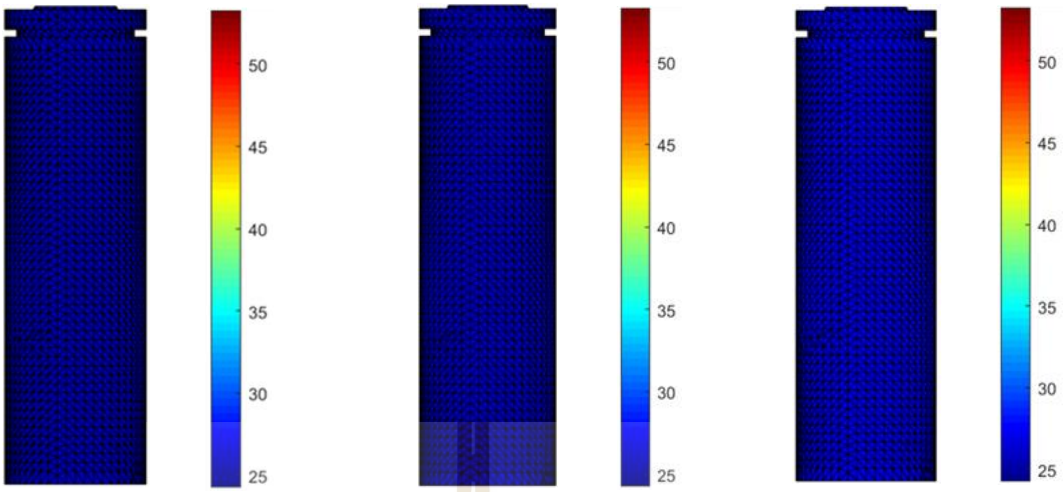
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD แสดงดังรูปที่ 5.24

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ เมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) แสดงดังรูปที่ 5.25



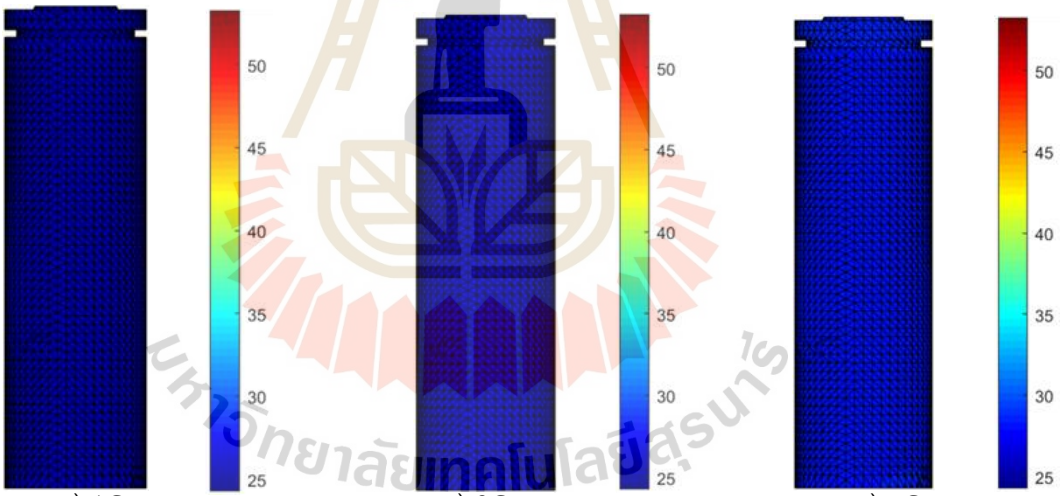
รูปที่ 5.20 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ที่ 0%DOD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) 1C-rate ข) 3C-rate ค) 5C-rate

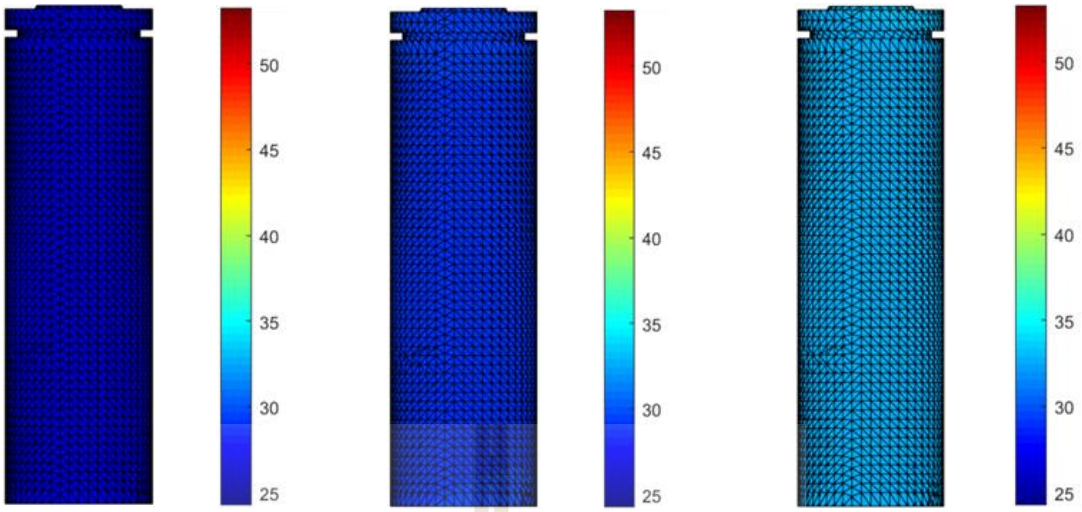
รูปที่ 5.21 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 5%DOD



ก) 1C-rate ข) 3C-rate ค) 5C-rate

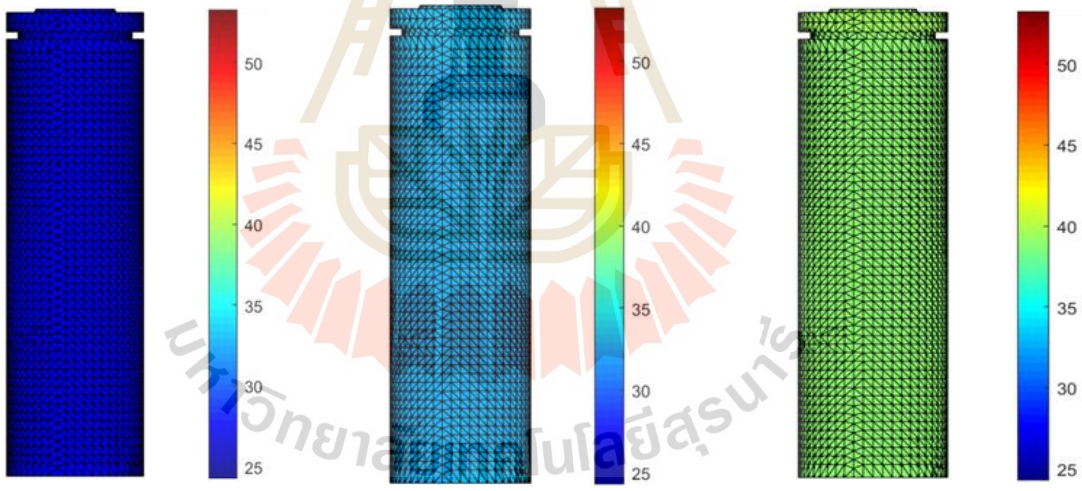
รูปที่ 5.22 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 10%DOD

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



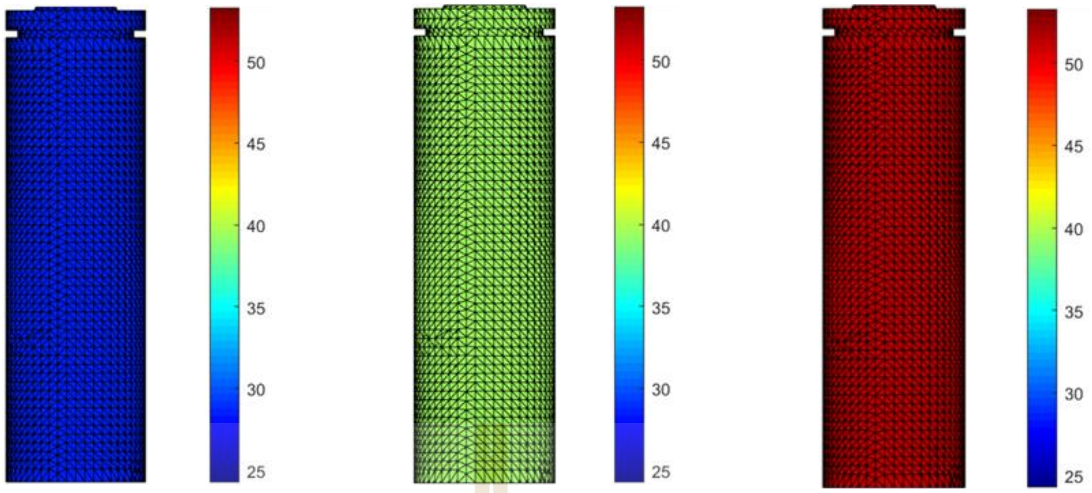
ก) 1C-rate ข) 3C-rate ค) 5C-rate

รูปที่ 5.23 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 25%DOD



ก) 1C-rate ข) 3C-rate ค) 5C-rate

รูปที่ 5.24 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 50%DOD



ก) 1C-rate ข) 3C-rate ค) 5C-rate

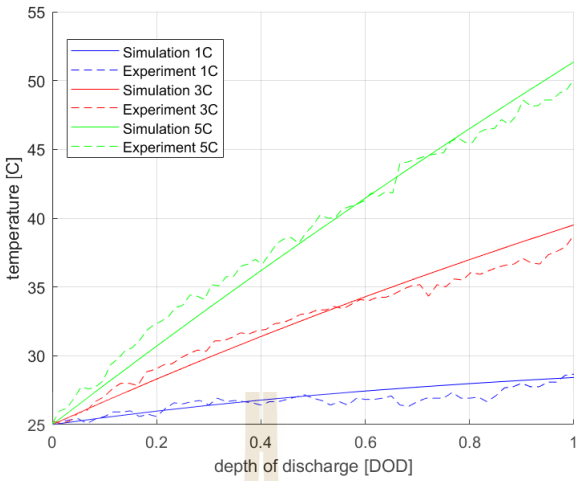
รูปที่ 5.25 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่ 100%DOD

จากรูปที่ 5.20 - 5.25 แสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของปริมาณความจุที่ใช้ไปเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ 0 - 100%DOD พบว่า อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่และ %DOD ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิทุกจุดของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น ดังนี้

- เมื่อพิจารณาการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่โดยอ้างอิงสมการที่ (4.14) พบว่า การสร้างความร้อนของแบตเตอรี่เกิดจากการไหลผ่านของปริมาณกระแสไฟฟ้า ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอัตรา 1, 3 และ 5C-rate ซึ่งหมายถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 2.1, 6.3 และ 10.5 A ตามลำดับ เป็นเหตุให้แบตเตอรี่มีการสร้างความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน อุณหภูมิของแบตเตอรี่จึงเพิ่มสูงขึ้น

- เมื่อพิจารณาปริมาณความจุที่ใช้ไปหรือระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่แต่ละ C-rate ของแบตเตอรี่ พบว่า การสร้างความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแบตเตอรี่ถูกสะสมตามระยะเวลาการคายประจุไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้น

ดังนั้นจากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ทำให้ทราบว่า อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ รวมถึงระยะเวลาของการคายประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ่น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแบตเตอรี่ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (%DOD) และอุณหภูมิ (˚C) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ดังรูปที่ 5.26

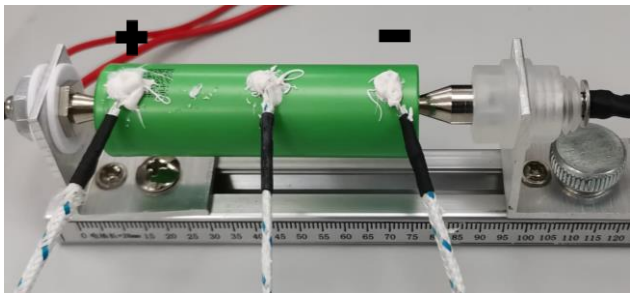


รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (%DOD) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกและความลึกของการคายประจุไฟฟ้า (Depth of discharge, %DOD) ของโปรแกรมจำลองผลและการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยการวัดอุณหภูมิจากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความแม่นยำ ±2% ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate เมื่อศึกษาอุณหภูมิในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่ควรเกิน 50°C เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดอัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่สูงสุดเท่ากับ 5C-rate โดยผลการจำลองเมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 51.14°C ทำให้ทราบว่าแบตเตอรี่ที่ใช้พิจารณานี้ควรมีอัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ไม่เกิน 5C-rate

จากผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่เปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลดังตารางที่ 5.4 ซึ่งกำหนดตำแหน่งการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวเฉลี่ยของแกนแบตเตอรี่สำหรับโปรแกรมจำลองผลและเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลดังรูปที่ 5.27

ก) โปรแกรมจำลองผล



ข) เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 5.27 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบทรงกระบอกระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD)

อุณหภูมิเฉลี่ย (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่	1C-rate	3C-rate	5C-rate
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 1	28.77	38.79	50.03
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 2	28.60	38.82	49.95
การทดสอบตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลูกที่ 3	28.63	38.64	50.27
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยการทดสอบตัวอย่างจริง	28.67	38.75	50.08
ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโปรแกรมจำลองผล	28.42	39.39	51.14
ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	0.88	1.63	2.07

จากตารางที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแกนแบตเตอรี่แบบทรงกระบอกระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าต่างๆ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD) พบว่า ค่าอุณหภูมิมีเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate มีค่าเท่ากับ 0.88, 1.63 และ 2.07% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองและผลการทดสอบจริงของอัตราการคายประจุไฟฟ้าแต่ละ C-rate มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการวิเคราะห์ความแตกต่างการกระจายอุณหภูมิของรูปที่ 5.20-5.25 ผู้วิจัยจึงได้กำหนดขอบเขตของช่วงอุณหภูมิใหม่ ให้สามารถมองเห็นสีของภาพกราฟิกเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5 C-rate ที่ %DOD ต่าง ๆ ดังนี้

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 1%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.28

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 5%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.29

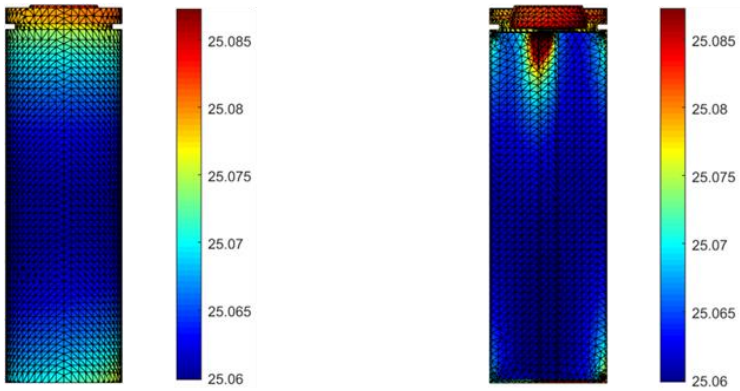
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 10%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.30

- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบแบบทรงกระบอกที่ 25%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.31

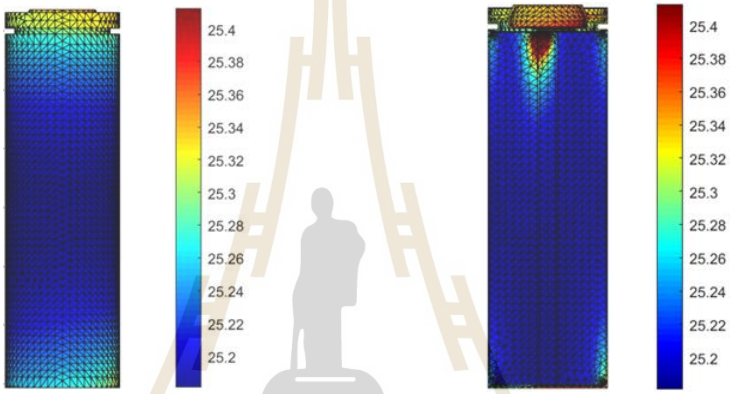
- ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบแบบทรงกระบอกที่ 50%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate แสดงดังรูปที่ 5.32

เมื่อพิจารณาจากภาพทางกราฟิกของผลจำลองการกระจายอุณหภูมิ ณ อัตราการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD เป็นสภาวะที่สามารถมองเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ได้ชัดเจนที่สุด เนื่องจากเป็นสถานะที่แบตเตอรี่สิ้นสุดการคายประจุและเป็นช่วงที่แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อนภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5 C-rate ที่ 100%DOD แสดงดังรูปที่ 5.33

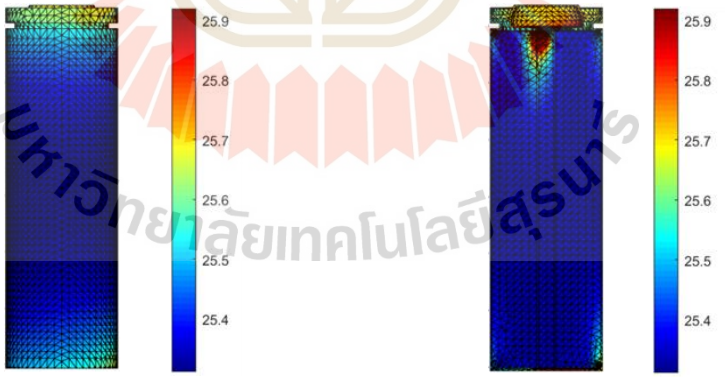
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) 1C-rate



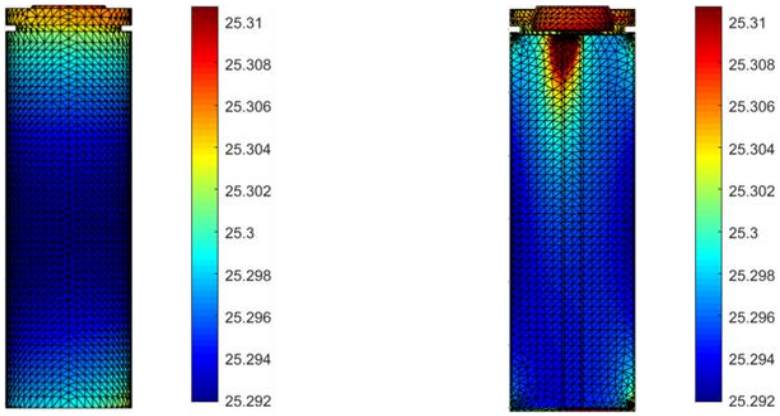
ข) 3C-rate



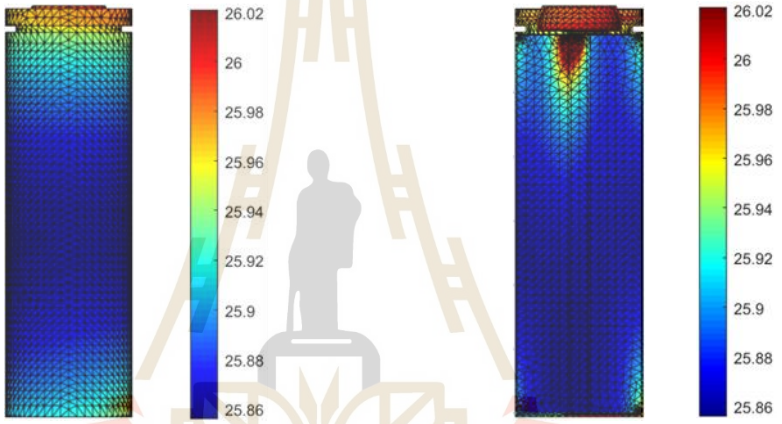
ค) 5C-rate

รูปที่ 5.28 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 1%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate

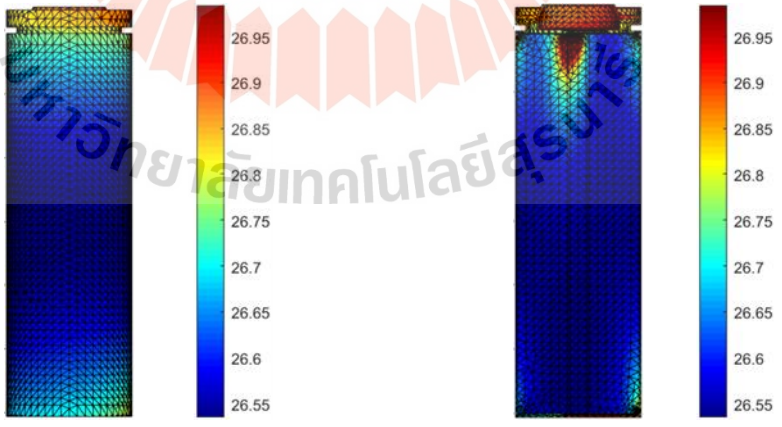
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) 1C-rate

