

## รายงานฉบับสมบูรณ์

# การศึกษาและพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ใน ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

ภายใต้ โครงการศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรม  
เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า ปี พ.ศ.2561

เสนอ

สถาบันยานยนต์



จัดทำโดย

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ



24 กันยายน 2561



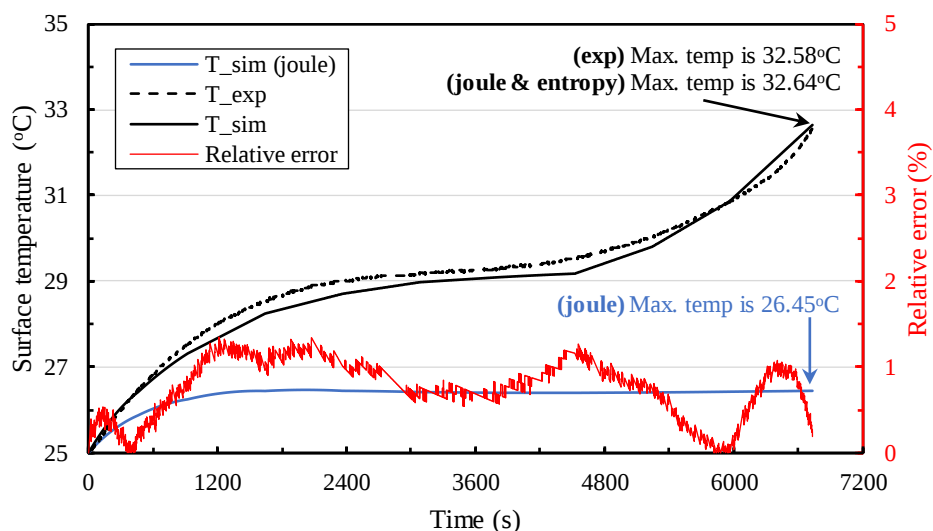
## บทสรุปผู้บริหาร

รายงานฉบับนี้ เป็นรายงานฉบับสมบูรณ์ โดยเนื้อหาจะเน้นการสร้างแบบจำลองทางความร้อนของแบตเตอรี่ ทั้งระดับเซลล์จนถึงระดับโมดูลย่อย ซึ่งระดับเซลล์ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งความร้อนที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกับความต้านทานภายใน (Ohmic Loss) ของเซลล์แบตเตอรี่ ส่วนที่สองความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี ทีมวิจัยได้ทำการหาค่าความร้อนทั้งสองส่วนภายในเซลล์ โดยใช้วิธีการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical Simulation) นอกจากนี้ยังมีการสร้างต้นแบบของระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ เพื่อดูพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง

โดยขั้นตอนการได้ค่าความร้อนจากความต้านทานภายใน (Ohmic Loss) ทางทีมวิจัยได้นำเสนอไว้สองวิธี วิธีแรกใช้เครื่องมือวัดความต้านทานที่มีย่านความถี่คงที่ 1 kHz โดยสามารถวัดได้แค่ความต้านทานสองเทอมจากความต้านทานสามเทอมภายใน และแบตเตอรี่ที่ถูกวัด มีการดึงกระแสไฟฟ้าออกเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าตก และทำการวัดค่าความต้านทานที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า (Open Circuit Voltage, OCV) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความยุ่งยากและใช้เวลานาน ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงคิดวิธีที่สองขึ้นมา โดยต่อแบตเตอรี่เข้ากับเครื่องดึงกระแสไฟฟ้าโดยตรง และทำการดึงกระแสแบบจั้งหะ (Pulse Discharge) โดยมีโปรแกรมควบคุมการดึงไฟฟ้าออกที่ทางทีมวิจัยพัฒนาขึ้นมา และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงแรงดัน รวมถึงกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณความต้านทานทั้งสามเทอมในขณะแรงดันไฟฟ้าทุกช่วง (Open Circuit Voltage, OCV) โดยใช้โค้ดที่ทางทีมวิจัยเขียนขึ้นมา

สำหรับค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ไม่สามารถหาได้จากวิธีการวัด แต่จะใช้การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย โดยนำเฉพาะค่าความร้อนจากความต้านทานภายในที่ได้จากการวัดใส่เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Finite Element Method, FEM) ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่ได้ จะเป็นผลมาจากค่าความร้อนจากความต้านทานภายในเท่านั้น หลังจากนั้นนำผลที่ได้มาเทียบกับผลการทดลองจริง ที่ได้ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดจากทั้งค่าความร้อนจากความต้านทานและความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ซึ่งค่าความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าน้อยกว่าจากการทดลอง หลังจากนั้นทางทีมวิจัยต้องทำการใส่ค่าและปรับค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีที่ขึ้นกับเวลา/แรงดัน เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยจะปรับค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีจนกว่า จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองใกล้เคียงกัน

จากในรูปที่ 1 เส้นสีน้ำเงิน คือ ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากค่าความร้อนจากความต้านทานภายในเพียงอย่างเดียว ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เส้นสีดำปะ คือ ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากค่าความร้อนจากความต้านทานภายใน และจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ที่ได้จากการทดลอง เส้นสีดำทึบ คือ ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากค่าความร้อนจากความต้านทานภายใน และจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ที่ได้จากการปรับค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับเส้นสีแดง คือ เปอร์เซนต์ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างเส้นสีดำปะและเส้นสีดำทึบ โดยข้อมูลค่าความร้อนของการเปลี่ยนแปลงที่ได้จะอยู่ในรูปของ Lookup Table



รูปที่ 1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C จากแบบจำลอง

หลังจากทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระดับเซลล์ดังกล่าวแล้ว ทำให้รู้ปริมาณความร้อนที่ออกมาจากเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถต่อยอดหาความร้อนในระดับโมดูลและแพ็คเกจเตอรี่ต่อไปได้ ยกตัวอย่างเช่น ถ้าแพ็คเกจเตอรี่ใช้จำนวนเซลล์ทั้งหมด 1,000 เซลล์ ไม่ว่าเซลล์จะต่อในรูปแบบวงจรรขนานหรืออนุกรม ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของแพ็คเกจทั้งหมด จะได้มาจากความร้อนระดับเซลล์คูณ 1,000 ทั้งนี้การออกแบบระบบระบายความร้อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า มีแนวความคิดทั้งหมดสามแบบ คือ ระบบที่ความสามารถต่ำกว่า พอดี และสูงกว่าค่าความร้อนที่ออกมาจากตัวแบตเตอรี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าและพฤติกรรมของผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามทางผู้ออกแบบระบบส่วนมากจะออกแบบระบบให้พอดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยและต้นทุนของระบบ สุดท้ายแล้วถ้าอุณหภูมิของแพ็คเกจเตอรี่สูงขึ้นขณะใช้งาน ก็จะมีสัญญาณเตือนผู้ขับขี่ให้

ชะลอความเร็วรถ ก่อนที่ระบบการจัดการแพ็คแบตเตอรี่ (Battery Management System) จะสั่งหยุดการจ่ายไฟของแพ็คแบตเตอรี่

ทั้งนี้โครงการมีการสร้างต้นแบบ โดยต้นแบบที่หนึ่งเป็นระบบที่รองรับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำและระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้น้ำยาแอร์จากระบบปรับอากาศมาช่วย และต้นแบบที่สองระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คแบตเตอรี่ ที่ต้องอาศัยน้ำยาแอร์สำหรับระบายความร้อนโดยตรงที่โมดูล โดยต้นแบบทั้งคู่สามารถควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส

ต้นแบบที่หนึ่งมีการตอบสนองจะช้ากว่า เมื่อแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากระบายความร้อนเป็นแบบความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ซึ่งอาศัยผลต่างของอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น จากผลการทดลองยังพบว่า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เพิ่มขึ้นสูงๆ ไม่ได้ช่วยให้ระบบมีความสามารถระบายความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่การลดอุณหภูมิของน้ำ และการออกแบบรูปทรงช่องทางการไหลสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจำเป็นต้องใช้ระบบปรับอากาศเข้ามาช่วยทำให้ระบบมีความซับซ้อน แทนการระบายความร้อนออกที่หม้อน้ำเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีขีดจำกัดของอุณหภูมิต่ำสุดของน้ำหล่อเย็นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ข้อดีของการใช้น้ำหล่อเย็น คือ สามารถควบคุมให้ผลต่างของอุณหภูมิของทุกเซลล์ไม่เกิน 5 องศาเซลเซียสได้ดี ข้อเสียของการใช้น้ำหล่อเย็น คือ จำเป็นต้องคำนึงเรื่องการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็น เนื่องจากอาจทำให้เกิดการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าได้

ต้นแบบที่สอง ข้อดีของระบบ คือ ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่า โดยแบ่งน้ำยาแอร์บางส่วนมาจากระบบปรับอากาศ มีการติดตั้งวาล์วตัดต่อน้ำยาแอร์ เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เป็นระบบที่มีการตอบสนองไว โดยใช้หลักการระบายความร้อนเป็นแบบความร้อนแฝง (Latent Heat) นอกจากนั้นการรั่วซึมของน้ำยาแอร์ ไม่ส่งผลให้เกิดการลัดวงจรของแพ็คแบตเตอรี่ เนื่องจากน้ำยาที่รั่วมาจะระเหยกลายเป็นไอ สำหรับข้อเสียของระบบนี้ คือ การควบคุมให้ผลต่างของอุณหภูมิของทุกเซลล์ไม่เกิน 5 องศาเซลเซียสในช่วงต้นทำได้แยกว่า เนื่องจากน้ำยาแอร์มีความสามารถในการดึงความร้อนสูงมาก เมื่อน้ำยาแอร์ที่สัมผัสบริเวณไหนก่อน อุณหภูมิส่วนนั้นจะเย็นมาก ต้องรอส่วนที่เย็นก่อนจนมันไม่สามารถคายความร้อนให้น้ำยาแอร์ได้แล้ว น้ำยาแอร์ที่เป็นของเหลวก็จะไหลไปสัมผัสบริเวณอื่นต่อไป แต่เมื่อเวลาผ่านไปการกระจายตัวของอุณหภูมิของทุกเซลล์จะค่อยๆ ต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นระบบนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานที่มากกว่าระบบที่ใช้น้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำอีกด้วย

โดยสรุป โครงการนี้ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่าความร้อน และสร้างต้นแบบเพื่อเป็นเครื่องมือใช้ในการอบรม เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้และแนวทางสู่ภาคอุตสาหกรรม สำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์

---

## Executive Summary

This complete report focuses on the thermal modeling of the battery from a single cell level up to module level. At the single cell level, the heat generation inside the cell consists of two parts. The first part is the heat generation from the current flowing through the internal resistance (Ohmic Loss) of the battery cell. The second part is the heat generation caused by the entropy change. Researchers have found the two parts of the heat generation parameters in the cell using both experiments and numerical simulations. Also, prototypes of the battery pack cooling system have been created in this work to observe actual behavior in the battery pack.

The researchers established two methods to acquire the heat generation from the internal resistance (Ohmic Loss). The first method uses a resistance measurement instrument with a fixed frequency at 1 kHz, which measures only two out of three-term or the battery internal resistance. Moreover, when measure battery, this method makes the voltage drop. Measurement of the resistance of the Open Circuit Voltage (OCV) can be hassle and time-consuming. For these reasons, the researchers figured a second method which connects the battery directly to an electronic load and uses pulse discharge with a program developed by the research team. The changes in the voltage were recorded including electric current. These will be used to calculate the three-term resistance at all open circuit voltages (OCVs) using the code built by the research team.

The instrument cannot measure the heat generation from the entropy change. However, the mathematical model can be used. The internal resistance of the battery cell from the measurement was used in the Finite Element Method (FEM); consequently, the change of battery temperature is only the result of internal resistance. Therefore, when the mathematical model results are compared with the actual results, the change of temperature caused by only heat generation from internal resistance in the mathematical model is less than the change of temperature caused by both two heat generation terms in the experiment. Thenceforth, in the mathematical model, heat generation from the entropy change as a function of time/voltage is

added and adjusted until the temperature change from the mathematical model and experiment are similar.

In Figure 1, the blue line is the result of temperature change based on heat generation from the internal resistance alone in the mathematical model. The black dot line which is experimental result is the result of temperature change based on heat generation from both the internal resistance and the entropy change. The solid black line is the result of temperature changes on the internal resistance and from entropy change adjusted values in mathematical models. The red line is the percentage of error between the black line and the black line. The heat generation data from the entropy change is in the form of a Lookup Table.

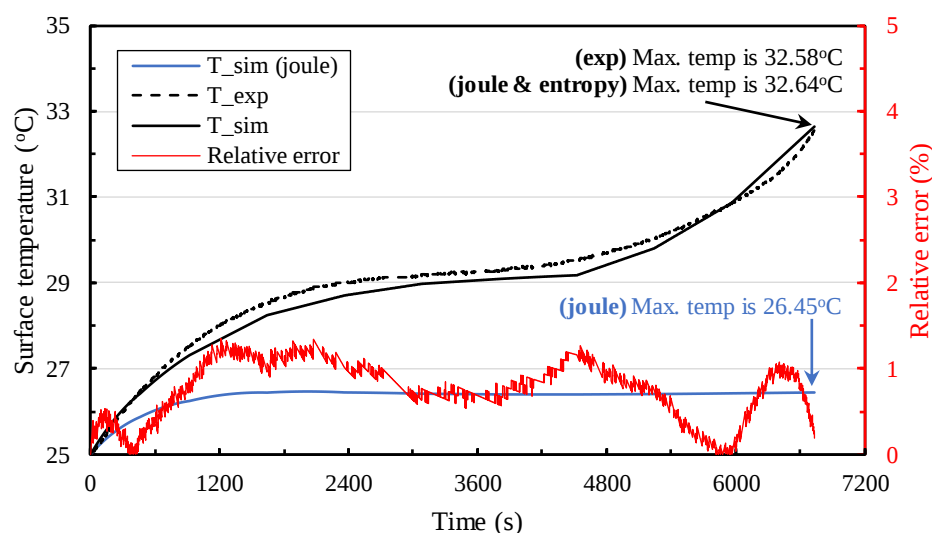


Figure 1 Temperature change of single battery cell at 0.5C

After got the mathematical model of cell level, the amount of heat from the battery cell can be known. Furthermore, the heated from the battery module and the battery pack can be calculated. For example, If the battery pack uses a total of 1,000 cells, whether the cells are connected in parallel or serial circuits, the heat value of all packs is derived from cellular heat multiplied by 1000. The design of the cooling system for electric vehicles has three concepts: a system that is lower, fit and higher than the heat from the battery. It depends on the

characteristics of the motor vehicle and the behavior of the driver. However, most system designers will design the system as accurately as possible considering the safety and cost of the system. Finally, if the temperature of the battery pack increases during operation, it will alert the driver to slow down the car before the battery management system cuts off the power supply of the battery pack.

Two prototypes have been constructed in this project. The first prototype is the cooling system that uses water coolant from the radiator or uses water coolant which is reduced temperature using the air conditioning system. Moreover, the second prototype is the cooling system, using refrigerant from the air conditioning system, which used refrigerant to cool down the battery module directly. These both prototypes can control the battery temperature in order not to exceed 40 degrees Celsius.

The first prototype is the slower response when the battery temperature rises rapidly because the heat transfer in this prototype is the sensible heat mechanism. The sensible is transferred due to the difference temperature between the flow of coolant and the battery cell. From the experiment results also showed that high flow rate of water coolant does not help the system has a significant increase in cooling capacity. However, reducing the temperature of water coolant and the design of the flow channel can improve the cooling capacity of the battery better. However, the cooling system of the water coolant requires air conditioning to make the system more complex instead of cooling system from the radiator alone. The minimum temperature limit of the coolant of cooling system from the radiator depends on the environmental temperature. The advantage of using water coolant is that it can control the difference of temperature of all cells is not more than 5 degrees Celsius. The disadvantage of using water coolant is the need to take into account the leakage of coolant. This leakage may cause a short circuit of the electricity.

The advantage of the second prototype is that is less complicated. This system use separating valve to dispersed the refrigerant from the air conditioner system to cool the battery temperature. This system is very responsive. The principle of heat transfer is the latent heat mechanism that

will not cause the short-circuit in the battery pack. The leaked solution will evaporate into the vapor. However, the disadvantage of this system is that it is difficult to control the difference in temperature of all cells within 5 degrees Celsius in the early time. Because the refrigerant has a very high heat extraction ability, the temperature is frigid at the inlet. This process has to wait until the first area is cold enough that the heat cannot transfer to the refrigerant. After that, the liquid refrigerant will flow to cool the next area. Over the time, the temperature distribution of all cells will be no more than 5 degrees Celsius. Also, this system requires more energy than the system using coolant from the radiator.

In conclusion, this project presents the technique of heat calculation. Moreover, these prototypes are used as training tools to convey the knowledge and the way to the industry and for the design of the battery pack cooling system.

## สารบัญเนื้อหา

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| บทสรุปผู้บริหาร .....                                                                  | i   |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                                      | xiv |
| สารบัญตาราง .....                                                                      | xxi |
| 1. บทนำ .....                                                                          | 1   |
| 1.1. ที่มาของโครงการ.....                                                              | 1   |
| 1.2. วัตถุประสงค์.....                                                                 | 4   |
| 1.3. กลุ่มเป้าหมาย.....                                                                | 4   |
| 1.4. ขอบเขตการดำเนินงาน.....                                                           | 4   |
| 1.5. งบประมาณที่ใช้ในโครงการ .....                                                     | 5   |
| 2. ทฤษฎีและเทคโนโลยีในปัจจุบันหลักการระบายความร้อนของแบตเตอรี่.....                    | 7   |
| 2.1. หลักการระบายความร้อนของแบตเตอรี่.....                                             | 7   |
| 2.2. ความต้านทานภายในและการสูญเสียของแบตเตอรี่.....                                    | 8   |
| 2.3. ความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....                             | 10  |
| 2.3.1. ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ .....             | 10  |
| 2.3.2. สมการความร้อนของแบตเตอรี่.....                                                  | 12  |
| 2.3.3. พฤติกรรมความร้อนของแบตเตอรี่.....                                               | 16  |
| 2.4. การสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แบตเตอรี่ .....                      | 19  |
| 2.4.1. ความร้อนจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของแบตเตอรี่เซลล์ (Joule heating)..... | 19  |

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2. ความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี(Entropy Change).....                                                                   | 22 |
| 2.4.3. ผลรวมของความร้อนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์.....                                                          | 24 |
| 2.5. ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์รี่.....                                                                                   | 25 |
| 2.5.1. ระบบที่ไม่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Passive cooling system) .....                                                           | 25 |
| 2.5.2. ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system) .....                                                               | 26 |
| 2.6. เทคโนโลยีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน .....                                                 | 32 |
| 2.6.1. เทคโนโลยีต่างๆที่ถูกใช้ในปัจจุบันในยานยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อต่างๆ .....                                                            | 32 |
| 2.6.2. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Tesla .....                                                                             | 34 |
| 2.6.3. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Mitsubishi.....                                                                         | 35 |
| 2.6.4. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ BMW.....                                                                                | 36 |
| 2.7. งานวิจัยโครงการที่ผ่านมาโดยทางทีมวิจัยนี้มีประสบการณ์มีดังนี้.....                                                            | 37 |
| 2.7.1. การวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า .....                                                             | 37 |
| 2.7.2. การดำเนินการวิจัยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่.....                                                   | 38 |
| 2.7.3. การดำเนินการวิจัยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบระบายความร้อนแพ็คเกจเตอร์รี่ สำหรับ<br>ยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบของบริษัท Audi ..... | 40 |
| 2.8. งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ .....                                                                                | 42 |
| 3. การสร้างและพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อน.....                                                                              | 47 |
| 3.1. ระดับเซลล์ (Cell Level).....                                                                                                  | 49 |
| 3.1.1. สมการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเซลล์แบตเตอรี่ .....                                                     | 50 |
| 3.1.2. เงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระดับเซลล์ .....                                                               | 51 |

---

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3. การตรวจสอบความแม่นยำของ mesh ในแบบจำลองระดับเซลล์.....                                                    | 51 |
| 3.1.4. การทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery cell discharge) ระดับเซลล์ .....                               | 54 |
| 3.1.5. การจำลองโดยใช้แหล่งความร้อน Joule heating.....                                                            | 56 |
| 3.1.6. แหล่งความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Heat generation due to entropy change).....                    | 58 |
| 3.1.7. เทคนิคการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ (เพิ่มเติม) .....            | 61 |
| 3.2. ระดับโมดูลย่อย (Submodule) .....                                                                            | 65 |
| 3.2.1. การทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery submodule discharge) ระดับโมดูลย่อย..                          | 66 |
| 3.2.2. การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขณะคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery submodule discharge) ระดับโมดูลย่อย ..... | 67 |
| 3.3. ระดับโมดูล (Module).....                                                                                    | 72 |
| 3.4. การคำนวณขนาดระบบระบายความร้อน.....                                                                          | 76 |
| 4. การศึกษาตัวแปรของการระบายความร้อน .....                                                                       | 79 |
| 4.1. ผลกระทบของอัตราการไหล (The effect of flow rate).....                                                        | 81 |
| 4.1.1. เงื่อนไขการจำลอง.....                                                                                     | 81 |
| 4.1.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง .....                                                                   | 82 |
| 4.2. ผลกระทบของรูปแบบช่องทางการไหล (The effect of channel width).....                                            | 84 |
| 4.2.1. เงื่อนไขการจำลอง.....                                                                                     | 85 |
| 4.2.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง .....                                                                   | 85 |
| 4.3. ผลกระทบของอุณหภูมิขาเข้าของของน้ำหล่อเย็น (The effect of Inlet temperature).....                            | 86 |

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.1. เงื่อนไขการจำลอง.....                                                                                                               | 87  |
| 4.3.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง .....                                                                                             | 87  |
| 4.4. สรุปผลกระทบของตัวแปรที่ได้ศึกษา .....                                                                                                 | 89  |
| 4.5. ผลการจำลองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส (เงื่อนไขการใช้งานจริงในประเทศไทย).....                                              | 90  |
| 5. ต้นแบบระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์.....                                                                                             | 95  |
| 5.1. การสร้างต้นแบบ .....                                                                                                                  | 98  |
| 5.1.1. ต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ .....          | 98  |
| 5.1.2. ผลการทดสอบต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ..... | 101 |
| 5.1.3. ต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ .....                                                                       | 109 |
| 5.1.4. ผลการทดสอบต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ .....                                                             | 110 |
| 6. เอกสารอ้างอิง.....                                                                                                                      | 111 |
| 6.1. การอบรมระบบระบายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย.....                                                           | 113 |
| 6.2. รายชื่อผู้เข้าอบรม .....                                                                                                              | 114 |
| 6.3. แบบประเมินความพึงพอใจ .....                                                                                                           | 115 |
| 6.4. รูปภาพบรรยายภาคการอบรม.....                                                                                                           | 117 |
| 6.4.1. ภาคทฤษฎี .....                                                                                                                      | 117 |
| 6.4.2. ภาคปฏิบัติ .....                                                                                                                    | 118 |
| 6.5. รูปภาพบรรยายภาคงาน EV Days.....                                                                                                       | 119 |
| 6.6. คู่มือการใช้งานต้นแบบ .....                                                                                                           | 120 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.7. M-file สำหรับคำนวณหาค่าความต้านทานตาม DOD ใน MATLAB.....                    | 124 |
| 6.8. ตัวอย่างการคำนวณกำลังของระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์รี่แบบง่าย ..... | 125 |
| 6.9. เอกสารประกอบการสอน .....                                                    | 128 |

## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 1.1 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องสำหรับการพัฒนาแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า [2] .....                                 | 2  |
| รูปที่ 2.1 Cell polarization curve .....                                                                             | 10 |
| รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความจุกระแสไฟฟ้าและอายุการใช้งานกับช่วงอุณหภูมิทำงานต่างๆ ของแบตเตอรี่ [5] ..... | 11 |
| รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ [4] .....                                          | 11 |
| รูปที่ 2.4 อายุการใช้งานแบตเตอรี่สั้นลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น.....                                                       | 12 |
| รูปที่ 2.5 หลักการการสร้างความร้อนในรูป Joule heating.....                                                           | 14 |
| รูปที่ 2.6 ค่า Ohmic resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ.....                                           | 15 |
| รูปที่ 2.7 ค่า Charge – transfer resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ.....                               | 15 |
| รูปที่ 2.8 ค่า Diffusion resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ.....                                       | 16 |
| รูปที่ 2.9 โพรไฟล์อุณหภูมิผิวที่อัตราการปล่อยประจุที่ 0.5C, 1C, 2C, 3C, 4C และ 5C.....                               | 17 |
| รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิสูงสุดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C.....                              | 17 |
| รูปที่ 2.11 รายละเอียดอุณหภูมิพื้นผิวและผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C                  | 18 |
| รูปที่ 2.12 พฤติกรรมของค่าความต้านทานที่ค่า DoD ต่างๆ [8] .....                                                      | 20 |
| รูปที่ 2.13 เครื่องมือวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Hioki – BATTERY TESTER BT3554) [9] .....                      | 21 |
| รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในตาม CCV.....                                                            | 21 |
| รูปที่ 2.15 การเกิดขึ้นของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีภายในเซลล์แบตเตอรี่ .....                              | 22 |
| รูปที่ 2.16 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ $\text{LiCoO}_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา [10] .....         | 23 |
| รูปที่ 2.17 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ $\text{LiC}_6$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา [10] .....           | 24 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.18 สัดส่วนความร้อนระหว่างความร้อนจากแหล่งทั้งสอง [7].....                                                                      | 25 |
| รูปที่ 2.19 แบบไม่มีแผ่นระบายความร้อนและแบบมีแผ่นระบายความร้อน .....                                                                    | 26 |
| รูปที่ 2.20 ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ.....                                                                                   | 27 |
| รูปที่ 2.21 ระบบระบายความร้อนด้วยครีระบายความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ .....                                                           | 28 |
| รูปที่ 2.22 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ .....                                                                            | 28 |
| รูปที่ 2.23 ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็กแบตเตอรี่.....                                                                         | 29 |
| รูปที่ 2.24 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็กแบตเตอรี่โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็น.....                                   | 32 |
| รูปที่ 2.25 แพ็กแบตเตอรี่ของ Nissan leaf ที่มีการใช้การพาความร้อน(Natural Air Convection) [11] .....                                    | 34 |
| รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างภายในท่อระบายความร้อน [12] .....                                                                               | 34 |
| รูปที่ 2.27 รูปแบบการวางท่อที่ใช้ระบายความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ [12] .....                                                              | 35 |
| รูปที่ 2.28 แสดงทิศทางการวางท่อระบายความร้อนภายในโมดูลแบตเตอรี่ ของ Tesla Model S [12, 13] .....                                        | 35 |
| รูปที่ 2.29 แสดงแผนภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยการไหลวนอากาศของ Mitsubishi [14] .....                                                 | 36 |
| รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างระบบการระบายความร้อนด้วยการไหลวนอากาศของ Mitsubishi [14] .....                                                 | 36 |
| รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างท่อระบายความร้อนที่ของ BMW [15].....                                                                           | 37 |
| รูปที่ 2.32 แสดงโมดูลขนาด 22P16S.....                                                                                                   | 37 |
| รูปที่ 2.33 แสดงภาพจริงของแพ็กแบตเตอรี่ต้นแบบโครงการวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า .....                        | 38 |
| รูปที่ 2.34 ตัวอย่างผลของความเร็วในแต่ละช่องน้ำหล่อเย็นของแต่ละโมดูลย่อย (รูปซ้ายมือ) และการกระจายอุณหภูมิของโมดูลย่อย (รูปขวามือ)..... | 38 |
| รูปที่ 2.35 การทำแบบจำลองสำหรับความร้อนใน SIMUNLINK โดยใช้ SIMSCAPE block.....                                                          | 39 |
| รูปที่ 2.36 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่าง FEM/CFD software กับ SIMULINK.....                                                  | 39 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.37 กรณศึกษาการระบายความร้อนจากแบตเตอรี่ด้วยน้ำหล่อเย็นแบบมีกล่อง P-Controller สำหรับควบคุมอัตราการไหล ..... | 40 |
| รูปที่ 2.38 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลง Proportional Gains, P สำหรับควบคุมอัตราการไหลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ .....       | 40 |
| รูปที่ 2.39 ระบบระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบของบริษัท Audi .....                           | 41 |
| รูปที่ 2.40 เงื่อนไขในการคำนวณ.....                                                                                  | 41 |
| รูปที่ 2.41 เทคนิคในการคำนวณ และผลที่ได้จากการคำนวณ .....                                                            | 42 |
| รูปที่ 2.42 โมเดล CAD ของแพ็คเกจแบตเตอรี่และเส้นทางการไหลของอากาศเย็น .....                                          | 43 |
| รูปที่ 2.43 แผนภาพของกล่องแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีปริมาณเซลล์ความหนาแน่นสูงที่กำหนดค่าไว้กับสองเส้นทางการไหล.....       | 44 |
| รูปที่ 2.44 แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่บรรจุ PEG1000 และแผ่นตาข่ายลวดอลูมิเนียม .....                                        | 45 |
| รูปที่ 2.45 ลักษณะรูปแบบของระบบระบายความร้อนของเหลวสำหรับโมดูลแบตเตอรี่ .....                                        | 45 |
| รูปที่ 2.46 แผนผังสามมิติรูปแบบการทำความเย็นเหลว.....                                                                | 46 |
| รูปที่ 2.47 แผนภาพโครงสร้างของความยาวของบล็อกอลูมิเนียมในการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น.....                                 | 46 |
| รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อน ©MTEC .....                                                | 48 |
| รูปที่ 3.2 ขนาดและรูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ในหน่วยเมตรที่ใช้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระดับเซลล์....                    | 49 |
| รูปที่ 3.3 บริเวณที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางความร้อน .....                                                             | 51 |
| รูปที่ 3.4 ระดับ mesh ที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์ระดับเซลล์ .....                                     | 52 |
| รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำที่ระดับ mesh ต่างๆ.....                                                  | 52 |
| รูปที่ 3.6 แผนผังการสร้างแบบจำลองในระดับเซลล์ ©MTEC.....                                                             | 53 |
| รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ในการทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ .....                                                          | 54 |
| รูปที่ 3.8 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C .....                                            | 55 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.9 การวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ .....                                                             | 56 |
| รูปที่ 3.10 ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่แรงดันต่าง ๆ .....                                                | 57 |
| รูปที่ 3.11 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C ที่ได้จากแหล่งความร้อน Joule heating ..... | 58 |
| รูปที่ 3.12 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C (ได้จากแหล่งความร้อนทั้งสอง) .....         | 60 |
| รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเซลล์แบตเตอรี่ .....                                                       | 60 |
| รูปที่ 3.14 แผนภาพวงจรของเซลล์แบตเตอรี่จะประกอบค่าความต้านทานต่าง ๆ และค่าความจุภายในเซลล์แบตเตอรี่ .....       | 62 |
| รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาของเซลล์แบตเตอรี่ .....                                | 62 |
| รูปที่ 3.16 การทดสอบการดิ่งกระแสไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์จำนวน 60 รอบ .....                                            | 64 |
| รูปที่ 3.17 ผลรวม Ohmic resistance (Rohm) และ diffusion resistance(Rd) เปลี่ยนแปลงตาม DOD .....                 | 64 |
| รูปที่ 3.18 ค่า Charge transfer polarization (Rch) เปลี่ยนแปลงตาม DOD .....                                     | 64 |
| รูปที่ 3.19 แผนผังการสร้างแบบจำลองระดับโมดูลย่อย ©MTEC .....                                                    | 65 |
| รูปที่ 3.20 อุปกรณ์ในการทดลองคายประจุไฟฟ้าในระดับโมดูลย่อย .....                                                | 66 |
| รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ในการประกอบแบตเตอรี่ในระดับโมดูลย่อย .....                                                   | 66 |
| รูปที่ 3.22 แบบสามมิติของโมดูลย่อยแบตเตอรี่ ©MTEC .....                                                         | 67 |
| รูปที่ 3.23 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C ของโมดูลย่อย .....                        | 70 |
| รูปที่ 3.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิของโมดูลย่อย .....                                                           | 70 |
| รูปที่ 3.25 การกระจายตัวอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ในอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ของการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 0.5C .....  | 72 |
| รูปที่ 3.26 ลักษณะและตำแหน่งรูทางเข้าและออกของน้ำแต่ละโมดูลย่อย .....                                           | 74 |

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 3.27 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 1 .....                                                                                             | 75 |
| รูปที่ 3.28 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 2 .....                                                                                             | 75 |
| รูปที่ 3.29 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 3 .....                                                                                             | 75 |
| รูปที่ 3.30 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 4 .....                                                                                             | 76 |
| รูปที่ 3.31 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 5 .....                                                                                             | 76 |
| รูปที่ 4.1 ตำแหน่งที่ศึกษาตัวแปรของการระบายความร้อน ©MTEC.....                                                                                                                       | 79 |
| รูปที่ 4.2 การศึกษาระบบระบายความร้อนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อนระดับโมดูลย่อย ©MTEC .80                                                                                         |    |
| รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่กำหนดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น .....                                                                                                                            | 81 |
| รูปที่ 4.4 การลดลงของอุณหภูมิด้วยอัตราการไหลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส.....                                                                                       | 82 |
| รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์และการกระจายความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียมสำหรับอัตราการไหล 0.025 ลิตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส..... | 82 |
| รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์และการกระจายความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียมสำหรับอัตราการไหล 2 ลิตรต่อวินาทีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส .....    | 83 |
| รูปที่ 4.7 ตำแหน่งช่องทางการไหล .....                                                                                                                                                | 84 |
| รูปที่ 4.8 การออกแบบช่องทางการไหลขนาดต่างๆ ©MTEC.....                                                                                                                                | 84 |
| รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิตามความกว้างของช่องทางการไหล .....                                                                                                      | 85 |
| รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของอุณหภูมิที่กำหนด ©MTEC.....                                                                                                                                    | 86 |
| รูปที่ 4.11 อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ที่อุณหภูมิโดยรอบ 25 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน.....                                                            | 87 |
| รูปที่ 4.12 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเซลล์ 25 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน.....                                        | 88 |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| รูปที่ 4.13 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุที่ 0.5C ของโมดูลย่อยที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส.....                                                                                 | 90  |
| รูปที่ 4.14 การลดลงของอุณหภูมิของอัตราการไหลต่างๆที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส.....                                                                                                            | 91  |
| รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิตามความกว้างของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส.....                                                                                   | 91  |
| รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ที่อุณหภูมิโดยรอบ 35 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน.....                                                                               | 92  |
| รูปที่ 5.1 ลักษณะโมดูลย่อยแบตเตอรี่ ©MTEC .....                                                                                                                                                         | 97  |
| รูปที่ 5.2 ลวดฟิวส์ที่ถูกติดตั้งไว้ที่ขั้วบวก.....                                                                                                                                                      | 97  |
| รูปที่ 5.3 ลักษณะโมดูลแบตเตอรี่ (ซ้าย) และแผ่นร่อนน้ำระบายความร้อน (ขวา) ที่จะใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ..... | 98  |
| รูปที่ 5.4 ลักษณะโมดูลย่อยที่ถูกประกอบลงบนแผ่นฐานโมดูลระบายความร้อน .....                                                                                                                               | 99  |
| รูปที่ 5.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำและอัตราการไหลสำเร็จรูป.....                                                                                                                                             | 99  |
| รูปที่ 5.6 การตรวจสอบการทำงานของแผ่นระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน .....                                                                                                               | 100 |
| รูปที่ 5.7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ .....                                                                                                                                                        | 102 |
| รูปที่ 5.8 อุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่.....                                                                                                                        | 102 |
| รูปที่ 5.9 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensors location).....                                                                                                                  | 102 |
| รูปที่ 5.10 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยไม่มีระบบระบายความร้อน.....                                                                                    | 104 |
| รูปที่ 5.11 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 25 องศาเซลเซียส.....                                                                  | 105 |
| รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ 25 องศาเซลเซียส..                                                                                                        | 106 |

---

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| รูปที่ 5.13 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35°C โดยไม่มีระบบระบายความร้อน                                        | 107 |
| รูปที่ 5.14 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 30 องศาเซลเซียส.....      | 108 |
| รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ 35 องศาเซลเซียส..                                            | 108 |
| รูปที่ 5.16 ลักษณะโมดูลแบตเตอรี่ (ซ้าย) และการเดินท่อน้ำยาแอร์ (ขวา) ที่จะใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจแบตเตอรี่ ..... | 110 |
| รูปที่ 5.17 ภาพองค์ประกอบจริงสำหรับโมดูลแบตเตอรี่ที่ทำการติดตั้งท่อน้ำยาแอร์.....                                                           | 110 |

## สารบัญตาราง

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตารางที่ 1.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแพ็คเกจเตอร์ที่ผลิตโดยทีมวิจัยในโครงการเดิม .....                                        | 3   |
| ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้และการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งการสร้างความร้อนที่ $SOC = 0.1$ ..18             |     |
| ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีการระบายความร้อนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน (ที่มา: SAE) .....                                    | 33  |
| ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ไอออนทรงกระบอก 18650 ที่ใช้ .....                                                  | 49  |
| ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติวัสดุภายในเซลล์แบตเตอรี่.....                                                                     | 50  |
| ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีขณะดึงไฟฟ้า 0.5C ในรูปแบบ Look-Up Table ..... | 59  |
| ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติวัสดุของน้ำที่ใช้ในแบบจำลองทางความร้อน .....                                                      | 69  |
| ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....                                                   | 71  |
| ตารางที่ 3.6 แสดงขนาดทางเข้าของการออกแบบในแต่ละรูปแบบ .....                                                             | 73  |
| ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล .....                                                   | 81  |
| ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของขนาดความกว้างของช่องทางการไหล...85                       |     |
| ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น.....                                         | 87  |
| ตารางที่ 4.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษามีผลต่อระบบระบายความร้อนโดยใช้น้ำหล่อเย็น .....                                         | 89  |
| ตารางที่ 4.5 สรุปข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส .....  | 93  |
| ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการเลือกสร้างต้นแบบเพื่อทำการศึกษิตัวแปรของระบบระบายความร้อน .....             | 96  |
| ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดสอบ.....                                                                                      | 101 |
| ตารางที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าขณะโมดูลย่อยแบตเตอรี่กำลังทำงาน.....                                                            | 103 |

### สัญลักษณ์

|                  |                                                                     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| BMS              | วงจรควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่                                      |
| $Q_{Battery}$    | ความร้อนเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าขณะใช้งานแบตเตอรี่           |
| $Q_{Sensible}$   | ความร้อนที่ทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ                       |
| $Q_{latent}$     | ความร้อนที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงสถานะ                               |
| $Q_{Conduction}$ | ความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากตัวแพ็คเกจแบตเตอรี่                       |
| $Q_{Convection}$ | ความร้อนที่ถูกระบายออกหรือถูกพัดพาออกจากตัวแบตเตอรี่                |
| $V_{OCV}$        | Open Circuit Voltage                                                |
| $V_{CCV}$        | Closed circuit voltage [V]                                          |
| $R_{ohm}$        | Internal ohmic resistance [ $\Omega$ ]                              |
| $R_{ch}$         | Charge transfer polarization [ $\Omega$ ]                           |
| $R_d$            | Concentration polarization [ $\Omega$ ]                             |
| $\rho_b$         | ความหนาแน่นของแบตเตอรี่ ( $\text{kg/m}^3$ )                         |
| $k_b$            | สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแบตเตอรี่ ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) |
| $C_{pb}$         | ความจุความร้อนของแบตเตอรี่ ( $\text{W/kg}\cdot\text{K}$ )           |
| $Q_{joule}$      | ผลของการสร้างความร้อนในรูปแบบ Joule heating (W)                     |
| $Q_{entropy}$    | ผลของการสร้างความร้อนในรูปแบบปฏิกิริยาเคมีที่ Entropy change (W)    |
| $n$              | จำนวนอิเล็กตรอน (mol)                                               |
| $F$              | ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ( $96,485 \text{ C/mol}$ )                      |
| $R_{int}$        | ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ ( $\Omega$ )                      |

---

|            |                                            |
|------------|--------------------------------------------|
| SOC        | State of Charge                            |
| DOD        | Depth of Discharge                         |
| CCV        | Closed circuit voltage                     |
| P          | Proportional Gains                         |
| $\rho_w$   | ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m <sup>3</sup> )     |
| $k_w$      | สภาพการนำความร้อนของน้ำ (W/(m·K))          |
| $C_{pw}$   | ค่าความจุความร้อนของน้ำ (J/(kg·K))         |
| $\vec{v}$  | เวกเตอร์ความเร็วของน้ำ (m/s)               |
| $P$        | แรงดันสถิต (Pa)                            |
| $\Delta S$ | เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไป (J/mol·K)         |
| $\Delta G$ | พลังงานอิสระหรือพลังงานอิสระกิปปี้ (J/mol) |
| $\Delta H$ | เอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงไป (J/mol)           |

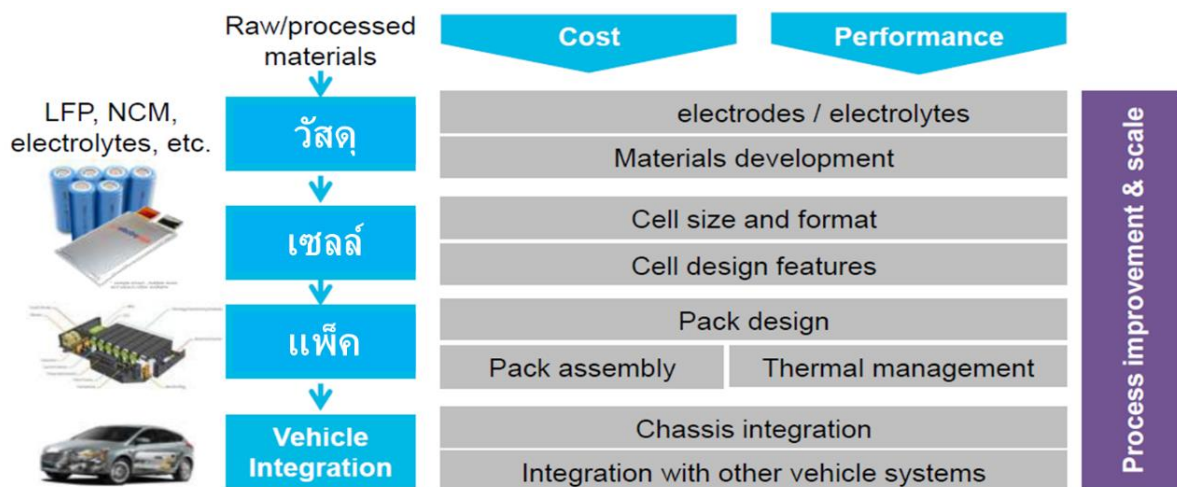


## 1. บทนำ

### 1.1. ที่มาของโครงการ

ด้วยเหตุที่ในปัจจุบันแหล่งพลังงานน้ำมันได้ถดถอยลง แต่ประเทศต้องการความมั่นคงในเสถียรภาพในด้านพลังงานและยังมีความตื่นตัวในคุณภาพของสิ่งแวดล้อมซึ่งรวมถึงปรากฏการณ์เรือนกระจกและคุณภาพของอากาศ โดยเฉพาะในเขตเมืองทั่วโลกให้ความสำคัญอย่างยิ่งยวดกับการพัฒนาเพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนอื่นเช่น พลังลม พลังแสงอาทิตย์ พลังน้ำ พลังคลื่น พลังความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากชีวมวล ปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มมีการตื่นตัวด้านการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาดซึ่งรวมถึงพลังงานทดแทนกันอย่างจริงจังมากขึ้น จะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของกระทรวงพลังงานปี 2559-2575 ที่มีการสนับสนุนนโยบายด้านการใช้แหล่งพลังงานจากพลังงานหมุนเวียน ตัวอย่างเช่นเอทานอล พลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยมีเป้าหมายสัดส่วนการใช้ 25% ภายใน 20 ปี ซึ่งในแผนนี้ได้รวมแผนการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าอยู่ด้วย ซึ่งการพัฒนานี้ได้รวมถึงการปรับปรุงการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้เครื่องยนต์แบบสันดาปเป็นยานยนต์ที่ขับเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ด้วย

ประเทศไทยมีห่วงโซ่การผลิตอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ที่มีความแข็งแกร่ง หากได้มีการมุ่งเน้นเฉพาะยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นหลัก สำหรับสถานภาพความสามารถในการผลิตรถยนต์ไฟฟ้านั้นมีอยู่น้อย เพื่อเตรียมความพร้อมในการรองรับการเข้ามาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า การวิจัยเพื่อสนับสนุนสร้างความสามารถของประเทศในการผลิตชิ้นส่วนสำคัญยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญยิ่ง อีกทั้งยังเป็นโอกาสของประเทศที่จะก้าวเข้าสู่สถานภาพการเป็นผู้นำด้านการผลิตชิ้นส่วนของเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีมูลค่าสูง ในเดือนมิถุนายน ปี 2559 ที่ผ่านมา รัฐบาลโดยมีรัฐมนตรีกระทรวงอุตสาหกรรมได้มีการประชุมหารือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องถึงแนวทางการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย โดยได้ประกาศการสนับสนุนการผลิตและการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีมาตรการที่จะส่งเสริมการลงทุนผลิตในประเทศ ซึ่งการส่งเสริมทางด้านเทคโนโลยีการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งรวมถึงการพัฒนาศักยภาพในการวิจัย พัฒนาและผลิตหัวจ่ายไฟฟ้า สถานีประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ และมอเตอร์[1]



รูปที่ 1.1 เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องสำหรับการพัฒนาแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า [2]

เนื่องจากแบตเตอรี่ยังคงเป็นแหล่งพลังงานหลักของยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันและตามการคาดการณ์ในอนาคตอย่างน้อยอีกสิบปีข้างหน้า อีกทั้งราคาส่วนใหญ่ของยานยนต์ไฟฟ้านั้นจะเป็นราคาของแบตเตอรี่เป็นหลัก การพัฒนาแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญยิ่ง รูปที่ 1.1 แสดงแผนภาพความเกี่ยวเนื่องของระดับเทคโนโลยีสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในแต่ละระดับ สถานภาพปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีการผลิตแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศ สถาบันยานยนต์ กระทรวงอุตสาหกรรม ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการพัฒนาศักยภาพของบุคลากรในประเทศในการผลิตแบตเตอรี่ ต้องการส่งเสริมให้เกิดองค์ความรู้ขึ้นในประเทศ โดยเฉพาะการพัฒนาแพ็คเกจแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์นั่งในปี 2560 จึงได้มอบหมายให้ทีมวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาแพ็คเกจแบตเตอรี่ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาต้นแบบแพ็คเกจแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนสำหรับใช้งานในรถยนต์นั่งไฟฟ้า (P1750013) โดยเบื้องต้นในปี 2560 ได้สร้างต้นแบบแพ็คเกจแบตเตอรี่สำหรับการใช้งานในรถยนต์นั่งเล็กต้นแบบที่ออกแบบและพัฒนาโดยทีมวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ได้วิจัยและพัฒนาสำเร็จมี 13.54 kWh สามารถบรรจุอยู่ในรถแทนที่แพ็คเกจเดิมและสามารถทำงานร่วมกับรถยนต์ต้นแบบให้สามารถขับเคลื่อนได้ โดยมีวงจรควบคุมการทำงานของแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) ทั้งที่เป็นส่วนที่เป็นระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุมด้านความร้อน (Thermal Management System) รายละเอียดตามตารางที่ 1.1 โดยโครงการพัฒนาที่ผ่านมา แม้ว่าจะได้มีการออกแบบและพัฒนาต้นแบบสำหรับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นให้กับแพ็คเกจแบตเตอรี่แล้วก็ตาม หากระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ออกแบบนั้นยังมีข้อจำกัดเนื่องจากยังคงไม่ตอบโจทย์สภาวะอากาศเฉพาะบนท้องถนนของ

ประเทศไทยที่มีอุณหภูมิสูงเกิน 40 องศาเซลเซียส ความชื้นเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณฝุ่นที่สูง ทำให้ทางทีมวิจัยเกิดแนวความคิดที่จะศึกษาและพัฒนาระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ สำหรับแพ็คเกจเตอรี่ เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียและความคุ้มค่าของแต่ละระบบ และเป็นแนวทางให้ภาคอุตสาหกรรมต่อยอดองค์ความรู้และนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแพ็คเกจเตอรี่ เป็นการสร้างโอกาสในการแข่งขันให้อุตสาหกรรมยานยนต์ภายในประเทศต่อไป

ตารางที่ 1.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแพ็คเกจเตอรี่ที่ผลิตโดยทีมวิจัยในโครงการเดิม

| Item                                   | Specification                               |
|----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Name                                   | Battery pack                                |
| Connections                            | 4 module 22P16S in parallel (22P16S*4)      |
| Cell specifications                    | LCO 18650 2.6 Ah 3.6 V                      |
| Nominal voltage                        | 59.2 V                                      |
| Nominal capacity                       | 228.8 Ah                                    |
| Nominal Energy                         | 13.54 kWh                                   |
| Operating voltage                      | 48 to 67.2 V                                |
| Nominal current (charge and discharge) | 114.4 A                                     |
| Maximum current (charge and discharge) | 228.8 A                                     |
| Pulse discharge current                | 457.6 A for 10 seconds                      |
| BMS                                    | 4 slave + 1 master                          |
| Storage temperature                    | 0 to 35 °C                                  |
| Operating temperature                  | Charge: 0 to 45 °C, Discharge: -20 to 60 °C |
| Weight                                 | Less than 120 kg.                           |
| Cooling system                         | Active Cooling System                       |

## 1.2. วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์ในสถานะแวดล้อมของประเทศไทย
- 2) เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้เกี่ยวกับระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์สู่ภาคอุตสาหกรรมไทย

## 1.3. กลุ่มเป้าหมาย

- 1) บุคลากรของสถาบันยานยนต์
- 2) ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ในภาคอุตสาหกรรม