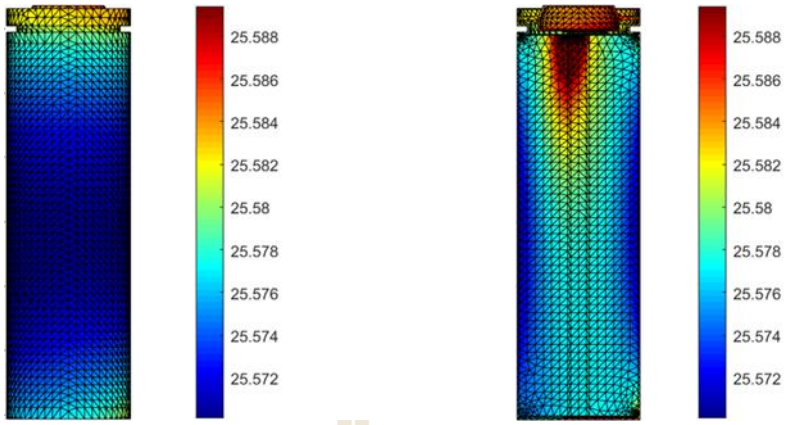


ข) 3C-rate

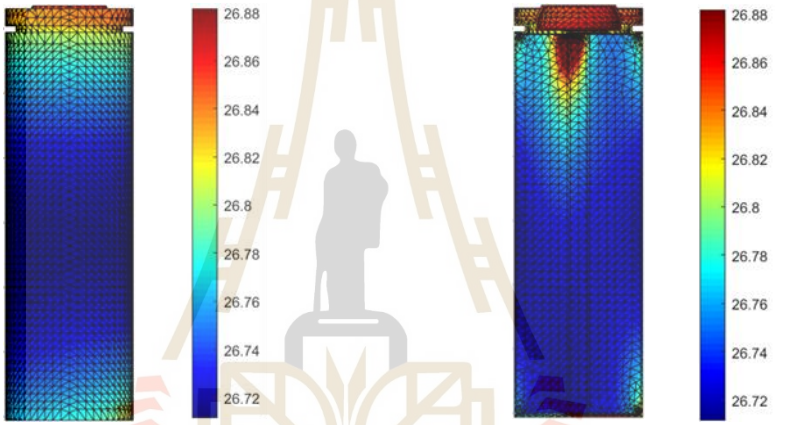


ค) 5C-rate

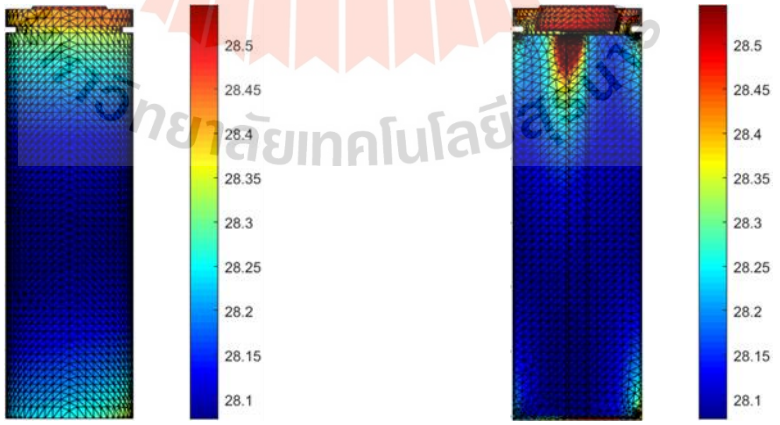
รูปที่ 5.29 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 5%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate



ก) 1C-rate

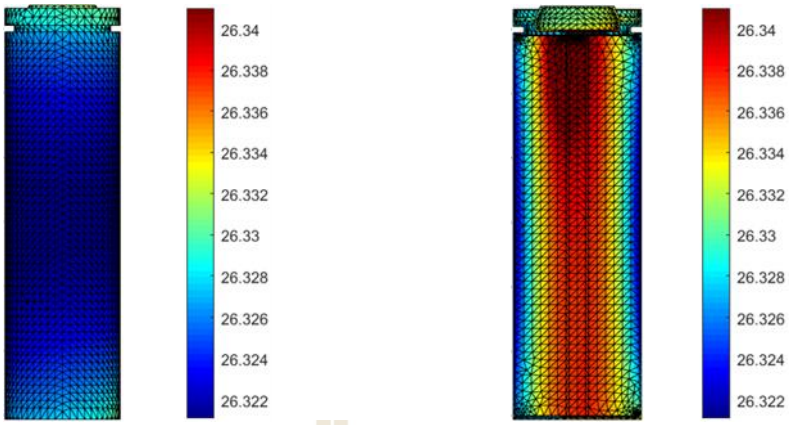


ข) 3C-rate

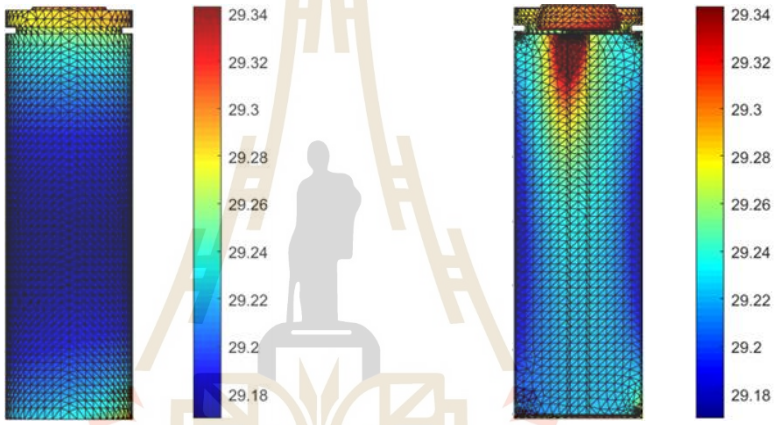


ค) 5C-rate

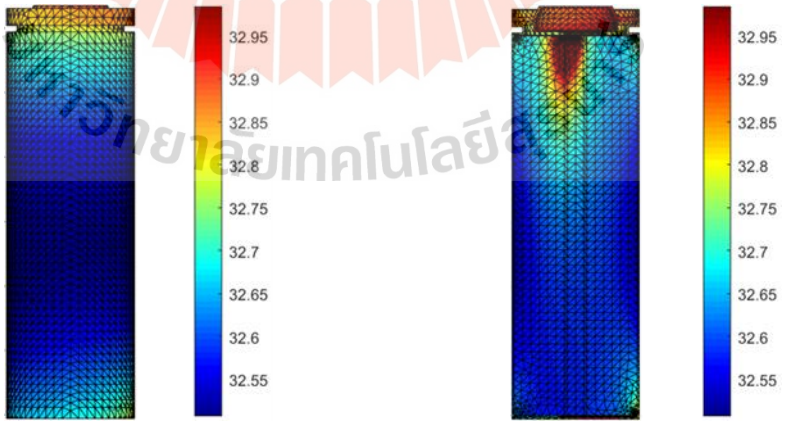
รูปที่ 5.30 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 10%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate



ก) 1C-rate

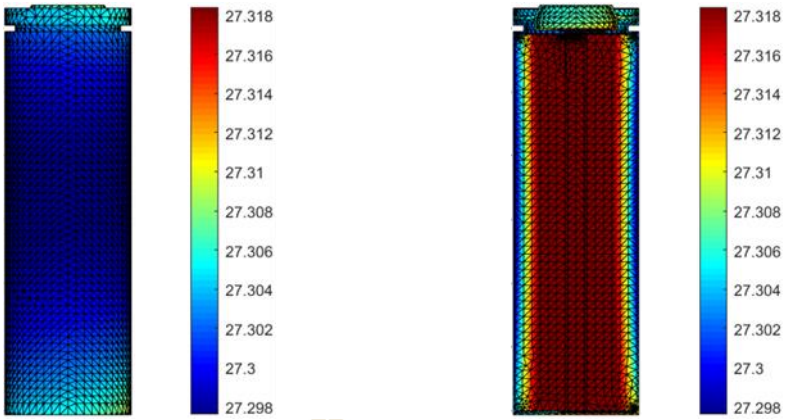


ข) 3C-rate

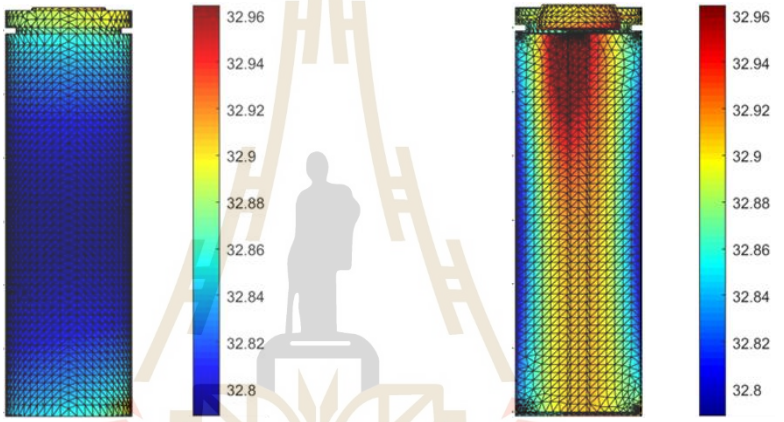


ค) 5C-rate

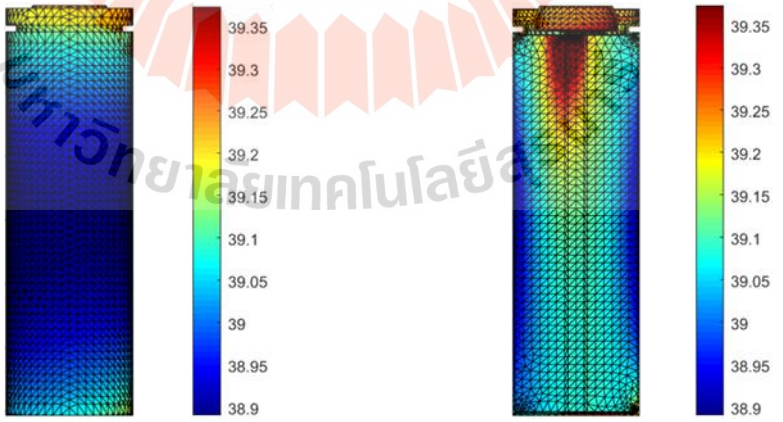
รูปที่ 5.31 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 25%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate



ก) 1C-rate

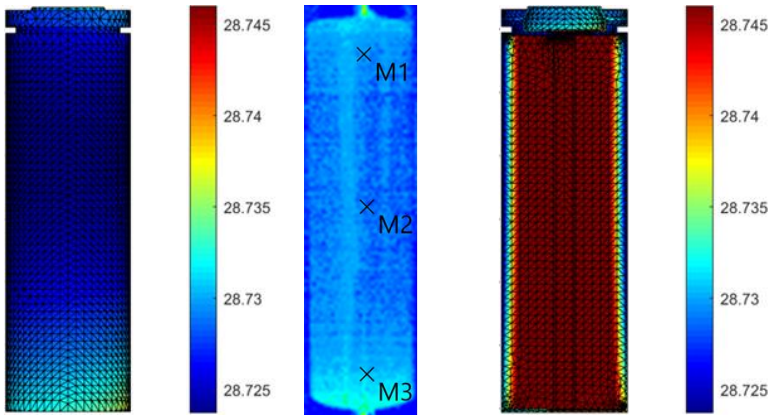


ข) 3C-rate

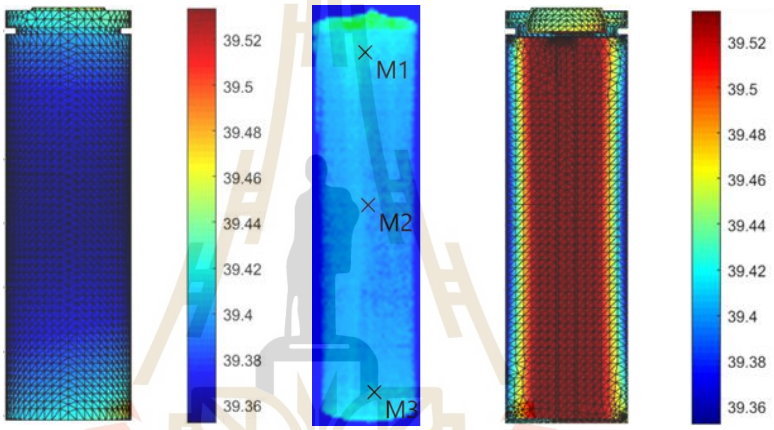


ค) 5C-rate

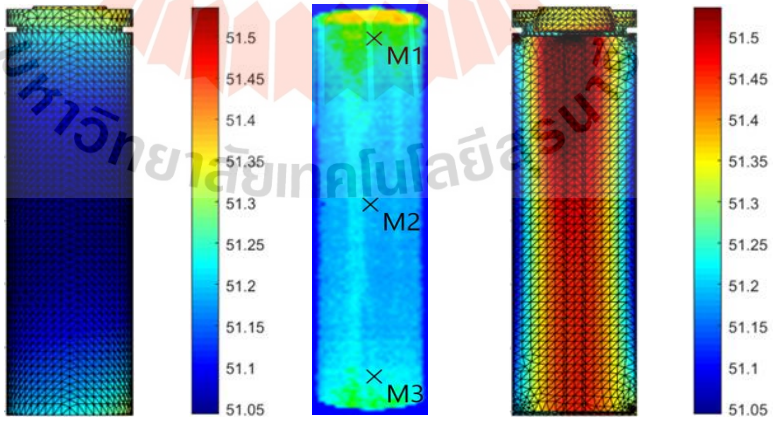
รูปที่ 5.32 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ 50%DOD เมื่อคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate



ก) 1C-rate



ข) 3C-rate



ค) 5C-rate

รูปที่ 5.33 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิว ผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน และพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ตามลำดับ ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ที่ 100%DOD

จากรูปที่ 5.28 - 5.33 เมื่อเริ่มต้นคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับจนสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ ดังนี้

- เมื่อพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ ณ บริเวณแท็บไฟฟ้าขั้วบวก พบว่าเป็นจุดเริ่มต้นที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นเกิดจากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแบตเตอรี่ยกกำลังสอง ดังสมการที่ (4.14) ส่งผลให้ปริมาณการผลิตความร้อนของแท็บไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอัตราการคายประจุไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกจะเริ่มกระจายตัวไปยังแกนของแบตเตอรี่ ผลกระทบจากการสร้างความร้อนของบริเวณที่กล่าวมาเกิดการถ่ายเทความร้อนตามกฎข้อที่ 1 ของฟูริเยร์ ที่ว่าด้วยการเคลื่อนที่ของความร้อนจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น จากการผลิตความร้อนของแท็บไฟฟ้าขั้วบวกนี้ทำให้แกนของแบตเตอรี่ที่มีบริเวณสัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกเกิดการสร้างความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่แกนแบตเตอรี่จะมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามรัศมีของทรงของกระบอก

- เมื่อพิจารณาที่แท็บไฟฟ้าขั้วลบพบว่า มีการสร้างความร้อนเกิดขึ้นที่แท็บไฟฟ้า โดยที่อุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าขั้วลบบริเวณที่สัมผัสกับแกนแบตเตอรี่นี้มีการกระจายตัวไปยังแกนแบตเตอรี่ โดยลักษณะของการสร้างความร้อนจะเกิดการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวก ดังนั้น จากผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ทั้งสาม ที่ 1-100%DOD จะสังเกตุเห็นว่าแท็บไฟฟ้าขั้วลบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการสร้างความร้อนน้อยกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวก โดยสาเหตุที่แท็บไฟฟ้าขั้วลบนี้มีอุณหภูมิน้อยกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวก (อะลูมิเนียม) เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำแท็บไฟฟ้าขั้วลบ (ทองแดง) มีค่ามากกว่าแท็บไฟฟ้าขั้วบวก เมื่อนำไปคำนวณปริมาณการสร้างความร้อนตามสมการที่ (4.14) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น จะทำให้ปริมาณการสร้างความร้อนน้อยลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าขั้วลบมีค่าน้อยกว่าขั้วบวก ในขณะเดียวกันแกนของแบตเตอรี่ที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบจะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับแท็บไฟฟ้าที่สัมผัสกัน นอกจากนี้ บริเวณแกนของแบตเตอรี่ที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวกจะมีอุณหภูมิสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณอื่น

- เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD จุดความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงสุดยังคงอยู่ที่บริเวณภายในแกนของแบตเตอรีที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้าขั้วบวก นอกจากนี้อุณหภูมิทุกๆ จุดภายในแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบไปด้วย แกนแบตเตอรี่ แท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหรือคายประจุไฟฟ้าจนหมด

จากรูปที่ 5.33 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน พบว่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไปในทิศทางเดียวกัน และสามารถแสดงผลการจำลองอุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุต่างๆ ที่ 100%DOD ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าอุณหภูมิจากผลการจำลองภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าภายใต้อัตราการคายประจุต่างๆ ที่ 100%DOD

อุณหภูมิ (°C)	**1C-rate**	**3C-rate**	**5C-rate**
อุณหภูมิสูงสุด	28.46	39.87	52.45
อุณหภูมิต่ำสุด	28.42	39.35	51.04
อุณหภูมิเฉลี่ย	28.44	39.44	51.22

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่า แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC ทั้งสองรูปแบบแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะแท็บไฟฟ้าขั้วบวกที่มีการสร้างปริมาณความร้อนมากกว่าขั้วลบ จึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อน ในกรณีที่อุณหภูมิของแท็บไฟฟ้ามีค่าสูงมากๆ จะส่งผลให้มีการกระจายอุณหภูมิไปยังจุดอื่น ๆ ได้มากตามไปด้วย แท็บไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาการสร้างความร้อนภายในแบตเตอรี่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพตลอดจนอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ดียิ่งขึ้น

5.5 สรุป

ในงานวิจัยนี้ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองของปัญหาการถ่ายเทความร้อนถูกแก้ไขโดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติมาคำนวณการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้แสดงให้เห็นถึง แท็บไฟฟ้าขั้วบวกของแบตเตอรี่เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นเมื่ออัตราการคายประจุไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุเป็นเพราะปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้ เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าและการสะสมความร้อนตามระยะเวลาในการคายประจุไฟฟ้าที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นภายในแบตเตอรี่ ดังนั้นการสร้างความร้อนบริเวณนี้จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความร้อนภายในแกนแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ได้นำไปเปรียบเทียบกับการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลและกล้องตรวจจับความร้อน พบว่าผลลัพธ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นจะนำโปรแกรมจำลองผลที่ได้พัฒนาขึ้นไปใช้ออกแบบแท็บไฟฟ้าเพื่อลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งสองแบบในบทถัดไป

บทที่ 6
การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก

6.1 บทนำ

เมื่อได้โปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิที่กระจายตัวบนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ณ ช่วงเวลาการคายประจุไฟฟ้าต่างๆ พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองผลโดยการเปรียบเทียบกับการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างจริงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกแล้ว พบว่าที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและแกนแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูง หากอุณหภูมิของแบตเตอรี่ยังคงสูงขึ้นอีกจะทำให้อายุการใช้งานและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง ตลอดจนเกิดการเคลื่อนตัวของความร้อนที่ทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิดจากอุณหภูมิที่สูงของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในขณะใช้งานได้ ดังนั้น เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงเกินไป ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองผลที่ได้มาคำนวณการกระจายอุณหภูมิสำหรับการออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ใหม่เพื่อให้ได้แท็บไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

6.2 การออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

ในการออกแบบจะกล่าวถึงการสร้างความร้อนของแท็บไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับแผ่นตัวรับกระแสขั้วบวกและขั้วลบ รวมถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์แท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ดังต่อไปนี้

6.2.1 วิธีการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

ในการออกแบบแท็บไฟฟ้าเพื่อช่วยลดปริมาณการสร้างความร้อนภายในแบตเตอรี่จะส่งผลต่อการสร้างความร้อนของแผ่นตัวรับกระแส เนื่องจากส่วนประกอบทั้งสองทำจากวัสดุชนิดเดียวกันและเชื่อมต่อกัน ซึ่งสมการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างความร้อนนี้คือพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (6.1) ที่เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในแกนของแบตเตอรี่หรือกล่าวได้อีกอย่างว่า เกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวรับกระแสและขั้วไฟฟ้าภายในแกนแบตเตอรี่ เป็นผลทำให้เกิดการสร้างความร้อนขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์การสร้างความร้อนของตัวรับกระแสจะถูกนำมาพิจารณาดังนี้

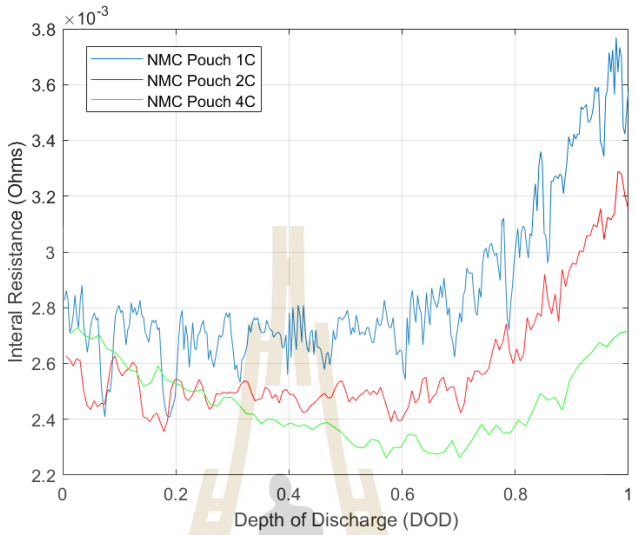
$$Q = Q_s + Q_j + Q_t = -T\Delta S\frac{I}{nFV_{cell}} + \frac{I^2R_{in}}{V_{cell}} + \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2 \qquad (6.1)$$

พจน์ที่สองของสมการที่ 6.1 คือ $Q_j = \dfrac{I^2R_{in}}{V_{cell}}$ (6.2)

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในแกนแบตเตอรี่ (A)

และ R_{in} คือ ค่าความต้านทานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในแกนแบตเตอรี่เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า (Ω)

<u>หมายเหตุ</u> R_{in} ที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้จากเครื่องมือ Chroma Model 17020 แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ก. สามารถแสดงผลการวัดค่าความต้านทานทั้งหมดภายในแกนแบตเตอรี่ได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความต้านทานทั้งหมดภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงแต่ละ C-rate

จากค่าความต้านทานที่วัดได้ สามารถแยกพิจารณาการสร้างความร้อนของวัสดุต่าง ๆ โดยเฉพาะที่ตัวรับกระแสไฟฟ้า ดังนี้

$$R_{in} = R_{cc} + R_{etc} \tag{6.3}$$

โดยที่ R_{cc} คือ ค่าความต้านทานของตัวรับกระแสไฟฟ้า (Ω)

และ R_{etc} คือ ค่าความต้านทานอื่นๆ ที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า เช่น ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น (Ω) (Choudhari et al., 2020)

เมื่อพิจารณาที่ค่าความต้านทานของตัวรับกระแสไฟฟ้า (R_{cc}) ภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งตัวรับกระแสขั้วบวกทำมาจากวัสดุอะลูมิเนียมและตัวรับกระแสขั้วลบทำมาจากทองแดง สามารถคำนวณค่าความต้านทานของวัสดุทั้งสองได้จาก

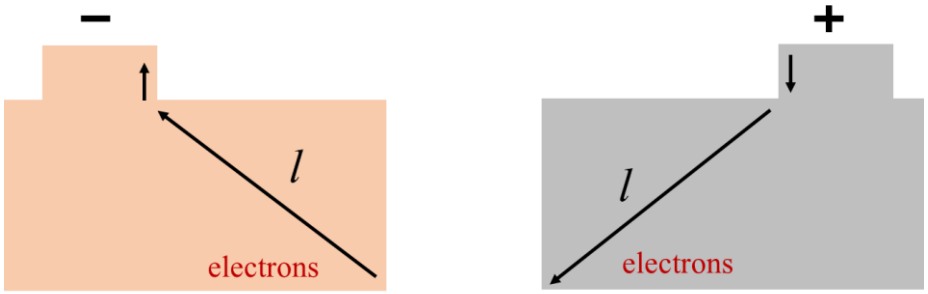
$$R = \frac{l}{\sigma A} \tag{6.4}$$

โดยที่ l คือ ระยะทางที่ปริมาณกระไฟฟ้าไหลผ่าน (m)

σ คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

และ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (m^2)

เมื่อพิจารณาที่ตัวรับกระแส จะสังเกตุเห็นว่า ทิศทางของกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุดจะไหลไปรวมกันที่บริเวณแท็บไฟฟ้าเพื่อออกสู่วงจรภายนอก ซึ่งมีระยะทางเท่ากับ l แสดงดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงระยะทางของอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุดภายในตัวรับกระแส เมื่อคายประจุไฟฟ้า

ในการคำนวณการสร้างความร้อนของตัวรับกระแสไฟฟ้าได้กำหนดขอบเขตดังนี้

- ระยะทางของอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุด (l) จะเป็นตัวกำหนดการสร้างความร้อนตลอดแผ่นตัวรับกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณการผลิตความร้อนของแกนแบตเตอรี่ใหม่จากสมการที่ (6.2)-(6.4) ได้ดังนี้

$$Q_j(t) = \frac{I^2(R_{in,C-rate}(t))}{V_{cell}} \quad ;t = \%DOD \tag{6.5}$$

$$R_{cc} = \frac{l}{A_{tab}\left(\sigma_{Al} + \sigma_{Cu}\right)} \tag{6.6}$$

$$Q_R = \frac{I^2 R_{cc}}{2V_{cell}} \tag{6.7}$$

$$Q_{etc}(t) = Q_j(t) - Q_{R,origin} \tag{6.8}$$

$$Q_{j,new}(t) = Q_{R,new} + Q_{etc}(t) \tag{6.9}$$

โดยที่ R_{cc} คือ ค่าความต้านทานของตัวรับกระแสไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ (Ω)

Q_R คือ ปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นจากตัวรับกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (W/m^3)

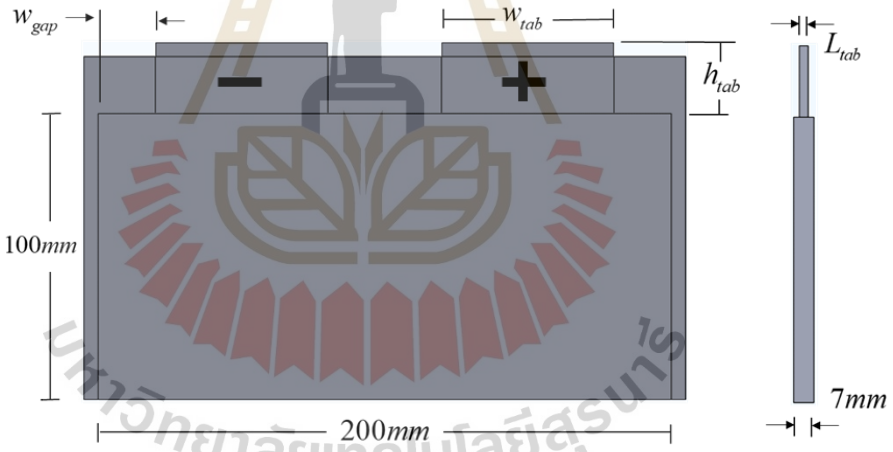
Q_{etc} คือ ปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นจากค่าความต้านทานอื่น ๆ ที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้า (W/m^3) เช่น ขั้วไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาการออกแบบแท็บไฟฟ้าส่วนใหญ่จะพิจารณาไปที่การเพิ่มและลดขนาดของแท็บไฟฟ้า (Mei et al., 2018) อันได้แก่ ความกว้าง ความหนาและความสูง ซึ่งส่งผลต่อการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ ในความเป็นจริงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงเมื่อพิจารณาที่การเปลี่ยนขนาดของความสูงและความกว้างของแท็บไฟฟ้าจะทำให้ปริมาตร (เฉพาะแท็บไฟฟ้า) เปลี่ยนไป แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าความหนาของแท็บไฟฟ้ามีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาตรของแท็บไฟฟ้ารวมถึงแกนของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดและออกแบบขนาดความสูงและความกว้างของแท็บไฟฟ้า โดยที่ความหนายังคงเดิม เพื่อไม่ให้แกนของแบตเตอรี่มีปริมาตรที่เปลี่ยนไป พร้อมทั้งขนาดของแท็บไฟฟ้าที่ออกแบบจะต้องมีปริมาตรเท่ากันกับชิ้นงานต้นแบบ สุดท้ายนำขนาดของแท็บไฟฟ้าที่ออกแบบแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาขนาดของแท็บไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ซึ่งขนาดแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6.1 และรายละเอียดขนาดภาพรวมของแบตเตอรี่แสดงได้ดังรูปที่ 6.3

ตารางที่ 6.1 ขนาดแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงในกรณีต่าง ๆ

ขนาด (mm)	กรณีต้นแบบ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
ความสูง (h_{tab})	25	20	30	37.5
ความหนา (L_{tab})	0.35	0.35	0.35	0.35
ความกว้าง (w_{tab})	60	75	50	40
ความกว้างของช่อง (w_{gab})	20	12.5	25	30

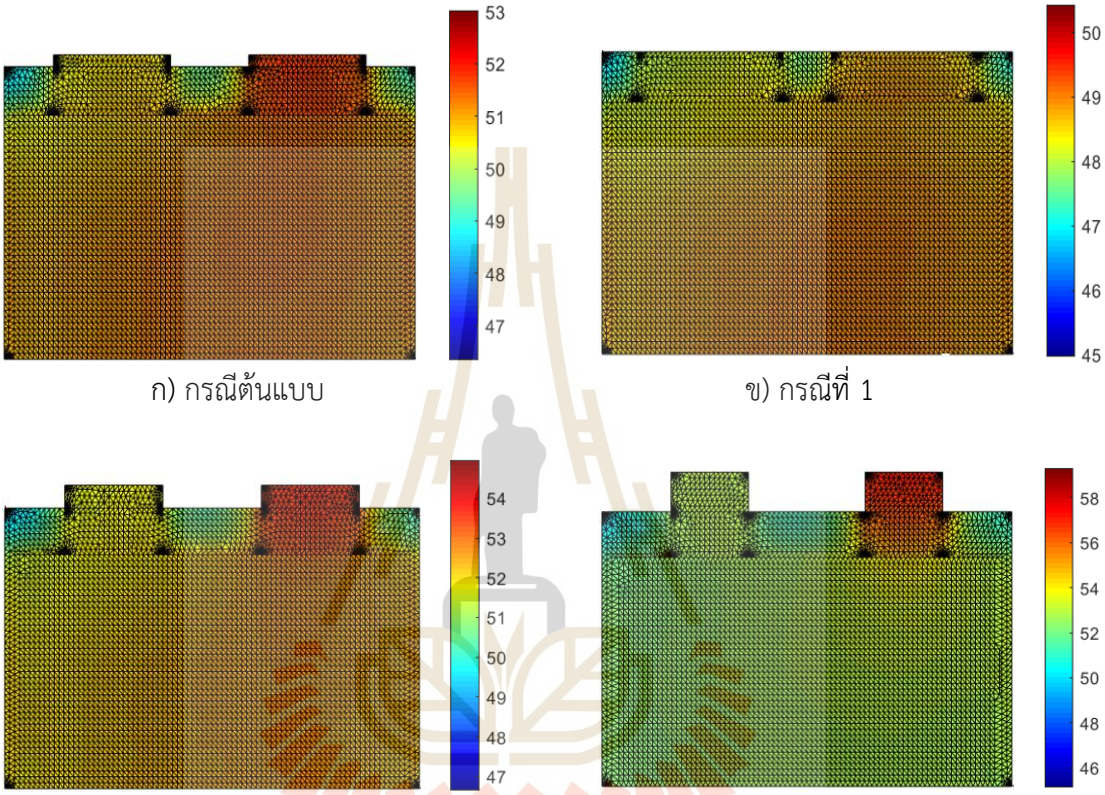


รูปที่ 6.3 รายละเอียดขนาดภาพรวมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง

6.2.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้า

เมื่อศึกษาอุณหภูมิในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่ควรเกิน 50°C เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ได้พิจารณาในบทที่ 5 ทำให้ทราบว่า ที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 8C-rate เมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) เป็นอัตราการคายประจุไฟฟ้าที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่มีค่า

เท่ากับ 51.63˚C ดังนั้นผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้าในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดให้แสดงผลการจำลองที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 8C-rate เพื่อจำลองอุณหภูมิที่สูงที่สุดในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 6.4



ก) กรณีต้นแบบ ข) กรณีที่ 1

ค) กรณีที่ 2 ง) กรณีที่ 3

รูปที่ 6.4 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (˚C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.4 แสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่างๆ ที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 8C-rate ณ สภาวะสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD) สำหรับการออกแบบขนาดของแท็บไฟฟ้าภายใต้ปริมาตรที่เท่ากัน โดยกำหนดให้ความหนาคงที่ จากนั้นเปลี่ยนแปลงความกว้างและความสูงของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.1 พบว่า ความกว้างที่เพิ่มขึ้นและความสูงที่ลดลงจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท็บไฟฟ้าที่กระแสไหลผ่านเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่สร้างจากความต้านทานภายในแบตเตอรี่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ต้นแบบและแบตเตอรี่ที่ออกแบบใหม่ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบ

ถุง พบว่า ที่ความกว้างของแบตเตอรี่เท่ากับ 40, 50 และ 75 mm. ทำให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับ -3.50, -2.32 และ 4.63% ตามลำดับ

นอกจากนี้การเปลี่ยนขนาดของแท็บไฟฟ้ายังส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (TSD) ที่อธิบายถึงความเข้มของอุณหภูมิหรือจุดความร้อนที่เกิดขึ้นบนแบตเตอรี่ หากค่านี้เข้าใกล้ศูนย์ จะบ่งบอกถึงแบตเตอรี่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สามารถสรุปค่าอุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้าไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 อุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อปรับขนาดของแท็บไฟฟ้า

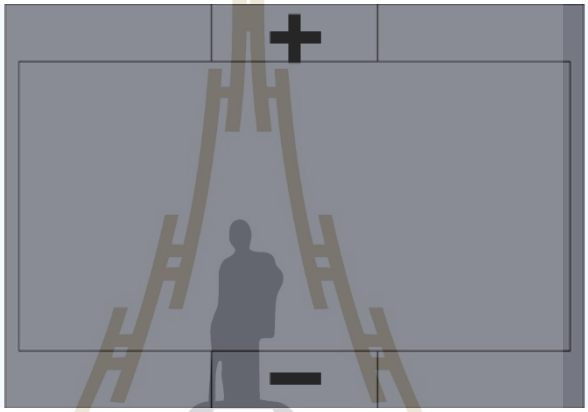
อุณหภูมิ (°C)	**กรณีต้นแบบ**	**กรณีที่ 1**	**กรณีที่ 2**	**กรณีที่ 3**
อุณหภูมิสูงสุด	51.91	49.52	53.20	54.78
อุณหภูมิเฉลี่ย	51.38	49.00	52.57	53.18
TSD	0.31	0.29	0.34	0.45
การลดลงของอุณหภูมิ (%)	0	4.63	-2.32	-3.50

จากการพิจารณาผลการจำลองร่วมกันระหว่างรูปที่ 6.4 และตารางที่ 6.2 โดยนำผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อกำหนดและออกแบบขนาดของแท็บไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี เปรียบเทียบกับกรณีต้นแบบทำให้ทราบว่า รูปแบบของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงคือ การออกแบบแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 1 ซึ่งทำให้อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลดลง 4.63%

6.2.3 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้จะกำหนดตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าบนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงใหม่ โดยที่ขนาดความกว้าง ความหนาและความสูงของแท็บไฟฟ้ายังคงเดิมหรือเท่ากันกับกรณีต้นแบบ ซึ่งตำแหน่งของแท็บไฟฟ้ากรณีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6.5 รวมถึงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้ากรณีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 6.6

ก) กรณีที่ 4

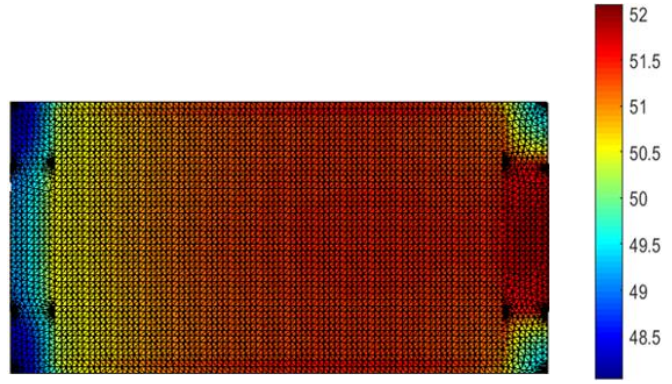


ข) กรณีที่ 5

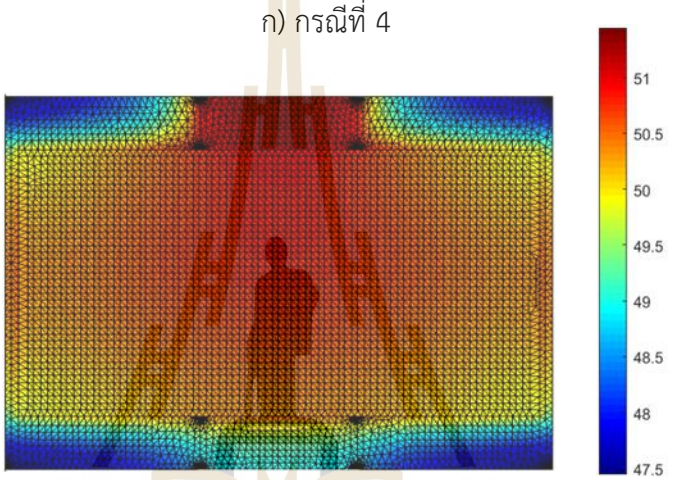
ค) กรณีที่ 6

รูปที่ 6.5 ตำแหน่งแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงในกรณีต่าง ๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ก) กรณีที่ 4



ข) กรณีที่ 5

ค) กรณีที่ 6

รูปที่ 6.6 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.6 แสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่างๆ ที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 8C-rate ณ สภาวะสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้า (100%DOD) พบว่า การเปลี่ยน

ตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุด รวมไปถึงค่าความต้านทานภายในของตัวรับกระแสที่อิเล็กตรอนต้องเผชิญเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ปริมาณความร้อนของแบตเตอรี่ที่สร้างขึ้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยเฉพาะการเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 6 จะมีระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนใกล้เคียงกันกับกรณีที่ 4 แต่เหตุผลที่อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ในกรณีที่ 6 สูงกว่ากรณีที่ 4 นั้นมาจากตำแหน่งแท็บไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบของกรณีที่ 6 อยู่ใกล้กัน ส่งผลให้ปริมาณความร้อนและการสะสมความร้อนของแกนแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ต้นแบบและแบตเตอรี่ที่ออกแบบโดยการเปลี่ยนตำแหน่งแท็บไฟฟ้าใหม่ พบว่า การเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 4, 5 และ 6 ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงเท่ากับ -0.21, 1.24 และ -5.45% ตามลำดับ และสามารถสรุปค่าอุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าไว้ในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 อุณหภูมิภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้า

อุณหภูมิ (°C)	**กรณีต้นแบบ**	**กรณีที่ 4**	**กรณีที่ 5**	**กรณีที่ 6**
อุณหภูมิสูงสุด	51.91	52.10	51.45	61.22
อุณหภูมิเฉลี่ย	51.38	51.49	50.75	54.18
TSD	0.31	0.38	0.36	1.85
การลดลงของอุณหภูมิ (%)	0	-0.21	1.24	-5.45

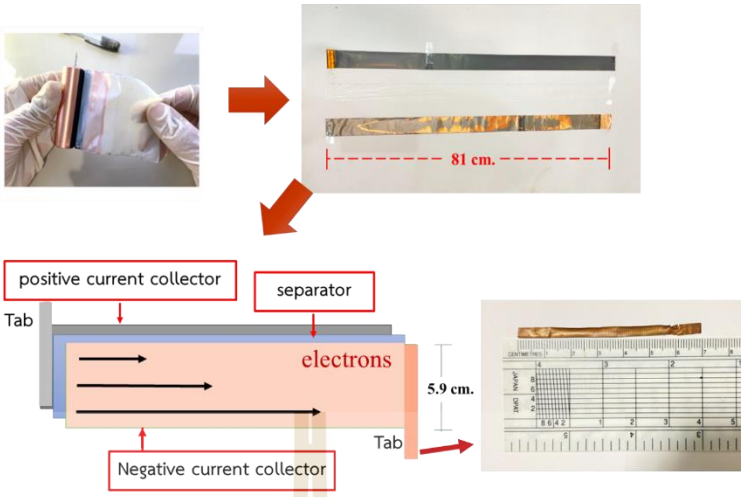
จากการพิจารณาผลการจำลองร่วมกันระหว่างรูปที่ 6.6 และตารางที่ 6.3 โดยนำผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าทั้ง 3 กรณี เปรียบเทียบกับกรณีต้นแบบทำให้ทราบว่า รูปแบบของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงคือ การออกแบบแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 5 ซึ่งทำให้อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลดลง 1.24%

6.3 การออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

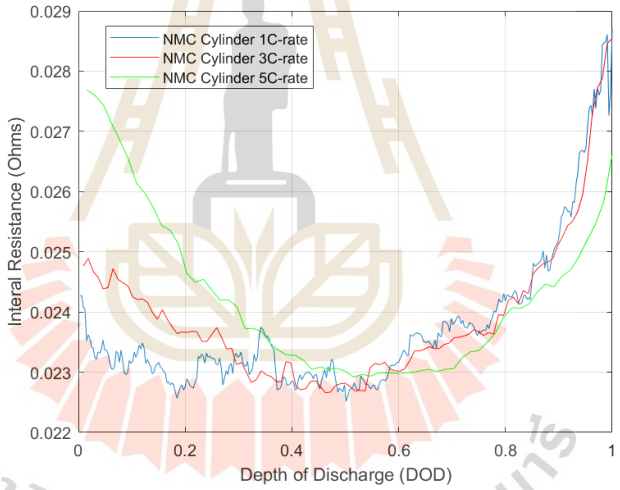
ในการออกแบบจะกล่าวถึงการสร้างความร้อนของแท็บไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับแผ่นตัวรับกระแสขั้วบวกและขั้วลบ รวมถึงขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์แท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ดังต่อไปนี้