## 1.4. ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1) ศึกษากระบวนการระบายความร้อนแบบต่างๆ ที่สามารถประยุกต์ใช้กับแพ็คเกจเตอร์ในที่จะใช้งานในสถานะอากาศของประเทศไทย โดยแสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละแบบ
- 2) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนอย่างน้อยสามแบบ เพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ
- 3) สร้างต้นแบบของระบบระบายความร้อน สำหรับแพ็คเกจเตอร์ขนาดแรงดันไฟฟ้าของแพ็คเกจเตอร์ไม่เกิน 60 โวลต์ และความจุกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 2.4 kWh (เป็นขนาดสูงสุดของเครื่องมือทดสอบที่ทางศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติทำการทดสอบได้) เพื่อใช้ในการทดสอบและส่งมอบอย่างน้อยสองแบบ เป็นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นและสารหล่อเย็น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ ประสิทธิภาพ และความเป็นได้ทางวิศวกรรมในการใช้งานจริง โดยต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 15 ถึง 45 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 1 ต้นแบบ
- 4) จัดอบรมเชิงปฏิบัติการให้แก่ เจ้าหน้าที่สถาบันยานยนต์ และบุคลากรที่เกี่ยวข้องในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยมีหลักเกณฑ์ในการคัดเลือกผู้ที่จะเข้าร่วมอบรม จากผู้ประกอบการที่มีขีดความสามารถในการต่อยอดทางด้านยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

### 1.5. งบประมาณที่ใช้ในโครงการ

| รายการ                                                                                             | Incash              | In-kind           | รวม                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| <b>ค่าจ้าง/ค่าตอบแทน</b>                                                                           | <b>330,000.00</b>   | <b>860,000.00</b> | <b>1,190,000</b>    |
| - ผู้ช่วยวิจัย ดร. มานพ มาสมทบ                                                                     |                     | 200,000.00        |                     |
| - นักวิจัยอาวุโส ดร.สุมิตรา จรัสโรจน์กุล                                                           |                     | 80,000.00         |                     |
| - นักวิจัยอาวุโส ดร.พิมพ์ ลิ้มทองกุล                                                               |                     | 80,000.00         |                     |
| - นักวิจัย ดร. วิศาล ลิลาวิวัฒน์                                                                   |                     | 200,000.00        |                     |
| - วิศวกร นายวิเศษ ลายลักษณ์                                                                        |                     | 140,000.00        |                     |
| - ผู้ช่วยวิจัย นายธนทร ศรีสุข                                                                      |                     | 160,000.00        |                     |
| - ช่างเทคนิคเชี่ยวชาญ นายสุธิเกียรติ ร่มโพธิ์                                                      | 150,000.00          |                   |                     |
| - นักศึกษา ป.โท นายภิมวรัตน์ จันทร์เทวี                                                            | 90,000.00           |                   |                     |
| - นักศึกษา ป.โท นายตันติวัฒน์ โกวิทกุลไกร                                                          | 90,000.00           |                   |                     |
| <b>ค่าวัสดุวิจัยเพื่อการวิจัย</b>                                                                  | <b>1,262,000.00</b> | <b>0.00</b>       | <b>1,262,000</b>    |
| - เซลล์แบตเตอรี่                                                                                   | 400,000.00          |                   |                     |
| - ชุดเสียบัดโมดูลย่อยแบตเตอรี่                                                                     | 68,000.00           |                   |                     |
| - ชุดเสียบัดโมดูลแบตเตอรี่                                                                         | 50,000.00           |                   |                     |
| - แผ่นนำไฟฟ้า และแผ่นนำความร้อน                                                                    | 48,000.00           |                   |                     |
| - BMS Board                                                                                        | 60,000.00           |                   |                     |
| - สะพานไฟฟ้า พิวส์ สายไฟ และ Current Sensor                                                        | 66,000.00           |                   |                     |
| - ชุดระบบควบคุม                                                                                    | 20,000.00           |                   |                     |
| - Flow Rate Sensor                                                                                 | 20,000.00           |                   |                     |
| - RTD sensor                                                                                       | 30,000.00           |                   |                     |
| - วัสดุอุปกรณ์สำหรับสร้างระบบระบายความร้อน (เช่น คอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ ปั๊มน้ำ ท่อน้ำ และอื่นๆ) | 500,000.00          |                   |                     |
| <b>ค่าใช้สอยและอุปกรณ์เครื่องมือวัด</b>                                                            | <b>1,060,000.00</b> | <b>0.00</b>       | <b>1,060,000.00</b> |
| - ค่าเสื่อมราคาครุภัณฑ์                                                                            | 10,000.00           |                   |                     |

| รายการ                                                                                                                                                   | Incash              | In-kind             | รวม                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| - ค่าปรับปรุงอุปกรณ์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์                                                                                      | 150,000.00          |                     |                            |
| - เครื่องมือวัดการถ่ายเทความร้อน กล้องตรวจจับความร้อน ชุดควบคุมผ่าน NI Instrument พร้อมคอมพิวเตอร์ติดตั้ง Labview และชุดปั๊มน้ำหล่อเย็นควบคุมอุณหภูมิได้ | 900,000.00          |                     |                            |
| <b>ค่าใช้จ่าย</b>                                                                                                                                        | <b>0.00</b>         | <b>88,000.00</b>    | <b>88,000.00</b>           |
| - ค่าจ้างวิเคราะห์/ทดสอบ                                                                                                                                 |                     | 10,000.00           |                            |
| - ค่าใช้เดินทางและค่ารับรองประชุม                                                                                                                        |                     | 8,000.00            |                            |
| - ค่าจัดการอบรมเชิงปฏิบัติการ (Workshop)                                                                                                                 |                     | 50,000.00           |                            |
| - ค่าทำรายงาน                                                                                                                                            |                     | 20,000.00           |                            |
| <b>ค่าใช้จ่ายทางอ้อมอื่น ๆ</b>                                                                                                                           | <b>150,000.00</b>   | <b>170,000.00</b>   | <b>320,000.00</b>          |
| - ค่าบำรุงสถาบัน (10%)                                                                                                                                   | 100,000.00          | 170,000.00          |                            |
| - Technology Fee                                                                                                                                         | 50,000.00           |                     |                            |
| <b>รวม</b>                                                                                                                                               | <b>2,802,000.00</b> | <b>1,118,000.00</b> | <b>3,920,000.00</b>        |
| <b>ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%</b>                                                                                                                                | <b>196,140.00</b>   | <b>78,260.00</b>    | <b>274,400.00</b>          |
| <b>จำนวนเงินรวมทั้งสิ้น</b>                                                                                                                              | <b>2,998,140.00</b> | <b>1,196,260.00</b> | <b><u>4,194,400.00</u></b> |

## 2. ทฤษฎีและเทคโนโลยีในปัจจุบันหลักการระบายความร้อนของแบตเตอรี่

เมื่อมีการใช้งานแพ็คแบตเตอรี่ไม่ว่าจะเป็นการอัดประจุหรือคายประจุก็ตาม จะมีความร้อนเกิดขึ้นในแพ็คแบตเตอรี่เสมอ และที่สำคัญในการใช้งานของแพ็คแบตเตอรี่ในสภาพอากาศของประเทศไทยที่ค่อนข้างร้อนทำให้การระบายความร้อนออกจากแพ็คแบตเตอรี่ด้วยตัวเองทำได้ยาก หากความร้อนสะสมภายในแพ็คแบตเตอรี่มากขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่และยังทำให้อายุการใช้งานสั้นลงอีกด้วย ดังนั้นระบบระบายความร้อนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะช่วยให้การทำงานของแพ็คแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีการระบายความร้อน และระบบระบายความร้อนที่ใช้ในแพ็คแบตเตอรี่กับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน รวมถึงแนวความคิดต่างๆที่เป็นไปได้ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการระบายความร้อนในแพ็คแบตเตอรี่

### 2.1. หลักการระบายความร้อนของแบตเตอรี่

ระบบระบายความร้อนให้แพ็คแบตเตอรี่ในรถยนต์ขึ้นอยู่กับ รูปทรงของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ อัตราการจ่ายไฟและอัดประจุ รวมถึงขนาดของแบตเตอรี่และพื้นที่ในการแพ็คแบตเตอรี่ โดยหลักๆ การระบายความร้อนจะเป็นการใช้ประโยชน์จากการนำความร้อน (Conductive Heat Transfer) การพาความร้อน (Convective Heat Transfer) และการดูดซับความร้อนในรูปแบบความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) รวมถึงรูปแบบความร้อนแฝง (Latent Heat) โดยทั้งสี่ความร้อนที่กล่าวมาสามารถดูดซับความร้อนจากแพ็คแบตเตอรี่ได้ ดังสมการที่ 2.1 โดยที่ผลกระทบของการแผ่รังสีมีค่าน้อยมาก เนื่องจากแพ็คแบตเตอรี่จะถูกประกอบอยู่ภายในรถยนต์อย่างมิดชิด

$$Q_{Battery} - Q_{Conduction} - Q_{Convection} - Q_{Sensible} - Q_{Latent} = 0 \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

$Q_{Battery}$  คือ ความร้อนเนื่องจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าขณะใช้งานแบตเตอรี่ ทั้งขณะจ่ายไฟฟ้าและอัดประจุไฟฟ้า โดยความร้อนส่วนนี้ ประกอบด้วยความร้อนสี่ส่วน คือ ความร้อนเนื่องจากการต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ (Resistance Loss/Ohmic Loss) ความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนตัวของไอออน (Ion Transport Loss) ความร้อนเนื่องปฏิกิริยาทางเคมี (Reaction Rate Loss) ความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy Heat) ซึ่งการคำนวณหาความร้อนในสี่ส่วนนี้ จะกล่าวในบทต่อไปในรายงานความก้าวหน้าครั้งต่อไป

$Q_{Sensible}$  คือ ความร้อนที่ทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่สถานะของสารไม่เปลี่ยนแปลง ถ้าค่าความจุความร้อนของวัสดุ และมีปริมาณมวลที่สูง จะทำให้วัสดุหรือแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อย โดยบางเทคนิคการระบายความร้อนได้ใช้เทคนิคนี้ เพื่อรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เช่น การนำเจล ของแข็งหรือของเหลว ล้อมรอบแบตเตอรี่ไว้ เพื่อดูดซับความร้อนไว้

$Q_{Latent}$  คือ ความร้อนที่ทำให้วัสดุเปลี่ยนแปลงสถานะ แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ยกตัวอย่างเช่น ระบบปรับอากาศภายในบ้านหรือรถยนต์ (Air Conditioner System) ท่อนำความร้อน (Heat Pipe) และอื่นๆ

$Q_{Conduction}$  คือ ความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกจากตัวแพ็คเกจแบตเตอรี่ โดยผ่านตัววัสดุนำความร้อนไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ โดยความสามารถในการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ และผลต่างของอุณหภูมิ

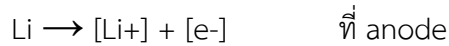
$Q_{Convection}$  คือ ความร้อนที่ถูกระบายออกหรือถูกพัดพาออกจากตัวแบตเตอรี่ โดยมีสารพาความร้อนเคลื่อนที่ โดยความสามารถในการพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับ ค่าการพาความร้อน ปริมาณสารพาความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิ

## 2.2. ความต้านทานภายในและการสูญเสียของแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตามจากที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นที่แสดงในรูปที่ 2.1 Open Circuit Voltage (OCV) ในทางทฤษฎีไม่สามารถใช้งานได้ในช่วงการใช้งาน เนื่องจากพื้นที่ที่กระแสไฟไหลผ่านแบตเตอรี่ จะไหลผ่านความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ของเซลล์แบตเตอรี่ด้วย การลดลงของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Drops) ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเป็นผลมาจากกระบวนการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันและผลลัพธ์ของผลรวมของแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันซึ่ง voltage drops เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ คือ

1) Concentration polarization เป็นผลที่เกิดจากความเข้มข้นที่แตกต่างกันของสารตัวทำปฏิกิริยาที่พื้นผิวอิเล็กโทรด ซึ่งขัดขวางการแพร่กระจาย (Diffusion) ของไอออน เรียกว่า การไล่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น (Concentration Gradient) ส่งผลให้ความต้านทานภายในสูงขึ้น และเป็นผลให้แรงดันตกภายในเซลล์

2) Charge transfer polarization หรือ Activation polarization เนื่องจากปัจจัยการหน่วง เป็นการเกิด Redox Reaction หรือ Activation Energy ที่ปฏิกิริยา Redox ต้องการ ที่เป็นส่วนหนึ่งของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งหมด กล่าวคือ กระบวนการเหล่านี้กินพลังงานและทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลง



3) Internal ohmic resistance คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) (สัดส่วนผกผันกับการนำไฟฟ้า) เช่นเดียวกับความต้านทานของวัสดุอิเล็กโทรด (Electrode Materials) ขั้ว (Terminals) การเชื่อมต่อระหว่างกัน (Interconnections) พื้นที่ติดต่อกันระหว่างอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์, และส่วนประกอบอื่น ๆ เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ Ohmic voltage drop ลดลงภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี หรือเรียกว่า IR loss

จากผลของทั้งสามกระบวนการที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงภายในเซลล์แบตเตอรี่สามารถนำมาเขียนได้ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$V_{ocv} = V_{ccv} - I \cdot (R_{ohm} + R_{ch} + R_d) \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

โดยที่  $V_{ocv}$  คือ Open circuit voltage [V]

$V_{ccv}$  คือ Closed circuit voltage [V]

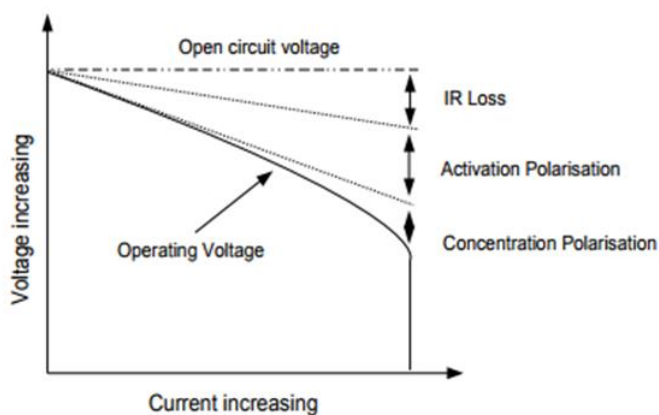
$R_{ohm}$  คือ Internal ohmic resistance [ $\Omega$ ]

$R_{ch}$  คือ Charge transfer polarization [ $\Omega$ ]

$R_d$  คือ Concentration polarization [ $\Omega$ ]

$I$  คือ Electric current [A]

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ลดลงเนื่องจากจลนพลศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics) กับความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุภายในเซลล์แบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การลดลงของ OCV ของแบตเตอรี่ที่มีผลต่อพลังงานที่มีอยู่ซึ่งจะต่ำกว่าค่าตามทฤษฎี จากสมการที่ 2.2 ก็แสดงให้เห็นว่ายิ่งกระแสสูง ( $I$ , C-rate) ในระบบหรือในแพ็คเกจแบตเตอรี่มีมากเท่าไรยิ่งส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเท่านั้น โดยในแต่ละเซลล์ถึงจะผลิตมาในกระบวนการเดียวกันของล็อตเดียวกันก็ตาม พฤติกรรมหรือการลดลงของแรงดันไฟฟ้าก็ไม่มีทางเท่ากันอยู่ดี ดังนั้นในการออกแบบแพ็คเกจแบตเตอรี่นั้นจะต้องคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย



รูปที่ 2.1 Cell polarization curve

## 2.3. ความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

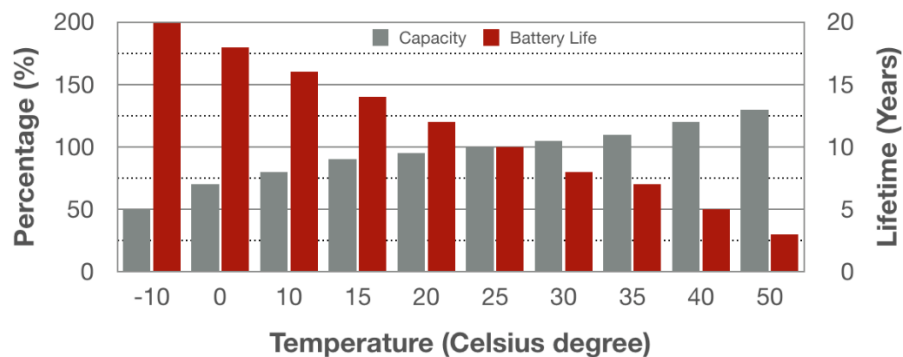
แม้ว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีความปลอดภัยสูง แต่บางครั้งก็อาจมีอันตรายได้เช่นกัน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนอาจเกิดความร้อนสูงได้จากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นการอัดหรือปล่อยประจุแบตเตอรี่โดยปกติก็เกิดความร้อนอยู่แล้ว แต่หากแบตเตอรี่หรือเครื่องประจุแบตเตอรี่ (Charger) มีความผิดปกติ ก็อาจทำให้เกิดอันตรายได้ สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟไหม้ได้ คือ การที่แบตเตอรี่ได้รับการอัดประจุเกินกว่าที่รับได้ (Overcharge) ซึ่งอาจเกิดในกรณีเช่นเครื่องประจุ แบตเตอรี่มีความบกพร่องทำให้ไม่หยุดการอัดประจุแม้ว่าแบตเตอรี่จะเต็มแล้ว หรือ แบตเตอรี่เสื่อมสภาพทำให้รับประจุได้น้อยลง สาเหตุอีกประการคือการใช้งานแบตเตอรี่อย่างหนัก เช่น การอัดหรือปล่อยประจุด้วยกระแสสูงเป็นเวลานาน ยิ่งหากใช้ในสถานที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือแบตเตอรี่ไม่สามารถระบายความร้อนได้ดีนัก ก็ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้ได้สูง

หากแบตเตอรี่มีอุณหภูมิภายในถึง 60 องศาเซลเซียส จะเริ่มมีความร้อนสูงขึ้นที่ขั้วลบและสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปฏิกิริยาข้างเคียงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สต่างๆ ที่อาจติดไฟได้ และเกิดความร้อนขึ้นด้วยส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่อง จนในที่สุดอาจเกิดไฟลุกไหม้ หรือระเบิดได้ เหตุการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการเกิดความร้อนต่อเนื่องแบบกู่ไม่กลับ (Thermal Runaway) ในบางกรณีอุณหภูมิอาจเพิ่มสูงถึง 900 องศาเซลเซียสได้ [3]

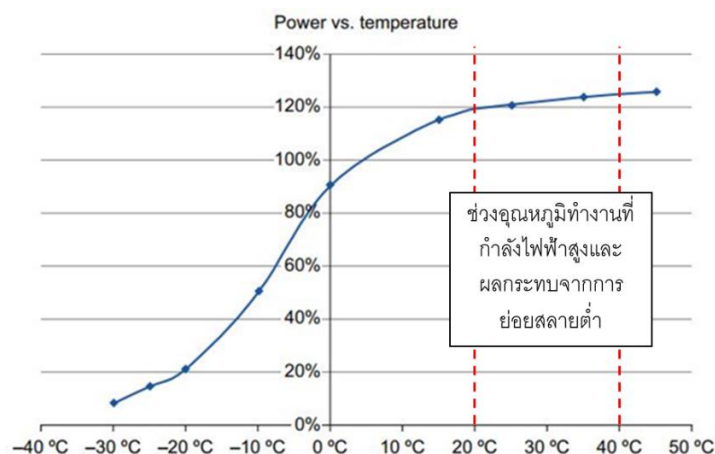
### 2.3.1. ผลกระทบของความร้อนที่มีต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

ในการอัดประจุหรือการปล่อยประจุพลังงานจากแบตเตอรี่จะมีความร้อนเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเสมอ ซึ่งอุณหภูมิจะส่งผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิสูง

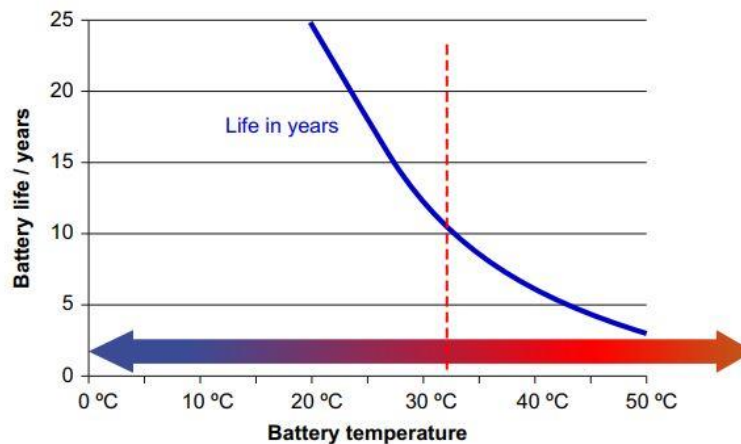
ความจุกระแสไฟฟ้าหรือสมรรถนะจะเพิ่มขึ้น แต่รอบอายุการใช้งานลดลง ในทางกลับกัน ที่อุณหภูมิต่ำความจุกระแสไฟฟ้าหรือสมรรถนะจะลดลง แต่รอบอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปช่วงอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 20 – 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงอุณหภูมินี้มีความใกล้เคียงกับความจุกระแสไฟฟ้าสูงสุด และส่งผลกระทบกับการย่อยสลายหรือเสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4 [4] ดังนั้นถ้าเซลล์แบตเตอรี่ที่นำมาประกอบหรือทำการแพ็กแบตเตอรี่มีคุณภาพที่ต่างกัน จะส่งผลให้สมรรถนะและอายุการใช้งานของแต่ละแบตเตอรี่ไม่เท่ากัน นอกจากนั้นถ้าระบบการระบายความร้อนให้กับแพ็กแบตเตอรี่ ยังต้องคำนึงเรื่องการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ โดยความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละเซลล์ที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความจุกระแสไฟฟ้าและอายุการใช้งานกับช่วงอุณหภูมิทำงานต่างๆ ของแบตเตอรี่ [5]



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบระหว่างกำลังไฟฟ้ากับอุณหภูมิของแบตเตอรี่ [4]



รูปที่ 2.4 อายุการใช้งานแบตเตอรี่ลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น

### 2.3.2. สมการความร้อนของแบตเตอรี่

สมการความร้อน (Heat Equation) เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์การนำความร้อน เพื่อทราบการกระจายอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ดังสมการที่ 2.3

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q_{battery} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดยที่  $Q_{battery}$  คือ การสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ (W)

$\rho_b$  คือ ความหนาแน่นของแบตเตอรี่ ( $\text{kg/m}^3$ )

$k_b$  คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแบตเตอรี่ ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )

$c_{pb}$  คือ ความจุความร้อนของแบตเตอรี่ ( $\text{W/kg}\cdot\text{K}$ )

$T$  คือ อุณหภูมิ (K)

อุณหภูมิของแบตเตอรี่ถูกกำหนดโดยการสร้างความร้อนภายในเซลล์ของแบตเตอรี่  $Q_{battery}$  แหล่งที่มาของการสร้างความร้อนของแบตเตอรี่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยสองส่วนดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$Q_{battery} = Q_{joule} + Q_{entropy} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

โดยที่  $Q_{joule}$  คือ ผลของการสร้างความร้อนในรูป Joule heating (W)

$Q_{entropy}$  คือ ผลของการสร้างความร้อนในรูปปฏิกิริยาเคมีที่ Entropy change (W)

การสร้างความร้อนในรูป Entropy change คือ ปฏิกิริยาความร้อนที่ถูกสร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากผลของกระบวนการ Concentration polarization และ Charge transfer polarization สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$Q_{entropy} = -T\Delta S \frac{I}{nF} \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

โดยที่  $T$  คือ อุณหภูมิ (K)

$\Delta S$  คือ เอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงไป (J/K)

$n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอน (mol)

$F$  คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,485 C/mol)

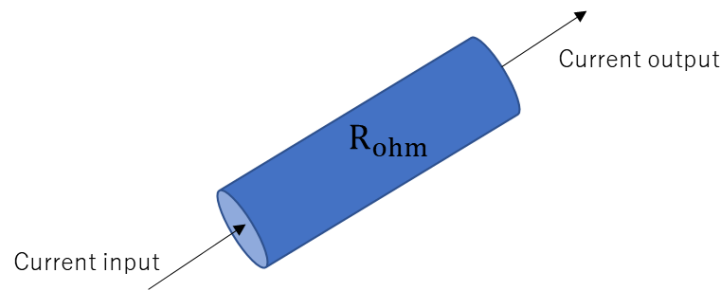
$I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (A)

การสร้างความร้อนในรูป Joule heating ดังรูปที่ 2.5 เกิดจากการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ เนื่องจากผลของกระบวนการ Internal ohmic resistance ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$Q_{joule} = I^2 R_{int} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

โดยที่  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน (A)

$R_{int}$  คือ ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ ( $\Omega$ )



รูปที่ 2.5 หลักการสร้างความร้อนในรูป Joule heating

การสูญเสียพลังงานในระหว่างการแปลงพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เป็นผลมาจาก 3 ปัจจัย คือ กระบวนการ Concentration polarization กับกระบวนการ Charge transfer polarization ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการปฏิกิริยาทางเคมีและกระบวนการ Internal ohmic resistance ที่เกิดจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าของส่วนประกอบภายในเซลล์แบตเตอรี่ โดยผลรวมของความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่จากสามปัจจัยแสดงดังสมการที่ 2.7

$$R_{int} = R_{ohm} + R_{ch} + R_d \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

โดยที่

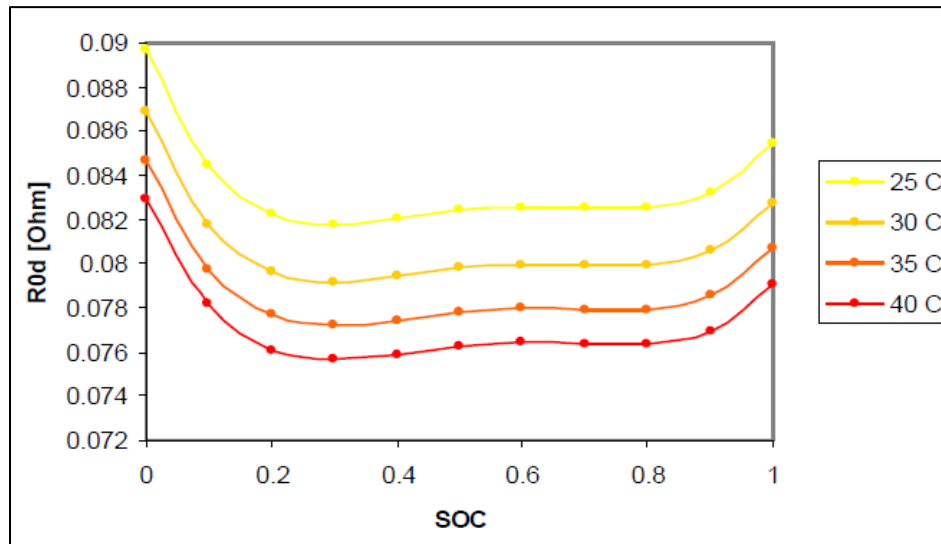
$R_{int}$  คือ ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ ( $\Omega$ )

$R_{ohm}$  คือ (Ohmic resistance) ความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรด และส่วนประกอบอื่น ๆ ของแบตเตอรี่ ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายใน ( $\Omega$ )

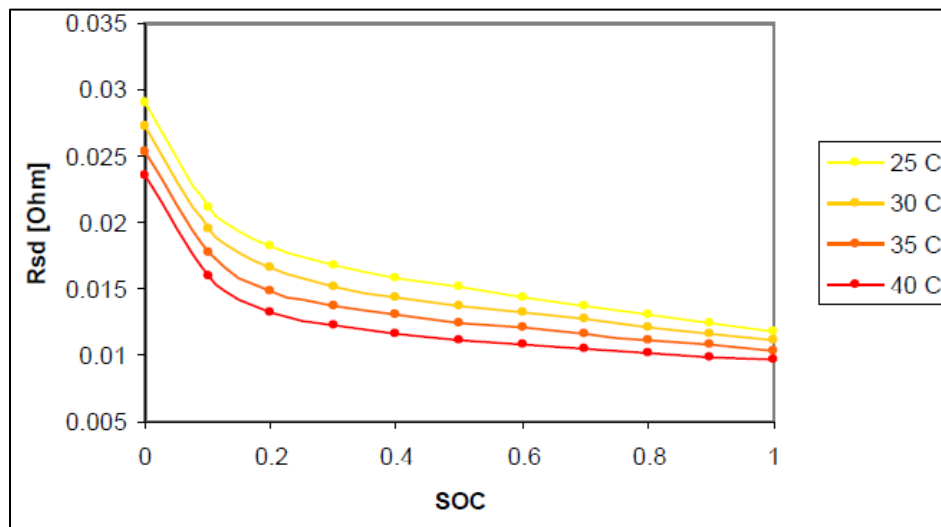
$R_{ch}$  คือ (Charge – transfer resistance) ความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับ activation reactions เนื่องจากในระหว่างกระบวนการไอออนลิเทียมจะแทรกตัวที่อินเตอร์เฟซระหว่างอิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ ( $\Omega$ )

$R_d$  คือ (Diffusion resistance) ความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ( $\Omega$ )

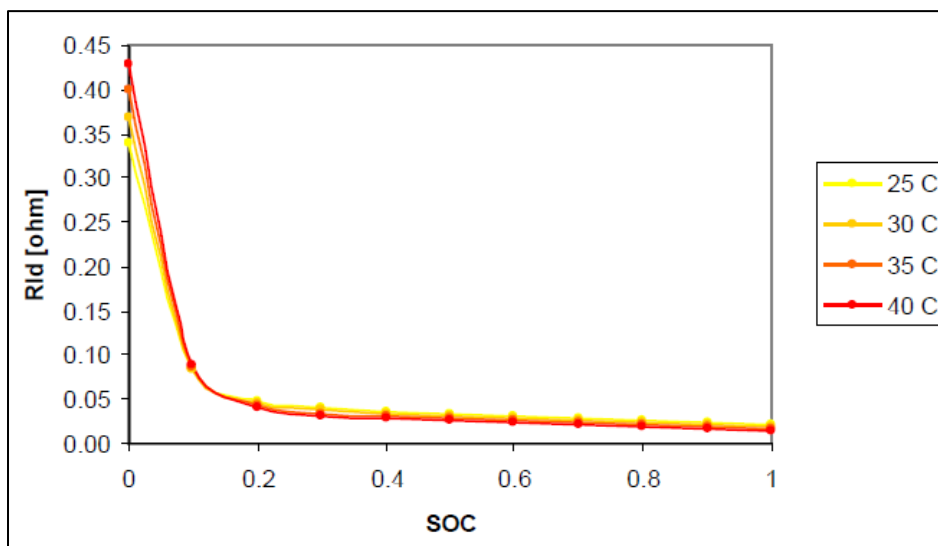
ค่าความต้านทานภายในทั้งสามเทอมจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น SOC และอุณหภูมิจากรูปที่ 2.6 รูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานภายในทั้งสามเทอมที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ [6]



รูปที่ 2.6 ค่า Ohmic resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.7 ค่า Charge – transfer resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ

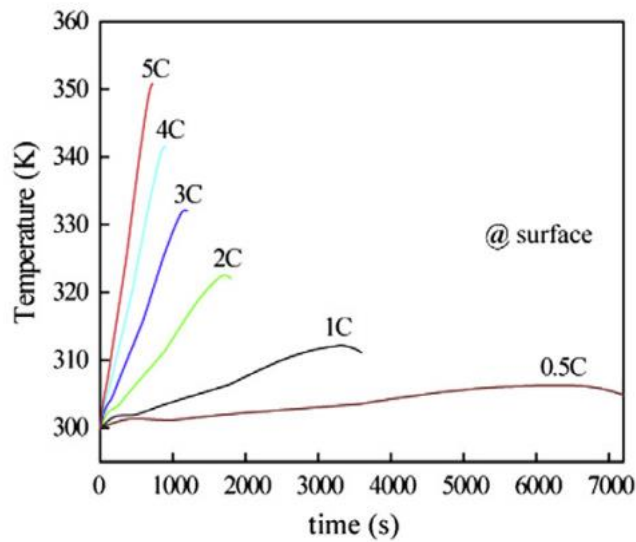


รูปที่ 2.8 ค่า Diffusion resistance ขณะปล่อยประจุที่ SOC และอุณหภูมิต่างๆ

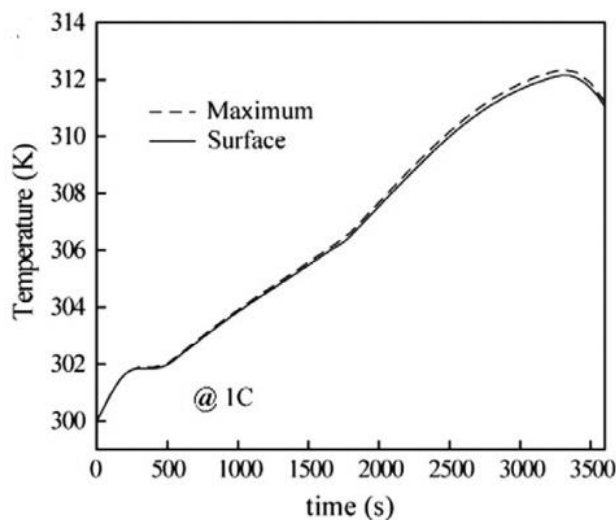
ความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่จะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูง ยกเว้นในเทอมของ Diffusion resistance และที่ SOC ตั้งแต่ 0 – 0.1 จะมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในทั้ง 3 เทอม ไม่ได้เป็นค่าคงที่โดยค่า Ohmic resistance จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนในเทอม Joule heating ส่วนค่า Charge – transfer resistance และ ค่า Diffusion resistance จะส่งผลต่อปริมาณความร้อนในเทอม Entropy change

### 2.3.3. พฤติกรรมความร้อนของแบตเตอรี่

Jeon และคณะ [7] ได้ทำศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก 18650 ประเภท LCO ด้วยความจุไฟฟ้า 1.5 Ah และได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วยแก้ปัญหาสมการการอนุรักษ์พลังงาน โดยพิจารณาจากเทอมการสร้างความร้อน (heat generation) ทั้งในรูป Joule heating และ Entropy change ที่อัตราการปล่อยประจุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า ยิ่ง C-rate สูง อุณหภูมิพื้นผิวของเซลล์แบตเตอรี่ยิ่งสูงตามไปด้วย จากรูปที่ 2.10 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิสูงสุดกับอุณหภูมิพื้นผิวที่ 1C มีพฤติกรรมคล้ายๆกัน และแสดงให้เห็นว่าในแต่ละช่วงเวลาผลจากการสร้างความร้อนจะมีค่าแตกต่างกัน



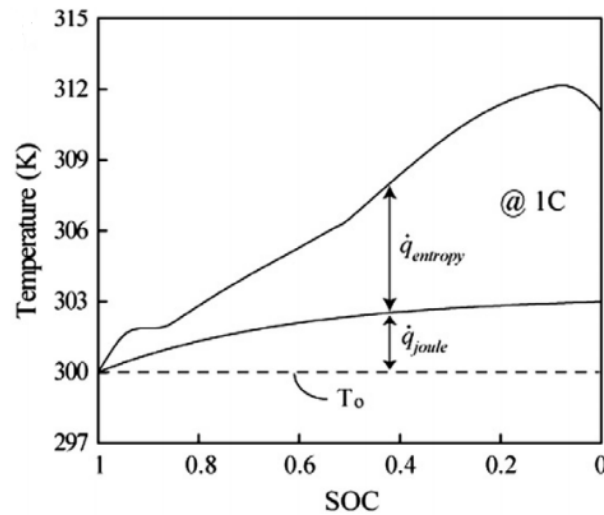
รูปที่ 2.9 โพรไฟล์อุณหภูมิผิวที่อัตราการปล่อยประจุที่ 0.5C, 1C, 2C, 3C, 4C และ 5C



รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิสูงสุดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C

ซึ่งพฤติกรรมอุณหภูมิที่พื้นผิวเซลล์แบตเตอรี่เป็นผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ที่อัตราการปล่อยประจุ 1C จะเห็นได้ผลของการสร้างความร้อนในรูป Entropy change จะส่งผลต่อพฤติกรรมอุณหภูมิของเซลล์มากกว่าในรูป Joule heating ที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นโค้งและเข้าสู่ค่าอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง

โดยตารางที่ 2.1 คือผลของอุณหภูมิพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้และการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งความร้อนที่ SOC = 0.1 ถึง C-rate สูง ผลของ Joule heating ยิ่งสูงตาม แต่ผลของ Entropy change ลดลง



รูปที่ 2.11 รายละเอียดอุณหภูมิพื้นผิวและผลของแหล่งการสร้างความร้อนแต่ละชนิดที่อัตราการปล่อยประจุ 1C

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิพื้นผิวที่คาดการณ์ไว้และการมีส่วนร่วมของแต่ละแหล่งการสร้างความร้อนที่ SOC = 0.1

| อัตราการ<br>ปล่อยประจุ | เซลล์ลิเทียมไอออนชนิด LCO |                        |                          |
|------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|
|                        | T [°C ]                   | q <sub>Joule</sub> [%] | q <sub>Entropy</sub> [%] |
| 0.5                    | 33.3                      | 12.8                   | 87.2                     |
| 1                      | 39.3                      | 24.1                   | 75.9                     |
| 2                      | 49.4                      | 40.4                   | 59.6                     |
| 3                      | 58.5                      | 51.0                   | 49.0                     |
| 4                      | 67.3                      | 58.2                   | 41.8                     |
| 5                      | 75.8                      | 62.8                   | 37.2                     |

## 2.4. การสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แบตเตอรี่

ความร้อนที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่เป็นประเด็นที่สำคัญมากในการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่กับอุปกรณ์อื่น เพื่อที่จะเข้าใจถึงขีดจำกัดความสามารถในการใช้งาน การใช้แบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับการออกแบบใช้งานรูปแบบต่างๆ

ความร้อนที่เกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่เกิดจากสองปัจจัยหลักคือ ความร้อนจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของเซลล์แบตเตอรี่(Joule heating) และความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี(Entropy heat) ซึ่งสัดส่วนในการเกิดความร้อนทั้งสองจะขึ้นอยู่กับการใช้งานของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่(C-rate)

### 2.4.1. ความร้อนจากการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานของแบตเตอรี่เซลล์ (Joule heating)

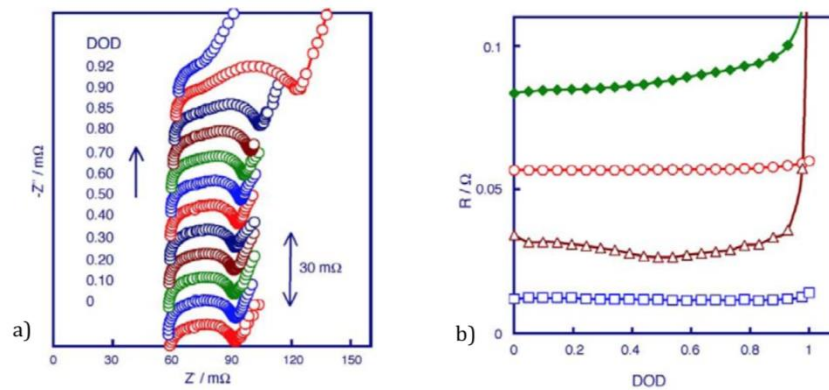
การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานจะทำให้เกิดความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนดังสมการที่ 2.6 อุปกรณ์ไฟฟ้าล้วนมีความต้านทานภายในจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือสารเคมีเช่นเดียวกันกับเซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความร้อนและสะสมอยู่ในตัวเซลล์ได้

$$Q_{joule} = i^2 R_{int}$$

สำหรับแบตเตอรี่ความต้านทานภายใน (Internal resistance,  $R_{int}$ ) จะได้รับอิทธิพลจากสามปัจจัยคือ ความต้านทานโอห์มิก (Ohmic resistance,  $R_{ohm}$ ) ที่เกิดจากตัววัสดุที่ใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรด (Electrodes) รวมไปถึงข้อต่อ (Connection points) ต่างๆ ความต้านทานจากความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ (Diffusion resistance,  $R_d$ ) และความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของประจุ (Charge transfer resistance,  $R_{ct}$ ) สรุปเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.7

$$R_{int} = R_{ohm} + R_d + R_{ch}$$

ความต้านทานทั้งสามดังกล่าวมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ความต้านทานโอห์มิกและความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเซลล์แบตเตอรี่มีการใช้งานจนถึงขีดจำกัดหรือ Depth of discharge (DoD) มีค่าใกล้เคียงค่าที่กำหนดไว้ ยกเว้นความต้านทานจากการเคลื่อนที่ของประจุที่จะมีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทำให้ค่าความต้านทานภายในรวมที่ DoD สูงจะมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน



a) เป็นผลของการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance)

b) แสดงให้เห็นการจำแนกของความต้านทานแต่ละประเภท

รูปที่ 2.12 พฤติกรรมของค่าความต้านทานที่ค่า DoD ต่างๆ [8]

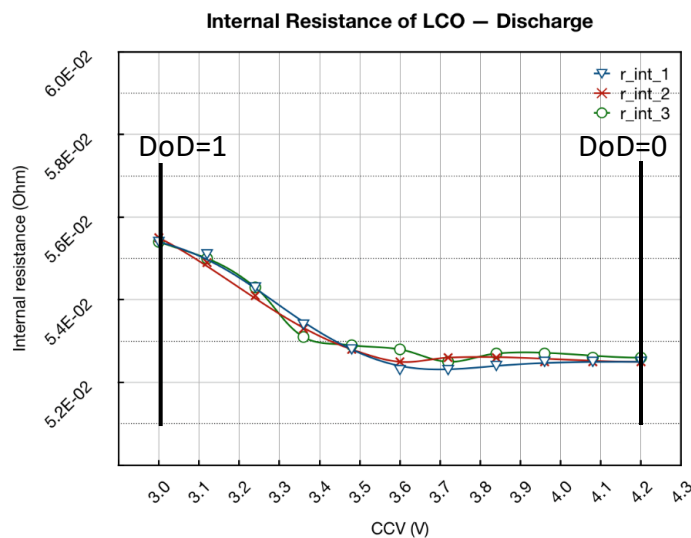
รูปที่ 2.12 แสดงพฤติกรรมของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ รูป a) เป็นผลของการวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของแบตเตอรี่ที่ระดับแบตเตอรี่ (DOD) ปริมาณต่างๆ รูป b) แสดงให้เห็นการจำแนกของความต้านทานแต่ละประเภท โดยที่  $\circ$  แสดงถึงความต้านทานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรด และส่วนประกอบอื่น ๆ ของแบตเตอรี่ ที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านภายใน ( $R_{ohm}$ ),  $\square$  แสดงถึงความต้านทานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ( $R_d$ ),  $\triangle$  แสดงถึงความต้านทานอันเนื่องมาจากความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับ activation reactions เนื่องจากในระหว่างกระบวนการไอออนลิเทียมจะแทรกตัวที่อินเตอร์เฟซระหว่างอิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ ( $R_{ch}$ ) และ  $\diamond$  แสดงถึงความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_{int}$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานรวมของทั้งสามพจน์ข้างต้น

จากข้อมูลจะกล่าวจะเห็นว่าความต้านทานของแบตเตอรี่ภายในมีค่าไม่คงที่ เมื่อถูกใช้งานจนแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานภายในจะเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน ซึ่งความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ( $R_{int}$ ) จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของการแพร่และการแลกเปลี่ยนของประจุ ในส่วนของความต้านทานที่เกิดจากวัสดุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิกับคุณสมบัติของวัสดุซึ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขณะใช้งานแบตเตอรี่นั้นมีค่าไม่สูงมาก (ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส) จึงทำให้ค่าความต้านทานในส่วนนี้มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

ด้วยเหตุนี้การวัดค่าความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ด้วยเครื่องมือที่ค่า DoD ต่างๆ หากพบว่าค่าของความต้านทานภายในมีค่าสูงขึ้นจะสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าค่าดังกล่าวมีเป็นค่าความต้านทานรวมที่รวมผลของความต้านทานทั้งสามตัวเอาไว้แล้ว เครื่องมือในการใช้วัดแบตเตอรี่คือ Hioki (BATTERY TESTER BT3554) แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะถูกใช้วัดความต้านทานของแบตเตอรี่ที่ขั้วของแบตเตอรี่ทั้งสองขณะไม่มีการเชื่อมต่อกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 เครื่องมือวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Hioki – BATTERY TESTER BT3554) [9]



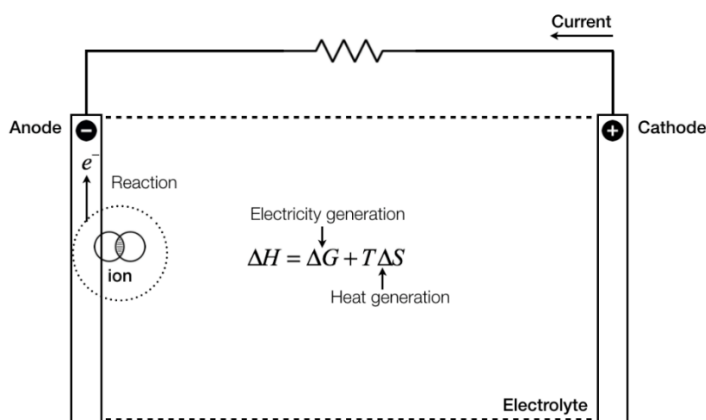
รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในตาม CCV

จากการทดลองวัดความต้านทานของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทโคบอลต์ออกไซด์ (LCO) ยี่ห้อทอริยาม่า (Toriyama<sup>®</sup>) ที่มีความต้านทาน 52.9 มิลลิโอห์มที่มีการใช้งานผ่านการปล่อยกระแสไฟฟ้า 1C ได้ผลของความต้านทานภายในที่มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.13 จากผลการทดสอบของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเมื่อเทียบกับ CCV พบว่าที่ค่า DoD สูงขึ้น ความต้านทานภายในก็จะสูงขึ้นตาม

อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ Hioki นั้นจะทำการวัดความต้านทานโดยใช้สัญญาณความถี่ 1 kHz ซึ่งจะทำให้สามารถวัดความต้านทานได้เพียงค่าความต้านทานจากวัสดุ ( $R_{ohm}$ ) และความต้านทานจากการแพร่ของไอออนภายในอิเล็กโทรไลต์ ( $R_d$ ) เท่านั้น แต่ความต้านทานจากการแลกเปลี่ยนของประจุที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยาเคมีจะปรากฏเมื่อความถี่ของเครื่องมือวัดมีค่าความถี่ในช่วงที่ต่ำ 1 Hz จึงทำให้ไม่สามารถวัดได้ โดยปกติต้องใช้ Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) ในการวัดเพื่อให้ได้ค่าของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ทั้งหมดทุกค่า ดังนั้นเพื่อที่จะสร้างแบบจำลองทางความร้อนจึงต้องใช้เทคนิคการจำลอง (Simulation) เข้าช่วย เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนที่เกิดจากเซลล์แบตเตอรี่ในปริมาณที่ถูกต้อง

## 2.4.2. ความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy Change)

นอกเหนือจากความร้อนที่เกิดจากการไหลของกระแสแล้ว ความร้อนบางส่วนยังเกิดจากปฏิกิริยาภายในเซลล์แบตเตอรี่อีกด้วย อย่างที่ทราบกันดีว่ากระแสไฟฟ้าในแบตเตอรี่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันทางเคมีของสารที่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ พลังงานที่เกิดขึ้นนอกจากจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแล้วยังก่อให้เกิดความร้อนเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.15 การเกิดขึ้นของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีภายในเซลล์แบตเตอรี่

รูปที่ 2.15 แสดงถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่ เมื่อปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นจะทำให้เกิดพลังงานขึ้นซึ่งส่วนหนึ่งจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีภายในอิเล็กโทรไลต์

ก่อให้เกิดความร้อน พลังงานที่ถูกแบ่งทั้งสองส่วนจะถูกเรียกว่าพลังงานอิสระหรือพลังงานอิสระกิบป์ (Gibb's Free Energy,  $\Delta G$ ) ซึ่งสามารถมองอีกมุมมองหนึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (Voltage drop) ได้ตามสมการที่ 2.8

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

โดยที่

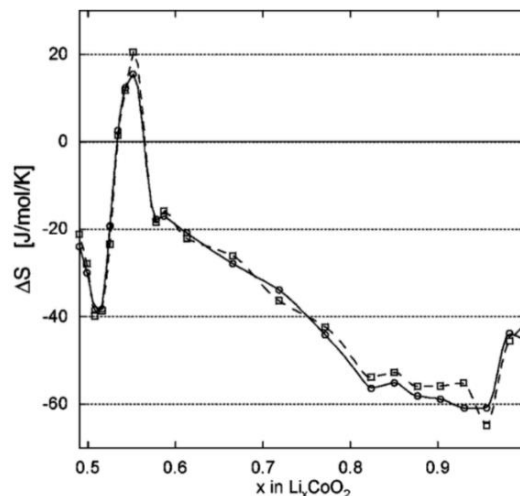
$$\Delta G = -nFV_1^0 \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

$$T\Delta S = -nFV_2^0 \quad \text{จะได้ว่า} \quad V_2^0 = -T\Delta S \frac{1}{nF} \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

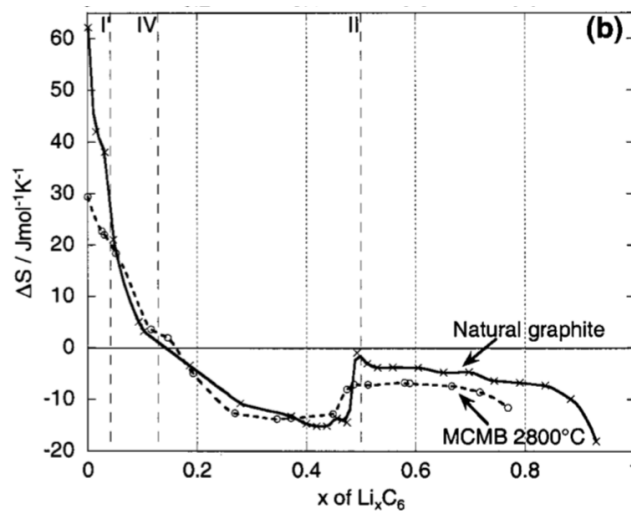
ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจึงสามารถหาได้จากการที่กระแสที่ถูกสร้างขึ้นไหลผ่านแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจากสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.10 สามารถเขียนรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.11

$$Q_{entropy} = iV_2^0 = -T\Delta S \frac{i}{nF} \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

อย่างไรก็ตามการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือและวิธีการบางอย่างเพื่อทำการทดลองวัดค่าดังกล่าว แต่เซลล์แบตเตอรี่ประเภทโคบอลต์ออกไซด์ได้เคยมีการทดลองแล้วดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ LiCoO<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา [10]



รูปที่ 2.17 ค่าของเอนโทรปีที่เปลี่ยนแปลงของ  $\text{LiC}_6$  ที่ความเข้มข้นต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยา [10]