6.3.1 วิธีการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

ลักษณะการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกจะพิจารณาดังนี้ เมื่อแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้า พบว่าอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุดจะเคลื่อนที่ตามความยาวของแผ่นตัวรับกระแสไฟฟ้าโดยมีขนาดเท่ากับ 81 cm. แสดงดังรูปที่ 6.7 ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานภายในของแผ่นตัวรับกระแสมีค่ามากกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง โดยค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแบตเตอรี่ที่วัดได้ สามารถแสดงผลได้ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.7 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนตามแนวความยาวของแผ่นตัวรับกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 6.8 ค่าความต้านทานภายในทั้งหมดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกแต่ละ C-rate

จากค่าความต้านทานที่วัดได้ สามารถแยกพิจารณาการสร้างความร้อนของวัสดุต่างๆ โดยเฉพาะที่ตัวรับกระแสไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ (6.3) ซึ่งค่าความต้านทานของตัวรับกระแสไฟฟ้า (R_{cc}) ภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก ตัวรับกระแสขั้วบวกทำมาจากวัสดุอะลูมิเนียมและตัวรับกระแสขั้วลบทำมาจากทองแดง สามารถคำนวณค่าความต้านทานของวัสดุทั้งสองได้จากสมการการหาค่าความต้านทานของตัวรับกระแสที่ (6.4) โดยประยุกต์ใช้กับการหาค่าความต้านทานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกได้ดังนี้

$$R = \frac{l/n}{\sigma A} \tag{6.10}$$

โดยที่ n คือ จำนวนของแท็บไฟฟ้าทั้งหมดบนแผ่นตัวรับกระแส

l คือ ระยะทางที่ปริมาณกระไฟฟ้าไหลผ่าน (m)

σ คือ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ (S/m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (m^2)

ในการคำนวณการสร้างความร้อนของตัวรับกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกได้กำหนดขอบเขตดังนี้

- ลดระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนด้วยการเพิ่มจำนวนแท็บไฟฟ้า ซึ่งจำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะต้องมีปริมาตรรวมกันเท่ากับแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ต้นแบบ
- การเพิ่มจำนวนแท็บไฟฟ้าในระยะห่างที่เท่ากัน จะทำให้ลดระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนแผ่นตัวรับกระแสตามจำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น
- ระยะทางของอิเล็กตรอนตัวที่ไกลที่สุด (l) จะเป็นตัวกำหนดการสร้างความร้อนตลอดแผ่นตัวรับกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณการผลิตความร้อนของแกนแบตเตอรี่ใหม่โดยนำสมการที่ (6.10) มาประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

$$Q_j(t) = \frac{I^2(R_{in,C-rate}(t))}{V_{cell}} \quad ;t = \%DOD \tag{6.11}$$

$$R_{cc} = \frac{l/n}{A_{cc}\sigma_{cc}} \tag{6.12}$$

$$Q_R = \frac{I^2 R_{cc}}{2V_{cell}} \tag{6.13}$$

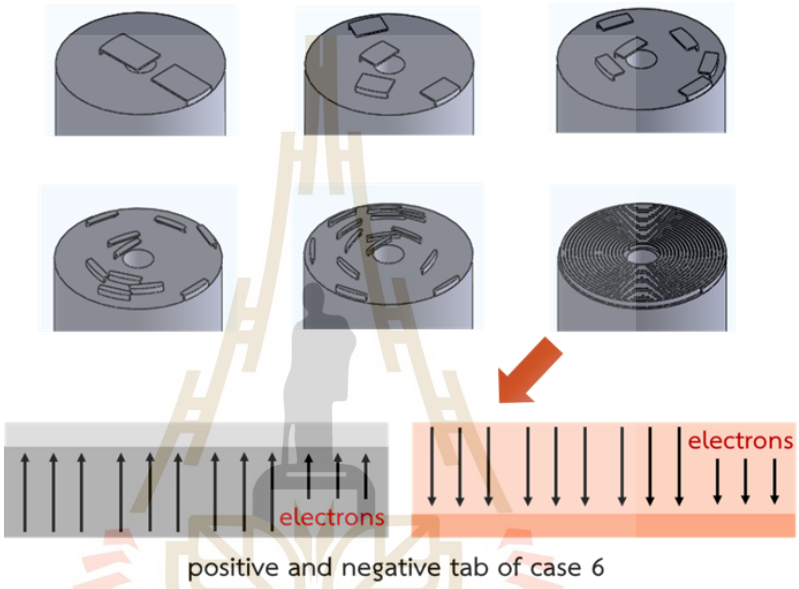
$$Q_{etc}(t) = Q_j(t) - Q_{R,origin} \tag{6.14}$$

$$Q_{j,new}(t) = Q_{R,new} + Q_{etc}(t) \tag{6.15}$$

สำหรับการออกแบบแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกจะดำเนินการเพิ่มจำนวนแท็บไฟฟ้าและเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของแท็บไฟฟ้าในระยะต่าง ๆ โดยกำหนดให้ความกว้างและความหนาคงที่ โดยที่แต่ละกรณีกำหนดให้ปริมาตรรวมของแท็บไฟฟ้าเท่ากับปริมาตรของแท็บไฟฟ้ากรณีต้นแบบ ดังแสดงในตารางที่ 6.4 และตำแหน่งการวางแท็บไฟฟ้าได้ใช้คำสั่ง spiral และ curve driven pattern บนโปรแกรม Solidworks ในการจัดวางซึ่งจะได้ระยะห่างของแท็บไฟฟ้าที่เท่ากันแสดงดังรูปที่ 6.9

ตารางที่ 6.4 ขนาดและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกในกรณีต่าง ๆ

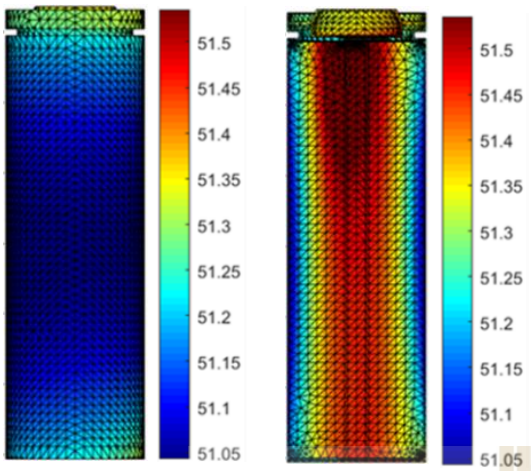
จำนวนแท็บไฟฟ้า	ต้นแบบ (1 tab)	กรณีที่ 1 (2 tabs)	กรณีที่ 2 (4 tabs)	กรณีที่ 3 (6 tabs)	กรณีที่ 4 (10 tabs)	กรณีที่ 5 (14 tabs)	กรณีที่ 6 (Full tab)
ความสูง (h_{tab}), (mm)	11	11/2	11/4	11/6	11/10	11/14	-
ความหนา (L_{tab}), (μm)	100	100	100	100	100	100	100
ความกว้าง (w_{tab}), (mm)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5



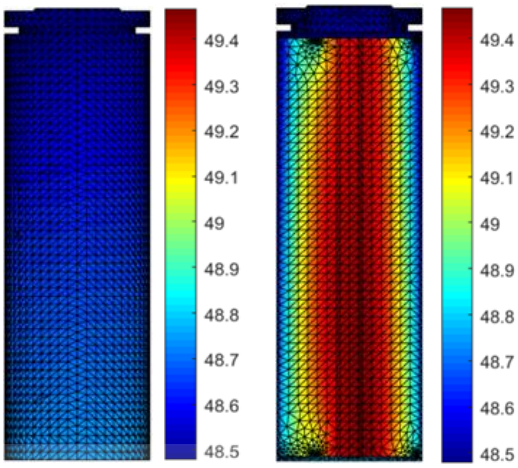
รูปที่ 6.9 ตำแหน่งการจัดวางแท็บไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Solidworks จำนวน 2, 4, 6, 10, 14 และแท็บเต็มรูปแบบ (Full tab) ตามลำดับ

6.3.2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิจากการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก

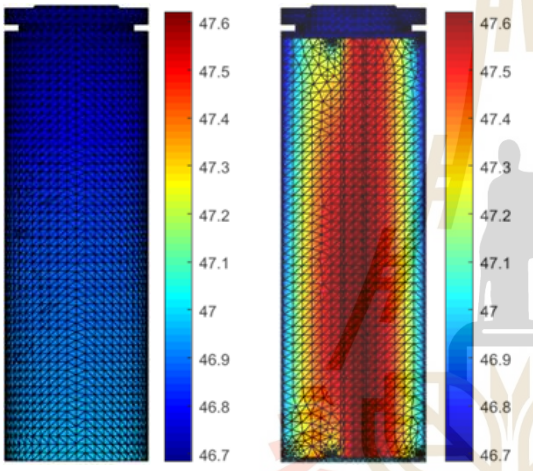
เมื่อศึกษาอุณหภูมิในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ ซึ่งไม่ควรเกิน 50°C เนื่องจากจะทำให้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลง จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่ได้พิจารณาในบทที่ 5 ทำให้ทราบว่า ที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 5C-rate เมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) เป็นอัตราการคายประจุไฟฟ้าที่ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 51.14°C ดังนั้นผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิการออกแบบแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดให้แสดงผลการจำลองที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 5C-rate เพื่อจำลองอุณหภูมิที่สูงที่สุดในสภาวะการใช้งานจริงของแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 6.10



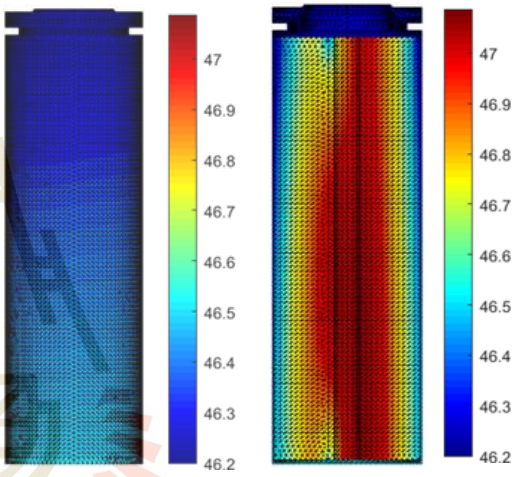
ก) กรณีต้นแบบ (1 tab)



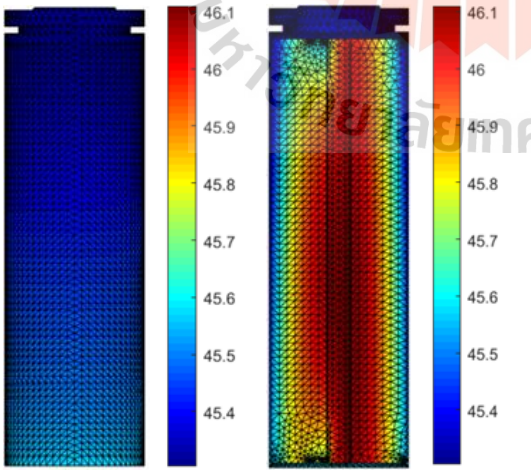
ข) กรณีที่ 1 (2 tabs)



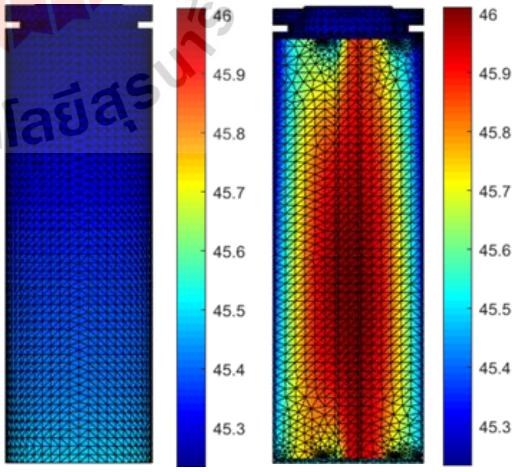
ค) กรณีที่ 2 (4 tabs)



ง) กรณีที่ 3 (6 tabs)

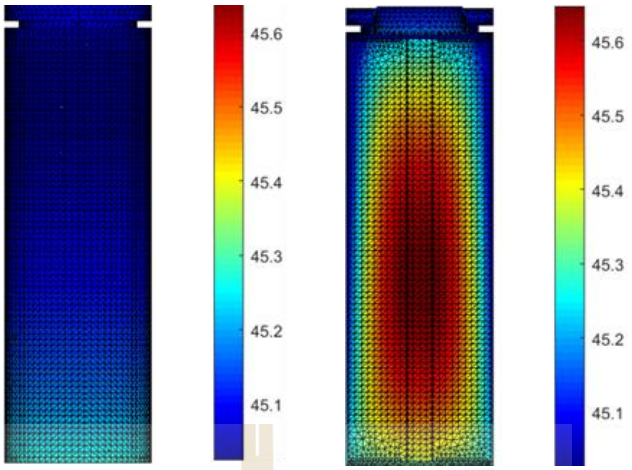


จ) กรณีที่ 4 (10 tabs)



ฉ) กรณีที่ 5 (14 tabs)

รูปที่ 6.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก เมื่อออกแบบจำนวนแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ



ช) กรณีที่ 6 (Full tab)

รูปที่ 6.10 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิ (°C) บนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก เมื่อออกแบบจำนวนแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ (ต่อ)

จากรูปที่ 6.10 แสดงผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวและพื้นที่หน้าตัดตรงกึ่งกลางของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกที่อัตราการคายประจุไฟฟ้าด้วยกระแสแบบคงที่ 5C-rate เมื่อคายประจุไฟฟ้าจนหมด (100%DOD) สำหรับการออกแบบขนาดและจำนวนของแท็บไฟฟ้าภายใต้ปริมาตรที่เท่ากัน โดยกำหนดให้ความหนาและความกว้างของแท็บไฟฟ้าคงที่ จากนั้นเปลี่ยนขนาดความสูงของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 6.5 เมื่อพิจารณาที่แท็บไฟฟ้า พบว่า การสร้างปริมาณความร้อนของจำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามกฎของการแบ่งกระแสไฟฟ้า (Current divider) กล่าวคือ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท็บจะถูกแบ่งออกตามจำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากแท็บที่เพิ่มขึ้นนั้นจะต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท็บมีขนาดลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแท็บไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย รวมถึงการเพิ่มจำนวนของแท็บไฟฟ้าในระยะห่างที่เท่ากันจะทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวรับกระแสลดลงตามระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณความร้อนบริเวณนี้ได้จากสมการที่ (6.12) และ (6.13) ตามลำดับ ส่งผลให้การสร้างความร้อนของแบตเตอรี่มีอุณหภูมิที่ลดลงตามจำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ต้นแบบและแบตเตอรี่ที่ออกแบบใหม่ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบททรงกระบอก พบว่า ที่จำนวนแท็บไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1 แท็บเป็น 2, 4, 6, 10, 14 และแท็บเต็มรูปแบบ ส่งผลให้มีแนวโน้มของอุณหภูมิลดลงเท่ากับ 4.43, 9.45, 10.13, 10.80, 11.01 และ 11.58% ตามลำดับ

ตารางที่ 6.5 อุณหภูมิของแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก เมื่อเพิ่มจำนวนของแท็บไฟฟ้า

อุณหภูมิ (°C)	ต้นแบบ (1 tab)	กรณีที่ 1 (2 tabs)	กรณีที่ 2 (4 tabs)	กรณีที่ 3 (6 tabs)	กรณีที่ 4 (10 tabs)	กรณีที่ 5 (14 tabs)	กรณีที่ 6 (Full tab)
อุณหภูมิสูงสุด	52.45	49.74	46.84	46.43	46.11	46.01	45.65
อุณหภูมิเฉลี่ย	51.22	48.95	46.38	46.03	45.69	45.88	45.29
TSD	0.16	0.24	0.23	0.22	0.21	0.19	0.16
การลดลงของอุณหภูมิ (%)	0	4.43	9.45	10.13	10.80	11.01	11.58

จากการพิจารณาผลการจำลองร่วมกันระหว่างรูปที่ 6.10 และตารางที่ 6.5 เมื่อนำผลจำลองการออกแบบการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกทั้ง 6 กรณี เปรียบเทียบกับกรณีต้นแบบทำให้ทราบว่า รูปแบบของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก คือ การออกแบบแท็บไฟฟ้าเต็มรูปแบบ (Full tab) เนื่องจากระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเป็นไปตามความสูงของแผ่นตัวรับกระแส รวมทั้งขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแท็บไฟฟ้ามีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่การออกแบบแท็บไฟฟ้าในกรณีนี้มีปริมาตรของแท็บที่ไม่เท่ากันกับต้นแบบ ดังนั้น การออกแบบแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 5 จึงเป็นกรณีที่เหมาะสมที่ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงถึง 11.01%

6.4 สรุป

การออกแบบขนาดของแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้ปริมาตรที่เท่ากัน โดยกำหนดให้ความหนาคงที่ จากนั้นเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างและความสูง รวมไปถึงการเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าในกรณีต่างๆ พบว่า ขนาดความกว้างที่เพิ่มขึ้นและความสูงที่ลดลง จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของแท็บไฟฟ้ามีขนาดเพิ่มขึ้น และการออกแบบตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ในระยะทางสั้นที่สุด จะทำให้ค่าความต้านทานภายในของแผ่นตัวรับกระแสที่อิเล็กตรอนต้องเผชิญลดลง ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่สร้างขึ้นของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงลดลง และการออกแบบขนาดและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้ปริมาตรที่เท่ากัน โดยเปลี่ยนแปลงขนาดความสูงในระยะต่าง ๆ จากนั้นกำหนดให้ขนาดความกว้างและความหนาคงที่ พบว่า จำนวนแท็บไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่มีอุณหภูมิลดลง เมื่อนำผลจำลองการออกแบบการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกทั้งหมดเปรียบเทียบกับกรณีต้นแบบทำให้ทราบว่า รูปแบบของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอก คือ การออกแบบแท็บไฟฟ้าในกรณีที่ 1 และ 5 ตามลำดับ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งสองแบบลดลง 4.63% และ 11.01% ตามลำดับ

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและขอเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การออกแบบแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับจำลองผลการกระจายอุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลการจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 2, 4 และ 8C-rate ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD มีค่าเท่ากับ 27.34, 31.14, 39.07 และ 51.38°C ตามลำดับ สำหรับผลการจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยภายในแกนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการคายประจุไฟฟ้าที่ 100%DOD มีค่าเท่ากับ 28.44, 39.44 และ 51.22°C ตามลำดับ จากผลการจำลองของแบตเตอรี่ทั้ง 2 รูปแบบ พบว่าเมื่ออัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น โดยจุดที่มีปริมาณการสร้างความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่อยู่ที่แท็บไฟฟ้าและบริเวณที่สัมผัสกับแท็บไฟฟ้า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน (%) ของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวแกนแบตเตอรี่ระหว่างผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงด้วยเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 2 และ 4C-rate มีค่าเท่ากับ 1.72, 0.36 และ 0.41% ตามลำดับ และสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกมีค่าความคลาดเคลื่อน (%) ภายใต้อัตราการคายประจุไฟฟ้าแบบคงที่ 1, 3 และ 5C-rate เท่ากับ 0.88, 1.63 และ 2.07% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองและผลการทดสอบจริงด้วยอัตราการคายประจุไฟฟ้าแต่ละ C-rate มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน พบว่าการกระจายอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไปในทิศทางเดียวกัน

สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ผู้วิจัยได้นำไปเปรียบเทียบกับการทดสอบตัวอย่างจริงโดยใช้เซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิลและกล้องตรวจจับความร้อน พบว่า ผลลัพธ์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นได้นำโปรแกรมจำลองผลที่พัฒนาขึ้นไปใช้ออกแบบแท็บไฟฟ้าเพื่อลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยการออกแบบขนาดและเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง ตลอดจนการออกแบบจำนวนแท็บไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอก พบว่า ขนาดความกว้างของแท็บไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและการลดระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนแผ่นตัวรับกระแส โดยการเปลี่ยนตำแหน่งและ

การเพิ่มจำนวนแท็บไฟฟ้า จะทำให้ค่าความต้านทานภายในแกนแบตเตอรี่ลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงตามไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การลดลงของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ต้นแบบและแบตเตอรี่ที่ออกแบบใหม่ สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุง พบว่า ที่ความกว้างของแท็บไฟฟ้าเท่ากับ 40, 50 และ 75 mm. ทำให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับ -3.50, -2.32, และ 4.63% ตามลำดับ รวมทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งของแท็บไฟฟ้าที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 คือ กรณีที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่า มีอุณหภูมิลดลง -0.21, 1.24, และ -5.45% ตามลำดับ และสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบทรงกระบอกพบว่า ที่จำนวนแท็บไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4, 6, 10 ,14 และแท็บเต็มรูปแบบ (Full tab) ทำให้อุณหภูมิลดลงเท่ากับ 4.43, 9.45, 10.13, 10.80, 11.01 และ 11.58% ตามลำดับ จากผลการจำลองที่แสดงข้างต้นทำให้ทราบว่า ขนาด ตำแหน่งและจำนวนแท็บไฟฟ้ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

7.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและแม่นยำของผลจำลองที่ได้พัฒนาโปรแกรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติขึ้น ควรนำผลจากการออกแบบขนาดและจำนวนแท็บไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบถุงและทรงกระบอกไปสร้างต้นแบบของแบตเตอรี่สำหรับใช้ในการทดสอบตัวอย่างจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองอีกครั้ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

ชัยยศ หัตถเสรีพงษ์. (2550). แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน. วารสารอิเล็กทรอนิกส์, 6(3), 53-59.

นงลักษณ์ มีทอง. (2553). วัสดุสำหรับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 60, 52-60.

นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. (2533). การถ่ายเทความร้อน. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2542). ไฟไนต์อิลลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์. (วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สมชัย อัครทิวา และ ขวัญจิต วงษ์ชาลี. (2545). เทอร์โมไดนามิกส์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป.

สุกัณญา ทัพศรี. (2555). การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่มีผลต่ออุณหภูมิรอบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา. (2558). การวิเคราะห์อุณหภูมิอาหารจากการทำงานของเตาไมโครเวฟหลากชนิด ด้วยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1984). A general energy balance for battery systems. Journal of The Electrochemical Society, 132(1), 5–12.

Bolsinger, C., & Birke, K.P. (2018). Effect of different cooling configurations on thermal gradients inside cylindrical battery cells. Journal of Energy Storage, 21, 222-230.

Chan, C.K., Peng, H., Jiu G., Mcllwrath, K., Zhang, X.F., Huggins, R.A., & Cui, Y. (2008). High-performance lithium battery anodes using silicon nanowire. Nature Nanotechnology, 3, 31-40.

Cheney, W., & Kincaid, D. (2013). Numerical Mathematics and Computing (7th ed.). Brook/Cole, Cengage Learning.

Choudhari, V.G., Dhoble, A.S., & Sathe, T.M. (2020). A Review on Effect of Heat Generation and Various Thermal Management Systems for Lithium Ion Battery Used for Electric Vehicle. Journal of Energy Storage, 32, 101709.

Du, S., Ji, M., Cheng, Y., Tang, Y., Zhang, H., Ai, L., Zhang, K., & Lai, Y. (2015) Study on the Thermal Behaviors of Power Lithium Iron Phosphate (LFP) Aluminum-Laminated Battery with Different Tab Configurations. International Journal of Thermal Sciences, 89, 327-336.

Feng, X., et al. (2015). Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module. Journal of Power Sources, 275, 261–273.

Feng, X., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wu, P., Kulp, C., & Prasser, S. (2015). Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25Ah LiNixCoyMnzO_2 large format lithium ion battery. Applied Energy, 154, 74-91.

Guatam, S., et al. (2017). Three-dimensional electro-thermal model of li-ion pouch cell: Analysis and comparison of cell design factors and model assumptions. Applied Thermal Engineering, 126, 796-808.

Guo, M., Kim, G.H., & White R.E., (2013). A three-dimension multi-physics model for a Li-ion battery. Journal of Power Sources, 240, 80–94.

Hu, X., Jiang, J., Cao, D., & Egardt, B. (2016). Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse Bayesian predictive modeling. IEEE Trans. Ind. Electron, 63(4), 2645–2656.

Jabbar, M.A., Phyu, H.N., Liu, Z., & Bi, C. (2004). Modeling and Numerical Simulation of a Brushless Permanent-Magnet DC Motor in Dynamic Conditions by Time-Stepping Technique, IEEE Transactions on Industry Applications, 40(3), 763-770.

Jeon, D.H., & Baek, S.M. (2011). Thermal Modeling of Cylindrical Lithium Ion Battery During Discharge Cycle. Energy Conversion and Management, 52, 2973-2981.

Kim, G.H., Pesaran, A., & Spotnitz, R. (2007). A Three-Dimensional Thermal Abuse Model for Lithium-Ion Cells. Journal of Power Sources, 170, 476-489.

Kreyszig, E. (2006). Advanced Engineering Mathematics (9th ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Lee, J.J., et al., (2020). Design optimization of tab attachment positions and cell aspect ratio to minimize temperature difference in 45-Ah LFP large-format Lithium-ion pouch cells. Applied Thermal Engineering, 182(9), 116143.

Li, C., Zhang, H., Zhang, R., Lin, Y., & Fang, H. (2021) On the Characteristics Analysis and Tab Design of an 18650 Type Cylindrical LiFePO4 Battery. Applied Thermal Engineering, 182, 116144.

Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Han X. (2014). Analysis of heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. Journal of Thermal Analysis and Carolimetry, 116, 1001-1010.

Mei, W., Chen, H., Sun, J., & Wang, Q. (2018). Numerical study on tab dimension optimization of lithium-ion battery from the thermal safety perspective. Applied Thermal Engineering, 142, 148-165.

Nikolian, A., et al. (2016). Lithium ion batteries-development of advanced electrical equivalent circuit models for nickel manganese cobalt lithium-ion. Energies, 9(360), 1-23.

Pao-la-or, P., & Isaramongkolrak, A. (2019). New Design and Magnetic Field Analysis of Transformer Shape with V-Connection for Core Loss Reduction in Railway System. International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 12(1), 56-65.

Pao-la-or, P., & Somphong, N. (2020). Comparison and analysis of temperature distribution in pouch and cylindrical Li-ion battery by finite element thermal model. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 9(5), 915-923.

Reddy, T.B. (2011). Linden's Handbook of Batteries (4th ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc.

Reynier, Y., Yazami, R., & Fultz, B. (2014). Thermodynamics of lithium intercalation into graphites and disordered carbons. Journal of The Electrochemical Society, 151, 422–426.

Samba, A., Omar, N., Gualous, H., Capron, O., Bossche, P.V., & Mierlo, J.V. (2014) Impact of Tab Location on Large Format Lithium-Ion Pouch Cell Based on Fully Coupled Tree-Dimensional Electrochemical-Thermal Model. Electrochimica Acta, 147, 319-329.

Sato, N., & Yagi, K. (2015). Thermal Behavior Analysis of Nickel/Metal Hydride Batteries of Electric Vehicles. JSAE Review, 21, 205-211.

Su, J., et al. (2019). An equivalent circuit model analysis for the lithium-ion battery pack in pure electric vehicles. Measurement and Control, 52(3-4), 193-201.

Taheri, P., Yazdanpour, M., & Bahrami, M. (2013). Transient Three-Dimensional Thermal Model for Batteries with Thin Electrodes. Journal of Power Sources, 243, 280-289.

Tarascon, J.M., & Armand, M. (2001). Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature Nanotechnology, 414, 359-367.

Vacharakup, S., Peerasaksophol, M., Kulworawanichpong, T., & Pao-la-or, P. (2011). Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. Applied Mechanics and Materials, 61, 110-116.

Vilayanur, V., et al., (2010). Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management. Journal of Power Sources, 195, 3720–3729.

Viswanathan, V.V., Choi, D., Wang, D., Xu, W., Towne, S., Williford, R.E., Zhang, J.G., Liu, J. & Yang, Z. (2010). Effect of Entropy Change of Lithium Intercalation in Cathodes and Anodes on Li-Ion Battery Thermal Management. Journal of Power Sources, 195, 3729-3729.

Wang, C.Y., Zhang, Ge, G. S., Xu, T., Ji, Y., Yang, X.D., & Leng, Y. (2016). Lithium-Ion Battery Structure that Self-Heats at Low Temperatures. Nature, 529, 515-518.

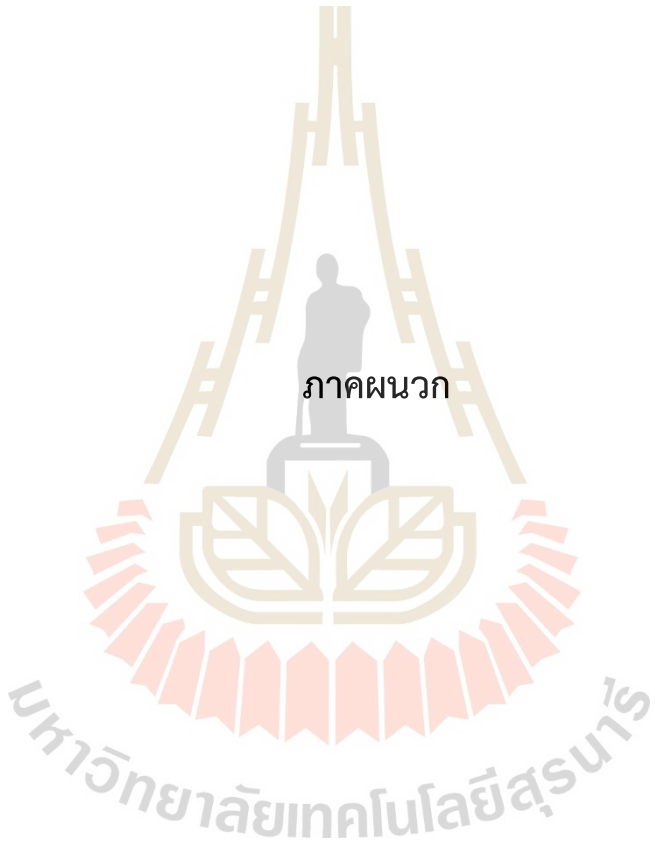
Wang, Z., Ma, J., & Zhang, L. (2017). Finite element thermal model and simulation for a cylindrical Li-ion battery. IEEE Access, 5, 15372-15379.

Williford, R., Viswanathan, V., & Zhang, J.G. (2009). Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries. Journal of Power Sources, 189, 101–107.

Zhang, X., Chang, X., Shen, Y., & Xiang, Y. (2017). Electrochemical-electrical-thermal modeling of pouch-type lithium ion battery : An application to optimize temperature distribution. Journal of Energy Storage, 11, 249-257.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก



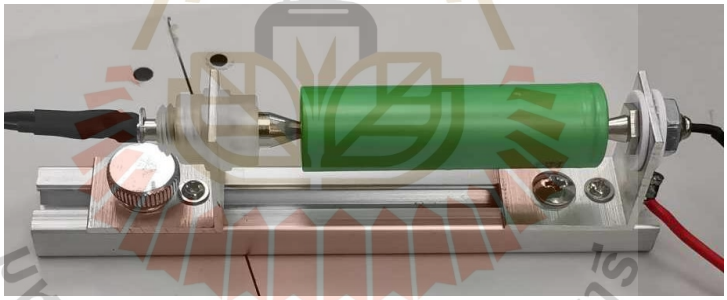
ภาคผนวก ก
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ ก.1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด NMC แบบถุง

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด MMC แบบถุงที่ใช้ทดสอบเป็นของบริษัท Microvast Holding Inc. มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้

- nominal voltage 3.7 V
- nominal capacity 15 Ah
- cut-off voltage 2.5 V
- charge up voltage 4.2 ± 0.05 V



รูปที่ ก.2 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด MMC แบบทรงกระบอก

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด MMC แบบทรงกระบอกที่ใช้ทดสอบเป็นของบริษัท Sony Energy Devices Corporation รุ่น US18650VTC4 มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้

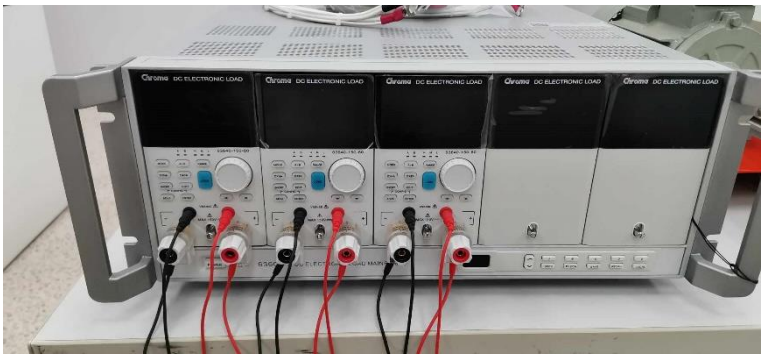
- nominal voltage 3.7 V
- nominal capacity 2,100 mAh
- cut-off voltage 2.5 V
- charge up voltage 4.2 ± 0.05V

รูปที่ ก.3 กล้องตรวจจับความร้อน Testo 880 thermal imager

เป็นกล้องถ่ายอุณหภูมิในลักษณะของภาพถ่ายทางความร้อนและภาพจริง โดยตรวจจับพลังงานรังสีอินฟาเรด (IR) ที่ถ่ายทอดออกมาจากวัตถุสู่สิ่งแวดล้อมและสร้างแถบสี ซึ่งวัตถุที่ร้อนหรือมีอุณหภูมิสูงกว่าจะแสดงสีสว่างและในส่วนของวัตถุที่เย็นหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะแสดงสีมืด

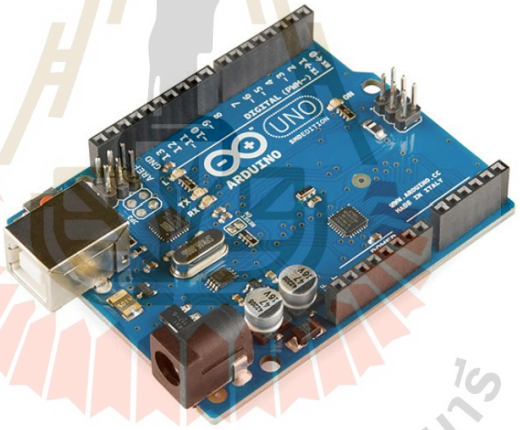
รูปที่ ก.4 Chroma Model 17020

Chroma Model 17020 เป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างปริมาณกระแสไฟฟ้าและสร้างภาระโหลดเพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เช่น แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply) แบตเตอรี่ (battery) เป็นต้น และสามารถตรวจวัดระดับของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าความต้านทานภายในได้อย่างแม่นยำ โดยค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ทนได้ของเครื่องมือชนิดนี้มีขนาดเท่ากับ 67.5 A



รูปที่ ก.5 Chroma DC electronic load

Chroma DC electronic load เป็นเครื่องมือที่ใช้สร้างภาระโหลดให้กับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่างๆ เช่น แบตเตอรี่ เป็นต้น โดยค่าพิกัดของกระแสไฟฟ้าที่ทนได้ของเครื่องมือชนิดนี้มีขนาดเท่ากับ 60 A



รูปที่ ก.6 Arduino UNO R3

Arduino UNO R3 หรือบอร์ด Microcontroller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์อื่นๆ ด้วยการเขียน code โปรแกรมลงบนตัวบอร์ด เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ต้องการ เช่น การเขียน code เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์หรือตรวจวัดค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ เป็นต้น

รูปที่ ก.7 Digital Anemometer

Digital Anemometer เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วของอากาศภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ

รูปที่ ก.8 ไมโครมิเตอร์

ไมโครมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้วัดขนาดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กในหน่วยไมโครเมตร โดยความละเอียดของไมโครมิเตอร์มีตั้งแต่ 0.01-0.001 m.

รูปที่ ก.9 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด K เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณทางกายภาพหรืออุณหภูมิในช่วง -50°C ถึง 700°C โดยมีค่าความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ ±2% นอกจากนี้ยังมีเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่นๆ ให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจวัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Pao-la-or, P., Somphong, N. (2020). Comparison and analysis of temperature distribution in pouch and cylindrical Li-ion battery by finite element thermal model. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 9*(5), 915-923.

Pao-la-or, P., Somphong, N. (2021). Tab Design for Thermal Reduction in Pouch Lithium-Ion Battery by Using Finite Element Method. *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), 14*(6), 485-495.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

International Journal of Smart Grid and Clean Energy

Comparison and analysis of temperature distribution in pouch and cylindrical Li-ion battery by finite element thermal model

Padej Pao-la-or[a], Natthawut Somphong[b]

[a b]*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

Abstract

Li-ion battery is the most popular energy storage system for the propulsion of an electric vehicle since the Li-ion batteries are high energy storage device and high energy density. However, Li-ion battery performance is highly sensitive to the operational temperature. The aim of the present study was to comparison and analysis of temperature distribution between the pouch and cylindrical Li-ion battery. The solution in thermal equations to be solved by approximating in the form of the partial differential equations (PDE) by 3-D finite element method using that all the coded developed by MATLAB program and the mathematical model that is time dependent. The simulation results show that an increased discharge current rate from 1C to 5C results show temperature increased. An increase the surface area and the cross-section tab area under the same volume conditions. The simulation results in formation of temperature decreased caused heat generation decrease. Thus, the temperature distribution of the pouch Li-ion battery less than the cylindrical Li-ion battery.

Keywords: Li-ion battery, 3-D finite element method, thermal distribution, thermal model

1. Introduction

It this well known that the most popular energy storage system for the propulsion of an electric vehicle, Li-ion battery is considered as one of the major concerns, since the Li-ion batteries are high energy storage devices and high energy density. However, the Li-ion battery performance is highly sensitive to the operational temperature [1]. For example, Li-ion batteries often suffer severe power loss under temperatures below zero degrees Celsius and face the increased risk of a thermal runaway at extremely high temperatures [2]. Thus, a thermal management system is necessarily required to control the system temperature within a permitted range, and maintain the temperature uniformity throughout the overall system.

The above thermal analysis of heat transfer problems will be explained in the form of differential equations, which require the solution to be solved by approximating in the form of the partial differential equations (PDE) and the popular method of solving a partial differential equation is 3-D finite element method [3]. The aim of the present study was to comparison and analysis of temperature distribution between the pouch and cylindrical Li-ion battery by using a 3-D finite element method, which is controlled the Li-ion battery under the same volume conditions. To find a suitable model for using in electric vehicles and accurately predict their thermal behavior under convection conditions.

2. Mathematical Model of Temperature for Li-Ion Battery

Based on these assumptions, a Li-Ion battery 3-D heat transfer equation under the Cartesian coordinate is derived as Equation (1).

* Manuscript received November 15, 2019; revised September 1, 2020.
Corresponding author. Tel.: +66-44-22-4400; *E-mail address*: padej@sut.ac.th.
doi: 10.12720/sgce.9.5.915-923

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \tag{1}$$

Where ρ, c, t and T are the average density (kg/m^3), the average specific heat capacity (J/kg·˚C), time (sec) and temperature (˚C) of the battery, respectively. k_x, k_y and k_z represent the thermal conductivity (W/m·˚C) of the battery in coordinate x, y and z and Q represents the heat generation (W/m^3).

The Li-Ion batteries are made up of multiple layers of different materials. To simplify the calculation, the average density and the average specific heat capacity of Li-Ion battery can be calculated as [4]

$$\rho_{cell} = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i v_i} \quad \text{and} \quad c_{cell} = \frac{\sum_i \rho_i c_i v_i}{\sum_i m_i}$$

Another important parameter is the thermal conductivity coefficient, which can be calculated as follows [4]

$$k_s = \frac{V_{cell}}{\sum_i \frac{v_i}{k_i}} \quad \text{and} \quad k_p = \frac{\sum_i k_i v_i}{V_{cell}}$$

Where k_s and k_p are the average heat conductivity coefficient in series and parallel respectively. During the discharge cycle, the heat generation is taken place caused by the flowing of current I, through the cell. And the heat generation for the battery which was developed by reference [5-6] can be written as

$$Q = Q_j + Q_s + Q_t = \frac{I}{V_{cell}} \left(\left(U^o - U \right) - T \frac{\partial U^o}{\partial T} \right) + \frac{I^2}{A_{tab} \sigma_{tab}} \tag{2}$$

Where I, V_{cell}, U^o, U, A_{tab} and σ_{tab} are the battery operating current (A) (positive for discharging and negative for charging), the cell volume (m^3) of battery, open circuit potential (V), the cell potential (V), the cross-section tab area (m^2) and the electrical conductivity of tab (MS/m), respectively. The first term is the heat generation due to joule heating can be described as

$$Q_j = \frac{I}{V_{cell}} \left(U^o - U \right) = \frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} \tag{3}$$

The internal resistance R_{in} (~2 mΩ [7]) during charge/discharge can be determined by Equation (4) [8]

$$R_{in} = \frac{\left(U^o - U \right)}{I} \tag{4}$$

And the second term is generated due to entropy change can be written as

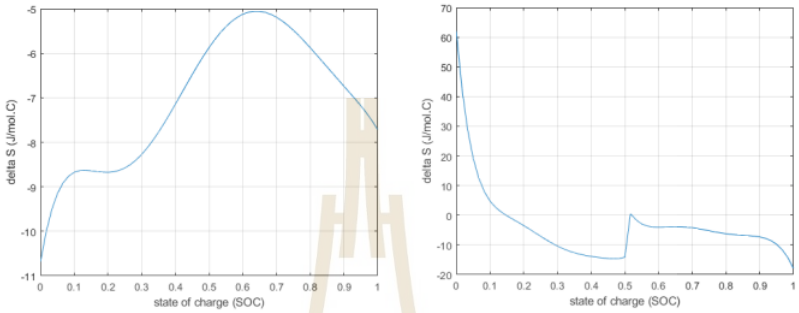
$$Q_s = \frac{I}{V_{cell}} \left(-T \frac{\partial U^o}{\partial T} \right) = -T \Delta S \frac{I}{nFV_{cell}} \tag{5}$$

Where F is the Faraday constant (96,485 c/mol), n is the charge number of electron and taken to be equal 1. the entropy changes (ΔS J/mol·˚C) of $LiNiMnCoO_2$ (NMC) and LiC_6 (graphite) considered in this study are illustrated in Fig. 1. These data are taken from reference [9-10]. The entropy changes typically to a reduction reaction, which is the discharge reaction for a cathode in a full cell. Thus, the total change

in entropy for a cell during discharge is [11]

$$\Delta S = \Delta S_c + \Delta S_a \tag{6}$$

Where ΔS_c represents the entropy change of the cathode material for reduction reaction, while ΔS_a represents the entropy change of the anode material for the oxidation reaction.