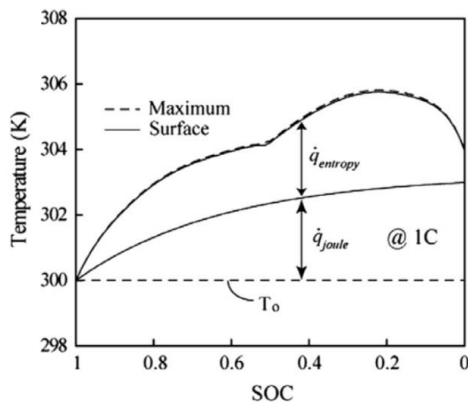
จากรูปทั้งสองจะสามารถนำค่ามาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อจำลองความร้อนอันเกิดจากการเปลี่ยนของเอนโทรปี

#### 2.4.3. ผลรวมของความร้อนที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความร้อนทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาผลของความร้อนทั้งสองเราสามารถสรุปได้ว่าจะเขียนผลรวมของความร้อนทั้งสองจากสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.11 สามารถเขียนรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.12

$$Q_{\text{Batt}} = i^2 r_{\text{int}} - T \Delta S \frac{i}{nF} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

จากสมการข้างต้นจะพบว่ากระแสที่ถูกปล่อยจากแบตเตอรี่ส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นหากความร้อนไม่สูงมากนัก ค่าของความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีจะส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นมากกว่าอธิบายได้จากสมการที่ 2.12 ที่พจน์ของความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับกระแสแต่ความร้อนจากการสูญเสียจากความต้านทานจะมีสัดส่วนกับกำลังสองของกระแสไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมา เช่นเดียวกันที่กระแสสูงขึ้นความร้อนจากการสูญเสียจากความต้านทานจะมีผลสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงจากเอนโทรปีดังรูปที่ 2.18 ที่อัตราการปล่อยกระแส 1C ความร้อนทั้งสองจะมีอัตราส่วนเป็นร้อยละ 24.1 ต่อ 75.9 ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจึงควรระมัดระวังในการใช้แหล่งความร้อนให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด



Predicted surface temperature and contribution of each heat sources at SOC = 0.1.

| C-rate | LiCoO <sub>2</sub> /C |                       |                         | LiNiCoMnO <sub>2</sub> /C |                       |                         |
|--------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
|        | T (K)                 | $\dot{q}_{joule}$ (%) | $\dot{q}_{entropy}$ (%) | T (K)                     | $\dot{q}_{joule}$ (%) | $\dot{q}_{entropy}$ (%) |
| 0.5    | 306.3                 | 12.8                  | 87.2                    | 301.9                     | 41.4                  | 58.6                    |
| 1      | 312.3                 | 24.1                  | 75.9                    | 305.4                     | 53.5                  | 46.5                    |
| 2      | 322.4                 | 40.4                  | 59.6                    | 314.1                     | 63.3                  | 36.7                    |
| 3      | 331.5                 | 51.0                  | 49.0                    | 323.4                     | 67.4                  | 32.6                    |
| 4      | 340.3                 | 58.2                  | 41.8                    | 333.0                     | 69.7                  | 30.3                    |
| 5      | 348.8                 | 62.8                  | 37.2                    | 342.7                     | 70.3                  | 29.7                    |

รูปที่ 2.18 สัดส่วนความร้อนระหว่างความร้อนจากแหล่งทั้งสอง [7]

## 2.5. ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็กแบตเตอรี่

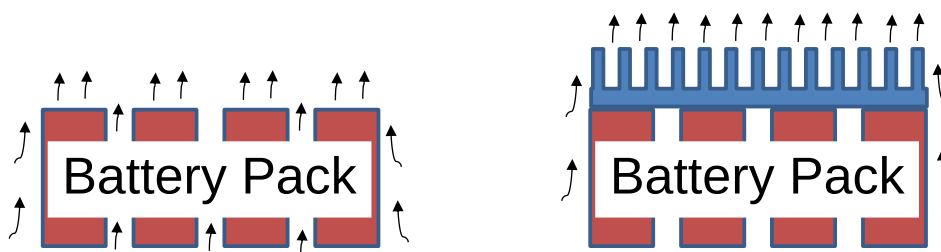
ในปัจจุบันมีระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็กแบตเตอรี่หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศในแต่ละพื้นที่ เช่น ในประเทศเมืองหนาวระบบระบายความร้อน นอกจากจะทำหน้าที่ระบายความร้อนแล้ว ในฤดูหนาวระบบ ต้องมีหน้าที่ให้ความร้อนกับแพ็กแบตเตอรี่เพื่อให้แบตเตอรี่อยู่ภายใต้อุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสมในช่วง 15 – 40 องศาเซลเซียส แต่สำหรับประเทศไทยแล้ว อุณหภูมิปกติของอากาศโดยทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 30 – 40 องศาเซลเซียส ดังนั้นระบบจึงต้องการแค่ระบบระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ถึงแม้ว่าบางภูมิภาค ของประเทศไทยในช่วงฤดูหนาวอุณหภูมิจะต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส แต่ระบบให้ความร้อนกับแพ็กแบตเตอรี่นั้น ไม่ค่อยมีความจำเป็นมาก เนื่องจากแพ็กแบตเตอรี่สามารถใช้ความร้อนจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าจากตัวมันเอง ทำให้ตัวมันเองร้อนได้ ในช่วงเริ่มต้น

ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็กแบตเตอรี่มีทั้งระบบแบบไม่ต้องการใช้พลังงาน (Passive Cooling System) และแบบต้องการใช้พลังงาน (Active Cooling System) ซึ่งแต่ละแบบจะมีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกันไป ขึ้นอยู่ลักษณะการใช้งานของแบตเตอรี่

### 2.5.1. ระบบที่ไม่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Passive cooling system)

พลังงานในแบตเตอรี่มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ด้วยปริมาณของ พลังงานที่จำกัด ที่สามารถถูกประจุไฟได้ ทำให้การใช้งานต้องถูกพิจารณาอย่างรอบคอบ ดังนั้นแนวคิดในการ ออกแบบระบบระบายความร้อนนี้จะไม่มีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในการทำงาน โดยที่การระบายความร้อน ของแบตเตอรี่นั้นจะเน้นการออกแบบเชิงเรขาคณิต เพื่อนำความร้อนออกจากแบตเตอรี่ โดยกระบวนการนำความ

ร้อน (Heat Conduction) และการพาความร้อนแบบอิสระ (Natural Heat Convection) เป็นหลัก ประสิทธิภาพการพาความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามขนาดพื้นที่สัมผัสของแบตเตอรี่กับอากาศ อย่างไรก็ตามความสามารถในการระบายความร้อนด้วยวิธีการพาความร้อนก็สามารถทำได้สูงสุดตามขนาดพื้นที่ผิวของแบตเตอรี่ ซึ่งอาจจะเพียงพอในการใช้งานที่มีความร้อนเกิดขึ้นในปริมาณไม่สูงมากนัก แต่ถ้าแบตเตอรี่มีการใช้งานโดยการปล่อยประจุในอัตราที่สูงมาก (High C-rate discharge) เกิดความร้อนในปริมาณมาก อาทิเช่น การใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าวิธีการดังกล่าวจะไม่เหมาะสมสำหรับการออกแบบใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 2.19 แบบไม่มีแผ่นระบายความร้อนและแบบมีแผ่นระบายความร้อน

ยกตัวอย่างความร้อนที่ถูกระบายโดยการพาของแบตเตอรี่ถูกกำหนดด้วยพื้นที่ของแบตเตอรี่ที่สัมผัสอากาศแบบไม่ใช้พลังงาน รูปที่ 2.19 แสดงถึงความร้อนที่ถูกพาออกไปโดยอากาศโดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนคือ อุณหภูมิของอากาศ อัตราการไหลของอากาศ และพื้นที่ที่สัมผัสอากาศ เนื่องจากการที่ไม่มีการใช้พลังงานเข้ามาในระบบทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศและอัตราการไหลของอากาศได้ ดังนั้นวิธีการเดียวที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบนี้คือการเพิ่มพื้นที่สัมผัสให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การติดครีป (fin) บนด้านที่สัมผัสอากาศของแบตเตอรี่เพิ่มพื้นที่สัมผัสให้มากกว่าพื้นที่ของตัวแบตเตอรี่เองเนื่องจากครีปเล็กๆที่ยื่นออกมาจากผิวช่วยให้การสัมผัสอากาศมีพื้นที่มากขึ้น ตามหลักการพาความร้อนแล้วครีปจะทำได้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

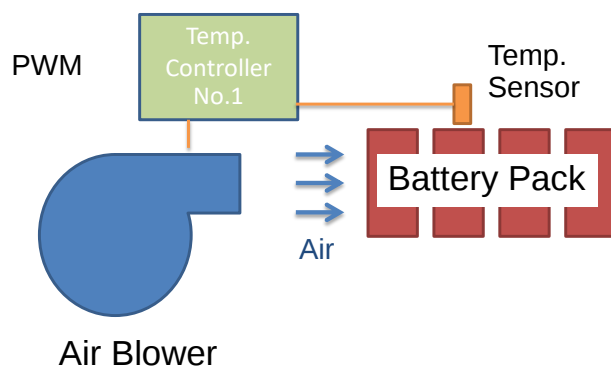
## 2.5.2. ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

แนวคิดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพื่อใช้จัดการดูแลเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นถือเป็นเรื่องที่เหมาะสมผล ในการทำงานของแบตเตอรี่ที่ทำให้เกิดความร้อนสูง การใช้อุปกรณ์เสริมเพื่อระบายความร้อนจึงมีความสำคัญเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ด้วยอุปกรณ์เพิ่มเติมทำให้ระบบการระบายความร้อนวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่ดีกว่าเนื่องจากวิธีการจัดการความร้อนที่ผสมผสานทั้งการออกแบบในเชิงเรขาคณิตและกลศาสตร์ของไหลเข้าด้วยกันทำให้สามารถใช้กระบวนการพาความร้อน (Heat Convection) ได้ดียิ่งขึ้นผ่าน

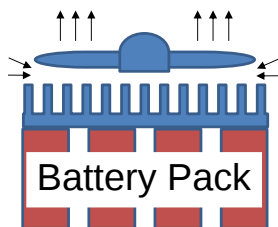
ตัวกลางการพาความร้อนที่เป็นของเหลว เช่น น้ำ เป็นต้น ระบบการจัดการความร้อนนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงแต่ก็มีข้อเสียที่ต้องใช้พลังงานในแบตเตอรี่บางส่วนมาขับเคลื่อนระบบให้ทำงานเช่นกัน อีกทั้งอุปกรณ์เสริมที่เพิ่มขึ้นยังลดพื้นที่ใช้สอยในการออกแบบของระบบแบตเตอรี่แพ็คเกจอีกด้วย อย่างไรก็ตามวิธีการออกแบบที่มากขึ้น ทำให้เกิดมุมมองและการออกแบบใหม่ๆ ที่พัฒนาเทคโนโลยีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย

### 2.5.2.1. ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ

ในระบบที่ใช้พลังงาน จะมีเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น การใช้พัดลมระบายอากาศ (Air blower) ควบคุมโดยระบบ Pulse Width Modulation (PWM) ที่ทำงานเมื่ออุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่ถูกวัดโดยเซ็นเซอร์ขึ้นถึงค่าที่ถูกตั้งไว้ดังรูปที่ 2.20 จะช่วยให้เกิดการไหลวนของอากาศและมีอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น อากาศที่ไหลเร็วขึ้นช่วยให้การพาความร้อนของอากาศเกิดขึ้นได้ในปริมาณที่มากขึ้นเช่นกัน ด้วยหลักการดังกล่าวความสามารถในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ รูปที่ 2.21 แสดงการผสมรวมเทคนิคที่ใช้ในระบบที่ไม่ใช้พลังงานโดยการติดครีป (Fin) เพื่อเป็นอีกหนึ่งตัวช่วยที่ทำให้ระบบระบายความร้อนทำงานได้ดีขึ้นอีกระดับหนึ่ง



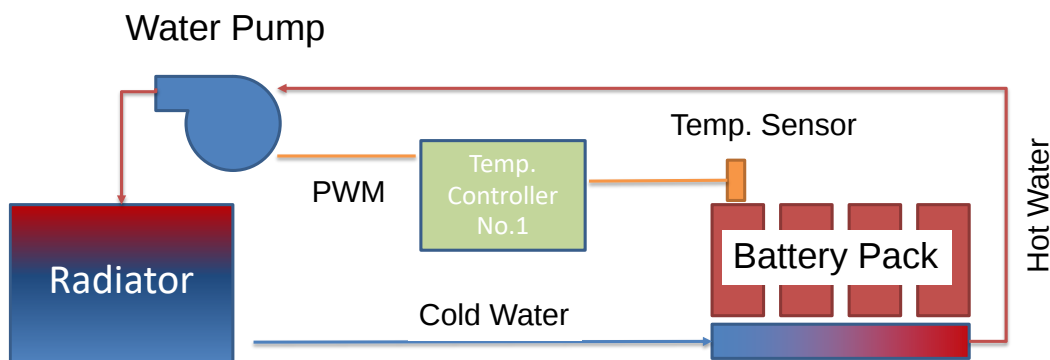
รูปที่ 2.20 ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ



รูปที่ 2.21 ระบบระบายความร้อนด้วยครีบริบายความร้อนร่วมกับพัดลมระบายอากาศ

อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังมีข้อเสียในอีกหลายแง่มุม เช่น การควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาในระบบ รวมไปถึงการหาอากาศที่สะอาดมาหมุนเวียนในระบบเป็นต้น ปัจจัยเรื่องอากาศสะอาดเป็นหนึ่งในประเด็นที่สำคัญอย่างยิ่งของระบบการหมุนเวียนที่ใช้อากาศ เนื่องจากรถยนต์ไฟฟ้าจะถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ในบางกรณีอากาศภายนอกถูกเจือปนด้วยสิ่งแปลกปลอม อาทิเช่น ฝุ่น หรือความชื้น เป็นต้น ซึ่งสิ่งแปลกปลอมเหล่านั้นล้วนไม่เป็นมิตรกับแบตเตอรี่ที่อาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายอย่างรวดเร็วหรือก่อให้เกิดอันตรายอันเกิดจากไฟฟ้าลัดวงจรก็เป็นได้

#### 2.5.2.2. ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ



รูปที่ 2.22 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นดังรูปที่ 2.22 นี้ จะใช้ของเหลวคือน้ำ ไหลผ่านช่องต่างๆที่จัดทำขึ้นภายในตัวแพ็คเกจแบตเตอรี่เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการทำงานของแบตเตอรี่ออกไปภายนอกซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของแพ็คเกจแบตเตอรี่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น ประกอบด้วยอุปกรณ์และหน้าที่สำคัญดังนี้

- **หม้อน้ำ (Radiator)** ซึ่งจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากน้ำไปสู่อากาศโดยรอบและจะเป็นแหล่งเก็บน้ำให้มีปริมาณเพียงพอที่จะใช้หมุนเวียนในระบบ

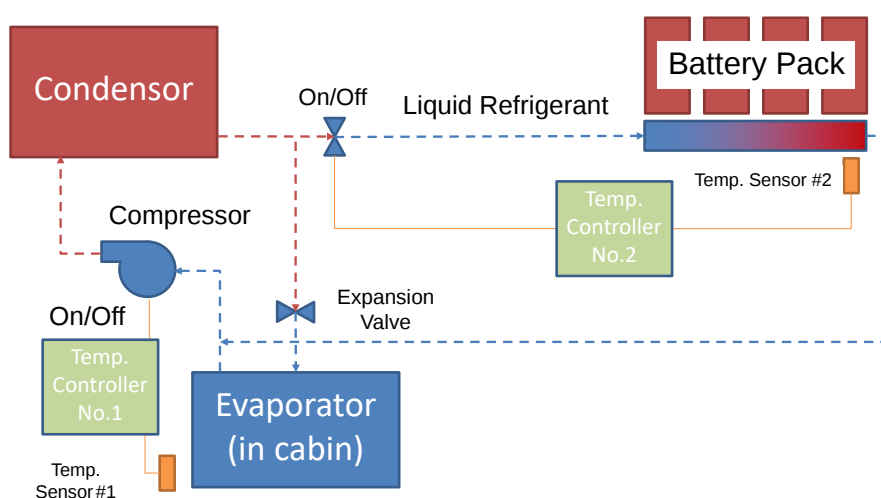
- **ปั๊มน้ำ (Water pump)** จะทำหน้าที่บังคับให้น้ำหมุนเวียนในระบบด้วยปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจะทำงานตามที่ชุดควบคุมอุณหภูมิกำหนด

- **ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)** ทำหน้าที่เปรียบเทียบผลที่รับมาจากตัววัดอุณหภูมิกับค่าที่กำหนดไว้หากเกินก็จะสั่งให้ปั๊มทำงาน ซึ่งเมื่อปั๊มน้ำทำงานน้ำจะไหลเข้าสู่ระบบระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในแพ็คเกจเตอริลลดลงอยู่ในช่วงที่ต้องการได้

- **ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)** จะติดอยู่กับผิวด้านข้างของแบตเตอรี่ จะคอยตรวจจับวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ขณะแบตเตอรี่ถูกใช้งาน และส่งให้ชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อประมวลผลต่อไป

จุดเด่นของระบบนี้ คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิแบตเตอรี่ได้ดีกว่าระบบระบายความร้อนด้วยอากาศรวมถึงการใช้แผ่นครีระบายความร้อน เนื่องจากน้ำมีค่าความจุทางความร้อนสูงกว่าอากาศ ระบบนี้สามารถเพิ่มสมรรถนะการระบายความร้อนโดยการเพิ่มอัตราการไหล แต่จุดด้อยของระบบนี้ คือ จะถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิภายนอกที่ใช้ระบายความร้อนจากหม้อน้ำออก

### 2.5.2.3. ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอริล



รูปที่ 2.23 ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอริล

จากรูปที่ 2.23 ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นโดยปกติแล้วเป็นระบบที่ใช้ในการทำ ความเย็นในห้องโดยสารของรถยนต์ (Cabin) แต่ในเทคโนโลยีปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ระบบนี้ร่วมกับการระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ ซึ่งจะอาศัยสารหล่อเย็นที่ได้นั้น ไปทำการระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์และระบายความร้อนในห้องโดยสารของรถยนต์ โดยส่วนประกอบหลักของระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นนี้คือ คอมเพรสเซอร์ (Compressor) คอยล์ร้อน (Condenser) คอยล์เย็น (Evaporator) วาล์วขยายตัว (Expansion valve) โดยหลักการทำงานของระบบนี้เริ่มจากคอมเพรสเซอร์เริ่มทำงาน จะดูดสารทำความเย็นที่ความดันต่ำ อุณหภูมิต่ำ ที่สถานะเป็นไอเข้ามาอัดความดันทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากนั้นไอที่มีความดันสูง อุณหภูมิสูง จะถูกส่งไปตามท่อไปที่คอนเดนเซอร์ ซึ่งคอนเดนเซอร์จะมีหน้าที่ระบายความร้อนของไอออกด้วยพัดลม จากนั้นไอจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ซึ่งของเหลวที่ออกมาจากคอนเดนเซอร์จะไหลแยกออกเป็นสองทางก่อนผ่านวาล์วขยาย เพื่อลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นพร้อมที่ดูดซับความร้อนได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ ทางแรกไหลไปที่แพ็คเกจเตอร์ ทางที่สองไหลไปที่คอยล์เย็นภายในห้องโดยสาร ในส่วนที่ไหลไปทางแพ็คเกจเตอร์นั้น เมื่อของเหลวที่ไหลผ่าน แพ็คเกจเตอร์จะคายความร้อน ทำให้สารทำความเย็นเดือดจากสถานะของเหลวกลายเป็นไอ โดยหลักการถ่ายเทความร้อนความร้อนแฝง ทำให้แพ็คเกจเตอร์นั้นมีอุณหภูมิที่ลดลง ในขณะที่ของเหลวส่วนที่ไหลไปที่คอยล์เย็นภายในห้องโดยสารนั้น การจะถูกทำให้เดือดกลายเป็นไอเช่นเดียวกัน โดยดูดซับความร้อนจากห้องโดยสาร ซึ่งมีพัดลมเป่าเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศในห้องโดยสารของรถยนต์ หลังจากนั้นสารทำความเย็นที่ได้รับความร้อนและกลายเป็นไอก็จะไหลกลับไปคอมเพรสเซอร์อีกครั้ง อันเป็นการทำงานครบวงจร ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมอุณหภูมิ คอมเพรสเซอร์สามารถถูกควบคุมความเร็วรอบในการสร้างอัตราการไหลของสารทำความเย็นสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากระบบปรับอากาศของยานยนต์ไฟฟ้ามีมอเตอร์ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ต่างหาก นอกจากนั้นยังสามารถติดตั้งวาล์วปิดเปิด เพื่อช่วยในการควบคุมอุณหภูมิแบบแยกส่วนสำหรับคอยล์เย็นในห้องโดยสารและแพ็คเกจเตอร์ ข้อดีของระบบระบายความร้อนนี้คือ สามารถใช้อุปกรณ์ร่วมกับชุดเดียวกับระบบปรับอากาศในรถยนต์มาใช้ระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้ลดต้นทุนของแพ็คเกจเตอร์

#### 2.5.2.4. ระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ

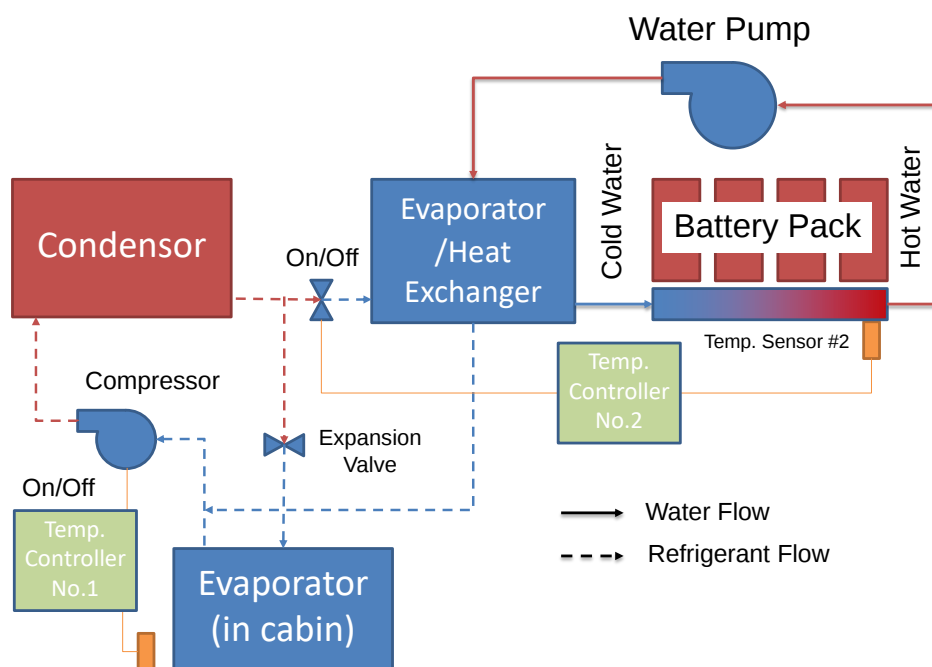
ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คเกจเตอร์โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็นตามรูปที่ 2.24 จะเป็นระบบระบายความร้อนที่มีความซับซ้อนที่สุด โดยจะเป็นระบบระบายความร้อนที่ใช้หลักการเดียวกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น โดยระบบนี้จะใช้ของเหลวซึ่งเป็นน้ำเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนออกจากตัวแพ็คเกจเตอร์ โดยน้ำไหลผ่านช่องต่างๆที่จัดทำ

ขึ้นภายในตัวแฟกแบตเตอร์เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดจากการทำงานของแบตเตอร์ออกไปภายนอกซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของแฟกแบตเตอร์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคล้ายกับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ แต่เนื่องจากการอาศัยการระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนออกจากแฟกแบตเตอร์ได้ ดังนั้นจึงจะต้องมีการใช้สารทำความเย็นจากระบบปรับอากาศเข้ามาช่วย ทำให้น้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนนั้นมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าภายนอก และเพื่อให้สามารถนำความร้อนออกจากแบตเตอร์แฟกได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแฟกแบตเตอร์โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็นประกอบด้วยอุปกรณ์และหน้าที่สำคัญดังนี้

- **คอมเพรสเซอร์ (Compressor)** อยู่นอกห้องโดยสารของรถยนต์ จะทำหน้าที่เพิ่มความดันของสารหล่อเย็นให้มีความดันสูงขึ้น โดยการเพิ่มความดันของสารหล่อเย็นนั้นจะทำให้สารหล่อเย็นนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย

- **คอนเดนเซอร์ (Condenser)** จะมีทำหน้าที่ระบายความร้อนของสารหล่อเย็นให้อุณหภูมิที่ต่ำลง และเปลี่ยนสถานะจากไอไปเป็นของเหลว โดยสารหล่อเย็นที่เป็นของเหลวจะถูกแบ่งเป็นสองทาง คือ ทางที่ไประบายความร้อนในห้องโดยสาร (Cabin) และทางที่ไปทำความเย็นให้กับน้ำที่จะถูกไหลผ่านแฟกแบตเตอร์ ซึ่งจะทำงานตามที่ชุดควบคุมอุณหภูมิกำหนด

- **วาล์วขยายตัว (Expansion valve)** จะทำหน้าที่ลดความดันของสารหล่อเย็น และเปลี่ยนสถานะของสารหล่อเย็น เมื่อสารหล่อเย็นมีความดันที่ต่ำลงและเปลี่ยนสถานะเป็นไอ จะทำให้สารหล่อเย็นมีอุณหภูมิที่ลดลง ซึ่งเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์



รูปที่ 2.24 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ีโดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็น

- คอยล์เย็น/อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Evaporator / Heat Exchanger) จะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนกับน้ำ โดยจะทำให้ น้ำร้อนที่ไหลออกมาจากแพ็คเกจเตอร์ีมีอุณหภูมิที่ต่ำลง
- ปั๊มน้ำ (Water Pump) จะทำหน้าที่บังคับให้น้ำหมุนเวียนในระบบแพ็คเกจเตอร์ีด้วยปริมาณที่เหมาะสม
- ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) จะติดอยู่กับผิวด้านข้างของแบตเตอรี่ จะคอยตรวจจับความร้อนที่เกิดขึ้น ขณะแบตเตอรี่ถูกใช้งาน และส่งให้ชุดควบคุมอุณหภูมิเพื่อประมวลผลต่อไป

## 2.6. เทคโนโลยีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

### 2.6.1. เทคโนโลยีต่างๆที่ถูกใช้อยู่ในปัจจุบันในยานยนต์ไฟฟ้ายี่ห้อต่างๆ

ระบบระบายความร้อนแบ่งออกได้สองประเภทคือการใช้การไหลของอากาศหรือการไหลวนของของเหลว โดยที่การเลือกใช้ประเภทของระบบระบายความร้อนขึ้นอยู่กับลักษณะของเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จากตารางที่ 2.2 รถยนต์ Tesla Model S มีปริมาณเซลล์แบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากกว่าชนิดอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากรถยนต์ดังกล่าวมีการใช้เซลล์ประเภททรงกระบอก (Cylindrical cell) ที่มีขนาดเล็กจึงทำให้สามารถบรรจุลงได้ในจำนวนที่มากกว่ารถยนต์ยี่ห้ออื่นที่ใช้เซลล์แบบกล่อง (Prismatic cell) หรือแบบถุง (Pouch cell)

ประเด็นที่น่าสนใจคือการระบายความร้อนของ Nissan leaf ที่เลือกใช้แบบการพาของอากาศ(Natural Air Convection) ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ขณะใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้ยานยนต์ไฟฟ้ารุ่นหลังจึงเริ่มพัฒนาระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่โดยใช้แนวคิดของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อควบคุมอุณหภูมิ (Active cooling system)

ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีการระบายความร้อนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน (ที่มา: SAE)

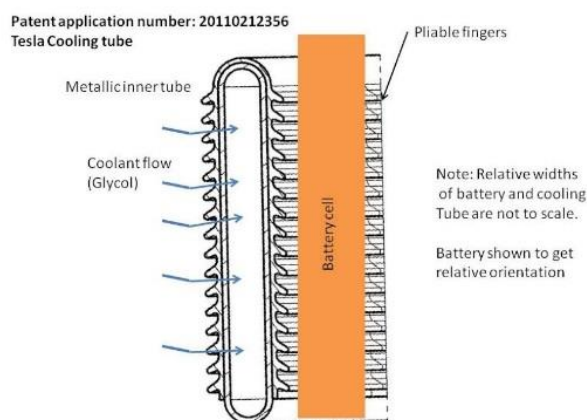
| ประเภทรถ                 | ประเทศ  | ปีที่จำหน่าย<br>(ค.ศ.) | ความจุ<br>(kWh) | ระยะทาง<br>(km) | จำนวน<br>เซลล์<br>(เซลล์) | ระบบระบายความร้อน                              |
|--------------------------|---------|------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------------------|
| Mitsubishi<br>i-MiEV     | ญี่ปุ่น | 2009                   | 16              | 100             | 88                        | การไหลวนของอากาศ (Forced<br>Air Convection)    |
| Nissan Leaf              | ญี่ปุ่น | 2010                   | 24              | 117             | 192                       | การพาของอากาศ (Natural<br>Convection)          |
| Ford Focus<br>(Electric) | อเมริกา | 2011                   | 23              | 112             | 98                        | การระบายความร้อนโดยของเหลว<br>(Liquid Cooling) |
| Tesla<br>Model S         | อเมริกา | 2012                   | 85              | 426             | 7104                      | การระบายความร้อนโดยของเหลว<br>(Liquid Cooling) |
| Honda Fit                | ญี่ปุ่น | 2012                   | 20              | 132             | 432                       | การไหลวนของอากาศ (Forced<br>Air Convection)    |
| VW e-Golf                | เยอรมัน | 2014                   | 24              | 129             | 264                       | การไหลวนของอากาศ (Forced<br>Air Convection)    |
| BMW i3                   | เยอรมัน | 2014                   | 22              | 130             | 96                        | การระบายความร้อนโดยของเหลว<br>(Liquid Cooling) |



รูปที่ 2.25 แพ็กแบตเตอรี่ของ Nissan leaf ที่มีการใช้การพาความร้อน(Natural Air Convection) [11]

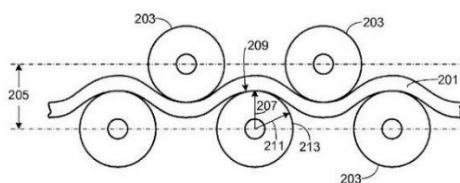
## 2.6.2. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Tesla

ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Tesla นั้นเป็นระบบระบายความร้อนแบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว (Liquid cooling) ซึ่งทาง Tesla นั้นได้ใช้ Glycol เป็นสารหล่อเย็นในระบบระบายความร้อน โดยที่แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Tesla จะทำการระบายความร้อนทางด้านผิวข้างของเซลล์แบตเตอรี่ เพราะฉะนั้นจึงได้ทำการออกแบบท่อโลหะขนาดเล็กและบางซึ่งภายในของท่อจะมี Glycol อยู่ ดังรูปที่ 2.26 โดยท่อโลหะขนาดเล็กจะคดไปมาอยู่ระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.27 หลักการทำงานของระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลวของ Tesla นั้นเมื่อแพ็กแบตเตอรี่มีอุณหภูมิมีค่าเกินค่าที่ได้กำหนดไว้ระบบจะทำการสั่งให้ปั๊มจ่าย Glycol ไหลผ่านภายในท่อโลหะที่ได้ออกแบบไว้ Glycol จะไหลผ่านเข้าทางเข้าท่อไปจนถึงทางออกของท่อ เมื่อ Glycol ไหลผ่านอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ที่มีค่าที่สูงนั้นจะลดลง ซึ่งระบบจะดำเนินแบบนี้เป็นวัฏจักร จนอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าเท่ากับค่าเริ่มต้นที่ได้กำหนดไว้ระบบจึงจะหยุดการทำงาน



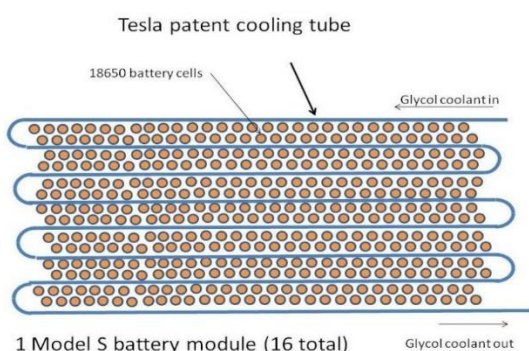
รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างภายในท่อระบายความร้อน [12]

Patent application number: 20110212356



รูปที่ 2.27 รูปแบบการวางท่อที่ใช้ระบายความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ [12]

โดยทั่วไป Tesla ได้ใช้เซลล์แบตเตอรี่ที่เป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical cell) ต่อรวมกันอยู่เป็นจำนวนมากภายใน 1 โมดูลแบตเตอรี่ ดังนั้นการวางท่อระบายความร้อนของ Tesla ใน 1 โมดูลแบตเตอรี่ของ Tesla จะมีลักษณะ ดังรูปที่ 2.28 ซึ่งการวางท่อระบายความร้อนของ Tesla จะมีลักษณะเช่นนี้เหมือนกันทุกโมดูลแบตเตอรี่

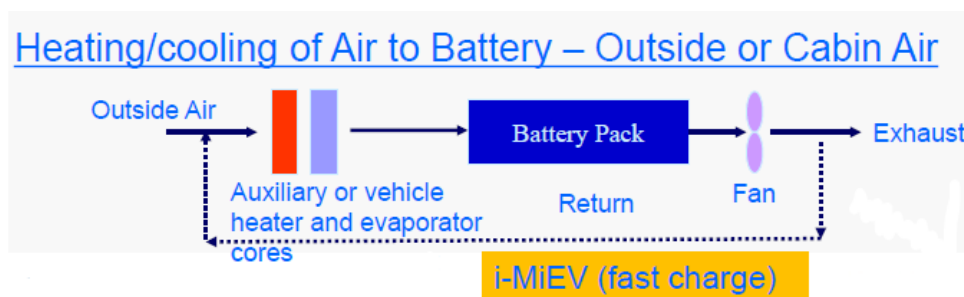


รูปที่ 2.28 แสดงทิศทางการวางท่อระบายความร้อนภายในโมดูลแบตเตอรี่ ของ Tesla Model S [12, 13]

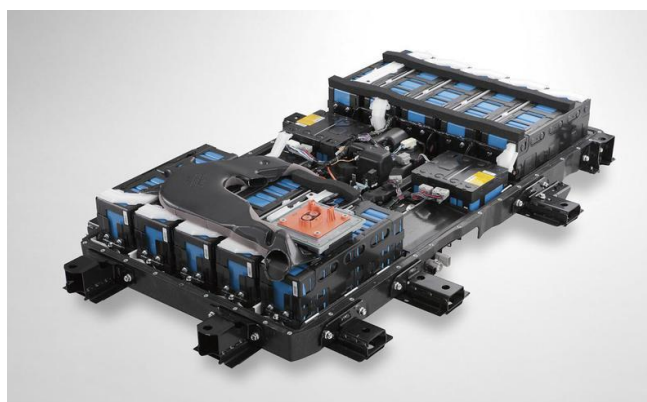
### 2.6.3. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ Mitsubishi

ระบบระบายความร้อนของ Mitsubishi นั้นเป็นระบบระบายความร้อนแบบการไหลวนของอากาศ (Forced air cooling) ซึ่งแนวคิดระบบระบายความร้อนของ Mitsubishi ที่ใช้การระบายความร้อนด้วยการไหลวนของอากาศนั้น จะประกอบไปด้วย แกนโลหะที่ทำให้เกิดความเย็นหรือแกนโลหะที่ทำให้เกิดความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศแต่ละภูมิภาคประเทศเพื่อที่จะใช้ในการให้ความเย็นหรือความร้อนแก่แพ็คเกจแบตเตอรี่และอีกส่วนที่สำคัญของระบบนี้ก็คือ พัดลมระบายอากาศ โดยหลักการทำงานของระบบระบายความร้อนด้วยการไหลวนของ Mitsubishi นั้นเมื่อแพ็คเกจแบตเตอรี่มีค่าอุณหภูมิที่สูงเกินค่าที่ได้กำหนดไว้ ระบบจะทำเปิดให้อากาศภายนอกเข้าสู่ทางเข้าโดยผ่านแกนโลหะที่มีความเย็นที่เกิดจากไอน้ำนั้น อากาศจะพาความเย็นเข้าสู่แบตเตอรี่เพื่อที่ให้อุณหภูมิ

ของแบตเตอรี่ลดลง หลังจากนั้นพัดลมจะดูดอากาศที่มีความร้อนที่อยู่ภายในแพ็คเกจแบตเตอรี่นั้นออกและป้อนกลับเข้าไปสู่ทางเข้าอีกเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 2.29 ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการให้ความร้อนแก่แพ็คเกจแบตเตอรี่เมื่อใช้ในสภาพภูมิอากาศที่เย็น แกนโลหะนั้นจะทำให้เกิดความร้อนและให้อากาศพาเข้าสู่แพ็คเกจแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแก่แพ็คเกจแบตเตอรี่



รูปที่ 2.29 แสดงแผนภาพของระบบการระบายความร้อนด้วยการไหลวนอากาศของ Mitsubishi [14]



รูปที่ 2.30 แสดงโครงสร้างระบบการระบายความร้อนด้วยการไหลวนอากาศของ Mitsubishi [14]

## 2.6.4. แนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ BMW

ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ BMW นั้นเป็นระบบระบายความร้อนแบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว (Liquid cooling) แต่จะต่างกับทาง Tesla เนื่องจากในระบบการระบายความร้อนของ BMW นั้นจะไม่มี Glycol เป็นตัวหล่อเย็นในระบบแต่จะมีสารหล่อเย็นแทน โดยแนวคิดระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ของ BMW นั้นจะทำการระบายความร้อนทางด้านล่างของแพ็คเกจแบตเตอรี่ ซึ่งท่อโลหะนี้เป็นช่องขนาดที่เท่าๆ กันขนานกันตลอดด้านล่างแพ็คเกจแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.31 หลักการทำงานของระบบระบายความร้อนของ BMW นั้นเมื่อ

อุณหภูมิของแพ็คเกจเตอร์มีค่าที่สูงเกินค่าที่กำหนดไว้ระบบจะทำการสั่งให้ปั๊มให้สารหล่อเย็นเข้าทางเข้าท่อระบายความร้อนผ่านไปยังช่องที่ขนานกันไปด้วยอัตราการไหลที่เท่าๆ กันเพื่อลดอุณหภูมิของแพ็คเกจเตอร์แต่ละแพ็คเกจเตอร์อย่างละเท่าๆ กัน เมื่ออุณหภูมิของแพ็คเกจเตอร์ถึงค่าที่กำหนดระบบก็จะสั่งให้ปั๊มหยุดการทำงานทำเช่นนี้เป็นวัฏจักร

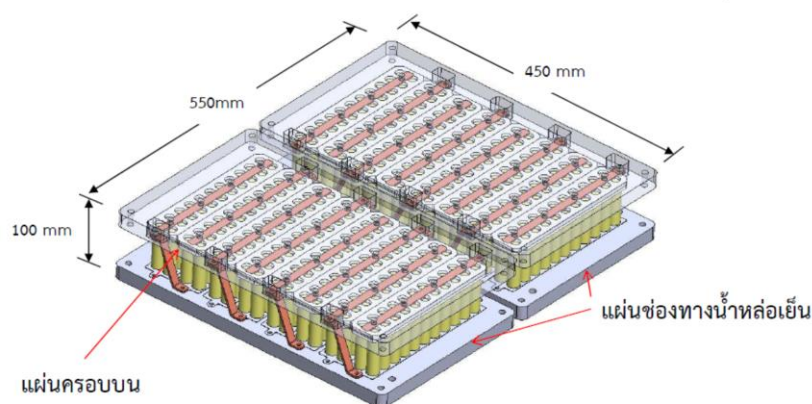


รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างท่อระบายความร้อนที่ของ BMW [15]

## 2.7. งานวิจัยโครงการที่ผ่านมาโดยทางทีมวิจัยนั้นมีประสบการณ์มีดังนี้

### 2.7.1. การวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

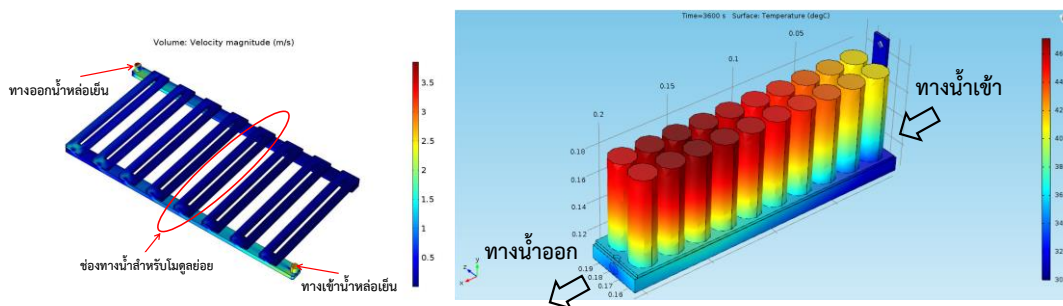
ซึ่งเป็นโครงรวมวิจัยกับทางสถาบันยานยนต์ เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้การแพ็คเกจเตอร์สู่อุตสาหกรรมในเชิงปฏิบัติ โดยแพ็คเกจดังกล่าวมีระบบระบายความร้อนติดตั้งอยู่ด้วย ดังรูปที่ 2.32 และรูปที่ 2.33 ซึ่งมีการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างการโครงการ เพื่อหารูปทรงและขนาดที่เหมาะสมดังแสดงรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.32 แสดงโมเดลขนาด 22P16S



รูปที่ 2.33 แสดงภาพจริงของแพ็คเกจเตอรีต้นแบบโครงการวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

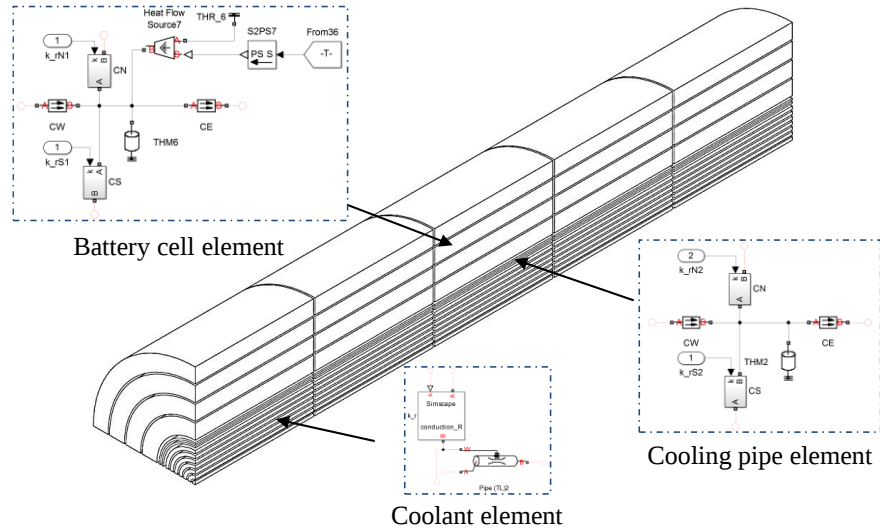


รูปที่ 2.34 ตัวอย่างผลของความเร็วในแต่ละช่องน้ำหล่อเย็นของแต่ละโมดูลย่อย (รูปซ้ายมือ) และการกระจายอุณหภูมิของโมดูลย่อย (รูปขวามือ)

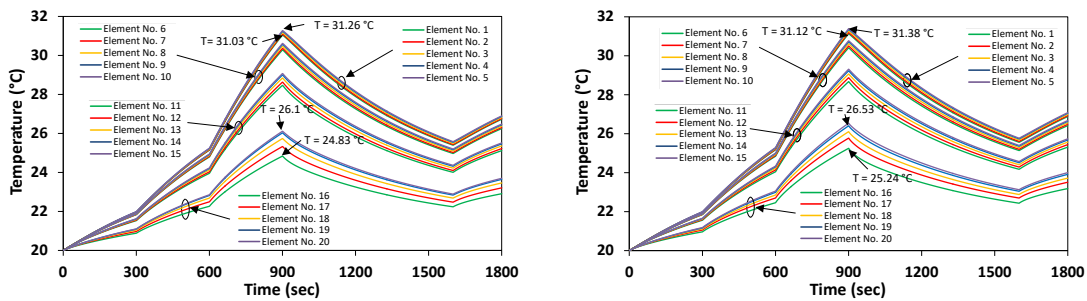
## 2.7.2. การดำเนินการวิจัยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่

โดยทำ Finite Element Method และ Computation Fluid Dynamic ใน MATLAB/SIMULINK แสดงในรูปที่ 2.35 เพื่อให้โมเดลของอุปกรณ์หลายๆ ชิ้น สามารถเชื่อมต่อกันได้แต่ยังคงความแม่นยำในการคำนวณเทียบเท่า FEM และ CFD ดังแสดงในรูปที่ 2.36 ซึ่งข้อได้เปรียบการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน SIMULINK คือ มีความเร็วในการคำนวณที่เร็วกว่า และสามารถเชื่อมต่อแบบจำลองเข้ากับระบบใหญ่ได้ ยกตัวอย่างเช่นระบบระบายความร้อนที่ใช้น้ำหล่อเย็นโดยมี P-Controller สำหรับควบคุมอัตราการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.37 โดยทำ

การปรับเปลี่ยน Proportional Gains, P ทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิดังในรูปที่ 2.38 โดยการใช้  $P = 0.25$  สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานในการจ่ายไฟให้ปั๊มน้ำ

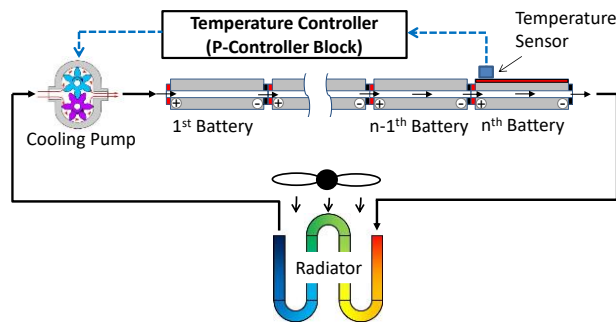


รูปที่ 2.35 การทำแบบจำลองสำหรับความร้อนใน SIMUNLINK โดยใช้ SIMSCAPE block

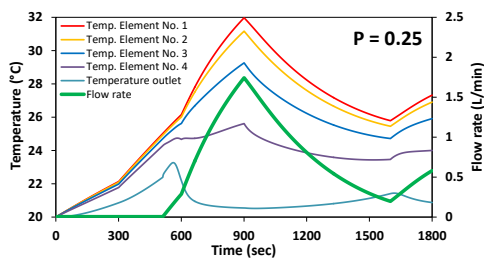


(1) ผลจากการคำนวณจาก FEM และ CFD software      (2) ผลจากการคำนวณจาก SIMULINK

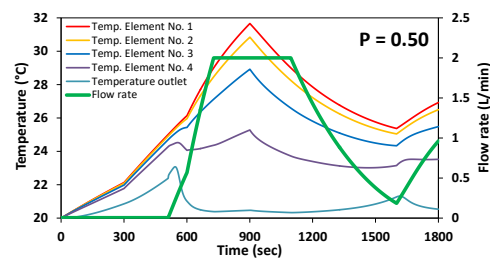
รูปที่ 2.36 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่าง FEM/CFD software กับ SIMULINK



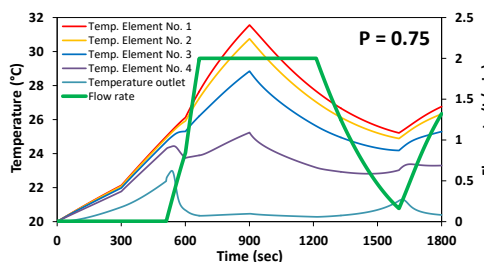
รูปที่ 2.37 กรณีศึกษาการระบายความร้อนจากแบตเตอรี่ด้วยน้ำหล่อเย็นแบบมีกล่อง P-Controller สำหรับควบคุมอัตราการไหล



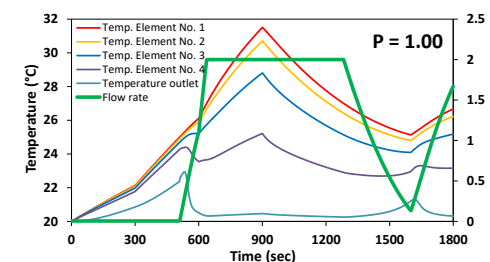
(1) ใช้  $P = 0.25$



(2) ใช้  $P = 0.50$



(3) ใช้  $P = 0.75$



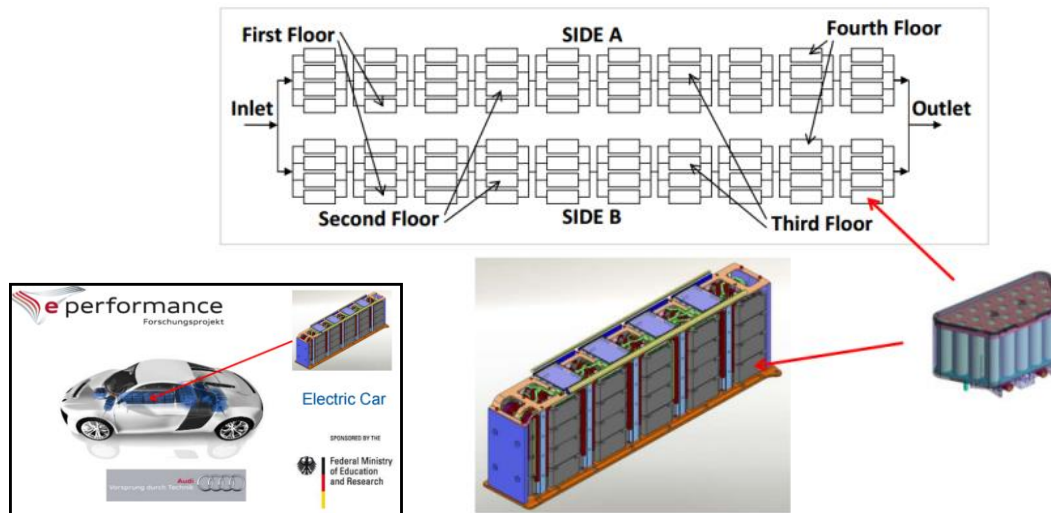
(4) ใช้  $P = 1.00$

รูปที่ 2.38 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลง Proportional Gains, P สำหรับควบคุมอัตราการไหลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