(a) (b)

Fig. 1. Entropy changes (J/mol·˚C) under different state of charge (SOC): (a) $LiNiMnCoO_2$ and (b) LiC_6.

3. 3-D Finite Element Method

The 3.65V/20Ah pouch battery provided by the manufacturer can be found in [6]. In this battery cell, there are 18 cell assemblies. One such assembly consists of sub-layers are shown in Fig. 2., In a case study, a cylindrical battery on the right side was designed to compare the temperature distribution, which is controlled the Li-ion battery under the same volume conditions. The 3-D finite element method domain can be used linear tetrahedron elements, which a pouch cell model consists of 11,621 nodes and 53,204 elements, while a cylindrical battery consists of 10,565 nodes and 55,461 elements.

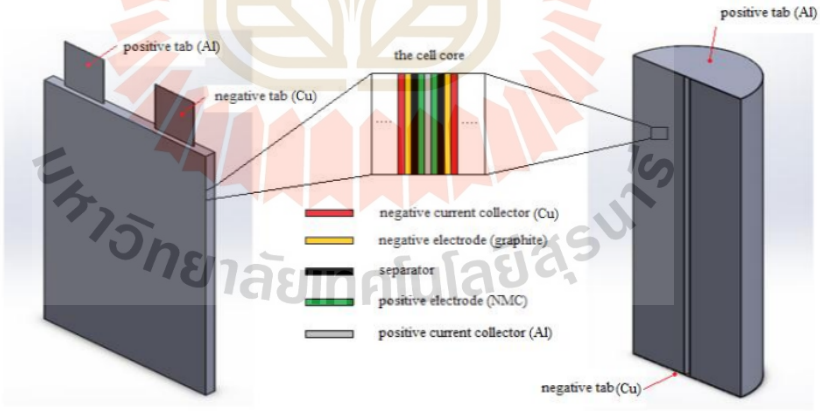


Fig. 2. Component of a pouch and a cylindrical Li-ion battery.

(a) (b)

Fig. 3. Mesh of Li-ion battery: (a) pouch cell and (b) cylindrical cell.

From Equation (1) the creating of finite element equations was applied to the method of weighted residual by the Galerkin method. And this paper was used the tetrahedron element for the shape function (three dimensions) for the finite element method. According to this method, Equation (7) and (8) are expressed corresponding with temperature [12].

$$T(x,y,z,t) = T_1N_1 + T_2N_2 + T_3N_3 + T_4N_4 \tag{7}$$

Where T_1, T_2, T_3 and T_4 are the temperature of node 1, 2, 3, and 4, respectively. And N_1, N_2, N_3 and N_4 are the element shape function, then

$$N_n = \frac{1}{6V}\left(a_n + b_n x + c_n y + d_n z\right) \tag{8}$$

And V is the volume of the tetrahedron element, which can be found the determinants of the coefficient as follows (9).

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \tag{9}$$

The position coefficient defined by

$$a_1 = x_4\left(y_2z_3 - y_3z_2\right) + x_3\left(y_4z_2 - y_2z_4\right) + x_2\left(y_3z_4 - y_4z_3\right) \qquad c_1 = x_4\left(z_2 - z_3\right) + x_2\left(z_3 - z_4\right) + x_3\left(z_4 - z_2\right)$$
$$a_2 = x_4\left(y_3z_1 - y_1z_3\right) + x_3\left(y_1z_4 - y_4z_1\right) + x_1\left(y_4z_3 - y_3z_4\right) \qquad c_2 = x_4\left(z_3 - z_1\right) + x_3\left(z_1 - z_4\right) + x_1\left(z_4 - z_3\right)$$
$$a_3 = x_4\left(y_1z_2 - y_2z_1\right) + x_2\left(y_4z_1 - y_1z_4\right) + x_1\left(y_2z_4 - y_4z_2\right) \qquad c_3 = x_4\left(z_1 - z_2\right) + x_1\left(z_2 - z_4\right) + x_2\left(z_4 - z_1\right)$$
$$a_4 = x_3\left(y_2z_1 - y_1z_2\right) + x_2\left(y_1z_3 - y_3z_1\right) + x_1\left(y_3z_2 - y_2z_3\right) \qquad c_4 = x_3\left(z_2 - z_1\right) + x_2\left(z_1 - z_3\right) + x_1\left(z_3 - z_2\right)$$

$$b_1 = y_4\left(z_3 - z_2\right) + y_3\left(z_2 - z_4\right) + y_2\left(z_4 - z_3\right) \qquad d_1 = x_4\left(y_3 - y_2\right) + x_3\left(y_2 - y_4\right) + x_2\left(y_4 - y_3\right)$$
$$b_2 = y_4\left(z_1 - z_3\right) + y_1\left(z_3 - z_4\right) + y_3\left(z_4 - z_1\right) \qquad d_2 = x_4\left(y_1 - y_3\right) + x_1\left(y_3 - y_4\right) + x_3\left(y_4 - y_1\right)$$
$$b_3 = y_4\left(z_2 - z_1\right) + y_2\left(z_1 - z_4\right) + y_1\left(z_4 - z_2\right) \qquad d_3 = x_4\left(y_2 - y_1\right) + x_2\left(y_1 - y_4\right) + x_1\left(y_4 - y_2\right)$$
$$b_4 = y_3\left(z_1 - z_2\right) + y_1\left(z_2 - z_3\right) + y_2\left(z_3 - z_1\right) \qquad d_4 = x_3\left(y_1 - y_2\right) + x_1\left(y_2 - y_3\right) + x_2\left(y_3 - y_1\right)$$

After that used weighted residual by the Galerkin method and was applied to the differential equation (1), where the integrations were performed over the element domain V.

$$\int_V N_n \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V \left(k_x \frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV + \int_\Gamma N_n h T d\Gamma + \int_V N_n Q_s T dV = \int_\Gamma N_n h T_\infty d\Gamma + \int_V N_n Q_j dV + \int_V N_n Q_t dV \quad (10)$$

From equation (10) can be expressed in matrix form

$$[C]\left\{\dot{T}\right\} + [K_c + K_h + K_s]\{T\} = \{Q\} \quad (11)$$

Where $[C]$ is the heat capacity matrix, $[K_c]$, $[K_h]$ and $[K_s]$ are the thermal conductivity matrix, the heat convection matrix, and the entropy change matrix, respectively. And $\{Q\}$ is the load vector for heat generation can be described as

$$[C]_{4x4} = \rho c \frac{V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[\mathrm{K}_c]_{4x4} = \frac{1}{36V}\left(k_x \left[b_j b_k \right] + k_y \left[c_j c_k \right] + k_z \left[d_j d_k \right] \right) \quad j,k = 1,2,3,4 \quad (13)$$

$$[\mathrm{K}_h + \mathrm{K}_s]_{4x4} = \left(h + \Delta S \frac{I}{nFV_{cell}} \right) \frac{V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\{Q\}_{4x1} = \{Q_h + Q_j + Q_t\}_{4x1} = \left(hT_{amb} + \frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} + \frac{I^2}{A_{tab}\sigma} \right) \frac{V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Where h is the heat convection coefficient (W/m^2·°C), T_{amb} is ambient temperature (°C). In this paper, the simulation was set initial temperature equal to the ambient temperature ($T_0 = T_{amb} = 25$°C) and the heat convection coefficient was set to equal to 10 W/m^2·°C.

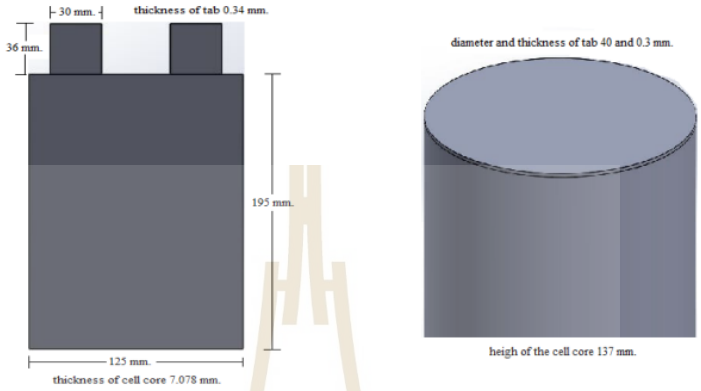
Equation (11) $\{\dot{T}\}$ represents the temperature distributions depending on time. Thus, the backward difference method is used as shown in Equation (16) [13].

$$\left\{\dot{T}\right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^{t}}{\Delta t} \quad (16)$$

For the calculation of all elements in the system of n nodes, the system equations are nxn matrix.

4. Dimension and Parameter of Li-ion Battery

The dimension of a pouch and a cylindrical Li-ion battery is shown in Fig. 4(a) and Fig. 4(b), respectively. The parameter of a pouch and a cylindrical Li-ion battery are provided in Table 1. [6].



(a) (b)

Fig. 4. Dimension of Li-ion battery: (a) pouch cell and (b) cylindrical cell.

Table 1. Material and geometric properties of the Li-ion battery

Material	ρ (kg/m^3)	k (W/m·°C)	c (J/kg·°C)	σ (MS/m)	thickness (μm)
Positive tab (Al)	2,702	238	903	37.8	
Positive electrode (NMC)	2,895	1.58	1,270		70
Positive current collector (Al)	2,702	238	903		21
Negative tab (Cu)	8,933	398	385	59.6	
Negative electrode (graphite)	1,555	1.04	1,437		79
Negative current collector (Cu)	8,933	398	385		12
Separator (PP)	1,017	0.34	1,978		25
The cell core of pouch cell (mixture of the separator, the electrode, and the current collector)	2,258.79	$k_x = k_y = 26.58$ (parallel) $k_z = 0.973$ (series)	1,225.36		
The cell core of the cylindrical cell	2,258.79	$k_x = k_z = 0.973$ (series) $k_y = 26.58$ (parallel)	1,225.36		

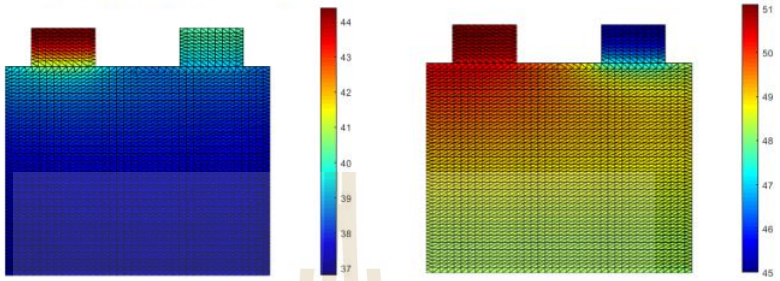
5. Result and Discussion

The 3-D finite element method based simulation is coded with MATLAB programing for calculation of temperature distribution inside the Li-ion battery. At the beginning of discharge, the most heated region is located at the positive tab. Thus, the region of the battery core, which is adjacent to the positive tab is more heat than the rest, Superior heat generation at the aluminum positive tab compared to the copper negative tab is due to the lower electric conductivity, which can be described in Equation (17). Whereas, the heat generation in the battery core is one order of magnitude smaller than the tabs, which is shown only 5C-rate in Fig. 5(a). As the discharge progresses, the battery core, the positive tab and the negative tab increase to high temperature as shown in Fig. 5(b).

$$Q_t = \frac{I^2}{A_{tab}\sigma_{tab}} \tag{17}$$

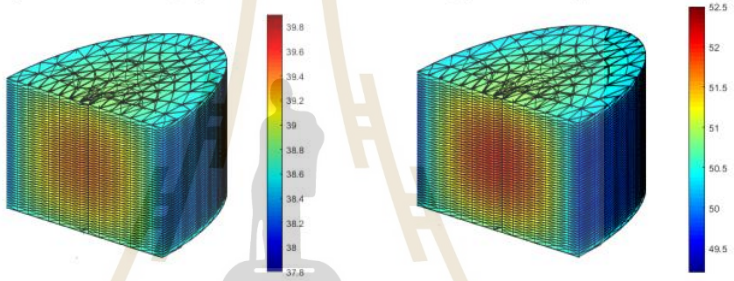
Fig. 6(a) shows the most heated region is located at the cell core. Thus, the region near of the cell core

is more heat than the rest. If comparison of area between the cell core and tab. Results show the temperature of the tab less than the cell core because thickness of tab less than the cell core in Fig. 5 under the same volume. In the end of discharge, the battery core, the positive tab and the negative tab increase to high temperature as shown in Fig. 6(b).



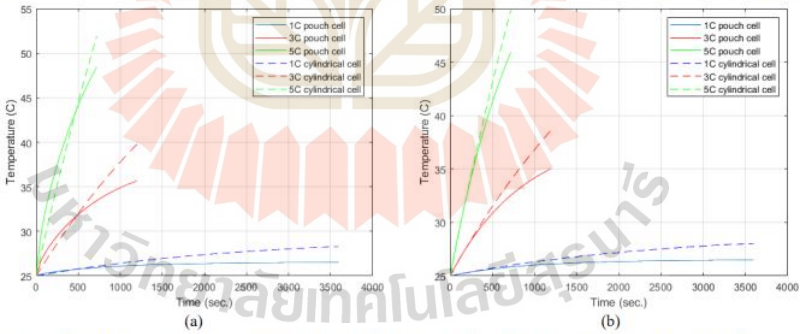
(a) (b)

Fig. 5. The temperature distribution (˚C) of the center section at 5C-rate: (a) 360 sec and (b) the end of discharge.



(a) (b)

Fig. 6. The temperature distribution (˚C) of cylindrical battery at 5C-rate: (a) 360 sec and (b) the end of discharge.



(a) (b)

Fig. 7. The temperature curve of batteries under different rates: (a) max. temp. of core and (b) ave. surf. temp.

Fig. 7. shows the comparison of temperature distribution between the pouch and cylindrical Li-ion battery under the same volume conditions. Fig. 7(a) show the maximum temperature within the cell core of various discharge current rate, while Fig. 7(b) show the average surface temperature of various discharge current rate. These data confirm that an increased discharge current rate from 1C to 5C results

show temperature increased. The temperature of the cylindrical Li-ion battery more than the pouch Li-ion battery, because the surface area of the cylindrical battery received heat transfer from the air less than the surface area of the pouch battery. And show the temperature results in Table 2.

Table 2. Maximum and the average surface temperature under different C-rates of the Li-ion battery

Temperature results (°C)	1C	3C	5C
Max. temp. of core (pouch)	26.52	35.69	48.45
Max. temp. of core (cylindrical)	28.31	39.80	51.92
Ave. surf. temp. (pouch)	26.48	35.05	46.12
Ave. surf. temp. (cylindrical)	28.05	38.66	49.89

6. Conclusion

This work study was to comparison of temperature distribution between the pouch and the cylindrical Li-ion battery by 3-D finite element method. It may be concluded from the present study that the discharge current, the cross-section tab area, the electric conductivity, and the surface area has a significant influence on heat generation of the Li-ion battery. The simulation results show that an increased discharge current rate from 1C to 5C results show temperature increased. An increase the surface area and the cross-section tab area under the same volume conditions, the simulation results in formation of temperature distribution decreased caused heat generation decrease. Thus, temperature of the pouch Li-ion battery less than the cylindrical Li-ion battery.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

Pao-la-or conducted the research; Somphong analyzed the data; Pao-la-or and Somphong wrote the paper; all authors had approved the final version.

Acknowledgments

This work was supported by the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

References

[1] Hu X, Jiang J, Cao D, Egardt B. Battery health prognosis for electric vehicles using sample entropy and sparse Bayesian predictive modeling. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2016; 63(4):2645–2656.
[2] Feng X, et al. Characterization of penetration induced thermal runaway propagation process within a large format lithium ion battery module. *Journal of Power Sources*, 2015; 275:261–273.
[3] Pao-La-Or P, Vacharakup S. Simulation of the 6-phase fractional pitch induction motors to reduce harmonic by using the 3-D finite element method. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2019; 4(8):580-587.
[4] Zhenpo W, Jun M, Lei Z. Finite element thermal model and simulation a cylindrical Li-ion battery. *IEEE Access*, 2017; 5:15372–15379.
[5] Bernardi D, et al. A general energy balance for battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985; 132(1):5–12.
[6] Shovon G, et al. Three-dimensional electro-thermal model of li-ion pouch cell: Analysis and comparison of cell design factors and model assumption. *Applied Thermal Engineering*, 2017; 126:796-808.
[7] Alexandros N, et al. Lithium ion batteries-development of advanced electrical equivalent circuit models for nickel manganese cobalt Lithium-Ion. *Energies*, 2016; 9(5):360-382.
[8] Guangming L, et al. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering diferrent influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014; 116:1001–1010.
[9] Williford R, Viswanathan V, Zhang J-G. Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium

ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2009; 189:101–107.

[10] Reynier Y, Yazami R, Fultz B. Thermodynamics of lithium intercalation into graphites and disordered carbons. *Journal of The Electrochemical Society*, 2014; 151:A422–426.

[11] Vilayanur V, et al. Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management. *Journal of Power Sources*, 2010; 195:3720–3729.

[12] Pao-La-Or P, Amornsawatwattanaa I. Analysis of water temperature distribution in various type of absorber in solar thermal by 3-D finite element method. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2019; 4(8):580-587.

[13] Pao-La-Or P, Bunmat A. Shielding of magnetic field effects operators working a power transmission lines using 3-D FEM. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2019; 5(8):779-785.

Copyright © 2020 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0), which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Praise Worthy Prize

International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 14, N. 6
ISSN 1974-9821 *December 2021*

Tab Design for Thermal Reduction in Pouch Lithium-Ion Battery by Using Finite Element Method

P. Pao-la-or, N. Somphong

Abstract – *Tabs are important sections of receiving and transmitting electrical power to various equipment. However, if the internal temperature of the battery is too high, the battery getting too hot may shorten the battery life and lose its original performance. Therefore, to troubleshoot this device from overheating, there is necessary to design the suitable tabs. In this work, the developed finite element method is employed to simulate the temperature distribution of 3.65 V/20 Ah pouch battery at the C-rate of 1C, 3C, and 5C. The simulated results appear that a significant heat accumulation at the positive tab of Li-ion battery will occur when the highest discharge rate of 5C is conducted. Also, the high rate of this discharge makes the cell core of battery have a higher temperature as well. Therefore, the thermal behavior is further analyzed by adjusting the sizes of tabs, i.e., height, thickness, and width. As a result of size modifications, a reduction in the heat deposition and current density are observed. In addition, the received results also show that the tab with dimensions of 20 mm × 0.35 mm × 54 mm (height, thickness, and width, respectively) is the suitable size for diminishing the average temperature of the tab and cell core as well as increasing a distribution to be uniform. Regarding the temperature change, the sizes mentioned above can drop its temperature by 6.68 °C for tab and 2.03 °C for cell core as compared to the original case.* ***Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.***

Keywords: *Lithium-Ion Battery, Tab Design, Temperature Distribution, Finite Element Method, Simulation*

Nomenclature

A_{tab}	Cross section tab area [m^2]
c	Specific heat capacity [J/kg °C]
c_{cell}	Specific heat capacity of the cell core [J/kg °C]
F	Faraday's constant [c/mol]
h	Heat convection coefficient [W/m^2 °C]
h_{core}	Height of cell core [mm]
h_{tab}	Height of tab [mm]
I	Battery operating current [A]
k	Thermal conductivity coefficient [W/m °C]
k_p	Average thermal conductivity coefficient in parallel [W/m °C]
k_s	Average thermal conductivity coefficient in series [W/m °C]
L_{core}	Thickness of cell core [mm]
L_{tab}	Thickness of tab [mm]
m	Weight [kg]
N	Shape function
n	Charge number of electrons
q	Heat generation [W/m^3]
R	Residual function
R_{in}	Internal resistance [Ω]
T	Temperature [°C]
$\overline{T}$	Average temperature [°C]
T_0	Initial temperature [°C]
T_{amb}	Ambient temperature [°C]
t	Time [s]
Δt	Stepping time [s]
ΔS	Entropy change [J/mol °C]
U	Cell potential [V]
U^o	Open circuit potential [V]
V	Volume of the element [m^3]
V_{cell}	Volume of the cell core [m^3]
v	Volume of each cell core element [m^3]
w_{core}	Width of cell core [mm]
w_{gap}	Distance between the edge of tab and cell core [mm]
w_{tab}	Width of tab [mm]
σ_{tab}	Electrical conductivity [S/m]
ρ	Mass density [kg/m^3]
ρ_{cell}	Mass density of the cell core [kg/m^3]

I. Introduction

Generally, the advantage of Li-ion batteries is that this type of battery can supply and store more energy than the others (e.g., lead-acid, Ni-Cd, and Ni-MH Battery) both volumetric and mass [1]. Nevertheless, most of the problems are that the battery life and performance tend to deteriorate since the heat generation and temperature of battery are too high or too low. For instance, there are risks of occurring thermal runaway when the temperature is above 55 °C and the loss of energy may be happened when the temperature is 0 °C or lower [2]-[5]. Therefore,

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

https://doi.org/10.15866/iremos.v14i6.21298

the management and control systems of temperature in lithium-based batteries to be in appropriate range are essential. The thermal management system can be divided into 2 main types [6], [7] including 1) Cooling system such as refrigerant and air that can diminish the battery temperature, and 2) Internal structure modification of a lithium-ion battery - that is the change in sizes or chemical coating of the tabs. Samba et al. [8] studied about the modification of tab width. The gained result shows that the weight and temperature of Li-ion battery is decreased. In addition, tabs also have an important function of allowing the electrons to flow from the oxidation half cell (anode) to the reduction half cell (cathode) when the discharge occurs [9]. Thus, an amount of heat produced at this region is only caused by electric current flows through the metallic conductor. Please note that if the temperature of tabs is too high, this can cause the battery core to overheat as well. As a result, to protect and troubleshoot such a problem, the optimization of tab dimensions is crucial. Consequently, in this work, the chosen method for enhancing thermal properties is the adjustment of tab sizes. Later, regarding the thermal model for lithium-ion batteries, this is initiated and developed by Bernardi et al. who apply a general energy balance to the model in which the thermal model that is established has described the heat generation mechanism of batteries in term of an electrochemical reaction [10]. According to previous literature, Jeon et al. [11] took such an electrochemical model to analyze the internal temperature of a cylindrical battery. Besides, Pao-la-or et al. [12] also used a model enhanced by Bernardi et al. to simulate and compare the temperature distribution of pouch and cylindrical batteries under the same volumes. The benefit of pouch type is that this kind has a greater the external surface area exposed to air than cylindrical type. As a result, the temperature in the case of Li-ion pouch batteries is lower. Zhang et al. [13] presented an electrochemical model for pouch batteries to proceed the analysis of the heat generation rate when the tab positions are altered.

The simulation results show that, although the maximum temperature on the surface of battery has slightly risen, but the symmetrical arrangement of tab also significantly improves the uniformity of temperature dissipation. Lee et al. [14] studied changing the position of tabs and cell core aspect ratio for large-format pouch lithium-ion battery. The obtained results appear that the proper placement of tabs by optimizing the cell core aspect ratio and tab attachment positions will diminish the difference in internal temperature since the internal resistance of the battery decreases. This also contributes to extending the lifetime of Li-ion batteries. Mei et al. [15] designed the dimensions of tabs for pouch-type batteries that involves increasing and decreasing the height, thickness, and width of the tab. The result of data analysis indicates that the battery produces a more uniform temperature distribution. Guo et al. [16] used a 3D electrochemical-thermal model for simulating a pouch-type battery, which has three cells that are connected in series by using the busbars as connectors.

The literature data implies that the region with the highest average temperature is at the middle cell when a discharge rate of 5C is conducted. In addition, it also shows that when all three cells reach the end of discharge, the core of the battery is the hottest place, followed by the positive tab and finally the negative tab. From the articles, these studies have demonstrated the application of thermal models of Bernardi as well as the influence of the tabs that affects the battery. As mentioned above, most articles focus on changing the position [13], [14] as well as increasing or decreasing the sizes of tabs [15] (i.e., height, thickness, and width), which impacts on the heat generation in lithium-ion batteries. However, engineering research does not pay much attention to the volumetric analysis of battery core. In fact, regarding the pouch battery, the volume of tabs can be changed by resizing the tab height and width. For the thickness, whether the alteration is an increase or decrease, in addition to causing the tabs change in the volume, this also changes the volume of battery core.

In this article, a 3.65V/20AH lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)/graphite pouch battery will be simulated and then validates the temperature distribution by MATLAB (ML) and SOLIDWORKS (SW) program. However, to run ML software for analyzing the temperature influence and thermal impact in Li-ion batteries at different C-rates, the most commonly used model of temperature dissipation that is derived from Bernardi et al., the developed 3D finite element equations, and finite element heat transfer code will be applied in this work. After that, the determination and study of tab dimensions including the height and width at a discharge rate of 5C will be conducted. Please note that the tab thickness is defined as a constant and the size of designated tabs must be the same volume as the original case. Finally, the sizes of tab designed for each case are compared to find the proper tab dimension of lithium-ion battery. However, the method shown is an alternative way to reduce the heat of battery. This is because there are other approaches such as changing the types of active materials coating on the electric current collector that manufacturers must consider for maximizing the lifespan and performance of batteries.

II. Thermal Model

Based on assumptions, the energy conservation equation is shown as 3D mathematical model of the temperature distribution under the Cartesian coordinate as follows:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \qquad (1)$$

Due to the pouch Li-ion battery that consists of the battery core, the positive and negative tab. Regarding the cell core of battery, this is made up of several thin layers using a different material [16]. However, it takes a long

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

time to calculate and build such multiple layer model.

Thus, in order to simplify the calculation for simulating, the average density and the average specific heat capacity of pouch Li-Ion battery must be calculated as seen in the following equations [17]:

$$\rho_{cell} = \frac{\sum_i m_i}{\sum_i v_i} \quad \text{and} \quad c_{cell} = \frac{\sum_i \rho_i c_i v_i}{\sum_i m_i} \tag{2}$$

Another important parameter is the thermal conductivity coefficient of battery which can be divided into two calculation methods including series and parallel that is calculates from equivalent thermal conductivity. Such methods are represented as the equation below [17]:

$$k_s = \frac{V_{cell}}{\sum_i \frac{v_i}{k_i}} \quad \text{and} \quad k_p = \frac{\sum_i k_i v_i}{V_{cell}} \tag{3}$$

During charge or discharge cycle, the heat is generated by the current I flowing through cell as well as the entropy change of the electrode active material that is caused by the electrochemical reaction, which is expressed in Eq. (4) [10], [18]:

$$q = q_j + q_s + q_t = \\ = \frac{I}{V_{cell}}\left(\left(U^o - U\right) - T\frac{\partial U^o}{\partial T}\right) + \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2 \tag{4}$$

The first term is the heat generated from joule heating which can be described as the equation below:

$$q_j = \frac{I}{V_{cell}}\left(U^o - U\right) = \frac{I^2 R_{in}}{V_{cell}} \tag{5}$$

The internal resistance (R_{in}) during charge or discharge can be determined by Eq. (6) [19], [20]:

$$R_{in} = \frac{\left(U^o - U\right)}{I} \tag{6}$$

For q_s, the generation of this parameter which is occurred by the entropy change can be provided in Eq. (7) [21]:

$$q_s = \frac{I}{V_{cell}}\left(-T\frac{\partial U^o}{\partial T}\right) = -T\Delta S\frac{I}{nFV_{cell}} \tag{7}$$

Typically, the materials for making the cathode and anode used in Li-ion battery are respectively lithium metal oxide and graphite. Regarding the chemical reaction showing the ion exchange between lithium and electron, these are represented in the following reactions.

At positive electrode:

$$MO_2(s) + Li^+(aq) + e^- \underset{\text{charge}}{\overset{\text{discharge}}{\rightleftharpoons}} LiMO_2(s)$$

At negative electrode:

$$LiC_6(s) \underset{\text{charge}}{\overset{\text{discharge}}{\rightleftharpoons}} 6C(s) + Li^+(aq) + e$$

Total reaction:

$$MO_2(s) + LiC_6(s) \underset{\text{charge}}{\overset{\text{discharge}}{\rightleftharpoons}} LiMO_2(s) + 6C(s)$$

From Eq. (7), n is the charge number of electrons participating in the reaction above and is equal to 1. The entropy changes are taken place by redox reaction, which is the charge/discharge reaction for electrodes in full cell.

Therefore, the total change of entropy for cells during charge/discharge can be calculated as follows [22]:

$$\Delta S = \Delta S_c + \Delta S_a \tag{8}$$

In the tab domains, the heat is solely produced by ohmic heating and was calculated in Eq. (9):

$$q_t = \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2 \tag{9}$$

The mathematical model received from this section will be used in the next section.

III. 3D-Finite Element Method

Finite element method is the most efficient numerical technique for solving the partial differential equations (PDE) such as the heat transfer problem, electromagnetic problem and so on. As mentioned above in Section II, to calculate the temperature by the finite element method, a mathematical model as seen in Eq. (1) must be used, which composes of the following these steps. First, this study uses 3.65V/20Ah LiNiMnCoO$_2$ (NMC)/Graphite ePLB C020 pouch battery that is provided by EiG Corporation (South Korea) [18]. In battery core, there are 18 and 19 layers of positive and negative electrode plate, respectively. Moreover, each layer consists of sub-layers as shown in Fig. 1. Then, the free tetrahedral method will be adapted to mesh. The obtained grid after meshing is shown in Fig. 2. After that, the creating of finite element method equation has applied the method of weighted residual by using Galerkin approach and the weighting function is defined like the shape functions. According to this method, the temperature result can be displayed as follows [23]:

$$T(x,y,z,t) = T_i N_i + T_j N_j + T_k N_k + T_l N_l \tag{10}$$

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

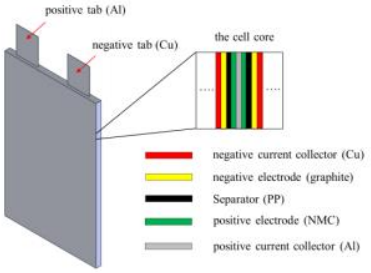


Fig. 1. The model of pouch cell and the sub-layers inside the battery

Fig. 2. The grid of battery

In (10), T_i, T_j, T_k and T_l are the temperature and N_i, N_j, N_k and N_l are the shape function of node i, j, k, and l, respectively. To find shape function, Eq. (11) is therefore given as follows:

$$N_f = \frac{1}{6V}\left(a_f + b_f x + c_f y + d_f z\right) \tag{11}$$

where f is node i, j, k, and l, respectively and V is the volume of tetrahedron element, which can be received from the determinants of the coefficient in accordance with Eq. (12):

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \tag{12}$$

From Eq. (10), the position coefficient can be obtained from the equations below:

$$a_i = x_l\left(y_j z_k - y_k z_j\right) + x_k\left(y_l z_j - y_j z_l\right) + x_j\left(y_k z_l - y_l z_k\right)$$
$$a_j = x_i\left(y_k z_i - y_i z_k\right) + x_k\left(y_i z_l - y_l z_i\right) + x_i\left(y_l z_k - y_k z_l\right)$$
$$a_k = x_l\left(y_i z_j - y_j z_i\right) + x_j\left(y_l z_i - y_i z_l\right) + x_i\left(y_j z_l - y_l z_j\right)$$
$$a_l = x_k\left(y_j z_i - y_i z_j\right) + x_j\left(y_i z_k - y_k z_i\right) + x_i\left(y_k z_j - y_j z_k\right)$$

$$b_i = y_l\left(z_k - z_j\right) + y_k\left(z_j - z_l\right) + y_j\left(z_l - z_k\right)$$
$$b_j = y_l\left(z_i - z_k\right) + y_i\left(z_k - z_l\right) + y_k\left(z_l - z_i\right)$$
$$b_k = y_l\left(z_j - z_i\right) + y_j\left(z_i - z_l\right) + y_i\left(z_l - z_j\right)$$
$$b_l = y_k\left(z_i - z_j\right) + y_i\left(z_j - z_k\right) + y_j\left(z_k - z_i\right)$$

$$c_i = x_l\left(z_j - z_k\right) + x_j\left(z_k - z_l\right) + x_k\left(z_l - z_j\right)$$
$$c_j = x_l\left(z_k - z_i\right) + x_k\left(z_i - z_l\right) + x_i\left(z_l - z_k\right)$$
$$c_k = x_l\left(z_i - z_j\right) + x_i\left(z_j - z_l\right) + x_j\left(z_l - z_i\right)$$
$$c_l = x_k\left(z_j - z_i\right) + x_j\left(z_i - z_k\right) + x_i\left(z_k - z_j\right)$$

$$d_i = x_l\left(y_k - y_j\right) + x_k\left(y_j - y_l\right) + x_j\left(y_l - y_k\right)$$
$$d_j = x_l\left(y_i - y_k\right) + x_i\left(y_k - y_l\right) + x_k\left(y_l - y_i\right)$$
$$d_k = x_l\left(y_j - y_i\right) + x_j\left(y_i - y_l\right) + x_i\left(y_l - y_j\right)$$
$$d_l = x_k\left(y_i - y_j\right) + x_i\left(y_j - y_k\right) + x_j\left(y_k - y_i\right)$$

Later, each element of the equation will be replaced by the approximate results in Eq. (1) which is equal to the residual function in Eq. (13):

$$R = \rho c\frac{\partial T}{\partial t} - \left(k_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) - q \tag{13}$$

For the 2nd partial differential equation, integration by parts is therefore made by using the Gauss's theorem. When such theorem is completed, the equation will be rearranged and performed under the domain V as follows:

$$\begin{aligned} &\int_V N_f \rho c\frac{\partial T}{\partial t}dV + \\ &+\int_V\left(k_x\frac{\partial N_f}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x} + k_y\frac{\partial N_f}{\partial y}\frac{\partial T}{\partial y} + k_z\frac{\partial N_f}{\partial z}\frac{\partial T}{\partial z}\right)dV \\ &+\int_\Gamma N_f hT d\Gamma + \int_V N_f q_s T dV = \\ &= \int_\Gamma N_f hT_\infty d\Gamma + \int_V N_f q_j dV + \int_V N_f q_t dV \end{aligned} \tag{14}$$

When the factorial formula as seen in Eq. (14) is used [24], each element of the equation will be written in 4×4 matrix form which can be divided into four parts in accordance with Eq. (15)-(18):

$$[C]_{4x4} = \rho c\frac{V}{20}\begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$[K_c]_{4x4} = \\ = \frac{1}{36V}\left(k_x\left[b_j b_k\right] + k_y\left[c_j c_k\right] + k_z\left[d_j d_k\right]\right) \tag{16}$$

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

$$[K_h + K_s]_{4x4} = \left(h + \Delta S \frac{I}{nFV_{cell}}\right)\frac{V}{20}\begin{bmatrix}2&1&1&1\\1&2&1&1\\1&1&2&1\\1&1&1&2\end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\{q\}_{4x1} = \{q_h + q_j + q_t\}_{4x1} = \left(hT_{amb} + \frac{I^2R_{in}}{V_{cell}} + \frac{1}{\sigma_{tab}}\left(\frac{I}{A_{tab}}\right)^2\right)\frac{V}{4}\begin{bmatrix}1\\1\\1\\1\end{bmatrix} \quad (18)$$

where $[C]$ is the heat capacity matrix, $[K_c]$, $[K_h]$ and $[K_s]$ are the thermal conductivity, heat convection and entropy change matrix, respectively. For the last matrix, $\{q\}$ is the load vector for heat generation. Then, the first term of Eq. (14) $\frac{\partial T}{\partial t}$ or $\{\dot{T}\}$ represents the temperature distribution depending on time. Thus, the backward difference method will be applied as shown in Eq. (19) [25]:

$$\{\dot{T}\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^{t}}{\Delta t} \quad (19)$$

Next, the heat convection boundary conditions will be brought to take into account. According to the Newton's law of cooling, the heat convection coefficient (h) and initial temperature (T_0) are set as 7.17 W/m^2 °C and 25 °C, respectively [26]. Please note that T_0 is determined to be equal to ambient temperature (T_{amb}=25 °C) in this work. Lastly, Eq. (14)-(19), the geometrical (Fig. 3) and parameter in Table I will be used for simulating in order to find the temperature results [18], [27].

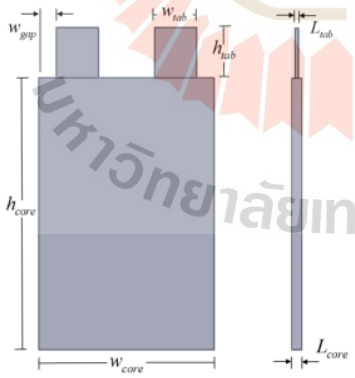


Fig. 3. Details of geometrical parameters of battery

TABLE I
MATERIAL AND GEOMETRIC PROPERTIES OF THE LI-ION BATTERY

Parameters	Symbols	Materials	Values
Mass Density (kg/m^3)	ρ	Aluminum	2,702
		NMC	2,895
		Copper	8,933
		Graphite	1,555
		PP	1,017
Thermal Conductivity (W/m·°C)	k	Aluminum	238
		NMC	1.58
		Copper	398
		Graphite	1.04
		PP	0.34
Specific Heat Capacity (J/kg·°C)	c	Aluminum	903
		NMC	1,270
		Copper	385
		Graphite	1,437
		PP	1,978
Electrical Conductivity (MS/m)	σ	Aluminum	37.8
		Copper	59.6
Internal Thickness of Cell Core (μm)	L	Aluminum	21
		NMC	70
		Copper	12
		Graphite	79
		PP	25
Details of Battery (mm)	w_{tab}	-	30
	L_{tab}		0.35
	h_{tab}		36
	w_{core}		125
	L_{core}		7.078
	h_{core}		195
	w_{gap}		12.5

In addition, the entropy changes of $LiNiMnCoO_2$ (NMC) and LiC_6 (graphite) as illustrated in Fig. 4 are utilized in this study as well [11], [22].

IV. Temperature Distribution

As mentioned previously, the finite element method will be used to write the code with MATLAB program in order to compute and analyze the temperature distribution and thermal influence inside the pouch Li-ion battery from beginning toward the end of discharge. Besides, to verify the validity of the self-developed program (ML), a packaged or ready-made program (SW) is also used to authenticate the simulation results.

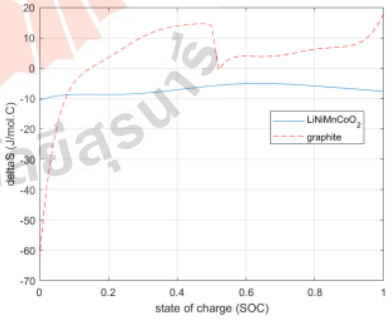
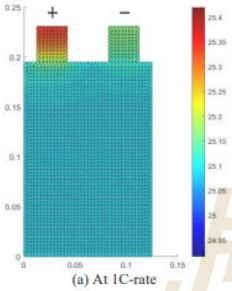


Fig. 4. The entropy change (J/mol °C) of the cathode and anode material under the State of Charge (SOC)

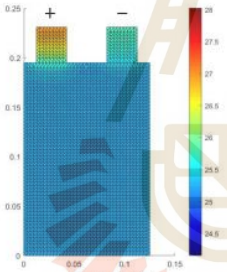
Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

Regarding the C-rates, three distinct discharge rates including 1C, 3C, and 5C will be employed for this task. Nevertheless, since these three C-rates are dissimilar, the discharge durations are not the same. Thus, these three periods have been redefined in terms of Depth pf Discharge (DOD), where DOD is the ratio of the used capacity to the total amount of storage in Li-ion battery.

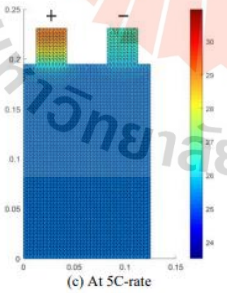
The simulation results of each rate will display the distribution of temperature on the surface of battery under the ambient temperature as illustrated in Figs. 5, 6 and 7. Then, examples of comparison results between ML and SW software at the end of discharge (100% DOD), and a comparison of simulation results of all three discharge rates will be explained and displayed in this work.



(a) At 1C-rate

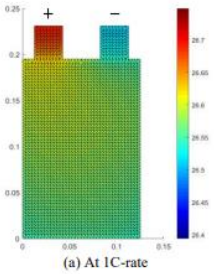


(b) At 3C-rate

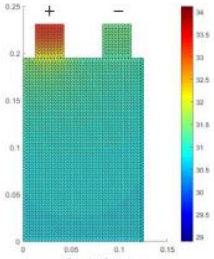


(c) At 5C-rate

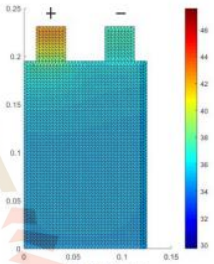
Figs. 5. The temperature distribution (°C) of battery under different discharge rate at 1% DOD



(a) At 1C-rate



(b) At 3C-rate

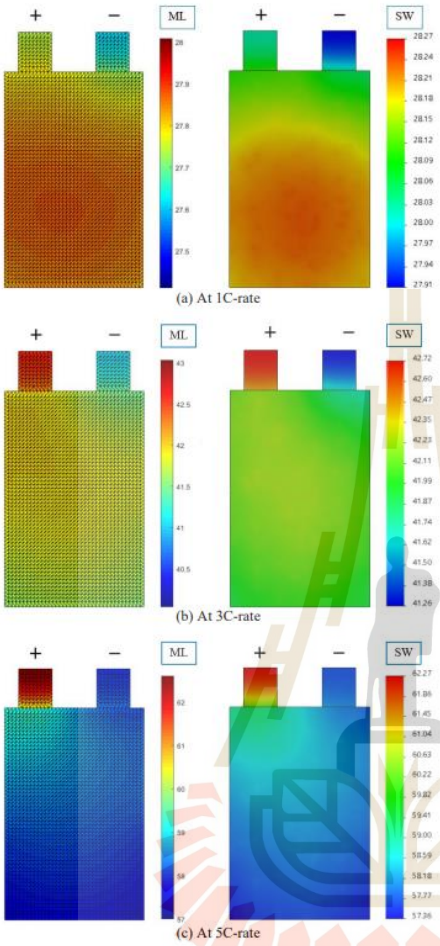


(c) At 5C-rate

Figs. 6. The temperature distribution (°C) of battery under different discharge rate at 25% DOD

In accordance with Figures 5, upon starting to discharge with all discharge rate, the results show that the positive tab will be the first point having the highest temperature. The effect of heat generation at this spot causes the movement of heat according to Fourier's first law of heat conduction - that is from a region of high temperature (oxidizing electrode) to a region of low temperature (cell core). The secondary hotspot is the negative tab, which has the reason for the heat transfer as same as the positive electrode. Thus, from all of the above, the spot with the least amount of heat, like the battery core, has the maximum temperature near the positive tab as compared to the other regions. However, when the discharge reaches 1/4 of total battery capacity with a C-rate of 1C, the temperature of cell core will begin to be greater than that of negative tab.