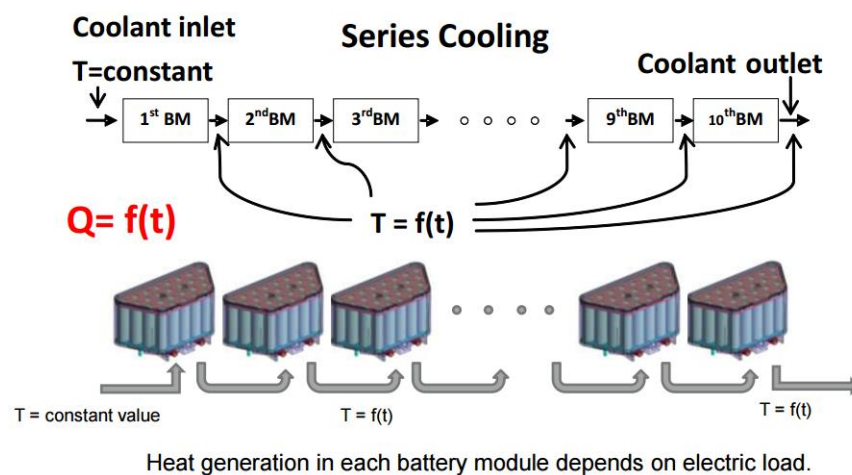
### 2.7.3. การดำเนินการวิจัยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบของบริษัท Audi

เนื่องจากระบบการระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจแบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 2.39 โดยมีเงื่อนไขการคำนวณดังแสดงรูปที่ 2.40 ทำให้ต้องสร้างเทคนิคในการคำนวณดังแสดงรูปที่ 2.41 โดยผสมผสานการเขียน

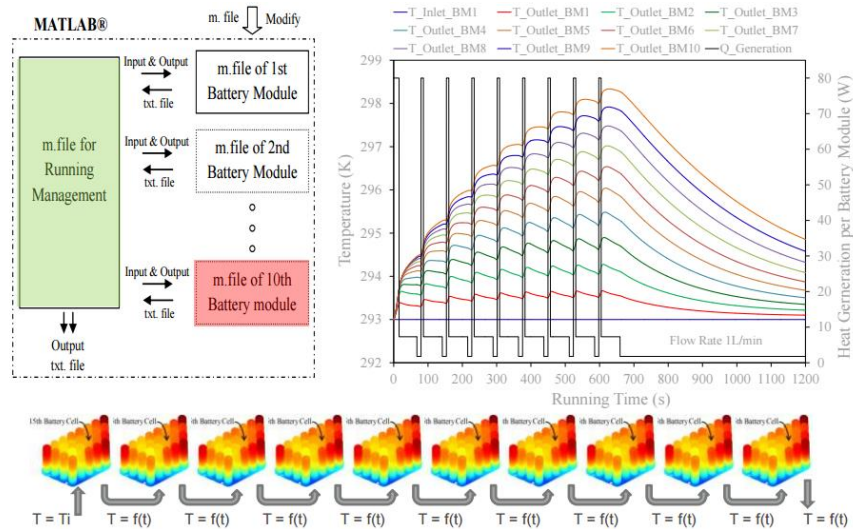
โค้ดใน MATLAB เพื่อจัดการคำนวณในโปรแกรม COMSOL multiphysics ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณต่อหนึ่งรอบทั้งหมดประมาณ 15 วัน จึงทำเกิดงานวิจัยการทำแบบจำลองใน MATHLAB/SIMULINK ซึ่งมีความรวดเร็วในการคำนวณมากกว่า



รูปที่ 2.39 ระบบระบายความร้อนแพ็คเกจเตอรี่ สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าต้นแบบของบริษัท Audi



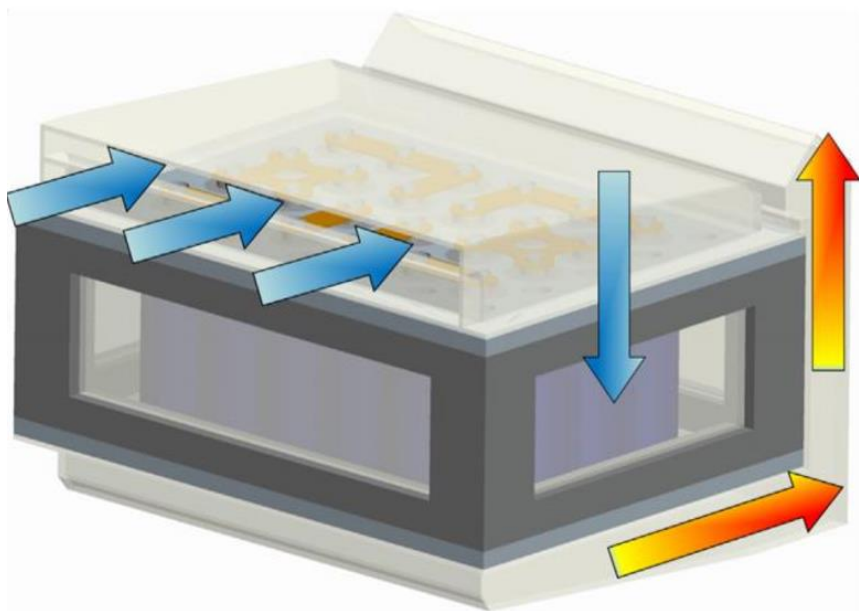
รูปที่ 2.40 เงื่อนไขในการคำนวณ



รูปที่ 2.41 เทคนิคในการคำนวณ และผลที่ได้จากการคำนวณ

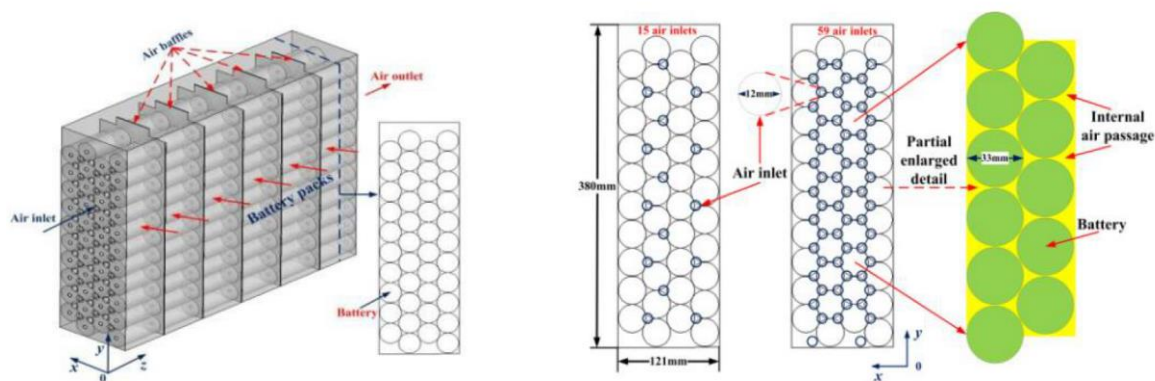
## 2.8. งานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้

Saw และคณะ [16] ได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ วิเคราะห์การสร้างความร้อนของเซลล์ LFP 38120 ซึ่งโมเดล CAD ของแบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลองและเส้นทางการไหลของอากาศที่ระบายความร้อนจะแสดงไว้ในรูปที่ 2.42 และได้ใช้การจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบคอนจูเกตในสภาวะคงตัว (steady state conjugate heat transfer) ในการดำเนินการเพื่อทำนายสมรรถนะด้านความร้อนของชุดแบตเตอรี่ โดยมีการแทนโครงสร้างที่เป็นขั้วไฟฟ้า (electrodes) และเยื่อเลือกผ่าน (separator) ที่อยู่ภายในเซลล์ LFP 38120 ให้เป็นโครงสร้างของแข็งแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (uniform solid structure) และมีการนำความร้อนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic thermal conductivity) ไปใช้กับแบตเตอรี่และมีอัตราการสร้างความร้อน 4 W (สอดคล้องกับอัตราการสร้างความร้อนโดยเฉลี่ยระหว่างอัตราการอัดประจุที่ 3C) ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองแบบสภาวะคงตัว แต่เนื่องด้วยในระหว่างการอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในช่วง SOC (state of charge) ต่างๆจะมีอัตราการสร้างความร้อน เพราะเป็นผลของความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ดังนั้นถ้าต้องการให้พฤติกรรมความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีลักษณะเหมือนการทดลองจะพิจารณาอัตราการสร้างความร้อนเป็นค่าคงที่ไม่ได้



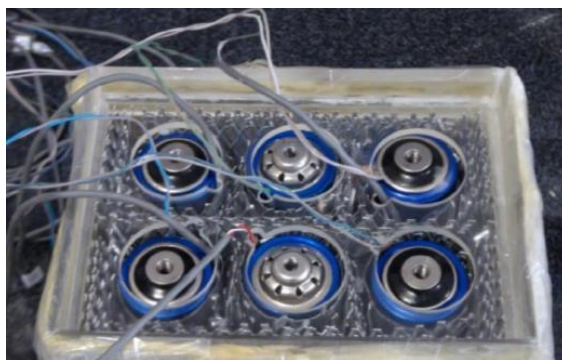
รูปที่ 2.42 โมเดล CAD ของแพ็คเกจเตอรี่และเส้นทางการไหลของอากาศเย็น

Lu และคณะ [17] ได้ทำการออกแบบและศึกษาความสามารถในการระบายความร้อนของอากาศกับแพ็คเกจเตอรี่ที่มีจำนวนเซลล์ปริมาณความหนาแน่นสูง มีจุดประสงค์เพื่อให้พื้นที่ใช้งานของแบตเตอรี่มีการใช้ประโยชน์สูงสุดและมีความหนาแน่นของพลังงานสูงสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการของสภาพการทำงาน ซึ่งภายในแพ็คเกจเตอรี่ประกอบไปด้วยเซลล์ทรงกระบอก 32650 จำนวน 252 เซลล์ มี 6 แถว แต่ละแถวมีแผ่นกั้นอากาศคั่นอยู่ รายละเอียดของกล่องแบตเตอรี่ที่มีเซลล์ปริมาณความหนาแน่นสูงจะแสดงในรูปที่ 2.43 ซึ่งช่องอากาศภายใน (พื้นที่สี่ เหลี่ยม) มีช่องว่างเล็กๆ ระหว่างเซลล์แต่ละเซลล์ของชุดแบตเตอรี่สำหรับให้อากาศไหลผ่าน โดยมีการพิจารณาเส้นทางการไหลสองแบบคือ 15 และ 59 ช่องระบายอากาศภายใต้สภาวะทางเข้าอากาศ ที่หลากหลายแบบที่มี 15 ช่อง ที่อัตราการไหล 12.2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดและความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดคือ 43 และ 22 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนแบบที่มี 59 ช่อง มีจำนวนช่องมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของอากาศ เพื่อให้กระจายอากาศได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศเย็นและพื้นผิวของแบตเตอรี่ ผลที่ได้ คือ อุณหภูมิสูงสุดและความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดคือ 37 และ 16 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดลดลง 6 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ 15 ช่อง แสดงให้เห็นว่าการ ปรับปรุงพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนระหว่างอากาศเย็นกับ พื้นผิวของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นแม้อัตราการไหลจะเท่าเดิม



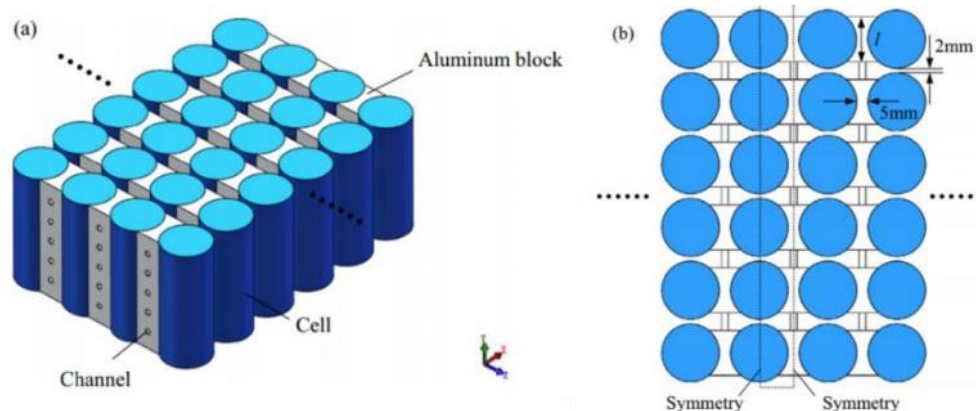
รูปที่ 2.43 แผนภาพของกล่องแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีปริมาณเซลล์ความหนาแน่นสูงที่กำหนดค่าไว้กับสองเส้นทางการไหล

Azizi และคณะ [18] ทำการศึกษาการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) และแผ่นตาข่ายลวดอลูมิเนียมสำหรับระบบการจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ LFP 38120 เพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของแบตเตอรี่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (50-55 องศาเซลเซียส) โดยใช้ Poly Ethylene Glycol 1000 (PEG1000) ที่มีจุดหลอมเหลว 35-40 องศาเซลเซียส เป็นสารเปลี่ยนเฟสและแผ่นตาข่ายลวดอลูมิเนียมถูกนำไปประยุกต์ใช้กับ PCM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อนและปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิของระบบดังแสดงในรูปที่ รูปที่ 2.44 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับหนึ่งเซลล์จากทั้งหมด โดยใช้ COMSOL ver. 5.1 และความถูกต้องของแบบจำลอง ได้รับการยืนยัน โดยเทียบข้อมูลจากการทดลองที่ได้ จากสถานะที่ต่างกัน ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ PCM และแผ่นตาข่ายอลูมิเนียมระหว่างเซลล์สามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวได้อย่างมีนัยสำคัญและทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ดีขึ้น ส่งผลให้สามารถลดอุณหภูมิผิวเซลล์สูงสุดที่อุณหภูมิห้องได้ 19% 21% และ 26% ที่ 1C 2C และ 3C ตามลำดับ และความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดในการทำงานของแบตเตอรี่ทั้งหมดต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส ถึงแม้การใช้สารเปลี่ยนเฟส (PCM) จะมีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนที่สูงกว่าแบบอื่นๆ แต่มีความซับซ้อนในการใช้งานจริงและปริมาณความหนาแน่นของจำนวนเซลล์ในการแพ็คเกจที่จำกัด

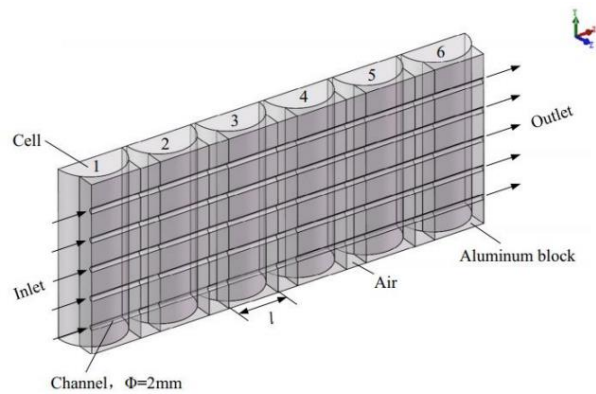


รูปที่ 2.44 แพ็กแบตเตอรี่ที่บรรจุ PEG1000 และแผ่นตาข่ายลวดอลูมิเนียม

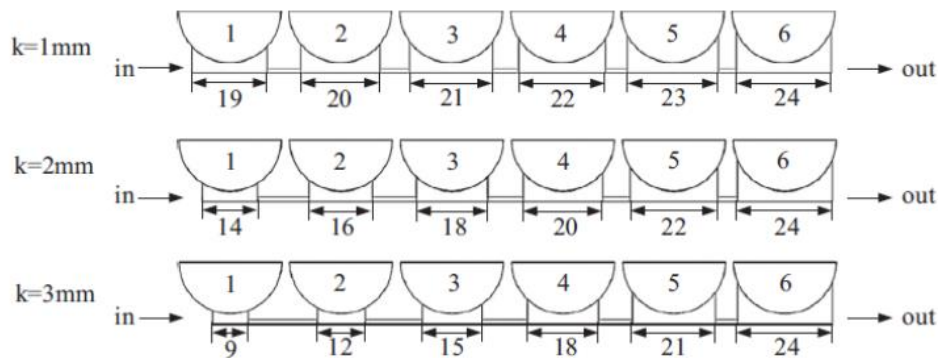
Rao และคณะ [19] ได้มีการออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวสำหรับโมดูล แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก 26650 ดังรูปที่ 2.45 ซึ่งเป็นโมดูลแบตเตอรี่ที่มีเซลล์แบตเตอรี่หกเซลล์ ตามช่องทางการไหล และมีระบบระบายความร้อนโดยอาศัยบล็อกอลูมิเนียมแสดงในรูปที่ 2.46 ซึ่งสามารถถ่ายโอนความร้อนจากแบตเตอรี่ไปยังน้ำหล่อเย็นที่เป็นสารทำความเย็นได้ ข้อเสียของรูปแบบนี้คือ ใช้เนื้อที่มากในการแพ็กและมีน้ำหนักมากด้วย สำหรับการออกแบบ มีการการออกแบบพื้นผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ แบตเตอรี่กับบล็อกอลูมิเนียมแบบเปลี่ยนแปลงได้ทั้ง 3 แบบเพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน 7 ระดับโมดูลดังแสดงในรูปที่ 2.47 เพื่อศึกษาผลกระทบของความยาวของบล็อกอลูมิเนียมและความเร็วของน้ำต่อสมรรถนะการระบายความร้อนในแบบจำลองนี้ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีพื้นผิวสัมผัสแบบเปลี่ยนแปลงดีกว่าระบบที่มีพื้นผิวสัมผัสคงที่เนื่องจากสามารถปรับปรุงความสม่ำเสมอของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้ง 3 แบบ อุณหภูมิสูงสุดจะลดลงเหลือเท่ากัน โดยอุณหภูมิสูงสุดจะลดลง 6% 14% และ 28% ที่ 0.5 m/s 1 m/s และ 2 m/s ตามลำดับ



รูปที่ 2.45 ลักษณะรูปแบบของระบบระบายความร้อนของเหลวสำหรับโมดูลแบตเตอรี่



รูปที่ 2.46 แผนผังสามมิติรูปแบบการทำความเย็นเหลว



รูปที่ 2.47 แผนภาพโครงสร้างของความยาวของบล็อกอลูมิเนียมในการเปลี่ยนแปลงเชิงเส้น

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการระบายความร้อนเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบบทรงกระบอก ด้วยของเหลวที่มีสมรรถนะที่ดีและระบบไม่มีความซับซ้อน แต่ยังคงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องไม่มากนัก ส่วนใหญ่นิยมออกแบบให้มีการระบายบริเวณด้านข้างตัวเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แต่ยังไม่มียานวิจัยที่มีการระบายความร้อนที่บริเวณหัวด้านล่างเซลล์เนื่องจากส่วนประกอบ และวัสดุภายในเซลล์แบตเตอรี่ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในแนวแกนทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าในแนวแกนรัศมีจึงส่งผลให้การระบายความร้อนที่บริเวณหัวด้านล่างเซลล์มีข้อได้เปรียบกว่าการระบายบริเวณด้านข้างตัวเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และการเปลี่ยนแปลงลักษณะของรูปแบบท่อที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ บริเวณหัวด้านล่างเซลล์เพื่อพัฒนาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในระดับโมดูลและระดับเซลล์ซึ่งจะทำการศึกษาในงานโครงการนี้

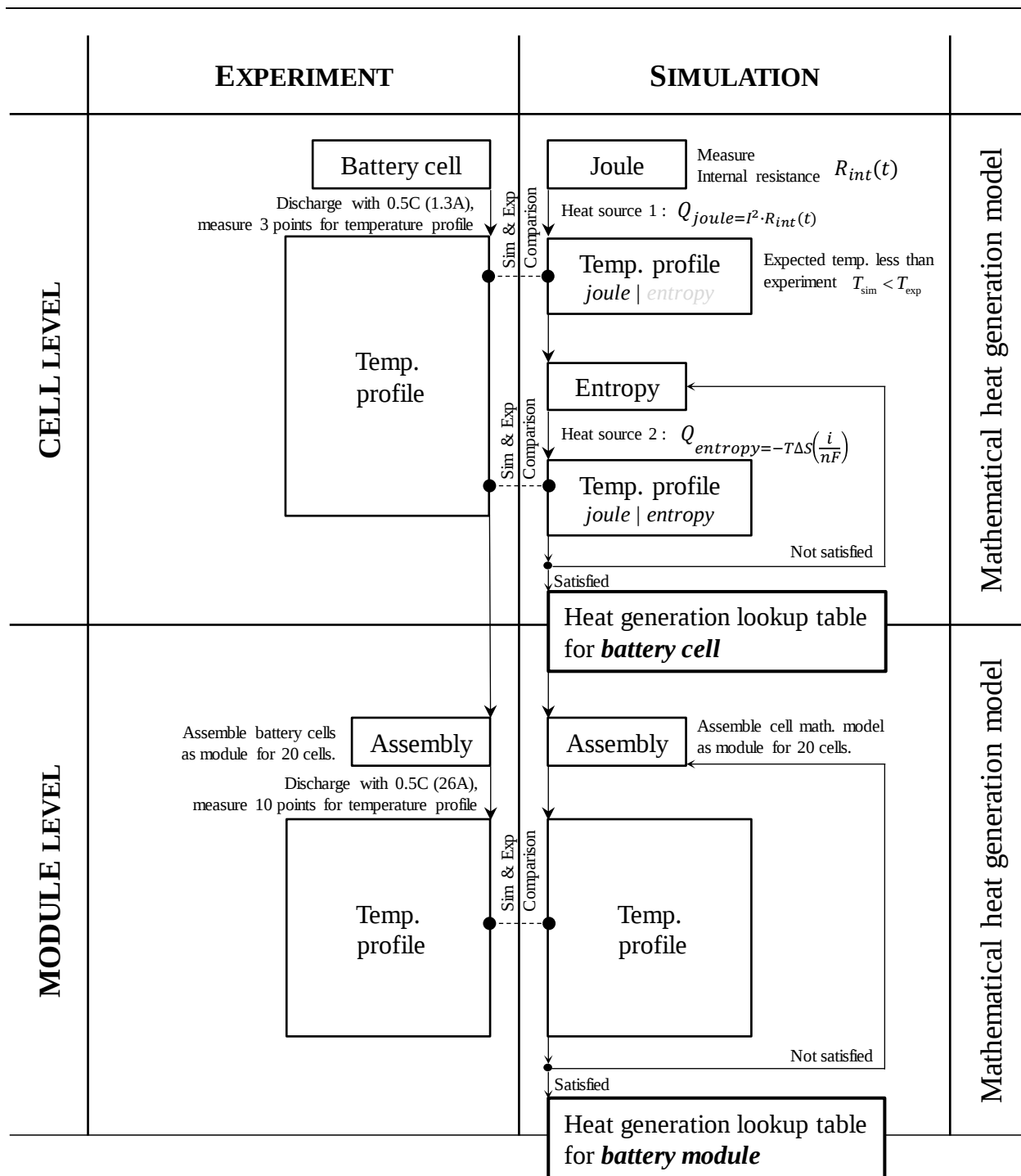
### 3. การสร้างและพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ระดับเซลล์ (Cell Level) และระดับโมดูลย่อย (Sub Module Level) ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางความร้อน จำเป็นต้องหาความร้อนสองส่วน ส่วนที่หนึ่งสามารถหาได้โดยตรงจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าที่ถูกใช้และนำมาคำนวณหาความร้อนจาก Joule Heating ส่วนที่สองคือ ความร้อนจาก Entropy Change ที่ไม่สามารถหาได้โดยตรง แต่จะใช้ผลต่างของอุณหภูมิจากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการแบบจำลอง (Simulation) เพื่อนำไปคำนวณหาความร้อนของ Entropy Change

รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางความร้อน ในช่วงแรกของการทำแบบจำลองจะเริ่มจากการสร้างในระดับเซลล์ (Cell level) โดยที่แบบจำลองจำเป็นจะต้องทำการทดลอง (Experiment) และการจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) ร่วมกัน ซึ่งผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองแบบในระดับเซลล์จะได้ผลลัพธ์ออกมาในรูปแบบของตาราง (Lookup table) ที่แสดงพฤติกรรมในแต่ละช่วงเวลาของแบตเตอรี่ ซึ่งผลของความร้อนที่เกิดขึ้นกับระดับเซลล์ในรูปแบบของ Lookup table สามารถประยุกต์ใช้ได้ทั้งระดับโมดูลย่อย และระดับแพ็คเกจแบตเตอรี่

แบบจำลองในระดับเซลล์ดังกล่าวนั้นจะถูกนำมาประกอบกันในลักษณะของโมดูลย่อย (Submodule) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในระดับโมดูลย่อย เช่นเดียวกันกับเซลล์แบตเตอรี่ (Battery cell) ที่ใช้ในการทดลองจะถูกนำมาประกอบเป็นโมดูลย่อย เพื่อใช้เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการทดลองและการจำลองในคอมพิวเตอร์ โดยที่ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองในระดับโมดูลย่อยนั้นจะออกมาในรูปแบบของตาราง (Lookup table) เช่นเดียวกับในระดับเซลล์

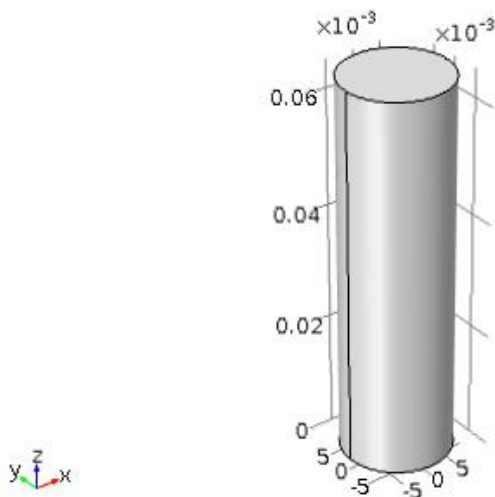
แบบจำลองในระดับโมดูลย่อยดังกล่าวข้างต้นจะถูกนำไปใช้ร่วมกับระบบระบายความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ส่งผลต่อความสามารถในการระบายความร้อน ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อน ©MTEC

### 3.1. ระดับเซลล์ (Cell Level)

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาระดับเซลล์ คือ เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก 18650 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่แสดงในตารางที่ 3.1 ภายในแบบจำลองทรงกระบอกจะถูกพิจารณาเป็นโครงสร้างของแข็งแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (uniform solid structure) และมีการนำความร้อนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic thermal conductivity) เพื่อแทนพฤติกรรมที่เกิดจากโครงสร้างที่เป็นขั้วไฟฟ้า (electrodes) และเยื่อเลือกผ่าน (separator) ที่อยู่ภายในเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก 18650 ( 18 คือ เส้นผ่าศูนย์กลาง 18 mm, 65 คือ ความยาวของแบตเตอรี่ 65 mm และ 0 ความหมายคือ รูปทรงกระบอก)



รูปที่ 3.2 ขนาดและรูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ในหน่วยเมตรที่ใช้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระดับเซลล์

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทั่วไปของแบตเตอรี่ไอออนทรงกระบอก 18650 ที่ใช้

| Diameter | Length | Maximum Voltage | Minimum Voltage | Capacity |
|----------|--------|-----------------|-----------------|----------|
| mm       | mm     | V               | V               | mAh      |
| 18       | 65     | 4.2             | 3.0             | 2600     |

เนื่องจากแบบจำลองระดับเซลล์ถูกสร้างมาเพื่อตรวจสอบผลเฉยพฤติกรรมความร้อนที่เกิดจากผลของการสร้างความร้อนในรูปปฏิกิริยาเคมีที่ Entropy change โดยให้ผลเฉยที่ได้จากโปรแกรมวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

(Finite Element Method, FEM) มีแนวโน้มของพฤติกรรมความร้อนใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่จริง หลังจากนั้นนำตัวแปรและเงื่อนไขที่ได้ตรวจสอบแล้วนำไปวิเคราะห์ในแบบจำลองระดับโมดูลย่อย และแพ็กต่อไป

### 3.1.1. สมการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในเซลล์แบตเตอรี่

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่จะถูกตรวจสอบในแบบจำลองระดับเซลล์ก่อนนำไปพิจารณาในแบบจำลองระดับโมดูลย่อย โดยใช้สมการความร้อนสมการที่ 2.3 (Heat equation) เป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์การนำความร้อนที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time dependent) เพื่อทราบการกระจายอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ ดังสมการที่ 2.3 และคุณสมบัติวัสดุภายในเซลล์แบตเตอรี่ที่ใช้ในแบบจำลองความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติวัสดุภายในเซลล์แบตเตอรี่

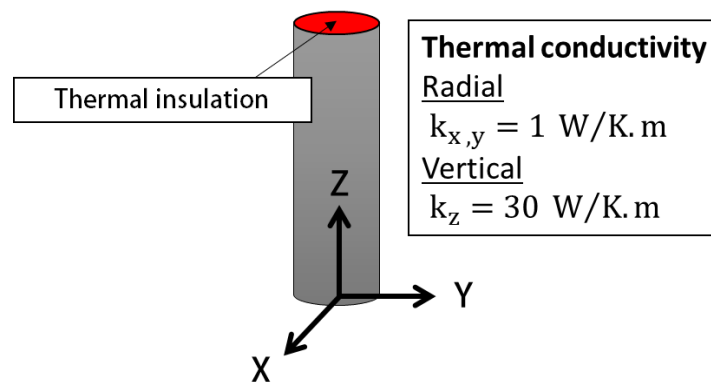
| Material | Density           | Specific heat | Thermal conductivity        |
|----------|-------------------|---------------|-----------------------------|
|          | kg/m <sup>3</sup> | J/(kg·K)      | W/(m·K)                     |
| Battery  | 2300              | 800           | 30 in z axis<br>1 in r axis |

เทอม  $(\rho_b C_{p,b} \frac{\partial T}{\partial t})$  คือ เทอมที่ขึ้นกับเวลา (Transient term) อธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป เทอม  $(\nabla \cdot (k_b \nabla T), \frac{\partial}{\partial x}(k_b \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_b \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_b \frac{\partial T}{\partial z}))$  อธิบายการนำความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่ (Conduction term) และเทอม  $Q_{battery}$  คือ พลังงานความร้อนที่สร้างขึ้นภายในเซลล์แบตเตอรี่ ประกอบไปด้วย ผลของการสร้างความร้อนในรูป Joule heating และผลของการสร้างความร้อนในรูปปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ Entropy change ดังสมการที่ 2.4 ซึ่งเป็นเทอมที่จะได้รับการตรวจสอบในแบบจำลองระดับเซลล์ เพื่อให้ผลเฉลยที่ได้มีแนวโน้มของพฤติกรรมความร้อนเหมือนการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่จริง

เทอมผลของการสร้างความร้อนในรูป Joule heating ( $Q_{joule}$ ) หาได้จากสมการที่ 2.7 เนื่องจาก SOC กับอุณหภูมิของเซลล์มีผลต่อปริมาณค่าความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่จึงไม่สามารถพิจารณาเป็นค่าคงที่ได้ ดังนั้นค่าความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแบตเตอรี่ ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าจะกำหนดตามจำนวนของ C-rate ที่พิจารณา

### 3.1.2. เงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระดับเซลล์

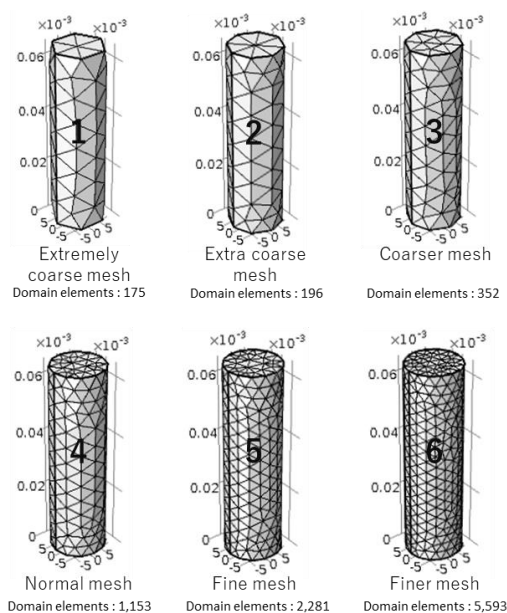
การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างแบบจำลองกับสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณที่สัมผัสกับอากาศ  $h = 15.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  บริเวณผิวแบบจำลองขั้วบวกของเซลล์แบตเตอรี่ 18650 มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางความร้อน (Thermal insulation) คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวแบบจำลองขั้วบวกกับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากภายในขั้วบวกประกอบไปด้วยอุปกรณ์ป้องกัน และมีการนำความร้อนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic thermal conductivity) ดังรูปที่ 3.3 และเงื่อนไขเริ่มต้นในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นภายในแบบจำลองเท่ากับอุณหภูมิห้อง  $T(t_0) = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$



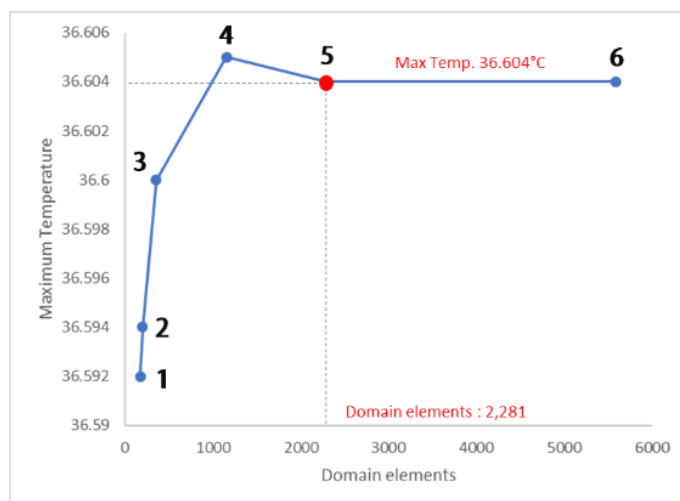
รูปที่ 3.3 บริเวณที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางความร้อน

### 3.1.3. การตรวจสอบความแม่นยำของ mesh ในแบบจำลองระดับเซลล์

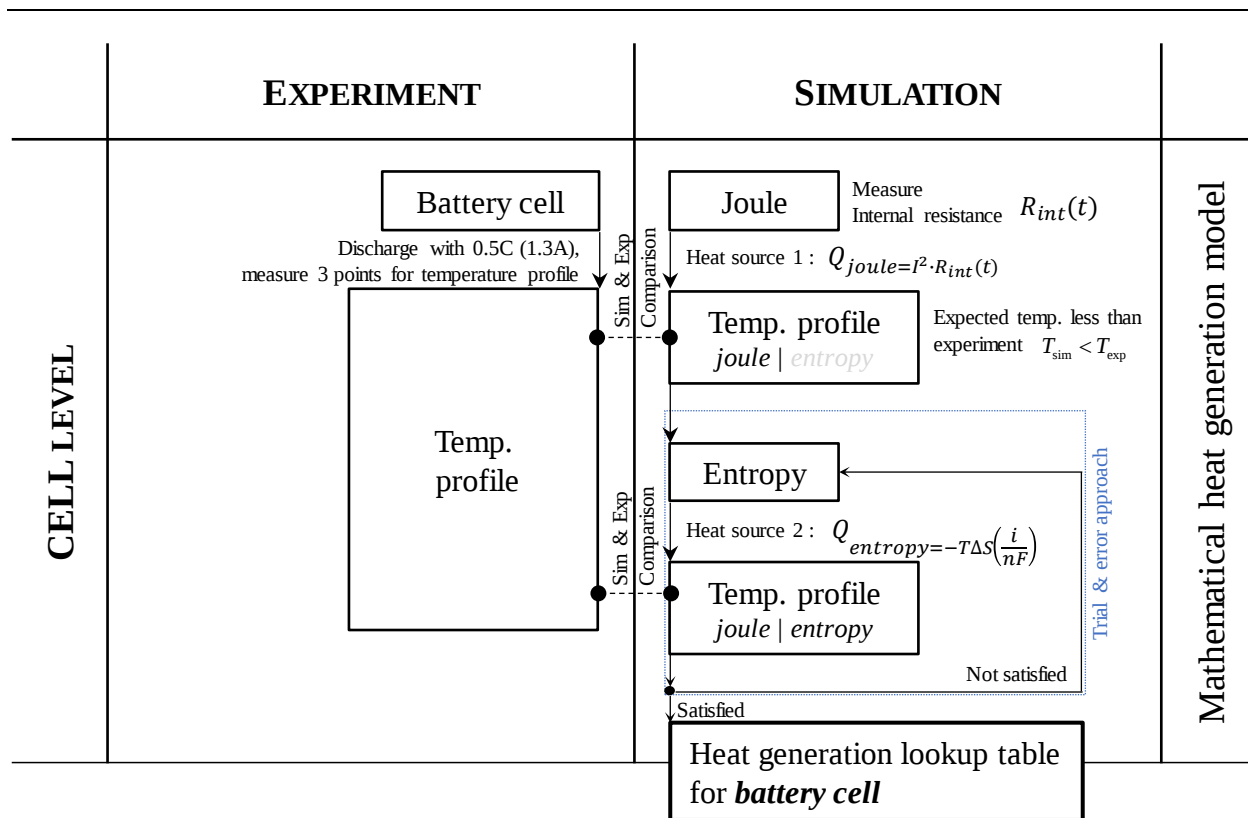
ซึ่งในการคำนวณทั้งกรณีที่มีแต่ผลของ Joule heating เพียงอย่างเดียว และกรณีที่มี ทั้งผลของ Joule heating และ Entropy change เป็นการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม Finite Element Method (FEM) โดยระดับ mesh ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ Fine mesh ที่มี 2,281 Domain mesh ซึ่งให้ความแม่นยำและได้ทำการเทียบจำนวน Domain mesh ที่มากกว่านี้แล้วก็ไม่ส่งผลเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ระดับ mesh ที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำในการวิเคราะห์ระดับเซลล์



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความแม่นยำที่ระดับ mesh ต่างๆ

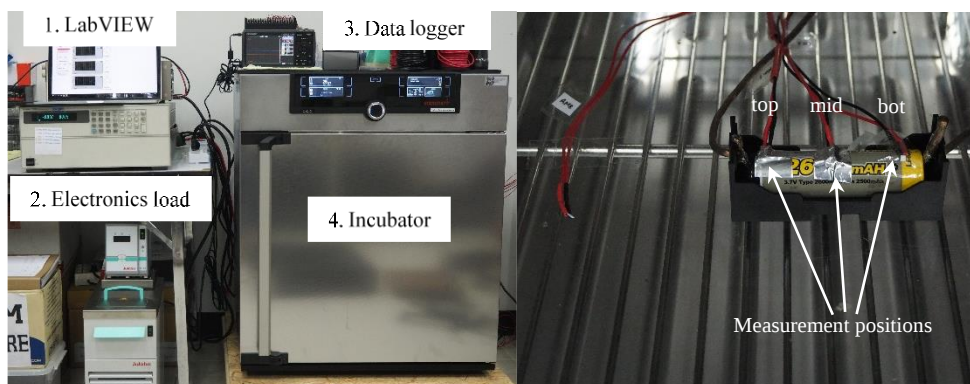


รูปที่ 3.6 แผนผังการสร้างแบบจำลองในระดับเซลล์ ©MTEC

จากรูปที่ 3.6 การทดลองจะทำการคายประจุไฟฟ้า (Discharge) ที่อัตรา 1.3 แอมแปร์ หรือ 0.5C โดยอุณหภูมิของแบตเตอรี่จะถูกบันทึกในแต่ละเวลาเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างแบบจำลอง จากนั้นทำการจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) ในขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นด้วยแหล่งความร้อนจากแหล่งเดียวคือ Joule heating ที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 โดยสมการนี้ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จำเป็นต้องได้รับการวัดซึ่งจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับปริมาณแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลลัพธ์ของการจำลองถูกคาดการณ์ไว้ว่าจะต้องน้อยกว่าผลจากการทดลองเนื่องจากผลลัพธ์ของการจำลองนั้นประกอบด้วยแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียว ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองโดยตรงกับการจำลองด้วยแหล่งความร้อนเพียงแหล่งเดียวนั้นยังขาดแหล่งความร้อนที่หายไปจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Heat generation due to entropy change) ภายในแบตเตอรี่ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะใช้ข้อมูลความร้อนของเอนโทรปีจาก Y. Reynier [10] และปรับค่าจนได้ใกล้เคียงกับรูปแบบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงที่วัดได้จากแบตเตอรี่

วิธีการดังกล่าวสามารถลดขั้นตอนได้โดยการนำรูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่มาสร้างแหล่งความร้อนได้โดยตรง แต่วิธีการที่ใช้ในรายงานฉบับนี้จะทำให้เห็นถึงความร้อนที่เกิดจากแหล่งความร้อนทั้งสองว่ามีสัดส่วนอย่างไร ข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ต่อยอดในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้ด้วย

### 3.1.4. การทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery cell discharge) ระดับเซลล์



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ในการทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่

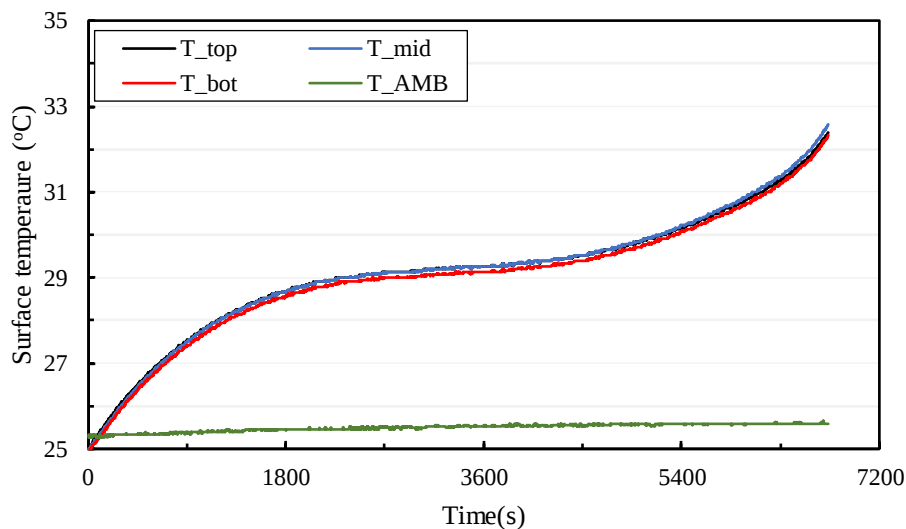
#### 3.1.4.1. วิธีทำการทดลอง

1. นำเซลล์แบตเตอรี่ใส่ลงในรางถ่านเพื่อเตรียมสำหรับการคายประจุไฟฟ้า
2. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความร้อนจากแบตเตอรี่บริเวณที่ผิวด้านข้างของเซลล์แบตเตอรี่
3. นำรางถ่านที่ใส่เซลล์แบตเตอรี่เข้าไปวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) เพื่อควบคุมอุณหภูมิตามต้องการ
4. ใช้ชุดควบคุมในคอมพิวเตอร์จากโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุม Electronics load ให้คายประจุไฟฟ้าจากเซลล์แบตเตอรี่ที่ 1.3 แอมแปร์ หรือ (0.5C) และหยุดการคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่เมื่อแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า 3 โวลต์
5. บันทึกค่าอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ด้วยอุปกรณ์ Data logger

### 3.1.4.2. เงื่อนไขการทดลอง

| ตัวแปรที่กำหนด          | ค่าที่กำหนด                          |
|-------------------------|--------------------------------------|
| อัตราการคายประจุไฟฟ้า   | 1.3 แอมแปร์ (0.5C ของเซลล์แบตเตอรี่) |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม     | 25 องศาเซลเซียส                      |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์                |

### 3.1.4.3. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 3.8 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าสูงในช่วงต้น สาเหตุคือความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่มาจากแหล่งความร้อนทั้งสองเริ่มเกิดการนำความร้อน (Conduction) จากภายในเซลล์ของแบตเตอรี่ออกมายังวัสดุที่เป็นโลหะภายนอกและเก็บสะสมอยู่ในเนื้อโลหะ (Sensible heat) จนทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวของเซลล์แบตเตอรี่ทำให้เกิดการพาความร้อน (Convection) จากผลต่างของอุณหภูมิของบริเวณผิวของเซลล์แบตเตอรี่และอากาศรอบข้าง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแหล่งความร้อนภายในแบตเตอรี่และการพาความร้อนจะมีค่าสมดุลกันในช่วง 1800 วินาที ถึงประมาณ 4000 วินาที จึงทำให้อุณหภูมิมียุคค่อนข้างคงที่ดัง

แสดงในรูปที่ 3.8 และในช่วงท้ายของกระบวนการคายประจุไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่ ในช่วงที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลง รวมไปถึงความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีที่สูงขึ้นอีกด้วย โดยที่ความร้อนจากทั้งสองแหล่งที่เพิ่มขึ้นนั้นมีความมากกว่าการพาความร้อนที่บริเวณผิวของเซลล์แบตเตอรี่ จึงทำให้ความร้อนสะสมในเนื้อโลหะของเซลล์แบตเตอรี่มีมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในช่วงท้ายของการคายประจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นดังผลลัพธ์ที่ได้

อย่างไรก็ตามการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเซลล์แบตเตอรี่ทั้งสามตำแหน่งนั้น ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เพื่อความสะดวกในการใช้งานเมื่อประกอบกันเป็นระบบใหญ่ อุณหภูมิที่ตำแหน่งกลางของเซลล์แบตเตอรี่ จะถูกนำมาใช้เพียงค่าเดียวในการใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงของแบตเตอรี่จากการทดลอง

### 3.1.5. การจำลองโดยใช้แหล่งความร้อน Joule heating

แหล่งความร้อนของ Joule heating นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 ซึ่งในการคำนวณสมการนี้ จำเป็นต้องทราบกระแสไฟฟ้าที่ใช้และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ โดยที่กระแสที่ถูกใช้ในการทดลองคือ 1.3 แอมแปร์ แต่ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั้นจะต้องทำการวัดค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จากแรงดันไฟฟ้าที่สถานะต่าง ๆ ของแบตเตอรี่

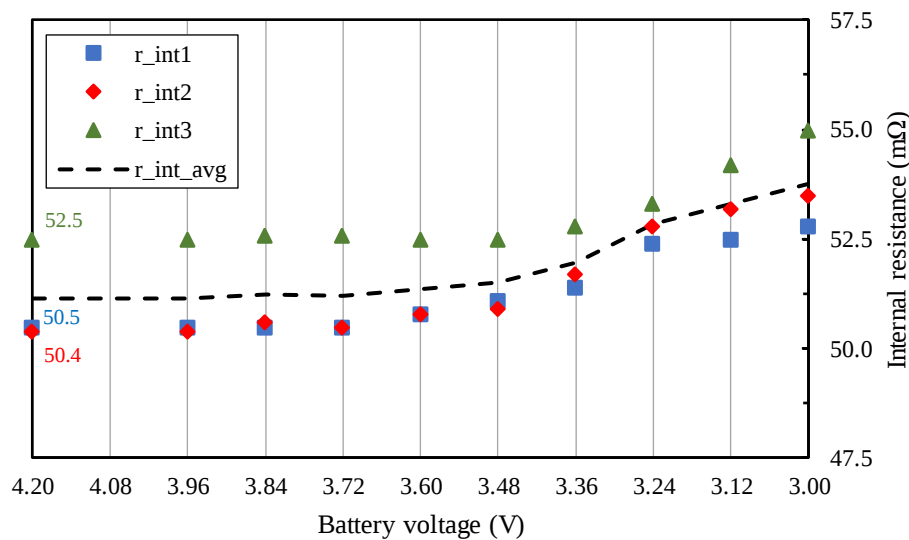


รูปที่ 3.9 การวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่

### 3.1.5.1. วิธีทำการทดลอง

1. อัดประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4.2 โวลต์
2. ใช้เครื่องมือวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ (Battery tester) เพื่อวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่
3. ทำซ้ำข้อ 1. – 2. แต่ทำการคายประจุไฟฟ้าจากเซลล์แบตเตอรี่ออกจนกระทั่งค่าสถานะของแบตเตอรี่ (State of charge: SOC) ลดลงเหลือ 0.9, 0.8, 0.7, ... , 0.2, 0.1 และ 0 ตามลำดับ
4. นำค่าความต้านทานภายในจากการวัดดังกล่าวมาคำนวณในโปรแกรมจำลองเพื่อหาค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาต่าง ๆ

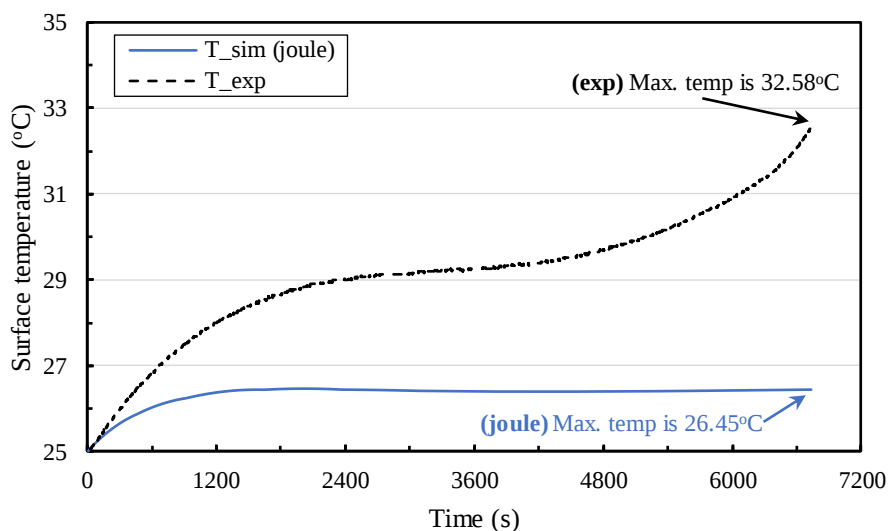
### 3.1.5.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 3.10 ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่แรงดันต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นว่าเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ลดลง ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองกับเซลล์แบตเตอรี่ทั้งสามเซลล์ที่มีความต้านทานภายในเริ่มต้นต่างกัน แต่ผลลัพธ์พฤติกรรม的增加ของความต้านทานภายในทั้งสามเซลล์นั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน โดยค่าที่ได้จากการวัดนั้นจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณตามสมการที่ 2.6 เช่นกัน

รูปที่ 3.11 แสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ได้จากแหล่งความร้อน Joule heating เห็นได้ชัดว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการจำลองนั้นมีค่าน้อยกว่าผลลัพธ์จากการทดลองตามที่ได้คาดการณ์ไว้ในตอนแรก อย่างไรก็ตามส่วนต่างของอุณหภูมินี้จะถูกเติมเต็มด้วยแหล่งความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี



รูปที่ 3.11 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C ที่ได้จากแหล่งความร้อน Joule heating

### 3.1.6. แหล่งความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Heat generation due to entropy change)

แหล่งความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5 แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีนั้นไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลของ Y. Reynier [10] ที่เคยได้ทำการทดลองกับเซลล์แบตเตอรี่ชนิดเดียวกันมาเป็นข้อมูลอ้างอิงแรกในการคำนวณหาค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีนี้ ซึ่งผลลัพธ์จากการใช้ค่าจากข้อมูลดังกล่าวนั้นยังได้รับค่าที่แตกต่างกับผลการทดลองจริงค่อนข้างมาก แต่ทั้งนี้ได้ทำการปรับค่าจนกระทั่งผลลัพธ์จากการใช้ข้อมูลดังกล่าวนี้มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ได้จริงและจำลองใหม่เพื่อหาการรู้เข้าของผลลัพธ์ที่ต้องการ ซึ่งทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี โดยจะทำการปรับเพิ่มค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีเพื่อไปรวมกับค่าความร้อน Joule heating จนกว่าค่าอุณหภูมิจากแบบจำลองจะใกล้เคียงกับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งค่าความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากค่าเอนโทรปีหลังจากได้ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นข้อมูลอยู่ในรูปแบบ Look-Up Table

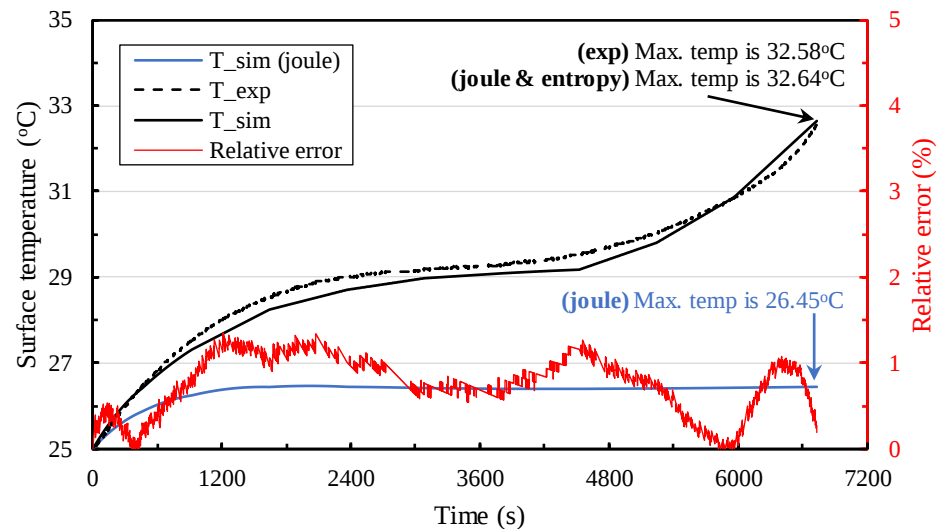
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีขณะดึงไฟฟ้า 0.5C ในรูปแบบ Look-Up Table

| Time (s) | Heat Generation (W) | Time (s) | Heat Generation (W) |
|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 0        | 0.045               | 3960     | 0.180               |
| 360      | 0.068               | 4320     | 0.180               |
| 720      | 0.050               | 4680     | 0.180               |
| 1080     | 0.145               | 5040     | 0.180               |
| 1440     | 0.155               | 5400     | 0.230               |
| 1800     | 0.160               | 5760     | 0.255               |
| 2160     | 0.165               | 6120     | 0.280               |
| 2520     | 0.170               | 6480     | 0.305               |
| 2880     | 0.180               | 6840     | 0.330               |
| 3240     | 0.180               | 7200     | 0.355               |
| 3600     | 0.180               |          |                     |

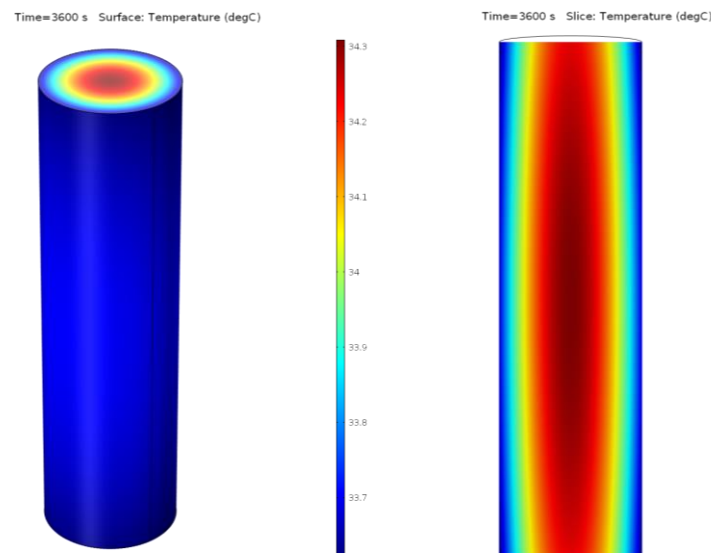
จากตารางที่ 3.3 ความร้อนที่เกิดขึ้นในระดับเซลล์สามารถประยุกต์ใช้ได้กับระดับโมดูลย่อยและโมดูล ยกตัวอย่างเช่น เมื่อมีการต่อเซลล์เข้ากัน 1,000 เซลล์ สำหรับหนึ่งโมดูล ไม่ว่าจะต่อแบบขนานหรืออนุกรม ในทาง ทฤษฎีค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์จะเท่ากัน เนื่องจากคุณภาพของเซลล์มีค่าใกล้เคียงก่อนการประกอบ โดย ค่าความร้อนของทั้งโมดูลจะมีค่าเท่ากับ 1,000 คูณกับค่าความร้อนสูงสุดของ Joule Heating และ Entropy Change ในการออกแบบระบบระบายความร้อนต้องออกแบบให้ระบบสามารถรองรับแบตเตอรี่จ่ายความร้อน สูงสุดได้ ในกรณีแบตเตอรี่ต้องจ่ายไฟฟ้าสูงสุดแบบต่อเนื่อง หรืออย่างน้อย 80% ของความร้อนสูงสุด ในกรณีไม่มี

การจ่ายไฟฟ้าสูงสุดแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้จำนวนเปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับค่าการจ่ายไฟฟ้า โดยความร้อนสูงสุดของ Joule Heating จะเกิดขึ้นที่ C-rate สูงสุด ในขณะที่ความร้อนสูงสุดของ Entropy change จะเกิดที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ ก่อนแบตเตอรี่หมด (Cut-off Voltage)

### 3.1.6.1. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 3.12 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C (ได้จากแหล่งความร้อนทั้งสอง)



รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของอุณหภูมิในเซลล์แบตเตอรี่

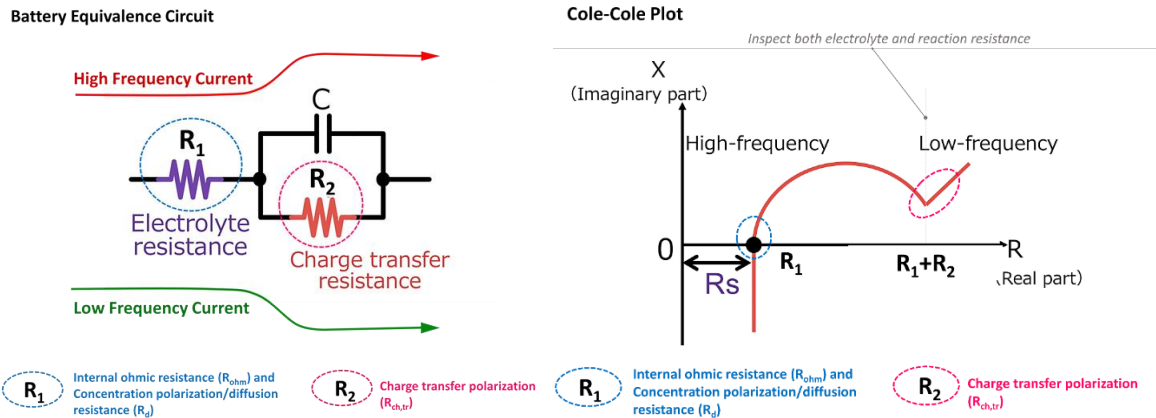
หลังจากนำค่าความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีรวมกับค่าความร้อนจากแหล่งความร้อน Joule heating ลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง จากรูปที่ 3.12 จะเห็นว่า ผลลัพธ์จากการแบบจำลองของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้คือ 5% ซึ่งผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์

รูปที่ 3.13 แสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในเซลล์แบตเตอรี่ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีค่าสูงที่สุดที่แกนกลางของแบตเตอรี่และมีค่าต่ำสุดที่บริเวณผิวของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของการพาความร้อนโดยที่ผิวของแบตเตอรี่มีพื้นที่มากจึงทำให้ความร้อนปริมาณมากถูกพาไปด้วยการพาความร้อนด้วยอากาศจากผลต่างของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Natural convection) ในส่วนด้านบนและด้านล่างของเซลล์แบตเตอรี่นั้นก็เกิดการพาความร้อนเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากพื้นที่ผิวที่น้อยกว่าจึงทำให้ความร้อนถูกถ่ายเทออกไปได้น้อยกว่าจึงทำให้มีอุณหภูมิที่สูงกว่าบริเวณผิวด้านข้างของแบตเตอรี่ ในทางกลับกันแกนกลางของแบตเตอรี่ไม่สามารถถูกถ่ายเทด้วยการพาความร้อนได้ทำให้ความร้อนสะสมอยู่ภายในเนื้อวัสดุและมีความร้อนสูงที่สุด

อีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้การกระจายตัวเกิดขึ้นดังรูปที่ 3.13 คือการตั้งค่าการนำความร้อนในเนื้อวัสดุ เนื่องจากโครงสร้างภายในของแบตเตอรี่ทรงกระบอกจะทำให้การนำความร้อนในแกนรัศมี (Radial thermal conductivity) มีค่าน้อยกว่าการนำความร้อนในแนวตั้ง (Vertical thermal conductivity) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบสามมิติที่ซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง การกำหนดคุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) ให้โครงสร้างที่เรียบง่าย (ทรงกระบอกตัน) จึงเป็นทางเลือกที่ดีกว่า ในกรณีนี้จึงทำให้แบตเตอรี่ที่ใช้ในการจำลองมีค่าการนำความร้อนในแกนรัศมีและแกนตั้งต่างกันเพื่อให้เกิดการกระจายความร้อนดังกล่าวตามพฤติกรรมและโครงสร้างของแบตเตอรี่

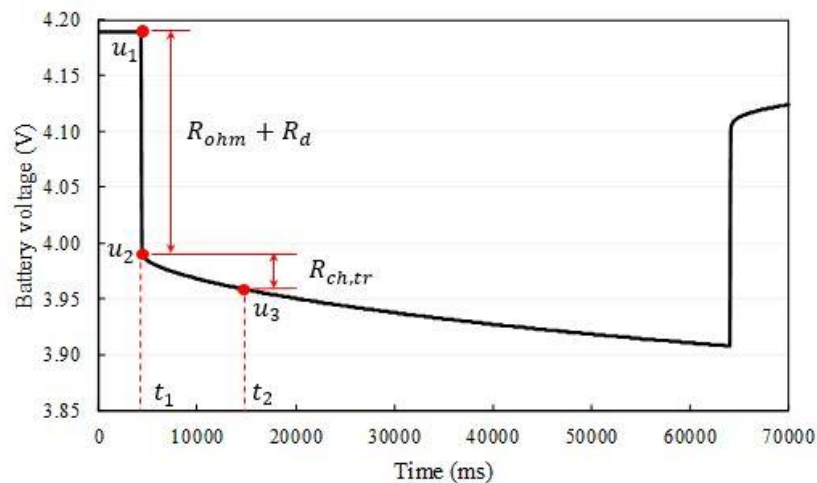
### 3.1.7. เทคนิคการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ (เพิ่มเติม)

โดยปกติแล้วการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่นั้นจะต้องใช้เครื่องมือที่ใช้เฉพาะในการหาค่าความต้านทานของแบตเตอรี่หรือที่เรียกว่าเครื่องวัดความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ แต่ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ที่วัดได้จากเครื่องวัดความต้านทานภายในแบตเตอรี่นั้นจะสามารถหาได้แค่สองส่วนคือ  $R_{ohm} + R_d$  ซึ่งแท้จริงแล้ว ภายในแบตเตอรี่ยังประกอบไปด้วยความต้านทานภายในอยู่อีกหนึ่งทอมคือ  $R_{ch}$



รูปที่ 3.14 แผนภาพวงจรของเซลล์แบตเตอรี่จะประกอบค่าความต้านทานต่าง ๆ และค่าความจุภายในเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 3.14 ซึ่งในการหาค่าความต้านทานภายในส่วนที่เหลือคือ  $R_{ch}$  นั้น อาจจะต้องใช้เครื่องมือชนิดอื่น ๆ ในการหาค่าความต้านทานเฉพาะนี้ แต่ค่าความต้านทานภายในส่วนที่เหลือเหล่านั้นสามารถหาค่าได้จากการใช้เทคนิคจากการคายประจุไฟฟ้าที่กระแสสูงสุดของเซลล์แบตเตอรี่นั้น จะสามารถคายประจุและนำค่าที่ได้ มาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (Voltage) กับเวลาของเซลล์แบตเตอรี่ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาของเซลล์แบตเตอรี่

ซึ่งจากความสัมพันธ์ของกราฟรูปที่ 3.15 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่ได้ดังสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2

$$R_{ohm} + R_d = (u_1 - u_2)/i \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$R_{ch,tr} = (u_2 - u_3)/i \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

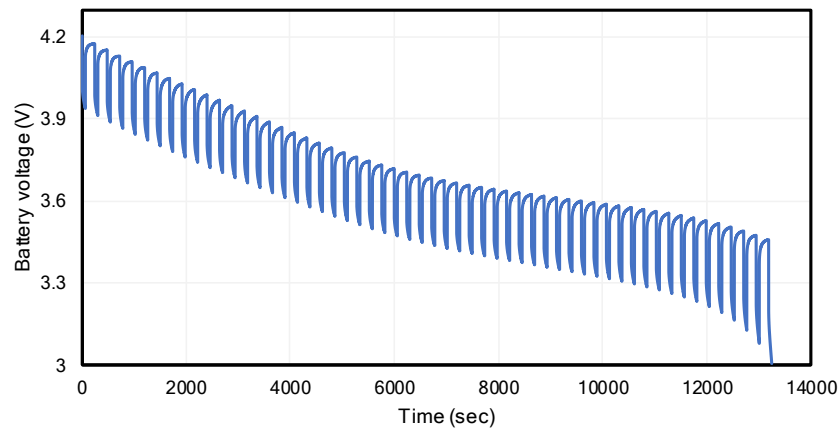
โดยที่ยังสามารถหาค่าความจุภายในที่คร่อม  $R_{ch}$  ได้จากสมการที่ 3.3 อีกด้วย

$$C = (t_2 - t_1)/R_{ch,tr} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

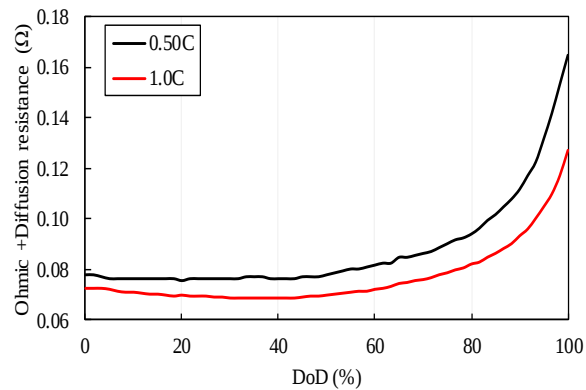
### ขั้นตอนการทดสอบ

1. นำเซลล์แบตเตอรี่ที่จะทำการทดสอบมาทำการอัดประจุไฟฟ้าให้แรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับ 4.2 V (แรงดันไฟฟ้าสูงสุด)
2. นำเซลล์แบตเตอรี่ต่อเข้ากับเครื่อง Electronic Load เพื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
3. ทำการคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ โดยควบคุมการดิ่งกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabView
4. รูปแบบการดิ่งกระแสไฟฟ้าจะเป็นรูปแบบพัลส์ โดยที่ดิ่งกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ให้ได้ (ซึ่งค่ากระแสสูงสุดขึ้นกับแต่ละชนิดของเซลล์แบตเตอรี่) เป็นเวลา 1 นาที และทำการไม่ดิ่งกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 3 นาทีจนครบ 60 ครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.16
5. ทำการดิ่งกระแสไฟฟ้าออกโดยเริ่มต้นที่แรงดันไฟฟ้า 4.2V จนถึง 3.0V
6. เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าด้วย Data logger
7. นำค่าที่เก็บจากเครื่อง Data logger มาทำการพลอตกราฟ
8. คำนวณหาค่าความต้านทาน (Internal resistance) ของแต่ละพัลส์ ตามสมการข้างบน

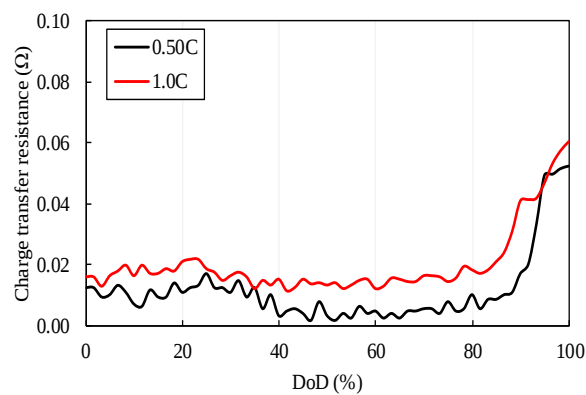
ด้วยวิธีการวัดแบบนี้ สามารถทำให้ได้ค่าความต้านทานของทุกช่วง SOC/DOD ทำให้การคำนวณค่าความร้อนจาก Joule Heating เนื่องจากความต้านทานทั้งสามเทอม มีความแม่นยำมากขึ้น โดย MATLAB Code ดังแสดงหัวข้อ 6.7 สำหรับการคำนวณหาค่าความต้านทานทั้งสามเทอมดังแสดงในรูปที่ 3.17 และ รูปที่ 3.18 จากผลการดิ่งกระแสไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 3.16 อย่างไรก็ตามค่าความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ยังจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยเหมือนวิธีการก่อนหน้านี้



รูปที่ 3.16 การทดสอบการดิ่งกระแสไฟฟ้าในรูปแบบพัลส์จำนวน 60 รอบ

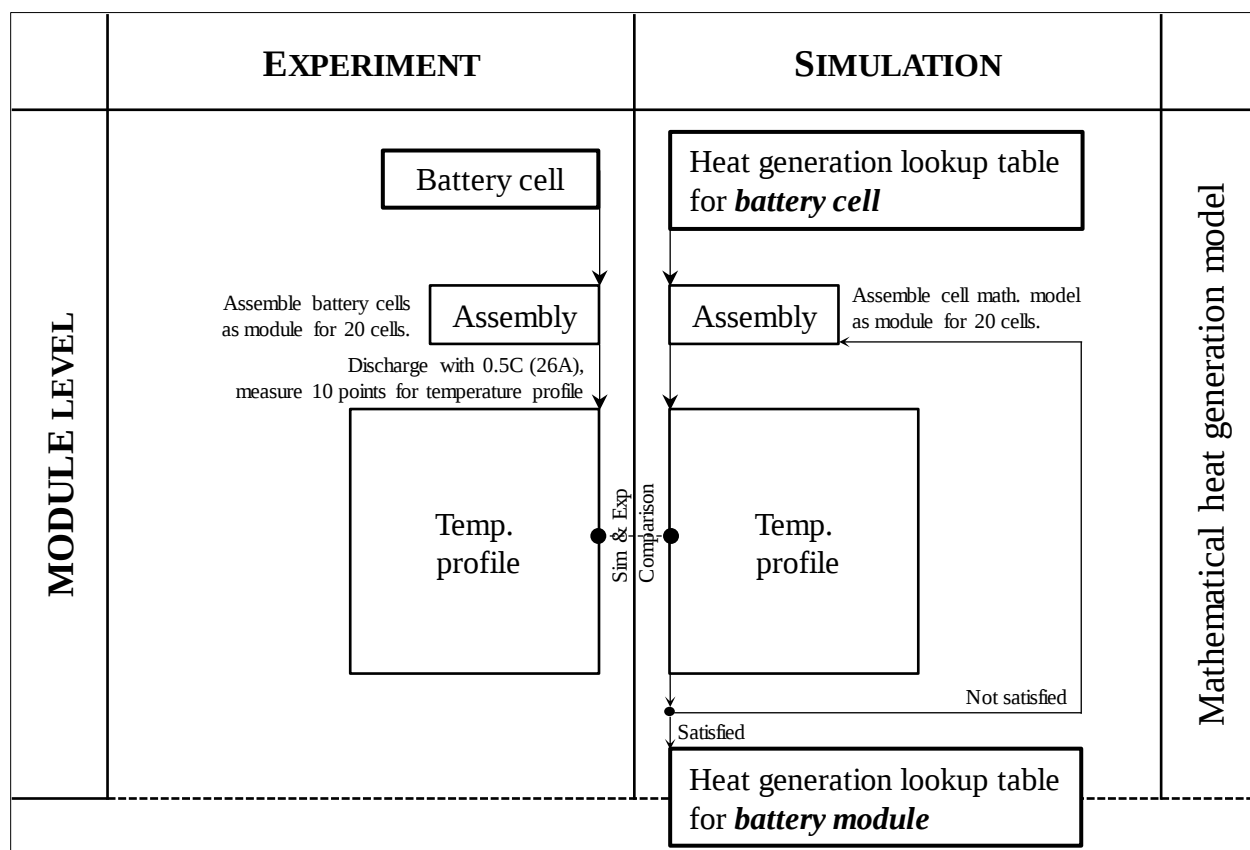


รูปที่ 3.17 ผลรวม Ohmic resistance ( $R_{ohm}$ ) และ diffusion resistance( $R_d$ ) เปลี่ยนแปลงตาม DOD



รูปที่ 3.18 ค่า Charge transfer polarization ( $R_{ch}$ ) เปลี่ยนแปลงตาม DOD

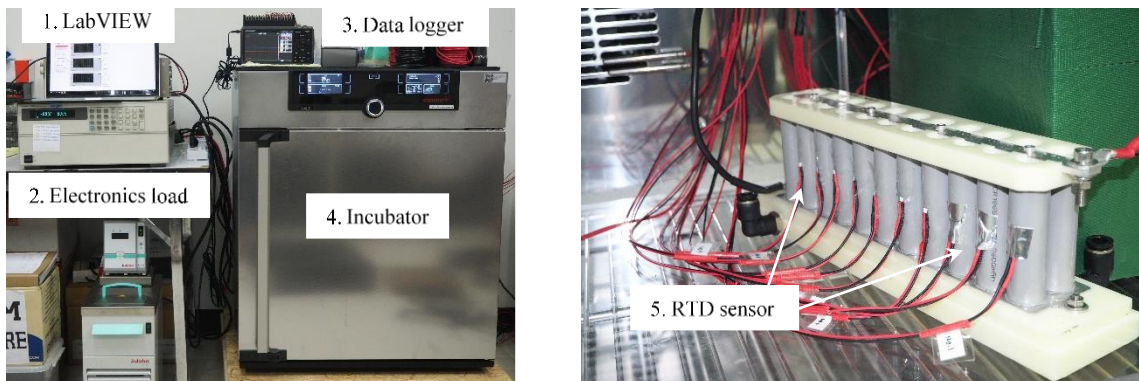
### 3.2. ระดับโมดูลย่อย (Submodule)



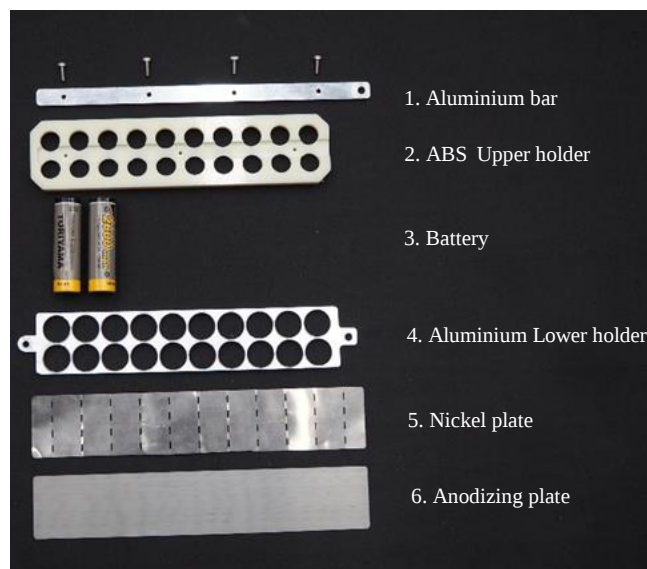
รูปที่ 3.19 แผนผังการสร้างแบบจำลองระดับโมดูลย่อย ©MTEC

จากรูปที่ 3.19 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระดับเซลล์ที่ได้สร้างขึ้นรวมถึงค่าความร้อนจากตารางที่ 3.3 ในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะถูกนำมาพัฒนาเพื่อสร้างระดับโมดูลย่อย โดยที่การสร้างระดับโมดูลย่อยต้องทำการทดลองและการจำลองในคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับการสร้างในระดับเซลล์ ขั้นตอนแรกของการสร้างแบตเตอรี่ในระดับโมดูลย่อยนั้น เซลล์แบตเตอรี่จะถูกนำมาประกอบขึ้นในรูปแบบของโมดูลย่อยผ่านการเชื่อมที่ขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่ หลังจากนั้นแบตเตอรี่ที่สร้างในระดับโมดูลย่อยนั้นจะถูกคายประจุไฟฟ้าออกด้วยอัตรา 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย) โดยที่การวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่นั้นจะทำการวัดจำนวน 10 ตำแหน่ง (มีจำนวนเซลล์อยู่ 20 ตัว ด้วยความสมมาตรของรูปทรง ทำให้การวัดอุณหภูมิหนึ่งตำแหน่ง เหมือนได้ 2 เซลล์แบตเตอรี่) และจะถูกบันทึกเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการจำลองโดยคอมพิวเตอร์ โดยที่การจำลองทางคอมพิวเตอร์นั้นจะทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในระดับเซลล์นำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นโมดูลย่อย และทำการคายประจุไฟฟ้าด้วยอัตราที่เท่ากัน เพื่อนำค่าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลอง

### 3.2.1. การทดลองคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery submodule discharge) ระดับโมดูลย่อย



รูปที่ 3.20 อุปกรณ์ในการทดลองคายประจุไฟฟ้าในระดับโมดูลย่อย



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ในการประกอบแบตเตอรี่ในระดับโมดูลย่อย

#### 3.2.1.1. วิธีทำการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความร้อนจากแบตเตอรี่ที่ผิวข้างของเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 10 ตำแหน่ง
3. นำโมดูลย่อยแบตเตอรี่เข้าไปวางในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะทดลอง
4. ใช้ชุดควบคุมในคอมพิวเตอร์จากโปรแกรม LabVIEW เพื่อควบคุม Electronics load ให้คายประจุไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 26 แอมแปร์ (0.5C) และหยุดการคายประจุไฟฟ้าของโมดูลย่อยแบตเตอรี่เมื่อแรงดันไฟฟ้าของโมดูลย่อยแบตเตอรี่มีค่าต่ำกว่า 3 โวลต์

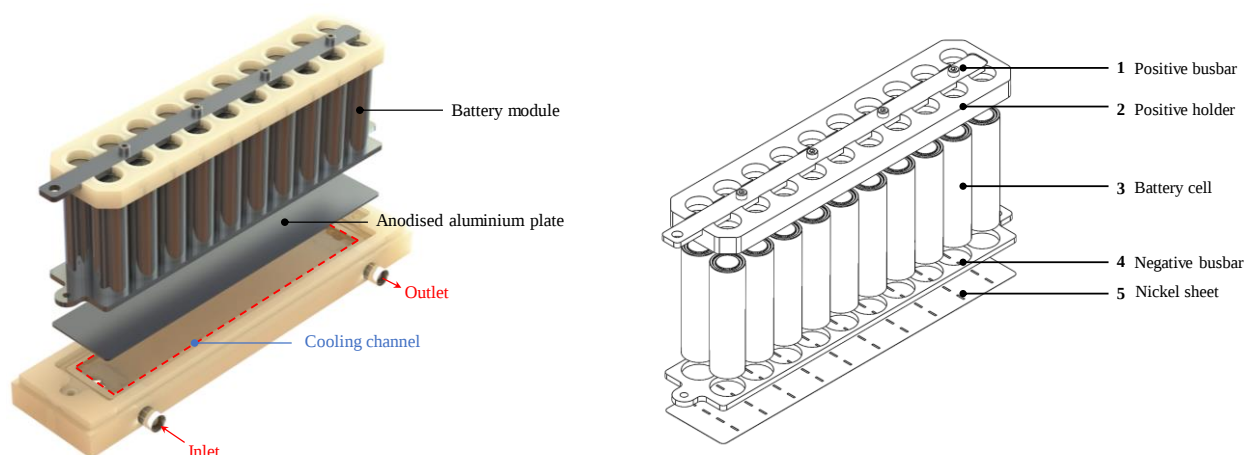
## 5. บันทึกค่าอุณหภูมิด้วยอุปกรณ์ Data logger

### 3.2.1.2. เงื่อนไขการทดลอง

| ตัวแปรที่กำหนด          | ค่าที่กำหนด                    |
|-------------------------|--------------------------------|
| อัตราการคายประจุไฟฟ้า   | 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย) |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม     | 25 องศาเซลเซียส                |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์          |

### 3.2.2. การทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขณะคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery submodule discharge) ระดับโมดูลย่อย

หลังจากได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระดับเซลล์เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยข้อมูลของความร้อนอยู่ในรูปของ Look-Up Table โดยนำข้อมูลต่างๆที่ได้ จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ระดับเซลล์ มาใช้เพื่อทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับโมดูลย่อยและโมดูล โดยใช้ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นแต่ละเซลล์ สำหรับการป้อนค่าความร้อนให้กับทุกเซลล์ของโมดูลย่อย โดยมีสมการการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 3.22 โดยสมการที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ในชิ้นส่วนที่ 1 2 3 และ 4 (Water Coolant, Aluminum holder, Negative busbar และ Anodizing plate ตามลำดับ) โดยชิ้นส่วนที่ 2, 3 และ 4 เป็นการถ่ายเทความร้อนบนของแข็งดังสมการที่ 3.4 ในขณะที่ชิ้นส่วนที่ 1 เป็นการถ่ายเทความร้อนในของเหลวที่มีการพัดพา



รูปที่ 3.22 แบบสามมิติของโมดูลย่อยแบตเตอรี่ ©MTEC

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

|        |        |                                                               |
|--------|--------|---------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $\rho$ | คือ ความหนาแน่นของแข็ง ( $\text{kg/m}^3$ )                    |
|        | $k$    | คือ สภาพการนำความร้อนของแข็ง ( $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ )  |
|        | $C_p$  | คือ ค่าความจุความร้อนของแข็ง ( $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ) |
|        | $T$    | คือ อุณหภูมิของอุณหภูมินิยม (K)                               |
|        | $t$    | คือ เวลา (s)                                                  |

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในน้ำหล่อเย็นสมการที่เกี่ยวข้องจะประกอบไปด้วย 3 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (continuity equations) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation equations) และสมการความร้อน (heat equation) หรือสมการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation equations) ดังสมการที่ 3.5 สมการที่ 3.6 และ สมการที่ 3.7 ตามลำดับ และคุณสมบัติวัสดุภายในน้ำที่ใช้ในแบบจำลองความร้อนจะไม่ขึ้นอยู่กัอุณหภูมิแสดงในตารางที่ 3.4

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}) = -\nabla P \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

$$\rho_w c_{p_w} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w c_{p_w} \vec{v} T) = \nabla \cdot (k_w \nabla T) \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

|        |           |                                                              |
|--------|-----------|--------------------------------------------------------------|
| โดยที่ | $\rho_w$  | คือ ความหนาแน่นของน้ำ ( $\text{kg/m}^3$ )                    |
|        | $k_w$     | คือ สภาพการนำความร้อนของน้ำ ( $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ )  |
|        | $c_{p_w}$ | คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ ( $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ ) |
|        | $T$       | คือ อุณหภูมิของน้ำ (K)                                       |
|        | $\vec{v}$ | คือ เวกเตอร์ความเร็วของน้ำ ( $\text{m/s}$ )                  |
|        | $P$       | คือ แรงดันสถิต (Pa)                                          |

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติวัสดุของน้ำที่ใช้ในแบบจำลองทางความร้อน

| Material | Density<br>kg/m <sup>3</sup> | Specific<br>heat<br>J/(kg·K) | Thermal<br>conductivity<br>W/(m·K) | Dynamic<br>viscosity<br>Pa·s |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Water    | 998.2                        | 4,128                        | 0.6                                | $1.003 \times 10^{-3}$       |

ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในน้ำ รูปแบบการไหลจะเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) เท่านั้น เงื่อนไขเริ่มต้นในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน กำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นภายในแบบจำลองเท่ากับ อุณหภูมิห้อง  $T(t_0) = 25^\circ\text{C}$  ส่วนอุณหภูมิน้ำทางเข้าและความเร็วที่ใช้ในการพิจารณาในสภาวะต่าง ๆ จะถูก กำหนดไว้ที่ทางเข้า ที่ความเร็วนี้การไหลของกระแสจะถูกระบุพิจารณาเป็น แบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) ความหนาแน่นของน้ำมีค่าคงที่ โดยความเร็วในการไหลจะเป็นแบบสม่ำเสมอและคงที่ ทางออกมีการกำหนดให้มี ความดันคงที่เป็นศูนย์

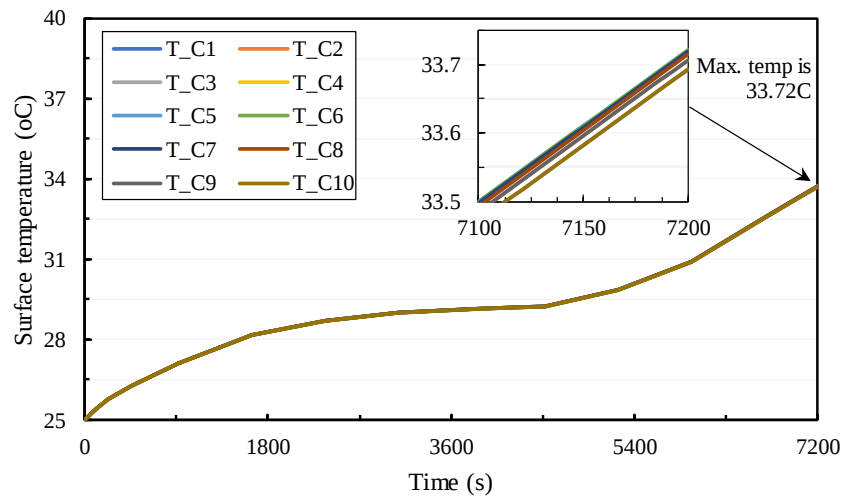
### 3.2.2.1. วิธีการทดลอง

1. นำแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อนระดับเซลล์มาประกอบขึ้นเป็นโมดูลย่อยแบตเตอรี่
2. ทำการจำลองโดยใช้เงื่อนไขการทดลองเดียวกับการทดลองที่ 3.2.1
3. นำการจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าจริงเพื่อปรับแบบจำลองให้มีค่าแม่นยำมากขึ้น

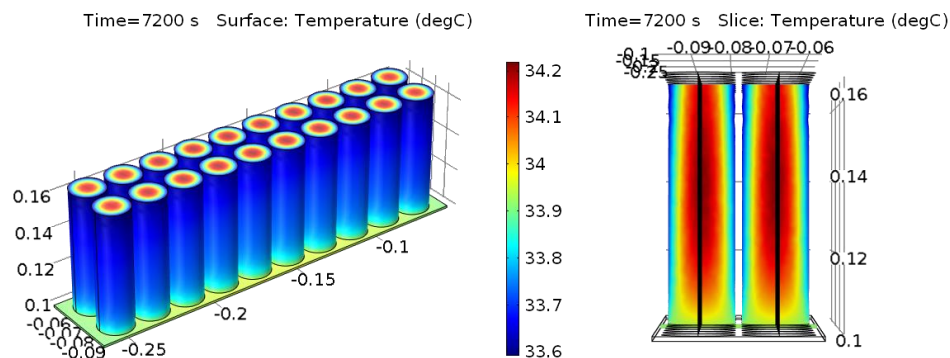
### 3.2.2.2. เงื่อนไขการทดลอง

| ตัวแปรที่กำหนด          | ค่าที่กำหนด                    |
|-------------------------|--------------------------------|
| อัตราการคายประจุไฟฟ้า   | 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย) |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม     | 25 องศาเซลเซียส                |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์          |

### 3.2.2.3. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 3.23 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิด้วยการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C ของโมดูลย่อย



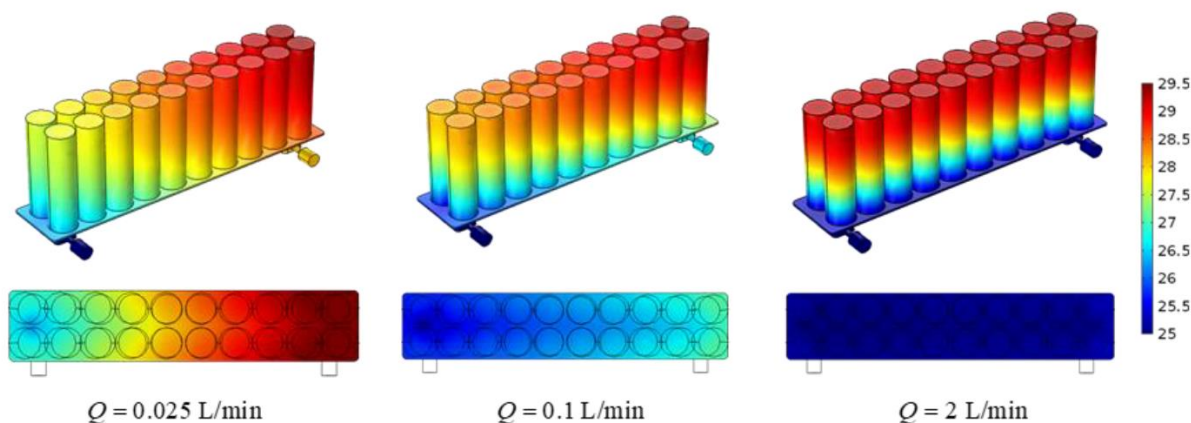
รูปที่ 3.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิของโมดูลย่อย

รูปที่ 3.23 แสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของโมดูลย่อยแบตเตอรี่ขณะที่กำลังถูกคายประจุไฟฟ้าด้วยอัตรา 26 แอมแปร์ จะเห็นว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่มีค่าใกล้เคียงกันมากและอุณหภูมิสุดท้ายแตกต่างกับแบบจำลองระดับเซลล์อยู่เพียงเล็กน้อย (แบบจำลองระดับเซลล์ 32.64 องศาเซลเซียสแต่แบบจำลองระดับโมดูล 33.72 องศาเซลเซียส) ในความเป็นจริงอุณหภูมิของแบตเตอรี่ต้องมีขนาดสูงกว่าเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างเซลล์ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิผนังด้านในของแบตเตอรี่จะต้องสูงกว่าผนังด้านนอก แต่จากการกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปที่ 3.22 จะเห็นว่าในผนังด้านในจะมีขนาดเท่ากับด้านนอก ในการจำลองนี้จะไม่คำนึงถึงเงื่อนไขการ

มีอากาศอยู่ระหว่างแบตเตอรี่เซลล์ทำให้อุณหภูมิที่ผิวข้างของแบตเตอรี่มีการกระจายอย่างสมมาตรและไม่เกิดการกระจายอุณหภูมิระหว่างเซลล์ในโมดูลย่อย การเพิ่มโมเดลอากาศ (Air domain) ในแบบจำลองจะทำให้ความแม่นยำของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่จะทำให้ทรัพยากรในการคำนวณของคอมพิวเตอร์และใช้เวลานานขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามแม้ว่าแบบจำลองนี้จะให้ผลลัพธ์แตกต่างกับการทดลองจริงเล็กน้อยแต่ก็เพียงพอในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เป็นผลจากระบบระบายความร้อนในกรณีต่างๆ การกระจายตัวอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ในอัตราการใช้ที่ต่างกัน

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

| Section             | Parameters                               | Values                                                 |
|---------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Study               | Flow rate                                | 0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1 and 2 L/min |
| Battery properties  | Thermal conductivity $\{k_x, k_y, k_z\}$ | $\{1, 1, 20\}$ W/m·K                                   |
|                     | Density ( $\rho$ )                       | 2300 kg/m <sup>3</sup>                                 |
|                     | Heat capacity ( $C_p$ )                  | 800 J/kg·K                                             |
| Anodising Aluminium | Thermal conductivity ( $k_{al}$ )        | 205 W/m·K                                              |
|                     | Density ( $\rho_{al}$ )                  | 2700 kg/m <sup>3</sup>                                 |
|                     | Heat capacity ( $C_p$ )                  | 910 J/kg·K                                             |
| Coolant (water)     | Thermal conductivity ( $k_w$ )           | 0.6 W/m·K                                              |
|                     | Density ( $\rho_w$ )                     | 998 kg/m <sup>3</sup>                                  |
|                     | Heat capacity ( $C_p$ )                  | 4128 J/kg·K                                            |
|                     | Viscosity ( $\mu$ )                      | 0.00089 Pa·s                                           |
| Conditions          | Discharge current                        | 26A (0.5C)                                             |
|                     | Ambient temperature                      | 25°C                                                   |
|                     | Operating time                           | 7200 s.                                                |



รูปที่ 3.25 การกระจายตัวอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ในอัตราการไหลที่แตกต่างกัน ของการจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่ 0.5C

รูปที่ 2.20 แสดงการกระจายตัวอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ที่อัตราการไหล 0.025, 0.1 และ 2 L/min โดยมีอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น 25 องศาเซลเซียส ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 0.5C ของแต่ละเซลล์ ในเวลา 2 ชั่วโมง จะพบว่าอุณหภูมิของแต่ละเซลล์อยู่ในช่วง 25 – 30 องศาเซลเซียส และผลต่างอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละเซลล์ไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 2 L/min อุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนและแผ่นขั้วลบต่ำถึง 25 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่ฝั่งขั้วบวกยังใกล้เคียงกับ 29.5 องศาเซลเซียส ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการใช้อัตราการไหลที่สูงจะช่วยให้อุณหภูมิที่ฝั่งขั้วลบต่ำ แต่ในทางกลับกันการใช้อัตราการไหลที่สูง และอุณหภูมิทางเข้าของน้ำที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก จำเป็นต้องใช้พลังงานมากกว่า

### 3.3. ระดับโมดูล (Module)

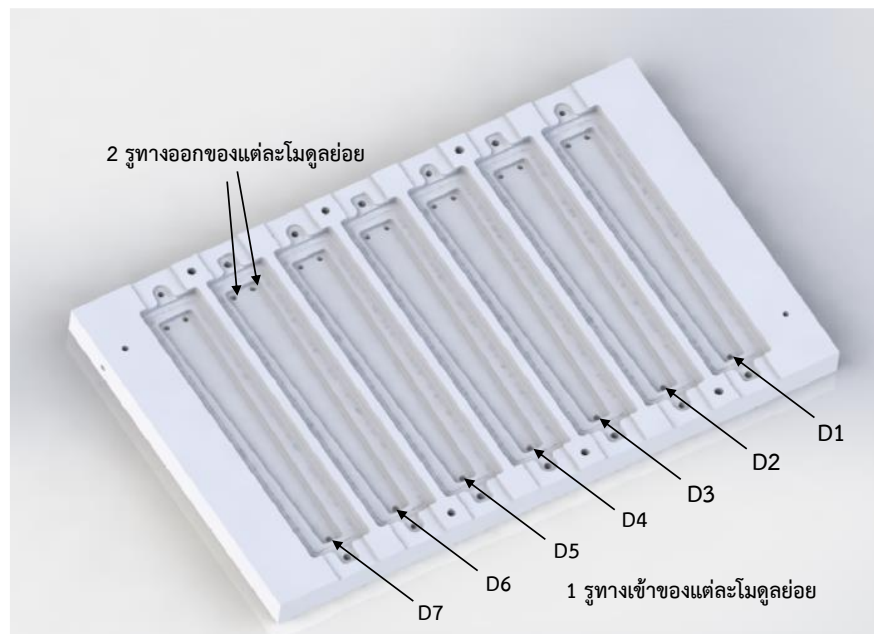
เนื่องจากโมดูลเป็นการนำโมดูลย่อยมาประกอบกันหลายโมดูลย่อย ซึ่งค่าความร้อนที่ได้จากการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระดับเซลล์ จะถูกป้อนค่าความร้อนเท่าๆกันของทุกๆ เซลล์ในโมดูล แต่ในระดับโมดูลจะประกอบไปด้วยร่องน้ำหล่อเย็นใต้โมดูลย่อย ดังนั้นระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำตามหัวที่ 2.5.2.2 และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศหัวที่ 2.5.2.4 ต้องมีการคำนึงถึงอัตราการไหล ที่ไหลผ่านแต่ละโมดูลย่อยเท่าๆ กัน ทางทีมวิจัยจึงต้องทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติม เพื่อศึกษาอัตราการไหลในแต่ละช่องการไหลของโมดูลย่อย ให้มีค่าอัตราการไหลที่ใกล้เคียง

กัน โดยมีการดัดแปลงรูทางเข้าและและตำแหน่งทางออกให้มีความเหมาะสม ในแต่ละช่องการไหลของโมดูลย่อย โดยทางที่มิวิจัยได้มีการปรับเปลี่ยนการออกแบบไว้หลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะนำเสนอ 5 รูปแบบ ดังแสดงในกลาง

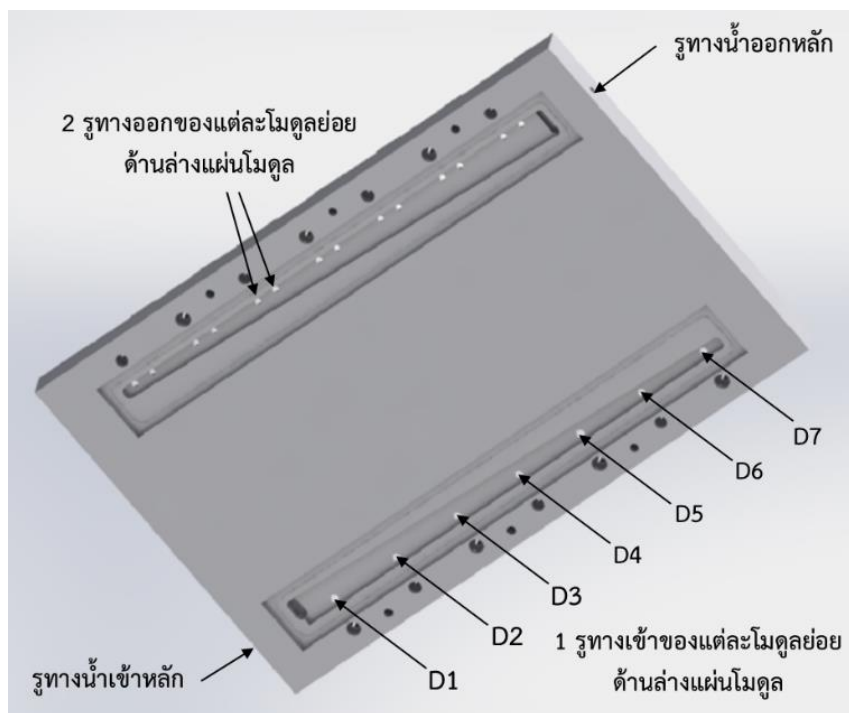
ตารางที่ 3.6 และ รูปที่ 3.26 จากผลของการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การไหล โดยกำหนด อัตราการไหลทางเข้า 0.4 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 3.27 - รูปที่ 3.28 พบว่าแบบที่เหมาะสมจะเป็นรูปแบบที่ 5 เนื่องจากมีสัดส่วนการไหลในแต่ละโมดูลย่อยใกล้เคียงกัน สำหรับรูทางออกของแต่ละโมดูลย่อยมีสองรู โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm เนื่องจากช่วยให้มีการกระจายตัวการไหล แทนการใช้รูทางออกเดียวตรงกลาง ที่รูปแบบการไหลของน้ำเฉพาะบริเวณตรงกลาง

ตารางที่ 3.6 แสดงขนาดทางเข้าของการออกแบบในแต่ละรูปแบบ

| ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง<br>ของช่องทางน้ำเข้าในแต่ละ<br>โมดูลย่อย | แบบที่ 1 | แบบที่ 2 | แบบที่ 3 | แบบที่ 4 | แบบที่ 5 |
|---------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| D1                                                            | 5 mm     | 5 mm     | 3 mm     | 3 mm     | 3 mm     |
| D2                                                            | 5 mm     | 5 mm     | 5 mm     | 5 mm     | 3.5 mm   |
| D3                                                            | 5 mm     | 5 mm     | 5 mm     | 5 mm     | 6 mm     |
| D4                                                            | 5 mm     | 5 mm     | 6 mm     | 6 mm     | 6.5 mm   |
| D5                                                            | 5 mm     | 4.5 mm   | 4.5 mm   | 4.5 mm   | 6 mm     |
| D6                                                            | 5 mm     | 4 mm     | 3.5 mm   | 3.5 mm   | 3.5 mm   |
| D7                                                            | 5 mm     | 3 mm     | 3 mm     | 3 mm     | 3 mm     |

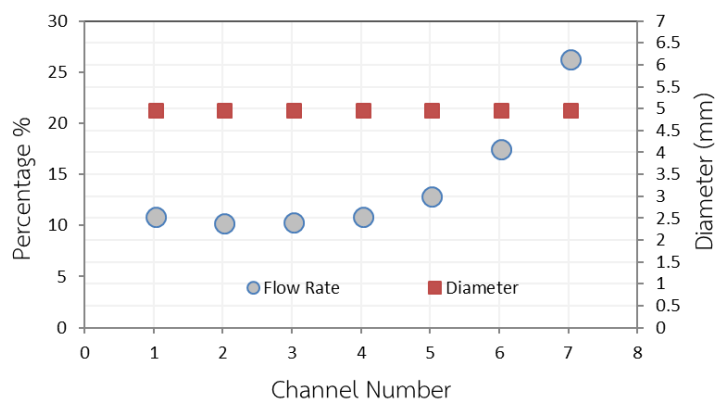


ก) แสดงภาพช่องทางการไหลของน้ำในมุมมองด้านบน

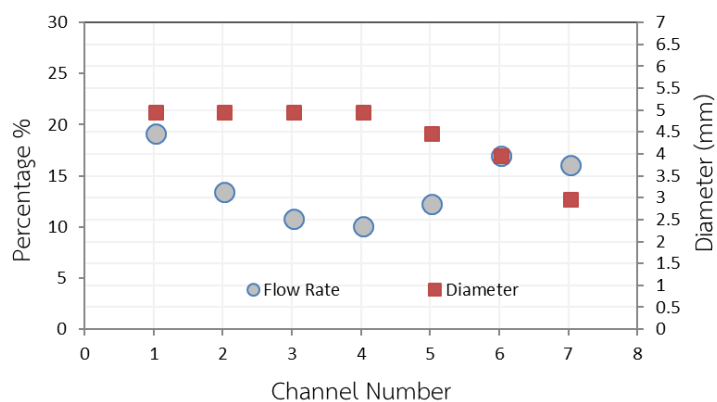


ก) แสดงภาพช่องทางการไหลของน้ำในมุมมองด้านล่าง

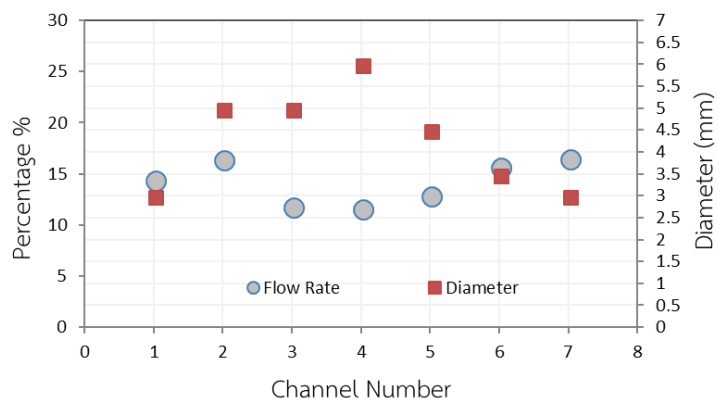
รูปที่ 3.26 ลักษณะและตำแหน่งรูทางเข้าและออกของน้ำแต่ละโมดูลย่อย



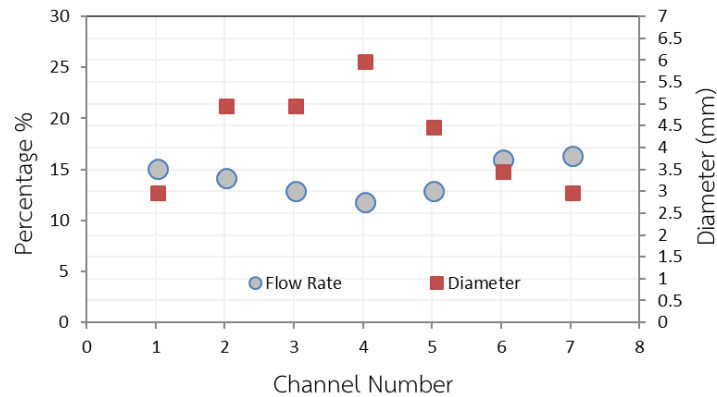
รูปที่ 3.27 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 1



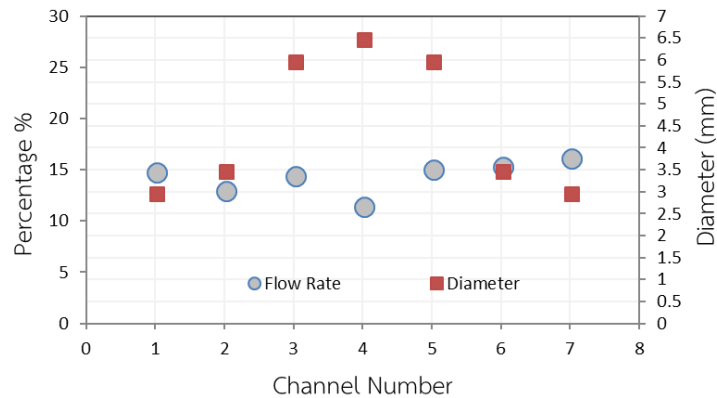
รูปที่ 3.28 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 2



รูปที่ 3.29 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ละช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 3



รูปที่ 3.30 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 4



รูปที่ 3.31 สัดส่วนของอัตราการไหลในแต่ช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อย รูปแบบที่ 5

### 3.4. การคำนวณขนาดระบบระบายความร้อน

ขนาดของระบบระบายความร้อนจะขึ้นอยู่กับโดยตรงกับจำนวนเซลล์ที่ประกอบลงในโมดูลหรือแพ็คเกจเตอร์ โดยความร้อนของแต่ละเซลล์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากระดับเซลล์ ประกอบด้วยความร้อน Joule Heating และ Entropy Change โดยสมมติฐานให้ทุกๆ เซลล์ มีค่าความร้อนเท่าๆกัน เนื่องจากทุกๆเซลล์ มีคุณภาพเท่ากัน ก่อนการประกอบ ดังนั้นถ้าโมดูลหรือแพ็คเกจเตอร์ มีจำนวนเซลล์เท่าไร เราสามารถหาขนาดของระบบระบายความร้อน โดยนำค่าความร้อนที่เกิดขึ้นสูงสุดของเซลล์ (จะเกิดก่อน Cut-Off Voltage) คูณกับจำนวนเซลล์ที่ใช้ทั้งหมด และใช้ค่าความร้อนทั้งหมด สำหรับการออกแบบคำนวณขนาดระบบระบายความร้อน ค่าความร้อนที่ออกจากแบตเตอรี่สูงสุด จะเป็นความร้อนที่อ้างอิงจากการจ่าย C-rate สูงสุดที่แบตเตอรี่จ่ายได้ (ขึ้นอยู่กับ

กับชนิดของเซลล์และขนาดของเซลล์) อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้ว โมดูลหรือแพ็คเกจเตอร์จะไม่ได้ทำงานในขณะที่จ่ายไฟฟ้าคงที่สูงสุดตลอดเวลา หรืออีกนัยหนึ่งแบตเตอรี่จะไม่จ่ายค่าความร้อนสูงสุดตลอดเวลา แบตเตอรี่จะคายความร้อนตามภาระกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน ดังนั้นนักออกแบบต้องรู้รูปแบบกำลังไฟฟ้าใช้งานจริง ซึ่งถ้าเป็นการออกแบบแพ็คเกจเตอร์สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ต้องออกแบบกำลังไฟฟ้าที่ได้มาจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าจาก Driving Cycle



#### 4. การศึกษาตัวแปรของการระบายความร้อน

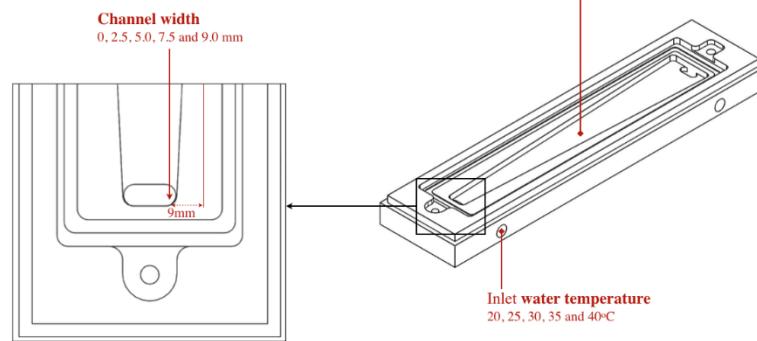
หลังจากได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อนของระดับโมดูลย่อย แบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำมา รวมเข้ากับระบบระบายความร้อนที่เกิดจากการไหลของของเหลวด้านใต้ของโมดูลแบตเตอรี่จากโครงการในเฟส 1 แต่ถูกนำมาศึกษาต่อให้ประสิทธิภาพดีขึ้นด้วยตัวแปรสามประเภทคือ อัตราการไหล (Flow rate) รูปแบบช่อง ทางการไหล (Channel width) และอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น (Inlet temperature) ดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

##### PARAMETRIC STUDIES

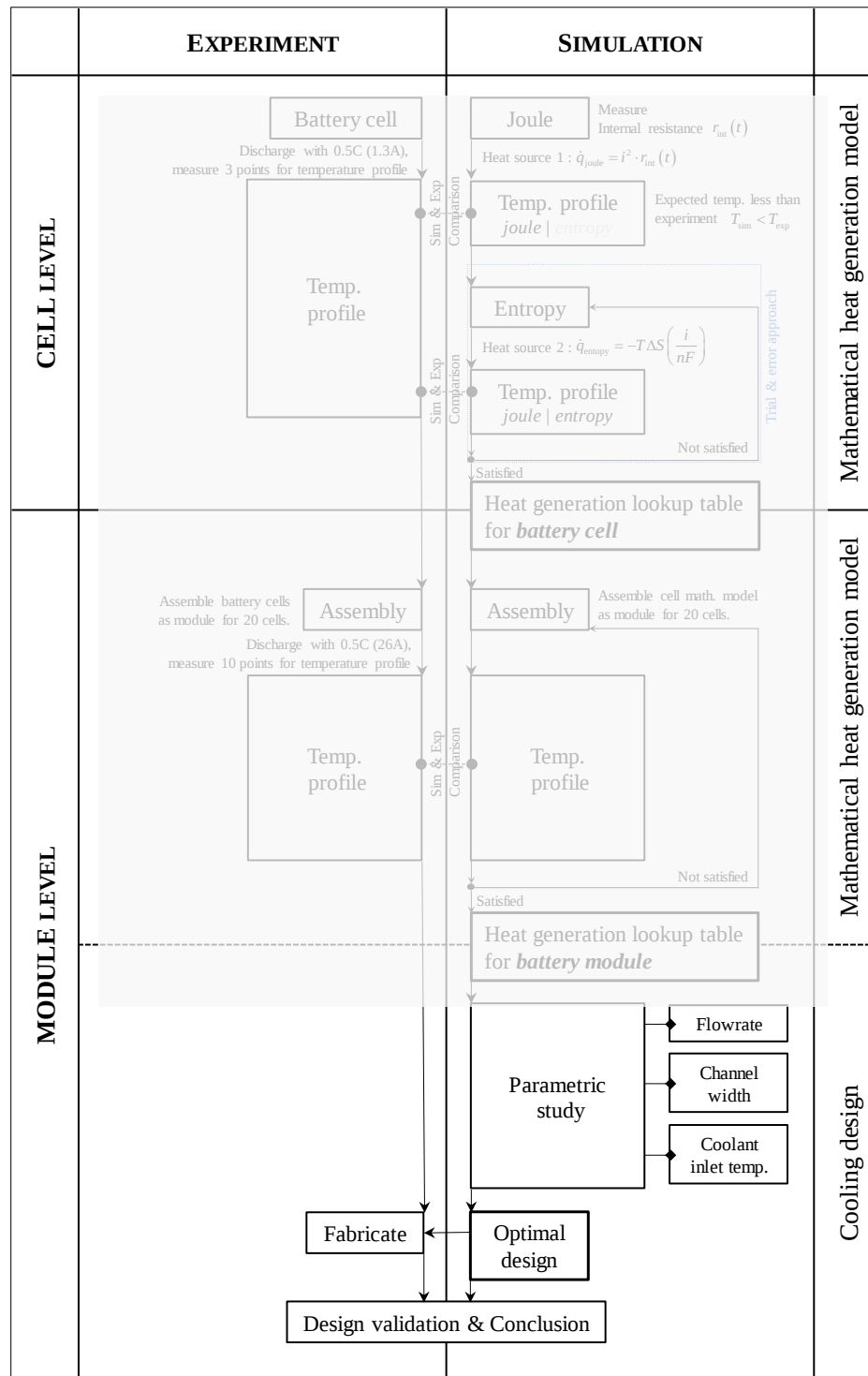
1. Flow rate
2. Channel width
3. Inlet water temperature

##### OPTIMISATION STRATEGIES

1. Flow rate :  $\% \text{eff} = \frac{\dot{q}_{\text{module}}}{P_{\text{pump}}} = \frac{\dot{m}_w c_p \Delta T}{\dot{m}_w \Delta P} = c_p \left( \frac{\Delta T}{\Delta P} \right)$
2. Channel width : Temp. gradient  $(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$
3. Inlet water temperature : Max. temp. reduction  $(T_{\text{max,ref}} - T_{\text{max,i}})$

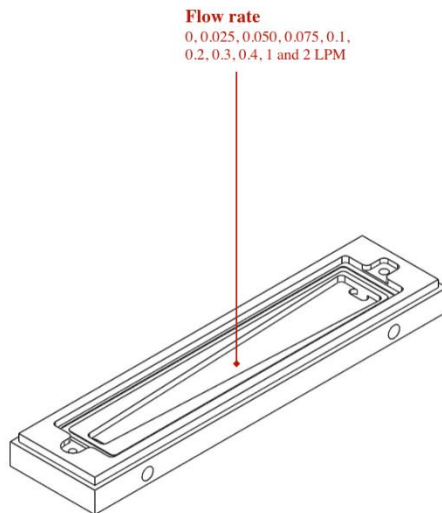


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งที่ศึกษาตัวแปรของการระบายความร้อน ©MTEC



รูปที่ 4.2 การศึกษาระบบระบายความร้อนจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางความร้อนระดับโมดูลย่อย ©MTEC

#### 4.1. ผลกระทบของอัตราการไหล (The effect of flow rate)



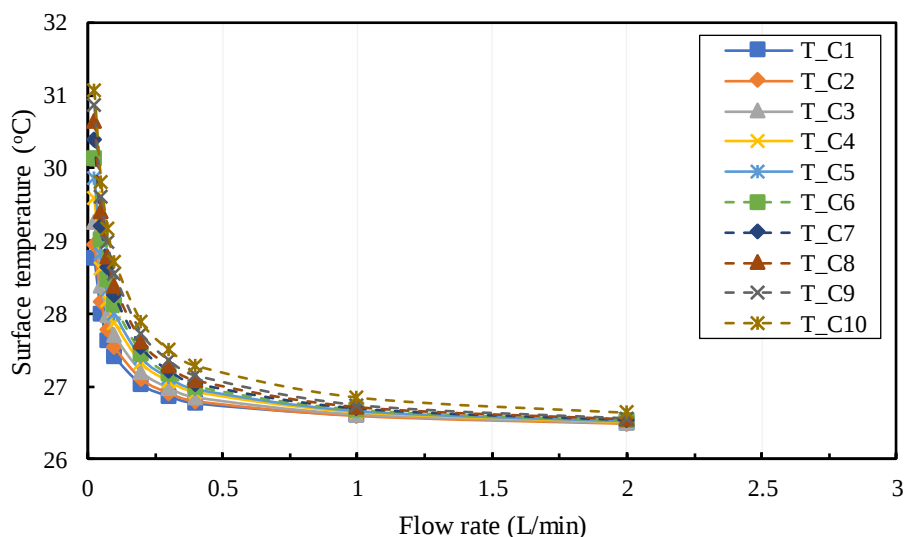
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่กำหนดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

##### 4.1.1. เงื่อนไขการจำลอง

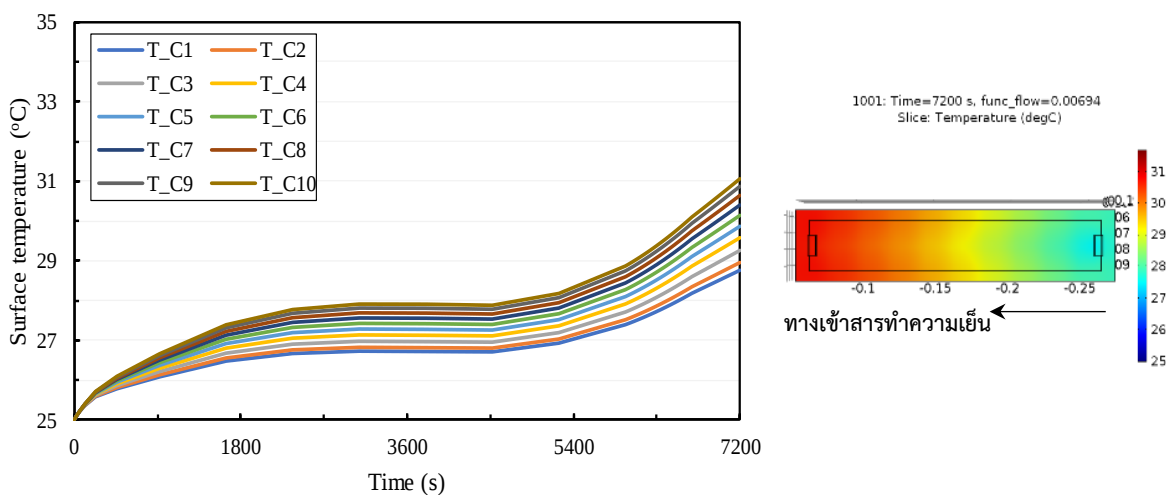
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอัตราการไหล

| ตัวแปรที่กำหนด          | ค่าที่กำหนด                                                  |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------|
| อัตราคายประจุไฟฟ้า      | 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย)                               |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม     | 25 องศาเซลเซียส                                              |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์                                        |
| อัตราการไหล             | 0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1 และ 2 ลิตรต่อนาที |

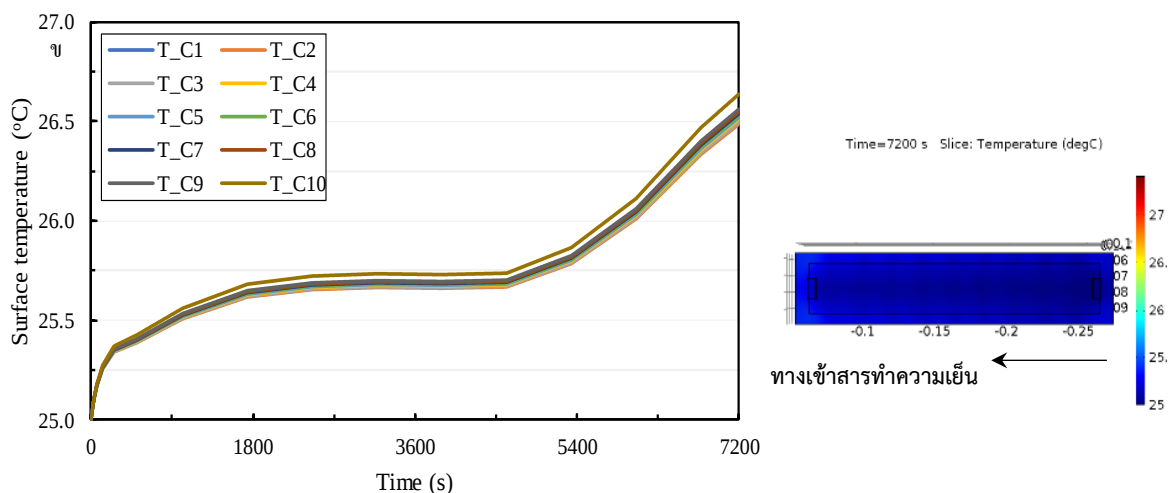
#### 4.1.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 4.4 การลดลงของอุณหภูมิด้วยอัตราการไหลต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส



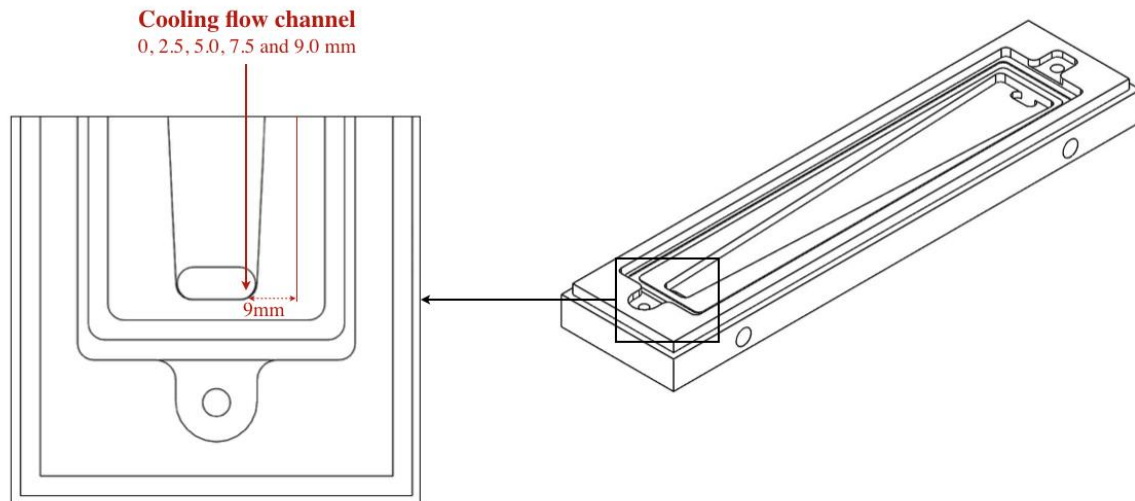
รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์และการกระจายความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียมสำหรับอัตราการไหล 0.025 ลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส



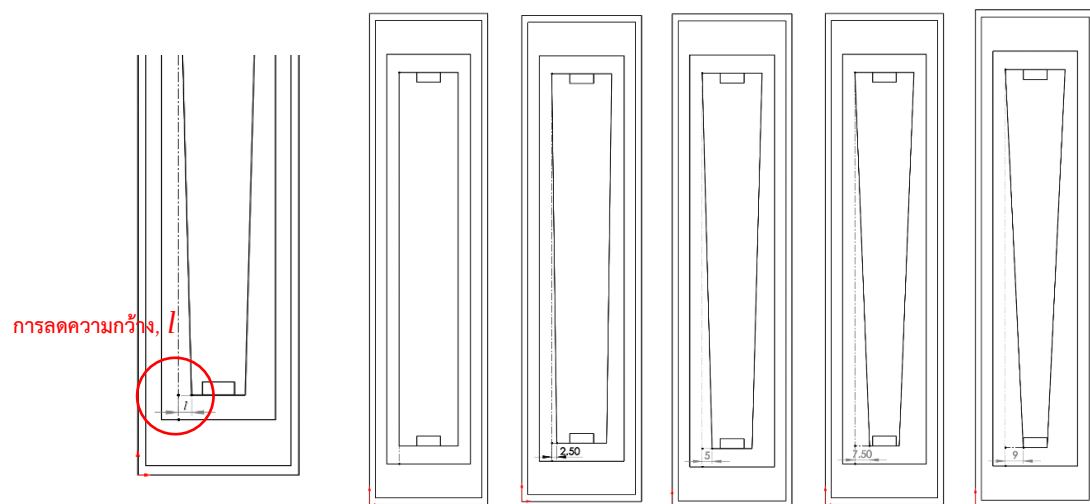
รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่แต่ละเซลล์และการกระจายความร้อนบนแผ่นอลูมิเนียมสำหรับอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นนั้นส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิ ความสามารถในการระบายความร้อนจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงของอัตราการไหล เมื่ออัตราการไหลมีค่าต่ำๆ น้ำหล่อเย็นจะมีเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแบตเตอรี่มาก ปริมาณของความร้อนจะถูกถ่ายเทให้กับน้ำหล่อเย็นที่เข้าทำให้ น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อน้ำหล่อเย็นไหลมาถึงทางออก แบตเตอรี่บริเวณทางออกจะถ่ายเทความร้อนได้น้อยลงตามหลักการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากผลต่างของอุณหภูมิมีน้อยลง ผลลัพธ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ไม่เท่ากันของเซลล์แบตเตอรี่บริเวณทางเข้าและทางออกของน้ำหล่อเย็นทำให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันของแบตเตอรี่ดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 ในทางกลับกันที่อัตราการไหลมีค่าสูงน้ำหล่อเย็นไหลด้วยความเร็วสูงขึ้นจึงมีเวลาในการรับความร้อนจากแบตเตอรี่ได้น้อยลง ทำให้อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกมีค่าต่างกันไม่มากนัก แบตเตอรี่บริเวณทางออกของน้ำหล่อเย็นจึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ที่พบที่เซลล์บริเวณทางออกมีค่าลดลงดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า การลดลงของอุณหภูมินั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลมีค่าสูงขึ้น จากรูปดังกล่าวอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 26.85 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 26.64 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการเพิ่มของอัตราการไหลสองเท่ามีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่สิ้นเปลืองพลังงานปริมาณมาก การเลือกใช้อัตราการไหลที่สูงจึงไม่ได้ส่งผลดีต่อความสามารถในการระบายความร้อนแต่จะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจึงควรที่จะเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมที่ทำให้ความร้อนถูกควบคุมอยู่ในเกณฑ์การออกแบบ

## 4.2. ผลกระทบของรูปแบบช่องทางการไหล (The effect of channel width)



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งช่องทางการไหล



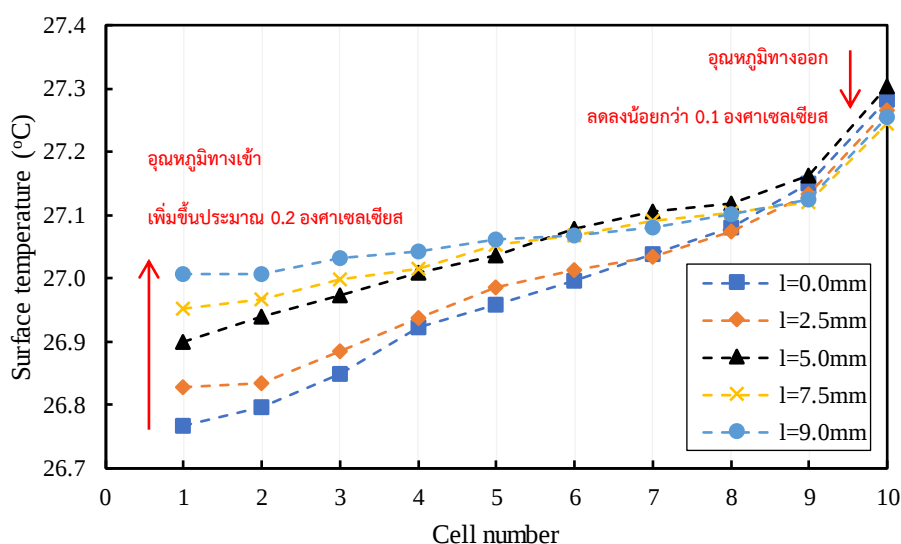
รูปที่ 4.8 การออกแบบช่องทางการไหลขนาดต่างๆ ©MTEC

#### 4.2.1. เงื่อนไขการจำลอง

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของขนาดความกว้างของช่องทางการไหล

| ตัวแปรที่กำหนด                | ค่าที่กำหนด                                 |
|-------------------------------|---------------------------------------------|
| อัตราการคายประจุไฟฟ้า         | 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย)              |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม           | 25 องศาเซลเซียส                             |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่       | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์                       |
| อัตราการไหล                   | 0.4 ลิตรต่อนาที                             |
| ขนาดความกว้างของช่องทางการไหล | 0, 25, 50, 75 และ 90 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.8) |

#### 4.2.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

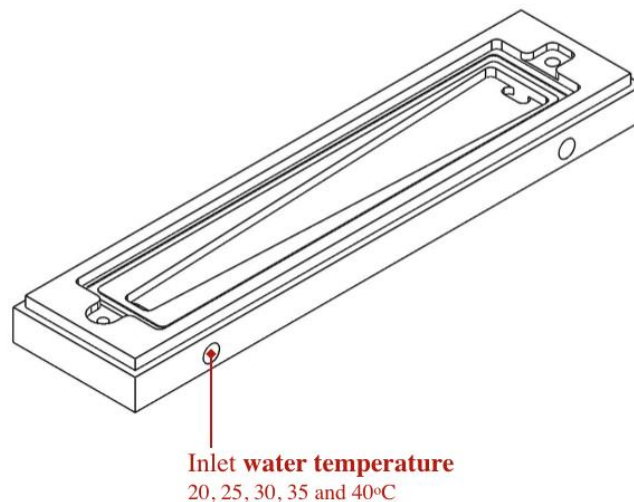


รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิตามความกว้างของช่องทางการไหล

สำหรับการพัฒนาต่อยอดของการออกแบบ Design 3 ช่องทางการไหลใกล้ทางเข้า ถูกลดขนาดความกว้างของการไหล เพื่อลดพื้นที่สัมผัสในการระบายความร้อน ขนาดช่องทางทั้งหมดจะถูกลดอยู่ห้าระดับแสดงในรูปที่ 4.8

คือ 0, 2.5, 5.0, 7.5 และ 9.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงของแต่ละช่องทางการไหลที่ถูกกลดไป จะเห็นได้ว่าที่ขนาดช่องทางการไหลที่ถูกกลดไป 9.0 มิลลิเมตร นั้น อุณหภูมิใกล้ทางเข้าของแบตเตอรี่เซลล์แรกจะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่อุณหภูมิของเซลล์สุดท้ายที่ทางออกจะมีค่าลดลงเล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ทางเข้าเป็นผลมาจากการลดพื้นที่สัมผัสสำหรับลดความสามารถในการระบายความร้อน และการลดลงของอุณหภูมิที่ทางออก เป็นผลมาจากน้ำหล่อเย็นได้รับความร้อนจากช่วงต้นมาน้อย ซึ่งทำให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงทำให้น้ำหล่อเย็นรองรับการระบายความร้อนที่เซลล์แบตเตอรี่ตัวสุดท้ายได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.9 อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่เซลล์แรกที่ทางเข้านั้น ยังอยู่ในเกณฑ์การออกแบบ แต่การเพิ่มขึ้นดังกล่าวช่วยลดผลต่างของอุณหภูมิภายในของโมดูลของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นผลดีต่อการใช้งาน ทำให้แต่ละเซลล์มีอายุการใช้งานที่ใกล้เคียงกัน ในแง่ของการเสื่อมสภาพของผลต่างของอุณหภูมิ

#### 4.3. ผลกระทบของอุณหภูมิขาเข้าของของน้ำหล่อเย็น (The effect of Inlet temperature)



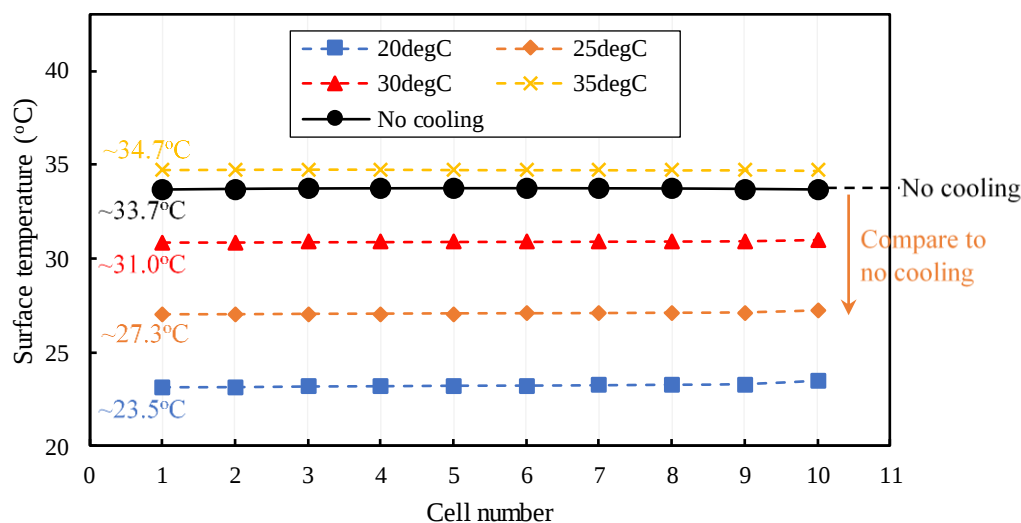
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของอุณหภูมิที่กำหนด ©MTEC

### 4.3.1. เงื่อนไขการจำลอง

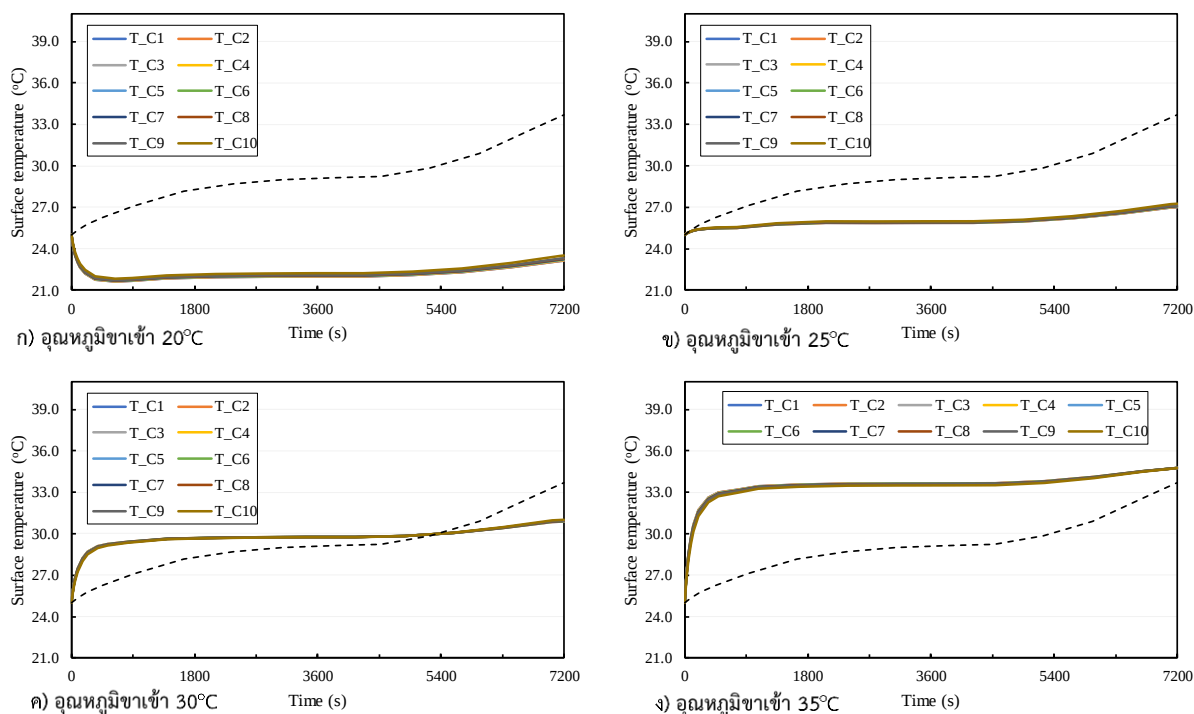
ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของแบบจำลองสำหรับการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น

| ตัวแปรที่กำหนด                | ค่าที่กำหนด                        |
|-------------------------------|------------------------------------|
| อัตราการคายประจุไฟฟ้า         | 26 แอมแปร์ (0.5C ของโมดูลย่อย)     |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม           | 25 องศาเซลเซียส                    |
| แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่       | 4.2 โวลต์ – 3.0 โวลต์              |
| อัตราการไหล                   | 0.4 ลิตรต่อนาที                    |
| ขนาดความกว้างของช่องทางการไหล | 90 มิลลิเมตร                       |
| อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น        | 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส |

### 4.3.2. ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง



รูปที่ 4.11 อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ที่อุณหภูมิโดยรอบ 25 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน



รูปที่ 4.12 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเซลล์ 25 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน

สำหรับการเปลี่ยนอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่นั้น จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และไม่มีการระบายความร้อน อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะสูงถึง 33.7 องศาเซลเซียส เมื่อมีการคายประจุไฟฟ้าที่ 0.5C ในขณะที่ เมื่อมีน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมจะทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงประมาณ 6.4 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.11 อย่างไรก็ตามรูปแบบการระบายความร้อนเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิขาเข้าจะถูกจำแนกได้เป็น 3 ประเภท รูปที่ 4.12 แสดงรูปแบบการเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิขาเข้าต่างๆ โดยที่เส้นประ คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่มีน้ำหล่อเย็น ก) แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตั้งต้นของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่จะถูกดึงความร้อนลงมาให้ต่ำกว่าอุณหภูมิตั้งต้นและชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะที่กำลังคายประจุไฟฟ้า 0.5C ข) อุณหภูมิของสารหล่อเย็นขาเข้าเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่ ในกรณีนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช้าลง โดยอุณหภูมิสุดท้ายจะมีค่าต่ำลง เนื่องจากความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทลงไปที่น้ำหล่อเย็น ค) และ ง) อุณหภูมิ

ของน้ำหล่อเย็นขาเข้าสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่ ในกรณีนี้ น้ำหล่อเย็นจะสร้างความร้อนที่จะทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะมีความเหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำของประเทศไทย

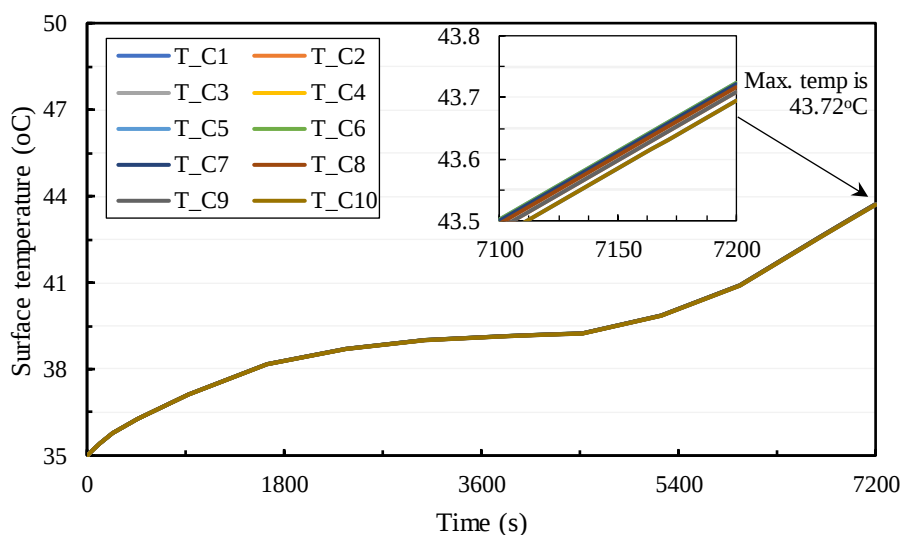
#### 4.4. สรุปผลกระทบของตัวแปรที่ได้ศึกษา

ตารางที่ 4.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาที่มีผลต่อระบบระบายความร้อนโดยใช้น้ำหล่อเย็น

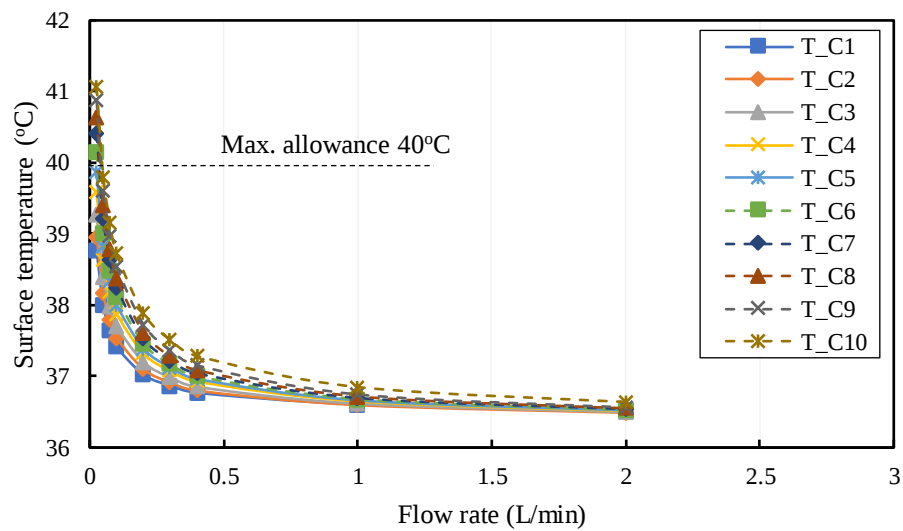
| ตัวแปรที่ศึกษา                                | ผลกระทบ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. อัตราการไหล (Flow rate)                    | <p>การไหลของน้ำหล่อเย็นช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- การไหลด้วยอัตราการไหลต่ำลดอุณหภูมิสูงสุดได้น้อยและทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์บริเวณทางเข้าและเซลล์บริเวณทางออก</li> <li>- การไหลด้วยอัตราการไหลสูงลดอุณหภูมิสูงสุดได้ถึงค่าหนึ่ง รวมไปถึงทำให้ความต่างของอุณหภูมิของเซลล์บริเวณทางเข้าและเซลล์บริเวณทางออกมีค่าต่างกันน้อยลง</li> </ul> |
| 2. ขนาดช่องทางการไหล (Channel width)          | <p>ลดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเซลล์บริเวณทางเข้าของน้ำหล่อเย็น ทำให้อุณหภูมิของเซลล์บริเวณทางเข้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ลดความแตกต่างของเซลล์บริเวณทางเข้าและทางออกของโมดูลย่อยได้</p>                                                                                                                                                                                                               |
| 3. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (Inlet temperature) | <p>ส่งผลต่อการลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ หากน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่ จะทำให้อุณหภูมิลดลงถึง 6.4 องศาเซลเซียส</p>                                                                                                                                                                                                                                                   |

#### 4.5. ผลการจำลองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส (เงื่อนไขการใช้งานจริงในประเทศไทย)

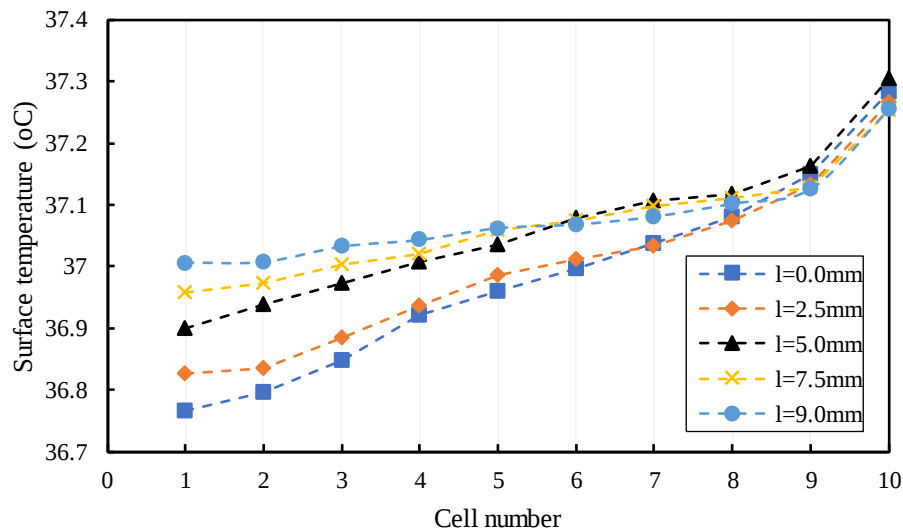
จากการจำลองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียสนั้นจะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่รวมไปถึงผลต่างของอุณหภูมิภายในโมดูลย่อยจะมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดทุกกรณีของการจำลอง แต่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมดังกล่าวจะเกิดขึ้นจริงได้ยากในประเทศไทย ซึ่งอุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทยจะอยู่ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงทำการศึกษาตัวแปรข้างต้นในหัวข้อที่ 4.1 – 4.3 ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียสอีกครั้งซึ่งให้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.16



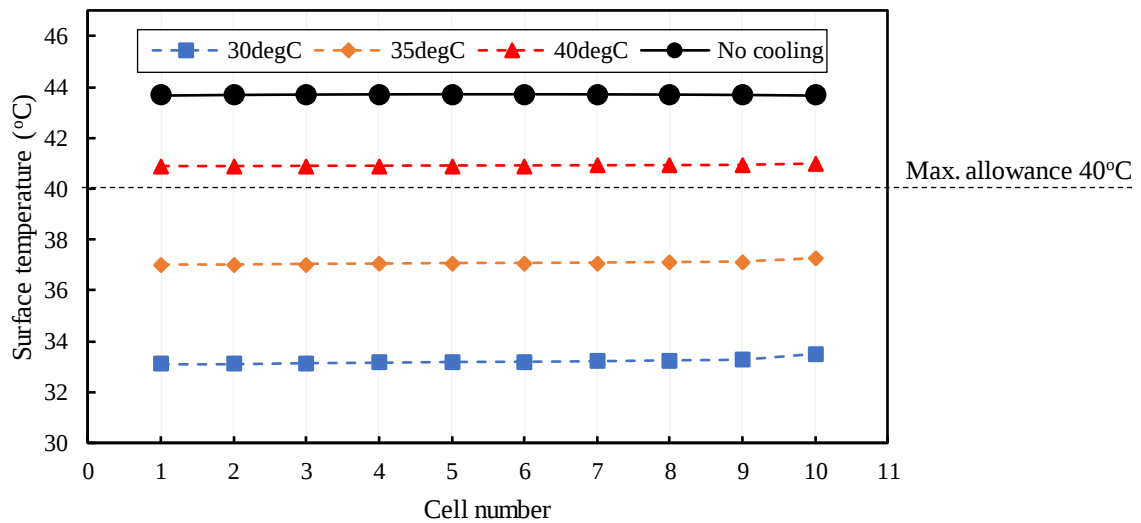
รูปที่ 4.13 รูปแบบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการคายประจุที่ 0.5C ของโมดูลย่อยที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 การลดลงของอุณหภูมิของอัตราการไหลต่างๆที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิตามความกว้างของช่องทางการไหลที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่แต่ละเซลล์ที่อุณหภูมิโดยรอบ 35 องศาเซลเซียสของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทางเข้าต่างกัน

จากผลการจำลองที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียสจะพบว่ามีความเสี่ยงที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น จากรูปที่ 4.14 ที่อัตราการไหลต่ำที่สุด 0.025 ลิตรต่อนาที เซลล์แบตเตอรี่บริเวณทางออกของน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส และที่อัตราการไหล 0.050 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ทุกเซลล์อยู่ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดเล็กน้อย แต่เนื่องจากการจำลองมีผลลัพธ์ของอุณหภูมิน้อยกว่าการทดลองจริงเล็กน้อย ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการออกแบบ (Safety factor) จึงสามารถกล่าวได้ว่าควรจะใช้อัตราการไหลที่ 0.1 ลิตรต่อนาทีของน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่

ในส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิ ในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิในแต่ละเซลล์ เนื่องจากการเรียงตัวของเซลล์ในปริมาณที่ไม่มาก (แถวละ 10 เซลล์) จึงทำให้ความต่างของอุณหภูมิของเซลล์บริเวณทางเข้าและทางออกมีค่าน้อย จึงไม่ต้องกังวลเรื่องอุณหภูมิที่แตกต่างกันของเซลล์แบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ช่องน้ำที่มีขนาดความกว้างทางเข้า 90 มิลลิเมตรจะช่วยให้ความต่างของอุณหภูมิลดลง แม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่บริเวณทางเข้าของน้ำหล่อเย็นเล็กน้อย แต่ผลลัพธ์ยังอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

สำหรับอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น ปัจจัยที่มีผลมากที่สุดในการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าหากอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่มีค่า 40 องศาเซลเซียส ไม่สามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในเกณฑ์ได้ ตามค่าที่ได้เลือกไว้ อย่างน้อยน้ำหล่อเย็นต้องมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่นั่นคือ 35

องศาเซลเซียสในการรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไว้ให้ต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำหล่อเย็น เช่น น้ำ จะมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าวัสดุที่เป็นโลหะ เช่น นิกเกิลที่ใช้ทำแบตเตอรี่ ทำให้อุณหภูมิของน้ำเมื่อถูกทิ้งไว้ในที่ที่มีอากาศร้อนจัดจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็นต้องใช้กลไกอื่นในการช่วยควบคุมอุณหภูมิ ระบบระบายความร้อนโดยใช้ของเหลวจึงเป็นระบบที่ง่ายและไม่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพเพียงพอในการควบคุมความร้อนของแบตเตอรี่อีกด้วย

ในกรณีที่แบตเตอรี่ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูงกว่า 35 องศาเซลเซียส หรือแบตเตอรี่ทำงานด้วยอัตราการปล่อยกระแสสูงกว่า 0.5C การลดอุณหภูมิด้วยระบบระบายความร้อนดังกล่าวอาจจะไม่เพียงพอ อย่างไรก็ตามระบบระบายความร้อนนี้สามารถถูกประยุกต์เพิ่มเติมโดยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและระบบแอร์เพื่อลดอุณหภูมิทางเข้าของน้ำได้ ในกรณีนี้จะสามารถทำให้การควบคุมอุณหภูมิของระบบระบายความร้อนสามารถรองรับการทำงานที่หนักของแบตเตอรี่ได้ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบจะถูกพูดถึงในบทถัดไป

ตารางที่ 4.5 สรุปข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส

| ข้อมูลการออกแบบ                               | รายละเอียด                                                                                                              |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. อัตราการไหล (Flow rate)                    | ควรมากกว่า 0.4 ลิตรต่อนาที่ต่อหนึ่งโมดูล สำหรับน้ำหล่อเย็นทางเข้า 35 องศาเซลเซียส ที่การจ่ายไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 0.5C-rate |
| 2. ขนาดช่องทางการไหล (Channel width)          | พื้นที่ที่สัมผัสกับแผ่นระบายความร้อนช่วงแรกควรมีพื้นที่น้อยกว่าช่วงหลัง                                                 |
| 3. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (Inlet temperature) | ควรมีน้อยกว่า 35 องศาเซลเซียส                                                                                           |
| 4. จำนวนเซลล์แบตเตอรี่ต่อหนึ่งโมดูลย่อย       | 20 Cells เพื่อให้อุณหภูมิของแต่ละเซลล์ไม่ต่างกันเกิน 5 องศาเซลเซียส                                                     |

ตารางที่ 4.5 เป็นข้อมูลที่เป็นแนวทางในการออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ เพื่อให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่

ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส และผลต่างอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่สูงสุดและต่ำสุดไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นขนาดรูทางเข้าของช่องทางการไหลของแต่ละโมดูลย่อยที่เหมาะสมจะเป็นรูปแบบที่ 5 เนื่องจากมีสัดส่วนการไหลในแต่ละโมดูลย่อยใกล้เคียงกัน

## 5. ต้นแบบระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์

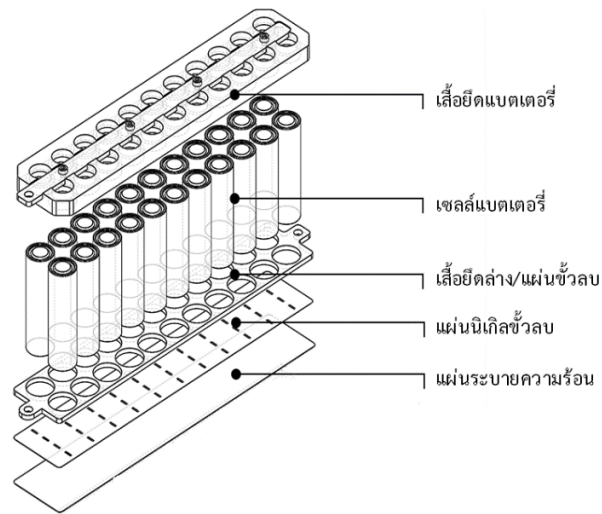
ในบทนี้ จะกล่าวถึงการสร้างต้นแบบระบบระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอร์ ซึ่งทางทีมวิจัยเลือกที่สร้างต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำตามหัวข้อที่ 2.4.2.2. ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ ตามหัวข้อที่ 2.4.2.3 และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศตามหัวข้อที่ 2.4.2.4 โดยพิจารณาตัวแปรหลายๆอย่าง ดังแสดงตารางที่ 5.1 ทั้งนี้ต้นแบบโมดูลของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ สามารถใช้แผ่นร่อนน้ำโมดูลชุดเดียวในการศึกษาตัวแปรได้ โดยทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำทางเข้า ในขณะที่ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ต้องสร้างชุดแผ่นระบายความร้อนแยกต่างหาก โดยต้องมีการเดินท่อสำหรับน้ำยาแอร์ ซึ่งมีความซับซ้อนในการผลิต อย่างไรก็ตามลักษณะของโมดูลย่อยของทุกระบบ มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงทำการจัดสร้างต้นแบบโมดูลขึ้นมา 2 ชุด โดยชุดแรกใช้ทำการศึกษาระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ ในขณะที่ ชุดที่สองใช้สำหรับระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ

สำหรับการออกแบบแผ่นร่อนน้ำโมดูลสามารถสร้างแบบจำลองได้ง่าย และมีการคำนวณต่างๆ ดังแสดงในบทที่ผ่านมา เพื่อหารูปทรงของแผ่นร่อนน้ำที่เหมาะสม ในขณะที่การออกแบบโมดูลที่มีการระบายความร้อนที่มีการติดตั้งท่อน้ำยาแอร์เข้าไปที่ใต้โมดูล มีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก เนื่องจากการระบายความร้อนโดยใช้หลักการความร้อนแฝง โดยสารจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เมื่อตัวสารความเย็นดึงความร้อนออกจากตัวแพ็คเกจเตอร์ ดังนั้นการศึกษาตัวแปรการระบายความร้อนด้วยท่อน้ำยาแอร์นั้นทำได้แค่ควบคุมอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อน โดยไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ การควบคุมอุณหภูมิจะเป็นตัดต่อการจ่ายน้ำยาแอร์

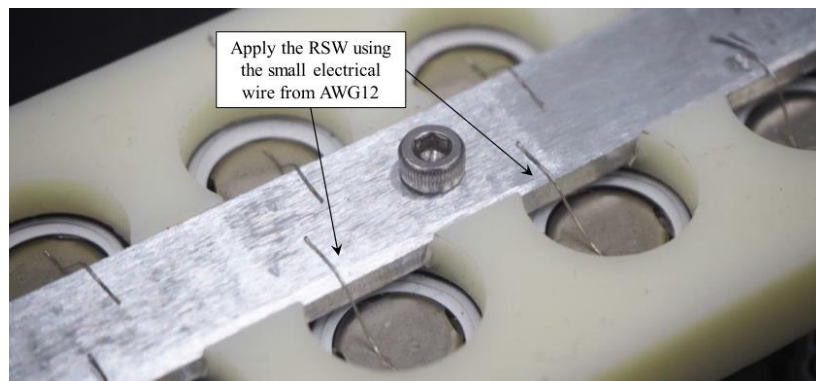
ระบบที่ใช้ น้ำยาแอร์ช่วยในการระบายความร้อน สามารถใช้น้ำยาแอร์บางส่วนจากระบบปรับอากาศภายในยานยนต์ไฟฟ้าได้ เพื่อเป็นการลดอุปกรณ์การจัดการระบายความร้อน ทั้งนี้ไม่ว่าระบบจะระบายความร้อนด้วยน้ำหรือน้ำยาแอร์ ความท้าทายอยู่ที่การป้องกันการรั่วซึมเป็นหลัก

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการเลือกสร้างต้นแบบเพื่อทำการศึกษาตัวแปรของระบบระบายความร้อน

|                                                                                      | ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ | ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็กแบตเตอรี่ | ระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| การออกแบบและการคำนวณ                                                                 | ไม่ซับซ้อน                                 | ซับซ้อน                                            | ซับซ้อน                                                          |
| ขั้นตอนในการผลิต                                                                     | ไม่ซับซ้อน                                 | ซับซ้อนมาก                                         | ไม่ซับซ้อน                                                       |
| ประสิทธิภาพของระบบ                                                                   | สูง                                        | ต่ำ                                                | ปานกลาง                                                          |
| สมรรถนะในการทำความเย็น                                                               | ต่ำ                                        | สูง                                                | ปานกลาง                                                          |
| ความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ไม่ให้ต่างกันเกิน 5 องศาเซลเซียส   | สูง                                        | ต่ำ                                                | สูง                                                              |
| ความสามารถในการรักษาอุณหภูมิของแต่ละเซลล์แบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วง 15 – 40 องศาเซลเซียส | ต่ำ                                        | สูง                                                | สูง                                                              |
| ราคาของระบบ                                                                          | ต่ำ                                        | สูง                                                | ปานกลาง                                                          |



รูปที่ 5.1 ลักษณะโมดูลย่อยแบตเตอรี่ OMTEC

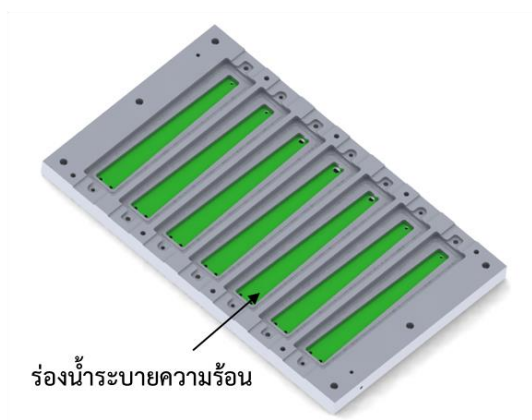
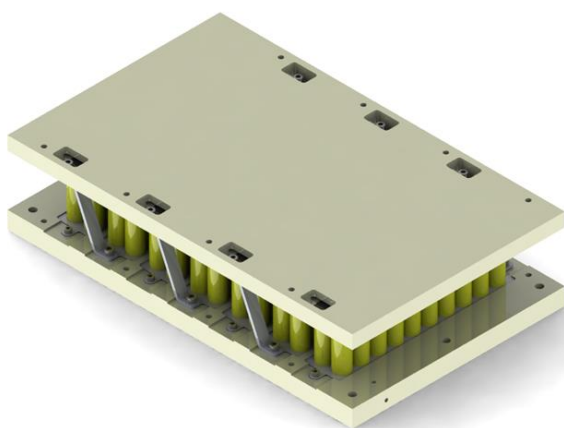


รูปที่ 5.2 ลวดพิวส์ที่ถูกติดตั้งไว้ที่ขั้วบวก

## 5.1. การสร้างต้นแบบ

### 5.1.1. ต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ

ตัวโมดูลย่อยมีการออกแบบ โดยที่ขั้วบวกมีการติดตั้งลวดพิวส์ป้องกันกระแสเกินไว้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 โดยลักษณะของโมดูลดังแสดงในรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ซึ่งพร้อมที่จะสามารถศึกษาตัวแปรของการระบายความร้อนได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องรออุปกรณ์การระบายความร้อนภายนอก เนื่องในโครงการได้มีการจัดซื้อชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำและอัตราการไหลสำเร็จรูปดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งใช้ในการศึกษาตัวแปรต่างๆ ทั้งนี้ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำและอัตราการไหลสำเร็จรูปจะไม่ถูกส่งมอบ โดยทางทีมวิจัยจะจัดสร้างอุปกรณ์มีลักษณะการทำงานดังกล่าวสำหรับการส่งมอบ



รูปที่ 5.3 ลักษณะโมดูลแบตเตอรี่ (ซ้าย) และแผ่นร่อนน้ำระบายความร้อน (ขวา) ที่จะใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ

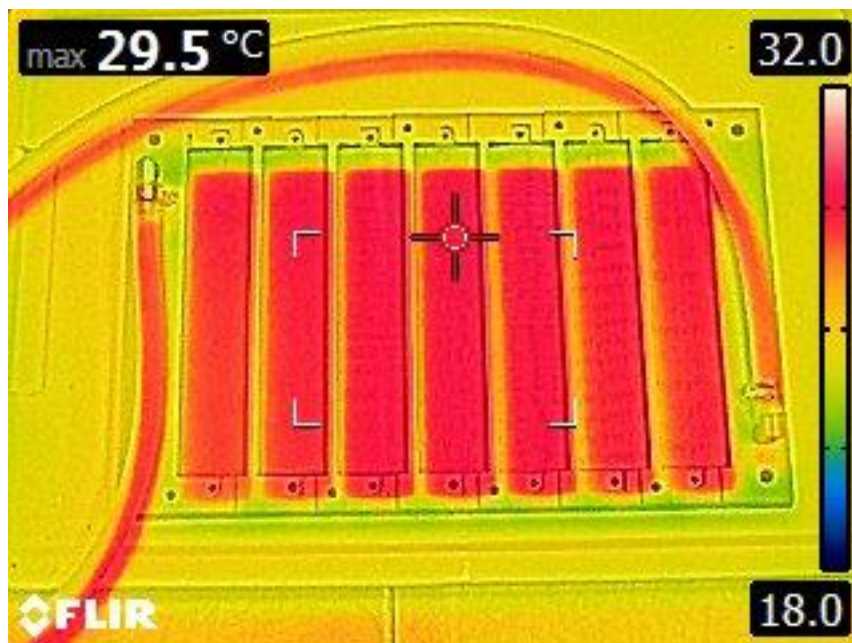


รูปที่ 5.4 ลักษณะโมดูลย่อยที่ถูกประกอบลงบนแผ่นฐานโมดูลระบายความร้อน

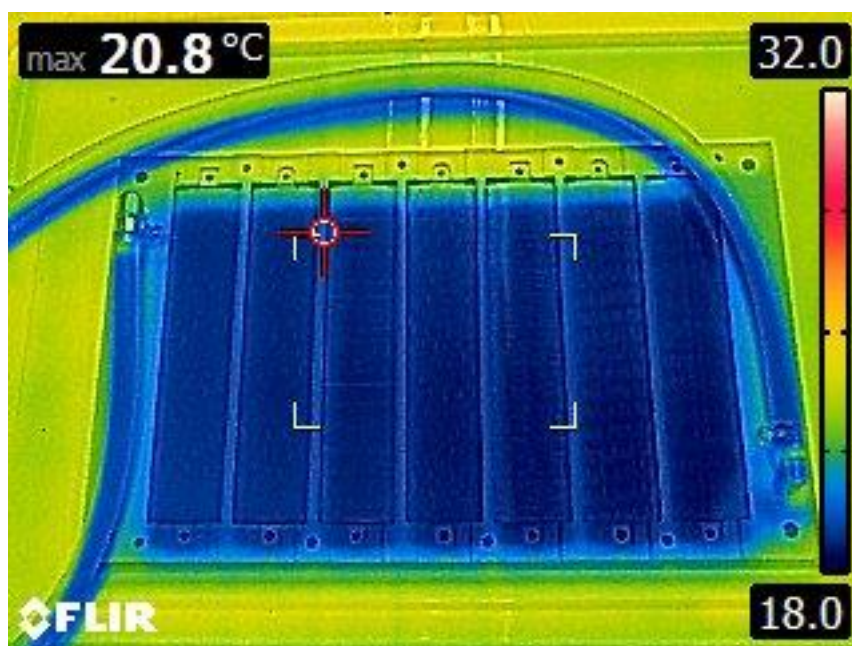
รูปที่ 5.6 แสดงการทดสอบการทำงานของแผ่นระบายความร้อนโดยอุณหภูมิเริ่มต้นของแผ่นที่ 30 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นมีการป้อนน้ำที่อัตราการไหลค่าหนึ่ง ที่ควบคุมอุณหภูมิของแผ่นให้อยู่ในช่วง 20 องศาเซลเซียส เพื่อให้แน่ใจว่าช่องทางการไหลในแต่ละโมดูลย่อยไม่มีการอุดตัน ก่อนทำการประกอบโมดูลย่อยลงบนแผ่นระบายความร้อน



รูปที่ 5.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำและอัตราการไหลสำเร็จรูป



ก) แผ่นระบายความร้อนอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 30 องศาเซลเซียส



ข) อุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนหลังจากมีการไหลของน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส

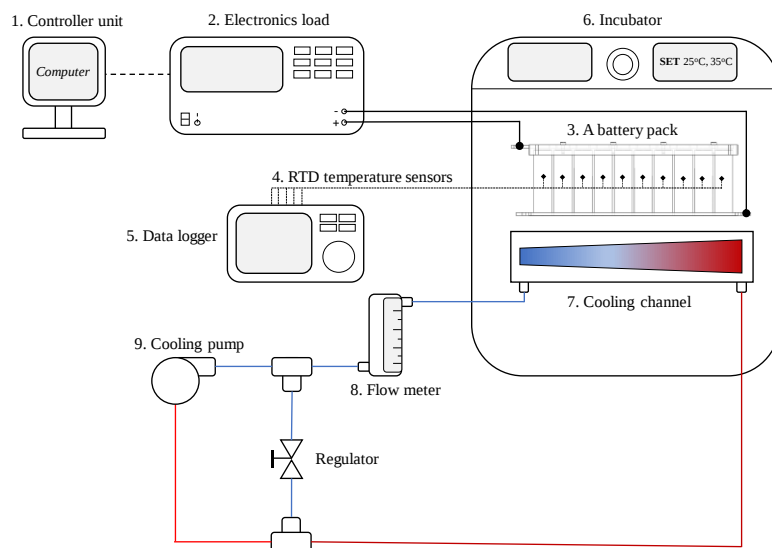
รูปที่ 5.6 การตรวจสอบการทำงานของแผ่นระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยใช้กล้องตรวจจับความร้อน

### 5.1.2. ผลการทดสอบต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ และระบบระบายความร้อนด้วยการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นโดยใช้ระบบปรับอากาศ

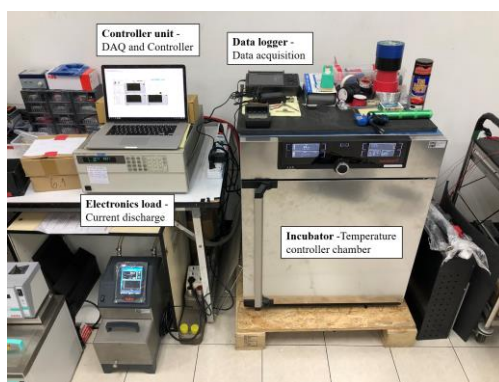
แท็กแบตเตอรี่ที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นได้รับการทดสอบในเงื่อนไขการใช้งานต่างๆ 4 กรณี แบ่งเป็น 2 สภาวะของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม สภาวะแรกคือในกรณีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นกรณีทั่วไปในการใช้งานของแบตเตอรี่ที่จะสามารถเอาไปใช้เปรียบเทียบความสามารถในการรักษาอุณหภูมิ (Benchmark) เทียบกับวิธีการอื่นได้ และในสภาวะที่สอง คือ กรณีที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการจำลองการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สภาพอากาศโดยเฉลี่ยของประเทศ ดังตารางที่ 5.2 โดยมีรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.7 - รูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการทดสอบ

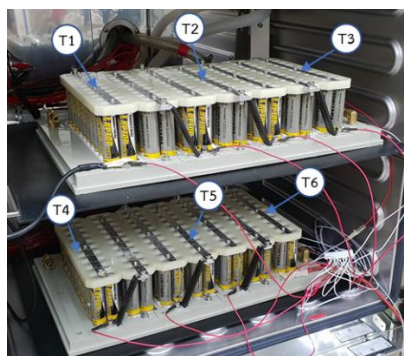
| เงื่อนไขการทดสอบ | อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม<br>(°C) | กระแสไฟฟ้า<br>(A) | อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น<br>(°C) | อัตราการไหล<br>(L/min) |
|------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| กรณีที่ 1        | 25                          | 20                | -                           | 1                      |
| กรณีที่ 2        | 25                          | 20                | 25                          | 1                      |
| กรณีที่ 3        | 35                          | 20                | -                           | 1                      |
| กรณีที่ 4        | 35                          | 20                | 30                          | 1                      |



รูปที่ 5.7 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ



รูปที่ 5.8 อุปกรณ์เครื่องมือสำหรับการทดสอบการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่



รูปที่ 5.9 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensors location)

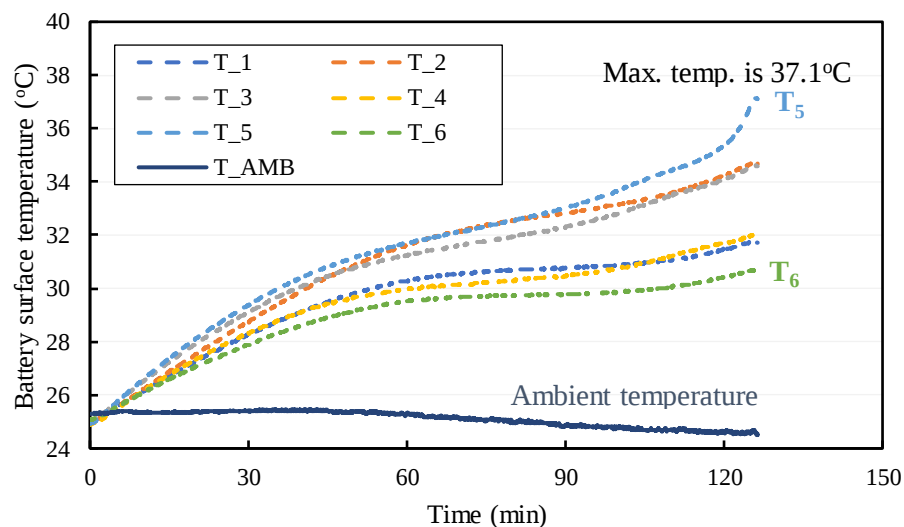
ตารางที่ 5.3 แรงดันไฟฟ้าขณะโมดูลย่อยแบตเตอรี่กำลังทำงาน

| Time<br>(min) | Battery<br>Module<br>Voltage | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T6 | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T5 | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T4 | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T3 | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T2 | โมดูลย่อย<br>ที่ติดตั้ง<br>T1 |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 125.98        | 46.79V                       | 3.269 V                       | 2.953 V                       | 3.438 V                       | 3.131 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.00        | 46.79V                       | 3.269 V                       | 2.950 V                       | 3.438 V                       | 3.130 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.02        | 46.78V                       | 3.268 V                       | 2.948 V                       | 3.438 V                       | 3.130 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.03        | 46.78V                       | 3.268 V                       | 2.946 V                       | 3.438 V                       | 3.129 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.05        | 46.77V                       | 3.268 V                       | 2.944 V                       | 3.437 V                       | 3.129 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.07        | 46.77V                       | 3.267 V                       | 2.942 V                       | 3.437 V                       | 3.127 V                       | 3.414 V                       | 3.431 V                       |
| 126.08        | 46.76V                       | 3.267 V                       | 2.940 V                       | 3.437 V                       | 3.127 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.10        | 46.76V                       | 3.267 V                       | 2.938 V                       | 3.437 V                       | 3.127 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.12        | 46.76V                       | 3.267 V                       | 2.935 V                       | 3.437 V                       | 3.126 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.13        | 46.75V                       | 3.267 V                       | 2.933 V                       | 3.437 V                       | 3.126 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.15        | 46.75V                       | 3.266 V                       | 2.931 V                       | 3.437 V                       | 3.125 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.17        | 46.75V                       | 3.266 V                       | 2.929 V                       | 3.437 V                       | 3.125 V                       | 3.413 V                       | 3.431 V                       |
| 126.18        | 47.49V                       | 3.334 V                       | 3.004 V                       | 3.475 V                       | 3.234 V                       | 3.459 V                       | 3.469 V                       |
| 126.20        | 48.05V                       | 3.371 V                       | 3.074 V                       | 3.510 V                       | 3.341 V                       | 3.461 V                       | 3.470 V                       |
| 126.22        | 48.27V                       | 3.403 V                       | 3.088 V                       | 3.514 V                       | 3.347 V                       | 3.506 V                       | 3.514 V                       |
| 126.23        | 48.29V                       | 3.404 V                       | 3.094 V                       | 3.515 V                       | 3.350 V                       | 3.507 V                       | 3.514 V                       |

### 5.1.2.1. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส

จากการใช้งานแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยที่ไม่มีการระบายความร้อนในกรณีนี้ 1 จะเห็นผลได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังรูปที่ 5.10 อุณหภูมิของโมดูลย่อยที่มีตัวตรวจจับอุณหภูมิตำแหน่ง T1 และ T6 จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าโมดูลอื่น เนื่องจากอยู่ในตำแหน่งที่สามารถระบายความร้อนกับอากาศที่อยู่โดยรอบ ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 5.9 ในทางกลับกันโมดูลย่อยแบตเตอรี่อื่นที่อยู่ตรงกลางของแพ็ก จะไม่สามารถถูกระบาย ความร้อนด้วยการพัดพาโดยใช้อากาศ เนื่องจากโมดูลย่อยแบตเตอรี่บริเวณใกล้เคียงมีอุณหภูมิสูงเช่นกัน ส่งผลให้ ความสามารถในการพาความร้อนบริเวณตำแหน่งกลางของโมดูลต่ำ นอกจากนั้นการที่อุณหภูมิของโมดูลย่อยที่ ติดตั้ง T5 มีอุณหภูมิสูงที่สุดนั้น เกิดจากคุณภาพของโมดูลย่อยดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าโมดูลย่อยอื่น ส่งผลให้ค่า แรงดันไฟฟ้าลดลงเร็วกว่า ผลจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้า(Battery Management System, BMS) จึงให้ เห็น ว่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโมดูลย่อยที่ติดตั้ง T5 ดัง

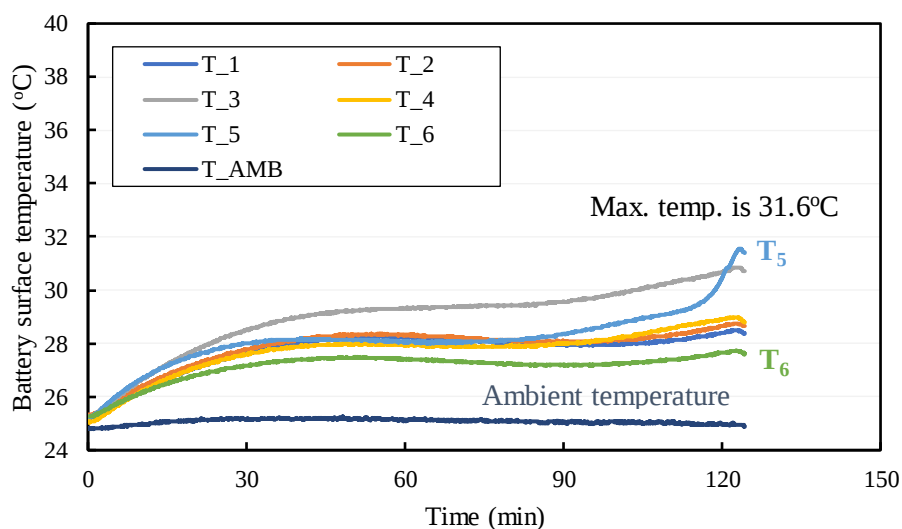
ตารางที่ 5.3 มีค่าต่ำกว่า 3 โวลต์ ซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดการทำงานของแบตเตอรี่ที่ถูกกำหนดไว้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่ มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์ดังกล่าว จะเกิดการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ด้วย เหตุนี้จึงส่งผลให้อุณหภูมิของโมดูลย่อยที่ติดตั้ง T5 มีอุณหภูมิสูงที่สุด



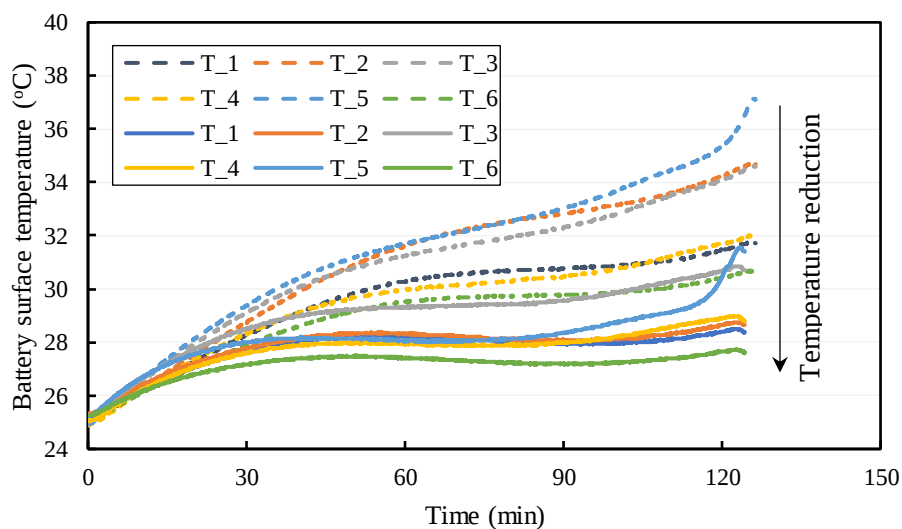
รูปที่ 5.10 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยไม่มีระบบระบาย ความร้อน

หลังจากทดสอบการทำงานโดยไม่มีระบบระบายความร้อนแล้ว ระบบระบายความร้อนจึงถูกติดตั้งเข้าไปกับชุดแพ็คเกจเตอร์ และทำการทดสอบอีกครั้ง ด้วยเงื่อนไขกรณีที่ 2 ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ออกมาดังรูปที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ลดลงมาจาก 37.1 องศาเซลเซียส เป็น 31.6 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิสูงสุดยังคงพบที่โมดูลย่อยที่ติดตั้ง T5 เช่นกัน ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น จุดแตกต่างที่สังเกตได้อีกหนึ่งประการ ก็คือความต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในการกระจายความร้อนมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากการออกแบบช่องทางการไหลที่ทำให้น้ำหล่อเย็นไหลไม่เท่ากันในแต่ละช่องที่ถูกออกแบบไว้ ในบริเวณที่แบตเตอรี่ถูกคาดการณ์ว่าจะมีอุณหภูมิสูง น้ำหล่อเย็นจะไหลด้วยอัตราการไหลที่สูงกว่าช่องทางอื่น ส่งผลให้มีการกระจายความร้อนที่ดีขึ้น มีผลต่างของอุณหภูมิที่ลดลง ช่วยลดอัตราความแตกต่างของการเสื่อมของแบตเตอรี่ อันเนื่องมาจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี

รูปที่ 5.12 แสดงถึงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงการลดลงของอุณหภูมิที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส จากก่อนและหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์การระบายความร้อน



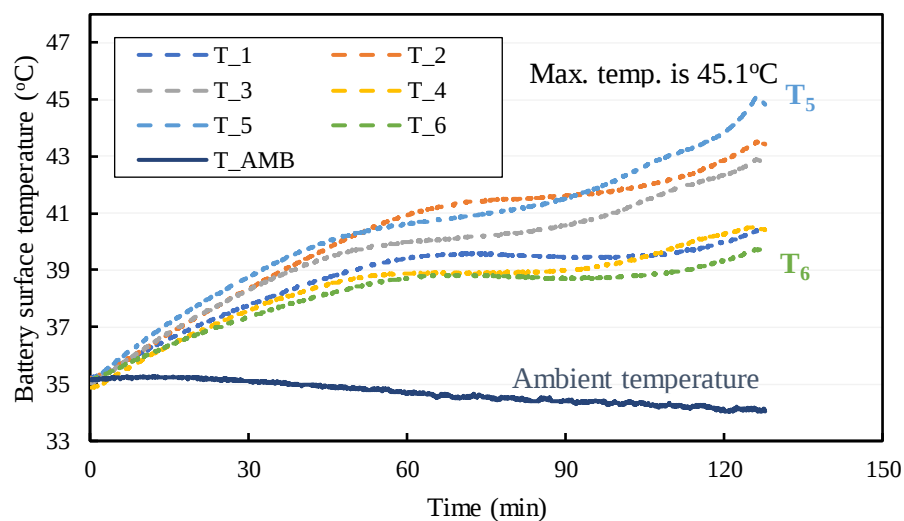
รูปที่ 5.11 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ 25 องศาเซลเซียส

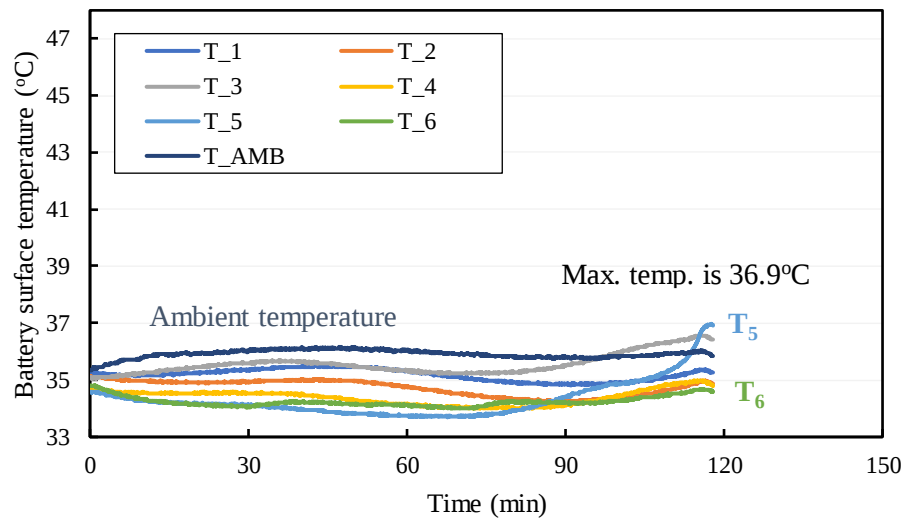
#### 5.1.2.2. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส

สำหรับสภาวะการใช้งานจริงที่ 35 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแพ็คเกจแบตเตอรี่ขณะที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.13 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้นถึง 45.1 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดข้อจำกัดการใช้งานของแบตเตอรี่ที่กำหนดไว้ หากใช้งานโดยปราศจากการจัดการ และควบคุมอุณหภูมิจะทำให้เกิดการเสื่อมของแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว และไม่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่ดังกล่าว ในการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะมีแนวโน้มที่เหมือนกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 25 องศาเซลเซียสรวมไปถึงการกระจายความร้อนและโมดูลย่อยที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำที่สุดอีกด้วยซึ่งจะสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับผลการทดลองข้างต้นในหัวข้อก่อนหน้านี้

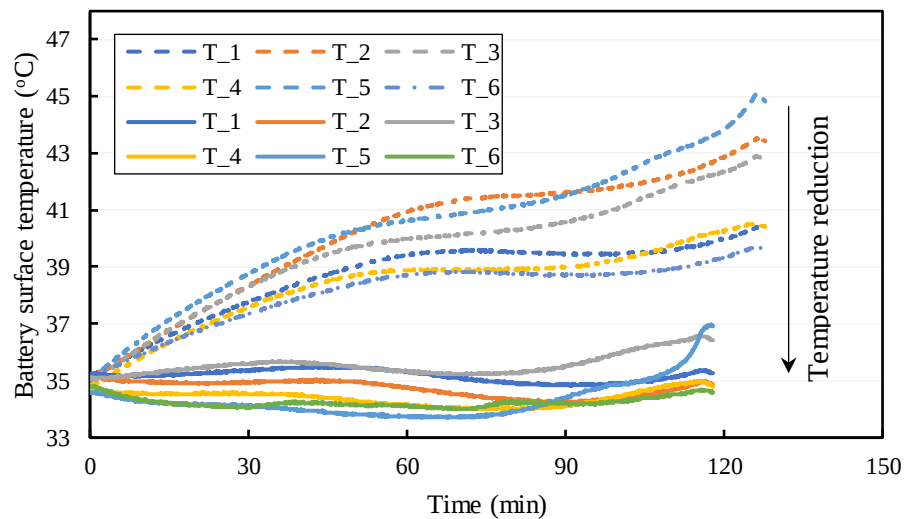


รูปที่ 5.13 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35°C โดยไม่มีระบบระบายความร้อน

หลังจากเก็บข้อมูลขณะไม่มีระบบระบายความร้อนเพื่อใช้อ้างอิงแล้ว ระบบระบายความร้อนจึงถูกติดตั้งและทดสอบตามเงื่อนไขที่ 4 เพื่อใช้ลดอุณหภูมิ ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.14 ในอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมนี้จะสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจะต่ำกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมอยู่ 5 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทดลองที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 35 องศาเซลเซียสเท่ากับสิ่งแวดล้อมนั้น ไม่สามารถดึงความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้เพียงพอที่จะควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ ดังนั้นจึงทำการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้ต่ำกว่าสิ่งแวดล้อมเล็กน้อย ซึ่งในกรณีนี้ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่โดยรวมจะลดลงเหลือเพียง 36.9 องศาเซลเซียสจาก 45.1 องศาเซลเซียสหรือลดลง 8.2 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นการกระจายความร้อนของโมดูลย่อยต่างๆจะมีค่าต่ำมาก แต่ละโมดูลจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลดีอย่างมากต่อการใช้งานแบตเตอรี่ในระยะยาว



รูปที่ 5.14 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่ 30 องศาเซลเซียส



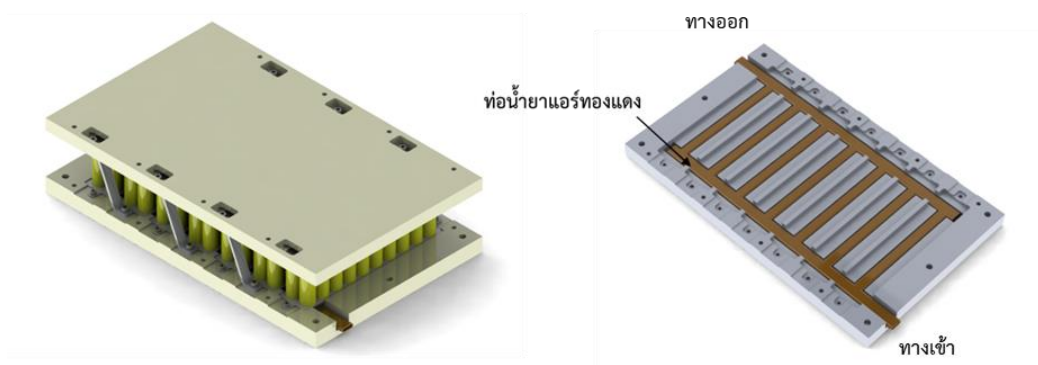
รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนที่ 35 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อการควบคุมอุณหภูมิของแพ็คเกจแบตเตอรี่คืออุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิที่ต่ำของน้ำหล่อเย็นช่วยเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแบตเตอรี่และควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเป็นเรื่องยากถ้าหากระบบเสริมเนื่องจากโดยปกติแล้วหากจอตลอดไว้กลางแจ้งจนอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าหนึ่งๆ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นก็จะมีค่า

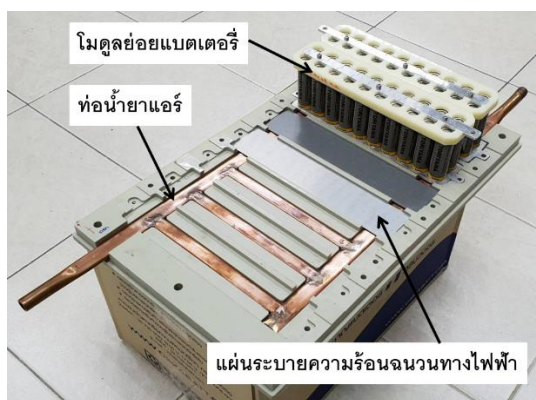
สูงไปด้วย แต่อาจจะมีความต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจากน้ำมีความจุความร้อน (Specific heat capacity) ที่ค่อนข้างสูง จึงสามารถเก็บความร้อนได้มากโดยที่อุณหภูมิยังไม่เปลี่ยนแปลง หนึ่งในวิธีการที่สามารถช่วยลดอุณหภูมิของ น้ำหล่อเย็นได้ก็คือการต่อระบบแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับน้ำยาแอร์ที่ใช้ในห้องโดยสาร ซึ่งถูกแยกออกมาเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเพื่อใช้ลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า ด้วยวิธีการดังกล่าวจะทำให้ น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

### 5.1.3. ต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์

เพื่อลดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำให้ น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิลดลงตามต้องการ จึงนำน้ำยาแอร์หรือสารทำความเย็นมาดึงความร้อนโดยตรงจากแบตเตอรี่ โดยยังต้องระบายความร้อนผ่านแผ่นระบายความร้อนเป็นวัสดุอลูมิเนียม ที่ผ่านการกระบวนการอโนไดซ์ โดยน้ำยาแอร์จะไหลผ่านท่อ น้ำยาแอร์ที่สัมผัสกับแผ่นระบายความร้อนโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 โดยใช้ซิลิโคนความร้อนทา เพื่อลดช่องว่างของอากาศ โดยการควบคุมระบบจะเป็นการตัดต่อการไหลของน้ำยาแอร์ที่ใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศของรถยนต์ โดยจะมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ โดยวัดอุณหภูมิที่ท่อ น้ำยาแอร์ จากการทดลองทางที่วิจัยพบว่า ระบบสามารถลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ในกรณีไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ และพบน้ำและน้ำแข็งเกาะตามท่อ แต่การใช้งานจริง ทางที่วิจัยจะตั้งอุณหภูมิของท่อ น้ำยาแอร์ที่ต้องการไว้ที่ 20 หรือ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะไม่มีน้ำหรือน้ำแข็งเกาะตามท่อ ซึ่งผลที่ได้จะไม่ต่างกับการใช้น้ำหล่อเย็น โดยข้อดีของระบบนี้ คือ มีสมรรถนะในการระบายความร้อนที่ดี และระบบจะมีรั่วซึมยากกว่า เพราะท่อ น้ำยาแอร์จะประกอบจากการเชื่อม แทนการป้องกันรั่วโดยใช้ซิลิโคน แบบระบบที่ใช้น้ำหล่อเย็น สำหรับข้อเสียของระบบนี้ คือ ในช่วงเริ่มต้นทำงาน บริเวณทางเข้าของน้ำยาแอร์จะเย็นก่อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปการกระจายตัวของอุณหภูมิจะกระจายตัวเท่ากัน



รูปที่ 5.16 ลักษณะโมดูลแบตเตอรี่ (ซ้าย) และการเดินท่อน้ำยาแอร์ (ขวา) ที่จะใช้กับระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอรี่



รูปที่ 5.17 ภาพองค์ประกอบจริงสำหรับโมดูลแบตเตอรี่ที่ทำการติดตั้งท่อน้ำยาแอร์

#### 5.1.4. ผลการทดสอบต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอรี่

ผลการศึกษาตัวแปรการระบายความร้อนด้วยท่อน้ำยาแอร์นั้นทำได้แค่ควบคุมอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อน โดยไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ การควบคุมอุณหภูมิจะเป็นจากการตัดต่อการจ่ายน้ำยาแอร์ จากการทดสอบพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามต้องการ ในกรณีไม่มีระบบตัดต่อจ่ายน้ำยาแอร์พบว่า อุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนสามารถลงถึงติดลบ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วแผ่นระบายความร้อนจะถูกควบคุมไว้ที่ 23 องศาเซลเซียส โดยความร้อนจากแบตเตอรี่จะถูกแผ่นระบายความร้อนดึงความร้อนออก เพื่อระบายที่ท่อน้ำยาแอร์ นอกจากนี้พบว่าในช่วงการทำงานเริ่มต้นโมดูลที่อยู่ใกล้ทางเข้าของท่อน้ำยาแอร์มีอุณหภูมิที่ต่ำ โดยภาพรวมระบบนี้ควบคุมการกระจายตัวของโมดูลยากกว่า แต่มีความสามารถในการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลงได้เร็วกว่า ซึ่งยังต้องการพัฒนาเพื่อให้เกิดการกระจายของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้ดีกว่าเดิม

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 1/2559 (ครั้งที่ 6), “เมื่อวันศุกร์ที่ 11 มีนาคม 2559 เวลา 13.30 น. ณ ตึกสันติไมตรี (หลังใน) ทำเนียบรัฐบาล.”
- [2] “Bloomberg New Energy Finance,” *Andersson*, 2001.
- [3] D. Stephens, P. Gorney, and B. Hennessey, *Failure Modes & Effects Criticality Analysis of Lithium-Ion Battery Electric and Plug-in Hybrid Vehicles*. SAE 2012 Government/Industry Meeting, 2012, pp. 1–18.
- [4] R. Matthé and U. Eberle, “8 - The Voltec System—Energy Storage and Electric Propulsion,” in *Lithium-Ion Batteries*, 2014, pp. 151–176.
- [5] TAWAKI, “HOW TEMPERATURE AFFECTS BATTERIES,” 2016. [Online]. Available: <http://www.tawaki-battery.com/how-temperature-affects-batteries/>.
- [6] D. Ottaviano, “Technical Assessment and Modeling of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles,” Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2012.
- [7] D. H. Jeon and S. M. Baek, “Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 8, pp. 2973–2981, 2011.
- [8] L. Lam, “A practical circuit-based model for Li-ion battery cells in electric vehicle applications,” University of Technology Delft, Delft, Netherlands, 2011.
- [9] “[https://www.hioki.com/en/products/detail/?product\\_key=6382](https://www.hioki.com/en/products/detail/?product_key=6382).” .
- [10] Y. Reynier, J. Graetz, T. Swan-Wood, P. Rez, R. Yazami, and B. Fultz, “Entropy of Li intercalation in  $\text{Li}_x\text{CoO}_2$ ,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 70, no. 17, pp. 1–7, 2004.
- [11] “[https://images.hgmsites.net/med/nissan\\_100317355\\_m.jpg](https://images.hgmsites.net/med/nissan_100317355_m.jpg).” .

- 
- [12] “<https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/3e/f4/c8/3ef4c86d2afa65012c793323137b629a.jpg>.” .
- [13] “<https://insideevs.com/tesla-or-gm-who-has-the-best-battery-thermal-management-bower>.” .
- [14] “<https://www.evhangar.com/wp-content/uploads/2015/03/i-MiEV-G-battery-pack-ForoEV.bmp>.” .
- [15] “<http://www.hybridcars.com/bmw-and-lg-chem-trump-tesla-in-battery-thermal-management>.” .
- [16] L. H. Saw, Y. Ye, A. A. O. Tay, W. T. Chong, S. H. Kuan, and M. C. Yew, “Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 783–792, 2016.
- [17] Z. Lu, X. Z. Meng, L. C. Wei, W. Y. Hu, L. Y. Zhang, and L. W. Jin, “Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies,” *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 682–688, 2016.
- [18] Y. Azizi and S. M. Sadrameli, “Thermal management of a LiFePO<sub>4</sub> battery pack at high temperature environment using a composite of phase change materials and aluminum wire mesh plates,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 294–302, 2016.
- [19] Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang, and Y. Li, “Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 1514–1522, 2017.

## 6.1. การอบรมระบบระบายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

วันที่ 27 สิงหาคม 2561

อาคาร MTEC อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ. ปทุมธานี

| เวลา          | สถานที่      | เนื้อหา                                                                                                                      |
|---------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9:00 – 10:30  | M120         | ระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจแบตเตอรี่<br>โดย ดร. มานพ มาสมทบ                                                               |
| 10:30 – 10:45 | ลานกาแฟ MTEC | พักรับประทานอาหารว่าง                                                                                                        |
| 10:45 – 12:15 | M120         | การหาค่าความร้อนจากแบตเตอรี่ และการออกแบบระบบ<br>ระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจแบตเตอรี่<br>โดย ดร. มานพ มาสมทบ                  |
| 12:15 – 13:00 | ลานกาแฟ MTEC | พักรับประทานอาหารกลางวัน                                                                                                     |
| 13:00 – 14:15 | MP102        | แนะนำอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์ความร้อน<br>ของแบตเตอรี่ และการทดสอบ<br>โดย ดร. มานพ มาสมทบ และ ดร. วิศาล สีสาวีวัฒน์ |
| 14:15 – 14:30 | ลานกาแฟ MTEC | พักรับประทานอาหารว่าง                                                                                                        |
| 14:30 – 16:15 | MP102        | นำเสนอต้นแบบระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจ<br>แบตเตอรี่<br>โดย ดร. มานพ มาสมทบ และ ดร. วิศาล สีสาวีวัฒน์                     |

### รายชื่อวิทยากร

|                       |                                                                 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| ดร. มานพ มาสมทบ       | หน่วยวิจัยวัสดุสำหรับพลังงาน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |
| ดร. วิศาล สีสาวีวัฒน์ | หน่วยวิจัยวัสดุสำหรับพลังงาน ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ |

## 6.2. รายชื่อผู้เข้าร่วม

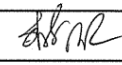
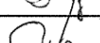
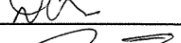
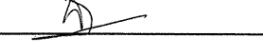


THAILAND  
AUTOMOTIVE  
INSTITUTE  
สถาบันยานยนต์

NSTDA

MTEC  
a member of NSTDA

รายชื่อผู้ลงทะเบียนเข้าร่วมหลักสูตรอบรม  
ระบบระบายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย  
วันจันทร์ที่ 27 สิงหาคม 2561 ณ อาคารเอ็มเทค อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี

| ลำดับ | ชื่อ-นามสกุล                  | หน่วยงาน                                 | ลายเซ็น                                                                               |
|-------|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | นายอัศวิน สาส์                | บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)                 |    |
| 2     | นายธวัชชัย เดฟิมลรัตน์        | บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)                 |    |
| 3     | นายธนเดช ไพรฤณ                | บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)                 |                                                                                       |
| 4     | นางสาวอรรณพ วัฒนพานิชกรณ      | บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)                 |    |
| 5     | นางสาวสิริกานดา นวลแสง        | บริษัท เบต้า เอ็นเนอร์ยี่ โซลูชั่น จำกัด |    |
| 6     | นายภาณุวัฒน์ เพ็ชรใส          | บริษัท เบต้า เอ็นเนอร์ยี่ โซลูชั่น จำกัด |     |
| 7     | Mr. Charet Akkarabanthongjai  | Mine Mobility Research Co.,Ltd.          |    |
| 8     | Mr. Wanswad Prinyawat         | Mine Mobility Research Co.,Ltd.          |                                                                                       |
| 9     | นายอนุกุล สภานชาติ            | บริษัท ออสก้าโซลดิ้ง จำกัด               |  |
| 10    | นายสมบุรณ์ อ่อนน้อม           | บริษัท ออสก้าโซลดิ้ง จำกัด               |   |
| 11    | นายกาญจน์ มากสิน              | บริษัท ออสก้าโซลดิ้ง จำกัด               |   |
| 12    | นายพิพัฒน์ ตรีสกุลวัฒนา       | บริษัท ออสก้าโซลดิ้ง จำกัด               |  |
| 13    | นายเดวิชัย รัตนตั้งปฐพี       | บริษัท ออสก้าโซลดิ้ง จำกัด               |  |
| 14    | ดร.พีรพงษ์ เกียรติศักดิ์ศรี   | สถาบันยานยนต์                            |   |
| 15    | นางสาวสุติภัทร ดอกไม้เทศ      | สถาบันยานยนต์                            |   |
| 16    | นายอุเทศก์ ด่วนบุตรศรี        | สถาบันยานยนต์                            |  |
| 17    | นายเสฏฐวุฒิ ลากวิสุทธิสาโรจน์ | สถาบันยานยนต์                            |  |
| 18    | นายธิดิภัทร ธิตะจาวี          | สถาบันยานยนต์                            |  |
| 19    | นายพงศกร นาควิเชียร           | บริษัท โพนิกซ์ จำกัด                     |   |
| 20    | นายธนาพันธ์ กาญจนคูหา         | บริษัท เอฟโอเอ็มเอ็ม (เอเชีย) จำกัด      |  |
| 21    | นายชัยพร สุวรรณวาที           | บริษัท เอฟโอเอ็มเอ็ม (เอเชีย) จำกัด      |  |
| 22    |                               |                                          |                                                                                       |

## 6.3. แบบประเมินความพึงพอใจ

Counts Questionnaires

[https://www2.mtec.or.th/eventnstda/Admin/EM\\_CountsQuestio...](https://www2.mtec.or.th/eventnstda/Admin/EM_CountsQuestio...)

Result Counts : หลักสูตรอบรม "ระบบระบายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย" วันจันทร์ที่ 27 สิงหาคม 2561 ณ อาคารเอ็มเทค อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี

Add Form

Part : 1 หน่วยงาน/องค์กร

| 28.) ประเภทของหน่วยงาน         | Avg.Score | Grad |
|--------------------------------|-----------|------|
| ภาคเอกชน : 8                   | (53.33 %) | 0.53 |
| หน่วยงานราชการ : 4             | (26.67 %) | 0.27 |
| รัฐวิสาหกิจ : 3                | (20.00 %) | 0.20 |
| มหาวิทยาลัย : 0                | (0.00 %)  | 0.00 |
| อื่นๆ/ไม่ใช่ (แล้วแต่กรณี) : 0 | (0.00 %)  | 0.00 |

Part : 2 วัตถุประสงค์ของการเข้ารับการฝึกอบรม

| 29.) วัตถุประสงค์ของการเข้ารับการฝึกอบรมในครั้งนี้ | Avg.Score | Grad |
|----------------------------------------------------|-----------|------|
| เพื่อศึกษาริธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นมาแล้ว : 1      | (5.88 %)  | 0.06 |
| เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต : 1          | (5.88 %)  | 0.06 |
| เพื่อพัฒนาบุคลากรให้มีศักยภาพสูงขึ้นในระยะยาว : 15 | (88.24 %) | 0.88 |
| อื่นๆ/ไม่ใช่ (แล้วแต่กรณี) : 0                     | (0.00 %)  | 0.00 |

Part : 3 ความคิดเห็นเกี่ยวกับหลักสูตร

| 30.) ความคิดเห็นเกี่ยวกับหลักสูตร       | ดีมาก (5) | ดี (4) | พอใช้ (3) | การปรับปรุง (2) | การปรับปรุงอย่างยิ่ง (1) | Avg.Score | Grad |
|-----------------------------------------|-----------|--------|-----------|-----------------|--------------------------|-----------|------|
| รูปแบบของการอบรม                        | 14        | 1      | 0         | 0               | 0                        | (98.67 %) | 4.93 |
| ระยะเวลาในการอบรม                       | 10        | 5      | 0         | 0               | 0                        | (93.33 %) | 4.67 |
| เอกสารประกอบการอบรม                     | 13        | 2      | 0         | 0               | 0                        | (97.33 %) | 4.87 |
| เนื้อหาหลักสูตร                         | 12        | 3      | 0         | 0               | 0                        | (96.00 %) | 4.80 |
| สถานที่จัด                              | 13        | 2      | 0         | 0               | 0                        | (97.33 %) | 4.87 |
| ประโยชน์ที่ได้รับ                       | 14        | 1      | 0         | 0               | 0                        | (98.67 %) | 4.93 |
| ความรู้ที่ทันทีก่อนการอบรม              | 3         | 4      | 4         | 4               | 0                        | (68.00 %) | 3.40 |
| ความรู้ที่ทันได้รับหลังการอบรม          | 9         | 6      | 0         | 0               | 0                        | (92.00 %) | 4.60 |
| โดยภาพรวม ท่านพึงพอใจกับการอบรมครั้งนี้ | 14        | 1      | 0         | 0               | 0                        | (98.67 %) | 4.93 |

Part : 4 ความคิดเห็นเกี่ยวกับวิทยากร

| 31.) วิทยากรท่านที่1: ดร.มานพ มาสมทบ  | ดีมาก (5) | ดี (4) | พอใช้ (3) | การปรับปรุง (2) | การปรับปรุงอย่างยิ่ง (1) | Avg.Score  | Grad |
|---------------------------------------|-----------|--------|-----------|-----------------|--------------------------|------------|------|
| ความรู้ และประสบการณ์                 | 15        | 0      | 0         | 0               | 0                        | (100.00 %) | 5.00 |
| เทคนิคการนำเสนอและการบรรยาย           | 12        | 3      | 0         | 0               | 0                        | (96.00 %)  | 4.80 |
| การตอบข้อซักถาม                       | 14        | 1      | 0         | 0               | 0                        | (98.67 %)  | 4.93 |
| โดยภาพรวม ท่านพึงพอใจวิทยากรในระดับใด | 15        | 0      | 0         | 0               | 0                        | (100.00 %) | 5.00 |

| 32.) วิทยากรท่านที่2: ดร.วิศาล สิลาริวัฒน์ | ดีมาก (5) | ดี (4) | พอใช้ (3) | การปรับปรุง (2) | การปรับปรุงอย่างยิ่ง (1) | Avg.Score | Grad |
|--------------------------------------------|-----------|--------|-----------|-----------------|--------------------------|-----------|------|
| ความรู้ และประสบการณ์                      | 12        | 3      | 0         | 0               | 0                        | (96.00 %) | 4.80 |
| เทคนิคการนำเสนอและการบรรยาย                | 10        | 5      | 0         | 0               | 0                        | (93.33 %) | 4.67 |
| การตอบข้อซักถาม                            | 12        | 3      | 0         | 0               | 0                        | (96.00 %) | 4.80 |
| โดยภาพรวม ท่านพึงพอใจวิทยากรในระดับใด      | 12        | 3      | 0         | 0               | 0                        | (96.00 %) | 4.80 |

Counts Questionnaires

[https://www2.mtec.or.th/eventnstda/Admin/EM\\_CountsQuestio...](https://www2.mtec.or.th/eventnstda/Admin/EM_CountsQuestio...)

Part : 5 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการให้บริการของเจ้าหน้าที่

| 33.) ความคิดเห็นเกี่ยวกับการให้บริการของเจ้าหน้าที่จัดฝึกอบรม(เอ็มเทค) | ดีมาก<br>(5) | ดี<br>(4) | พอใช้<br>(3) | การปรับปรุง<br>(2) | การปรับปรุง<br>ยัง<br>(1) | Avg.Score | Grad |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|--------------|--------------------|---------------------------|-----------|------|
| เจ้าหน้าที่เอาใจใส่และบริการอย่างเต็มที่                               | 14           | 1         | 0            | 0                  | 0                         | (98.67 %) | 4.93 |
| การให้บริการมีความถูกต้องครบถ้วนและทันเวลา                             | 14           | 1         | 0            | 0                  | 0                         | (98.67 %) | 4.93 |
| เจ้าหน้าที่มีความรู้ในการบริการ                                        | 13           | 2         | 0            | 0                  | 0                         | (97.33 %) | 4.87 |
| กระบวนการให้บริการมีลำดับขั้นตอนดำเนินการ                              | 13           | 2         | 0            | 0                  | 0                         | (97.33 %) | 4.87 |

|                                       |            |      |
|---------------------------------------|------------|------|
| 34.) การให้บริการโดยภาพรวมของหน่วยงาน | Avg.Score  | Grad |
| พอใจ : 15                             | (100.00 %) | 1.00 |
| ไม่พอใจ : 0                           | (0.00 %)   | 0.00 |
| อื่นๆ/ไม่ใช่ (แล้วแต่กรณี) : 0        | (0.00 %)   | 0.00 |

Part : 6 ข้อเสนอแนะ

|                                                                                                                                                                                                                       |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 35.) หัวข้อที่ท่านสนใจให้เอ็มเทคจัดฝึกอบรม                                                                                                                                                                            |  |
| 1.หัวข้อ Simulation สำหรับระบบระบายความร้อน (Heat Transfer) (2 ท่าน)<br>2.หัวข้อ Battery Cell Design and Manufacturing Process (Li-ion battery)<br>3.หัวข้อ การคำนวณและการออกแบบแบตเตอรี่ และระบบควบคุมแบตเตอรี่รถ EV |  |

|                                                   |  |
|---------------------------------------------------|--|
| 36.) ข้อเสนอแนะอื่น ๆ                             |  |
| อยากให้มียุทธศาสตร์แบบชัดเจนไป เพราะมีประโยชน์มาก |  |

Admin

Remark :

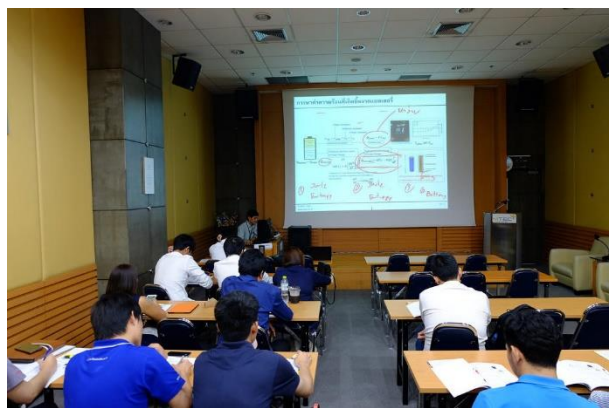
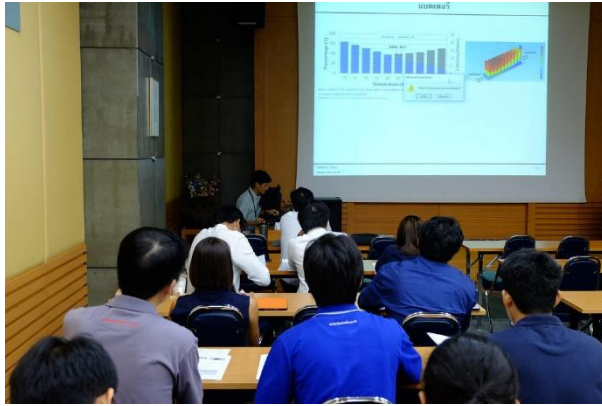
Remark :

Save

Print

## 6.4. รูปภาพบรรยายภาคการอบรม

### 6.4.1. ภาคทฤษฎี



#### 6.4.2. ภาคปฏิบัติ



## 6.5. รูปภาพบรรยายกาจัดงาน EV Days



## 6.6. คู่มือการใช้งานต้นแบบ

ในต้นแบบส่งมอบจะเป็นต้นแบบไม่ได้ใช้ในการทดลอง แต่จะเป็นต้นแบบแสดงถึงหลักการทำงานของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำและต้นแบบระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอร์ โดยสามารถมองเห็นชิ้นส่วนภายในของแพ็คเกจเตอร์ เพื่อให้เข้าใจต่อการเข้าใจหลักการทำงานของ อย่างไรก็ตามทางทีมวิจัยได้ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิให้กับตัวโมดูลแพ็คเกจเตอร์เข้าไปด้วย ซึ่งสามารถใช้งานได้จริง โดยตัวควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองระบบจะแยกกัน แต่เมื่อเสียบปลั๊กทั้งสองระบบจะทำงานพร้อมกัน โดยสามารถอุณหภูมิปรับตั้งค่าได้ดังนี้

1. เสียบปลั๊กไฟเข้ากับไฟบ้าน AC 220V (ไฟจะถูกแปลงผ่านหม้อแปลงเป็น DC 12V เข้าสู่บอร์ดควบคุมอุณหภูมิ) หน้าจอจะแสดงตัวเลข 000.0 ก่อน และจะแสดงอุณหภูมิในขณะนั้น

- ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ พัดลมที่หม้อน้ำจะทำงานตลอด หลังจากเสียบปลั๊ก แต่ปั๊มน้ำจะทำงานก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของแพ็คเกจเตอร์สูงเกินค่าที่ตั้งไว้ที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ

- ระบบระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็น คอมเพรสเซอร์จะทำงานก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของแพ็คเกจเตอร์สูงเกินค่าที่ตั้งไว้ที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ



2. กด SW1 หน้าจอจะแสดง P--.1 แล้วปล่อย หลังจากนั้นหน้าจอจะแสดงอุณหภูมิที่เครื่องจะสั่งให้คอมเพรสเซอร์แอร์ ทำงาน



3. กด SW2 และ SW3 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิตามต้องการ



4. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการให้ทำการกด SW1 หน้าจอจะแสดง P--.2 แล้วปล่อย หลังจากนั้นหน้าจอจะแสดงอุณหภูมิที่เครื่องจะสั่งให้คอมเพรสเซอร์แอร์ หยุดการทำงาน



5. กด SW2 และ SW3 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิตามต้องการ



6. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการให้ทำการกด SW1 หน้าจอจะแสดง P--.3 แล้วปล่อย หลังจากนั้นหน้าจอจะแสดงเวลาในการหวนวงคอมเพรสเซอร์แอร์ หยุดการทำงาน



7. กด SW2 เพื่อตั้งค่านาที และกด SW3 เพื่อตั้งค่าวินาที (ตั้งได้สูงสุด 9.59 นาที)



8. เมื่อได้ค่าที่ต้องการให้ทำการกด SW1 หน้าจอจะแสดง P.-- แล้วปล่อย จะเป็นการออกจากการตั้งฟังก์ชันการทำงานและบันทึกค่าต่างๆ พร้อมกับแสดงอุณหภูมิปัจจุบัน



หมายเหตุ ในกรณีที่อยู่ในการระหว่างการตั้งฟังก์ชันการทำงาน ถ้าต้องการออกก่อน โดยที่ไม่ต้องการบันทึกค่า ให้ทำการกด SW4 เพื่อออกจากฟังก์ชัน

## 6.7. M-file สำหรับคำนวณค่าความต้านทานตาม DOD ใน MATLAB

```
% These parameters which define the value in the Simscape
Current = 2.6; % The current which uses to discharge battery
Cycle = 240;
X=[1:1:60];
DOD_T=0-0.01695;
% Calculate resistance R1 and R2 and depth of discharge (DoD)
for N = 1:1:60;
    M = N-1;
    i = Cycle*M+1;%14401
    R12(:,N)= (Voltage(i)-Voltage(i+1))/Current;% The resistance(R12)=(V1-V2)/I
    OCV(:,N)= Voltage(i);
    CCV(:,N)= Voltage(i+1);
    DOD(:,N)=DOD_T+0.01695;
    DOD_T=DOD(1,N);
    DOD(1,60)=1;
end
% Calculate capacity (C) and resistance (R3)
for N = 1:1:60;
    M = N-1;
    i = Cycle*M+1;%14401
    for L=0:1:Cycle;
        j = i+L; %position within the current loop
        D1 = abs(Voltage(j)-Voltage(j+1));
        D2 = abs(Voltage(j+1)-Voltage(j+2));
        if D1<=0.001 && D2<=0.001;
            V3(:,N) =Voltage(j);
            V4(:,N) =Voltage(j+1);
            V5(:,N) =Voltage(j+2);
            TC(:,N) = L;
            R3(:,N) =(Voltage(i)-Voltage(j))/Current - R12(N);
            C(:,N) = L/R3(N);
            break;
        end
    end
end
R_All=R12+R3;
plot(X,OCV,X,CCV,X,R_All,'LineWidth',2,'Parent',axes)
```

## 6.8. ตัวอย่างการคำนวณกำลังของระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์รี่แบบง่าย

เนื่องจากทางทีมวิจัยได้ดำเนินการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Finite Element Method (FEM) และ Computation Fluid Dynamic (CFD) ซึ่งสมการที่ใช้ในการคำนวณไม่สามารถคำนวณด้วยหลักคณิตศาสตร์ทั่วไปหรือด้วยมือได้ จำเป็นต้องคิดด้วยระบบวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งมีความยุ่งยากในการเรียนรู้ รวมถึงต้องเข้าใจตั้งแต่การขึ้นแบบสามมิติ ที่จะสามารถสร้าง Mesh สำหรับการทำแบบจำลองได้ อย่างไรก็ตามทางทีมวิจัยได้นำเสนอสมการหาความร้อนแบบคร่าวๆ เพื่อใช้ในการคำนวณกำลังของระบบระบายความร้อนสำหรับแพ็คเกจเตอร์รี่

เงื่อนไขสมมติฐาน

- อุณหภูมิของแบตเตอรี่เท่ากันทั้งก้อน ทำให้เทอมของการนำความร้อนภายในตัวแบตเตอรี่ไม่ถูกนำมาคิดด้วย
- ความร้อนจากแบตเตอรี่ไประบายออกตามพื้นผิวและขั้วต่อสายไฟ
- การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทุก 1 วินาที  $\Delta t = 1$  วินาที (ถ้าต้องการละเอียด สามารถใช้เวลา น้อยลงได้)
- ข้อมูลของแบตเตอรี่ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลจำเพาะแบตเตอรี่

| Material | Volume, $V$                                   | Density, $\rho$ | Specific heat, $C_p$ | Thermal conductivity |
|----------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
|          | $m^3$                                         | $kg/m^3$        | $J/(kg \cdot K)$     | $W/(m \cdot K)$      |
|          | $\frac{\pi}{4} \cdot (0.018^2) \cdot (0.065)$ |                 |                      |                      |
| Battery  | เส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร                 | 2300            | 800                  | 30 in z axis         |
|          | ความยาว 65 มิลลิเมตร                          |                 |                      | 1 in r axis          |

สมการความร้อนของแบตเตอรี่ที่ลดรูปนั้นจะไม่พิจารณาค่าการนำความร้อน และความร้อนที่ระบายออกจากตัวแบตเตอรี่สู่สิ่งแวดล้อม

$$m \cdot C_p \cdot \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = Q(t)_{Joule} + Q(t)_{Entropy} = Q(t)_{Battery}$$

$$\rho \cdot V \cdot C_p \cdot \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta t} = Q(t)_{Battery}$$

$$T_{i+1} = \frac{Q(t)_{Battery} \cdot \Delta t}{\rho \cdot V \cdot C_p} + T_i$$

แทนค่าคงที่  $\Delta t = 1 \text{ sec}$ ,  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ,  $\frac{\pi}{4} \cdot (0.018^2) \cdot (0.065) \text{ m}^3$ ,  $C_p = 800 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

$$T_{i+1} = \frac{Q(t)_{Battery} \cdot 1}{2300 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.018^2) \cdot (0.065) \cdot 800} + T_i$$

ค่าแปรผันตามเวลา  $T_i$  และ  $Q(t)_{Battery}$

ที่เวลา  $t = 1 \text{ sec}$ ,  $T_i = T_0 = 298 \text{ K}$  (อุณหภูมิแบตเตอรี่จากการคำนวณ)

$$T_{i+1} = \frac{Q(t)_{Battery} \cdot 1}{2300 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.018^2) \cdot (0.065) \cdot 800} + 298$$

$Q(t)_{Battery}$  จะถูกสุ่มจนกว่าค่าอุณหภูมิแบตเตอรี่จากการคำนวณ  $(T_{i+1})_{cal}$  และอุณหภูมิแบตเตอรี่จากการทดลอง  $(T_{i+1})_{exp}$  ใกล้เคียงกัน

$$(T_{i+1})_{cal} = (T_1)_{cal} = 298.4994333 \text{ K}$$

$$(T_{i+1})_{exp} = (T_1)_{exp} = 298.5 \text{ K}$$

ที่เวลา  $t = 2 \text{ sec}$ ,  $T_i = T_1 = 298.4994333 \text{ K}$  (อุณหภูมิแบตเตอรี่จากการคำนวณ)

$$T_{i+1} = \frac{Q(t)_{Battery} \cdot 1}{2300 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.018^2) \cdot (0.065) \cdot 800} + 298.4994333$$

$Q(t)_{Battery}$  จะถูกสุ่มจนกว่าค่าอุณหภูมิแบตเตอรี่จากการคำนวณ  $(T_{i+1})_{cal}$  และอุณหภูมิแบตเตอรี่จากการทดลอง

$$(T_{i+1})_{cal} = (T_1)_{cal} = 298.7990933 \text{ K}$$

$$(T_{i+1})_{exp} = (T_1)_{exp} = 299 \text{ K}$$

ตารางที่ 2 ค่าความร้อนที่ได้จากการสูม (อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการสูมค่า สามารถเขียนโค้ดเพื่อให้สูมค่าได้)

| เวลา<br>(วินาที) | ค่าความร้อนของแบตเตอรี่<br>$Q(t)_{Battery}, W$ | อุณหภูมิแบตเตอรี่<br>จากการคำนวณ (K) | อุณหภูมิแบตเตอรี่<br>จากการทดลอง (K) |
|------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0                | 0                                              | 298                                  | 298                                  |
| 1                | 0.019                                          | 298.4994333                          | 298.5                                |
| 2                | 0.0114                                         | 298.7990933                          | 299                                  |
| 3                | ...                                            | ...                                  | 300                                  |
| 4                | ...                                            | ...                                  | 300.2                                |
| 5                | 0.021                                          | 301.01                               | 301                                  |
| 6                | ...                                            | ...                                  | 301.5                                |

ในการคำนวณหาค่าสูงสุดสำหรับระบบระบายความร้อนให้นำค่าความร้อนของแบตเตอรี่ที่เวลาค่าความร้อนสูงสุดมาใช้ ขณะที่ C-rate คงที่ต่อเนื่องสูงสุด เช่น ความร้อนสูงสุดเกิดขึ้นที่เวลา 5 วินาที ที่ C-rate คงที่สูงสุด 0.5C ที่มีค่าความร้อน 0.021 W และให้นำค่าความร้อนที่ได้นี้คูณกับจำนวนเซลล์ที่ใช้ทั้งหมดในแพ็คเกจแบตเตอรี่ ก็จะได้ค่าความสามารถของกำลังระบบระบายความร้อนที่ต้องใช้ ซึ่งนักออกแบบต้องทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Simulation หรือสร้างต้นแบบเพื่อทดสอบความสามารถของระบบ เพราะถ้าระบบมีการระบายความร้อนแบบมีการไหลจำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่รองรับ CFD คำนวณ ในการออกแบบ หรือทดลองจริงเท่านั้น ถ้ามีการออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีความสามารถสูงกว่าค่าความร้อนที่เกิดขึ้น ระบบก็肯定不会เปลี่ยนเปลืองกำลังเกินความจำเป็น เนื่องจากระบบระบายความร้อนจะมีชุดตัดต่อการทำงานของระบบ โดยอ่านค่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ แต่ต้นทุนของระบบจะสูง

## 6.9. เอกสารประกอบการสอน

สนับสนุนโดย



ร่วมจัดโดย



### การศึกษาและพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ใน ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

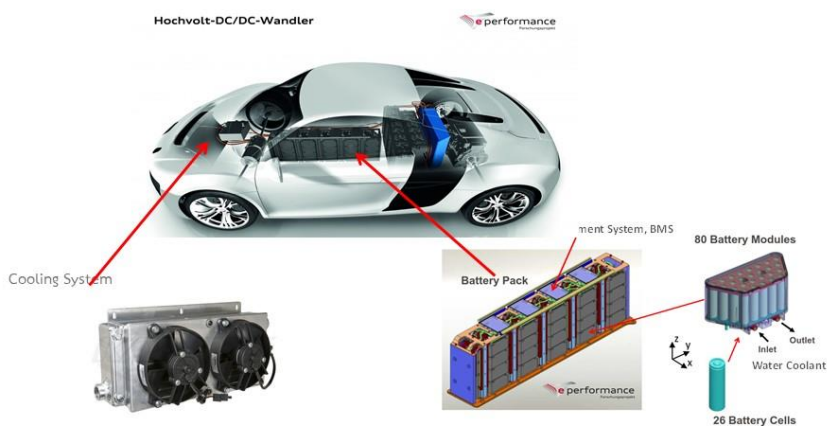


27 สิงหาคม 2561

หน่วยวิจัยวัสดุเพื่อพลังงาน  
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ  
สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

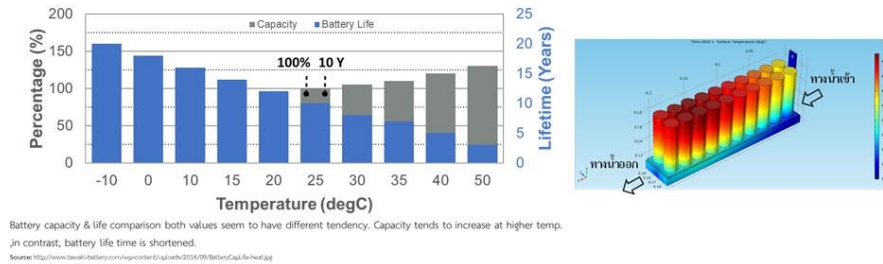
งานสัมมนาได้รับการอุดหนุนจาก สถาบันยานยนต์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ กระทรวงอุตสาหกรรม

### องค์ประกอบชุดแพ็คเกจแบตเตอรี่



Source: Manop Masornitth, Christoph Schaefer, Wei Zhou, Dirk Uwe Sauer, "Battery Pack Temperature Distribution Simulation with COMSOL and MATLAB" COMSOL Conference 2012 Milan Proceedings, October 2012, Milan, Italy

## ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมรรถนะและอายุการใช้งานของเซลล์แบตเตอรี่



|          |                                              |                                  |
|----------|----------------------------------------------|----------------------------------|
| Criteria | อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมรับได้                   | 15 - 40°C (45°C สำหรับประเทศไทย) |
|          | ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดระหว่างเซลล์ที่ยอมรับได้ | 5°C                              |

© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 3

## ระบบระบายความร้อนที่ใช้กับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน

| ประเภทรถ              | ประเทศ  | ปีที่จำหน่าย (ก.ศ.) | ความจุ (kWh) | ระยะทาง (km) | จำนวน เซลล์ (เซลล์) | ระบบระบายความร้อน                           |
|-----------------------|---------|---------------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------------------------------|
| Mitsubishi i-MiEV     | ญี่ปุ่น | 2009                | 16           | 100          | 88                  | การไหลวนของอากาศ (Forced Air Convection)    |
| Nissan Leaf           | ญี่ปุ่น | 2010                | 24           | 117          | 192                 | การพาของอากาศ (Natural Convection)          |
| Ford Focus (Electric) | อเมริกา | 2011                | 23           | 112          | 98                  | การระบายความร้อนโดยของเหลว (Liquid Cooling) |
| Tesla Model S         | อเมริกา | 2012                | 85           | 426          | 7104                | การระบายความร้อนโดยของเหลว (Liquid Cooling) |
| Honda Fit             | ญี่ปุ่น | 2012                | 20           | 132          | 432                 | การไหลวนของอากาศ (Forced Air Convection)    |
| VW e-Golf             | เยอรมัน | 2014                | 24           | 129          | 264                 | การไหลวนของอากาศ (Forced Air Convection)    |
| BMW i3                | เยอรมัน | 2014                | 22           | 130          | 96                  | การระบายความร้อนโดยของเหลว (Liquid Cooling) |

### ระบบระบายความร้อน

- ระบบที่ไม่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Passive cooling system)
- ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

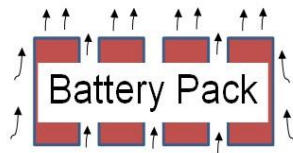
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 4

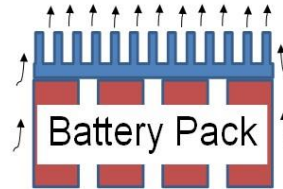
## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

ระบบที่ไม่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Passive cooling system)

แบบไม่มีแผ่นระบายความร้อน



แบบมีแผ่นระบายความร้อน



ใช้ได้กับแพ็คเกจที่มีการจ่ายกำลังไฟน้อยๆ

© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 5

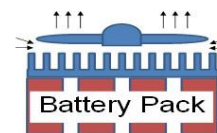
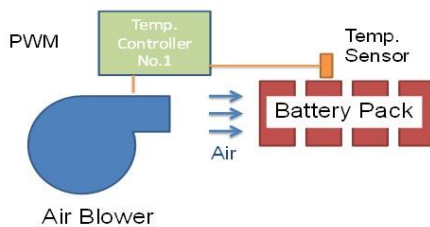
## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

ระบบระบายความร้อนด้วยพัดลมระบายอากาศ

ระบบระบายความร้อนด้วยครีบบระบายความร้อนร่วมกับ

พัดลมระบายอากาศ



การทำงาน : ระบบจะใช้อากาศจากภายนอกตัวรถมาระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่  
หมายเหตุ : ระบบนี้ไม่เหมาะสมกับไทยเนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นภายนอกที่ค่อนข้างสูง

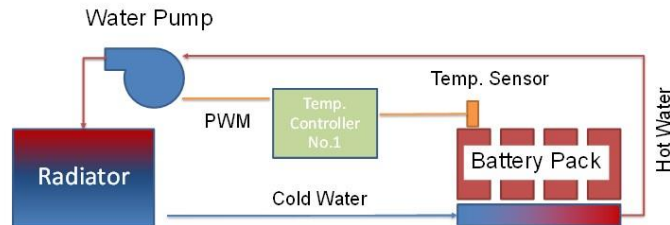
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 6

## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

### ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นจากหม้อน้ำ



การทำงาน : ระบบจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่  
โดยน้ำร้อนที่ออกจากแบตเตอรี่จะถูกทำให้เย็น โดยการถ่ายเทความร้อนจากหม้อน้ำ (Radiator)

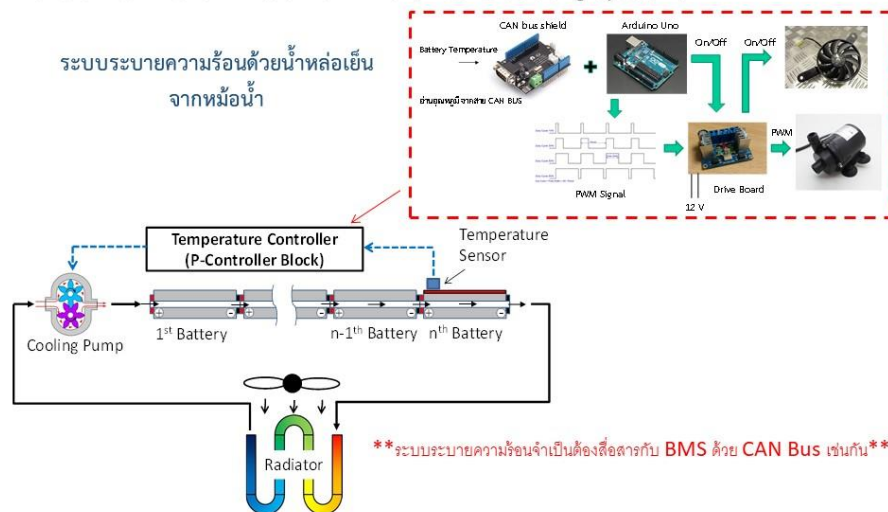
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 7

## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

### ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็น  
จากหม้อน้ำ



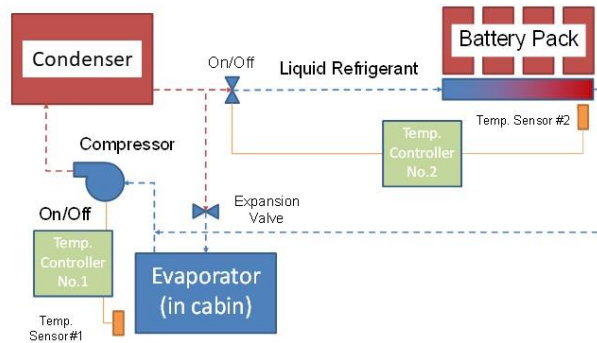
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 8

## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

### ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

ระบายความร้อนด้วยสารทำความเย็นกับแพ็คเกจเตอรี่



การทำงาน : ระบบจะใช้ไนยาแอร์ (Coolant) เป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ โดยไนยาแอร์ที่อยู่ในระบบปรับอากาศของรถยนต์เอง

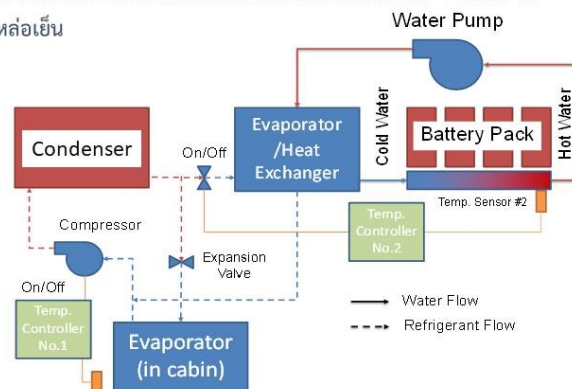
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 9

## ระบบระบายความร้อนเบื้องต้น

### ระบบที่ต้องการพลังงานในการทำงาน (Active cooling system)

ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นกับแพ็คเกจเตอรี่โดยผ่านระบบทำความเย็นด้วยสารหล่อเย็น

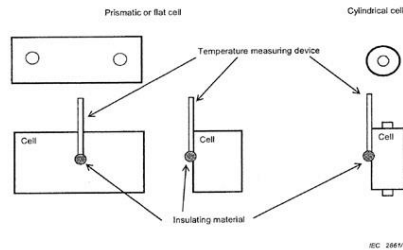


การทำงาน : ระบบจะใช้น้ำเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ โดยน้ำจะถูกทำให้เย็นด้วยคอยล์เย็น (Heat Exchanger) ที่ทำงานจากน้ำยาหล่อเย็นภายในตัวรถ

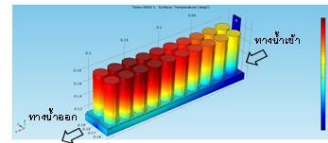
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 10

## การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor)



ตามมาตรฐาน IEC 2861/10



ควรติดตั้งบริเวณเซลล์ที่มีอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ)

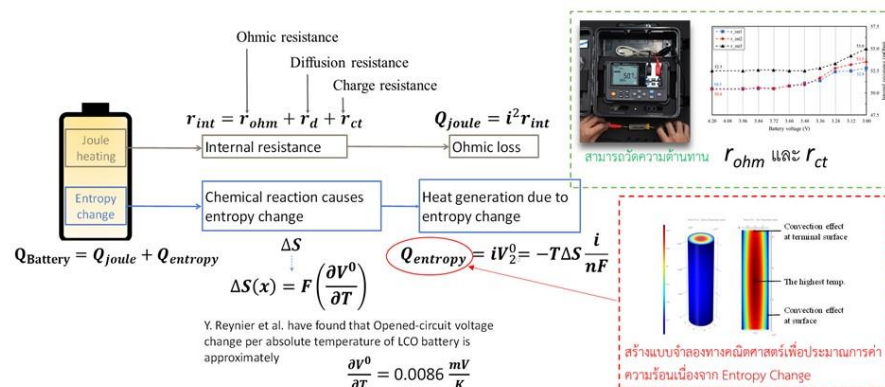
เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด ควรทาซิลิโคนนำความร้อน (Silicone Heat Transfer Compound) เพื่อลดช่องว่างอากาศระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเซลล์แบตเตอรี่



© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 11

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

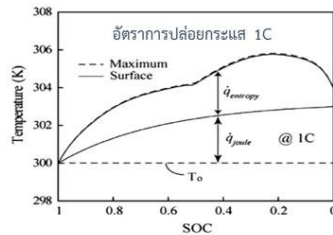


© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 12

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

$$Q_{\text{Battery}} = Q_{\text{joule}} + Q_{\text{entropy}}$$



Predicted surface temperature and contribution of each heat sources at SOC = 0.1.

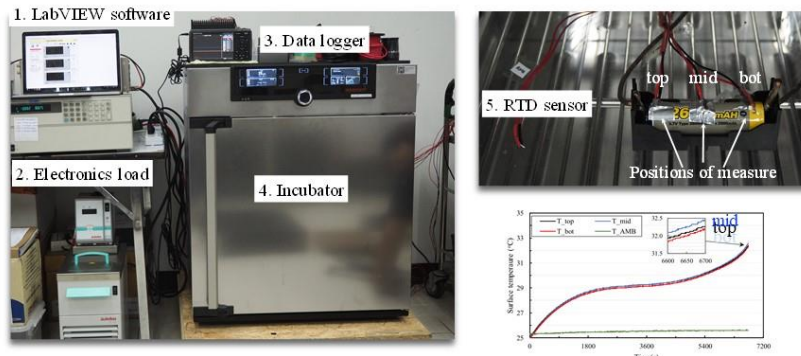
| C-rate | LiCoO <sub>2</sub> /C |                        |                          | LiNiCoMnO <sub>2</sub> /C |                        |                          |
|--------|-----------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------|
|        | T (K)                 | q <sub>joule</sub> (%) | q <sub>entropy</sub> (%) | T (K)                     | q <sub>joule</sub> (%) | q <sub>entropy</sub> (%) |
| 0.5    | 306.3                 | 12.8                   | 87.2                     | 301.9                     | 41.4                   | 58.6                     |
| 1      | 312.3                 | 24.1                   | 75.9                     | 305.4                     | 53.5                   | 46.5                     |
| 2      | 322.4                 | 40.4                   | 59.6                     | 314.1                     | 63.3                   | 36.7                     |
| 3      | 331.5                 | 51.0                   | 49.0                     | 323.4                     | 67.4                   | 32.6                     |
| 4      | 340.3                 | 58.2                   | 41.8                     | 333.0                     | 69.7                   | 30.3                     |
| 5      | 348.8                 | 62.8                   | 37.2                     | 342.7                     | 70.3                   | 29.7                     |

อัตราการปล่อยกระแส 1C ความร้อนทั้งหมดจะมีอัตราส่วนเป็นร้อยละ 24.1 ( $Q_{\text{joule}}$ ) ต่อ 75.9 ( $Q_{\text{entropy}}$ )

**\*\* การออกแบบระบบระบายความร้อนควรหาค่าความร้อนของการทำงานสูงสุด (C-Rate สูงสุด หรือ C-Rate ต่อเนื่อง ที่ใช้งาน) \*\***

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

ชุดการทดลองเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ C-rate Discharge ต่างๆ ของเซลล์เดียว



Testing condition for a single cell battery discharge

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ที่ 0.5C-Rate Discharge

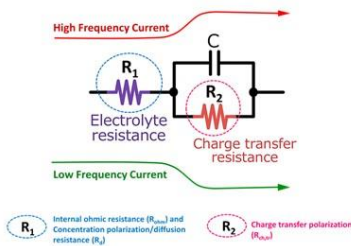
| Discharge current | Ambient temp. | Voltage     | Sampling rate | Cell resistance |
|-------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|
| 1.3A (0.5C)       | 25°C          | 3.0V ~ 4.2V | 1 s           | 50mΩ ~ 55mΩ     |

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความร้อนทั้งของ Joule Heating และ Entropy Change

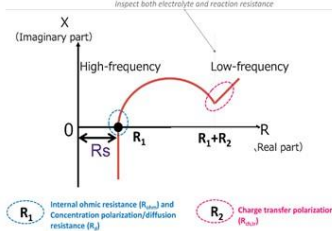
## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

แผนภาพวงจรของเซลล์แบตเตอรี่จะประกอบค่าความต้านทานต่าง ๆ และค่าความจุภายในเซลล์แบตเตอรี่

Battery Equivalence Circuit



Cole-Cole Plot



1kHz

Ohmic resistance

Diffusion resistance

Charge resistance

$$r_{int} = r_{ohm} + r_d + r_{ct}$$

© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 15

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

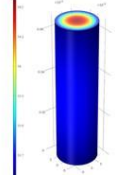


$$Q_{joule} = i^2 r_{int} (V)$$

$$Q_{Battery} = Q_{joule} + Q_{entropy}$$

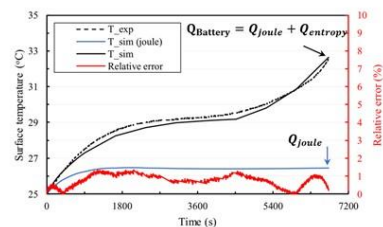
$$Q_{entropy} = f(i, t)$$

จากการวัด



อุณหภูมิของแบตเตอรี่ โดยอ้างอิงค่าเริ่มต้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา

เส้นสีน้ำเงิน คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อใส่ค่าความร้อน Joule Heating อย่างเดียว  
เส้นสีดำ คือ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อใส่ค่าความร้อน Joule Heating และความร้อนเนื่องจาก Entropy change  
เส้นสีแดง คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิระหว่างการทดลองและแบบจำลอง



© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 16

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

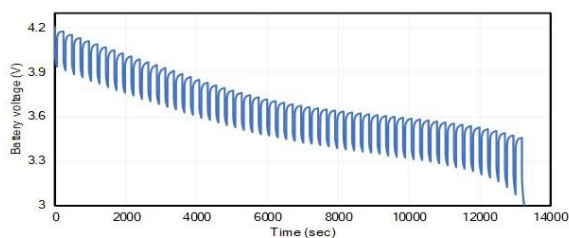
ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีของเอนโทรปีของไฟฟ้า 0.5C  
ในรูปแบบ Look-Up Table

$$Q_{entropy} = f(i, t)$$

| Time (s) | Heat Generation (W) | Time (s) | Heat Generation (W) |
|----------|---------------------|----------|---------------------|
| 0        | 0.045               | 3960     | 0.180               |
| 360      | 0.068               | 4320     | 0.180               |
| 720      | 0.050               | 4680     | 0.180               |
| 1080     | 0.145               | 5040     | 0.180               |
| 1440     | 0.155               | 5400     | 0.230               |
| 1800     | 0.160               | 5760     | 0.255               |
| 2160     | 0.165               | 6120     | 0.280               |
| 2520     | 0.170               | 6480     | 0.305               |
| 2880     | 0.180               | 6840     | 0.330               |
| 3240     | 0.180               | 7200     | 0.355               |
| 3600     | 0.180               |          |                     |

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

เทคนิคการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่

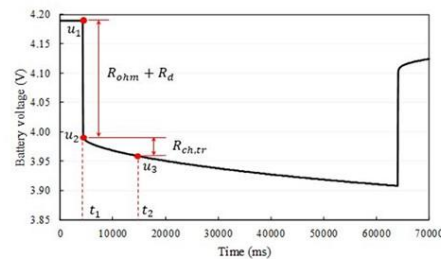


ขั้นตอนการทดสอบ

- นำเซลล์แบตเตอรี่ที่จะทำการทดสอบมาทำการอัดประจุไฟฟ้าให้แรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับ 4.2 V (แรงดันไฟฟ้าสูงสุด)
- นำเซลล์แบตเตอรี่ต่อกับเครื่อง Electronic Load เพื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
- ทำการคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่โดยควบคุมการดึงกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabView
- รูปแบบการดึงกระแสไฟฟ้าจะเป็นรูปแบบพัลส์โดยที่ดึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ (ซึ่งค่ากระแสสูงสุดขึ้นกับแต่ละชนิดของเซลล์แบตเตอรี่) เป็นเวลา 1 นาที และทำการไม่ดึงกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 3 นาทีจนครบ 60 ครั้ง
- ทำการดึงกระแสไฟฟ้าออกโดยเริ่มต้นที่แรงดันไฟฟ้า 4.2V จนถึง 3.0V
- เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าด้วย Data logger
- นำค่าที่เก็บจากเครื่อง Data logger มาทำการพล็อตกราฟ
- คำนวณหาค่าความต้านทาน (Internal resistance)

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

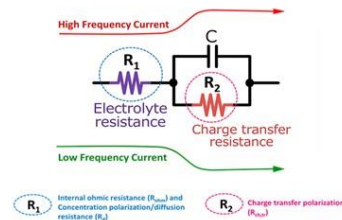
เทคนิคการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ (เพิ่มเติม)



$$Q_{joule} = i^2 r_{int}(SOC) \quad r_{int} = R_{ohm} + R_d + R_{ch, tr}$$

ข้อดี สามารถหาค่าความต้านทานได้ทุก ๆ SOC

Battery Equivalence Circuit



$$R_{ohm} + R_d = (u_1 - u_2) / i$$

$$R_{ch, tr} = (u_2 - u_3) / i$$

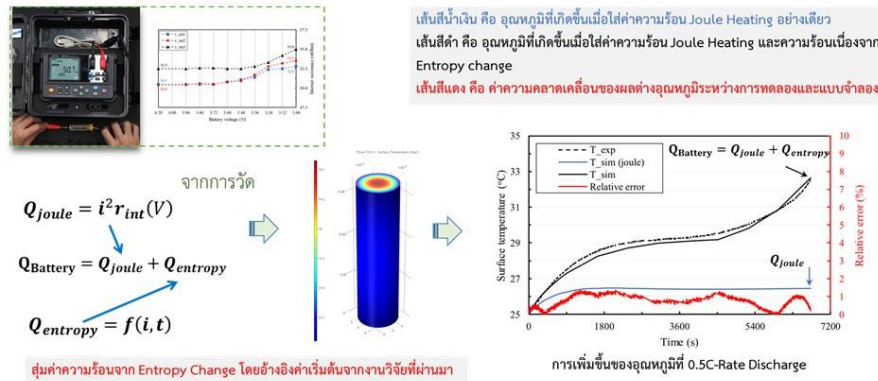
$$C = (t_2 - t_1) / R_{ch, tr}$$

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

เทคนิคการหาค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่โดยการดึงกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่

- นำเซลล์แบตเตอรี่ที่จะทำการทดสอบมาทำการอัดประจุไฟฟ้าให้แรงดันไฟฟ้าให้เท่ากับ 4.2 V (แรงดันไฟฟ้าสูงสุด)
- นำเซลล์แบตเตอรี่ต่อกับเครื่อง Electronic Load เพื่อทำการทดสอบการคายประจุไฟฟ้า
- ทำการคายประจุไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่โดยควบคุมการดึงกระแสไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabView
- รูปแบบการดึงกระแสไฟฟ้าจะเป็นรูปแบบพัลส์โดยที่ดึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดให้ได้ (ซึ่งค่ากระแสสูงสุดขึ้นกับแต่ละชนิดของเซลล์แบตเตอรี่) เป็นเวลา 1 นาทีและทำการไม่ดึงกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 3 นาทีจนครบ 60 ครั้ง
- ทำการดึงกระแสไฟฟ้าออกโดยเริ่มที่แรงดันไฟฟ้า 4.2V จนถึง 3.0V
- เก็บค่าแรงดันไฟฟ้าด้วย Data logger
- นำค่าที่เก็บจากเครื่อง Data logger มาทำการพลอตกราฟ
- คำนวณหาค่าความต้านทาน (Internal resistance)

## การหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่

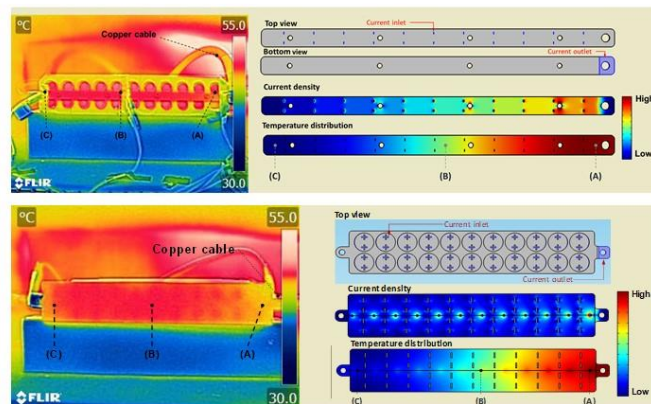


© MTEC 2018  
 www.mtec.or.th

หน้า 21

## ความร้อนจากส่วนอื่นๆในแพ็คเกจแบตเตอรี่

สายไฟ, Busbar, BMS และอื่นๆ



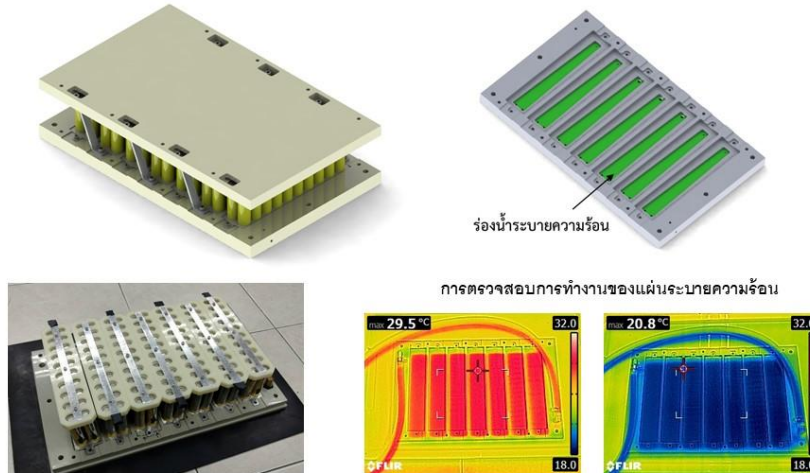
$$Q_{joule} = i^2 r_{วัสดุอุปกรณ์}$$

© MTEC 2018  
 www.mtec.or.th

หน้า 22

## ตัวอย่างการออกแบบระบบระบายความร้อน

### ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ



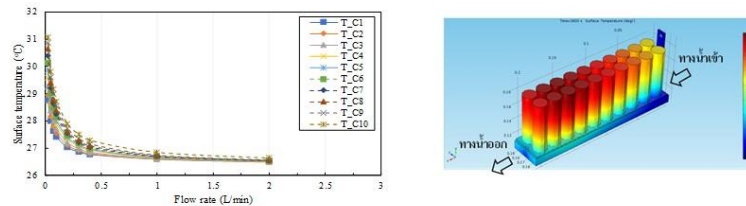
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 23

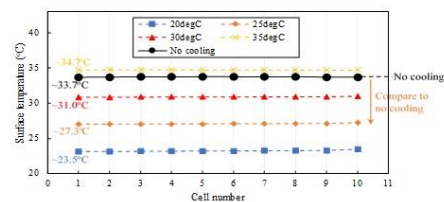
## ตัวอย่างการออกแบบระบบระบายความร้อน

### ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

#### ผลกระทบของอัตราการไหล



#### ผลกระทบของอุณหภูมิทางเข้าของน้ำหล่อเย็น



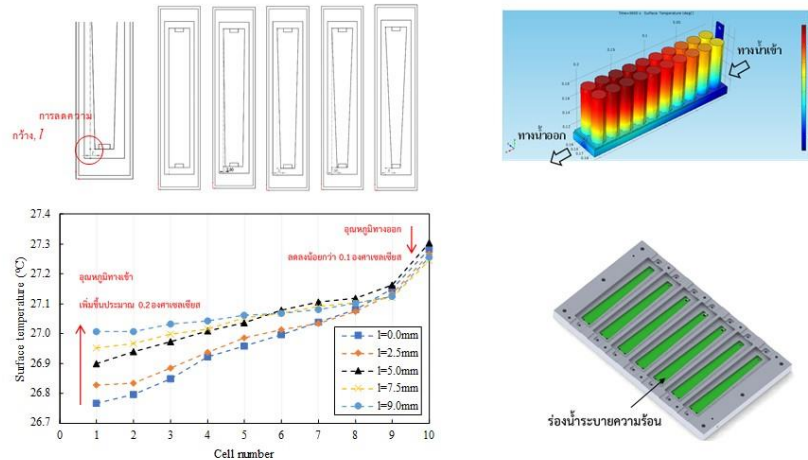
© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 24

## ตัวอย่างการออกแบบระบบระบายความร้อน

### ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

#### ผลกระทบของรูปทรงช่องทางการไหลของน้ำ



© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 25

## ตัวอย่างการออกแบบระบบระบายความร้อน

### ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

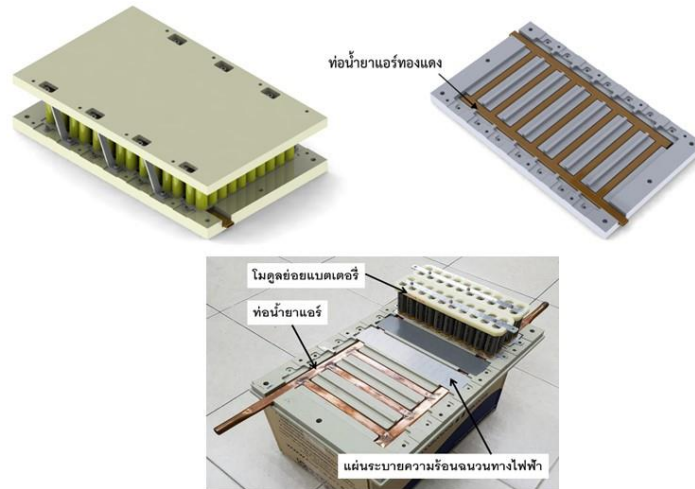
| ตัวแปรที่ศึกษา                                | ผลกระทบ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. อัตราการไหล (Flow rate)                    | <p>การไหลของน้ำหล่อเย็นช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>การไหลด้วยอัตราการไหลต่ำลดอุณหภูมิสูงสุดได้น้อยและทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์บริเวณทางเข้าและเซลล์บริเวณทางออก</li> <li>การไหลด้วยอัตราการไหลสูงลดอุณหภูมิสูงสุดได้ถึงค่าหนึ่ง รวมไปถึงทำให้ความต่างของอุณหภูมิของเซลล์บริเวณทางเข้าและเซลล์บริเวณทางออกมีค่าต่างกันน้อยลง</li> </ul> |
| 2. ขนาดช่องทางการไหล (Channel width)          | <p>การลดพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเซลล์บริเวณทางเข้าของน้ำหล่อเย็น ทำให้อุณหภูมิของเซลล์บริเวณทางเข้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ลดความแตกต่างของเซลล์บริเวณทางเข้าและทางออกของโมดูลย่อยได้</p>                                                                                                                                                                                                        |
| 3. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (Inlet temperature) | <p>อุณหภูมิของน้ำทางเข้ามีบทบาทสำคัญสุด ในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้น้ำเย็นเกินไปจำเป็นต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้น</p>                                                                                                                                                                                                                                                |

© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 26

## ตัวอย่างการออกแบบระบบระบายความร้อน

### ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำยาแอร์



© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 27

สนับสนุนโดย



ร่วมจัดโดย



ขอบคุณครับ

© MTEC 2018  
www.mtec.or.th

หน้า 28