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved



Figs. 7. Comparison of temperature distribution (°C) between ML and SW software under different discharge rate at 100% DOD

This is because the amount of heat produced from the battery core is larger than from the negative electrode. Even so, the difference in temperature is still very small as exhibited in Fig. 6(a). Regarding the battery in discharge mode, the temperature is directly proportional to the discharge rate. In this study, according to simulation results at a discharge rate of 5C, the temperature at the positive tab increases the most rapidly and also has the highest value as compared to other rates.

The reason is that the thermal quantities generated from the tab (2.40 MW/m^3) is caused by the squared amount of electric current flowing through the tabs (Eq. (9)). Next, the area with the second highest temperature is at the negative tab (1.52 MW/m^3) since the heat generation (or ohmic heating) of this tab (Cu) has a higher electrical conductivity than the positive tab (Al). Lastly, the cell core of battery is area that has the least amount of heat produced (0.17 MW/m^3). Figs. 6 are the simulation results, which shows the temperature distribution for each with a DOD of 25% in Li-ion pouch battery. After that, at the discharge rate of 1C with a 100% DOD, the maximum heat generation occurred at the cell core of battery implied that the hotspot located at the positive electrode when the percentage of DOD is originally 25% is moved to the battery core as seen in Fig. 7(a). This is because the heat accumulation area and heat capacity properties of both tabs are less than that of the core of battery (c_{cell}=1,225.36 J/kg °C). Please note that the values of heat capacities for reducing and oxidizing electrode can be seen in Table I and the approximate value of the battery core is computed from Eq. (2). However, for 3C and 5C discharge rate, the hotspot of cell core will be placed at the upper center and will cause the battery core to be more temperature than the negative tab. In addition to the reasons as in the case of 1C, there is also the influence of high current density near the positive tab and the internal resistance of cell core that is directly proportional to the temperature [20].

As a result, the battery temperature increases even further. In addition, the temperature at every point inside the battery including the cell core, and the positive and negative tab will increase over time as shown in Figs. 7.

In accordance to Figures 7(a)-7(c), the simulation results obtained from both software show a slight difference in the temperature distribution. This is because the tools for simulation (i.e., ML and SW) may not use the same methods for generating the finite element equations. Such approaches may be variational approach, weight residual, etc. Also, there are the solutions of transient heat transfer problems such as Galerkin, forward and backward difference methods and so on [28], [29]. As exhibited in Figure 8, the average temperature of the cell core received from the simulation of ML and SW program will be investigated and then compared to each other under natural convection that is described by Newton's law of cooling.

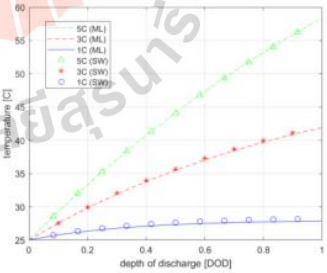


Fig. 8. The relation between average temperature (°C) and Depth of Discharge (DOD) of both programs under different discharge rates

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

According to data analysis, the average temperature difference between the ML and SW simulation tools at discharge rates of 1C, 3C, and 5C is at 0.25 °C, 0.18 °C, and 0.06 °C, respectively. The values of mean, maximum, minimum temperatures for each C-rate are expressed in Table II. From the simulation with SW program, the operation results reveal the disadvantages of the ready-made software as follows: 1) Unable to take the values of electric current into the program when entering the discharge stage, and 2) The input data such as heat generation is required to be calculated before running the program. Therefore, ML program with self-written code will be used to simulate the temperature distribution in this work. As mentioned in Section I, it found that the reduction of battery life and performance as well as the occurrence of thermal runaway, contributing to fire and explosion are caused by the high temperature of Li-ion battery. Consequently, to prevent the battery temperature from being too high and the occurrence of thermal behavior, the reduction and maintenance of battery temperature (especially the positive tab and cell core) to be consistent is necessary by varying sizes of tabs at high discharge rate, which will be described in the next section.

V. Comparison Results of Each Case

Referring to the previous context, owing to the effect of hotspot on the tab and battery core, the resizing to solve this issue needs to be conducted. However, the modification of tab sizes by changing the tab height and width does not impact on the volume of a battery core, except for the tab thickness that can change the battery's volume. Therefore, the determination of tab size without changing tab thickness and the analysis of temperature distribution in lithium-based battery under the same volume will be processed in this section for performance improvement of battery. To find the tab dimension that is optimal for the pouch Li-ion battery, the parameters must be set as seen in Table III. According to Table III, these 5 cases are simulated in this study. After that, the selected case from all 4 cases (namely, Case I, II, III, and IV) will be compared with prototype case for analyzing the thermal dissipation at 5C discharge rate and finding the most suitable tab.

TABLE II
COMPARISON OF TEMPERATURE DISTRIBUTION BETWEEN MATLAB AND SOLIDWORKS PROGRAM AT THE END OF DISCHARGE

	Parameters	1C	3C	5C
ML	Max. temp. (°C)	27.97	42.53	62.49
	Min. temp. (°C)	27.67	41.03	57.43
	Avg. temp. of cell core (°C)	27.85	41.91	58.42
SW	Max. temp. (°C)	28.27	42.71	62.26
	Min. temp. (°C)	27.90	41.25	57.36
	Avg. temp. of cell core (°C)	28.10	42.09	58.48

TABLE III
THE VALUES OF TAB-SIZE FOR SIMULATION

Parameters	Original	Case I	Case II	Case III	Case IV
Height (mm)	36	30	27	24	20
Thickness (mm)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Width (mm)	30	36	40	45	54

The simulated results of each case are represented in Figs. 9. Based on the simulations, the cross-section area of tab is increased because of the raised width. As a result of this situation, the ohmic heating is diminished. In term of height, although the tab heigh does not affect this aspect, but it will rise the heat accumulation area of tab. Also, due to the good thermal conductivity of metal (namely, Al and Cu), the heat transfer is also enhanced.

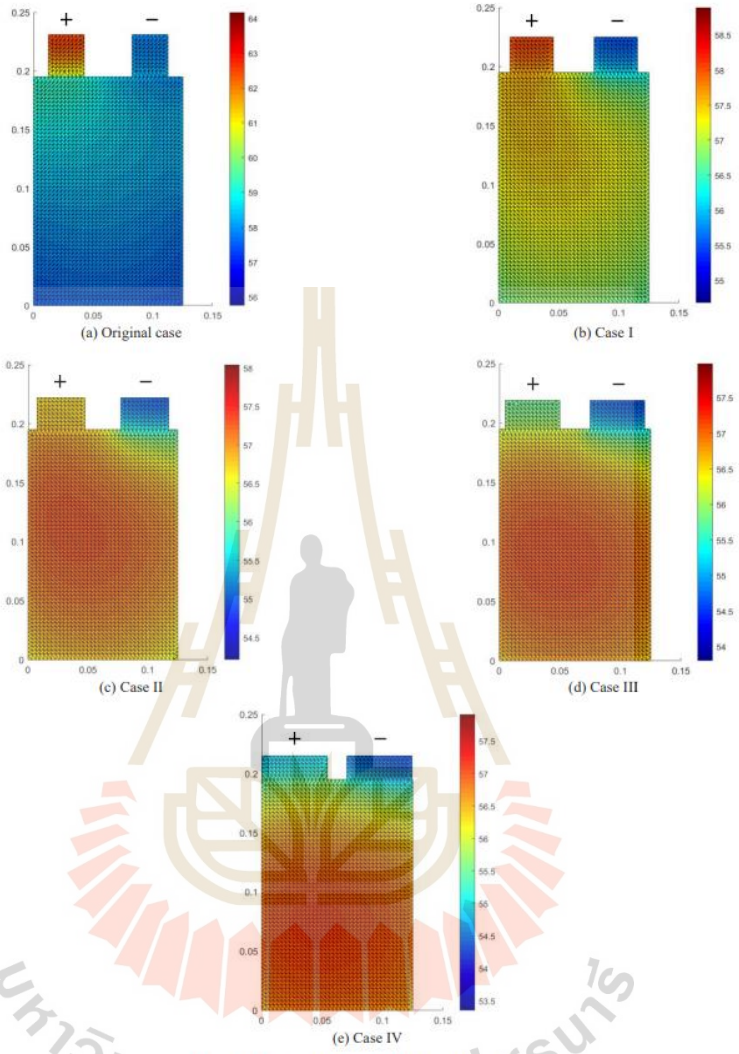
Hence, in case the tab height is reduced. This results in less heat generation on the tab (q_t) and less heat transfer from the tab to cell core of battery. The average temperature of tab and cell core in lithium-based battery from original case to Case IV is also steadily decreased.

In addition to changes in the sizes that impacts on the temperature, the temperature of standard deviation (TSD) is also significant that indicates the fields of different intensity of temperature. If this value approaches zero, a uniform temperature distribution is occurred. Also, the hotspot in Li-ion battery must be processed. Eq. (20) is used for computing this value.

$$TSD = \sqrt{\frac{\left(T_n - \overline{T}\right)}{n}} \tag{20}$$

From Table IV, the TSD value of Case I and II is equal to 0.27 and closest to zero. For Case III and IV, both cases have a higher value of TSD – that are 0.32 and 0.42, respectively. The parameters that cause this value to differ are the width and height of the tab. Both variables will change in the ohmic heating. As a result, the hotspot of all 4 cases changes accordingly. This can be seen in Figs. 9, which represent the simulation results of each case. In accordance with Fig. 9(b), the hotspot of Case I is located at the positive tab that resembles the original case. This is because the results of previously mentioned temperature analysis cause the decrease in heat generation of tab for Case I and also make the tab temperature start to be similar to the battery core. This results in the reduction of TSD value. However, when the heat generation of tab is reduced by increasing the width and decreasing the height of tab. In order to words, Case II is conducted as illustrated in Fig. 9(c). As a result of such a situation, the hotspot starts to move toward the cell core of battery. That means the cell core has a higher heat generation than the tab. In addition, if the thermal quantity occurred at the tab is further reduced (namely, Case III and IV), the temperature difference will be greater at the battery core. This contributes to the motion of hotspot from higher to a lower position of battery core. Therefore, this is the reason of raising TSD value in Case III and IV. Nevertheless, these 4 cases (i.e., Case I, II, III, and IV) still have a better temperature distribution than the original case is. From all of the above, increasing the width and the decreasing height on the tab reduce the temperature of lithium-ion battery and also cause a change in the hotspot within the cell core. This can be observed from the simulation results as well as TSD value.

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved



Figs. 9. The temperature distribution (°C) of pouch battery under the same volume at the end of discharge

TABLE IV
THE AVERAGE TEMPERATURE AND TSD VALUES OF EACH CASE

Parameters	Original	Case I	Case II	Case III	Case IV
Average temp. of cell core (°C)	58.42	57.01	56.74	56.60	56.39
TSD of cell core	0.44	0.27	0.27	0.32	0.42

Nonetheless, the temperature is another important factor that must be taken into account too. As seen in Case IV, although the TSD value for this case is high compared to Case I, II, and III, but the hottest point and average temperature of battery is the lowest. As mentioned above, to improve the battery life and performance, Case IV is therefore the suitable tab in this study. Please note that the temperature difference between Case IV and original case for the positive tab and cell core in lithium-based battery is at 6.68 °C and 2.03 °C, respectively.

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

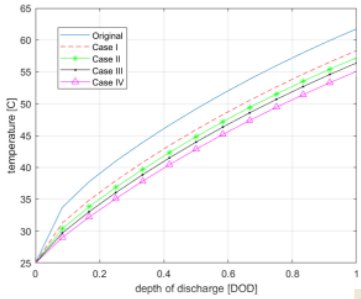


Fig. 10. The relation between average temperature (°C) of positive tab and Depth of Discharge (DOD) at 5C discharge rate

VI. Conclusion

In this work, the 2nd PDE of heat transfer problem is simulated by finite element method to compute the distribution of temperature in the NMC pouch battery under different C-rates. The obtained results shows that the positive tab a place that has a higher temperature than the others when the discharge rate is higher. This is because the quantity of heat taken place on the tab (or ohmic heating) is large, which lead to a difference in temperature within the battery. According to the thermal influence of aforementioned tab, the battery tabs are therefore varied in height and width while the thickness is fixed at 0.35 mm. This will be split the simulations of these various sizes into 4 cases. Then, the best performing case from the 4 cases will be compared with original case in order to determine the suitability for extending the performance and cycle life of lithium-ion battery.

From the simulation results, the comparative analysis of each case appears that Case IV has a large TSD value compared to Case I, II, and III. However, since the current density and heat accumulation area of the tab is reduced – that means the average and the maximum temperature of battery in this case is lower than the other cases (i.e., Case I, II, III, and original case). Consequently, the most appropriate tab in this study is Case III, which has a height of 20 mm and a width of 54 mm. In the present study, the author has only studied the reduction of battery temperature by modifying the tab sizes at constant discharge rate.

However, in reality, the operation of battery is not just discharged with steady current. For instance, lithium-ion battery utilization in electric vehicle – owing to the acceleration and deceleration behavior of vehicles, the discharges in different types occur. Consequently, the author proposes that the temperature distribution of battery may be further analyzed by the other forms of discharges, e.g., pulse, exponential, or the introduction of electric vehicle discharging models. This leads to a design that makes the battery more efficient.

Acknowledgements

This work is supported by the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

References

[1] J.M. Tarascon, and M. Armand, Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries, *Nature,* Vol. 414:359-367, November 2001.

[2] N. Sato, and K. Yagi, Thermal Behavior Analysis of Nickel/Metal Hydride Batteries of Electric Vehicles, *JSAE Review,* Vol. 21:205-211, April 2000.

[3] X. Feng, J. Sun, M. Ouyang, F. Wang, X. He, L. Lu, and H. Peng, Characterization of Penetration Induced Thermal Runaway Propagation Process within a Large Format Lithium Ion Battery Module, *Journal of Power Sources,* Vol. 275:261-273, February 2015.

[4] X. Feng, X. He, M. Ouyang, L. Lu, P. Wu, C. Kulp, S. Prasser, Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25Ah $LiNi_xCo_yMn_zO_2$ large format lithium ion battery, *Applied Energy,* Volume 154, 2015, Pages 74-91. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.118

[5] C.Y. Wang, G. Zhang, S. Ge, T. Xu, Y. Ji, X.D. Yang, and Y. Leng, Lithium-Ion Battery Structure that Self-Heats at Low Temperatures, *Nature,* Vol. 529:515-518, January 2016.

[6] P. Taheri, M. Yazdanpour, and M. Bahrami, Transient Three-Dimensional Thermal Model for Batteries with Thin Electrodes, *Journal of Power Sources,* Vol. 243:280-289, December 2013.

[7] S. Du, M. Ji, Y. Cheng, Y. Tang, H. Zhang, L. Ai, K. Zhang, and Y. Lai, Study on the Thermal Behaviors of Power Lithium Iron Phosphate (LFP) Aluminum-Laminated Battery with Different Tab Configurations, *International Journal of Thermal Sciences,* Vol. 89:327-336, March 2015.

[8] A. Samba, N. Omar, H. Gualous, O. Capron, P.V. Bossche, and J.V. Mierlo, Impact of Tab Location on Large Format Lithium-Ion Pouch Cell Based on Fully Coupled Tree-Dimensional Electrochemical-Thermal Modeling, *Electrochimica Acta,* Vol. 147:319-329, November 2014.

[9] C. Li, H. Zhang, R. Zhang, Y. Lin, and H. Fang, On the Characteristics Analysis and Tab Design of an 18650 Type Cylindrical $LiFePO_4$ Battery, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 182:116144, January 2021.

[10] D. Bernardi, E. Pawlikowski, and J. Newman, A General Energy Balance for Battery Systems, *Journal of the Electrochemical Society,* Vol. 132: 5-12, January 1985.

[11] D.H. Jeon, and S.M. Baek, Thermal Modeling of Cylindrical Lithium Ion Battery During Discharge Cycle, *Energy Conversion and Management,* Vol. 52:2973-2981, August 2011.

[12] P. Pao-la-or, and N. Somphong, Comparison and Analysis of Temperature Distribution in Pouch and Cylindrical Li-Ion Battery by Finite Element Thermal Model, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy,* Vol. 9:915-923, September 2020.

[13] X. Zhang, X. Chang, Y. Shen, and Xiang, Electrochemical-Electrical-Thermal Modeling of a Pouch-Type Lithium Ion Battery: An Application to optimize Temperature Distribution, *Journal of Energy Storage,* Vol. 11:249-257, June 2017.

[14] J.J. Lee, J.S. Kem, D.C. Lee, H. Chang, and C.W. Kim, Design Optimization of Tab Attachment Ratio to Minimize Temperature Difference in 45-Ah LFP Large-Format Lithium-Ion pouch Cells, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 182:116143, January 2021.

[15] W. Mei, H. Chen, J. Sun, and Q. Wang, Numerical Study on Tab Dimension of Lithium-Ion Battery from the Thermal Safety Perspective, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 142:148-165, September 2018.

[16] M. Guo, G.H. Kim, and R.E. White, A Three-Dimensional Multi-Physics Model for a Li-Ion Battery, *Journal of Power Sources,* Vol. 240:80-94, October 2013.

[17] Z. Wang, J. Ma, and L. Zhang, Finite Element Thermal Model and Simulation for a Cylindrical Li-Ion Battery, *IEEE Access,* Vol. 5:15372-15379, July 2017.

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

[18] S. Goutam, A. Nikolian, J. Jaguemont, J. Smekens, N, Omar, P.V.D. Bossche, and J.V. Mierlo, Three-Dimensional Electro-Thermal Model of Li-Ion Pouch Cell: Analysis and Comparison of Cell Design Factors and Model Assumptions, *Applied Thermal Engineering,* Vol. 126:796-808, November 2017.
[19] G. Liu, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, and X. Han, Analysis of the Heat Generation of Lithium-Ion Battery During Charging and Discharging Considering Different Influencing Factors, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,* Vol. 116:1001-1010, January 2014.
[20] A. Nikolian, Y. Firouz, R. Gopalakrishnan, J.M. Timmermans, N. Omar, P.V.D. Bossche, and J.V. Mierlo, Lithium Ion Batteries-Development of Advanced Electrical Equivalent Circuit Models for Nickel Manganese Cobalt Lithium-Ion, *Energies,* Vol. 9:360-382, May 2016.
[21] V.G. Choudhari, A.S. Dhoble, and T.M. Sathe, A Review on Effect of Heat Generation and Various Thermal Management Systems for Lithium Ion Battery Used for Electric Vehicle, *Journal of Energy Storage,* Vol. 32:101709, December 2020.
[22] V.V. Viswanathan, D. Choi, D. Wang, W. Xu, S. Towne, R.E. Williford, J.G. Zhang, J. Liu, and Z. Yang, Effect of Entropy Change of Lithium Intercalation in Cathodes and Anodes on Li-Ion Battery Thermal Management, *Journal of Power Sources,* Vol. 195:3729-3729, June 2010.
[23] Pao-la-or, P., Isaramongkolrak, A., New Design and Magnetic Field Analysis of Transformer Shape with V-Connection for Core Loss Reduction in Railway System, (2019) *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 12 (1), pp. 56-65. doi:https://doi.org/10.15866/iremos.v12i1.15507
[24] S. Vacharakup, M. Peerasaksophol, T. Kulworawanichpong, and P. Pao-la-or, Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116:61-66, October 2011.
[25] M.A. Jabbar, H.N. Phyu, Z. Liu, and C. Bi, Modeling and Numerical Simulation of a Brushless Permanent-Magnet DC Motor in Dynamic Conditions by Time-Stepping Technique, *IEEE Transactions on Industry Applications,* Vol. 40(Issue 3):763-770, May 2004.
[26] G.H. Kim, A. Pesaran, and R. Spotnitz, A Three-Dimensional Thermal Abuse Model for Lithium-Ion Cells, *Journal of Power Sources,* Vol. 170:476-489, July 2007.
[27] C. Bolsinger, and K.P. Birke, Effect of Different Cooling Configurations on Thermal Gradients inside Cylindrical Battery Cells, *Journal of Energy Storage,* Vol. 21:222-230, February 2019.
[28] E. Kreyszig, *Advanced Engineering Mathematics, 9th Ed.* (John Wiley & Sons, Inc., 2006).
[29] W. Cheney, and D. Kincaid, *Numerical Mathematics and Computing, 7th Ed.* (Brook/Cole, Cengage Learning, 2013).

Authors' information

Suranaree University of Technology, Thailand.

Padej Pao-la-or is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand. He received B. Eng. (1998), M. Eng. (2002) and D. Eng. (2006) in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand. His fields that interest is about the broad range of power systems, finite element analysis, optimization and artificial intelligence, electromagnetic field, electrical machinery and energy conversion. He has joined the school since December 2005 and is currently the member of Power System Research, Suranaree University of Technology.

Natthawut Somphong is graduated from Suranaree University of Technology, majoring in the School of Electrical Engineering (2013) and the School of Mechatronics Engineering (2018) for B. Eng. and M. Eng., respectively. His areas of interest are the clean energy, electrochemical reaction, heat transfer and finite element analysis.

Copyright © 2021 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวุฒิ สมพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 พฤษภาคม 2534 ที่โรงพยาบาลมหาราช จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552

สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา พ.ศ. 2556 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา พ.ศ. 2561 ภายหลังจากจบการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการต่างๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมไปถึงมีผลงานตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษาดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี