



การทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับระบบการจัดการความร้อน  
ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของไหลเฟอร์ไรต์

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE THERMAL MANAGEMENT  
SYSTEM OF LI-ION BATTERY MODULE WITH FERROFLUID

ศรารุณี สิริเกษมสุข

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับระบบการจัดการความร้อน  
ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของไหลเฟอโร



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE THERMAL MANAGEMENT  
SYSTEM OF LI-ION BATTERY MODULE WITH FERROFLUID



SARAWUT SIRIKASEMSUK

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY  
(Mechanical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์  
เรื่อง  
การทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับระบบการจัดการความร้อน  
ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของไหลเฟอโรโร  
ของ  
สรวิชัย สิริเกษมสุข

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ..... ประธาน  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามล) (รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี)

..... ที่ปรึกษาร่วม ..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์) (รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวานิชกุล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีธรรมรัตน์)



ชื่อเรื่อง	การทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลขเกี่ยวกับระบบการจัดการความร้อน ในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของไหลเฟอโรโร
ผู้วิจัย	ศราวุฒิ สิริเกษมสุข
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล นาผล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. สงกรานต์ วิริยะศาสตร์

ในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ด้วยประสิทธิภาพที่สูงกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น แต่การใช้งานแบตเตอรี่เป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีประสิทธิภาพลดลง อีกทั้งยังมีโอกาสเกิดไฟไหม้มากกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นอีกด้วย ซึ่งการใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมจนเกิดความร้อนสูงขึ้นแบบเฉียบพลัน หากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่อวงจรเป็นโมดูลจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมากเช่นกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้แนวคิดที่ออกแบบระบบการจัดการความร้อนในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของไหลเฟอโรโร โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 จำนวน 60 ก้อน มาต่อวงจรแบบ 6S10P เพื่อสร้างเป็นโมดูล ทดสอบการอัดและคายประจุไฟฟ้าเฉลี่ย 4A ด้วยสารหล่อเย็นน้ำและของไหลเฟอโรโรผ่านช่องการไหลในชุดทดสอบระบบระบายความร้อน โดยมีรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นแบบไหลเข้าทางเดียว 2 รูปแบบแบ่งเป็นโมเดล 1 และโมเดล 2 ผลการทดลองพบว่าสามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนลงได้ประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  และสามารถควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ  $28-30^{\circ}\text{C}$  โดยที่โมเดล 1 ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่ำกว่าโมเดล 2 ที่ 1.84% และของไหลเฟอโรโรทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนต่ำกว่าน้ำ 6.69% และผลคำตอบจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในโมเดล 1 และโมเดล 2 โดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน 2.17% และจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อปรับปรุงแบบในโมเดลที่ 3, 4 และ 5 ที่เป็นการไหลของสารหล่อเย็นแบบไหลเข้าระบบ 2 ทาง พบว่าโมเดล 5 สามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบทั้ง 5 โมเดล

คำสำคัญ : แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, ของไหลเฟอโรโร, ระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่โมดูล

Title	EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE THERMAL MANAGEMENT SYSTEM OF LI-ION BATTERY MODULE WITH FERROFLUID
Author	SARAWUT SIRIKASEMSUK
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Professor Dr. Paisarn Naphon
Co Advisor	Associate Professor Dr. Songkran Wiriyasart

Currently, Lithium-ion batteries are popular because of their higher efficiency compared to other types of batteries but are prone to fire from overheating, less efficient after prolonged use and any connected circuit module will also be damaged. In this research, a concept to design a thermal management system in a lithium-ion battery module with Ferrofluid is introduced. The module is created by using 60 units of type 18650 lithium-ion batteries connected to a 6S10P circuit. An average current of 4A for the charge and discharge test was used with water coolant and Ferrofluid coolant through the flow port in the cooling system test section. There were two models of coolant flow for one direction, divided into Model One and Model Two. The results showed that the temperature of the battery can be reduced by approximately 10°C and the lithium-ion battery temperature can be controlled within the temperature range of 28-30°C, where Model One made the battery temperature 1.84% lower than that of model Two, and the Ferrofluid coolant made the battery temperature 6.69% lower than the water. It was consistent with the experiment results in Model One and Model Two, with a difference of not more than 2.17%, and flowing into the system in two directions, it was found that Model Five was able to reduce the temperature of the lithium-ion battery most effectively compared to all five models.

Keyword : Li-ion Battery, Ferrofluid, Battery Module Cooling System

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี จากความเมตตากรุณาของ ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล อาจารย์ที่ปรึกษา และ รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการให้คำแนะนำแนวทางปฏิบัติที่ดี ส่งเสริม และผลักดันให้กระผมเกิดความคิด มุมมอง ความสามารถในการทำงานวิจัย การพัฒนาศักยภาพต่างๆ รวมถึงการอนุญาตให้ใช้ห้องปฏิบัติการ เทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT) และเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ อย่างอิสระ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยแนะนำให้กำลังใจ ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในทุกๆ เรื่อง กระผมขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

สราวุฒิ สิริเกษมสุข

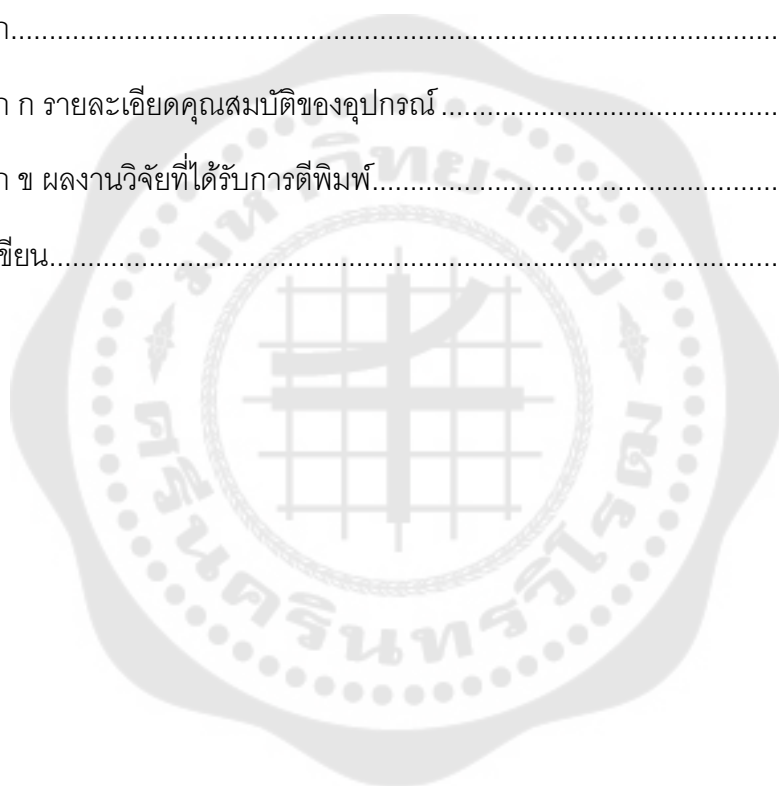


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับแบดเตอรี .....	3
2.2 แบดเตอรีลิเทียม .....	4
2.2.1 ชนิดของแบดเตอรีลิเทียม.....	5
2.2.2 ประสิทธิภาพของแบดเตอรีลิเทียม.....	7
2.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านความร้อนของแบดเตอรี.....	10
2.3 การจัดการด้านความร้อนของแบดเตอรี (BTMS) .....	15
2.3.1 เทอร์มอลรันนอเวย์ TR.....	16
2.3.2 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ .....	23
2.3.3 ระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว .....	35

2.3.4 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศร่วมกับของเหลว .....	46
2.3.5 ระบบการระบายความร้อนด้วยวิธีการเปลี่ยนสถานะ PCM .....	48
2.4 สรุปจากการทบทวนวรรณกรรม.....	50
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	51
3.1 สมการหลักของแบบจำลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่.....	51
3.2 เงื่อนไขขอบเขต .....	52
3.3 วิธีการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	55
บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง .....	57
4.1 แผนภาพระบบการทำงาน .....	58
4.2 การออกแบบอุปกรณ์การทดลอง.....	63
4.2.1 ชุดทดสอบระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ .....	63
4.2.2 การออกแบบระบบโมดูลแบตเตอรี่ .....	65
4.2.3 การออกแบบตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า.....	72
4.2.4 ตำแหน่งตรวจสอบคุณสมบัติของโมดูลแบตเตอรี่ .....	78
4.2.5 ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่ .....	80
4.3 วิธีการทดลอง .....	85
4.4 เงื่อนไขการทดลอง .....	86
บทที่ 5 การวิเคราะห์และผลการทดลอง .....	89
5.1 ผลการทดลองในกรณีที่ไม่มียระบบสารหล่อเย็น.....	89
5.2 ผลการทดลองในกรณีที่มีระบบสารหล่อเย็น .....	91
5.2.1 กรณีใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น .....	91
5.2.2 กรณีสารหล่อเย็นเป็นของไหลเฟอโรโร.....	100
5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข.....	105

5.4 การพัฒนารูปแบบการระบายความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ .....	121
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	127
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	127
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	129
บรรณานุกรม .....	130
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์.....	140
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	145
ประวัติผู้เขียน.....	183



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แสดงธาตุองค์ประกอบที่ลดลงหลังการใช้งานผ่านไป 500 รอบ.....	7
ตาราง 2 แสดงอุบัติเหตุของรถยนต์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาก่อน.....	16
ตาราง 3 แสดงตัวแปรต่างๆ จากการทดลองเกี่ยวกับเทอร์โมลรันอเวย์.....	21
ตาราง 4 ตารางแสดงข้อมูลจากการทดสอบแบตเตอรี่จำนวน 40 ก้อน.....	66
ตาราง 5 สรุปการไหลในชุดระบายความร้อนทั้ง 3 แบบ.....	85
ตาราง 6 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเดลที่ 1 กับโมเดลที่ 2.....	100
ตาราง 7 สรุปผลการเปรียบเทียบสารหล่อเย็นระหว่างน้ำ และของไหลเฟอริโร.....	104
ตาราง 8 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 1.....	106
ตาราง 9 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 2.....	107
ตาราง 10 ตารางแสดงผลคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	119
ตาราง 11 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโมเดลที่ 1.....	120
ตาราง 12 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในโมเดลที่ 2.....	120
ตาราง 13 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 3.....	123
ตาราง 14 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 4.....	123
ตาราง 15 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์ผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 5.....	124
ตาราง 16 แสดงข้อมูลจำเพาะของ BMS 6s 40a.....	141
ตาราง 17 ตารางคุณสมบัติของสารแมกนีไทต์.....	142
ตาราง 18 แสดงข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์แสดงข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบดิจิตอล....	142
ตาราง 19 อุปกรณ์ตัวต้านทานปรับค่าได้สำหรับคายประจุของแบตเตอรี่.....	143

ตาราง 20 ตารางแสดงข้อมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 40 ก้อน..... 143





## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 แสดงแผนภาพแนวโน้มการพัฒนาของแบตเตอรี่จาก .....	4
ภาพประกอบ 2 การกระจายความร้อนในแบตเตอรี่ .....	5
ภาพประกอบ 3 แสดงช่วงปริมาณความจุของแบตเตอรี่ .....	6
ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะของกระแส และแรงดันทั้งแบบคงที่และแบบเป็นสัญญาณพัลส์ ....	8
ภาพประกอบ 5 แสดงรูปแบบการถ่ายเทความร้อน .....	11
ภาพประกอบ 6 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen .....	25
ภาพประกอบ 7 แสดงโมเดลการทดลองของ Z. Lu .....	26
ภาพประกอบ 8 แสดงโมเดลการทดลองของ Kitagawa .....	27
ภาพประกอบ 9 แสดงโมเดลการทดลองของ Xie .....	27
ภาพประกอบ 10 แสดงโมเดลการทดลองของ Saw, King .....	28
ภาพประกอบ 11 แสดงโมเดลการทดลองของ Sun & Dixon .....	29
ภาพประกอบ 12 แสดงโมเดลการทดลองของ Hong.....	30
ภาพประกอบ 13 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen .....	31
ภาพประกอบ 14 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen .....	31
ภาพประกอบ 15 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen .....	32
ภาพประกอบ 16 แสดงโมเดลการทดลองของ Zhao Lu .....	33
ภาพประกอบ 17 แสดงโมเดลการทดลองของ Shahid & Agelin-Chaab .....	34
ภาพประกอบ 18 แสดงโมเดลการทดลองของ Bolsinger & Birke .....	35
ภาพประกอบ 19 แสดงพฤติกรรมด้านความร้อนของแบตเตอรี่ที่กระแส C-Rate ต่างๆ.....	36
ภาพประกอบ 20 แสดงโมเดลการทดลองของ Saw Ye .....	37
ภาพประกอบ 21 แสดงโมเดลการทดลองของ Rao .....	38

ภาพประกอบ 22 แสดงโมเดลการทดลองของ J. Zhao .....	39
ภาพประกอบ 23 แสดงโมเดลการทดลองของ Zhang.....	40
ภาพประกอบ 24 แสดงโมเดลการทดลองของ Li.....	40
ภาพประกอบ 25 แสดงโมเดลการทดลองของ Pety .....	41
ภาพประกอบ 26 แสดงโมเดลการทดลองของ Tan .....	42
ภาพประกอบ 27 แสดงโมเดลการทดลองของ Tan .....	43
ภาพประกอบ 28 แสดงโมเดลการทดลองของ Jiaqiang E .....	44
ภาพประกอบ 29 แสดงโมเดลการทดลองของ Malik.....	45
ภาพประกอบ 30 แสดงโมเดลการทดลองของ Wiryasart .....	46
ภาพประกอบ 31 แสดงโมเดลการทดลองของ S. Wang.....	47
ภาพประกอบ 32 แสดงโมเดลการทดลองของ D. Chen.....	48
ภาพประกอบ 33 แสดงโมเดลการทดลองของ Ling .....	49
ภาพประกอบ 34 แสดงโมเดลการทดลองของ L. Feng .....	50
ภาพประกอบ 35 แผนภาพแสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนของไมดูลแบตเตอรี่.....	52
ภาพประกอบ 36 แสดงรูปแบบโครงสร้างของชุดระบายความร้อน .....	53
ภาพประกอบ 37 แสดงองค์ประกอบของชุดทดสอบระบบระบายความร้อน.....	54
ภาพประกอบ 38 ระบบของไหลในการระบายความร้อนของไมดูลแบตเตอรี่.....	54
ภาพประกอบ 39 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการแก้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์ .....	56
ภาพประกอบ 40 แผนภาพระบบการจัดการความร้อนในไมดูลแบตเตอรี่ .....	57
ภาพประกอบ 41 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของไมดูลแบตเตอรี่.....	58
ภาพประกอบ 42 วงจรไฟฟ้าในการควบคุมระบบอัดประจุ และคายประจุ .....	59
ภาพประกอบ 43 แผนภาพแสดงระบบการจัดการความร้อนที่ใช้ในการทดลอง.....	60
ภาพประกอบ 44 แผนภาพแสดงระบบระบายความร้อนด้านไมดูลแบตเตอรี่.....	61

ภาพประกอบ 45 แผนภาพแสดงระบบระบายความร้อนด้านเทอร์โมอิเล็กทริก .....	62
ภาพประกอบ 46 ชุดทดสอบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน .....	63
ภาพประกอบ 47 ชุดทดสอบระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ .....	64
ภาพประกอบ 48 แบตเตอรี่ K-1 Model 18650 3.7 V 3000 mAh .....	65
ภาพประกอบ 49 เครื่อง LiitoKala รุ่น Lii-500 .....	66
ภาพประกอบ 50 โมดูลแบตเตอรี่ของรถเทสลาโมเดลเอส.....	67
ภาพประกอบ 51 แสดงผังการจัดเรียงแบตเตอรี่ในโมดูลแบตเตอรี่รถเทสลาโมเดลเอส .....	67
ภาพประกอบ 52 แสดงวงจรแบตเตอรี่ลิเทียมโมดูล 60 ก้อน .....	68
ภาพประกอบ 53 แสดงวงจรของแบตเตอรี่ลิเทียมโมดูลอย่างง่าย .....	68
ภาพประกอบ 54 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่กับแผ่นนิกเกิล .....	69
ภาพประกอบ 55 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อวงจร .....	69
ภาพประกอบ 56 สายไฟทองแดงเบอร์ 8AWG .....	70
ภาพประกอบ 57 บอร์ด BMS 6s 40a.....	70
ภาพประกอบ 58 แสดงวงจรที่ต่อโมดูลแบตเตอรี่กับบอร์ด BMS.....	71
ภาพประกอบ 59 แสดงตำแหน่งของ B+, B-, P+ และ P-.....	71
ภาพประกอบ 60 Battery Capacity Voltage.....	72
ภาพประกอบ 61 ควบคุมรูปแบบและระบบไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Electric System).....	72
ภาพประกอบ 62 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรตัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ .....	73
ภาพประกอบ 63 แสดงวงจรตัดประจุไฟฟ้า หรือวงจรการตัดประจุแบตเตอรี่ .....	73
ภาพประกอบ 64 แสดงวงจรคายประจุไฟฟ้า หรือวงจรการคายประจุแบตเตอรี่ .....	74
ภาพประกอบ 65 แสดงอุปกรณ์ DC 0-100V 100A Digital Voltmeter Ammeter .....	74
ภาพประกอบ 66 แสดงอุปกรณ์ชั่ง (Shunt) .....	75
ภาพประกอบ 67 แสดงวงจรของชิ้นที่สามารถกลับทางการไหลของกระแสได้ .....	75

ภาพประกอบ 68 แสดงวงจรของผู้ควบคุม .....	76
ภาพประกอบ 69 แสดงตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลอง .....	76
ภาพประกอบ 70 แสดงพัดลมระบายอากาศของผู้ควบคุม .....	77
ภาพประกอบ 71 แสดงหัวต่อสายไฟ MC4 Connector.....	77
ภาพประกอบ 72 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิทั้ง 11 ตำแหน่ง มุมมองด้านบน.....	78
ภาพประกอบ 73 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็น.....	78
ภาพประกอบ 74 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิทั้งหมด 11 ตำแหน่งแบบ 3 มิติ .....	79
ภาพประกอบ 75 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล.....	79
ภาพประกอบ 76 แสดงภาพองค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยน้ำ.....	80
ภาพประกอบ 77 แสดงภาพองค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก.....	81
ภาพประกอบ 78 แสดงชื่อเรียกช่องทางไหลของสารหล่อเย็น .....	82
ภาพประกอบ 79 แสดงรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 1 .....	83
ภาพประกอบ 80 แสดงรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 2 .....	84
ภาพประกอบ 81 อนุภาคแมกนีไทต์ (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) เพื่อนำมาผสมทำเป็นสารละลายเฟอร์ไร .....	85
ภาพประกอบ 82 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิของตัวแปรต่างๆ .....	86
ภาพประกอบ 83 แสดงโปรแกรม LabVIEW.....	87
ภาพประกอบ 84 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW .....	88
ภาพประกอบ 85 กราฟแสดงการอัดประจุ และคายประจุ ของแบตเตอรี่ชนิด 18650 .....	89
ภาพประกอบ 86 แสดงรูปแบบการเกิดความร้อนของแบตเตอรี่.....	90
ภาพประกอบ 87 แสดงแอมพลิจูดในแต่ละตำแหน่ง .....	90
ภาพประกอบ 88 รูปแบบการไหลของโมเดล 1 .....	91
ภาพประกอบ 89 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ .....	92
ภาพประกอบ 90 แสดงข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่.....	92

ภาพประกอบ 91 แสดงคุณสมบัติเฉลี่ยของแบตเตอรี่.....	93
ภาพประกอบ 92 แสดงคุณสมบัติของช่องทางการไหลของน้ำ .....	94
ภาพประกอบ 93 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทั้งด้านหน้าและด้านหลัง.....	94
ภาพประกอบ 94 รูปแบบการไหลของโมเดล 2 .....	95
ภาพประกอบ 95 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ .....	96
ภาพประกอบ 96 แสดงข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่.....	96
ภาพประกอบ 97 แสดงคุณสมบัติเฉลี่ยของแบตเตอรี่.....	97
ภาพประกอบ 98 แสดงคุณสมบัติของช่องทางการไหลของน้ำ .....	97
ภาพประกอบ 99 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทั้งด้านหน้าและด้านหลัง.....	98
ภาพประกอบ 100 แสดงคุณสมบัติเฉลี่ยแบตเตอรี่ของโมเดล 1 และโมเดล 2 .....	98
ภาพประกอบ 101 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิทางเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น .....	99
ภาพประกอบ 102 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของฝั่งด้านหน้า .....	99
ภาพประกอบ 103 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของฝั่งด้านหลัง.....	100
ภาพประกอบ 104 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ .....	101
ภาพประกอบ 105 แสดงคุณสมบัติเฉลี่ยของแบตเตอรี่ลิเทียมทั้ง 7 ตำแหน่ง .....	101
ภาพประกอบ 106 แสดงอุณหภูมิทางเข้าและทางออกระหว่างการทดลอง .....	102
ภาพประกอบ 107 แสดงผลต่างของอุณหภูมิแบตเตอรี่.....	102
ภาพประกอบ 108 แสดงคุณสมบัติเฉลี่ยแบตเตอรี่ของสารหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิด .....	103
ภาพประกอบ 109 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก.....	103
ภาพประกอบ 110 ผลต่างอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้านหน้า .....	104
ภาพประกอบ 111 ผลต่างอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้านหลัง .....	104
ภาพประกอบ 112 แสดงตำแหน่งช่องทางการไหลสำหรับใช้ในการตรวจสอบกิริต .....	105
ภาพประกอบ 113 แสดงกราฟตรวจสอบกิริตของโมเดลที่ 1 .....	107

ภาพประกอบ 114 แสดงกราฟตรวจสอบกิริยาของโมเดลที่ 2 .....	108
ภาพประกอบ 115 แสดงกิริยาของโมเดลที่ 1 .....	109
ภาพประกอบ 116 แสดงเงื่อนไขการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 1 .....	110
ภาพประกอบ 117 ผลเฉลยคุณสมบัติของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 1 .....	112
ภาพประกอบ 118 ผลเฉลยคุณสมบัติของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 1 .....	113
ภาพประกอบ 119 ผลเฉลยความเร็วการไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโมเดลที่ 1 .....	114
ภาพประกอบ 120 แสดงกิริยาของโมเดลที่ 2 .....	114
ภาพประกอบ 121 แสดงเงื่อนไขการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 2 .....	115
ภาพประกอบ 122 ผลเฉลยคุณสมบัติของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 2 .....	117
ภาพประกอบ 123 ผลเฉลยคุณสมบัติของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 2 .....	118
ภาพประกอบ 124 ผลเฉลยความเร็วการไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโมเดลที่ 2 .....	119
ภาพประกอบ 125 แสดงเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของโมเดลต่างๆ .....	122
ภาพประกอบ 126 แสดงคุณสมบัติตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโมเดลต่างๆ .....	125
ภาพประกอบ 127 แสดงตำแหน่งคุณสมบัติที่สูงและต่ำสุดของแบตเตอรี่ในแต่ละโมเดล .....	126

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเมื่อมีการใช้งานอย่างต่อเนื่องจะเกิดความร้อนสะสม ซึ่งอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน รวมไปถึงอุบัติเหตุจากการเกิดไฟไหม้ หรือการระเบิด ซึ่งปัญหาดังกล่าวมักเกิดการกระทำทางกายภาพ และทางความร้อนที่มีการสะสม จนทำให้เกิดความร้อนที่สูงขึ้นอย่างฉับพลัน และยากต่อการยับยั้งอุณหภูมิ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิและระบายความร้อนที่เหมาะสมจะสามารถช่วยการเกิดปัญหาเหล่านี้ได้ และจากการศึกษาปัญหาที่พบส่วนใหญ่จะเกิดกับยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องด้วยเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้งานเป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งมีการใช้งานต่อเนื่อง รวมถึงการอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูงเพื่อลดระยะเวลาในการอัดประจุ หรือการเพิ่มความเร็วด้วยอัตราเร่งขณะที่ขับขี่ซึ่งเป็นการคายประจุด้วยกระแสไฟฟ้าสูงเช่นกัน ส่งผลให้เกิดไฟไหม้รถยนต์ไฟฟ้า ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่ทำการออกแบบระบบการจัดการความร้อนในโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยได้จำลองจาก โมดูลแบตเตอรี่ของรถเทสลาโมเดลเอส (Tesla Model S) ซึ่งรถ 1 คัน มีโมดูลแบตเตอรี่ 16 โมดูล แต่ละโมดูลจะมีแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 จำนวน 444 ก้อน ซึ่งได้จำลองโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมในการทดลองจำนวน 60 ก้อน ต่อวงจรไฟฟ้าแบบ 6S10P และมีการจัดวางตำแหน่งแบตเตอรี่แบบสลับฟันปลา ส่วนการระบายความร้อนจะเกิดขึ้นที่ด้านข้างของโมดูลแบตเตอรี่โดยแบ่งเป็นด้านบนและด้านล่าง เพื่อการระบายความร้อนที่ดีที่สุด ซึ่งหากการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ดี จะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ และออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยของไหลเฟอโรโร
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยของไหลเฟอโรโร โดยการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
3. เพื่อศึกษาการอัดประจุ และคายประจุด้วยกระแสที่ส่งผลต่อความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า



### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. ทดสอบโดยใช้แบตเตอรี่ชนิด 18650 แรงดันไฟฟ้า 3.7 v กระแส 3000 mAh ต่อเซลล์ และใช้แบตเตอรี่จำนวน 60 เซลล์ต่อโมดูล
3. ทำการทดลองอัดประจุ และคายประจุของแบตเตอรี่ด้วยกระแสไม่เกิน 10 แอมป์ แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 18.0 – 24.0 โวลต์
4. ใช้ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 1,000 วัตต์ 0-4 โอห์ม เป็นโหลดสำหรับการคายประจุไฟฟ้า
5. ระบบไฟฟ้าที่ทดลองสามารถรองรับกระแสได้สูงสุดที่ 30 แอมป์
6. กำหนดอุณหภูมิภายในระบบไว้ไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส
7. น้ำ และของไหลเฟอโรโร ที่มีอัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น 0.8 - 2 มิลลิลิตรต่อวินาที เป็นสารหล่อเย็นในระบบระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่

### 1.4 ประโยชน์และผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมและมีความปลอดภัยตลอดการใช้งาน
2. สามารถลดอัตราการเกิดความเสียหาย และช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เมื่อมีการใช้งานติดต่อกันเป็นเวลานาน
3. ได้ข้อมูลและตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับแบตเตอรี่

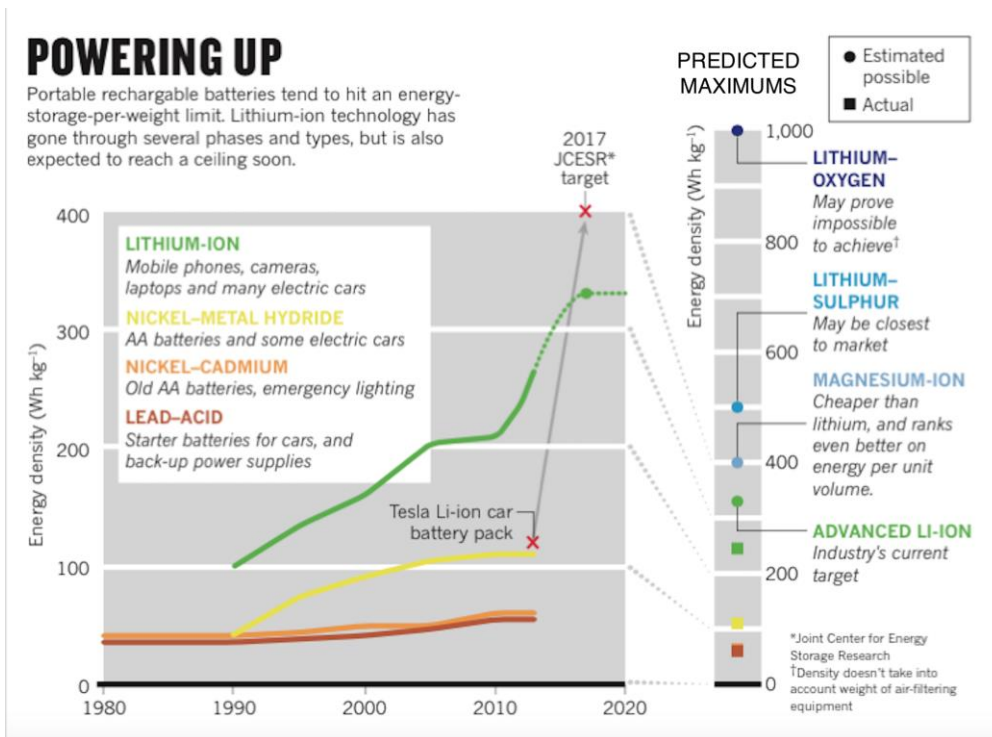
แบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ สามารถจ่ายแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ตามคุณสมบัติต่างตามชนิดของแบตเตอรี่ ผ่านขั้วบวก (แอโนด) และขั้วลบ (แคโทด) เมื่อแบตเตอรี่มีการต่อกับอุปกรณ์ที่ต้องการไฟฟ้า จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารอิเล็กโทรไลต์ ในรูปแบบของไอออน แบตเตอรี่สามารถแบ่งชนิดตามการใช้งานได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. แบตเตอรี่ปฐมภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำกัด ใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เพียงรอบเดียว ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นทางเดียว

2. แบตเตอรี่ทุติยภูมิ เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปในแบตเตอรี่ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้ นิยมใช้มากกว่าชนิดปฐมภูมิ อีกทั้งยังสามารถเป็นแหล่งพลังงานสำรองได้อีกด้วย

พลังงานจากแบตเตอรี่ สามารถเพิ่มแรงดันหรือกระแสได้โดยเทคนิคทางไฟฟ้า การต่อวงจรแบตเตอรี่แบบอนุกรมจะเพิ่มแรงดันทางไฟฟ้า และการต่อวงจรแบบขนานจะช่วยเพิ่มกระแสของชุดแบตเตอรี่ได้ ซึ่งการเพิ่มกระแสไฟฟ้านั้นยังสามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นๆ ได้อีกด้วย แต่การที่กระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่มากขึ้นจะทำให้ระบบของแบตเตอรี่มีขนาดใหญ่ตาม รวมถึงการอัดประจุเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของแบตเตอรี่ทุติยภูมิก็ยิ่งใช้เวลานานขึ้นด้วยเช่นกัน ในการเลือกใช้แบตเตอรี่จะเลือกจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้านั้นเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม และเลือกกระแสไฟฟ้าตามการใช้งานรวมถึงพื้นที่ในการเก็บแบตเตอรี่ด้วย

(Aoxia & Sen, 2016, pp. 1-10) ได้กล่าวถึงแบตเตอรี่ตั้งแต่ยุคเริ่มแรกมาจนถึงปัจจุบัน และคาดการณ์ไปยังอนาคต



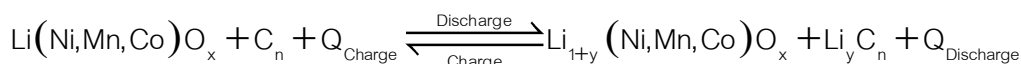
ภาพประกอบ 1 แสดงแผนภาพแนวโน้มการพัฒนาของแบตเตอรี่จาก

ที่มา: (Aoxia & Sen, 2016, pp. 1-10)

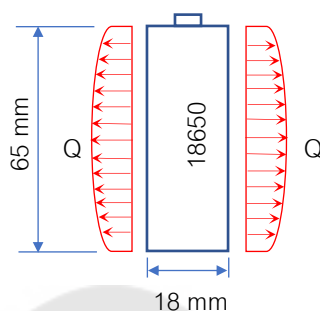
เริ่มจากแบตเตอรี่จากกรดตะกั่ว แบตเตอรี่นิกเกิล แบตเตอรี่ลิเทียม และ กล่าวว่าเทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมได้รับความนิยมเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ดีที่สุด

## 2.2 แบตเตอรี่ลิเทียม

(Ruiz et al., 2018, pp. 1427-1452) ได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูล เพื่อพิสูจน์ว่าแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้ามากที่สุด การหาวิธีป้องกันแบตเตอรี่เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน การทดสอบภาวะต่างๆ เพื่อทดสอบและศึกษาเกี่ยวกับแบตเตอรี่ และได้มีการทดสอบทางกลศาสตร์ ทางไฟฟ้า สิ่งแวดล้อม และอันตรายจากสารเคมี โดยการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียม ทั้งข้อมูลพื้นฐานของแบตเตอรี่ การใช้งาน ปัญหาต่างๆ เพื่อนำมาปรับปรุงแบตเตอรี่ลิเทียมในอนาคต ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้นมีสมการทางเคมีดังสมการ



และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีรูปแบบการเกิดความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนดัง  
ภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 การกระจายความร้อนในแบตเตอรี่

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่นั้นหาได้จากค่ากำลังทางไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้ามีการ  
ถ่ายเทประจุไฟภายในแบตเตอรี่ และจะถ่ายเทความร้อนออกจากรอบตัวแบตเตอรี่ โดยสามารถหา  
ค่าฟลักซ์ความร้อนได้จาก

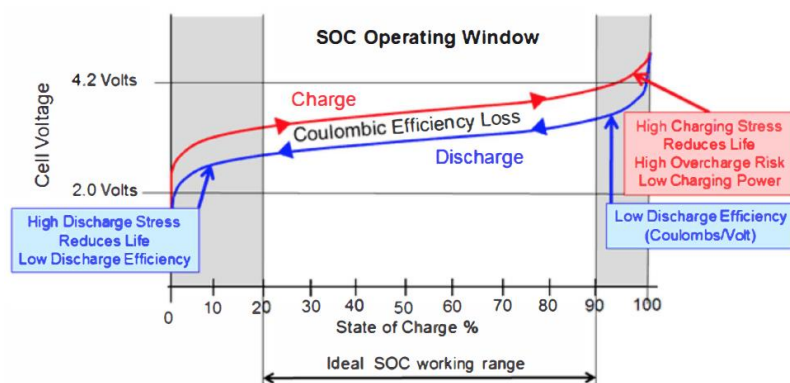
$$Q''_{\text{Battery}} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

โดยที่

- $P$  คือ กำลังไฟฟ้า (W)
- $A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
- $Q''$  คือ ฟลักซ์ความร้อน ( $W/m^2$ )

### 2.2.1 ชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียม

(Aoxia & Sen, 2016, pp. 1-10) ได้พูดถึงชนิดของแบตเตอรี่ลิเทียมว่ามีอยู่หลาย  
ประเภท ซึ่งส่วนมากจะต่างกันในขั้วแคโทดเช่น ลิเทียมโคบอล (LCO), ลิเทียมแมงกานีส (LMO),  
ลิเทียมฟอสเฟส (LFP), ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอล (NMC), ลิเทียมนิกเกิลโคบอลลูมินัม  
(NCA), และลิเทียมไททาเนต (LTO) โดยที่ LMO ผสมรวมกับ NMC เพื่อให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น



ภาพประกอบ 3 แสดงช่วงปริมาณความจุของแบตเตอรี่

ที่มา: (Aoxia & Sen, 2016, pp. 1-10)

และในการใช้งานแบตเตอรี่นั้นควรให้ประจุไฟในแบตเตอรี่ (SOC) อยู่ในช่วง 20% - 90% โดยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่เพิ่มช่วงที่มีการอัดประจุนั้นจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 0 ถึง 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่วงคายประจุอยู่ที่ -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส

(Mendoza-Hernandez, Ishikawa, Nishikawa, Maruyama, & Umeda, 2015, pp. 499-504) ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับ  $\text{LiCoO}_2$  และ  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  วัสดุที่ใช้ในด้านคาโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด 18650 โดยทดลองภายใต้เงื่อนไข SOC's ต่างกัน ความร้อนจากภายใน ความร้อนจากภายนอก และ TR โดยในการทดลองพบว่า  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  มีอุณหภูมิที่มีความคงที่มากกว่า  $\text{LiCoO}_2$

(Cheng, Li, Wang, & Guo, 2017, pp. 1602-1607) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับกลไกการเก็บประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมภายใต้อุณหภูมิห้อง หลังจากที่แบตเตอรี่ถูกใช้งานไปมากกว่า 500 รอบ จะเกิดความสูญเสียประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ไป 12.9% โดยวิเคราะห์จาก XRD, SEM, EIS และ CV ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบลดลงหลังจากรอบการใช้งานแบตเตอรี่ผ่านไป 500 รอบ ดังแสดงในตาราง

ตาราง 1 แสดงธาตุองค์ประกอบที่ลดลงหลังการใช้งานผ่านไป 500 รอบ

Electrode	Cycle No.	Mass fraction %						
		C	O	F	P	Mn	Co	Ni
Cathode	0	37.07	30	8.01	-	7.51	4.93	12.49
	500	36.07	32.12	7.97	-	7.37	4.65	11.82
Anode	0	88.42	6.05	5.04	0.49	-	-	-
	500	82.79	7.86	8.81	0.54	-	-	-

ที่มา: (Cheng et al., 2017, pp. 1602-1607)

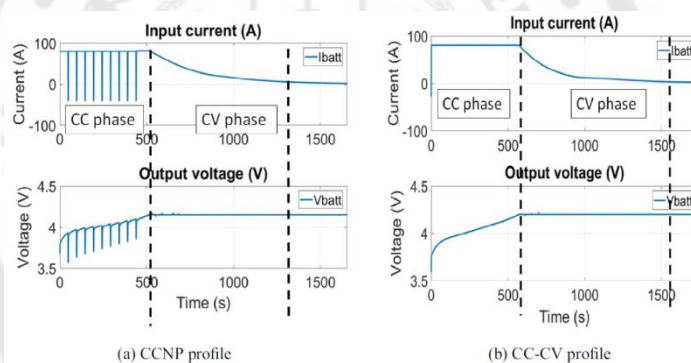
### 2.2.2 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียม

(Spinner et al., 2016, pp. 1-11) ได้ออกแบบและสร้างเซลล์ตัวแทนที่มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาด 18650 โดยเลียนแบบมาจากแบตเตอรี่ลิเทียม 18650 ทั้งคุณสมบัติทางความร้อน และพฤติกรรมการตอบสนองต่างๆ ซึ่งภายในประกอบด้วย สเตนเลสและแผ่นไมก้าที่วางสลับกัน โดยคุณสมบัติของเซลล์ตัวแทนนี้มีความหนาแน่นวัดได้  $1,593 \pm 30 \text{ kg/m}^3$  ความจุความร้อน  $727 \pm 18 \text{ J/kg-K}$  การนำความร้อนคำนวณได้  $5.1 \pm 0.6 \text{ W/m-K}$  การแผ่ความร้อนได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล จากการเพิ่มความจุความร้อนเป็น  $805 \pm 23 \text{ J/kg-K}$  พบว่าการแผ่ความร้อนอยู่ระหว่าง 0.12 และ 0.197 W/m-K ความร้อนที่แผ่ได้ของเซลล์ตัวแทนอยู่ที่ 43-71 องศาเซลเซียส และสรุปว่าเซลล์ตัวแทนนี้มีความร้อนที่ใกล้เคียงกันกับแบตเตอรี่ 18650

(Deng et al., 2018, pp. 10-29) ได้ทบทวนเกี่ยวกับผลกระทบความแตกต่างของสารทำความเย็นและกระบวนการทำความเย็น ของระบบแบตเตอรี่ลิเทียม เนื่องจาก TR ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียส และสารทำความเย็นที่สรุปมี น้ำผสมไกลคอล น้ำมัน ของไหลนาโน โลหะเหลวและไอออนโลหะ ส่วนระบบการทำความเย็นแบ่งเป็น แอคทีฟและพาสซีฟภายนอกและภายใน ทางตรงและทางอ้อม และการจัดเรียงของแบตเตอรี่ลิเทียมแบบอนุกรม แบบขนานและแบบผสมระหว่างแบบอนุกรมกับแบบขนาน โดยได้สรุปว่าการทำความเย็นน้ำมีประสิทธิภาพดีกว่าน้ำมัน ส่วนแก๊สเฉื่อยเป็นโลหะเหลวที่มีความหนืดต่ำและการนำความร้อนสูง แต่มีราคาสูงหากนำมาเป็นส่วนผสมในน้ำ เป็นของไหลนาโนจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องราคา และสามารถตอบโจทย์เรื่องการระบายความร้อนได้ และในช่วงอุณหภูมิการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมนี้สาร Novec 7000 มีการทำงานที่ดีเพราะจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียส ส่วน

การจัดวางแบตเตอรี่ลิเทียมที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นการจัดวางแบบอนุกรม-ขนาน จะทำให้การระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้ดีที่สุด

(Jaguemont, Omar, Abdel-Monem, Van den Bossche, & Van Mierlo, 2018, pp. 1282-1296) ได้ทำการค้นคว้าเกี่ยวกับการอัดประจุแบบเร็วของแบตเตอรี่ ว่าหากมีกำลังไฟสูงหรือมีพลังงานที่สูง ฤกษ์หรือภาชนะที่บรรจุแบตเตอรี่ลิเทียมจะเป็นอย่างไร ซึ่งใช้แบบจำลองทางอุณหภูมิตัวแบบ 3 มิติ และแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ คือแบบกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC-CV) และแบบสัญญาณพัลส์ติดลบของกระแสและแรงดัน (CCNP-CV) ทดสอบที่อุณหภูมิ 10, 25 และ 45 องศาเซลเซียส โดยทดสอบกับแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{CoO}_2$ : NMC) และลิเทียมไททาเนต ( $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ : LTO) และวิเคราะห์ผลโดย CFD และได้สรุปผลการอัดประจุแบบเร็วทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส และจากแบบจำลองทางอุณหภูมิตัวแบบ 3 มิติพบว่า NMC ให้พลังงานสูง ส่วน LTO ให้กำลังสูง



ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะของกระแส และแรงดันทั้งแบบคงที่และแบบเป็นสัญญาณพัลส์

ที่มา: (Jaguemont et al., 2018, pp. 1282-1296)

(Z. Chen, Sun, Dong, Wei, & Wu, 2019, pp. 158-166) พูดยถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ SOC และระยะเวลาที่เหลือในการคายประจุ RDT แบตเตอรี่ลิเทียม โดยกระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ไม่ได้เป็นเชิงเส้นอาจทำให้การวิเคราะห์ระยะเวลาที่เหลือของแบตเตอรี่เกิดความผิดพลาดได้ และการพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์มาเป็นระดับประจุในแบตเตอรี่ จึงได้ทดลองทางวงจรไฟฟ้าแบบวงจรเปิด โดยทดสอบทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ และได้สรุปว่าแรงดันในสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ระดับต่างๆ สามารถวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่จะใช้ในการคายประจุที่เหลือได้



(M. Xu, Wang, Reichman, & Wang, 2018, pp. 298-309) กล่าวว่า การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว หรืออัดประจุแบบรวมเร็วของแบตเตอรี่ลิเทียม ผู้คนจะให้ความสำคัญเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่เพื่อเลี่ยงการเกิด TR และหาผลที่เกิดขึ้นจากการอัดประจุแบบไวจากพฤติกรรมความร้อนที่เกิด และประสิทธิภาพทางพลังงานของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทดลอง 30 นาที ถึงความจุ 80% และอัดประจุด้วยกระแสคงที่แบบผสม 2 กระแส (two-stage constant current: 2SCC) โดยทดสอบแบบ กระแสสูง-กระแสต่ำ กระแสต่ำ-กระแสสูง และแบบกระแสแบบเดียวคงที่ ผลการทดลองสรุปว่ากระแสสูงช่วงแรกและกระแสต่ำช่วงหลังอุณหภูมิต่ำและประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าอีก 2 แบบ

(Amietszajew, McTurk, Fleming, & Bhagat, 2018, pp. 346-352) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีการอัดประจุไฟฟ้าแบบไว เพื่อเพิ่มแนวทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยหาว่าการอัดประจุเร็วสูงสุดนั้นเป็นเท่าไร และต้องปลอดภัยด้วย โดยทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 ซึ่งมีกระแส 3 แอมป์ และทดลองพบว่าการอัดประจุแบบไวนั้นปลอดภัยที่กระแสสูงสุด 6A หรือ 2C

(Sturm et al., 2019, pp. 204-223) ทดลองการอัดประจุ และคายประจุกับเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด 18650 ชนิด NMC-811/SiC และ NMC-111/graphite ด้วยวิธี p2D โดยในการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าระดับการอัดเก็บประจุไฟฟ้าเกินกว่า 60% สามารถทำได้น้อยกว่า 18 นาที

(Abada et al., 2016, pp. 178-192) ได้กล่าวถึงบทความที่ได้รวบรวมมาถึงเรื่องความปลอดภัยของแบตเตอรี่ลิเทียม ว่าเป็นประเด็นที่สำคัญ และกล่าวถึงการทำงานของแบตเตอรี่ รวมถึงบริเวณการเกิดเทอร์มอลรันอะเวย์ พร้อมการวิเคราะห์รูปแบบที่ใช้ในปัจจุบัน และบูรณาการรูปแบบเพื่อปรับปรุงในอนาคตที่เน้นการตลาด ราคา ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ทั้งอายุการใช้งาน รวมถึงการนำกลับมาอัดประจุใหม่

(Drake et al., 2014, pp. 298-304) ทำการทดลองการวัดความร้อนเอนนิไซโทรปีก การนำความร้อน และความจุความร้อน ของแบตเตอรี่ลิเทียม  $\text{LiFePO}_4$  ขนาด 26650 และ 18650 และวิเคราะห์ผลการทดลองของวัฏจักรของความร้อนด้วยวิธีทางไฟไนท์อิลิเมนต์ได้ค่าน้อยสุดช่วง  $0.15-0.2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  สำหรับขนาด 26650 และ 18650 โดยกล่าวอีกว่าการทดลองนี้จะทำให้เข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้น อาจจะนำไปสู่รูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยได้

### 2.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านความร้อนของแบตเตอรี่

#### 2.2.3.1 ความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียม (C. Zhao, Cao, Dong, & Jiang, 2018)

$$Q_{gen} = Q_{ir} + Q_{re} = \pm \left[ I(U_{ca} - U_{an} - U) - IT \frac{d(U_{ca} - U_{an})}{dT} \right] \quad (2)$$

โดยที่

$Q_{gen}$	คือ ความร้อนของแบตเตอรี่ (W)
$Q_{ir}$	คือ ความร้อนของแบตเตอรี่ที่ย้อนกลับไม่ได้ (W)
$Q_{re}$	คือ ความร้อนของแบตเตอรี่ที่ย้อนกลับได้ (W)
$I$	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
$U_{ca}$	คือ วงจรด้านแคโทด (V)
$U_{an}$	คือ วงจรด้านแอโนด (V)
$U$	คือ จุดเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้า (V)
$T$	คือ อุณหภูมิ (K)

#### 2.2.3.2 เทอร์มอลรันอเวย์ (Thermal runaway)

ความร้อนที่เกิดขึ้นปริมาณมากจนทำให้เกิดเทอร์มอลรันอเวย์ได้นั้น มาจากองค์ประกอบด้านความร้อนในหลายส่วนรวมกัน เช่นปฏิกิริยาทางเคมีและไฟฟ้าเคมี รวมถึงความร้อนภายในแบตเตอรี่ ดังสมการ

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = -\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + \Sigma Q \quad (3)$$

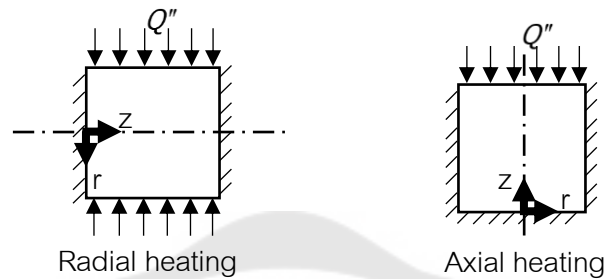
โดยที่

$\rho$	คือ ความหนาแน่นของมวล ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$C_p$	คือ ความจุความร้อน ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$T$	คือ อุณหภูมิ (K)
$t$	คือ เวลา (s)
$\lambda$	คือ การนำความร้อน ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ )
$Q$	คือ ความร้อน (W)



### 2.2.3.3 สมการพลังงาน

รูปแบบความร้อนทางกายภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมประเภททรงกระบอกสามารถวิเคราะห์อุณหภูมิได้จากความร้อนตามแนวแกน และการกระจายความร้อนแบบเรเดียชัน (Drake et al., 2014, pp. 298-304)



ภาพประกอบ 5 แสดงรูปแบบการถ่ายเทความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \frac{\rho c_p}{k_r} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

เมื่อ  $\theta(r, t)$  เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{k_r} Q'' \quad \text{ที่ } r=R \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad \text{ที่ } r=0 \quad (6)$$

สมมติให้อุณหภูมิห้องเริ่มต้น  $\theta(r, t) = 0$  และไม่คิดการสูญเสียความร้อนจากโครงสร้าง อุณหภูมิเฉลี่ยที่สูงขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \theta(r, t) &= \theta_m(t) + s(r) + w(r, t) \quad (7) \\ &= \frac{2Q''}{\rho c_p R} t + \frac{Q''}{k_r R} \left( \frac{r^2}{2} - \frac{R^2}{4} \right) - \frac{2Q'' R}{k_r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n r)}{(\lambda_n R)^2 J_0(\lambda_n R)} \exp\left( -\frac{k_r \lambda_n^2}{\rho c_p} t \right) \end{aligned}$$

โดยที่

$R$	คือ เรเดียน ( $J \cdot kg^{-1} K^{-1}$ )
$Q''$	คือ ฟลักซ์ความร้อน ( $W/m^2$ )
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของมวล ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$k_r$	คือ รัศมีการนำความร้อน ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )
$C_p$	คือ ความจุความร้อน ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$\theta$	คือ อุณหภูมิแบบเตอรี (K)
$\theta_m$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแบบเตอรี (K)
$s(r)$	คือ องค์ประกอบสถานะสถานะอยู่ตัว
$w(r,t)$	คือ องค์ประกอบสถานะสถานะชั่วครู่

ความร้อนตามแนวแกน

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\rho C_p}{k_z} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

เมื่อ  $\theta(z,t)$  เป็นอุณหภูมิที่สูงขึ้น

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{k_z} Q'' \quad \text{ที่ } z = H \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad \text{ที่ } z = 0 \quad (10)$$

สามารถหาอุณหภูมิเฉลี่ยได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \theta(z,t) &= \theta_m(t) + s(z) + w(z,t) \quad (11) \\ &= \frac{Q''}{\rho C_p H} t + \frac{Q''}{2k_z H} \left( z^2 - \frac{H^2}{3} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} 2Q'' H}{k_z (n\pi)^2} \cos\left(\frac{n\pi z}{H}\right) \exp\left(-\frac{k_z (n\pi)^2}{\rho C_p H^2} t\right) \end{aligned}$$

โดยที่

$H$	คือ ความสูง (m)
$Q''$	คือ ฟลักซ์ความร้อน ( $W/m^2$ )
$\rho$	คือ ความหนาแน่นของมวล ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$k_z$	คือ การนำความร้อนตามแนวแกน ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )
$C_p$	คือ ความจุความร้อน ( $J g^{-1} K^{-1}$ )
$\theta$	คือ อุณหภูมิแบตเตอรี่ (K)
$\theta_m$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่ (K)
$s(z)$	คือ องค์ประกอบสถานะสถานะอยู่ตัว
$w(z,t)$	คือ องค์ประกอบสถานะสถานะชั่วครู่

#### 2.2.3.4 สมการอนุรักษ์พลังงานของแบตเตอรี่

$$\rho_b C_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q_{gen} \quad (12)$$

โดยที่

$\rho_b$	คือ ความหนาแน่นของแบตเตอรี่ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$C_b$	คือ ความร้อนจำเพาะของแบตเตอรี่ ( $J g^{-1} K^{-1}$ )
$k_b$	คือ การนำความร้อนของแบตเตอรี่ ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )
$Q_{gen}$	คือ ความร้อนของแบตเตอรี่ (W)

เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำความเย็น จะได้สมการการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w C_w \mathbf{v} T_w) = \nabla \cdot (k_w \nabla T_w) \quad (13)$$

โดยที่

$\rho_w$	คือ ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$C_w$	คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น ( $J g^{-1} K^{-1}$ )
$k_w$	คือ การนำความร้อนของน้ำหล่อเย็น ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )
$T_w$	คือ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
$\mathbf{v}$	คือ ความเร็วของน้ำหล่อเย็น (m/s)

สมการความต่อเนื่องและสมการการอนุรักษ์โมเมนตัม  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$  จะได้

$$\rho_w \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} \quad (14)$$

โดยที่

- $p$  คือ ความดันสถิต (Pa)  
 $\mu$  คือ ความหนืดพลวัต (Pa.S)

### 2.2.3.5 การนำความร้อน (Bolsinger & Birke, 2019, pp. 222-230)

ความร้อนตามแนวแกน

$$\lambda_{axial} = \frac{\sum d_n \lambda_n}{D} \quad (15)$$

ความร้อนการแผ่

$$\lambda_{rad} = \frac{D}{\sum \frac{d_n}{\lambda_n}} \quad (16)$$

โดยที่

- $\lambda_{axial}$  คือ การนำความร้อนตามแนวแกน ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )  
 $\lambda_{rad}$  คือ การนำความร้อนจากการแผ่ ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )  
 $\lambda_n$  คือ ลำดับชั้นการนำความร้อน ( $W \cdot m^{-1} K^{-1}$ )  
 $d_n$  คือ ความหนาของชั้นผิว ( $\mu m$ )  
 $D$  คือ ความหนารวม ( $\mu m$ )

### 2.2.3.6 ความร้อนสถานะอยู่ตัว

$$C \cdot \frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{diss} \quad (17)$$

โดยที่

$C$	คือ ความจุความร้อน ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$T_{in}$	คือ อุณหภูมิภายในแบตเตอรี่ (K)
$\dot{Q}_{gen}$	คือ อัตราการเกิดความร้อน (J/s)
$\dot{Q}_{diss}$	คือ อัตราการสลายตัวความร้อน (J/s)

## 2.3 การจัดการด้านความร้อนของแบตเตอรี่ (BTMS)

(F. Liu, Lan, & Chen, 2016, pp. 57-70) ได้ศึกษาการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ และใช้ระบบท่อระบายความร้อน ทำการทดลองและเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์โดยโปรแกรม CFD ท่อที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์เป็นท่อขนาดเล็กระดับไมโคร (ultra-thin micro heat pipe: UMHP) และใช้โมเดลความร้อนแบบ 3 มิติ แบบแยกส่วน เพราะมีทั้งตัวแปรต่างๆ เกี่ยวกับความร้อนในท่อ รวมถึงเงื่อนไขของโมเดลทางความร้อน ซึ่งภายในท่อขนาดเล็กนั้นพิจารณาการพาความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ โดยผลลัพธ์จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมเหมือนกับ การทดลอง

(Tian, Gan, Zhang, Gu, & Yang, 2018, pp. 16-27) ได้ศึกษาระบบการจัดการความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้า (EVTMS) โดยระบบระบายความร้อน และความร้อนเหลือทิ้งนั้นทำให้การทำมาเย็นลดลง 26.30-32.10% และความร้อนเหลือทิ้งอยู่ระหว่าง 18.73-45.17% และ COP อยู่ระหว่าง 0.68-21.05% ในการทดลองภายใต้สภาวะการขับขี่แบบเดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ถูกตรวจสอบความจุจากผลกระทบนี้พบว่า SOC ลดลง 10.60% และ COP ให้ความร้อนเพิ่มขึ้น 25.55% เมื่อเทียบกับความร้อน PTC พบว่าระบบ EVTMS นั้นดีกว่า 31.71%

(H. Liu, Wei, He, & Zhao, 2017, pp. 304-330) ได้ศึกษาถึงพลังงานจากแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออนที่ถูกนำไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้า โดยปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ได้มีการศึกษาจากนักวิจัยมากมาย ไม่ว่าจะเป็นเรื่องอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลดลง หรือวงจรไฟฟ้า ปฏิกริยาทางเคมีและความร้อนจากการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ (BTMS) มีการค้นคว้าการระบายความร้อนด้วยวิธีต่างๆ เช่น การใช้อากาศ การใช้ของเหลว การใช้ไอระเหย ท่อร้อน รวมถึงการใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้

(PCM) ในการระบายความร้อน และการระบายความร้อนแบบทางตรง ทางอ้อม ซึ่งในการจัดการด้านความร้อนขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยการจัดการที่ดีนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

### 2.3.1 เทอร์มอลรันอเวย์ TR

(Q. Wang et al., 2012, pp. 210-224) ได้ทบทวนเกี่ยวกับปรากฏการณ์ Thermal runaway (TR) ที่จะทำให้เกิดประกายไฟและการระเบิดของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยกล่าวถึงพลังงานที่ผู้คนทั่วโลกให้ความสนใจพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมที่จะนำมาใช้งานแทนเชื้อเพลิงที่ได้จากซากสิ่งมีชีวิต เพราะสามารถช่วยเรื่องของการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ แต่ปัญหาหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมคือการเกิด Thermal runaway (TR) ที่จะทำให้เกิดประกายไฟและการระเบิดของแบตเตอรี่ ซึ่งได้นำเสนอโมเดลทางความร้อน หรือโมเดลความร้อนของไฟฟ้าเคมี แบบ 1, 2 และ 3 มิติ โดยใช้วิธีการทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) และ finite volume method (FVM) และแบ่งเป็นการทดลองเกี่ยวกับการใช้เตาอบ การทำให้เกิดการลัดวงจร การอัดประจุไฟฟ้าเกินความต้องการของแบตเตอรี่ การเจาะ และการบิด เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลที่ทำให้เกิดไฟและการระเบิดของแบตเตอรี่ โดยได้ผลว่า โมเดลแบบ 3 มิติ และวิธีทางความร้อนแบบไฟฟ้าเคมี เป็นเงื่อนไขที่มีความเป็นจริงและครอบคลุมมากที่สุด และวัสดุที่ใช้ในด้านแคโทด LiFePO<sub>4</sub> เป็นวัสดุที่ราคาถูกและมีความปลอดภัยสูง ส่วนการเกิด TR จะเกิดที่ด้านแคโทดซึ่งการป้องกันที่ดีคือการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส

ตาราง 2 แสดงอุบัติเหตุของรถยนต์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมาก่อน

No.	Date	Accidents replay	Fire causes
1	18 Jul. 2011	EV bus catch fire, Shanghai, China	Caused by overheated LiFePO <sub>4</sub> batteries
2	11 Apr. 2011	EV taxi catch fire, Hangzhou, China	Caused by 16 Ah LiFePO <sub>4</sub> battery
3	3 Sep. 2010	A Boeing B747-400F cargo plane catch fire, Dubai	Caused by overheated lithium batteries
4	26 Apr. 2010	Acer recalled 2700 laptop batteries, as Dell, Apple, Toshiba, Lenovo and Sony done in 2006	Potential overheating and fire hazards

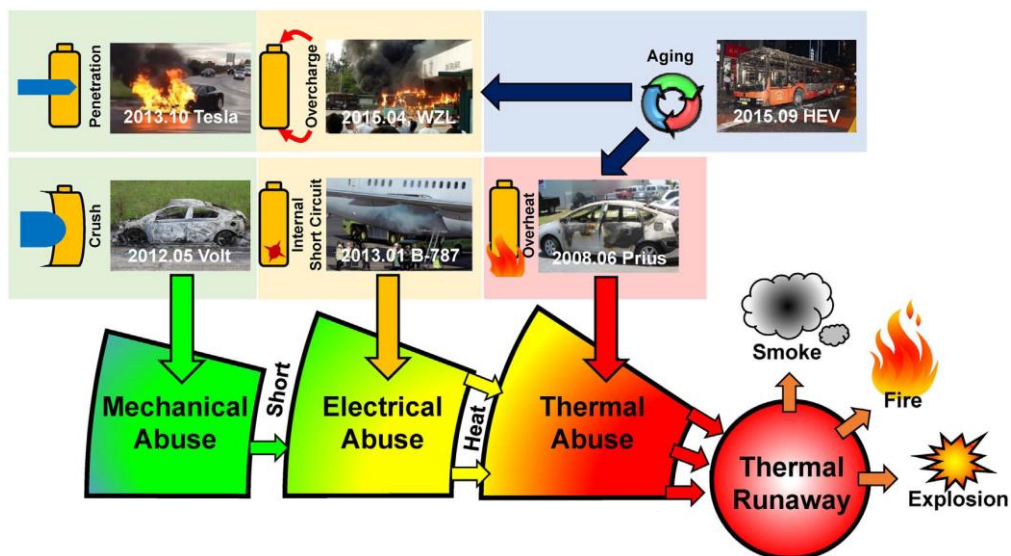
No.	Date	Accidents replay	Fire causes
5	Mar. 2010	Two iPod Nano music player overheating and catching fire, Japan	Caused by overheated lithium batteries
6	Jan. 2010	Two EV buses catch fire, Urumqi, China	Caused by overheated LiFePO <sub>4</sub> batteries
7	July, 2009	Cargo plane catch fire before fly to USA, Shenzhen, China	Caused by spontaneous combustion of lithium ion batteries
8	21 Jun. 2008	Laptop catch fire in a conference, fire burning 5min, Japan	Caused by overheated battery
9	Jun. 2008	Honda HEV catch fire, Japan	Caused by overheated LiFePO <sub>4</sub> batteries
10	2006–now	Tens of thousands of mobile phone fires or explosions	Caused by short-circuit, overheating, etc.

ที่มา: (Q. Wang et al., 2012, pp. 210-224)

(Taniguchi et al., 2019, pp. 148-154) ศึกษาเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด LiCoO<sub>2</sub> จำนวน 25 ก้อน ที่ความร้อนเริ่มต้นจากสิ่งแวดล้อมที่ 80 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC) ต่างๆ และวิเคราะห์ความสัมพันธ์จากเครื่องมือวัดอัตราเร่งทางความร้อน พบว่าความร้อนจากสิ่งแวดล้อมที่ 80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดความร้อนจากตัวแบตเตอรี่เอง และมีอุณหภูมิสูงขึ้นแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่เกิด TR และจากการทดลองพบว่าที่แบตเตอรี่ 100% SOC มีอัตราการเกิด TR ต่ำที่สุด

(X. Feng et al., 2018, pp. 246-267) ได้ทำการทบทวนถึงกลไกการเกิด TR ในแบตเตอรี่ลิเทียมของรถยนต์ไฟฟ้า โดยสรุประดับการของการเกิด TR ไว้ 3 ระดับ คือ ระดับทางกล เช่นอุบัติเหตุที่ส่งผลต่อแบตเตอรี่ไม่จำเป็นการบิดหรือถูกเจาะ ซึ่งอาจจะส่งผลถึงระดับถัดมาคือการลัดของวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยมีโอกาสเกิดได้ทั้งกรณีภายในแบตเตอรี่คือวงจรภายในเกิดการลัดวงจร หรือกรณีภายนอกแบตเตอรี่เช่นการอัดประจุเกิน และในระดับนี้จะพบเป็นสาเหตุหลักหรือปัญหาหลักที่เจอโดยทั่วไป และอาจจะส่งผลต่อระดับถัดมาคือด้านความร้อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดควัน ไฟ หรือการระเบิดของแบตเตอรี่ได้





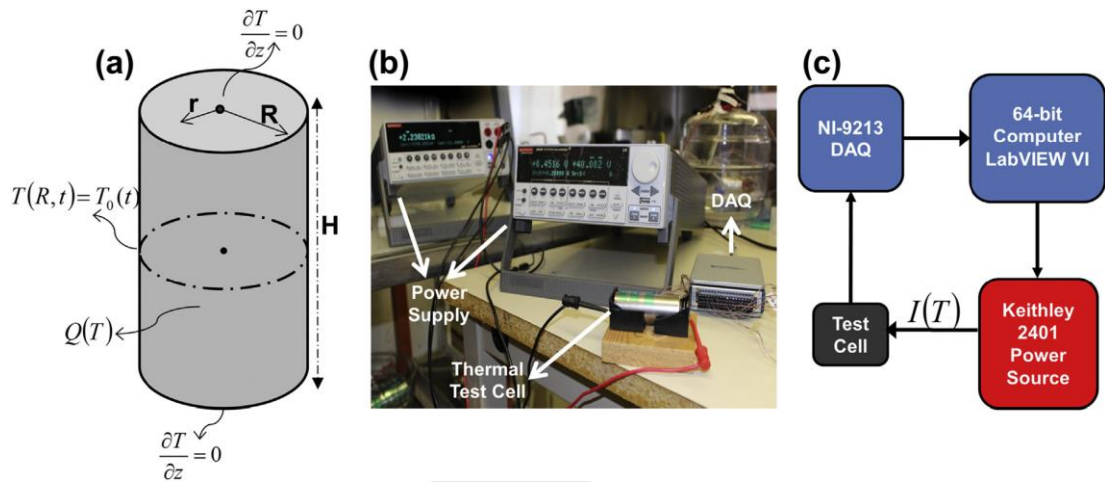
ภาพประกอบ 5 แสดงถึงแนวทางการเกิดเทอร์มอลรันอเวย์ของ

ที่มา: (X. Feng et al. (2018, pp. 246-267)

(Larsson, Bertilsson, Furlani, Albinsson, & Mellander, 2018, pp. 220-231) ได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียม (Graphite-LiCoO<sub>2</sub>) โดยเก็บที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงทดสอบให้ความร้อน 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ผลที่ได้คือแบตเตอรี่ลิเทียมจะเกิด TR ที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส อีกทั้งแบตเตอรี่ลิเทียมที่เสื่อมสภาพ หรือเสียแล้ว ก็ยังมีโอกาสที่จะเกิด TR ได้อยู่

(Parhizi, Ahmed, & Jain, 2017, pp. 27-35) ได้พูดถึงงานวิจัยเกี่ยวกับการเกิด TR ส่วนใหญ่ กล่าวถึงอุณหภูมิที่ผิวของแบตเตอรี่ แต่การเกิด TR นั้น มักจะเกิดที่แกนของแบตเตอรี่ ดังนั้นขนาดของแบตเตอรี่ที่พิจารณาย้อนกลับการนำความร้อน จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิจริงๆ ที่เกิด TR จากแกนของแบตเตอรี่ และด้วยพื้นฐานการเกิด TR ที่อธิบายจะนำไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยลดการเกิด TR ลงได้

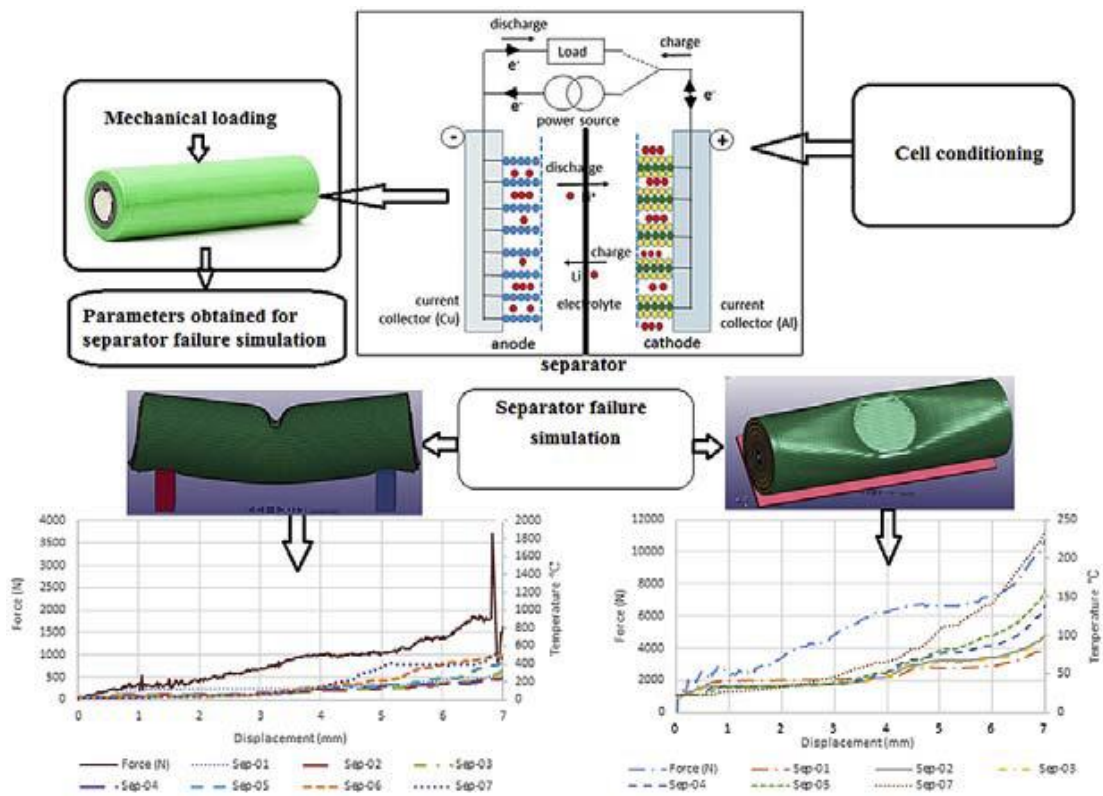




ภาพประกอบ 6 แสดงถึงการทดลองการเกิดเทอร์โมลรั้นอเวย์ของ

ที่มาจาก: (Parhizi et al., 2017, pp. 27-35)

(Sheikh, Elmarakbi, & Elkady, 2017, pp. 61-70) ทำการทดลองหาการเกิด TR ของ แบตเตอรี่ 18650 โดยเงื่อนไขการทดลองการบีบอัดทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Rod, Circular punch, three-point bend และ flat ที่อัตราประจุภายในแบตเตอรี่ต่างกัน โดยวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ด้วยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ และในการทดลองระยะการบีบอัด และเวลาใช้ในการบีบอัดของแบตเตอรี่นั้น พบว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส ละยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลมาจากการลัดวงจรภายในแบตเตอรี่



ภาพประกอบ 7 แสดงผลการทดสอบทางกายภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ที่มา: (Sheikh et al., 2017, pp. 61-70)

(Feng et al., 2015, pp. 74-91) ได้นำเสนอการเกิด TR เพื่อการป้องกัน โดยทดลองกับแบตเตอรี่แพ็คเกจชนิด  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  ขนาด 25 Ah โดยในการทดลองนั้นได้ใช้แบตเตอรี่ที่มีประจุเต็ม ต่อพ่วงกัน 6 ก้อน และทดลองให้เกิด TR ซึ่งผลที่ได้สรุปเป็นข้อๆ ดังนี้ 1. TR เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 469 องศาเซลเซียส 2. พลังงานไฟฟ้าลดลง 75% หรือน้อยกว่า ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน 3. เกิดการกระจายความร้อนสูงกว่า  $70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  4. ความร้อนระหว่างแบตเตอรี่ที่มีความหนา 1 mm มีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า  $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

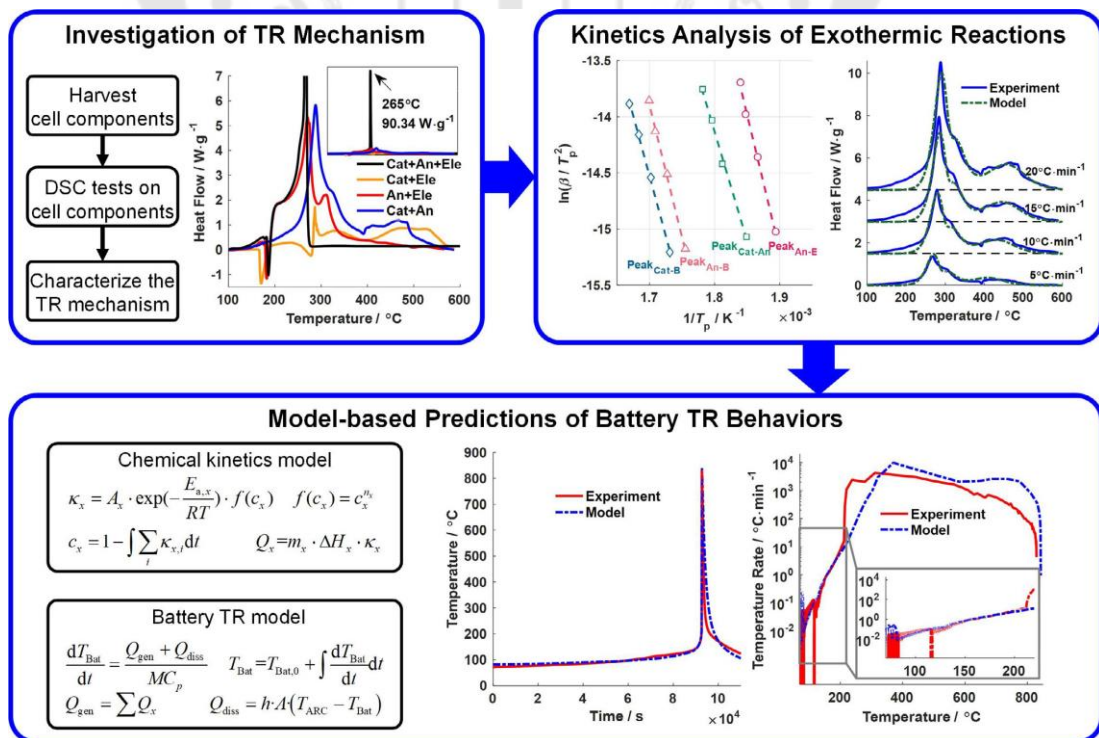
(Ren et al., 2018, pp. 633-644) กล่าวว่า TR เป็นเรื่องหลักด้านความปลอดภัยของแบตเตอรี่ลิเทียมที่ต้องให้ความสำคัญ โดยเริ่มจากการทดสอบแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) โดยมีองค์ประกอบ 3 ตัวคือ Cathode (Cat), Anode (An) และ Electrolyte (Ele) จากนั้นทดสอบ TR โดยความร้อนของเตาเริ่มต้นที่ 130 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความร้อนแก่แบตเตอรี่ และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการลดอุณหภูมิ โดยผลของการทดลองของแบตเตอรี่จากอุณหภูมิเตาเริ่มต้นที่

130 องศาเซลเซียส สามารถทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 185.84 องศาเซลเซียส จากการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้อุณหภูมิ 179.43 องศาเซลเซียส ส่วนที่เตาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส นั้น มีอุณหภูมิขึ้นสูงสุดถึง 857.74 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการใช้โมเดล TR สามารถใช้ในการคาดการณ์ได้

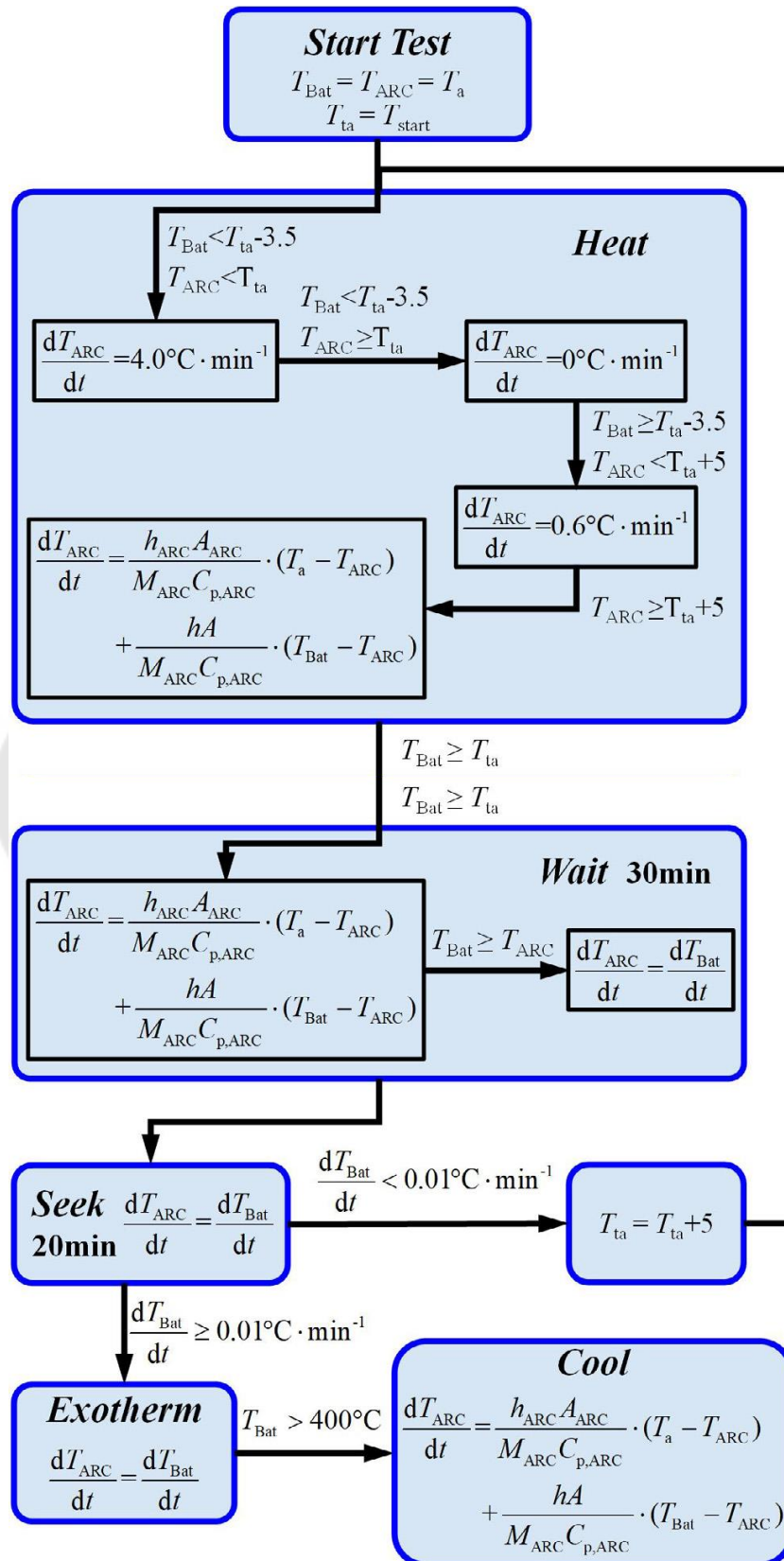
ตาราง 3 แสดงตัวแปรต่างๆ จากการทดลองเกี่ยวกับเทอร์โมลรันอเวย์

Sample	x	$A_x/s^{-1}$	$E_{a,x}/J mol^{-1}$	$n_x$	$\Delta H_x/J g^{-1}$
An + Ele	SEI	$6.3623 \times 10^9$	$1.0960 \times 10^5$	5.5	578.7
	An-E	$5.1510 \times 10^{17}$	$2.0077 \times 10^5$	1	253.2
	An-B	$4.9679 \times 10^{15}$	$1.9549 \times 10^5$	1	108.5
Cat + An	Cat-An	$2.4262 \times 10^{13}$	$1.6201 \times 10^5$	1	560.6
	Cat-B	$6.5429 \times 10^{13}$	$1.7785 \times 10^5$	2	452.1
	Cat	$5.3481 \times 10^5$	$1.0934 \times 10^5$	1.5	434.0

ที่มา: (Ren et al., 2018, pp. 633-644)



ภาพประกอบ 8 แสดงถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปรากฏการณ์เทอร์โมลรันอเวย์



ภาพประกอบ 9 แสดงแผนผังการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการทดลอง

(Wilke, Schweitzer, Khateeb, & Al-Hallaj, 2017, pp. 51-59) ได้พูดถึงประเด็นของความปลอดภัยของแบตเตอรี่ลิเทียมว่าการป้องกันอันตรายที่รุนแรงคือควรเลี้ยงไม่ให้เกิด TR ทุกรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นที่วัสดุ โครงสร้างของแบตเตอรี่ รวมถึงโมดูลของแบตเตอรี่หรือแบตเตอรี่แพ็ค ซึ่งการทดลองนั้นจะทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แพ็คที่ต่อไว้แบบขนาน 4 ก้อน และนำมาต่ออนุกรม 10 ชุด (10s4p) รวม 2.85 Ah และทดสอบโดยการเจาะแบตเตอรี่ด้วยตะปู และระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมินั้นจะทดสอบด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงวัสดุคอมโพสิต (phase change composite materials: PCC™) และเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีระบบนี้ โดยผลที่ได้นั้นการใช้ PCC สามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่าแบบไม่มี PCC จากเซลล์ใกล้เคียงที่มีอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า

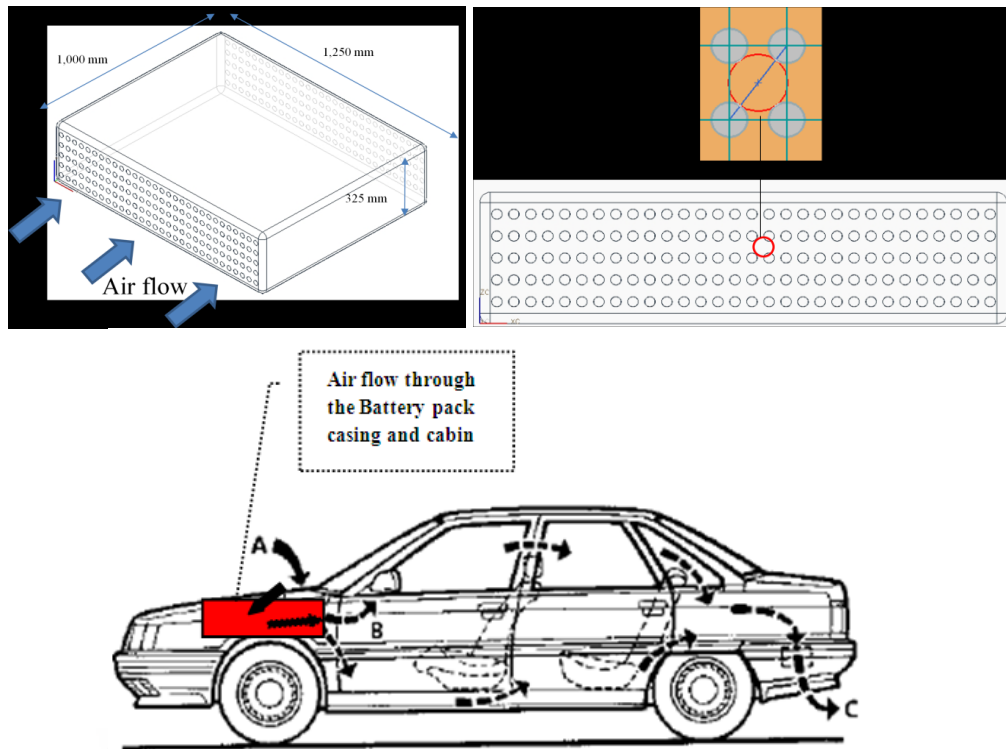
(J. Xu, Lan, Qiao, & Ma, 2017, pp. 883-890) ได้ศึกษาปัญหาการเกิด TR และการป้องกัน TR จากการลัดวงจรของแบตเตอรี่ลิเทียม ที่เกิดจากการถูกเจาะ โดยมีตัวแปรคือความลึกในการเจาะ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุที่เจาะ ซึ่งเป็นการสมมุติฐานจากอุบัติเหตุที่อาจจะเกิดขึ้นจากพาหนะ โดยวิเคราะห์จากแบบจำลอง the conjugate heat transfer model และ the reaction kinetics model โดยได้ทำระบบท่อระบายความร้อนขนาดเล็ก (minichannel cooling) ซึ่งสามารถป้องกันการลุกลามของ TR กับเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิด TR กับแบตเตอรี่เซลล์ตัวมันเองได้

(Yuan, Wang, Wang, & Zhao, 2019, pp. 39-50) ทำการทดสอบวัสดุคั่นระหว่างแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด 18650 ที่จำลองโมดูลมาจำนวนหนึ่ง โดยวัสดุที่ใช้ต้องสามารถป้องกันความร้อนแผ่ไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียงเมื่อเกิด TR โดยได้ผลว่าแผ่นคอมโพสิตกราฟไฟท์ และอลูมิเนียมเอกซ์ทราดสามารถป้องกันความร้อนที่จะส่งผลให้แบตเตอรี่รอบข้างเกิด ความร้อนจนไปสู่การเกิด TR

### 2.3.2 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ

(Mousavi, Hoque, Rahnamayan, Dincer, & Naterer, 2011, pp. 1848-1855) ได้ทำการทดลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมชนิดทรงกระบอก 18650 จำนวน 150 ก้อน ด้วยอากาศที่ไหลผ่านท่อ PVC ในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกัน แต่จำนวนท่อนั้นเท่าเดิม เพื่อหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีหาจำนวนยูนิตที่ถ่ายโอน (Number of Transfer Unit : NTU) โดยผลที่ได้ NTU สามารถเพิ่มได้สูงสุดตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ PVC โดยที่ความเร็วของลมอยู่ในช่วงที่กำหนด

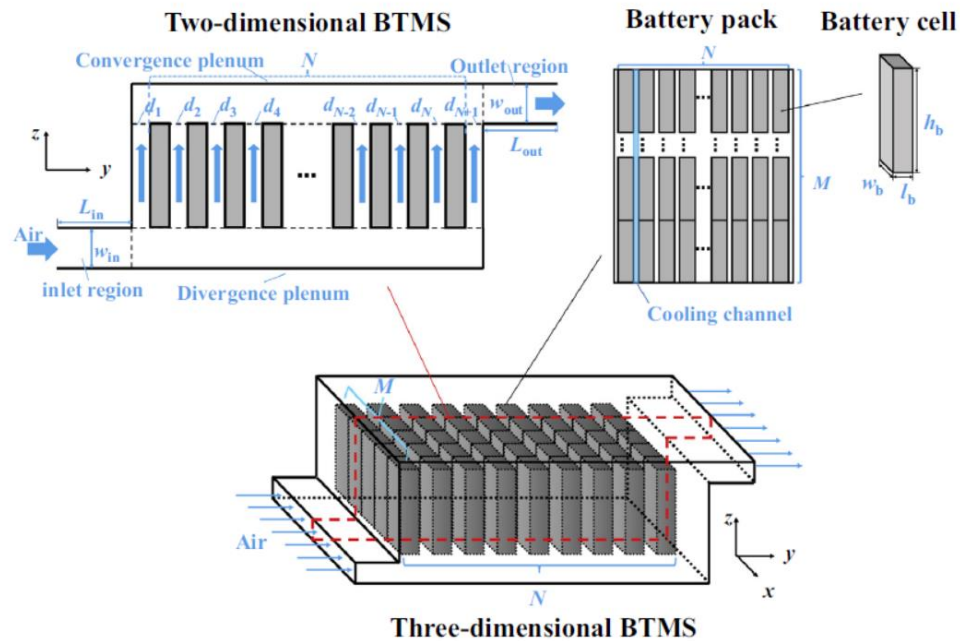




ภาพประกอบ 10 แสดงโมเดลการทดลองของ Mousavi

ที่มา: (Mousavi et al., 2011, pp. 1848-1855)

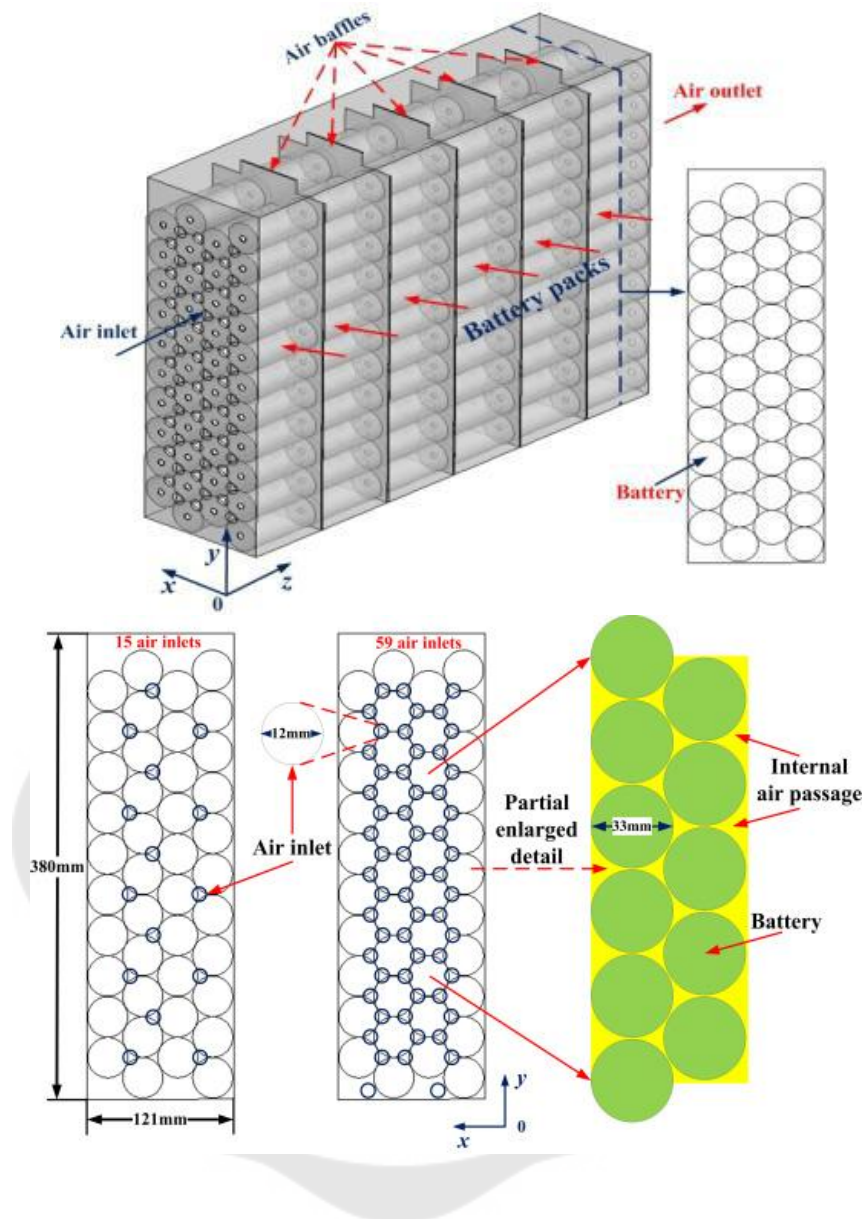
(K. Chen, Chen, Li, Yuan, & Wang, 2018, pp. 393-401) ได้ศึกษาการจัดการความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อความสะอาดกสบายภายในห้องโดยสาร โดยกล่าวถึงระยะห่างระหว่างแบตเตอรี่ในการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CFD ของช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่ เพื่อหาระยะที่น้อยและเหมาะสมที่สุดในการระบายความร้อนที่ดีที่สุด โดยในการปรับระยะระหว่างแบตเตอรี่นั้นพลังงานที่ใช้คงที่ โดยผลที่ได้โปรแกรม CFD สามารถลดระยะเวลาที่หาผลคำตอบได้ในระยะเวลาที่รวดเร็ว และได้ระยะที่สามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ถึง 60%



ภาพประกอบ 6 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen

ที่มา: (K. Chen, Chen, et al., 2018, pp. 393-401)

(Z. Lu et al., 2016, pp. 682-688) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมของรถยนต์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแบตเตอรี่จำนวนมาก เนื่องจากความต้องการที่สูงเกี่ยวกับความจุทางไฟฟ้าภายในรถ และความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่จำนวนมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพ ความมั่นใจในการใช้งาน ความปลอดภัย และอายุการใช้งาน โดยในการศึกษานี้เพื่อวิเคราะห์ห่ออากาศที่ไหลผ่านพื้นที่อุณหภูมิ และตำแหน่งที่เป็นแหล่งความร้อนจากแบตเตอรี่ การวิเคราะห์ทางตัวเลขการกระจายความร้อนด้วยอากาศอย่างมีประสิทธิภาพจะสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้อย่างมากภายใต้แบตเตอรี่ที่อยู่ในกล่องเป็นจำนวนมาก

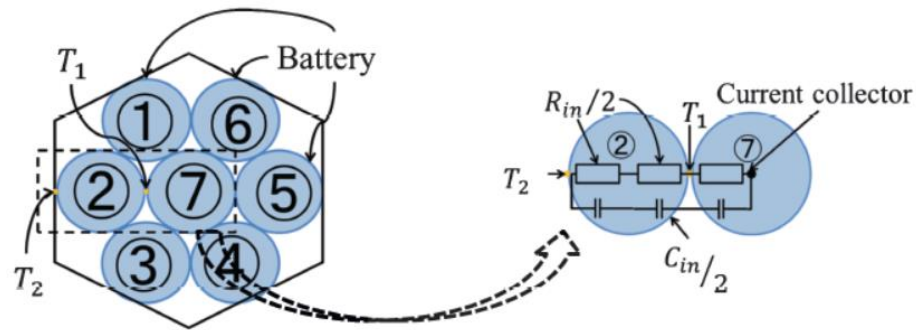


ภาพประกอบ 7 แสดงโมเดลการทดลองของ Z. Lu

ที่มา: (Z. Lu et al., 2016, pp. 682-688)

(Kitagawa, Kato, & Fukui, 2014, pp. 63-67) ทำการทดลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยเริ่มจากกลไกในการให้ความร้อน จากนั้นทำการตรวจสอบจากแบตเตอรี่ก้อนเดียว และหาความเร็วของอากาศที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุด

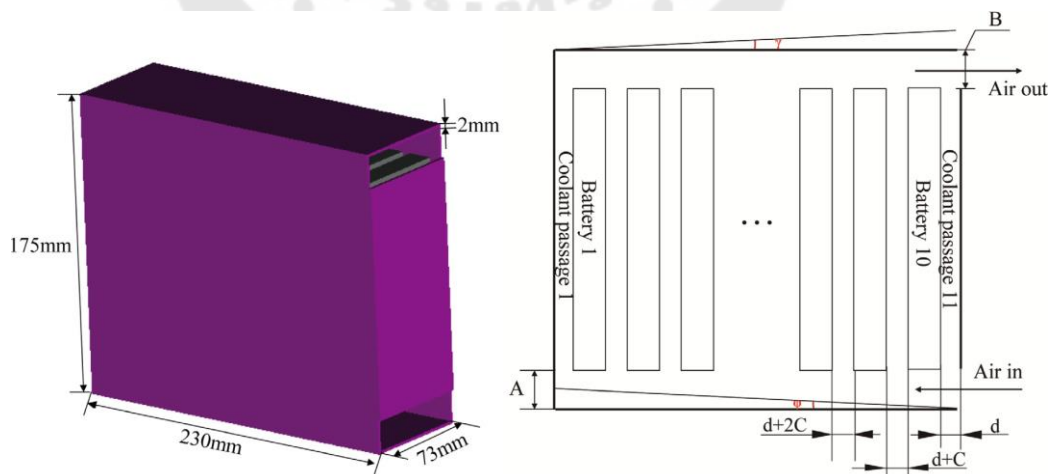




ภาพประกอบ 8 แสดงโมเดลการทดลองของ Kitagawa

ที่มา: (Kitagawa et al., 2014, pp. 63-67)

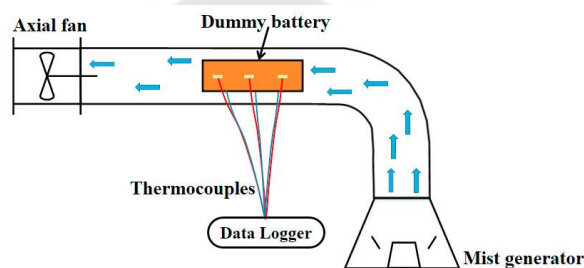
(Xie, Ge, Zang, & Wang, 2017, pp. 583-593) ได้ออกแบบอุปกรณ์บรรจุแบตเตอรี่แพ็ค ชนิดให้อากาศไหลผ่านแบบบังคับ โดยมีปัจจัยอยู่ 3 ด้านคือมุมทางเข้า มุมทางออก และขนาดความกว้างของอากาศที่ไหลผ่าน โดยจำลองสถานการณ์โดยแบบจำลองทางพลศาสตร์การไหล CFD จากนั้นวิเคราะห์ผลจากตัวแปรทั้ง 3 ได้ผลว่ามุมทางเข้าที่ดีที่สุดอยู่ที่ 25 องศา และมุมทางออกที่ดีที่สุดคือ 25 องศา ส่วนความกว้างของอากาศที่ไหลผ่านนั้นขนาดที่เท่ากันทั้งทางเข้าและทางออกของอากาศดีที่สุด ซึ่งเมื่อปรับให้เหมาะสมที่สุดแล้วสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดลงได้ 12.82% และความแตกต่างของอุณหภูมิอยู่ที่ 29.72% พร้อมทั้งเสนอแนวทางนี้ในการจัดการความร้อนในรถยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย



ภาพประกอบ 9 แสดงโมเดลการทดลองของ Xie

ที่มา: (Xie et al., 2017, pp. 583-593)

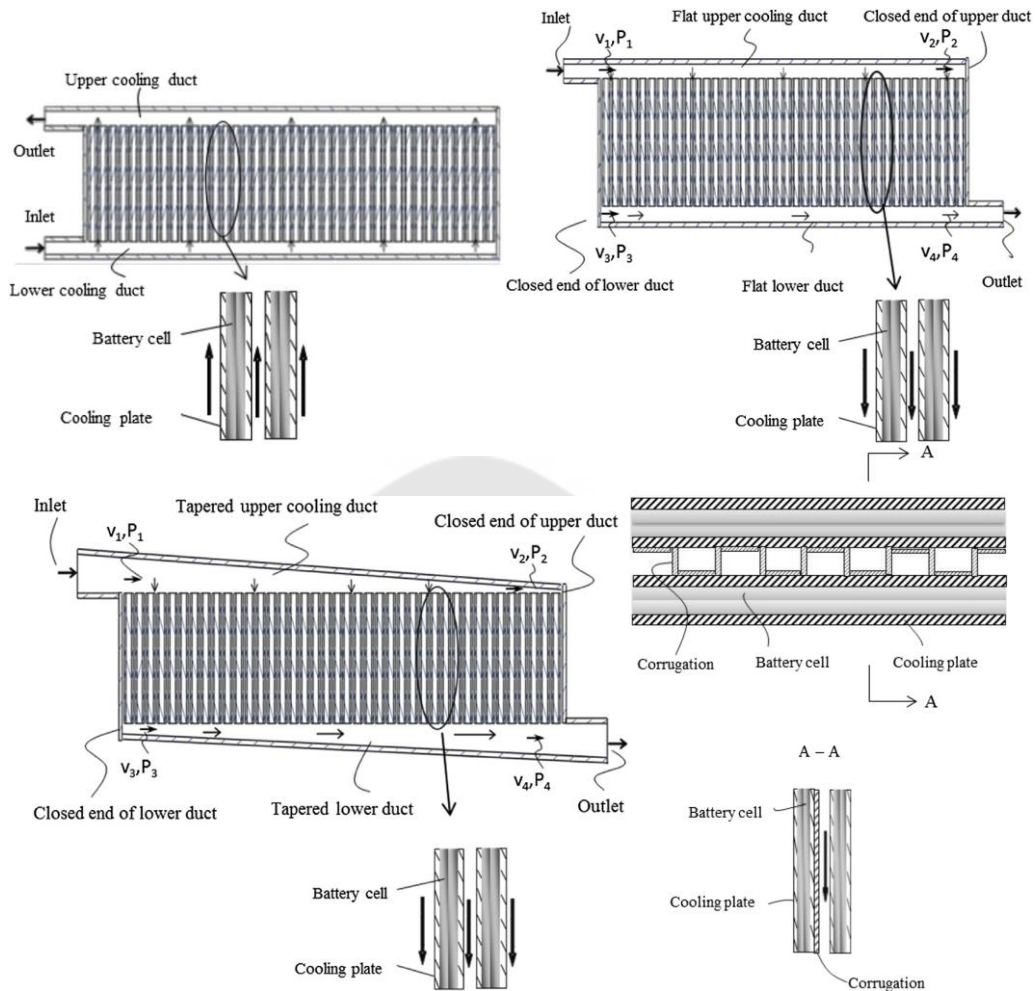
(Saw, King, et al., 2017, pp. 2592-2597) กล่าวแบตเตอรี่ที่เชื่อมกับความต้องการในรถยนต์ไฟฟ้า โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานอยู่ที่ 25-40 องศาเซลเซียส ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดลองการใช้ระบบหมอกเย็นแทนอากาศเย็นแบบแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ของไหล ผลการจำลองจากความสัมพันธ์ของ Nu และ Re พบว่าอัตราการไหลของหมอก 0.37 กรัมต่อวินาที และความเร็วอากาศที่ 2 เมตรต่อวินาที นั้นเพียงพอต่อการรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส และสรุปผลการทดลองว่าหมอกเย็นนั้นเป็นแนวทางการระบายความร้อนแบบใหม่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าได้



ภาพประกอบ 10 แสดงโมเดลการทดลองของ Saw, King

ที่มา: (Saw, King, et al., 2017, pp. 2592-2597)

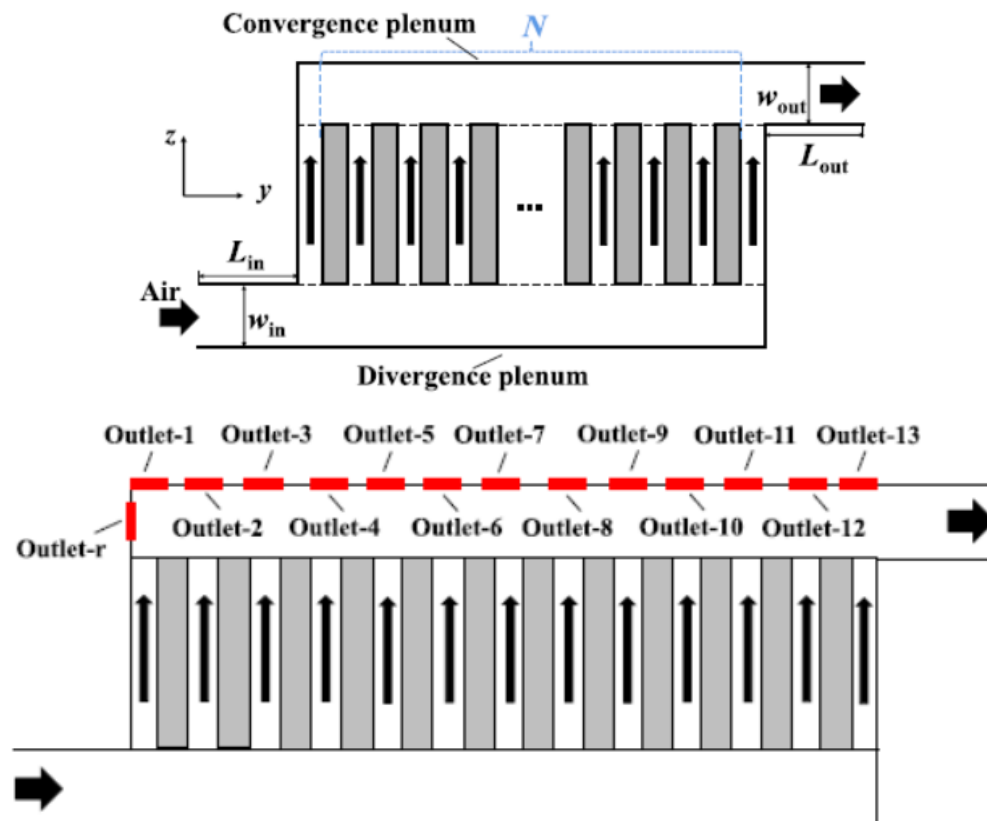
(Sun & Dixon, 2014, pp. 404-414) ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ระบายความร้อนของชุดแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า โดยเงื่อนไขความร้อนสม่ำเสมอ และจำลองการระบายความร้อนแบบ 3 มิติ วิเคราะห์ออกแบบจากการทดลอง (design of experiments: DOE) และใช้เทคนิค Latin-hypercube technique ในการศึกษาครั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบการระบายความร้อนของท่อระบายความร้อน ช่องระบายความร้อน และแผ่นทำความเย็นรวมถึงพฤติกรรมการระบายความร้อน ในการออกแบบชุดระบายความร้อนด้วยอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 11 แสดงโมเดลการทดลองของ Sun & Dixon

ที่มา: (Sun & Dixon, 2014, pp. 404-414)

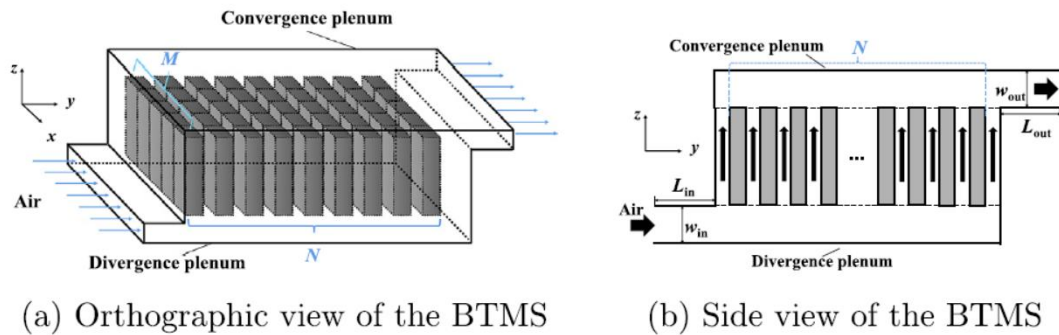
(Hong, Zhang, Chen, & Wang, 2018, pp. 1204-1212) กล่าวถึงการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็น และอากาศเย็นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด และได้ทำการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศทางเข้าและปริมาณความร้อนของแบตเตอรี่ โดยจัดวางตำแหน่งของช่องระบายความร้อนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ถึง 5 องศาเซลเซียส และความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดลดลง 60% ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นหากช่องระบายมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยผลลัพธ์นี้จะให้ผลแบบเดียวกันกับกรณีความร้อนของแบตเตอรี่ไม่คงที่



ภาพประกอบ 12 แสดงโมเดลการทดลองของ Hong

ที่มา: (Hong et al., 2018, pp. 1204-1212)

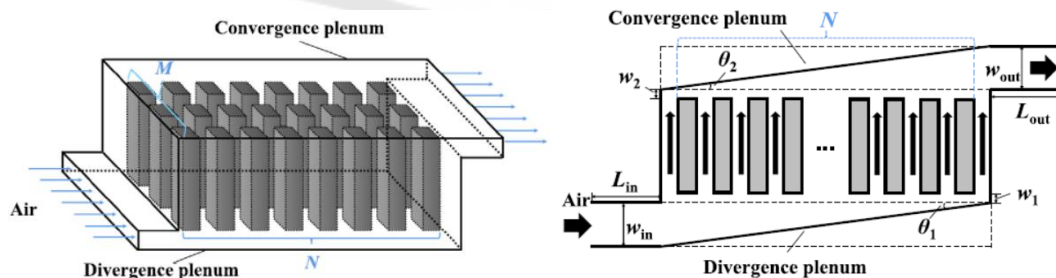
(K. Chen, Wang, Song, & Chen, 2017a, pp. 177-186) ได้กล่าวถึงวิธีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยอากาศแบบขนาน โดยออกแบบจากโมเดลแบบจำลองความเร็วของไหลที่ผ่านช่องระบายความร้อน และโมเดลแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อรวมโมเดลทั้ง 2 และหาจุดที่เหมาะสมภายใต้สภาวะความร้อนที่ต่อเนื่องของแบตเตอรี่ผลที่ได้สามารถตอบปัญหาความร้อนของแบตเตอรี่ได้ และจะได้รูปแบบการจัดเรียงแบตเตอรี่เพื่อการระบายความร้อนที่ดีที่สุด โดยความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดลดลง 42% นอกจากนี้การปรับปรุงยังสามารถประยุกต์ใช้ในกรณีที่มีความร้อนไม่คงที่ได้



ภาพประกอบ 13 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen

ที่มา: (K. Chen et al., 2017a, pp. 177-186)

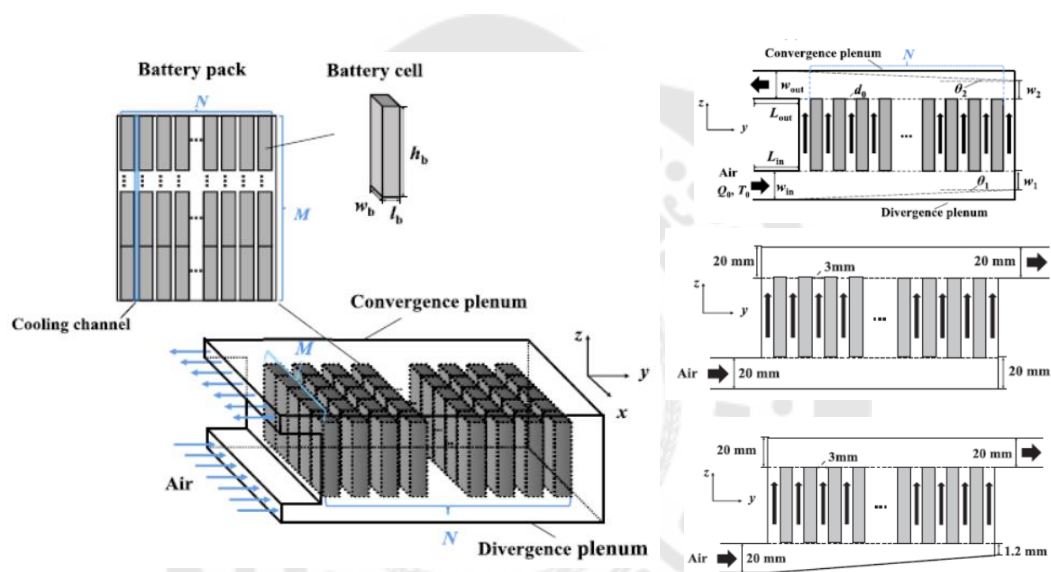
(K. Chen, Wang, Song, & Chen, 2017b, pp. 943-952) ได้ทดลองการระบายความร้อนของชุดแบตเตอรี่ด้วยอากาศที่ไหลแบบขนานโดยการผสมระหว่างวิธีนิวตัน และระบบด้านอากาศโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงคำนวณการไหล CFD ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงที่ 41% ส่วนอุณหภูมิแตกต่างกันลดลง 45% ส่วนการทดลองกรณีแบตเตอรี่ที่ความร้อนไม่คงที่ได้ทดสอบที่อัตราการคายประจุ 4C และ 5C พร้อมกับสรุปว่าวิธีผสมระหว่างวิธีนิวตัน และระบบด้านอากาศนั้นทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดกรณีความร้อนคงที่ลดลงที่ 35% และกรณีความร้อนไม่คงที่ลดลง 32% อีกทั้งยังเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาโครงสร้างของแบตเตอรี่ที่ต้องการระบายความร้อนด้วยอากาศ



ภาพประกอบ 14 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen

ที่มา: (K. Chen et al., 2017b, pp. 943-952)

(K. Chen, Song, Wei, & Wang, 2018, pp. 603-613) ได้ทดลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยอากาศไหลแบบขนาน โดยออกแบบชุดโครงสร้างเป็นแบบบังคับการไหลยูไทป์ (U-type flow) โดยกล่าวถึงการปรับมุมมองเสาที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ แต่ไม่ค่อยเห็นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนการปรับความกว้างทางเข้าและทางออกของอากาศยังเป็นวิธีที่เพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้อย่างมาก ในการทดลองนี้ได้ทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ 5C ผลที่ได้จากการปรับรูปแบบการระบายความร้อนที่เหมาะสมทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ลดลง 70% โดยที่การใช้พลังงานลดลง 32%

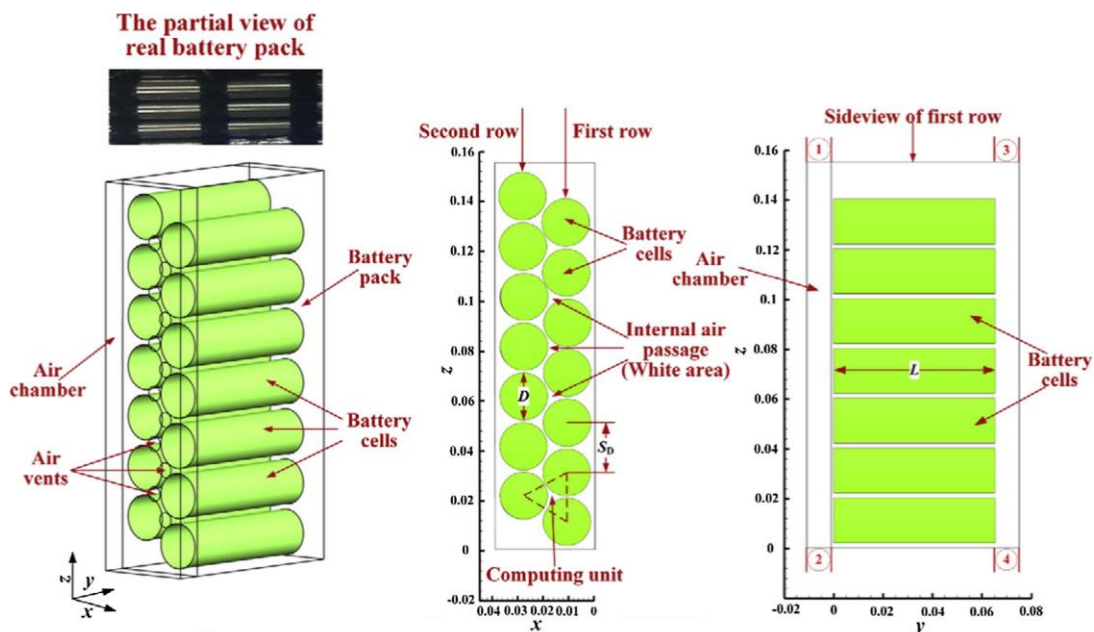


ภาพประกอบ 15 แสดงโมเดลการทดลองของ K. Chen

ที่มา: (K. Chen, Song, et al., 2018, pp. 603-613)

(Zhao Lu et al., 2018, pp. 751-762) ทำการทดลองระบบระบายความร้อนด้วยอากาศของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด 18650 ทดลองด้วยโมเดล 3 มิติ และวิเคราะห์ด้วยวิธีทางพลศาสตร์เชิงตัวเลข จากพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 อย่างคืออุณหภูมิสูงสุด พื้นที่ทางความร้อน และประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยผลที่ได้เน้นช่องอากาศไหลเข้าและไหลออกอยู่ด้านบนดีที่สุด อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวของแบตเตอรี่ ( $L/D$ ) เท่ากับ 36.10 ทำให้ค่า  $\beta$  มีค่าต่ำสุดที่สุดที่รับได้ในการระบายความร้อน โดยเป็นตัวเลือกเกี่ยวกับการออกแบบของแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นในการใช้งาน

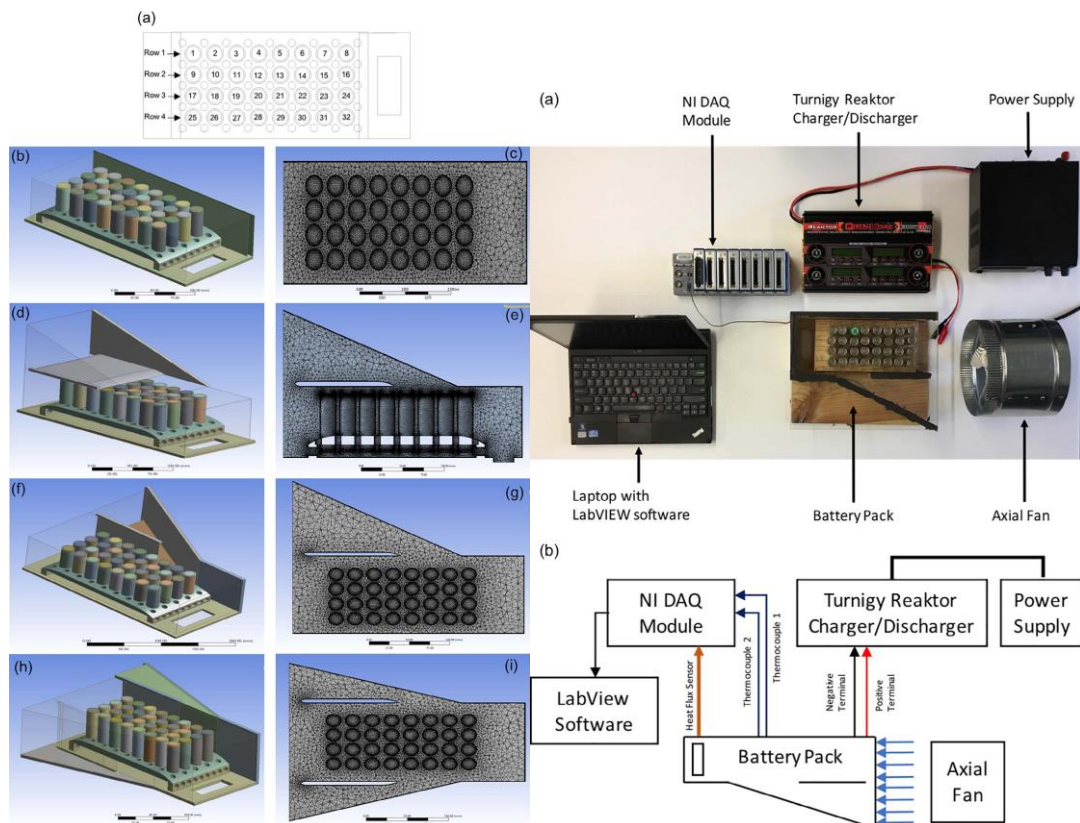




ภาพประกอบ 16 แสดงโมเดลการทดลองของ Zhao Lu

ที่มา: (Zhao Lu et al., 2018, pp. 751-762)

(Shahid & Agelin-Chaab, 2018, pp. 351-363) ทำการทดลองทำการทดลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ทรงกระบอก ด้วยอากาศแบบบังคับการไหล โดยกำหนดทางไหลเข้าสู่ทดสอบ 3 แบบวิธีด้วยกัน โดยไหลผ่านห้องพักลม (Plenum) เพื่อกำหนดการเปลี่ยนทิศทางการไหล และใช้การคำนวณพลศาสตร์การไหลเชิงตัวเลข ผลที่ได้แสดงอุณหภูมิสูงสุดลดลง 4% และอุณหภูมิของแต่ละเซลล์มีความสม่ำเสมอถึง 39% พร้อมเสนอการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอให้สูงขึ้น



ภาพประกอบ 17 แสดงโมเดลการทดลองของ Shahid & Agelin-Chaab

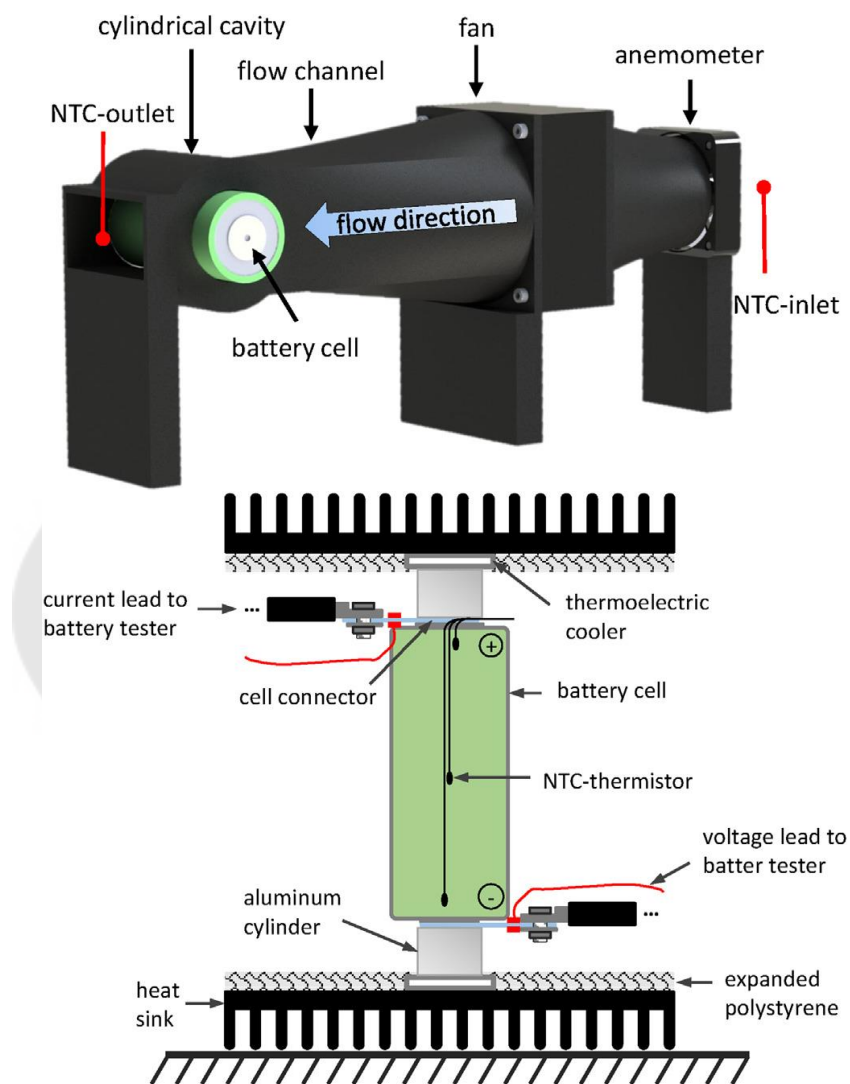
ที่มา: (Shahid & Agelin-Chaab, 2018, pp. 351-363)

(Erb, Kumar, Carlson, Ehrenberg, & Sarma, 2017, pp. 39-47) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของต้นทุนที่ใช้ในการระบายความร้อนด้วยอากาศ กับขนาดของชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้า โดยการลดขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ ต้นทุนในการระบายความร้อนก็ลดลงด้วย ผลการวิเคราะห์สามารถหาขนาดของเซลล์แบตเตอรี่ทรงกระบอกที่ใช้เพื่อต้นทุนที่ต่ำที่สุดได้

(Bolsinger & Birke, 2019, pp. 222-230) ได้กล่าวถึงแบตเตอรี่ลิเทียมมีการกระจายความร้อนที่ไม่มีรูปแบบตายตัวเนื่องจากความแตกต่างกันของขั้วไฟฟ้า โดยในการทดสอบครั้งนี้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่ลิเทียมทรงกระบอกชนิด 26650 LiFePO<sub>4</sub>/graphite และวัดอุณหภูมิจากเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC ทั้ง 3 ตำแหน่ง โดยระหว่างการทดลอง ได้ใช้การวิเคราะห์จากแถบสีที่แสดงถึงอุณหภูมิ กระแสแบบพัลส์ทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงขึ้นในแต่ละช่วงของ SOC และการใช้งานสภาวะคงตัวทางความร้อน (thermal steady state) ของสารทำความเย็นต่างๆ เพื่อ



คำนวณหาการไหลทางความร้อน การระบายความร้อนช่วยลดการแผ่ความร้อนของเซลล์ แบตเตอรี่จากด้านในเซลล์ เปรียบเทียบกับการระบายความร้อนที่ผิวโดยไม่เพิ่มอุณหภูมิตาม แนวแกน การเพิ่มความสามารถในการระบายความร้อน ไม่ทำให้การแผ่ความร้อนเพิ่มขึ้น



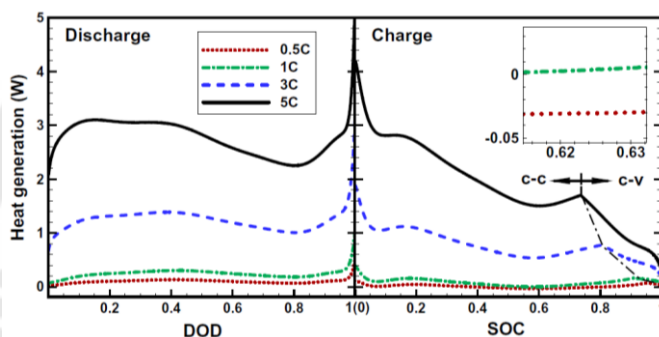
ภาพประกอบ 18 แสดงโมเดลการทดลองของ Bolsinger & Birke

ที่มา: (Bolsinger & Birke, 2019, pp. 222-230)

### 2.3.3 ระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว

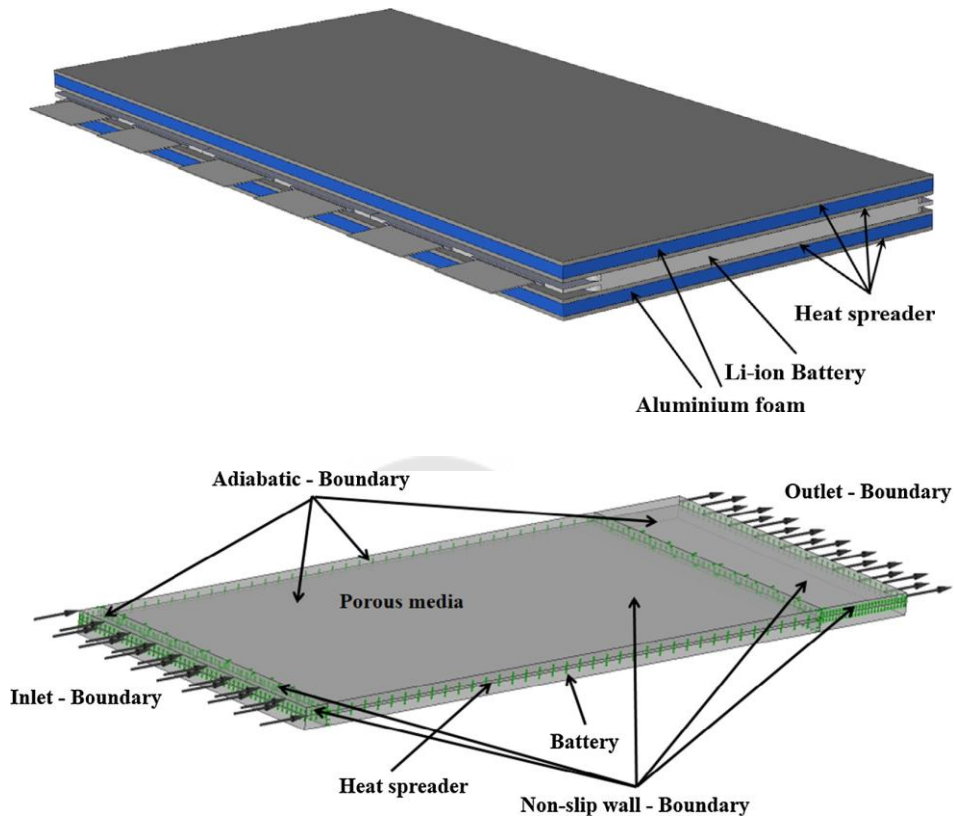
(C. Zhao et al., 2018, pp. 751-762) ได้ศึกษาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิด ทรงกระบอก 18650 จำนวน 71 ก้อน เกี่ยวกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนไปยังผนังระบาย

ความร้อน ที่อัตราการอัดและความประจุทางไฟฟ้าที่ขนาดต่างกัน ซึ่งผลที่ได้พบว่าอัตรา C-rate ที่สูงขึ้นทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น และความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแย่ตามไปด้วย ส่วนการเพิ่มอัตราการไหลของของเหลวสามารถลดอุณหภูมิได้ และช่วยรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแบตเตอรี่ได้ การเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแบตเตอรี่สามารถเพิ่มความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และการลดอุณหภูมิได้เล็กน้อย ส่วนการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแบตเตอรี่กับผนังระบายความร้อนสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้ แต่จะทำให้ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในแบตเตอรี่ลดลง ดังภาพประกอบที่ 19



ภาพประกอบ 19 แสดงพฤติกรรมด้านความร้อนของแบตเตอรี่ที่กระแส C-Rate ต่างๆ

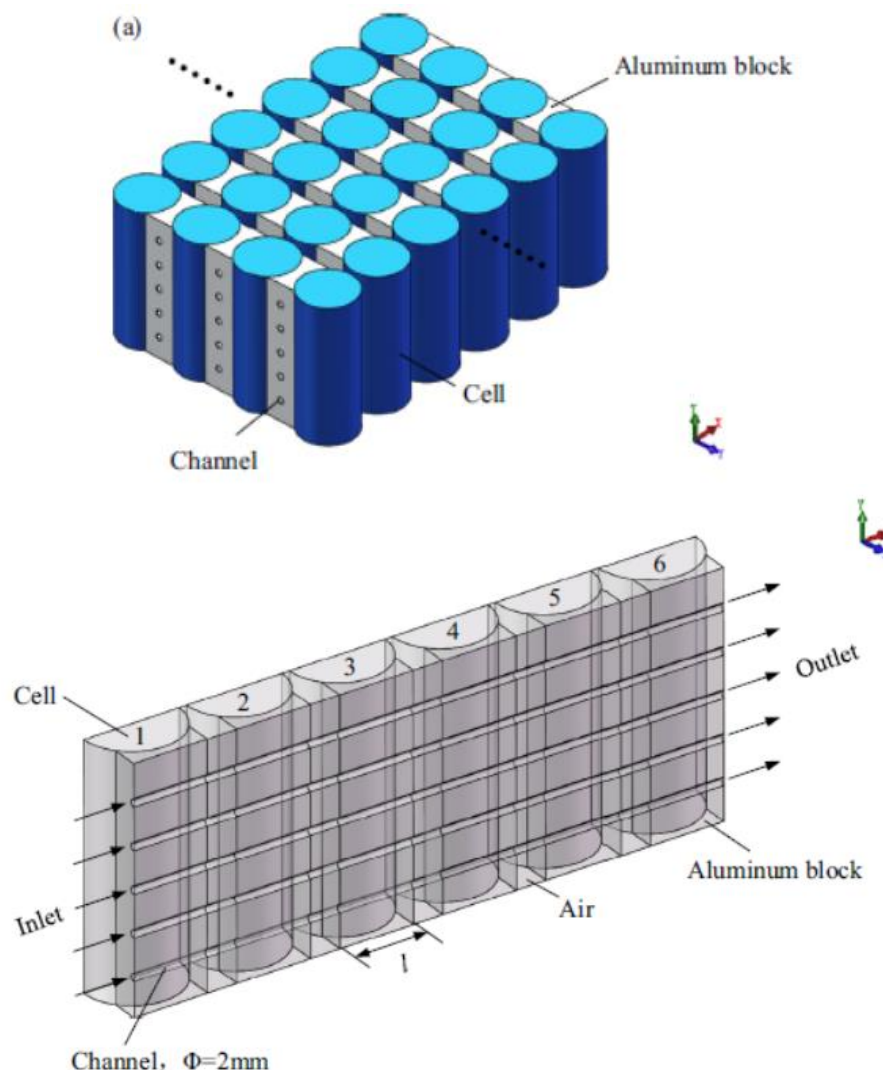
(Saw, Ye, et al., 2017, pp. 1489-1499) ได้กล่าวถึงระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่โดยใช้ครีป และท่อคดเคี้ยวในการระบายความร้อน โดยของเหลวที่ไหลในระบบนั้น อุณหภูมิขาออกจะสูงกว่าอุณหภูมิขาออก การระบายความร้อนที่กระจายตัวไม่ดีจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่สั้นลง โดยในการศึกษานี้ได้ใช้โมดูลแบตเตอรี่ของ  $\text{LiFePO}_4$  และแผ่นโฟมอลูมิเนียมคั่นระหว่างกลางเพื่อช่วยกระจายความร้อน ซึ่งแผ่นโฟมที่ใช้ทดสอบจะมีความพรุน และความหนาแน่นที่ต่างกัน วิเคราะห์ผลโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล จากความสัมพันธ์ของ เลข Nusselt การดูดซึม หรือซึมผ่าน และสัมประสิทธิ์การสูญเสียความต้านทาน โดยผลที่ได้พบว่าโฟมอลูมิเนียม PPI ที่มีความพรุน 0.918 มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูงสุด และมีความต้านทานต่อการไหลต่ำ ดังนั้นการใช้แผ่นโฟมอลูมิเนียมร่วม และปรับรูปแบบให้เหมาะสมจะเป็นวิธีใหม่สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมในการระบายความร้อนได้



ภาพประกอบ 20 แสดงโมเดลการทดลองของ Saw Ye

ที่มา: (Saw, Ye, et al., 2017, pp. 1489-1499)

(Rao, Qian, Kuang, & Li, 2017, pp. 1514-1522) ทำการทดลองชุดระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียม ด้วยน้ำหล่อเย็นผ่านบล็อกคอลลูมิเนียมที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนไม่เท่ากัน โดยกล่าวว่าคอลลูมิเนียมสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแบตเตอรี่ไปยังน้ำหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดลองนี้ได้ทดลองในแบตเตอรี่ที่มีจำนวน 6 เซลล์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการระบายความร้อนจากความยาวของบล็อกคอลลูมิเนียม และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น โดยเปรียบเทียบขนาดความยาวของพื้นที่ผิวสัมผัสไม่คงที่ทั้ง 3 แบบ กับแบบพื้นที่ผิวสัมผัสคงที่ ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบผิวสัมผัสไม่คงที่ดีกว่า ส่วนความเร็วทางเข้าที่  $0.05 \text{ m/s}$  นั้นทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลง 6%, 14% และ 28% และกล่าวถึงการออกแบบที่ดี จะส่งผลถึงชุดระบายความร้อนที่มีน้ำหนักเบา กำลังของปั๊ม และประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น

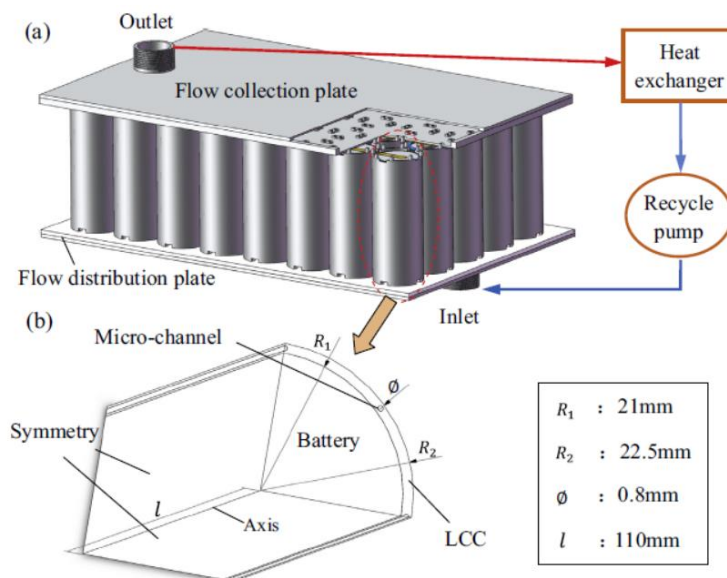


ภาพประกอบ 21 แสดงโมเดลการทดลองของ Rao

ที่มา: (Rao et al., 2017, pp. 1514-1522)

(J. Zhao, Rao, & Li, 2015, pp. 157-165) ได้ศึกษาระบบระบายความร้อนไมโครลแบบเตอริลเทียมไอออนด้วยของเหลวไหลผ่านช่องขนาดเล็ก โดยใช้แบบเตอริลชนิดทรงกระบอกขนาด 42110 ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากจำนวนท่อ อัตราการไหลเชิงมวล ทิศทางการไหล และขนาดของท่อ ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อน ผลที่ได้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้ โดยจำนวนท่อขนาดเล็กไม่น้อยกว่า 4 ท่อ และอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่  $1 \times 10^{-3}$  kg/s ยังกล่าวอีกว่าวิธีการระบายความร้อนด้วยของเหลววิธีนี้ ดีกว่าการระบาย

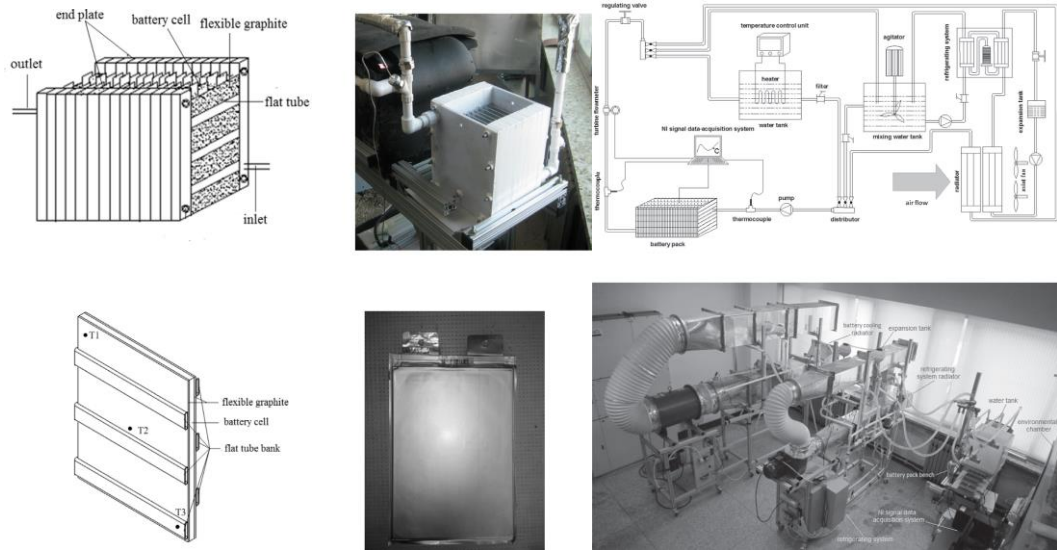
ความร้อนตามธรรมชาติ และความสามารถในการลดความร้อนสูงสุดขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเชิงมวล



ภาพประกอบ 22 แสดงโมเดลการทดลองของ J. Zhao

ที่มา: (J. Zhao et al., 2015, pp. 157-165)

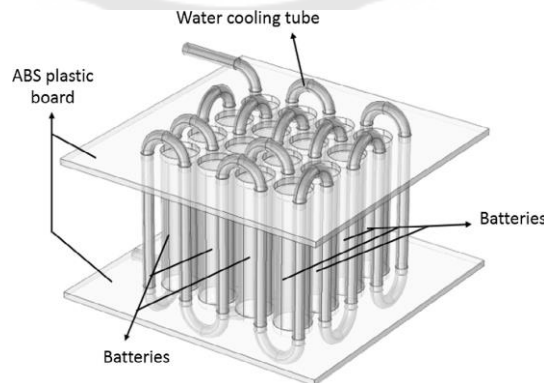
(Zhang et al., 2017, pp. 655-662) ได้กล่าวถึงอุปกรณ์การแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยของเหลวโดยใช้ท่ออลูมิเนียมแบบแบนในการรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าให้มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสม และได้มีการนำกราฟฟิซนิคยัดหยุ่นได้มาช่วยเรื่องของการจัดการความร้อน และผลจากความร้อนเพื่อการระบายความร้อนที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยพบว่าแบตเตอรี่แพคเกจนั้นมีการระบายความร้อนที่ดี มีน้ำหนักเบา และความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดนั้นต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส การใช้กราฟฟิซนิคยัดหยุ่นส่งผลให้อุณหภูมิค่อนข้างคงตัว ส่วนการทำความเย็นแบบแผ่นข้อนั้นช่วยให้อุณหภูมิลดลงเล็กน้อยภายใต้ความไม่นิ่งของแบตเตอรี่ นอกจากนี้ระบบการจัดการความร้อนไม่วางต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของเหลวซึ่งเป็นประโยชน์ในการลดกำลังการทำงานของปั๊มได้



ภาพประกอบ 23 แสดงโมเดลการทดลองของ Zhang

ที่มา: (Zhang et al., 2017, pp. 655-662)

(Li, Yan, Chen, & Wang, 2018, pp. 575-585) ได้ศึกษาระบบการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยน้ำ โดยวิธีการวิเคราะห์ทางตัวเลขจากโมเดลไฟฟ้าเคมี-ความร้อน และการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ ซึ่งมีทั้งแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ทั้งแบตเตอรี่ก้อนเดียว และแบตเตอรี่แพ็ค และอธิบายถึงระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นวิธีที่ดีกว่าในการเพิ่มประสิทธิภาพที่รอบต่ำ และการใช้งานแบตเตอรี่ที่อัตราไม่คงที่

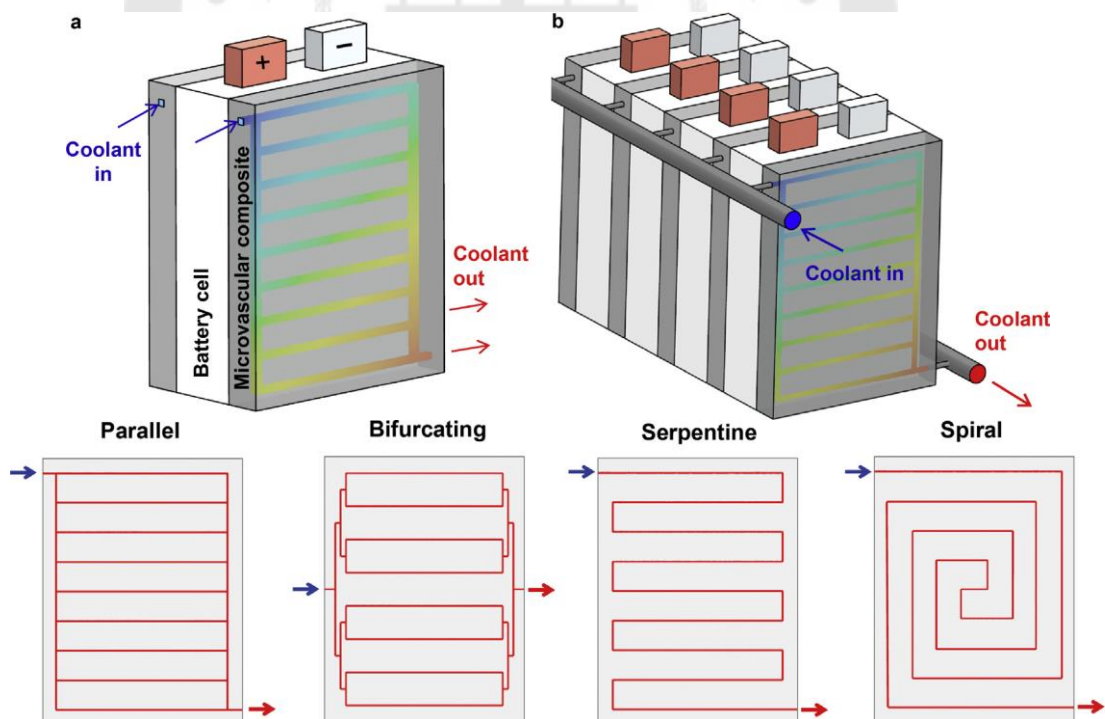


ภาพประกอบ 24 แสดงโมเดลการทดลองของ Li

ที่มา: (Li et al., 2018, pp. 575-585)



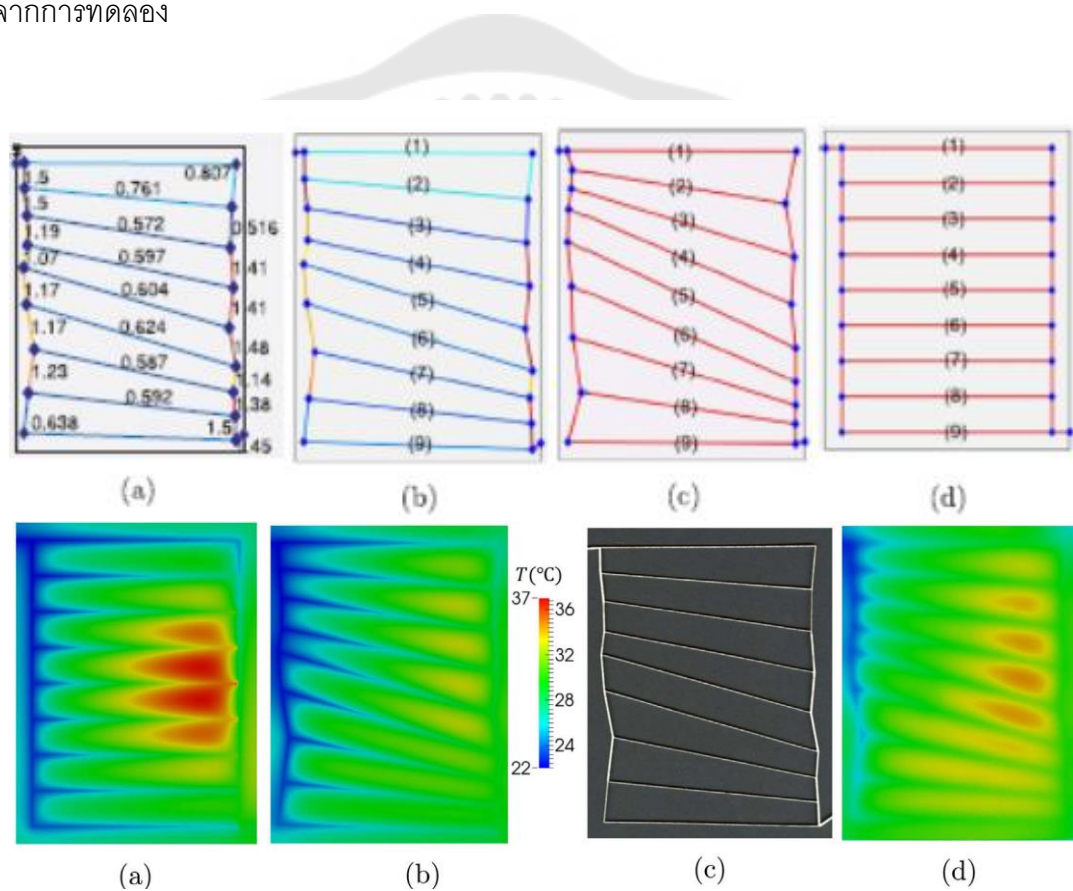
(Pety et al., 2017, pp. 513-522) ได้ทำการทดลองชุดระบายความร้อนที่ทำมาจากคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ ด้วยของไหลผ่านท่อขนาดเล็กไมโครวาสคูลาร์ (microvascular) เพื่อการระบายความร้อนและเสริมความแข็งแรงของวัสดุเพื่อป้องกันอุบัติเหตุการชน โดยประสิทธิภาพของการทำความเย็นของไหลที่เข้าไประบายความร้อนนั้นออกแบบลักษณะเป็นช่องคู่ขนาน กลับไปกลับมาหรือการเดินแบบคดเคี้ยว ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการไหลและขนาดของท่อต่างๆ กัน โดยการออกแบบวนสไปรัลมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนดีที่สุด แต่ต้องใช้ปั๊มแรงดันสูง (>100 kPa) อัตราการไหลมากกว่า 30 mL/min จึงจะเพียงพอต่อการระบายความร้อน ส่วนการออกแบบการไหลที่แยกเป็น 2 ทางที่ปรับปรุงแล้ว ใช้ความดันน้อยสุดโดยที่ประสิทธิภาพทางความร้อนลดลงเล็กน้อย เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดเล็กมีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนเล็กน้อย แต่ท่อที่ขนาดเล็กมากๆ จะส่งผลต่อแรงดันของปั๊ม และการทดลองนี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางพลศาสตร์ของไหล CFD ในการหาวิธีที่ดีที่สุด โดยผลที่ได้ยืนยันยืนยันว่าแผงคอมโพสิตไมโครวาสคูลาร์ สามารถทำให้แบตเตอรี่เย็นลงโดยมีฟลักซ์ความร้อน  $500 \text{ W/m}^2$  และอุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียสได้



ภาพประกอบ 25 แสดงโมเดลการทดลองของ Pety

ที่มา: (Pety et al., 2017, pp. 513-522)

(Tan, Najafi, Pety, White, & Geubelle, 2018, pp. 145-157) ได้ทำการออกแบบแผงระบายความร้อนผ่านท่อขนาดเล็กลง (microvascular) ที่หลากหลายโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ เพื่อทดลองวิเคราะห์ในช่องอุณหภูมิต่างๆ ถึงอุณหภูมิสูงสุด ความดันตกคร่อม และความแปรปรวนของอุณหภูมิ วิเคราะห์คำตอบโดยวิธี  $\epsilon$ -constraint method และวิธี normalized normal constraint method และนำผลที่ได้มาวาดกราฟพาราไดซ์ ผลจากข้อจำกัด และเงื่อนไขที่แตกต่างจากแหล่งความร้อน กำลังของปั๊ม และการไหลแบบบังคับเพื่อการออกแบบที่เหมาะสม การปรับปรุงตัวแปรต่างๆ รวมถึงความดันตกคร่อม ซึ่งผลการวิเคราะห์นั้นได้ผ่านการตรวจสอบจากการทดลอง

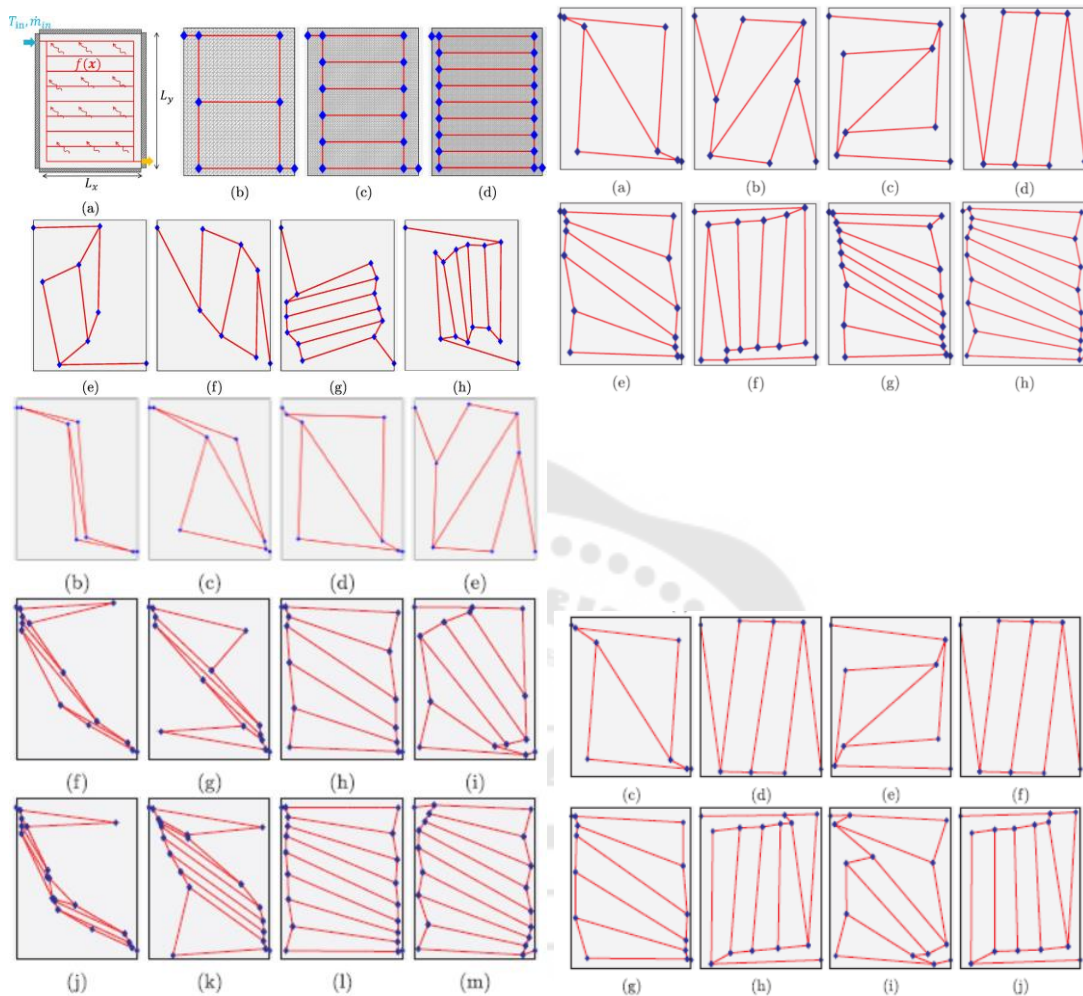


ภาพประกอบ 26 แสดงโมเดลการทดลองของ Tan

ที่มา: (Tan et al., 2018, pp. 145-157)

อีกทั้ง ยังได้จำลองรูปแบบอื่นๆ อีกมากมาย เพื่อการหารูปแบบต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบต่างๆ

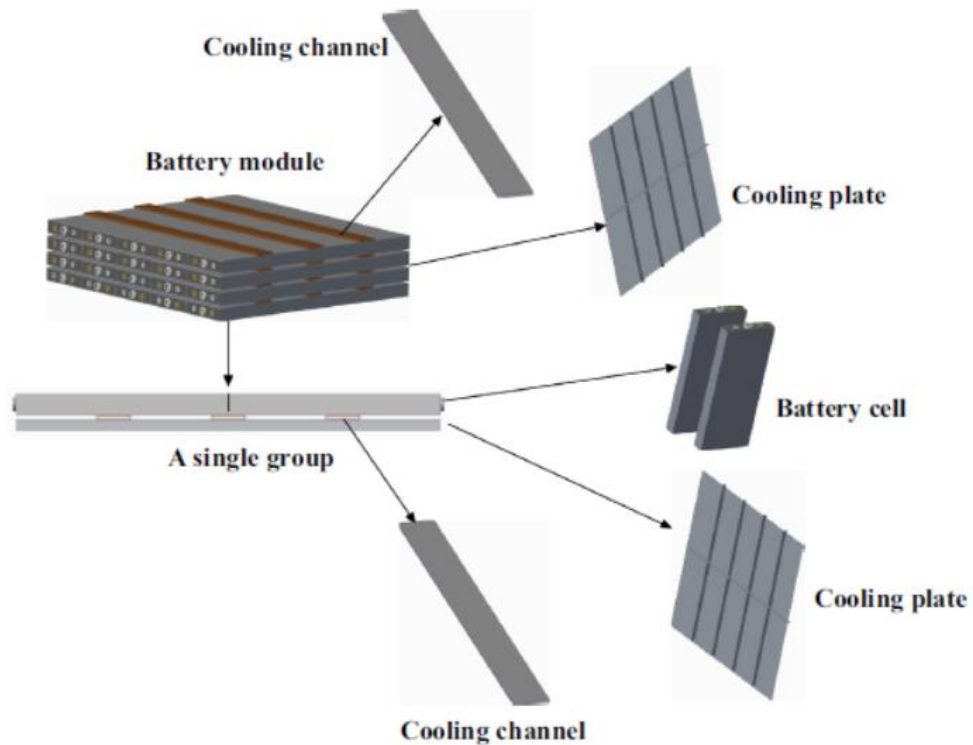




ภาพประกอบ 27 แสดงโมเดลการทดลองของ Tan

ที่มา: (Tan et al., 2018, pp. 145-157)

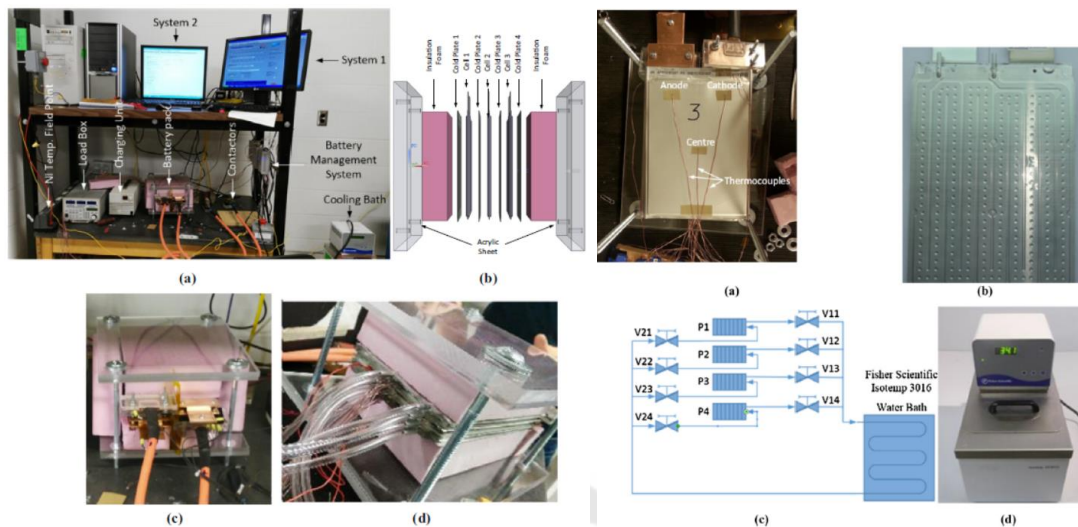
(E et al., 2018, pp. 508-520) ทำการวิเคราะห์การระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนด้วยของเหลว โดยศึกษาจากพารามิเตอร์ 4 ตัวแปร ได้แก่ ความยาวท่อ(L) ความสูงท่อ(H) อัตราการไหล(V) และจำนวนท่อ(M) ของสารหล่อเย็น และแบบจำลอง 16 แบบ  $L_{16}(4^4)$  ผลที่ได้พบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ  $M > V > L > H$  และได้สรุปปัจจัยที่ส่งผลหลักคือจำนวนท่อกับอัตราการไหลของสารหล่อเย็น ส่วนปัจจัยรองคือความยาวท่อกับความสูงท่อ พร้อมทั้งกล่าวว่าสามารถประยุกต์ใช้วิธีเหล่านี้เพื่อตอบโจทย์ปัญหาที่หลากหลายได้



ภาพประกอบ 28 แสดงโมเดลการทดลองของ Jiaqiang E

ที่มา: (E et al., 2018, pp. 508-520)

(Malik, Dincer, Rosen, Mathew, & Fowler, 2018, pp. 472-481) ได้ทำการทดสอบการระบายของแบตเตอรี่ด้วยของเหลว โดยได้ทดสอบกับแบตเตอรี่ลิเทียม  $\text{LiFePO}_4$  ขนาด 20Ah จำนวน 3 แบตเตอรี่ โดยต่อแบบอนุกรม และทดลองการคายประจุทางไฟฟ้าที่ 1C 2C 3C และ 4C โดยสารทำความเย็นที่ใช้ในระบบระบายความร้อนได้ผ่านแผ่นความเย็นที่อุณหภูมิ 10 20 30 และ 40 องศาเซลเซียส พร้อมอ่านอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล 18 ชิ้น ผลการทดลองที่ได้สารทำความเย็นที่ 30 องศาเซลเซียสสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ทั้ง 4 แบบของการคายประจุทางไฟฟ้า และการทดลองที่อัตราการคายประจุ 1C กระแส 19.11Ah ทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงสุดที่ 40 องศาเซลเซียส

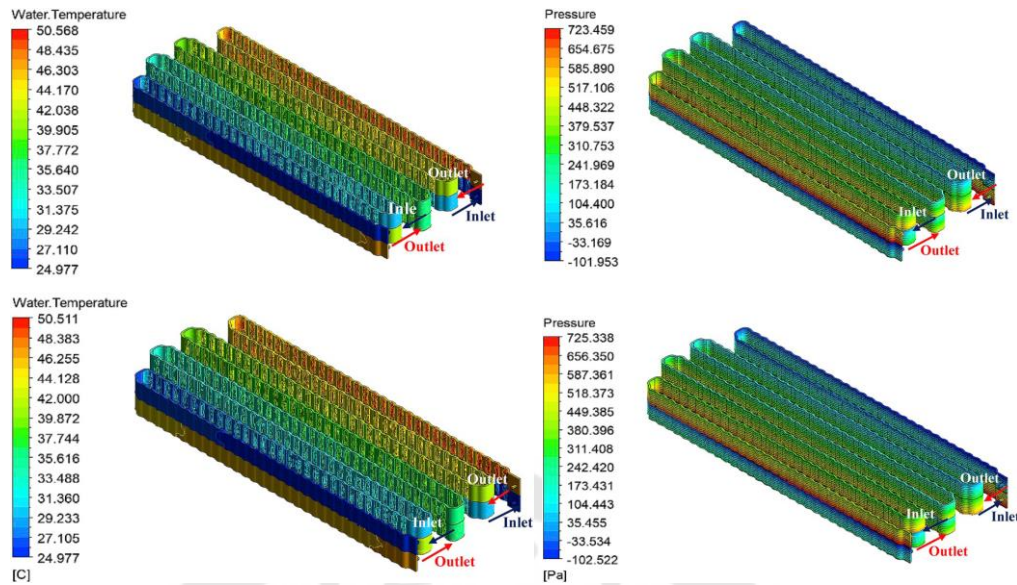


ภาพประกอบ 29 แสดงโมเดลการทดลองของ Malik

ที่มา: (Malik et al., 2018, pp. 472-481)

(Jarrett & Kim, 2014, pp. 644-655) ได้ทำการทดลองออกแบบแผ่นระบายความร้อนของแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้สารหล่อเย็นเป็นของเหลวในการระบายความร้อน และได้ศึกษาอิทธิพลของความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ อุณหภูมิเฉลี่ย และความดันตกคร่อม โดยใน 3 ตัวแปรนี้ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมามีผลกระทบมากที่สุดในเรื่องนี้การทำงาน การกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อนที่ป้อนในระบบ และอัตราการไหลของสารหล่อเย็น และยังศึกษาการกระจายตัวของความร้อนจากแบตเตอรี่โดยเสนอว่าการพิจารณาว่าความร้อนคงที่ช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลทำได้ง่ายขึ้น

(Wiriyasart, Hommalee, Sirikasemsuk, Prurapark, & Naphon, 2020, pp. 1-11) ได้ศึกษาวิธีการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า เพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งกำหนดรูปแบบการทดสอบไว้ 3 แบบ คือการไหลทางเดียว การไหลสวนทาง และการไหลแบบขนาน โดยผลที่ได้คือการไหลแบบสวนทางสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 28.65% และได้แนะนำการใช้ของไหลนำมาใช้เป็นสารหล่อเย็นในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนให้กับโมดูลของแบตเตอรี่อีกด้วย



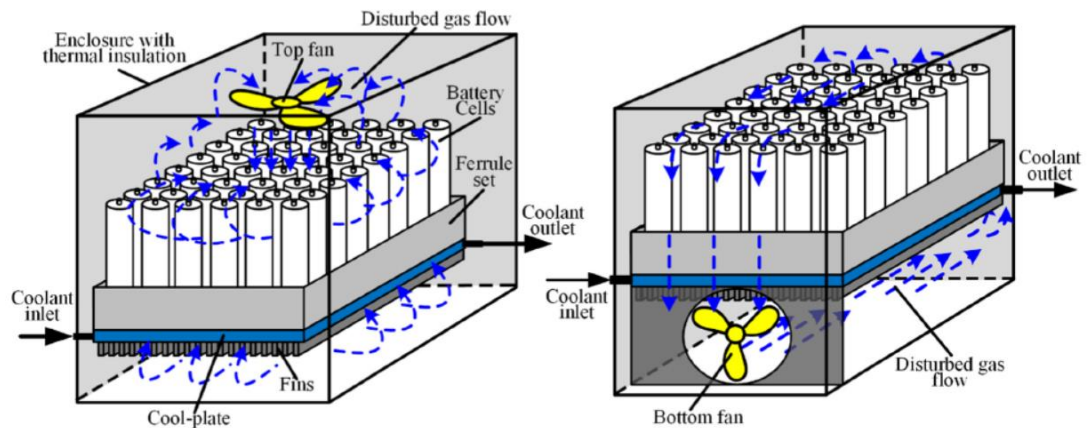
ภาพประกอบ 30 แสดงโมเดลการทดลองของ Wiriyasart

ที่มา: (Wiriyasart et al., 2020, pp. 1-11)

### 2.3.4 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศร่วมกับของเหลว

(S. Wang et al., 2017, pp. 929-939) ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยก๊าซเย็นไหลแบบบังคับ ร่วมกับของเหลวเย็น และวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณเพื่อหาก๊าซเย็นที่ไหลแบบบังคับ โดยความปั่นป่วนของก๊าซเย็นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อน พร้อมกับเทียบวิธีระบายความร้อนแบบสุญญากาศ โดยแบตเตอรี่นั้นได้สร้างความร้อนภาพรวมไว้ที่ 576 วัตต์ และระบบดังกล่าวสามารถทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงได้ 3.45 องศาเซลวิน และอุณหภูมิมีความแตกต่าง 3.88 องศาเซลวิน ในขณะที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น 2.46 องศาเซลวิน ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดี

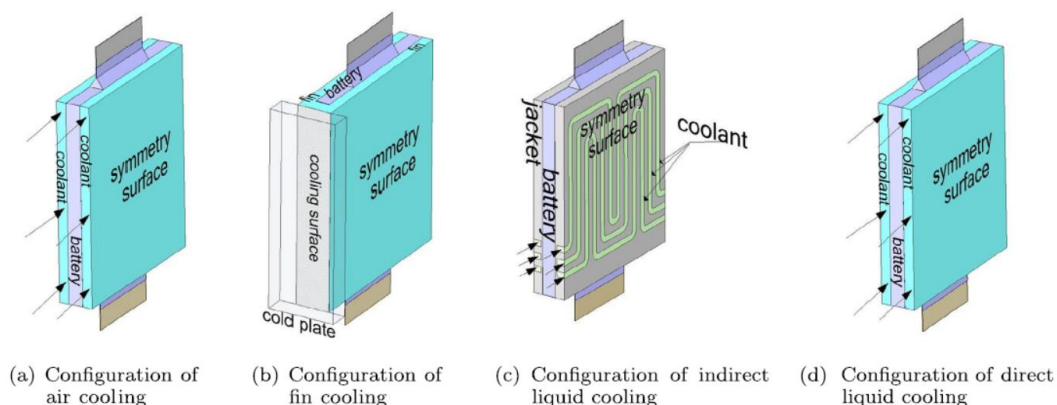




ภาพประกอบ 31 แสดงโมเดลการทดลองของ S. Wang

ที่มา: (S. Wang et al., 2017, pp. 929-939)

(D. Chen, Jiang, Kim, Yang, & Pesaran, 2016, pp. 846-854) ทำการศึกษาการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเพื่อรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 15 องศาเซลเซียส ถึง 35 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีต่างๆ 4 แบบคือการระบายความร้อนด้วยอากาศ การระบายความร้อนด้วยครีระบายความร้อน การระบายความร้อนด้วยของเหลวแบบทางตรง และการระบายความร้อนด้วยของเหลวแบบทางอ้อม โดยศึกษาจากพลังงานที่ใช้ในการระบายความร้อน อุณหภูมิสูงสุด ผลต่างของอุณหภูมิของแฉะเซลล์ และน้ำหนักระบบ ซึ่งผลการทดลองและการวิเคราะห์โดย ANSYS/Fluent พบว่าอากาศใช้พลังงานมากกว่าแบบอื่น 2 ถึง 3 เท่า ส่วนแบบครีระบายความร้อนทำให้ระบบการระบายความร้อนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40% ส่วนการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ดีที่สุด แม้ว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะน้อยกว่าแบบระบายด้วยของเหลวทางตรง แต่ก็น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมได้เสนอเสนอว่าสามารถนำไปใช้งานจริงได้

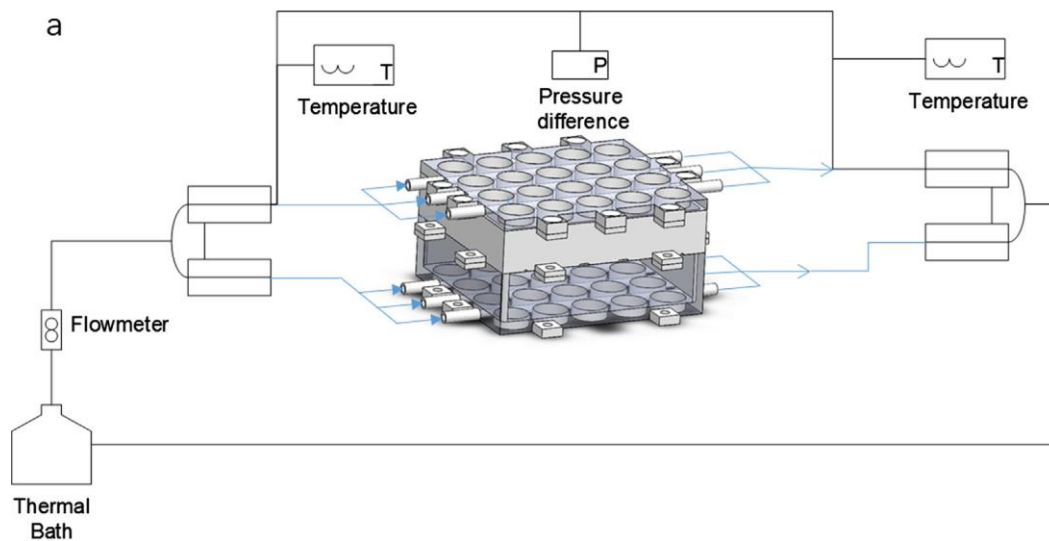
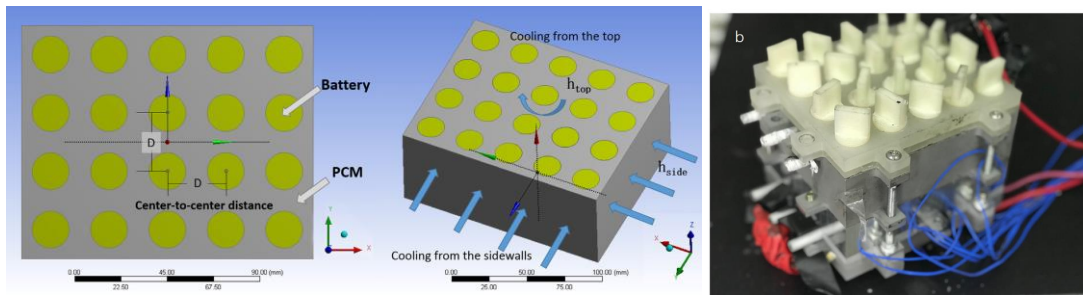


ภาพประกอบ 32 แสดงโมเดลการทดลองของ D. Chen

ที่มา: (D. Chen et al., 2016, pp. 846-854)

### 2.3.5 ระบบการระบายความร้อนด้วยวิธีการเปลี่ยนสถานะ PCM

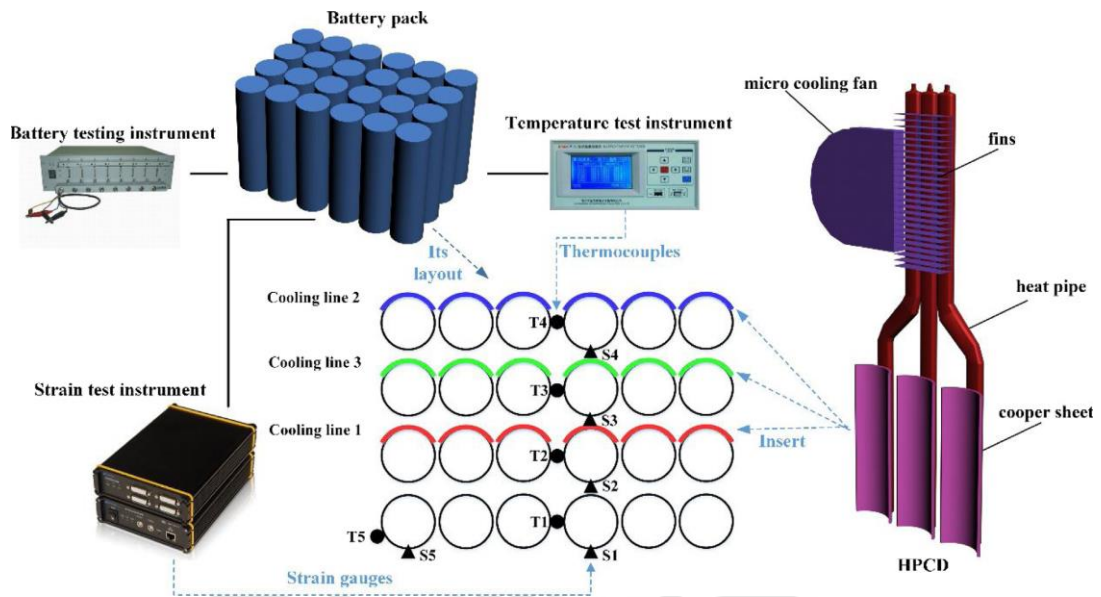
(Ling et al., 2018, pp. 777-788) ได้ประยุกต์อุปกรณ์แบบผสมที่รวมการระบายความร้อนแบบการเปลี่ยนสถานะของวัสดุ (phase change materials: PCM) กับกราไฟท์แบบขยาย (expanded graphite: EG) ซึ่งแสดงถึงวิธีที่ดีในการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ แต่ระบบมีน้ำหนักมาก โดยในการทดลองนี้เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดจากผลการแสดงของผิวสัมผัส (response surface methodology: RSM) และแบบจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนเชิงตัวเลข เพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดและปริมาตรของระบบจัดการความร้อน ซึ่งระบบที่ปรับเพื่อความเหมาะสมแล้วช่วยประหยัดมวลของ PCM ถึง 94.1% และเพิ่มปริมาณได้มากถึง 55.6% โดยผลที่ได้นำมาตรวจสอบกับการทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองโมดูลแบตเตอรี่ที่มีจำนวนแบตเตอรี่ 20 ก้อน ทดสอบการคายประจุที่ 1.5C อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 37.0 องศาเซลเซียส และความแตกต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบแบบผสมนี้มีประสิทธิภาพสูงในการระบายความร้อน น้ำหนักเบาและโครงสร้างเรียบง่ายเมื่อเทียบกับระบบที่มีการระบายความร้อนด้วยน้ำธรรมดา



ภาพประกอบ 33 แสดงโมเดลการทดลองของ Ling

ที่มา: (Ling et al., 2018, pp. 777-788)

(L. Feng et al., 2018, pp. 84-92) ได้ทำการทดลองการจัดการแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด 18650 ด้วยฮีทไปป์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร จำนวน 3 ท่อฮีทไปป์ ทดลองโดยการอัดและคายประจุที่ 0.5C และ 1C พร้อมทั้งสรุปว่าการคายประจุที่ 1C มีอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งวิธีฮีทไปป์สามารถลดอุณหภูมิจาก 53.3 องศาเซลเซียส เหลือ 17.5 องศาเซลเซียส ความเครียดสูงสุดลดลง 75% และกล่าว่วิธีฮีทไปป์นี้เป็นวิธีที่ใช้พลังงานน้อย



ภาพประกอบ 34 แสดงโมเดลการทดลองของ L. Feng

ที่มา: (L. Feng et al., 2018, pp. 84-92)

## 2.4 สรุปจากการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่าปัญหาของแบตเตอรี่ลิเทียมที่นักวิจัยกล่าวถึงส่วนมากจะมุ่งเน้นเรื่องความปลอดภัยจากความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุ การคายประจุ รวมถึงอุบัติเหตุต่างๆ จนเกิด TR หรือความร้อนที่เกินกว่าช่วงอุณหภูมิทำงานที่ 25 – 40 องศาเซลเซียส และเรื่องอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยในการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถใช้อากาศ หรือของเหลวในการระบายความร้อน ตลอดจนการใช้สารหล่อเย็นที่เปลี่ยนสภาพได้ (PCM) ซึ่งมีทั้งการทดลองและการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งการระบายความร้อนด้วยของเหลวจะควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดี รวมถึงการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถทำนายรูปแบบและช่วยลดค่าใช้จ่ายรวมถึงเวลาในการทดลอง แต่การทดลองจะสามารถศึกษาพฤติกรรมต่างๆ และผลที่เป็นรูปธรรม ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจึงเกิดเป็นแนวทางในการออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยของไหล ซึ่งได้กำหนดของไหล 2 ชนิดคือน้ำและของไหลผสมรวมถึงเลือกรูปแบบการไหลแบบไหลสวนทางในแต่ละด้านเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและอาจจะต่อยอดรูปแบบต่างๆ ต่อไป เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสม หรือดีที่สุดในการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



### บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 3.1 สมการหลักของแบบจำลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการไหลของของไหล ในวิธีการจำลองแบบเฟสเดียวมีสมมติฐานจากของเหลวและอนุภาคนาโนที่แขวนลอย อยู่ในสถานะสมดุลความร้อน และมีการไหลแบบราบเรียบทั้ง 3 มิติ และในการไหลมีความเร็วเท่ากัน คุณสมบัติทางกายภาพของความร้อนคงที่ และความหนืดมีการกระจายตัวเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบสมการควบคุมทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{V}) = 0 \quad (18)$$

สมการโมเมนตัม

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{W}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho_m \mathbf{g} \quad (19)$$

สมการพลังงาน

$$\nabla \cdot (\rho_m V C_m T) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (20)$$

สมการความหนาแน่นของของไหลนาโน

$$\rho_m = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (21)$$

สมการความหนืดของของไหลนาโน

$$\mu_m = (1 + 2.5\phi) \mu_w \quad (22)$$

สมการความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_w \quad (23)$$

สมการการนำความร้อนของของไหลนาโน

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + 2\phi(k_w - k_p)} \right] k_w \quad (24)$$

โดยที่

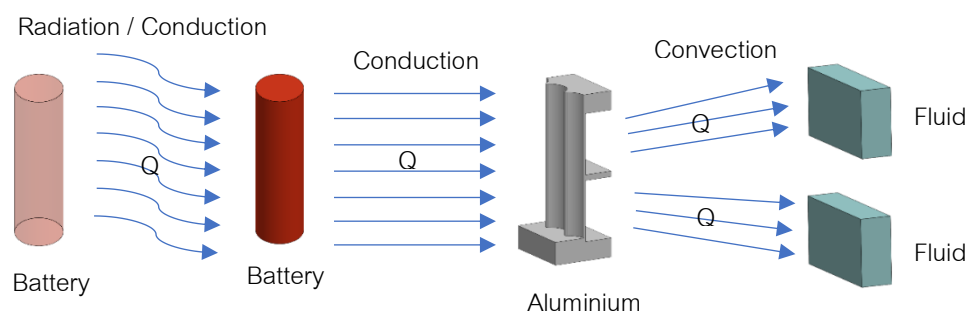
$\rho_m$  คือ ความหนาแน่นของของไหลนาโน ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคนาโน ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$\rho_w$	คือ ความหนาแน่นของของไหลพื้นฐาน ( $g \cdot cm^{-3}$ )
$\phi$	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคนาโน
$\mu_m$	คือ ค่าความหนืดของของไหลนาโน (Pa.S)
$\mu_w$	คือ ค่าความหนืดของของไหลพื้นฐาน (Pa.S)
$(\rho c_p)_{nf}$	คือ ความร้อนจำเพาะของของไหลนาโน ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$(\rho c_p)_p$	คือ ความร้อนจำเพาะของอนุภาคนาโน ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$(\rho c_p)_w$	คือ ความร้อนจำเพาะของของไหล ( $Jg^{-1}K^{-1}$ )
$k_{nf}$	คือ การนำความร้อนของของไหลนาโน ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ )
$k_p$	คือ การนำความร้อนของอนุภาคนาโน ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ )
$k_w$	คือ การนำความร้อนของน้ำหล่อเย็น ( $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ )

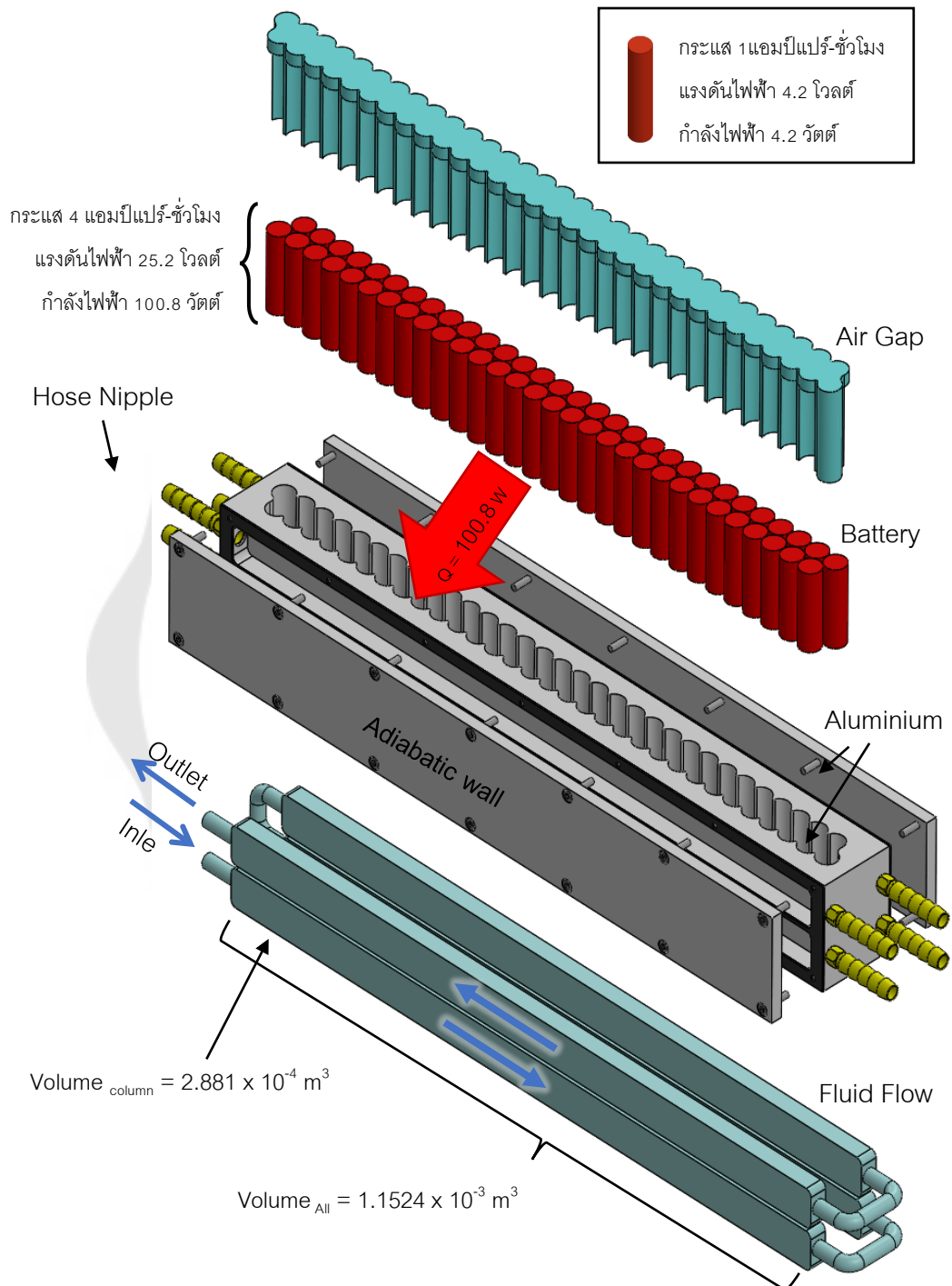
### 3.2 เจ็อนไซขอบเขต

ระบบระบายความร้อนด้วยของไหลเฟอโรโรนัน ได้ออกแบบชุดทดสอบระบบระบายความร้อนให้รองรับกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจำนวน 60 ก้อน โดยการวางสลัฟพื้นปลาเป็นแถวยาวและอยู่ชิดกัน ซึ่งอาจจะส่งผลให้ความร้อนที่เกิดจากแบตเตอรี่ส่งผ่านถึงกันได้ และในชุดทดสอบระบบระบายความร้อนได้ออกแบบให้มีช่องการไหลของสารหล่อเย็นอีก 4 ช่อง แบ่งเป็นด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งในแต่ละด้านนั้นจะแบ่งช่องการไหลออกเป็นส่วนบนและส่วนล่างของตำแหน่งแบตเตอรี่ เพื่อรองรับการนำความร้อนผ่านชุดทดสอบระบบระบายความร้อนและพาความร้อนไปยังของไหลที่ไหลผ่านช่องทางการไหลของสารหล่อเย็นด้านในชุดทดลองซึ่งมีรูปแบบการไหลในรูปแบบต่างๆ โดยมีรูปแบบการถ่ายเทความร้อนดังภาพประกอบที่ 35

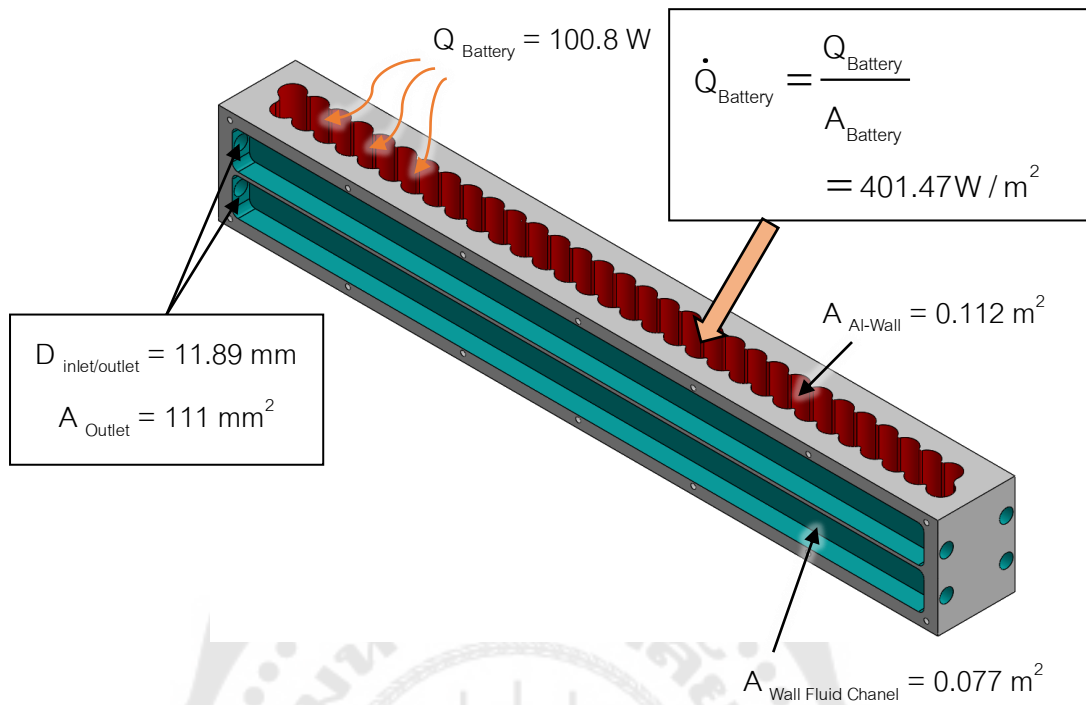


ภาพประกอบ 35 แผนภาพแสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่

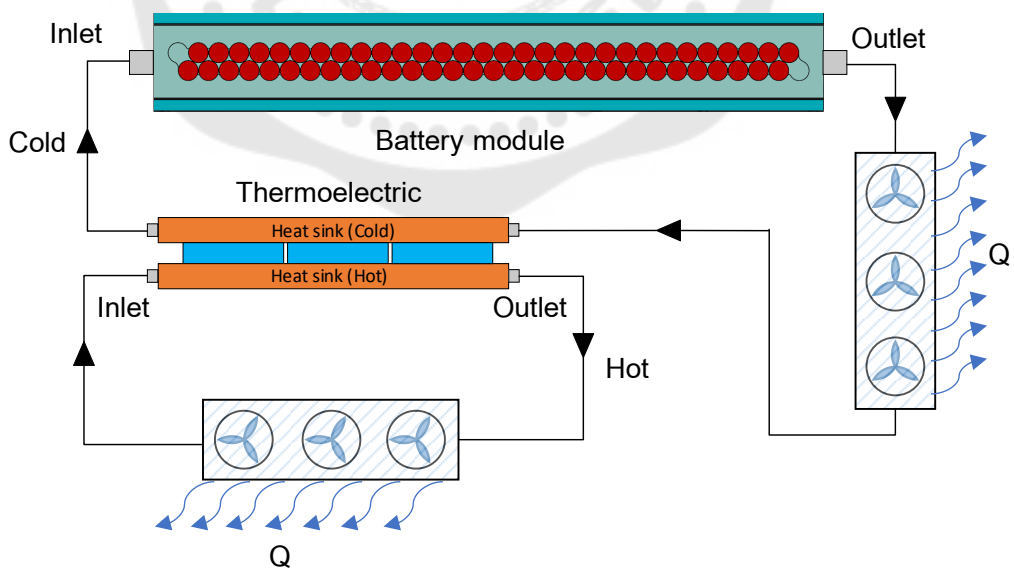
### ชุดระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมด้วยของเหลวหล่อเย็น



ภาพประกอบ 36 แสดงรูปแบบโครงสร้างของชุดระบายความร้อน



ภาพประกอบ 37 แสดงองค์ประกอบของชุดทดสอบระบบระบายความร้อน ระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมด้วยสารหล่อเย็น



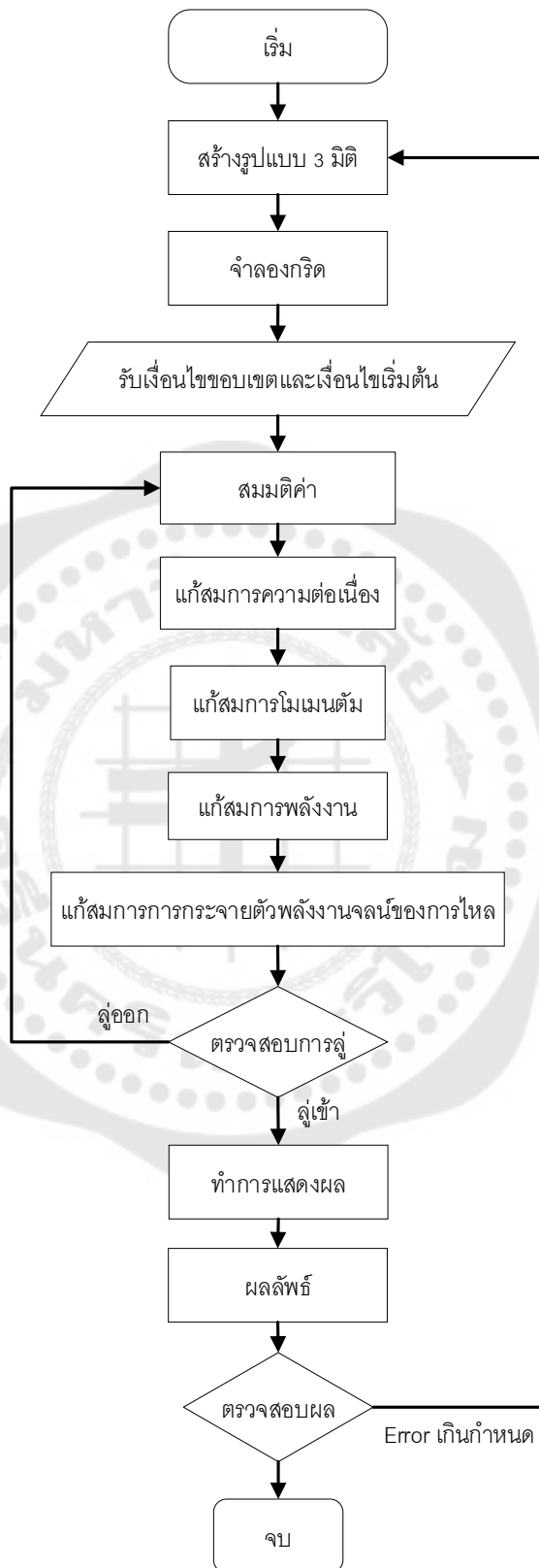
ภาพประกอบ 38 ระบบของไหลในการระบายความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่

### 3.3 วิธีการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อทดลองระบบการระบายความร้อนภายใต้สภาวะ ตัวแปร และพารามิเตอร์เดียวกัน เพื่อหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของแบตเตอรี่แต่ละรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็น ซึ่งได้ทดสอบบนกริดของคำตอบที่โหนด และเอลิเมนต์ ขนาดต่างๆ โดยกำหนดให้น้ำเป็นสารหล่อเย็นทางเข้ามีอัตราการไหล  $0.02 \text{ m/s}$  อุณหภูมิหน้า 25 องศาเซลเซียส ส่วนทางออกเป็นการทดสอบแบบความดัน กำหนดให้ความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่ทดสอบที่ฟลักซ์ความร้อน  $401.47 \text{ W/m}^2$  ซึ่งเป็นข้อมูลจากการพิจารณาที่แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุด  $4.2 \text{ โวลต์ / ก้อน}$  และหากแบตเตอรี่ที่ทดสอบ  $60 \text{ ก้อน}$  โดยต่อวงจร 6S10P ได้โมดูลแบตเตอรี่  $V = 4.2 \times 6 = 25.2 \text{ โวลต์}$  แบตเตอรี่มีพื้นที่ผิวทั้งหมด  $0.004 \text{ m}^2 / \text{ก้อน}$  ทำการทดลองที่กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย  $4 \text{ แอมป์}$  จะเป็นการทดลองที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด  $P = IV = 4 \times 25.2 = 100.8 \text{ วัตต์ / โมดูล}$  และ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดขึ้นของแบตเตอรี่ทั้งโมดูลจากการทดลองมีค่าเท่ากับ  $100.8 / 0.004 = 401.47 \text{ W/m}^2$

เงื่อนไขการทดลองด้วยวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยโปรแกรม Flow Simulation ของ Solidworks นั้น จำเป็นต้องกำหนดขอบเขต และเงื่อนไขให้สัมพันธ์กับปัญหา เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

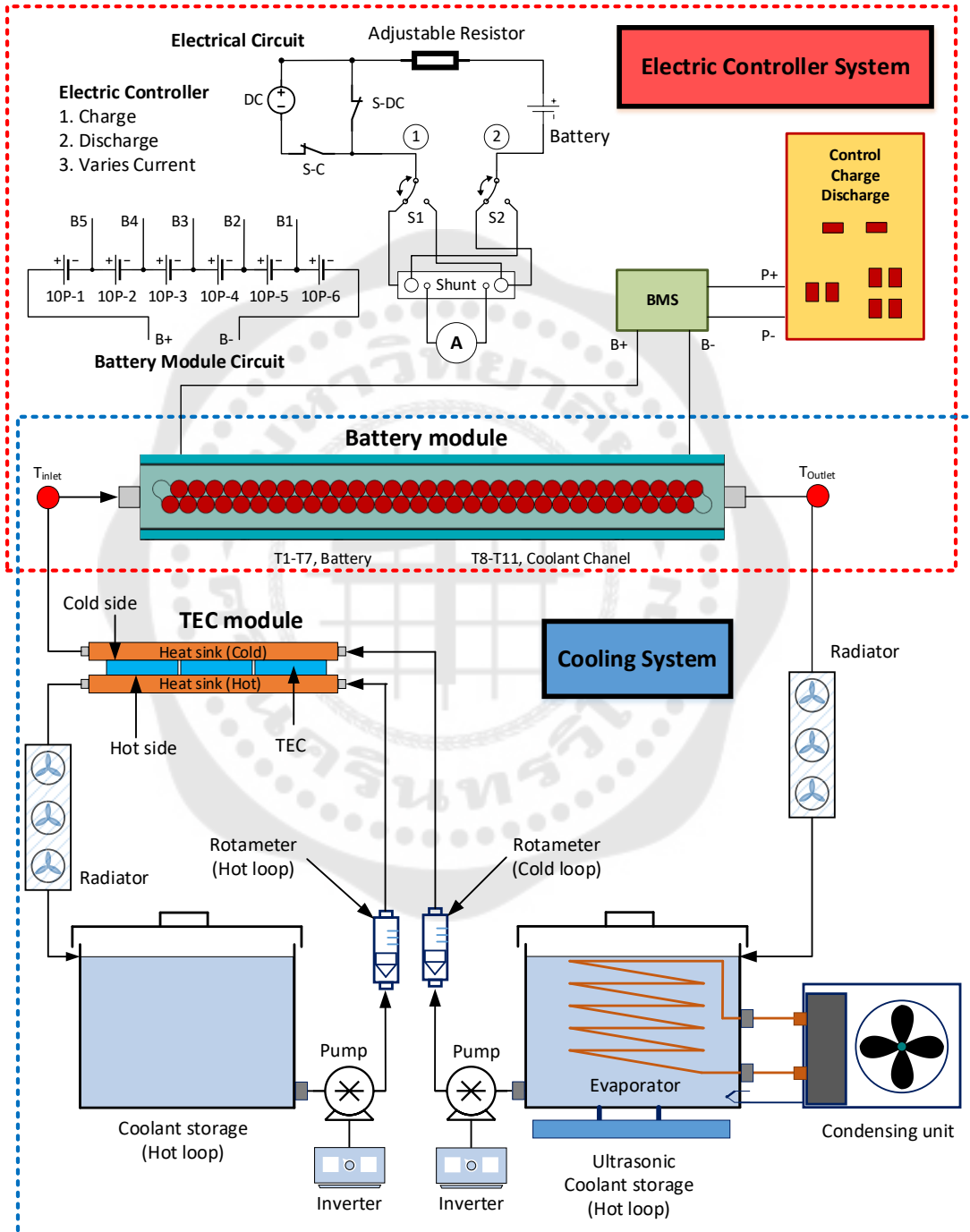
1. กำหนดค่าแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใส่  $-9.81 \text{ m/s}^2$  ตามรูปแบบการวางโมเดล ทำให้ค่าแรงโน้มถ่วงอยู่ในแนวแกน Y
2. ใช้สมการพลังงาน
3. กำหนดรูปแบบการไหลเป็นแบบราบเรียบ
4. กำหนดวัสดุของไหลเป็นน้ำสถานะเป็นของเหลว
5. ของไหลขาเข้ามีอุณหภูมิ  $25 \text{ องศาเซลเซียส}$  ด้วยความเร็ว  $0.02 \text{ m/s}$
6. ของไหลขาออก กำหนดให้เป็นแบบ Pressure Outlet
7. ฟลักซ์ความร้อน มีค่า  $401.47 \text{ W/m}^2$
8. กำหนดให้เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Coupled
9. เศษตกค้าง ตั้งค่าไว้ที่  $1 \times 10^{-6}$
10. การวนซ้ำ  $15,000 \text{ รอบ}$  หรือจนกว่าค่าเศษตกค้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 39 แผนภาพแสดงลำดับขั้นตอนการแก้สมการแบบจำลองคณิตศาสตร์

# บทที่ 4

## การออกแบบอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง



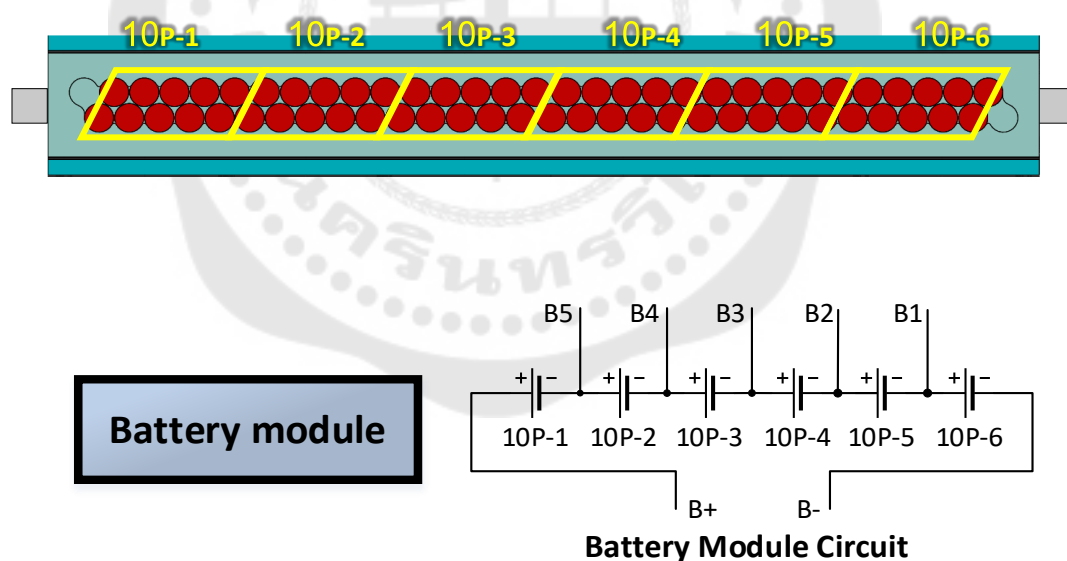
ภาพประกอบ 40 แผนภาพระบบการจัดการความร้อนในโมดูลแบตเตอรี่



#### 4.1 แผนภาพระบบการทำงาน

โดยระบบการจัดการความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่ในการทดลองนั้น สามารถแบ่งเป็นระบบใหญ่ๆ ได้ 2 ระบบ คือ

- 4.1.1 ระบบจำลองการใช้งานโมดูลแบตเตอรี่
    - 4.1.1.1 ระบบวงจรโมดูลแบตเตอรี่ 6S10P
    - 4.1.1.2 ระบบวงจรไฟฟ้า และการควบคุมการอัดประจุ / คายประจุ
  - 4.1.2 ระบบการจัดการความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่
    - 4.1.2.1 ระบบระบายความร้อนด้านโมดูลแบตเตอรี่
    - 4.1.2.2 ระบบระบายความร้อนด้านเทอร์โมอิเล็กทริก
    - 4.1.2.3 ระบบสนามแม่เหล็กกรณีระบายความร้อนด้วยของไหลเฟอร์โร
- 4.1.1 ระบบจำลองการใช้งานโมดูลแบตเตอรี่
- 4.1.1.1 ระบบวงจรไฟฟ้าโมดูลแบตเตอรี่ 6S10P

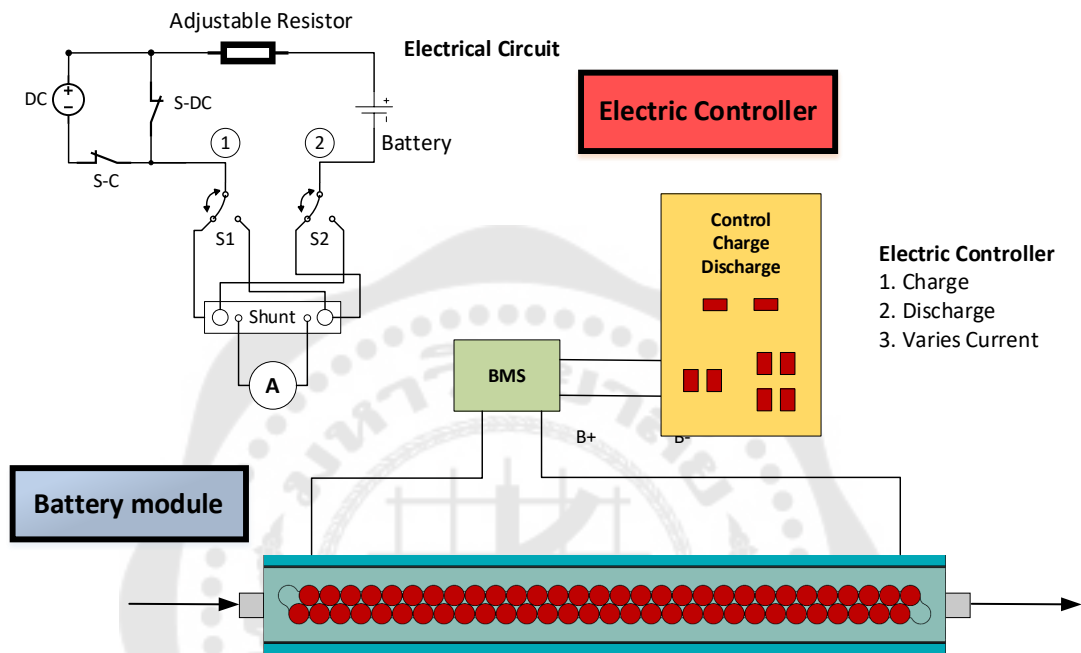


ภาพประกอบ 41 แผนภาพวงจรไฟฟ้าของโมดูลแบตเตอรี่

จากภาพประกอบ 41 วงจรของโมดูลแบตเตอรี่ 6S10P เป็นการต่อวงจรแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 แรงดันไฟฟ้า 3.7 โวลต์ กระแส 3 แอมป์ แบบขนานจำนวน 10 ก้อน เพื่อให้ได้กระแสที่เพียงพอต่อการทดลองที่ 30 แอมป์ ทั้งหมด 6 ชุด แล้วนำแต่ละชุดมาทำการต่อวงจรไฟฟ้า

แบบอนุกรม เพื่อให้ได้แรงดันที่ต้องการในการทดลองที่ 24 โวลต์ และวงจรที่ได้มาผ่านบอร์ด BMS เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์และแบตเตอรี่เกิดความเสียหายระหว่างการทดลอง

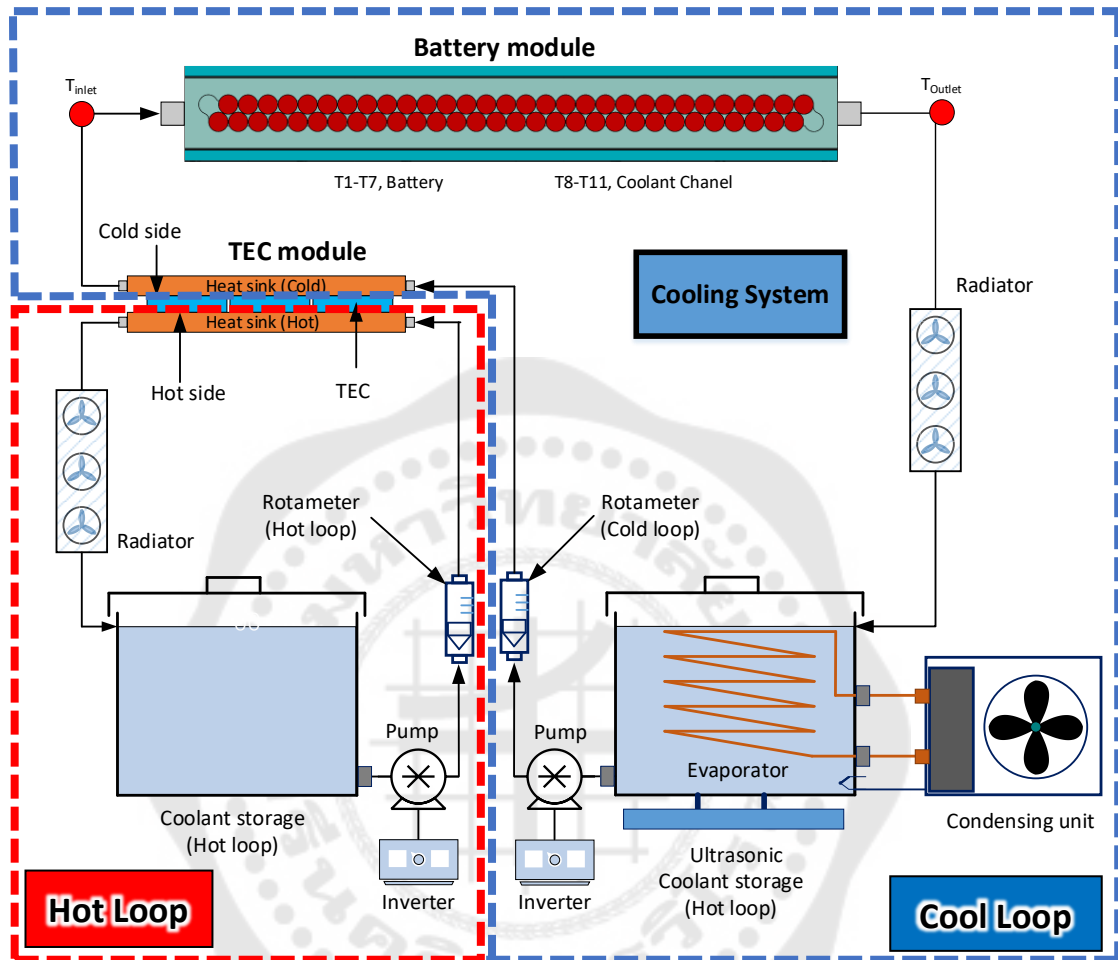
#### 4.1.1.2 ระบบวงจรไฟฟ้าในการควบคุมการอัดประจุ และคายประจุ



ภาพประกอบ 42 วงจรไฟฟ้าในการควบคุมระบบอัดประจุ และคายประจุ

จากภาพประกอบ 42 วงจรไฟฟ้าที่ทำการทดลองนั้นสามารถปรับกระแสได้ตามต้องการ ภายในช่วงการใช้งานของอุปกรณ์ แต่ไม่สามารถปรับแรงดันได้ และในตู้ควบคุมไฟฟ้ามีอุปกรณ์ในการอ่านค่าความจุของแบตเตอรี่ แรงดันของแบตเตอรี่ แรงดัน และกระแสที่ทดลอง

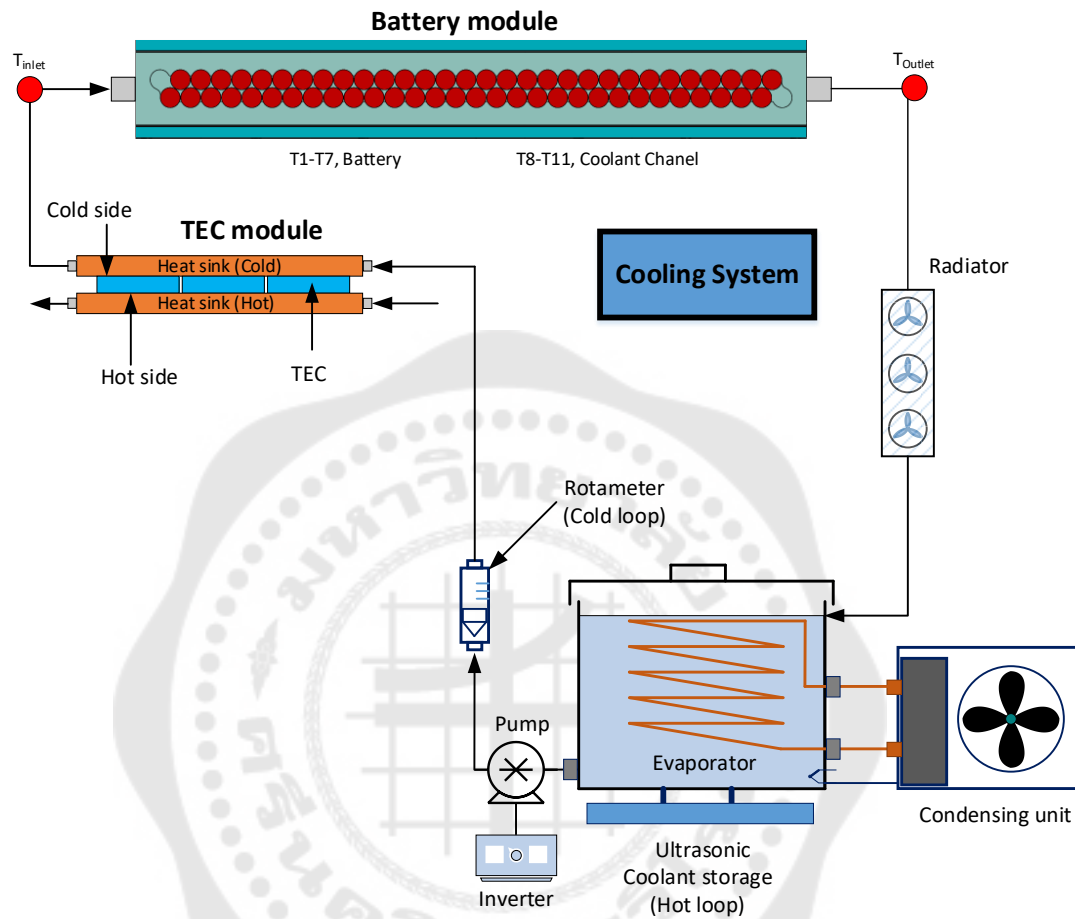
#### 4.1.2 ระบบการจัดการความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่



ภาพประกอบ 43 แผนภาพแสดงระบบการจัดการความร้อนที่ใช้ในการทดลอง

จากภาพประกอบ 43 การจัดการความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่จะประกอบด้วยระบบการระบายความร้อนหลักๆ อยู่ 2 ระบบได้แก่ ระบบของสารหล่อเย็นในการระบายความร้อนด้านโมดูลแบตเตอรี่ และระบบของสารหล่อเย็นในการระบายความร้อนด้านเทอร์โมอิเล็กทริก

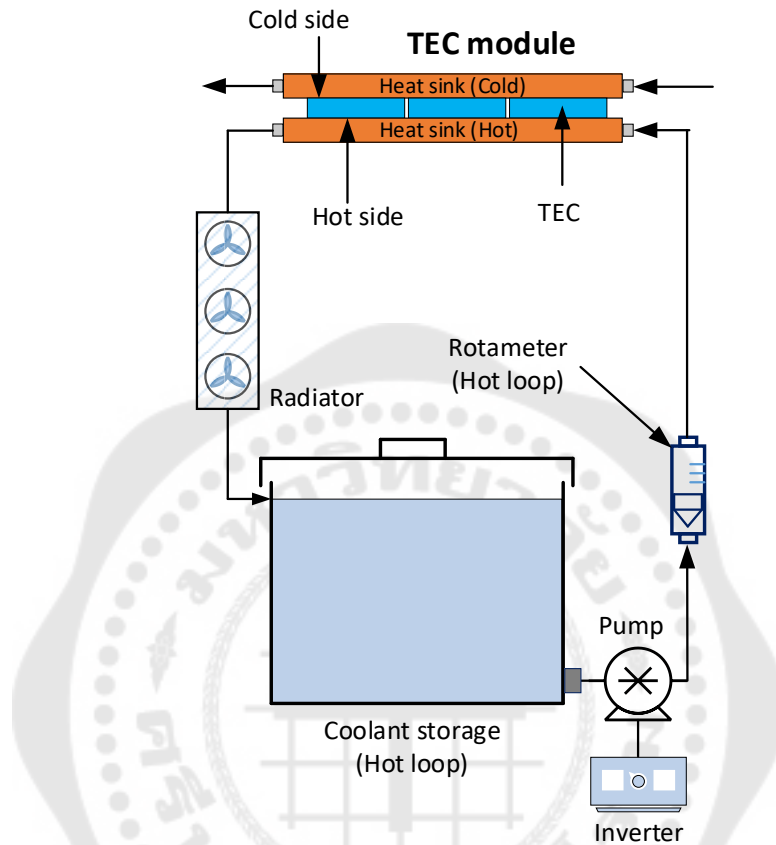
#### 4.1.2.1 ระบบระบายความร้อนด้านโมดูลแบตเตอรี่ (Cool Loop)



ภาพประกอบ 44 แผนภาพแสดงระบบระบายความร้อนด้านโมดูลแบตเตอรี่

จากภาพประกอบ 44 การระบายความร้อนด้านโมดูลแบตเตอรี่ จะมีอยู่ 2 รูปแบบคือการระบายความร้อนด้วยน้ำ (ใช้ถังน้ำเย็นปกติ) และการระบายความร้อนกรณีใช้น้ำเติมสารละลายนาโน (ใช้ถังน้ำเย็นที่มีระบบอัลตราโซนิก)

#### 4.1.2.2 ระบบระบายความร้อนด้านเทอร์โมอิเล็กทริก (Hot Loop)



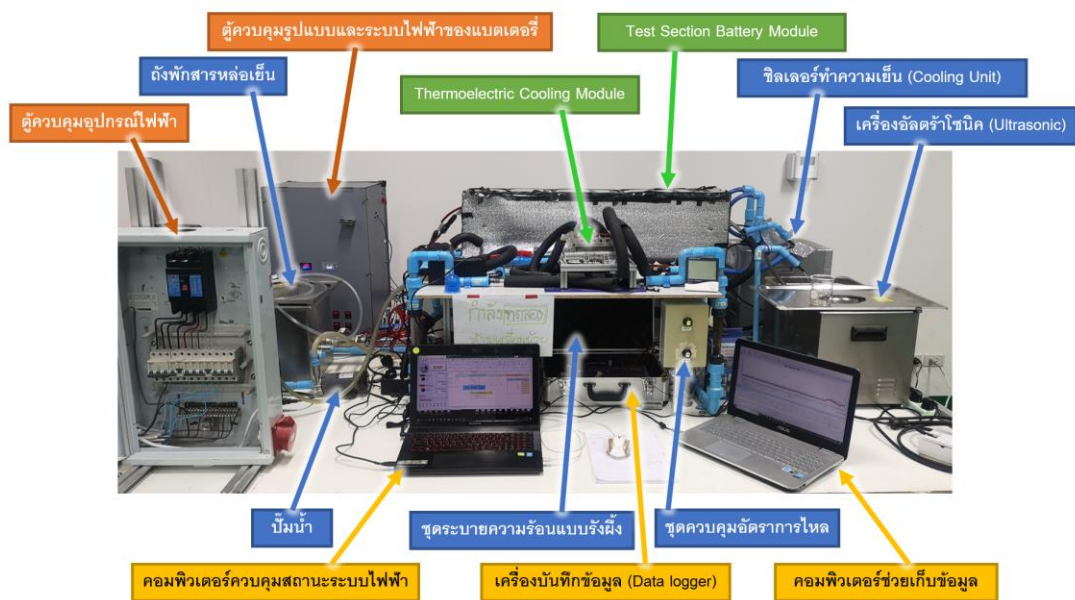
ภาพประกอบ 45 แผนภาพแสดงระบบระบายความร้อนด้านเทอร์โมอิเล็กทริก

ในระบบระบายความร้อนที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริกนั้นจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น จากนั้นผ่านชุดระบายความร้อน แล้วจึงปล่อยน้ำลงในถังพักน้ำก่อนนำมาใช้ซ้ำ

## 4.2 การออกแบบอุปกรณ์การทดลอง

ในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้น ได้แบ่งรายละเอียดเป็นข้อๆ ดังนี้

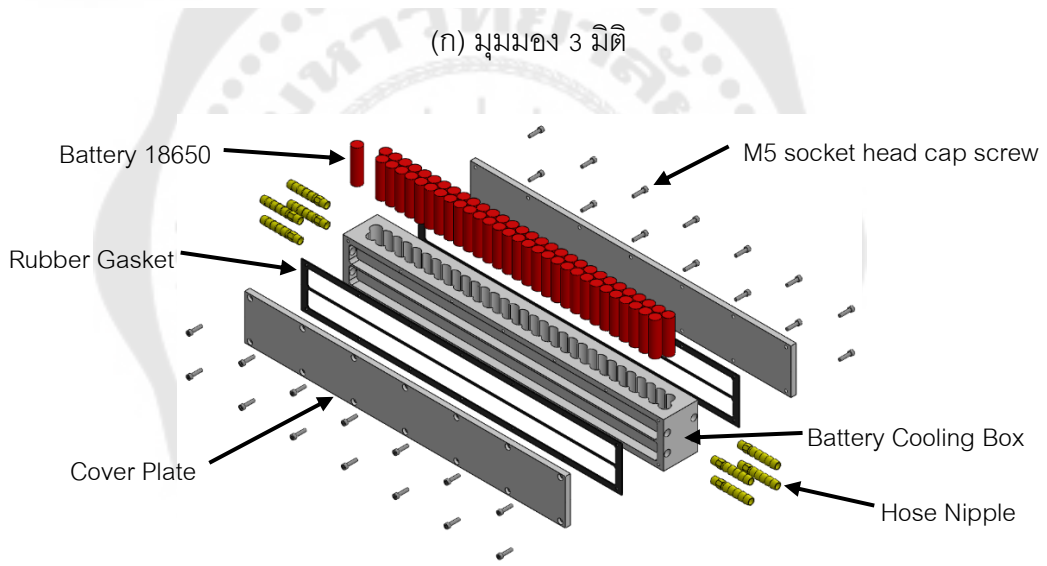
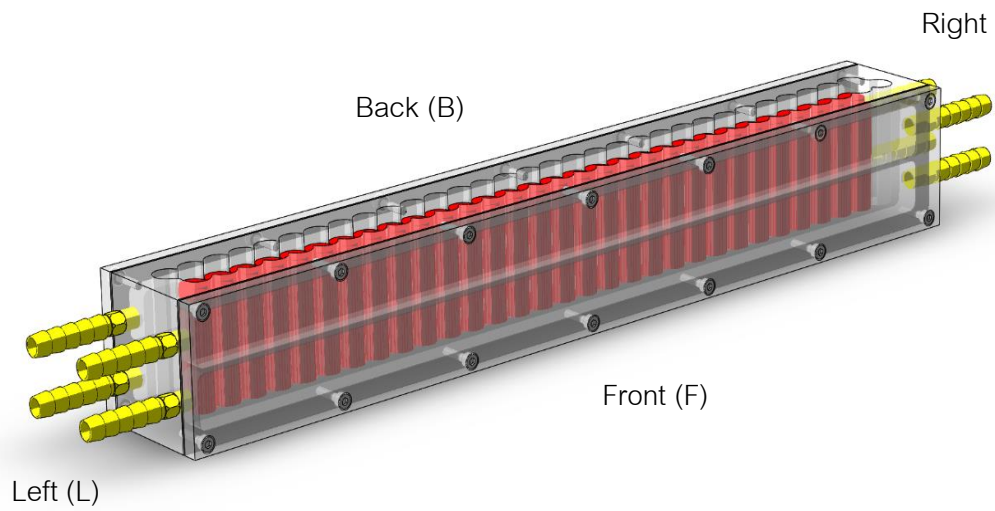
- 4.2.1 ชุดทดสอบระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่
- 4.2.2 การออกแบบระบบโมดูลแบตเตอรี่
- 4.2.3 การออกแบบตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า
- 4.2.4 ตำแหน่งตรวจสอบอุณหภูมิของโมดูลแบตเตอรี่
- 4.2.5 ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่



ภาพประกอบ 46 ชุดทดสอบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

### 4.2.1 ชุดทดสอบระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่

ในการกำหนดรูปแบบโมเดลสำหรับการทดลองระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น ได้ออกแบบชุดทดสอบระบบระบายความร้อนที่ทำมาจากอลูมิเนียมสำหรับติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียม 18650 จำนวนทั้งสิ้น 60 ก้อน โดยมีช่องสำหรับให้สารหล่อเย็นระบายความร้อนของแบตเตอรี่ทั้งหมด 4 ช่อง ซึ่งจะสามารถประยุกต์รูปแบบการไหลภายในชุดทดลองได้ซึ่งมีรูปแบบดังภาพประกอบที่ 47



(ข) แสดงภาพองค์ประกอบของชุดทดลอง



(ค) แสดงภาพหน้าตัดทางซ้าย (Left) และทางขวา (Right)

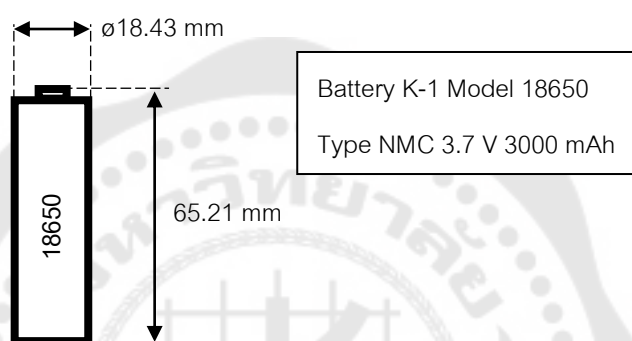
ภาพประกอบ 47 ชุดทดสอบระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่



## 4.2.2 การออกแบบระบบโมดูลแบตเตอรี่

### 4.2.2.1 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดทรงกระบอก 18650 ของ K-1 Model 18650 มีแรงดัน 3.7 V และกระแส 3000 mAh ต่อ 1 ก้อน มีมาตรฐาน มอก.2217-2548 (มาตรฐานเซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่มีอิเล็กโทรไลต์แอลคาไลน์หรืออิเล็กโทรไลต์อื่นที่ไม่ใช่กรด-เซลล์และแบตเตอรี่ทุติยภูมิระบบลิเทียม สำหรับการใช้งานแบบพกพา) ภาพประกอบ 48



ภาพประกอบ 48 แบตเตอรี่ K-1 Model 18650 3.7 V 3000 mAh

ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนี้เป็นชนิดทรงกระบอก มีระบบไฟฟ้าขั้วลบเป็น Carbon ระบบไฟฟ้าขั้วบวกเป็น Li (Co, Mn, Ni) O<sub>2</sub> จากมาตรฐานของแบตเตอรี่นั้น แบตเตอรี่นี้มีความสามารถด้านความร้อนคือ สามารถอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แบตเตอรี่ต้องไม่เกิดไฟ หรือระเบิดได้ ในการเลือกใช้งานนั้น แบตเตอรี่ จะถูกทำการตรวจสอบภาพ และทดลองการอัดและคายประจุเพื่อเป็นค่าตั้งต้นสำหรับโมดูลการทดลอง ซึ่งใช้ฟังก์ชัน Nor Test จากเครื่อง LiitoKala รุ่น Lii-500 ดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 เครื่อง LiitoKala รุ่น Lii-500

ในการทำ Nor Test mode นั้น เครื่องจะทำการอัดประจุเข้าในแบตเตอรี่จนเต็ม จากนั้นเริ่มทำการคายประจุพร้อมกับเก็บข้อมูลจนแบตเตอรี่หมด และจะอัดประจุคืนจนเต็มอีกครั้ง เป็นการจบกระบวนการทดสอบ ซึ่งในการทดสอบโดยการสูบล้อแบตเตอรี่ทั้งหมด 40 ก้อน จากทั้งหมด 100 ก้อน ได้ผลเฉลี่ยดังตารางที่ 4

ตาราง 4 ตารางแสดงข้อมูลจากการทดสอบแบตเตอรี่จำนวน 40 ก้อน

	ต่ำสุด	สูงสุด	เฉลี่ย
แรงดันไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่เต็ม (v)	3.96	4.2	4.1885
ความจุของแบตเตอรี่ (mAh)	684	1644	1283.325
ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (mR)	17	125	54.175

#### 4.2.2.2 การออกแบบโมดูลแบตเตอรี่

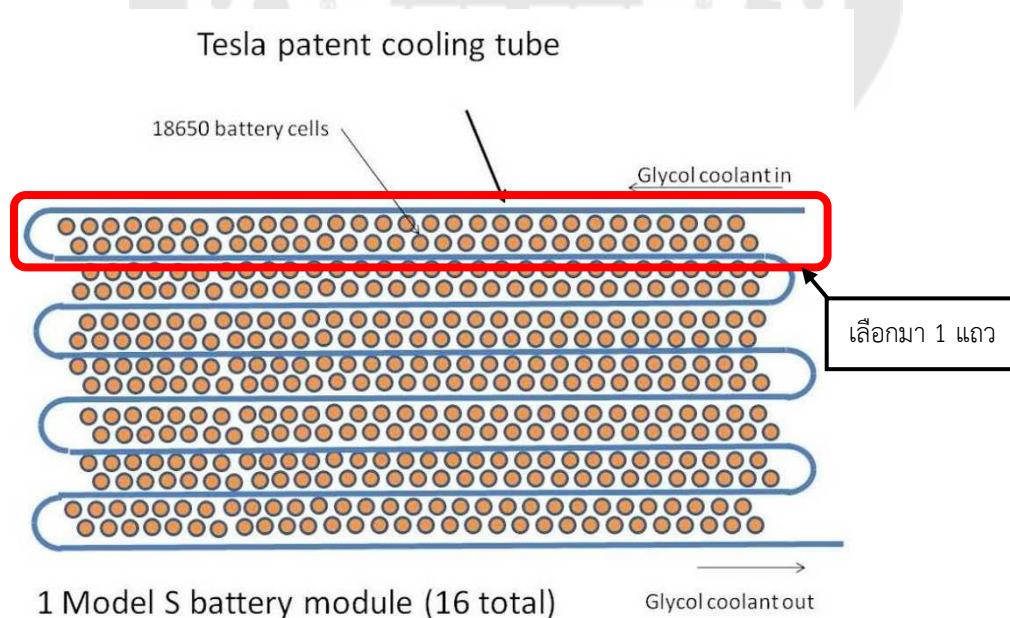
ในการออกแบบโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับการทดลองนั้น ได้อ้างอิงข้อมูลของโมดูลแบตเตอรี่ที่ใช้งานในรถไฟฟ้าเทสลาโมเดล S (6s74p) ขนาด 85 kW โดยมีแรงดันไฟในสภาวะปกติที่ 21.6v หรือ SOC 50% และมีค่า SOC 100% ที่แรงดันไฟ 25.2v กับค่า SOC 0% ที่แรงดันไฟ 18.0v ในวงจรโมดูลแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นจะเรียงตัวของแบตเตอรี่ชนิด 18650 โดยจะต่อวงจรแบบอนุกรมกัน 6 ก้อน (6s) และต่อขนานอีก 74 ชุด (74p) รวมทั้งสิ้น 444 ก้อน ดังภาพประกอบ 50



ภาพประกอบ 50 โมดูลแบตเตอรี่ของรถเทสลาโมเดลเอส

ที่มา : <http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=TeslaBattModule>

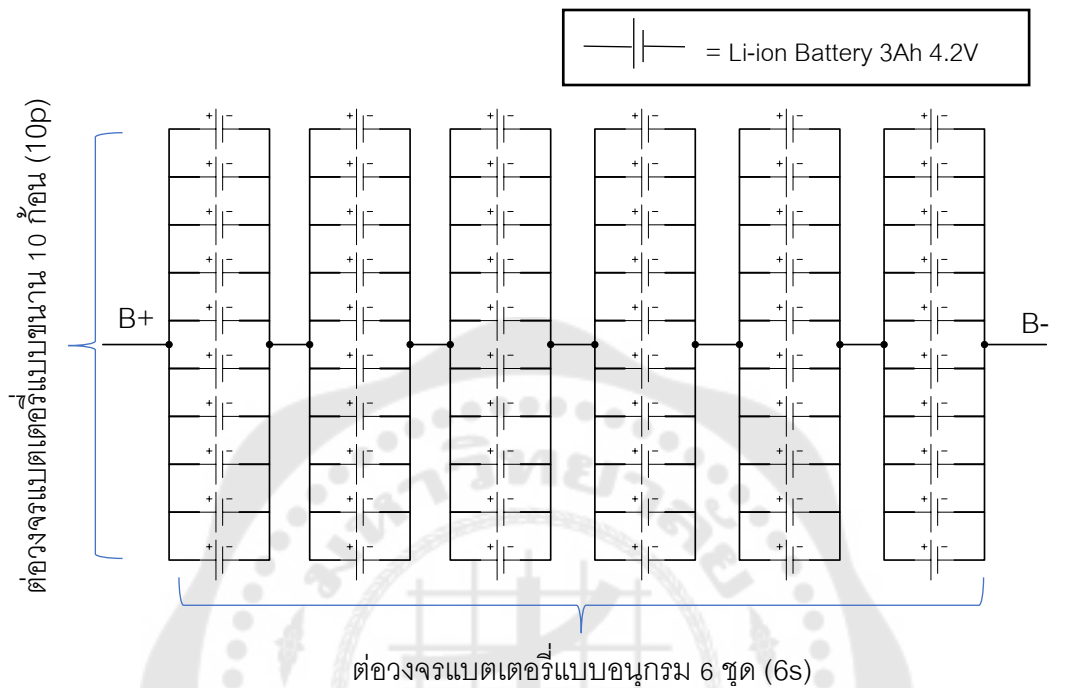
แต่ในการทดลองนั้นได้จำลองจากโมดูลมา 1 แถว (มีที่ระบายความร้อนประกบหน้าหลัง) ซึ่งมีทั้งหมด 62 ก้อน ดังภาพประกอบ 53 แต่ด้วยการรักษารูปแบบการต่อวงจรของแบตเตอรี่แบบอนุกรมกัน 6 ก้อน (6s) จะทำให้ต่อได้สูงสุด และใกล้เคียงกับโมดูลมากที่สุดจึงออกแบบไว้ที่ การต่อขนาน 10 ชุด (10p) รวมทั้งสิ้น 60 ก้อน (6s10p)



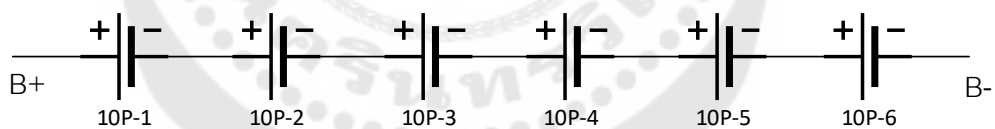
ภาพประกอบ 51 แสดงผังการจัดเรียงแบตเตอรี่ในโมดูลแบตเตอรี่รถเทสลาโมเดลเอส

ที่มา : <https://insideevs.com/news/328909/tesla-or-gm-who-has-the-best-battery-thermal-management/>

วงจรของโมดูลแบตเตอรี่ที่ออกแบบไว้ 6s10p คือต่อแบบขนานอีก 10 ก้อน และต่อแบบอนุกรม 6 ชุด รวมทั้งหมด 60 ก้อน มีรูปแบบวงจรดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 แสดงวงจรแบตเตอรี่ลิเทียมโมดูล 60 ก้อน



ภาพประกอบ 53 แสดงวงจรของแบตเตอรี่ลิเทียมโมดูลอย่างง่าย

ในการเชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่ 10 ก้อน แบบต่อขนานเพื่อให้ได้กระแสที่ 30 แอมป์ โดยใช้แผ่นนิกเกิลดังภาพประกอบ 54 เป็นตัวเชื่อมระหว่างแบตเตอรี่กับแผ่นนิกเกิล



ภาพประกอบ 54 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่กับแผ่นนิกเกิล

ในการเชื่อมต่อวงจรของแบตเตอรี่นั้น ทำการเชื่อมโดยวิธีการสปอต ด้วยเครื่อง  
ดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อวงจร

ในส่วนการเชื่อมต่อระหว่างชุดแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานทั้ง 6 ชุด มาเชื่อมต่อ  
วงจรแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันทางไฟฟ้าที่ 24 โวลต์ ได้ใช้การเชื่อมต่อโดยสายไฟทองแดงเบอร์  
8AWG ดังภาพประกอบ 56





ภาพประกอบ 56 สายไฟทองแดงเบอร์ 8AWG

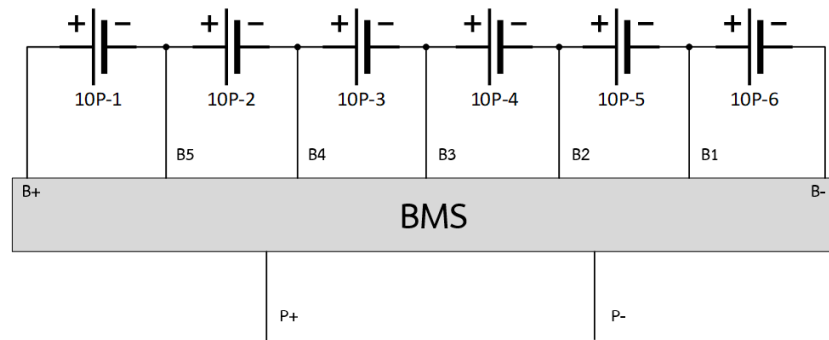
เมื่อออกแบบโมดูลแบตเตอรี่ชนิด 18650 สำหรับการทดลองแล้ว แต่ในการทดลองนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันวงจรทางไฟฟ้าไม่ให้เกิดปัญหาจากการอัด และคายประจุที่เกินกว่าแบตเตอรี่จะรับได้ โดยการติดตั้งวงจรช่วยการจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System : BMS) โดยในการเลือกอุปกรณ์ BMS นั้น ได้ทำการเลือกจากแบตเตอรี่ที่ใช้งานคือ K-1 ที่ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีค่ากระแสอยู่ที่ 3000 mAh หรือ 3 แอมป์ และโมดูลของแบตเตอรี่ทำการต่อแบบขนานที่ 10p หรือโมดูลแบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 30 แอมป์ และเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิด BMS ตัดในกรณีที่กระแสเกินกว่า 30 แอมป์ จึงเลือก BMS ขนาดที่ 6s 40a ดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 บอร์ด BMS 6s 40a

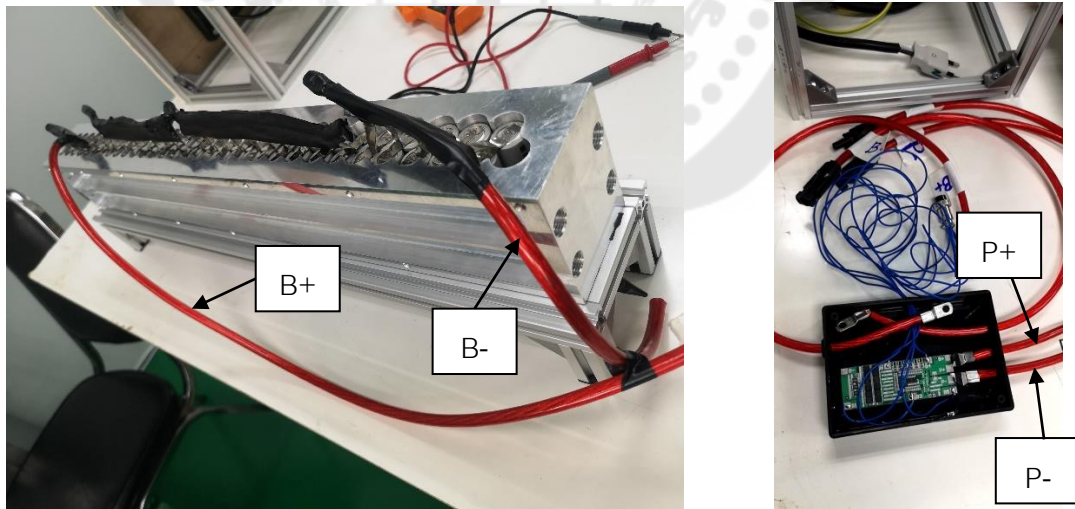


ในการต่อวงจรของโมดูลแบตเตอรี่กับบอร์ด BMS 6s 40a โดยมีจุดเชื่อมต่อกับบอร์ด 7 ตำแหน่งคือ ขั้วบวก ขั้วลบ และจุดเชื่อมต่อระหว่างชุดแบตเตอรี่ที่ต่อแบบขนานอีก 5 ตำแหน่งดังภาพประกอบ 68



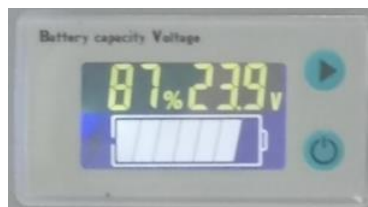
ภาพประกอบ 58 แสดงวงจรที่ต่อโมดูลแบตเตอรี่กับบอร์ด BMS

จากรูป ตำแหน่งของ P+ และตำแหน่งของ P- จะเป็นจุดต่อเพื่อทำการอัดและคายประจุ โดยสามารถใช้ในการอ้างอิงขั้วบวกลบทางไฟฟ้าได้ดังภาพประกอบ 59



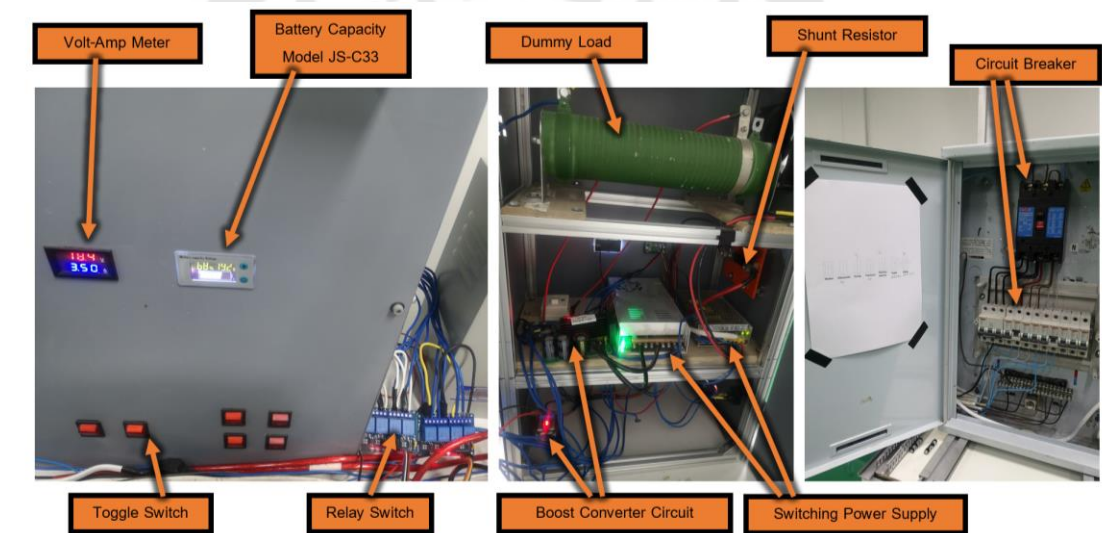
ภาพประกอบ 59 แสดงตำแหน่งของ B+, B-, P+ และ P-

ระบบไฟฟ้าของโมดูลแบตเตอรี่สามารถตรวจสอบปริมาณของแบตเตอรี่ (SOC) แรงดันทางไฟฟ้า (v) ได้จากอุปกรณ์ Battery Capacity Voltage ดังภาพประกอบ 60 โดยอุปกรณ์ ตั้งค่าแสดงผลของแบตเตอรี่ลิเทียม 6S 24 โวลต์



ภาพประกอบ 60 Battery Capacity Voltage

#### 4.2.3 การออกแบบตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า

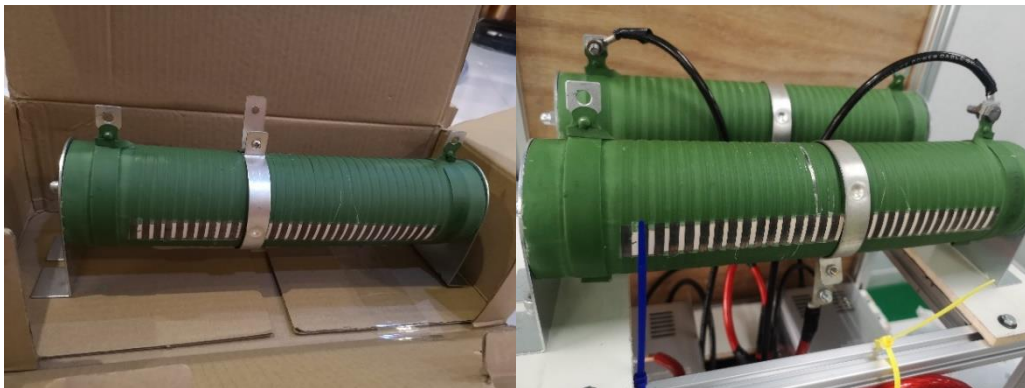


ภาพประกอบ 61 ตู้ควบคุมรูปแบบและระบบไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Electric System)

ในการออกแบบตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า ได้ใช้อุปกรณ์สำหรับการอัดประจุไฟเข้าแบตเตอรี่ เป็นสวิชชิง 24 โวลต์ 15 แอมป์ จำนวน 2 ตัวดังภาพประกอบ 63 (ก) และอุปกรณ์สำหรับระบบคายประจุไฟฟ้าใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ 1000 วัตต์ 0-5 โอห์ม จำนวน 2 ตัว ดังภาพประกอบ 62 (ข)



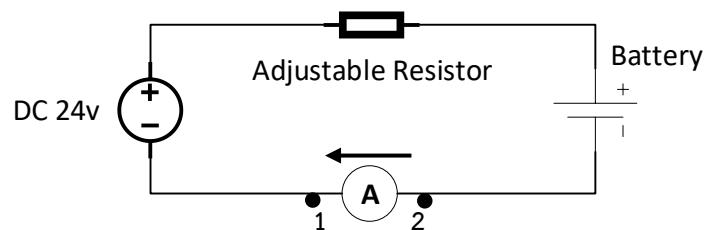
(ก)



(ข)

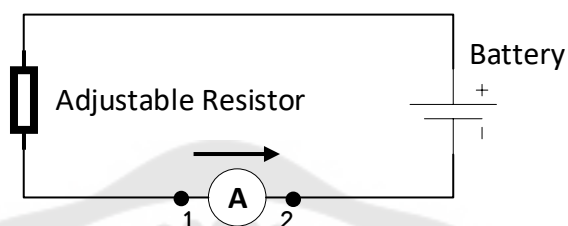
ภาพประกอบ 62 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรวัดและคายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่

ในส่วนวงจรการวัดประจุจะใช้วงจรอย่างง่าย คือจากแหล่งจ่ายสวิตซ์ซึ่งผ่านตัวต้านทานเพื่อสามารถปรับและควบคุมกระแสให้เป็นไปตามที่ต้องการ ก่อนเข้าแบตเตอรี่ และใช้โวลต์/แอมป์ มิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแส โดยมีวงจรดังภาพประกอบ 63



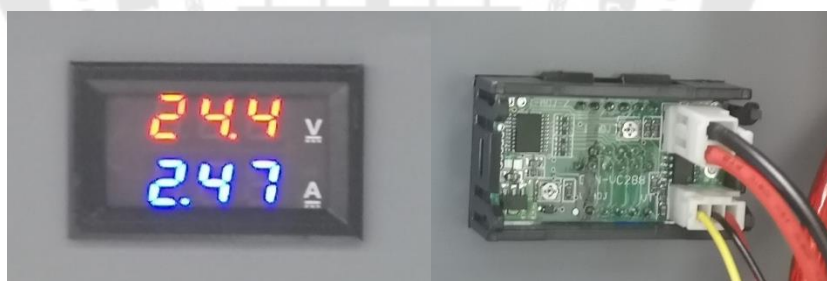
ภาพประกอบ 63 แสดงวงจรวัดประจุไฟฟ้า หรือวงจรการวัดประจุแบตเตอรี่

วงจรคายประจุไฟฟ้ ออกแบตเตอรี่ หรือระบบคายประจุไฟฟ้ ได้เลือกใช้ต้านทานแบบปรับค่าได้ 1000 วัตต์ 0-5 โอห์ม จำนวน 2 ตัว และใช้วงจรอย่างง่าย จากแบตเตอรี่จ่ายให้หลอดที่เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ เพื่อให้กระแสให้เป็นไปตามที่ต้องการ และใช้ โวลต์/แอมป์ มิเตอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแส โดยมีวงจรดังภาพประกอบ 64



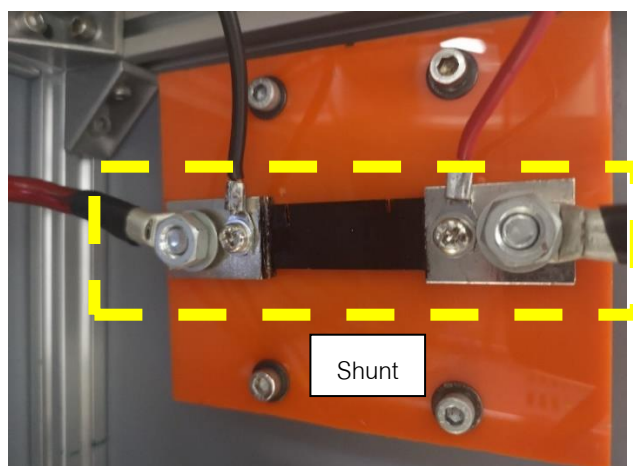
ภาพประกอบ 64 แสดงวงจรคายประจุไฟฟ้ หรือวงจรการคายประจุแบตเตอรี่

วงจรสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าของแรงดันและกระแส ได้เลือกใช้อุปกรณ์แสดงผล DC 0-100V 100A Digital Voltmeter Ammeter ดังภาพประกอบ 65



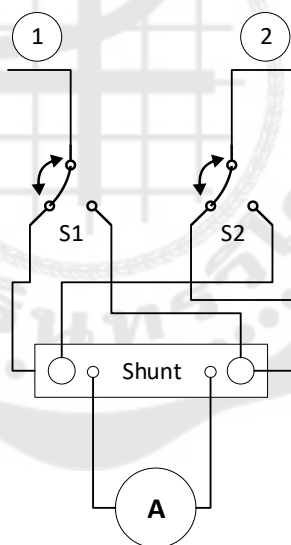
ภาพประกอบ 65 แสดงอุปกรณ์ DC 0-100V 100A Digital Voltmeter Ammeter

โดยการใช้ใช้งานนั้นสามารถใช้อุปกรณ์ร่วมกันทั้งในกรณีอัดประจุและคายประจุได้ แต่กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์วัดปริมาณทางไฟฟ้านั้นสามารถอ่านได้เพียงทิศทางเดียว จึงต้องใช้ สวิตช์กลับทางมาเสริม เพื่อให้การใช้งานสามารถอ่านค่าได้ โดยในส่วนของการวัดปริมาณกระแสของวงจร ต้องมีอุปกรณ์ช้้น (Shunt) ดังภาพประกอบ 66 เพิ่มเติมในวงจร



ภาพประกอบ 66 แสดงอุปกรณ์ชิ้น (Shunt)

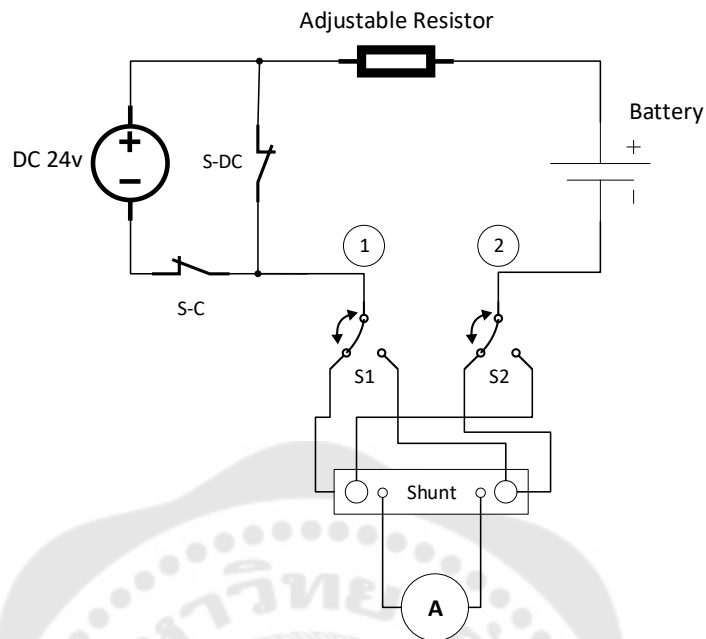
ในส่วนของอุปกรณ์วงจรวัดค่าแรงดันและกระแสนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟ 12v เพื่อเป็นไฟเลี้ยงอุปกรณ์ และในการใช้งานนั้น ได้ทำการต่อวงจรดังภาพประกอบ 67



ภาพประกอบ 67 แสดงวงจรของชิ้นที่สามารถกลับทางการไหลของกระแสได้

จากภาพประกอบ 67 หมายเลข 1 และหมายเลข 2 คือหมายเลขจุดเชื่อมต่อเข้าโวลต์แอมป์มิเตอร์ที่ปรากฏในวงจรอัดประจุ และคายประจุ จากวงจรที่กล่าวมาข้างต้นสามารถรวมวงจรเป็นระบบไฟฟ้าในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า สำหรับการอัดประจุและคายประจุได้ และเป็นวงจรของตู้ควบคุมโดยมีวงจรดังภาพประกอบ 68





ภาพประกอบ 68 แสดงวงจรของตู้ควบคุม

ตู้ควบคุมระบบอัดประจุ และคายประจุ จะมีสวิตช์ทั้งหมด 7 ตัว เพื่อควบคุมการอัดประจุ 1 สวิตช์ การคายประจุ 1 สวิตช์ กระแสที่ตั้งค่าไว้ 2 สวิตช์ พร้อมกับทิศทางของกระแส เพื่อให้แอมป์มิเตอร์อ่านค่าได้ทั้งกรณีการอัดประจุ และคายประจุ 2 สวิตช์ รวมถึงสวิตช์เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับโวลต์-แอมป์มิเตอร์ และหน้าจอแสดงผล 2 หน้าจอ ได้แก่ หน้าจอโวลต์-แอมป์มิเตอร์ และหน้าจอแสดงปริมาณความจุของแบตเตอรี่ลิเทียม ดังภาพประกอบ 69



(ด้านหน้า)

(ด้านใน)

ภาพประกอบ 69 แสดงตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าสำหรับการทดลอง



เพื่อเป็นการป้องกันความร้อนที่สูงเกินจนทำให้ระบบ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ภายในตู้ควบคุมเกิดปัญหา จึงได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศไว้ในตำแหน่งใกล้ๆ ตัวด้านทานปรับค่าได้ดังภาพประกอบ 70



ภาพประกอบ 70 แสดงพัดลมระบายอากาศของตู้ควบคุม

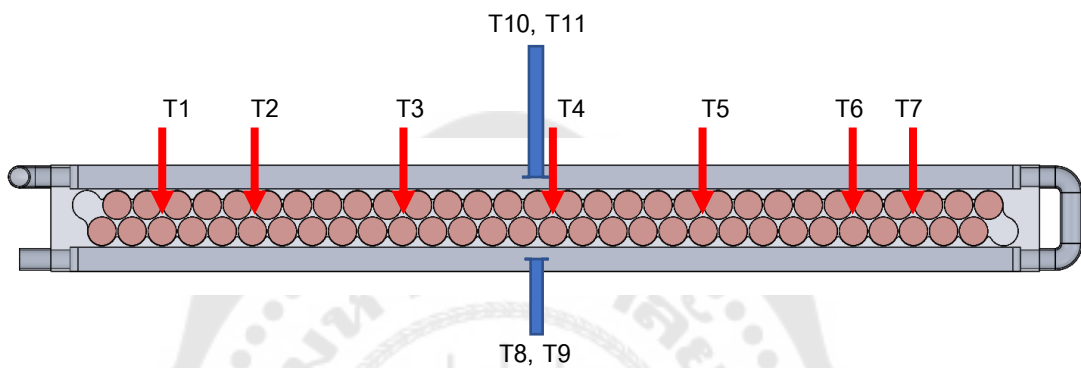
โดยในการใช้งานการอัดประจุจะทำการเปิดสวิตช์ S-C และปิดสวิตช์ S-DC เพื่อให้กระแสไหลผ่านแหล่งจ่ายไฟ ส่วนการคายประจุจะกลับกัน ส่วนสายไฟระหว่างโมดูลแบตเตอรี่กับบอร์ด BMS (B+, B-) และระหว่างตู้ควบคุมกับบอร์ด BMS (P+, P-) จะใช้ตัวต่อ MC4 Connector ดังภาพประกอบ 71 ส่วนจุดเชื่อมต่อระหว่างชุดของแบตเตอรี่กับบอร์ด BMS (B1-B5)



ภาพประกอบ 71 แสดงหัวต่อสายไฟ MC4 Connector

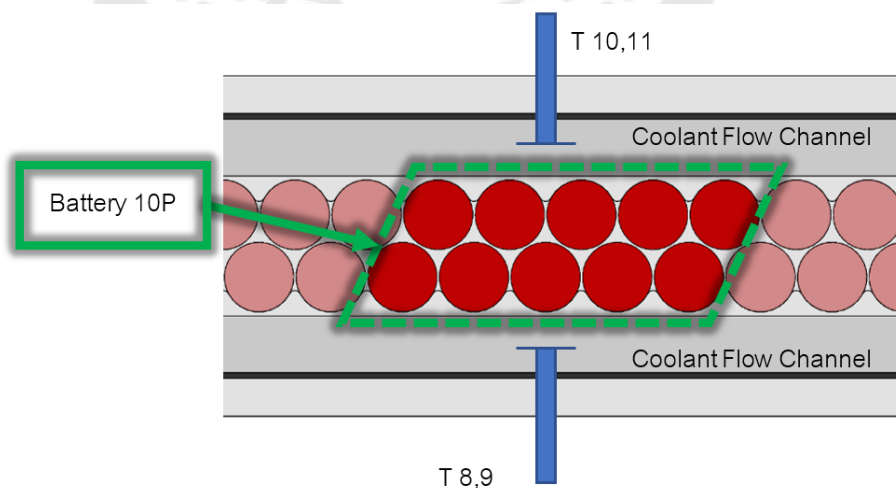
#### 4.2.4 ตำแหน่งตรวจสอบอุณหภูมิของโมดูลแบตเตอรี่

ในการทดสอบครั้งนี้ได้มีการกำหนดตำแหน่งที่บันทึกอุณหภูมิทั้งหมด 11 ตำแหน่ง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่บันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่ T1 ถึง T7 เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากแบตเตอรี่โดยตรง และส่วนที่เป็นช่องการไหลของสารหล่อเย็น โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลทั้งหมด 4 ตำแหน่ง T8 ถึง T11 ดังภาพประกอบ 72



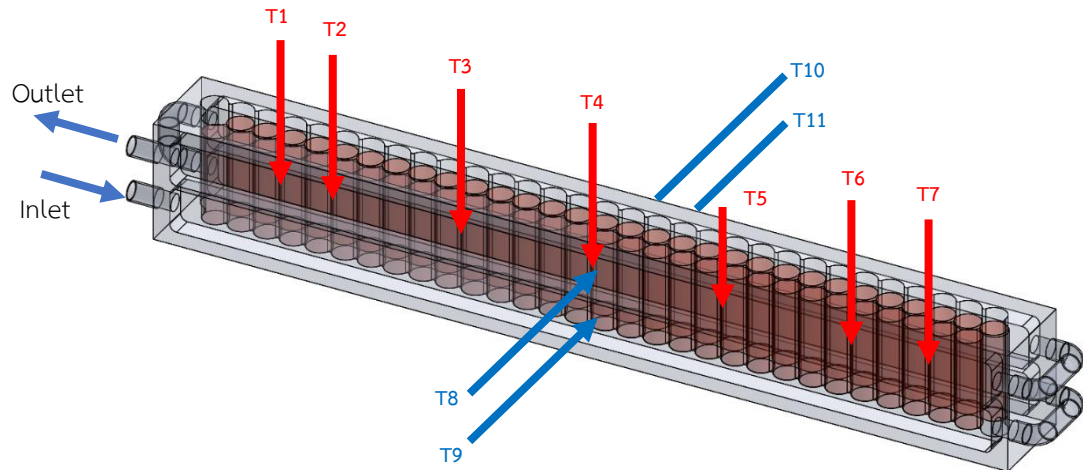
ภาพประกอบ 72 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิทั้ง 11 ตำแหน่ง มุมมองด้านบน

ตำแหน่งบริเวณช่องการไหลของสารหล่อเย็นทำการเก็บข้อมูลในระนาบเดียวกันทั้งด้านบนและด้านล่าง และทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ดังภาพประกอบ 73



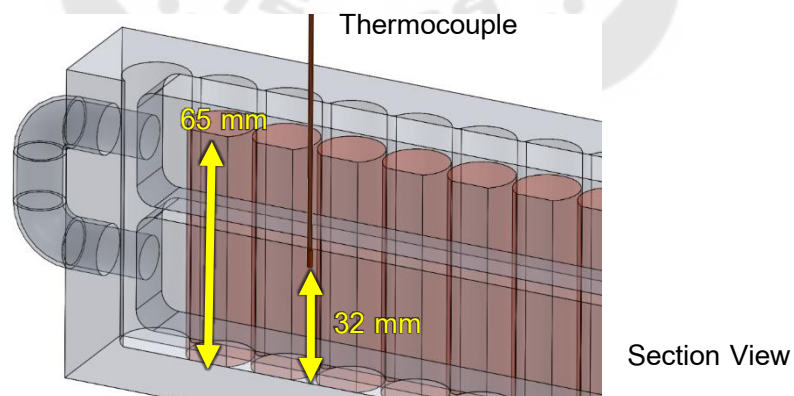
ภาพประกอบ 73 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์อ่านค่าอุณหภูมิของสารหล่อเย็น

โดยตำแหน่งที่จะทำการทดสอบและเก็บข้อมูลนั้น สารหล่อเย็นจะไหลเข้าทางด้านล่าง และไหลออกทางด้านบน และมีตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิดังภาพประกอบ 74



ภาพประกอบ 74 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิทั้งหมด 11 ตำแหน่งแบบ 3 มิติ

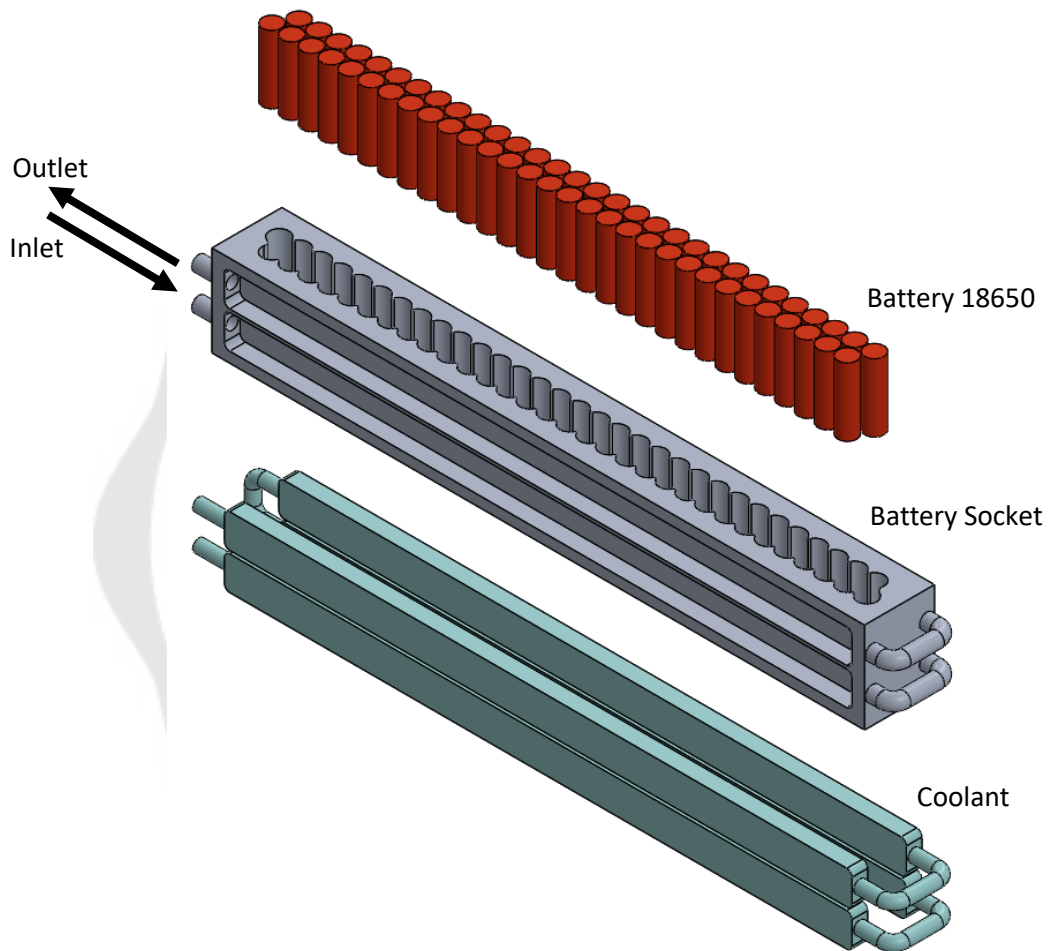
โดยตำแหน่งการวัดอุณหภูมิต่างส่วนเหล่านั้นจะใช้สายเทอร์โมคัปเปิลใส่ไว้ประมาณกึ่งกลางของแบตเตอรี่ และช่องน้ำไหลนั้นจะครอบคลุมพื้นที่ที่แบตเตอรี่สัมผัส ดังภาพประกอบ 75



ภาพประกอบ 75 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิล

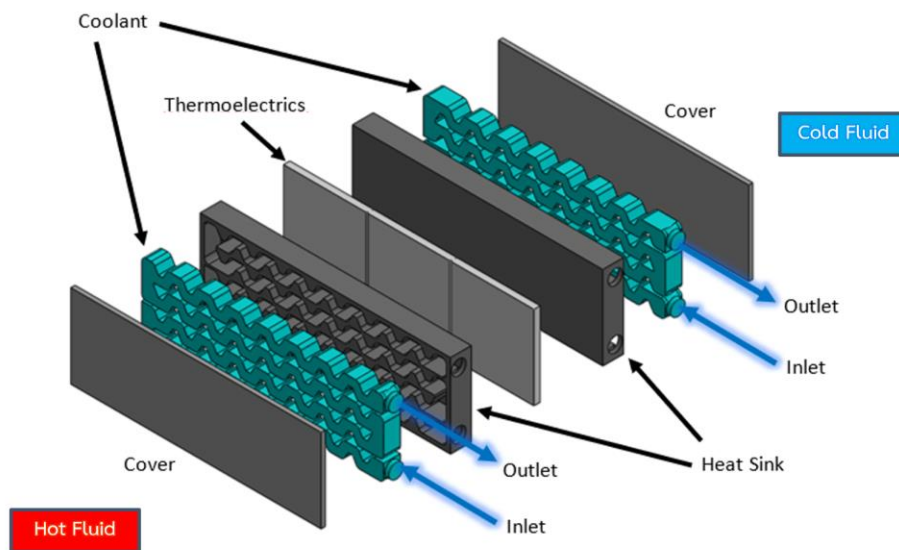
#### 4.2.5 ระบบระบายความร้อนแบตเตอรี่

ในรูปแบบของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ จะถูกนำความร้อนผ่านชุดทดสอบระบบระบายความร้อนที่ทำมาจากอลูมิเนียม ก่อนที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านช่องของสารหล่อเย็น ในรูปแบบการไหลแบบต่างๆ ดังภาพประกอบ 76



ภาพประกอบ 76 แสดงภาพองค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยน้ำ

โดยอุณหภูมิของสารหล่อเย็นทางเข้าจะไหลผ่านชุดทดลองการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (TEC) เพื่อลดอุณหภูมิทางเข้าของสารหล่อเย็น ก่อนที่จะเข้าไปในชุดระบายความร้อนของแบตเตอรี่ต่อไป ดังภาพประกอบที่ 77

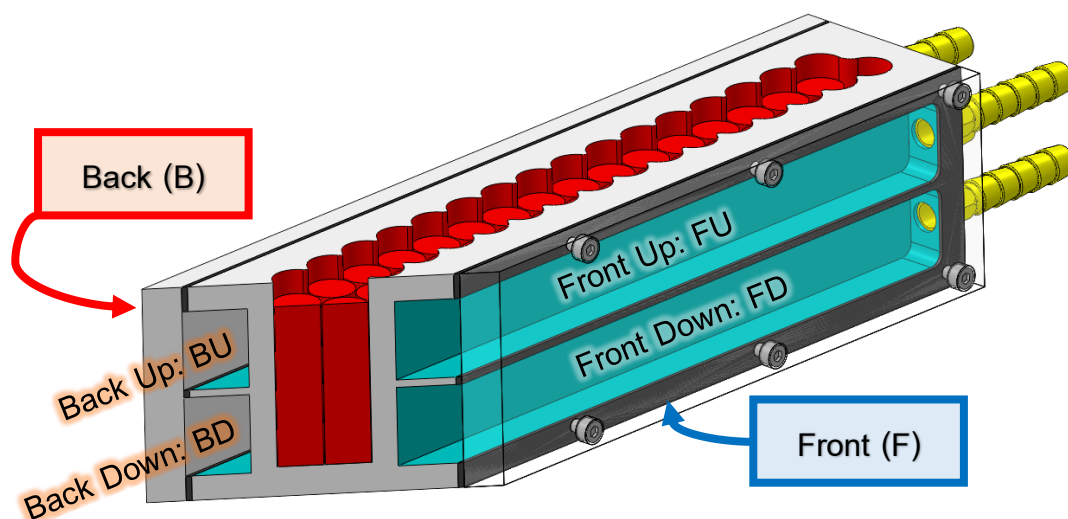


ภาพประกอบ 77 แสดงภาพองค์ประกอบของระบบระบายความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก

ที่มา: แบบที่ดีที่สุดของงานวิจัยเรื่องโมดูลทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าโดยใช้ของไหลนาโน ของนายชุตติชัย หอมมาลี นิสิตปริญญาโท มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

คุณสมบัติของของสารหล่อเย็นที่ไหลเข้าไประบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนนั้น จะได้จากระบบของเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งด้านของเหลวเย็น และเข้าสู่ชุดระบายความร้อนซึ่งมีช่องทางการไหลของสารหล่อเย็นทั้งหมด 4 ด้าน ประกอบไปด้วย

1. Front (F) คือ ด้านหน้ามีช่องทางการไหลแบ่งเป็น
  - ช่องด้านหน้าข้างบน (Front Up: FU)
  - ช่องด้านหน้าข้างล่าง (Front Down: FD)
2. Back (B) คือ ด้านหลังมีช่องทางการไหลแบ่งเป็น
  - ช่องด้านหลังข้างบน (Back Up: BU)
  - ช่องด้านหลังข้างล่าง (Back Down: BD)
3. Left (L) คือ ด้านซ้ายมี 4 ช่องทางการไหล ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อทางปลาไหล
4. Right (R) คือ ด้านขวามี 4 ช่องทางการไหล ผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อทางปลาไหล

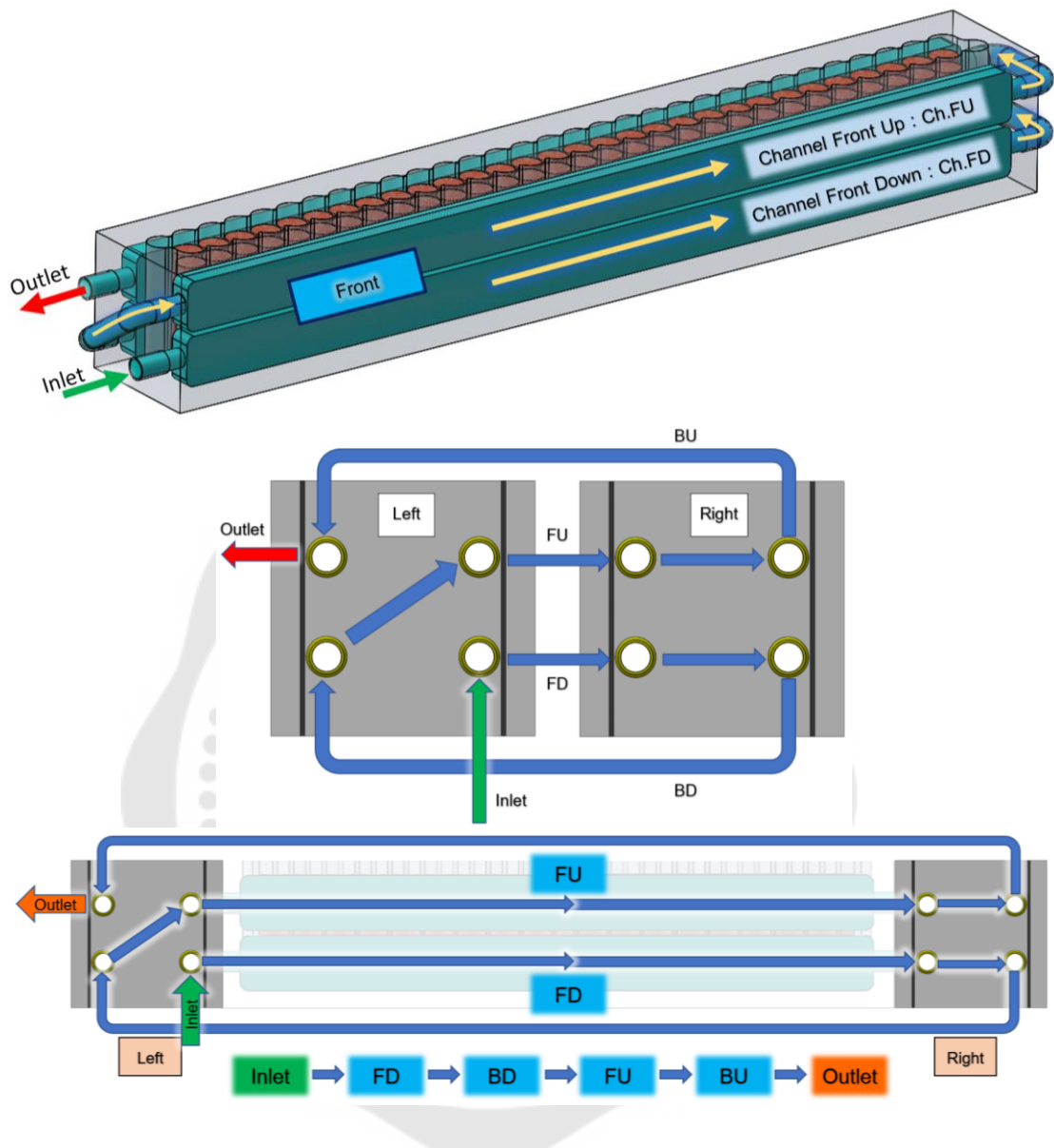


ภาพประกอบ 78 แสดงชื่อเรียกช่องทางไหลของสารหล่อเย็น

ในการทดลองนี้ได้กำหนดรูปแบบการไหลของน้ำหล่อเย็นไว้ 2 รูปแบบโดยเรียก  
รูปแบบการไหล เป็นโมเดลการไหล 2 โมเดล ดังนี้

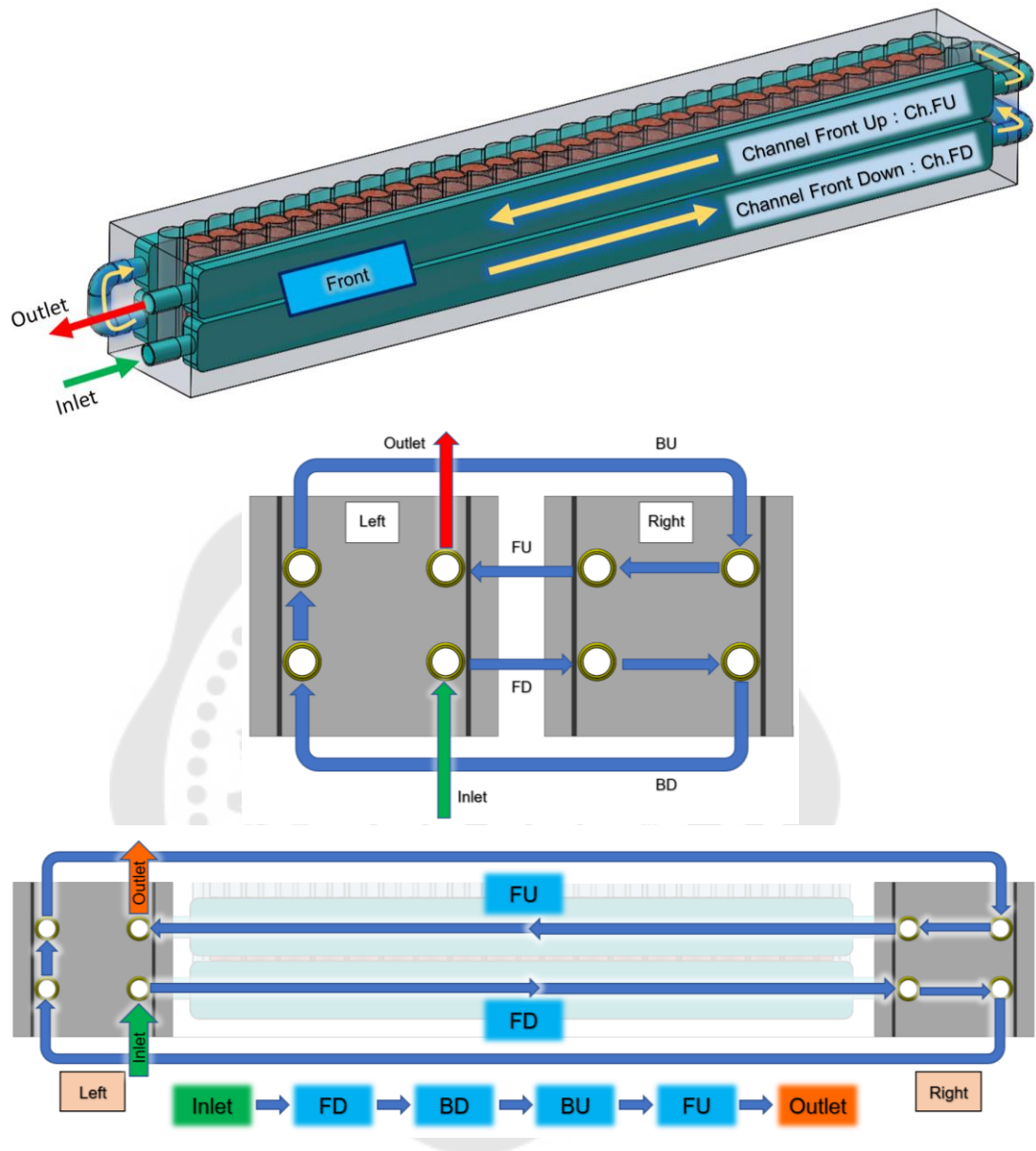
รูปแบบการระบายความร้อนโมเดลที่ 1 เป็นรูปแบบการไหลที่ให้สารหล่อเย็นไหลใน  
ช่องระบายความร้อนด้านล่างทั้งด้านหน้าและด้านหลังก่อน จากนั้นจะไหลเข้าช่องระบายความ  
ร้อนด้านบนทั้งด้านหน้าและด้านหลังก่อนออกจากชุดระบายความร้อน โดยเป็นการไหลแบบทาง  
เดียวจากด้านล่างไปด้านบน ดังภาพประกอบที่ 79





ภาพประกอบ 79 แสดงรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 1

รูปแบบการระบายความร้อนโมเดลที่ 2 เป็นรูปแบบการไหลที่ให้สารหล่อเย็นไหลในช่องระบายความร้อนด้านล่างทางด้านหน้าเหมือนกับโมเดลที่ 1 จากนั้นจะไหลเข้าช่องระบายความร้อนด้านหลังในช่องระบายด้านล่างแล้วจึงไหลไปด้านบน ซึ่งเป็นการไหลแบบสวนทาง จากนั้นจะกลับมาที่ช่องระบายความร้อนด้านหน้าช่องบนเพื่อไหลออกจากชุดระบายความร้อน ซึ่งเป็นการไหลแบบสวนทางที่ด้านหน้าของชุดทดลอง ดังภาพประกอบที่ 80



ภาพประกอบ 80 แสดงรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 2

จากการออกแบบโมเดลทั้ง 2 แบบ ซึ่งเป็นการหาผลต่างของอุณหภูมิ หรือผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดกับแบตเตอรี่ในระหว่างการระบายความร้อน โดยแต่ละโมเดลนั้นจะมีจุดเด่นที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5

ตาราง 5 สรุปการไหลในชุดระบายความร้อนทั้ง 3 แบบ

รายการ	โมเดล 1	โมเดล 2
รูปแบบการไหล	ไหลทางเดียวกัน	ไหลสวนทาง
ลักษณะการไหล	ด้านล่างไปสู่ด้านบน เข้าออกสลับฝั่ง	ด้านล่างไปสู่ด้านบน เข้าออกด้านเดียวกัน

โดยสารหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองนี้มี 2 ชนิด คือน้ำและของไหลเฟอร์โร ดังภาพประกอบที่ 81 โดยของไหลเฟอร์โรนั้นจะใช้ที่ความเข้มข้น 0.015% ผ่านระบบลดอุณหภูมิ ก่อนเข้าสู่ชุดระบายความร้อนของแบตเตอรี่

อนุภาคแมกนีไทต์ Magnetite ( $Fe_3O_4$ )



สารละลายเฟอร์โร (Ferro Fluid)

(ความเข้มข้น 0.015%)



ภาพประกอบ 81 อนุภาคแมกนีไทต์ ( $Fe_3O_4$ ) เพื่อนำมาผสมทำเป็นสารละลายเฟอร์โร

#### 4.3 วิธีการทดลอง

##### 4.3.1 การสร้างเงื่อนไขทางไฟฟ้า โหลดภาระที่ป้อนให้กับแบตเตอรี่

1. การอัดประจุไฟฟ้า เฉลี่ย 4 แอมแปร์ โดยที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันภายในของแบตเตอรี่ ใช้เวลา 9 นาที
2. การคายประจุไฟฟ้าเฉลี่ย 4 แอมแปร์ โดยที่กระแสมีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันภายในของแบตเตอรี่ ใช้เวลา 5 นาที
3. ระหว่างการอัดและคายประจุไฟฟ้าจะหน่วงเวลา 0.5 วินาที

##### 4.3.2 การปรับการไหล

1. การปรับอัตราการไหลของสารหล่อเย็นทางเข้าสู่ชุดระบายความร้อนของแบตเตอรี่ ด้วยอัตราการไหล 0.8-2 มิลลิลิตรต่อวินาที
2. การปรับอัตราการไหลของสารหล่อเย็นสูงสุดประมาณ 2.5 มิลลิลิตรต่อวินาที

### 4.3.3 ลักษณะการไหล

1. การไหลแบบราบเรียบ

### 4.3.4 ชนิดของสารหล่อเย็น

1. น้ำ
2. สารละลายเฟอโร

### 4.3.6 ตัวแปรอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

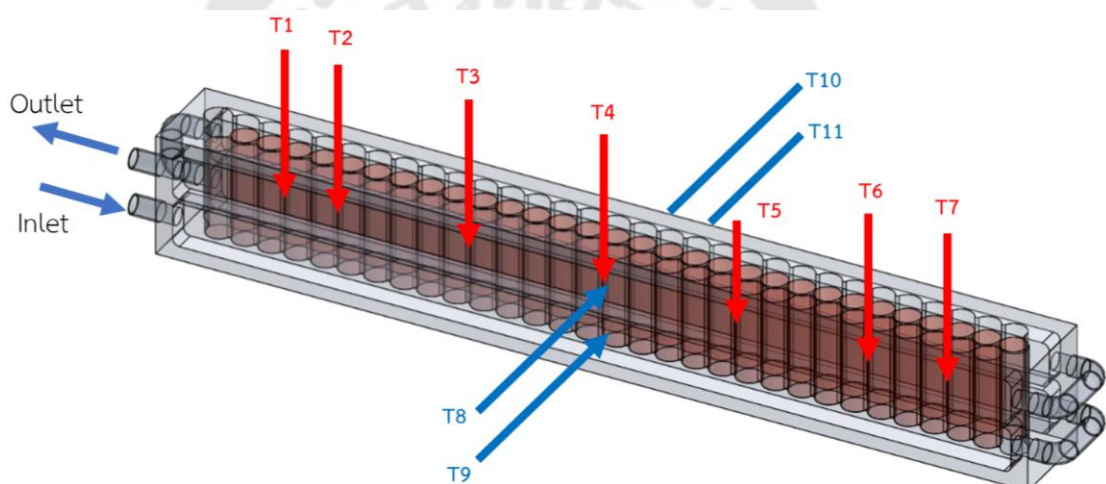
1. อุณหภูมิแบตเตอรี่ 7 ตำแหน่ง
2. อุณหภูมิช่องทางไหลสารหล่อเย็น 4 ตำแหน่ง
3. อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นเข้าสู่ชุดแบตเตอรี่
4. อุณหภูมิของของไหลหล่อเย็นออกจากชุดแบตเตอรี่

$T_{\text{Battery}}$

$T_{\text{Channel}}$

$T_{\text{inlet}}$

$T_{\text{outlet}}$



ภาพประกอบ 82 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิของตัวแปรต่างๆ

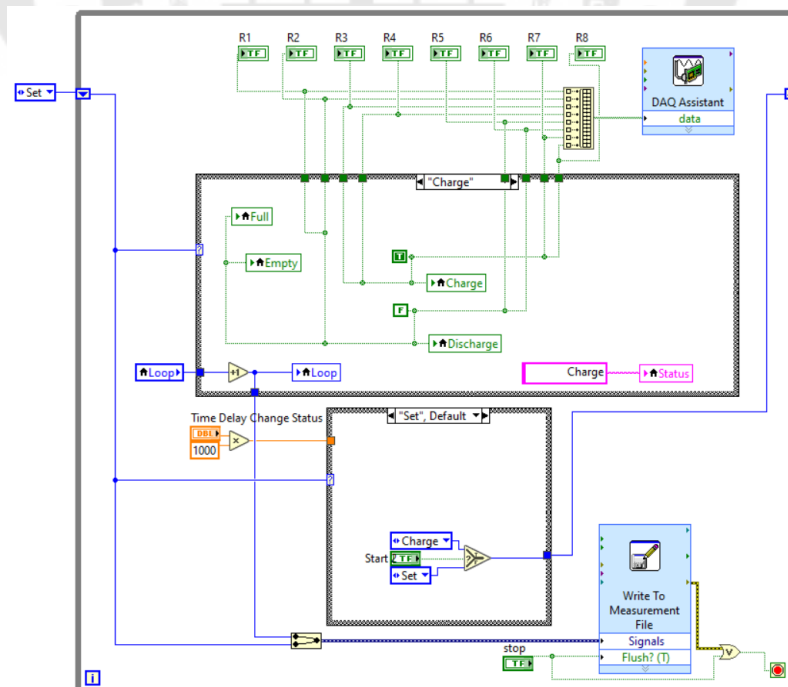
## 4.4 เจ็อนไขการทดลอง

ในการทดลองระบบด้านความร้อนของแบตเตอรี่นั้น จำเป็นต้องมีการอัดและคายประจุหลายรอบ เพื่อความเสถียรของระบบในการอัดและคายประจุจำเป็นต้องควบคุมโดยเวลา โดยในการอัดประจุนั้นระบบจะใช้เวลานานกว่าการคายประจุ โดยกระแสที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความต้านทานภายในแบตเตอรี่เมื่อปริมาณความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการปรับตั้งกระแสตั้งต้นไว้ที่ 4 แอมป์ ทดสอบกรณีแรงดันสูงสุด 100 SOC ที่ 25.2 โวลต์ และแรงดันต่ำสุด 0 SOC ที่ 18 โวลต์ ทำให้การอัดประจุจะใช้เวลา 9 นาที การคายประจุจะใช้เวลา 5 นาที และในระหว่างที่เปลี่ยนสถานะจากการอัดประจุ เมื่อแบตเตอรี่เต็มมาเป็น

คายประจุ หรือตอนที่คายประจุเสร็จจะกลับมาอัดประจุ จะหน่วงเวลา 0.5 วินาที โดยโปรแกรมมี หน้าต่างดังภาพประกอบที่ 83



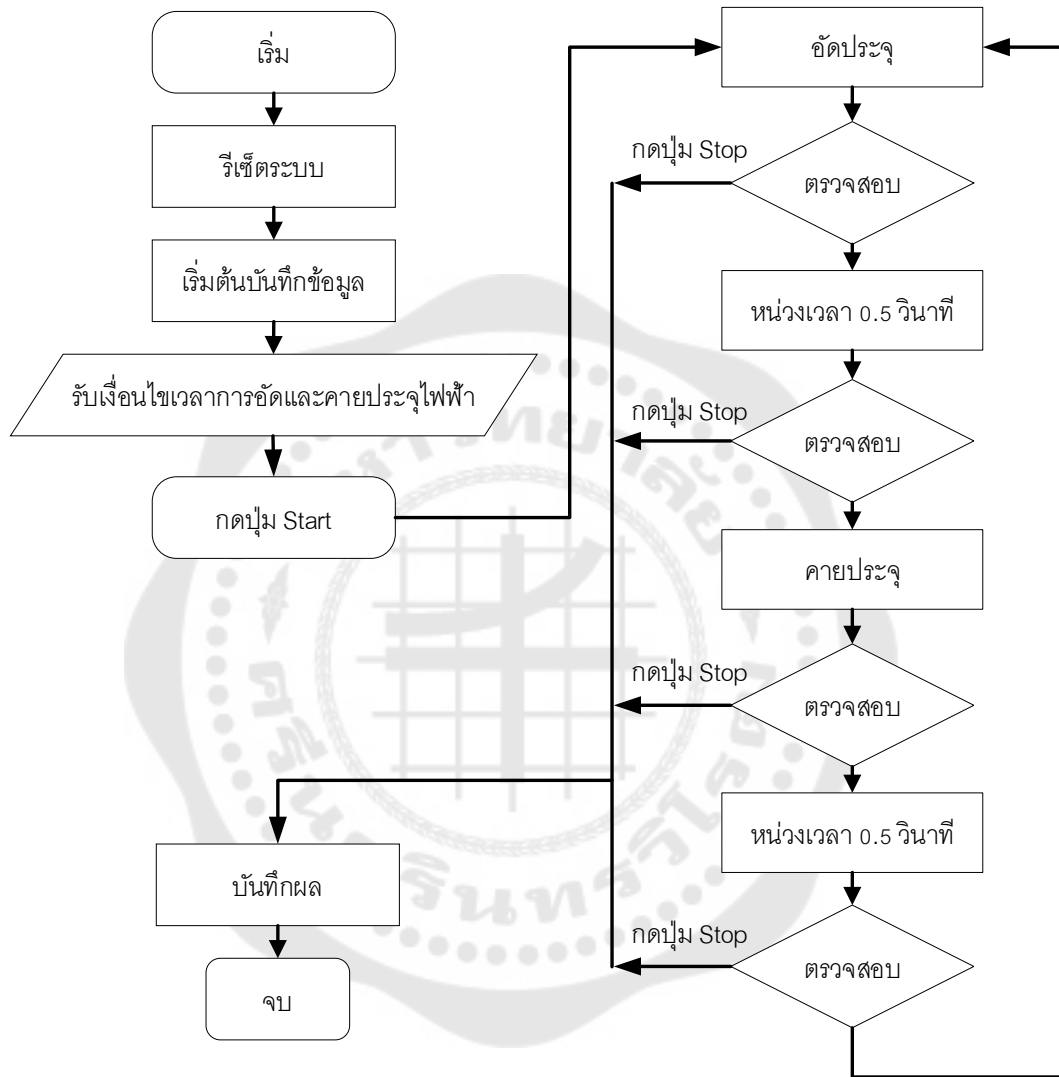
(ก) แสดงหน้าต่าง Front Panel



(ข) แสดงหน้าต่าง Block Diagram

ภาพประกอบ 83 แสดงโปรแกรม LabVIEW

โดยโปรแกรมจะเริ่มบันทึกข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้นโปรแกรม จากนั้นจะสามารถปรับเวลาสำหรับการอัด และคายประจุ รวมถึงการหน่วงเวลาขณะที่เปลี่ยนสถานะ โดยมีรูปแบบการทำงาน ดังภาพประกอบที่ 84



ภาพประกอบ 84 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม LabVIEW

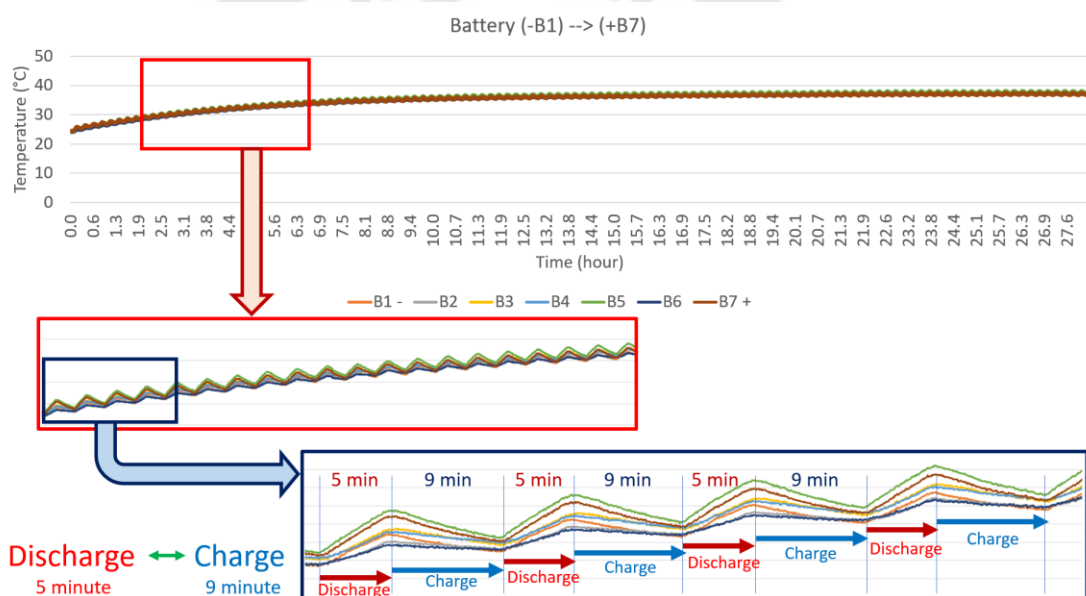
โดยโปรแกรมจะทำการควบคุมอุปกรณ์ในตู้ควบคุมผ่านรีเลย์ทั้งหมด 8 ตัวด้วยกัน เพื่อให้การอัดและคายประจุทำงานได้อย่างสมบูรณ์ การหน่วงเวลาขณะที่เปลี่ยนสถานะการอัดและคายประจุ จะช่วยให้ระบบไฟฟ้าไม่มีการไหลย้อนกลับ



## บทที่ 5 การวิเคราะห์และผลการทดลอง

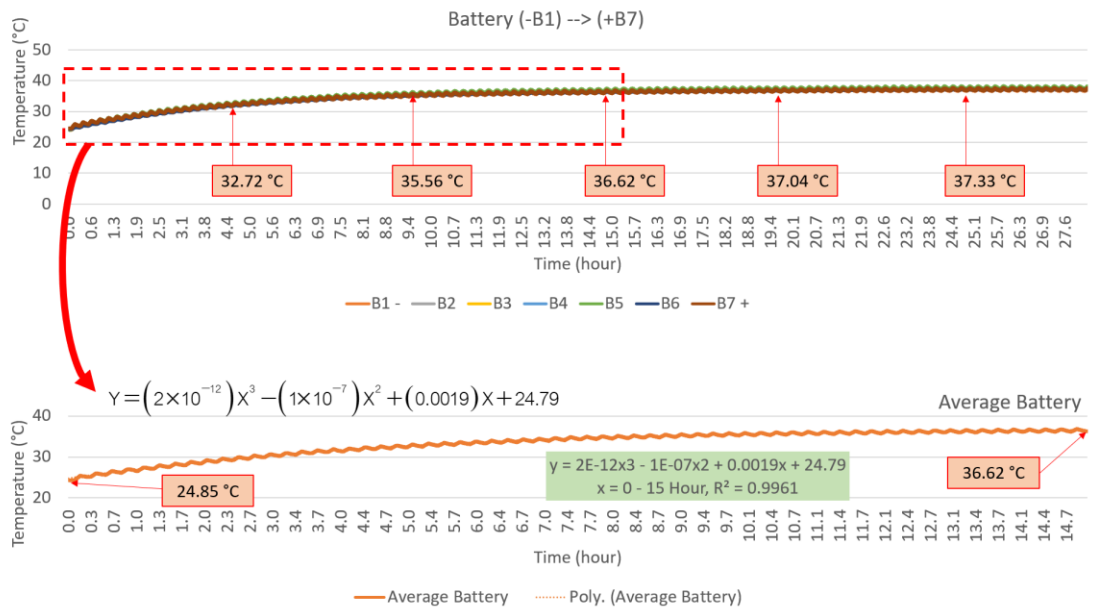
### 5.1 ผลการทดลองในกรณีที่ไม่มียระบบสารหล่อเย็น

ในการทดลองได้ทำการอัดและคายประจุ ซึ่งเป็นการทดลองภาระทางไฟฟ้าโดยในการทดลองได้ให้กระแสตั้งต้นที่ 4 แอมแปร์ และทำการอัดประจุด้วยแหล่งจ่ายไฟแรงดัน 25.2 โวลต์ นาน 9 นาที จากนั้นทำการคายประจุด้วยตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ 1000 วัตต์ 4 โอห์ม นาน 5 นาที จึงจะกลับไปอัดประจุไฟฟ้าใหม่ ซึ่งทำการอัดและคายประจุเช่นนี้ต่อเนื่อง โดยขณะที่เปลี่ยนสถานะอัดและคายประจุจะมีการหน่วงเวลา 0.5 วินาที ผลการทดลองได้ดังภาพประกอบที่ 85



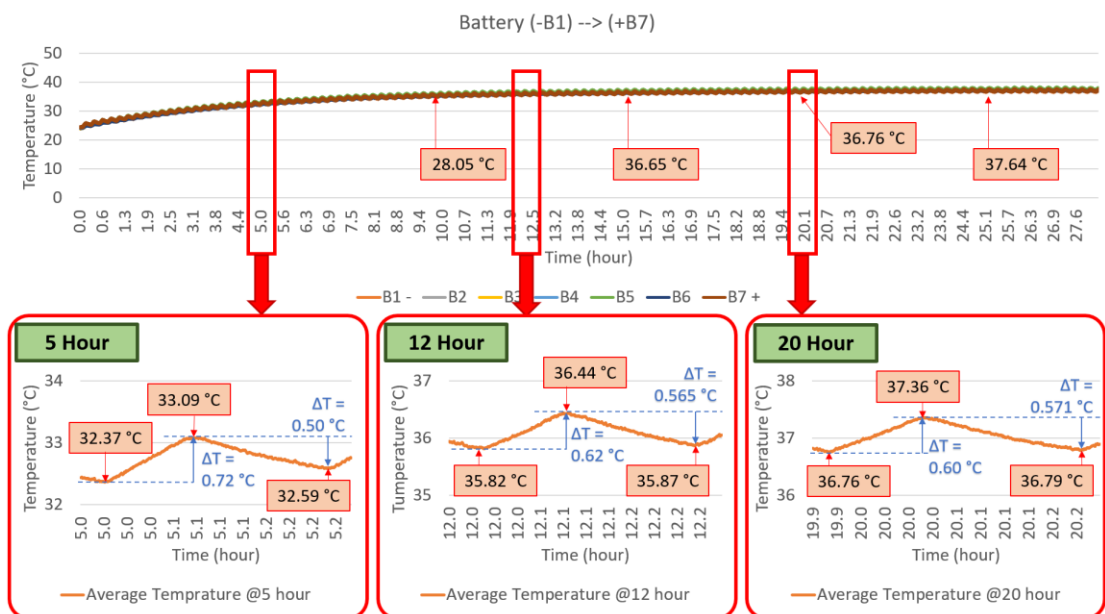
ภาพประกอบ 85 กราฟแสดงการอัดประจุ และคายประจุ ของแบตเตอรี่ชนิด 18650

โดยจากภาพประกอบ 85 นี้จะพบว่าในการคายประจุ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งต่างจากการอัดประจุที่ทำให้ความร้อนลดลง แต่การทดสอบลูการทดลอง คายประจุ-อัดประจุ 1 รอบจะมีความร้อนเกิดขึ้น โดยความร้อนจะถูกสะสมดังแสดงในภาพประกอบ 86



ภาพประกอบ 86 แสดงรูปแบบการเกิดความร้อนของแบตเตอรี่

จากภาพประกอบที่ 91 ความร้อนที่เกิดขึ้นในช่องของแบตเตอรี่นั้นจะได้สมการ  $Y = (2 \times 10^{-12})X^3 - (1 \times 10^{-7})X^2 + (0.0019)X + 24.79$  โดยที่ X เป็นเวลาระหว่าง 0-15 ชั่วโมง มีค่าความถูกต้องของสมการอยู่ที่  $R^2 = 0.9961$  หรือ 99.61% ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าแอมพลิจูดที่เกิดขึ้นในแต่ละรูปการทดลองดังรูปที่ 87



ภาพประกอบ 87 แสดงแอมพลิจูดในแต่ละตำแหน่ง

จากภาพประกอบที่ 87 ความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น ทำให้ผู้ประกอบการทดลองมีความร้อนเพิ่มขึ้น โดยช่วงเริ่มการทดลองนั้น ความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และอัตราการเกิดความร้อนจะลดลง จนเข้าสู่จุดสมดุลความร้อนของแบตเตอรี่ เว้นแต่จะเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมลรันอเวย์ ที่ทำให้ ความร้อนเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณจนควบคุมไม่ได้ ซึ่งจะเกิดจากความร้อนสะสมที่แบตเตอรี่เป็น เวลานาน ดังนั้นการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ หรือควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นการป้องกัน ปัญหาดังกล่าวได้

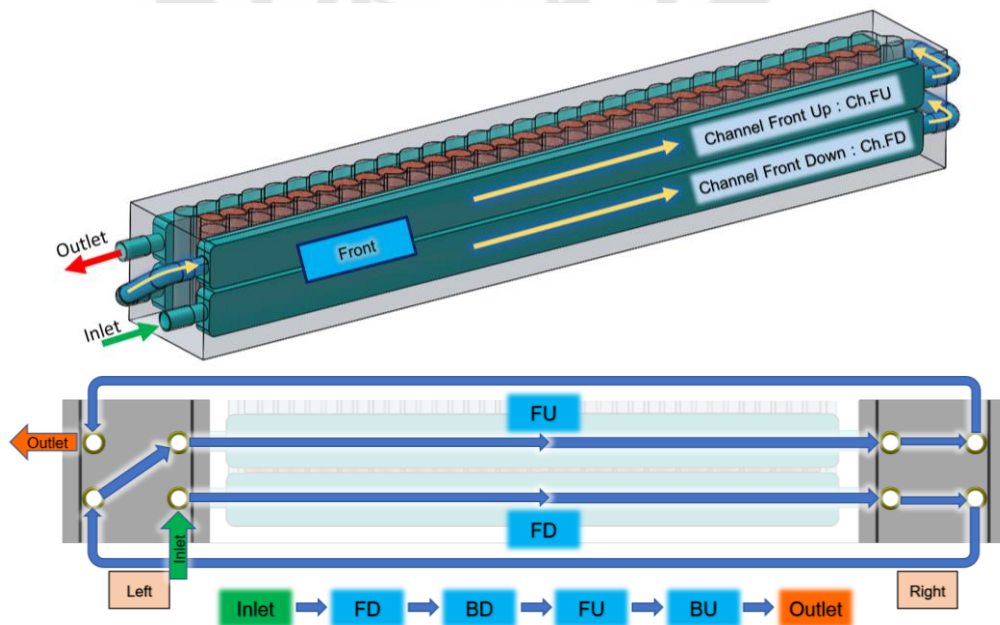
ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการทดลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยของไหลสาร หล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ หรือไม่ก็ควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่ให้ความร้อนสูง เกินไปจนเกิดอันตราย

## 5.2 ผลการทดลองในกรณีที่มีระบบสารหล่อเย็น

ในการออกแบบจากอุปกรณ์ชุดทดลองนั้น สามารถเชื่อมต่อท่อเพื่อกำหนดการไหลของ สารหล่อเย็นให้เป็นรูปแบบการไหลต่างๆ ได้ โดยในการทดลองครั้งนี้จะกำหนดรูปแบบการไหลไว้ที่ 2 รูปแบบได้แก่ โมเดล 1 และโมเดล 2 และได้ทดลองสารหล่อเย็นไว้ 2 ชนิด คือน้ำ และของไหล เฟอร์ไร

### 5.2.1 กรณีใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น

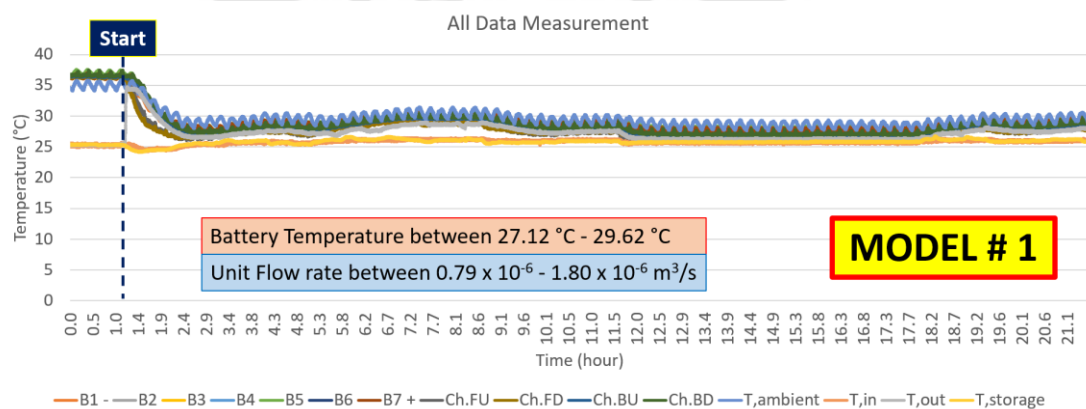
ระบบระบายความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นในรูปแบบโมเดล 1 เป็นรูปแบบการ ไหลที่เริ่มไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบนโดยในแต่ละด้านจะมีการไหลแบบทางเดียวกัน ดัง ภาพประกอบ 88



ภาพประกอบ 88 รูปแบบการไหลของโมเดล 1

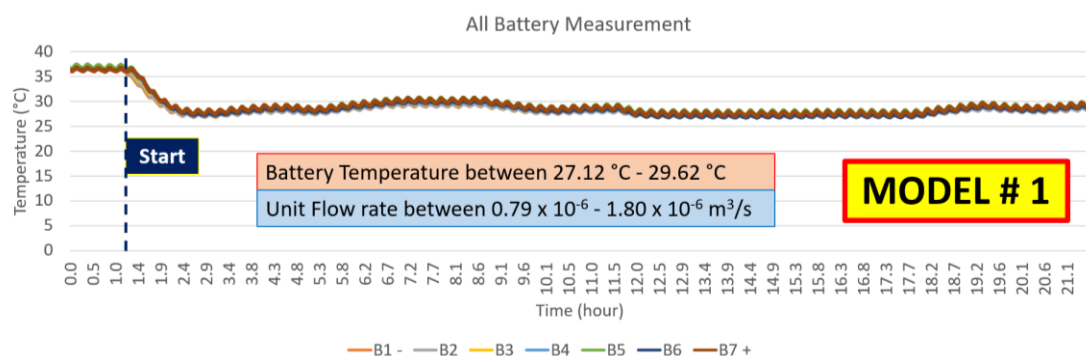
จากภาพประกอบ 88 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการไหลผ่านช่องการไหล โดยของไหลจะไหลจากช่องการไหลด้านหน้าข้างล่าง (Chanel Front Down : Ch.FD) ไปยังด้านหลังข้างล่าง (Chanel Back Down : Ch.BD) และวนมาที่ด้านหน้าข้างบน (Chanel Front Up : Ch.FU) ก่อนไปช่องสุดท้ายด้านหลังข้างบน (Chanel Back Up : Ch.BU) จึงไหลออกจากระบบการระบายความร้อน

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น โดยขณะทำการทดลองนั้นได้บันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่ทั้ง 7 ตำแหน่ง อุณหภูมิของน้ำในช่องทางการไหลของสารหล่อเย็น อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกจากชุดทดลอง และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งได้ผลดังภาพประกอบ 89



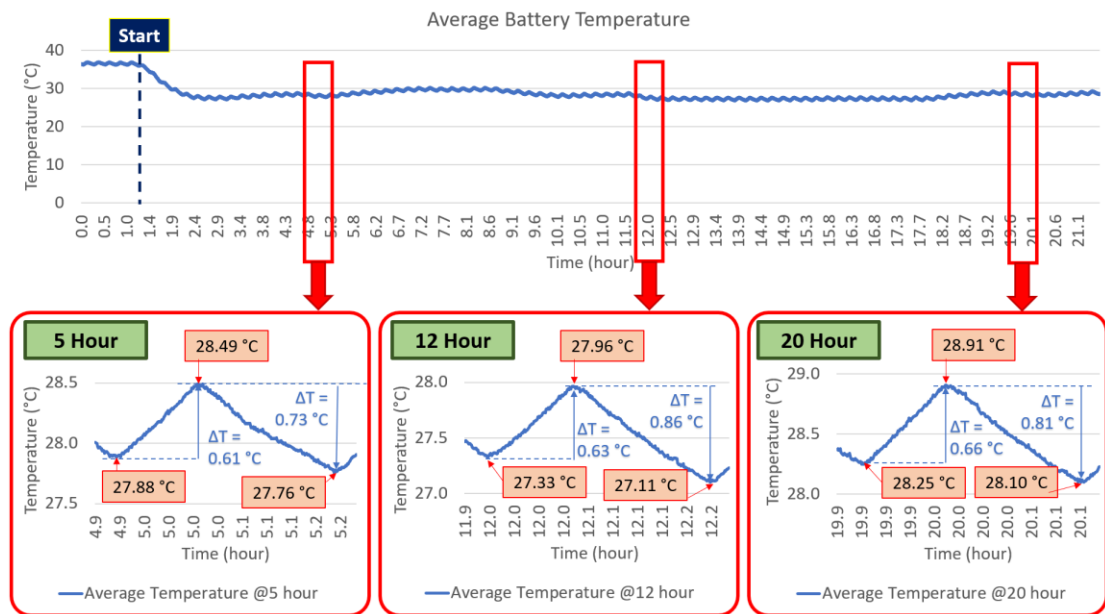
ภาพประกอบ 89 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ

จากข้อมูลของการทดลองดังภาพประกอบ 89 นั้นสามารถจำแนกเป็นอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดังภาพประกอบ 90



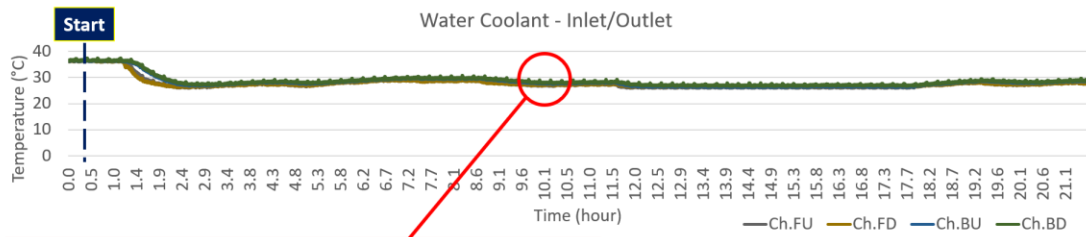
ภาพประกอบ 90 แสดงข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่

จากภาพประกอบที่ 90 เป็นภาพของแบตเตอรี่ทั้ง 7 ตำแหน่ง โดยสามารถนำข้อมูลทั้ง 7 ตำแหน่งมาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้ดังภาพประกอบที่ 91



ภาพประกอบ 91 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่

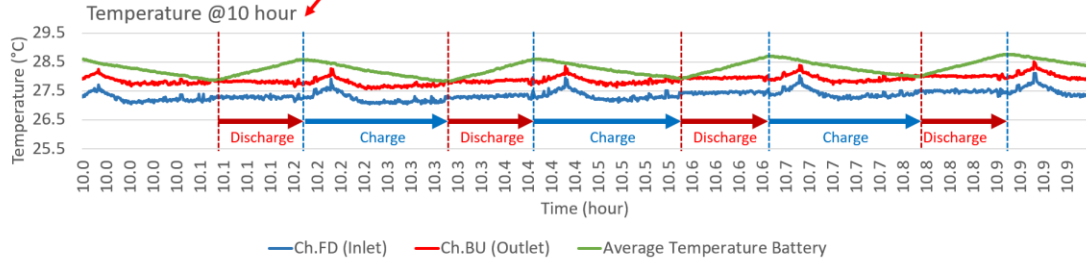
ภาพประกอบที่ 91 แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยแอมพลิจูดของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลทำให้เกิดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเป็นการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ และความร้อนที่เกิดขึ้นได้ส่งผ่านสารหล่อเย็นที่เป็นน้ำผ่านช่องทางไหล ซึ่งมีข้อมูลดังภาพประกอบที่



Coolant inlet between 25.04 °C – 26.51 °C and Average = 25.90 °C  
 Coolant outlet between 26.01 °C – 29.08 °C and Average = 27.21 °C  
 Coolant ΔT between 0.06 °C – 3.01 °C and Average = 1.25 °C

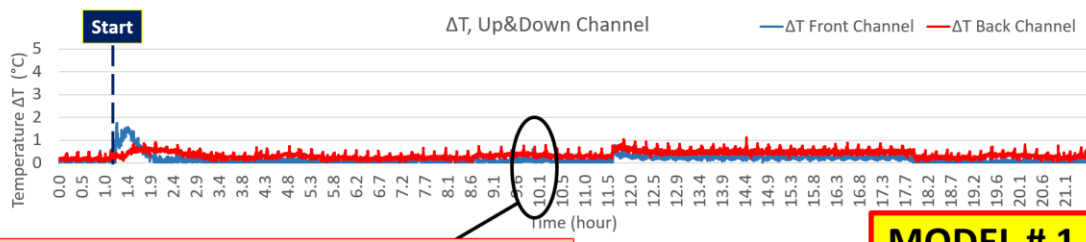
**MODEL # 1**

Unit Flow rate between  $0.79 \times 10^{-6}$  -  $1.80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$



ภาพประกอบ 92 แสดงอุณหภูมิของช่องทางไหลของน้ำ

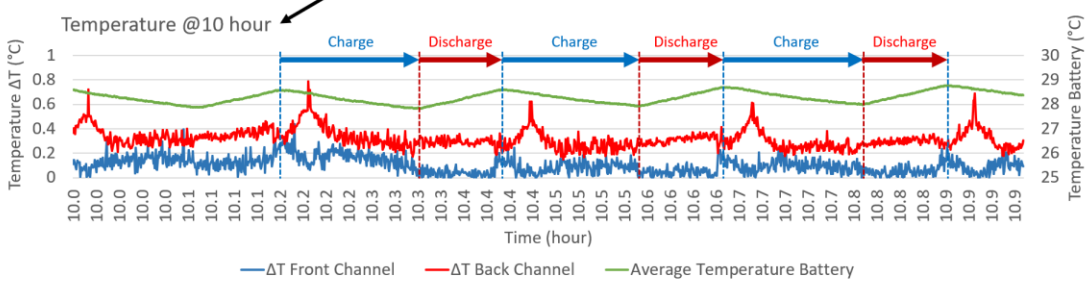
จากภาพประกอบ 92 ในการระบายความร้อนนั้นส่งผลให้เกิดความต่างของอุณหภูมิ ด้านบนและด้านล่างของช่องน้ำไหลทั้งด้านหน้า และด้านหลัง โดยหากอุณหภูมิต่างกันมากจะเป็นการระบายความร้อนที่ทำลายแบตเตอรี่เพราะอุณหภูมิจะเกิดความแตกต่างบนล่างภายในแบตเตอรี่ก่อนเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองได้ผลดังภาพประกอบที่ 93



ΔT Front Channel between 0.00 °C to 1.74 °C and Average = 0.17 °C  
 ΔT Back Channel between 0.01 °C to 0.11 °C and Average = 0.37 °C

**MODEL # 1**

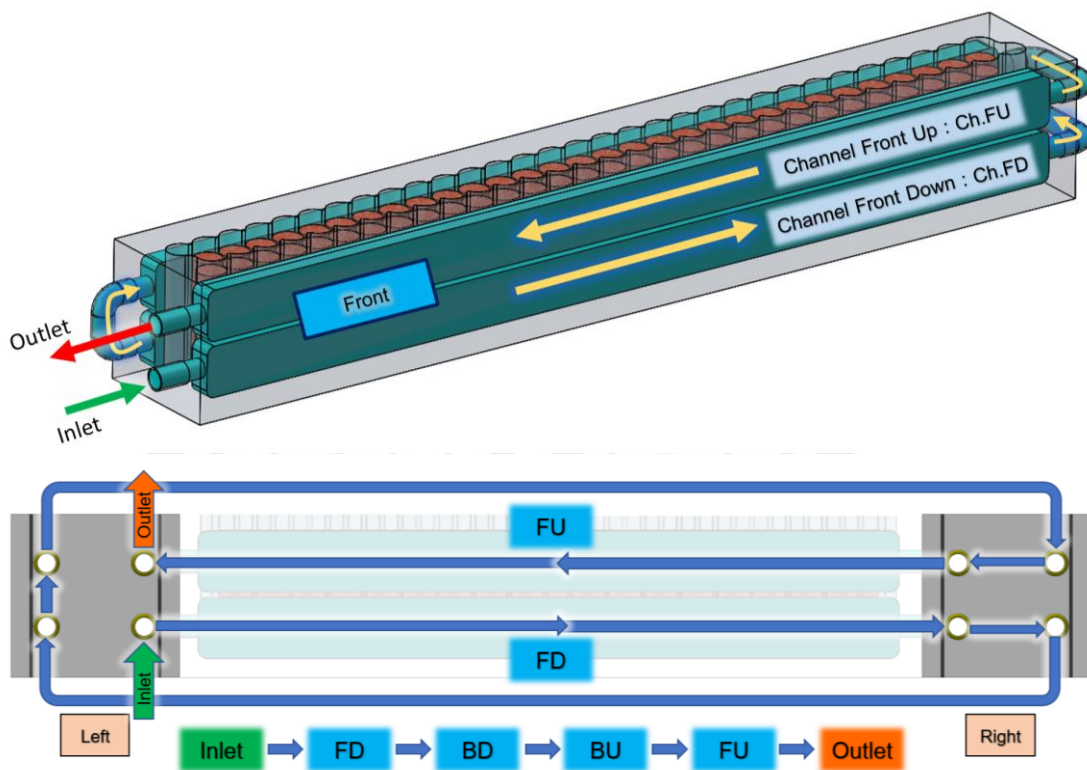
Unit Flow rate between  $0.79 \times 10^{-6}$  -  $1.80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$



ภาพประกอบ 93 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทั้งด้านหน้าและด้านหลัง



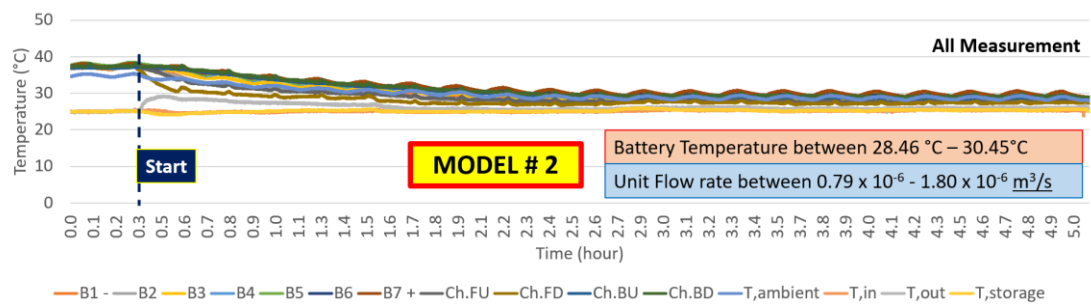
จากภาพประกอบ 93 พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างทั้งด้านหน้าและด้านหลังไม่แตกต่างกันมาก ในโมเดลที่ 1 ดังที่ได้กล่าวมานั้น ในส่วนระบบระบายความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นในรูปแบบโมเดล 2 เป็นรูปแบบการไหลที่เริ่มไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบนคล้ายกับโมเดล 1 แต่มีความแตกต่างกันตรงที่ในแต่ละด้านจะมีการไหลแบบสวนทางกัน ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 94 รูปแบบการไหลของโมเดล 2

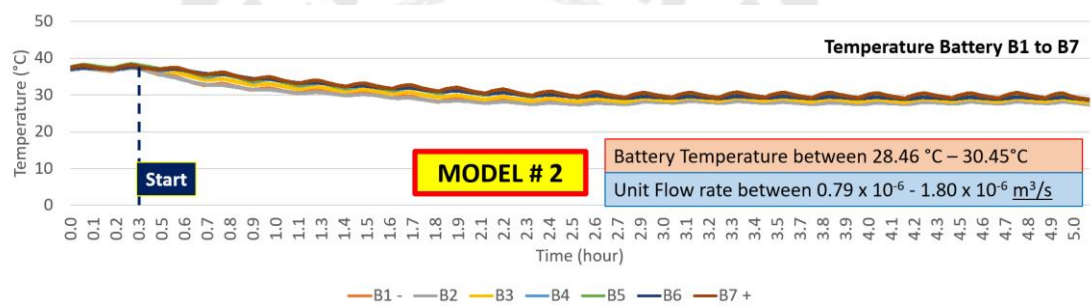
จากภาพประกอบ 94 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการไหลผ่านช่องการไหล โดยสารหล่อเย็นจะไหลจากช่องการไหลด้านหน้าข้างล่าง (Chanel Front Down : Ch.FD) ไปยังด้านหลังข้างล่าง (Chanel Back Down : Ch.BD) และวนมาข้างบนในด้านหลัง (Chanel Back Up : Ch.BU) แล้วจึงไปช่องสุดท้ายด้านหน้าข้างบน (Chanel Front Up : Ch.FU) ก่อนออกจากระบบการระบายความร้อน

ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นเหมือนการทดลองโมเดล 1 โดยขณะทำการทดลองนั้นได้บันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่ทั้ง 7 ตำแหน่ง อุณหภูมิของน้ำในช่องทางการไหลของสารหล่อเย็น อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกจากชุดทดลอง และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งได้ผลดังภาพประกอบ 95



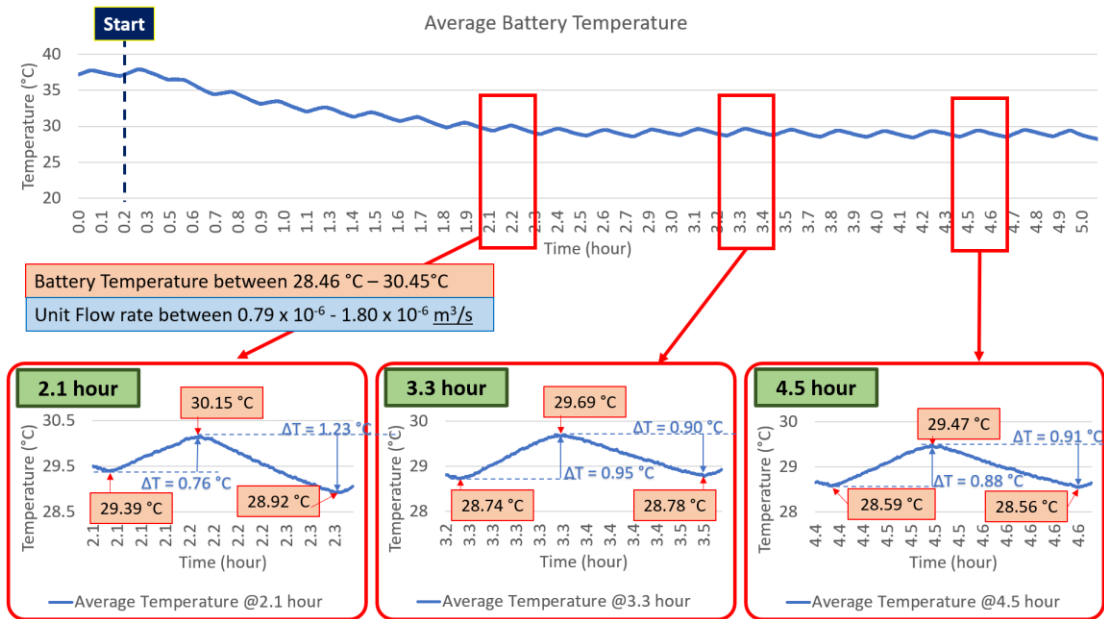
ภาพประกอบ 95 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ

จากข้อมูลของการทดลองดังภาพประกอบ 95 นั้นสามารถจำแนกเป็นอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดังภาพประกอบ 96



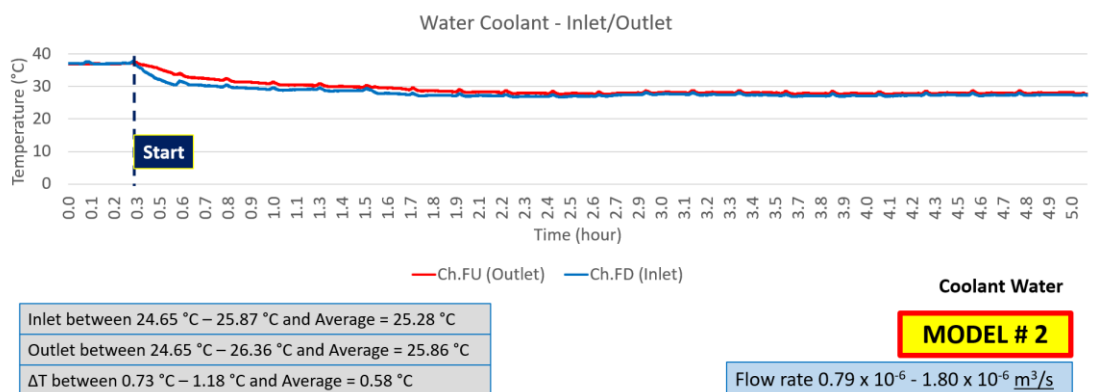
ภาพประกอบ 96 แสดงข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่

จากภาพประกอบที่ 96 เป็นภาพของแบตเตอรี่ทั้ง 7 ตำแหน่ง โดยสามารถนำข้อมูลทั้ง 7 ตำแหน่งมาหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิได้ดังภาพประกอบที่ 97



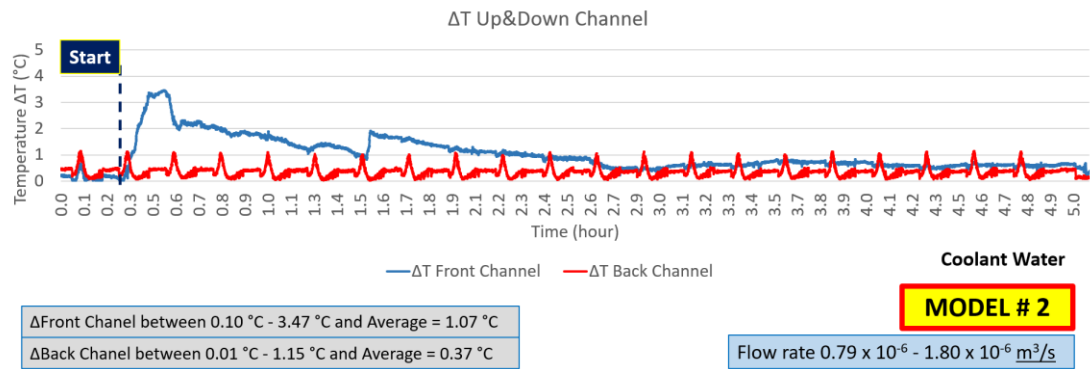
ภาพประกอบ 97 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่

ภาพประกอบที่ 97 แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการระบายความร้อนด้วยน้ำ โดยแอมพลิจูดของรูปการทดลองที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าแตกต่างกัน แต่พออุณหภูมิเริ่มนิ่ง แอมพลิจูดของรูปการทดลองก็จะมีค่าให้เคียงกัน และเป็นผลทำให้เกิดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ไม่เปลี่ยนแปลง หรือเป็นการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ และความร้อนที่เกิดขึ้นได้ส่งผ่านสารหล่อเย็นที่เป็นน้ำผ่านช่องทางไหล ซึ่งมีข้อมูลดังภาพประกอบที่ 98



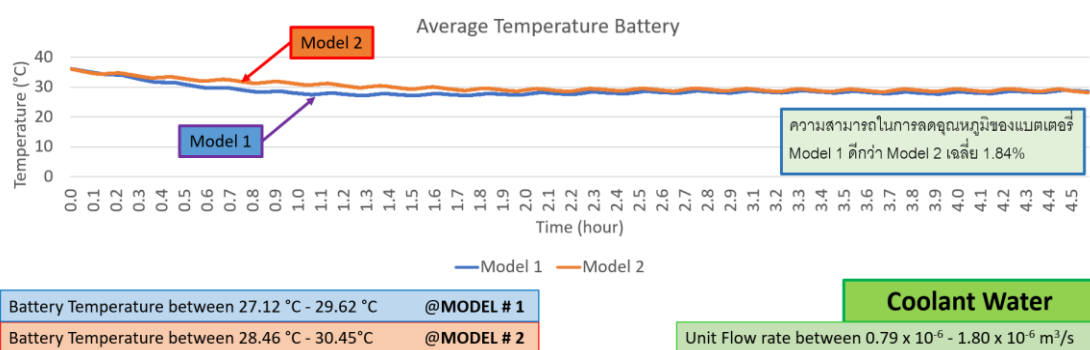
ภาพประกอบ 98 แสดงอุณหภูมิของช่องทางไหลของน้ำ

จากรูปที่ 98 ในส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิการระบายความร้อนในโมเดล 2 นั้นอุณหภูมิมีความแตกต่างกันมากกว่าแบบโมเดล 1 ซึ่งผลการทดลองได้ผลดังภาพประกอบที่ 99



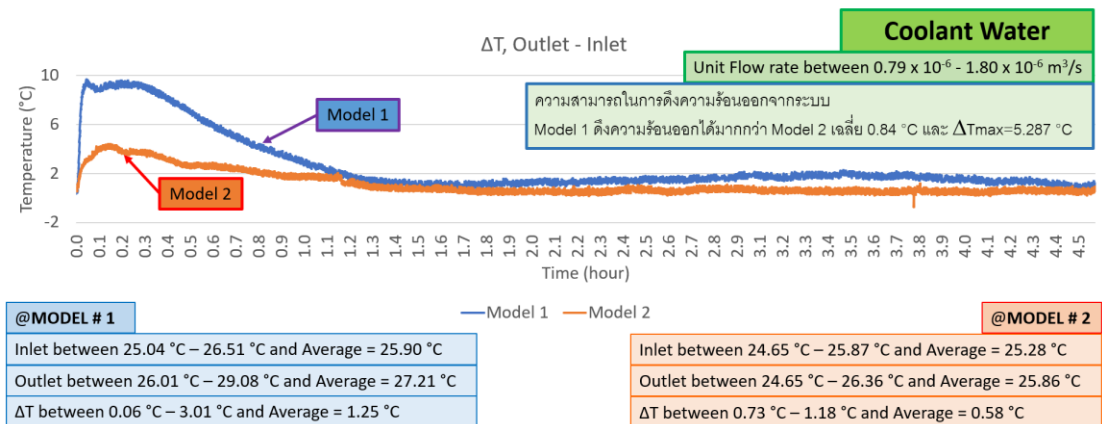
ภาพประกอบ 99 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

จากภาพประกอบ 99 พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีความแตกต่างกันมากกว่าในโมเดลที่ 1 ซึ่งในการทดลองทั้งโมเดล 1 และ โมเดล 2 นั้นสามารถเปรียบเทียบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นสารหล่อเย็นในโมเดลทั้ง 2 แบบ เพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยในการวิเคราะห์จากอุณหภูมิของแบตเตอรี่ อัตราการนำความร้อนออกจากระบบ และความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่าง โดยในส่วนของอุณหภูมิของแบตเตอรี่มีผลดังภาพประกอบที่ 100



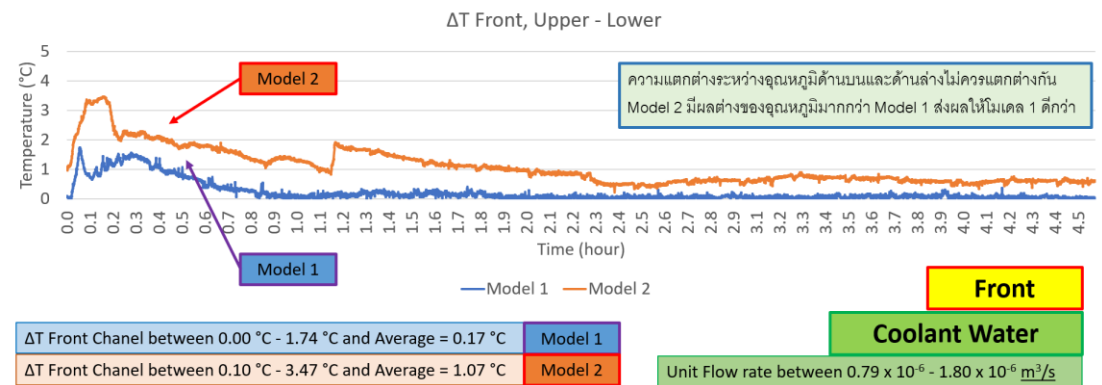
ภาพประกอบ 100 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยแบตเตอรี่ของโมเดล 1 และโมเดล 2

จากภาพประกอบที่ 100 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแบตเตอรี่หลังจากที่ได้เปิดระบบการระบายความร้อน จากกราฟโมเดล 1 มีอุณหภูมิต่ำกว่าโมเดล 2 แสดงให้เห็นว่าระบบระบายความร้อนในโมเดล 1 สามารถทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงได้ดีกว่าโมเดล 2



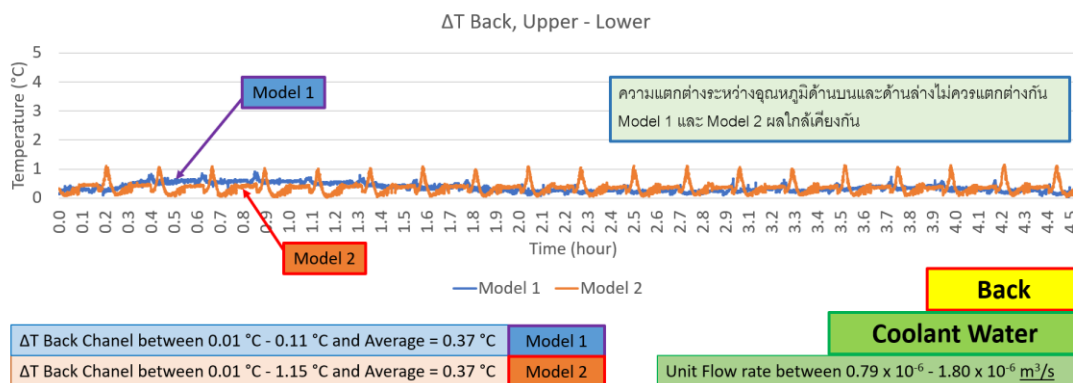
ภาพประกอบ 101 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิทางเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น

จากภาพประกอบที่ 101 เป็นกราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างทางเข้าและทางออกของน้ำหล่อเย็น และพบว่าโมเดล 1 มีอุณหภูมิที่สูงกว่าโมเดล 2 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพาความร้อนออกจากระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ของโมเดล 1 ดีกว่าโมเดล 2



ภาพประกอบ 102 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของฝั่งด้านหน้า

จากภาพประกอบที่ 102 แสดงกราฟความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของฝั่งด้านหน้าชุดทดลอง ซึ่งโดยการระบายความร้อนนั้น ความร้อนที่คงอยู่ในระบบไม่ควรให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งจะเป็นสามารถทำให้เกิดปัญหาของแบตเตอรี่เสื่อมได้ เนื่องจากแบตเตอรี่มีอุณหภูมิต่างกันในแบตเตอรี่ก็อันเดียวกัน โดยจากกราฟพบว่าโมเดล 2 มีอุณหภูมิสูงกว่า โมเดล 1 ซึ่งก็คือโมเดล 2 จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ภายในอันเดียวกัน



ภาพประกอบ 103 แสดงกราฟผลต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของฝั่งด้านหลัง

จากภาพประกอบ 103 ผลต่างของอุณหภูมิด้านหลังทั้งโมเดล 1 และโมเดล 2 ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลดีต่อแบตเตอรี่

จากกราฟที่เปรียบเทียบมาทั้งหมดสามารถสรุปผลจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสม และความสารถในการดึงความร้อนออกจากระบบได้ดังตาราง 6

ตาราง 6 สรุปผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเดลที่ 1 กับโมเดลที่ 2

รายการเปรียบเทียบ	Model 1	Model 2	โมเดลที่ดีกว่า
อุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่	28.87 °C	29.41 °C	โมเดลที่ 1
ผลต่างของอุณหภูมิเข้าและออก	1.157 °C	0.652 °C	โมเดลที่ 1
ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านหน้า	0.14 °C	1.20 °C	โมเดลที่ 1
ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านหลัง	0.37 °C	0.37 °C	ไม่แตกต่าง

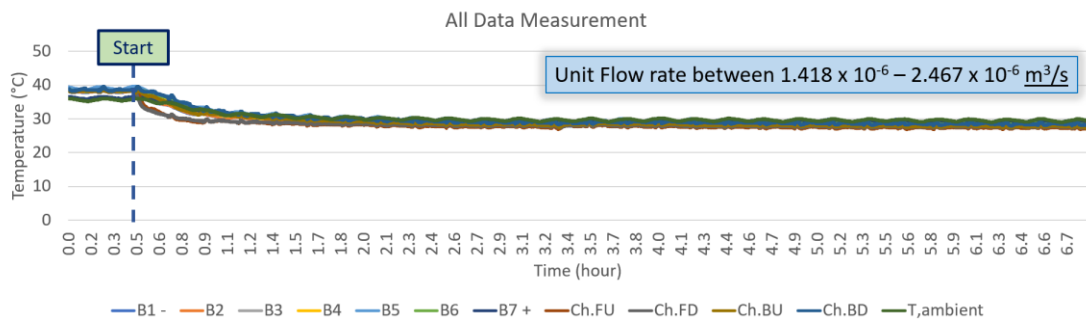
จากตารางจะสามารถสรุปได้ว่าโมเดลที่ 1 ดีกว่าโมเดลที่ 2 ทั้งเรื่องของการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ภายในระบบ และการพาความร้อนออกจากระบบ รวมถึงไม่ส่งผลเสียต่อแบตเตอรี่จากการที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันภายในแบตเตอรี่ก้อนเดียวกัน

### 5.2.2 กรณีสารหล่อเย็นเป็นของไหลเฟอโรโร

ในการทดลองระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมด้วยน้ำ เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 ซึ่งผลที่ได้นั้น โมเดลที่ 1 มีผลการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ดีกว่าโมเดลที่ 2 จึงได้พิจารณาการทดลองในมิติของสารหล่อเย็น โดยเลือกทดสอบเฉพาะโมเดลที่ 1 โดยสารหล่อเย็นที่นำมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำนั้น ได้ใช้อุณหภูมิ

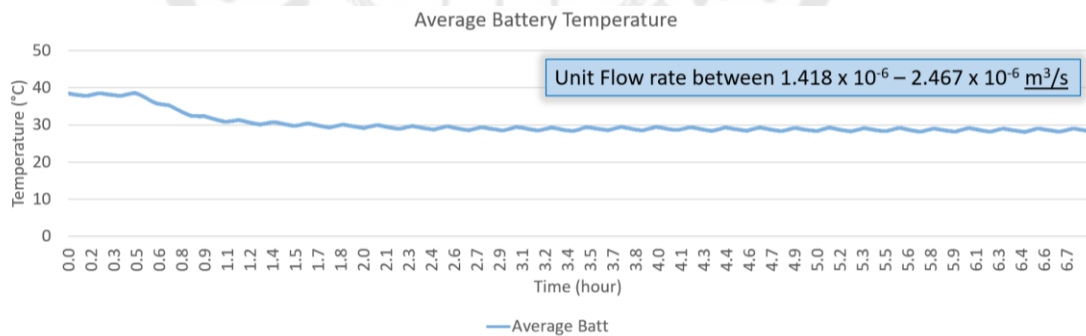


ไทด์ ( $Fe_3O_4$ ) ผสมในน้ำเพื่อทำเป็นสารหล่อเย็นเฟอร์โร ที่มีความเข้มข้นที่ 0.015% โดยในการทดลองระบบระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นเฟอร์โร โมเดลที่ 1 ได้ทำการทดลองที่อัตราการไหลระหว่าง  $1.418 \times 10^{-6}$  ถึง  $2.467 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแบตเตอรี่ทั้ง 7 ตำแหน่ง อุณหภูมิของน้ำในช่องทางการไหลของสารหล่อเย็น อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกจากชุดทดลอง และอุณหภูมิลิ่งแวดล้อมโดยรอบ ซึ่งได้ผลดังภาพประกอบ 104



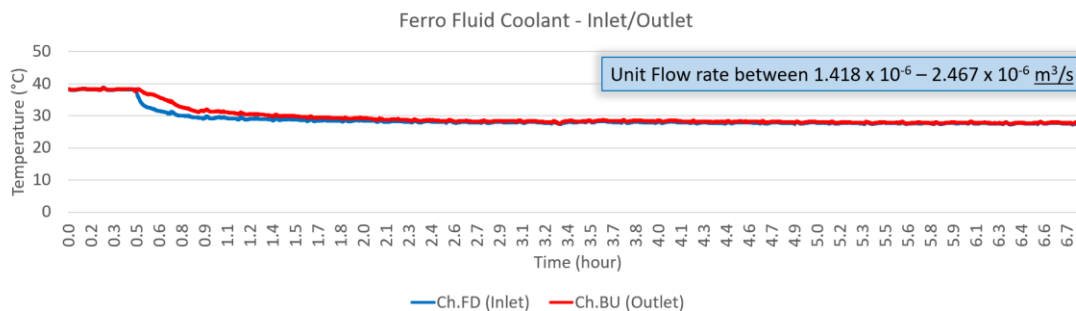
ภาพประกอบ 104 แสดงข้อมูลของอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ

จากภาพประกอบที่ 104 นำข้อมูลมาแสดงเฉพาะแบตเตอรี่ลิเทียม โดยแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่ลิเทียมทั้ง 7 ตำแหน่ง ได้ผลดังภาพประกอบที่ 105



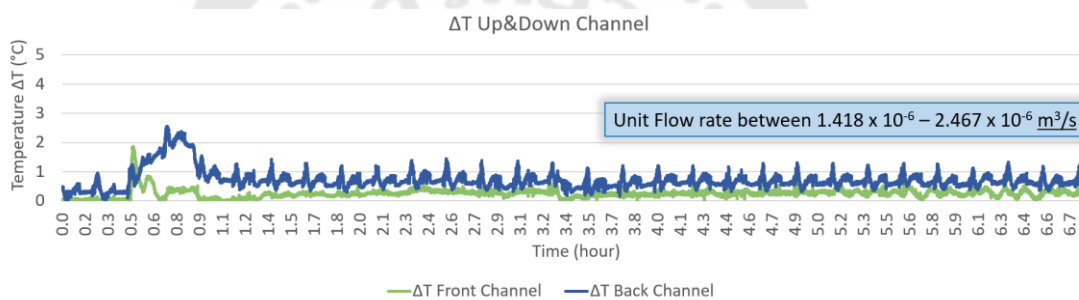
ภาพประกอบ 105 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่ลิเทียมทั้ง 7 ตำแหน่ง

ในระหว่างทดลองนั้นอุณหภูมิทางเข้า และทางออกที่แสดงถึงความสามารถในการพาความร้อนออกจากระบบได้ผลดังภาพประกอบที่ 106



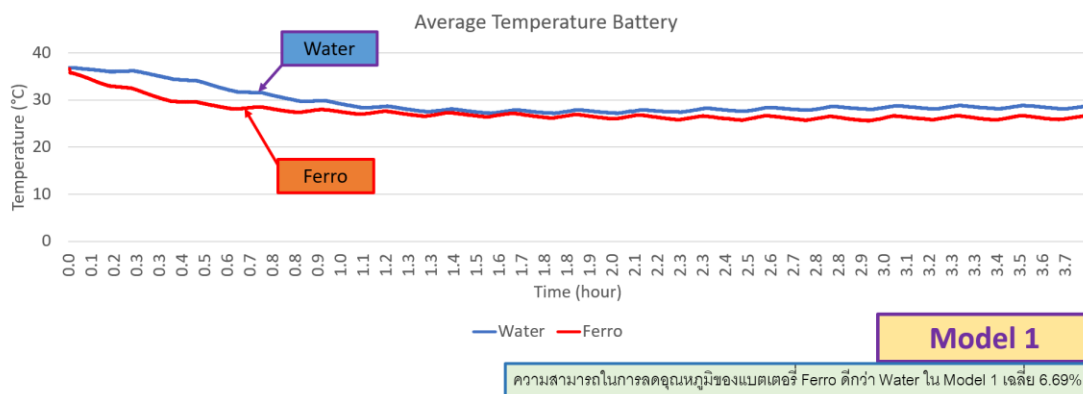
ภาพประกอบ 106 แสดงอุณหภูมิทางเข้าและทางออกระหว่างการทดลอง

ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแบตเตอรี่ส่วนบนและส่วนล่างที่แสดงถึงการดูแลแบตเตอรี่เพื่อยืดอายุการใช้งานทั้งด้านหน้าและด้านหลังของชุดทดลองได้ผลดังตารางที่ 107



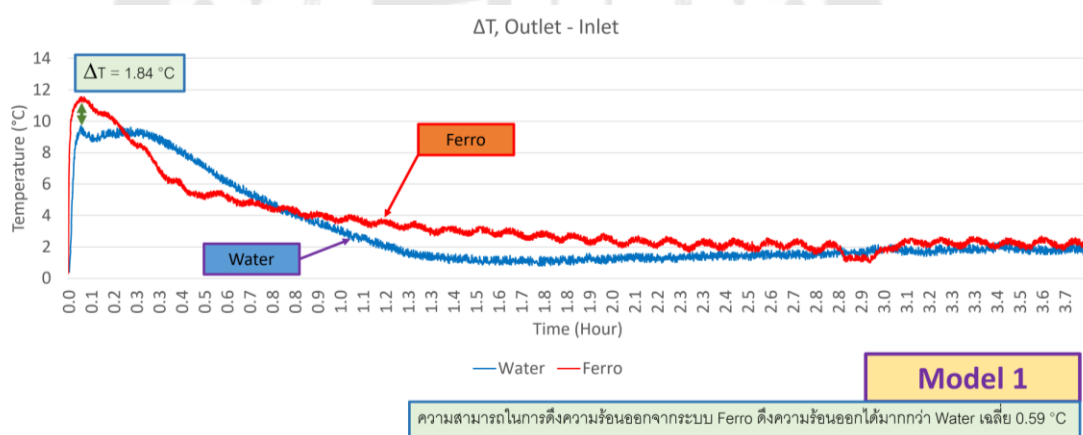
ภาพประกอบ 107 แสดงผลต่างของอุณหภูมิแบตเตอรี่

จากข้อมูลการทดลองการระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นเฟอร์โร จึงนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมถึงความสามารถในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมเทียบกับการระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งในการทดลองด้วยสารหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิด ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาสารหล่อเย็นที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยในการวิเคราะห์จากอุณหภูมิของแบตเตอรี่ อัตราการนำความร้อนออกจากระบบ และความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่าง โดยในส่วนของอุณหภูมิของแบตเตอรี่มีผลดังภาพประกอบที่ 108



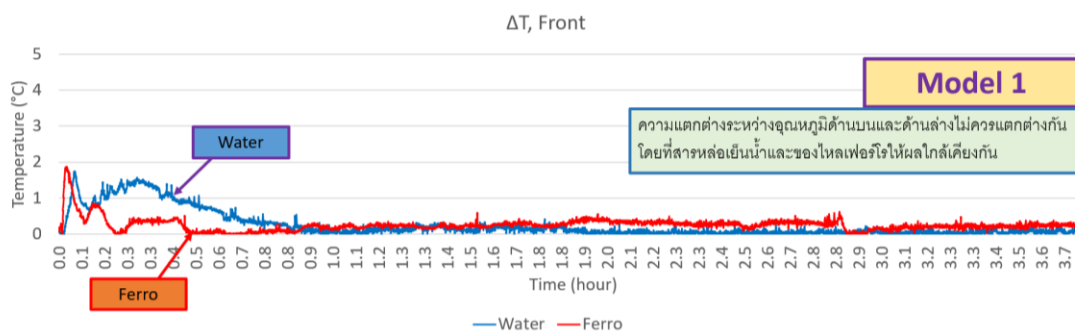
ภาพประกอบ 108 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยแบตเตอรี่ของสารหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิด

วิเคราะห์ความสามารถในการพาความร้อนออกจากระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมโดยพิจารณาจากผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก ซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 109



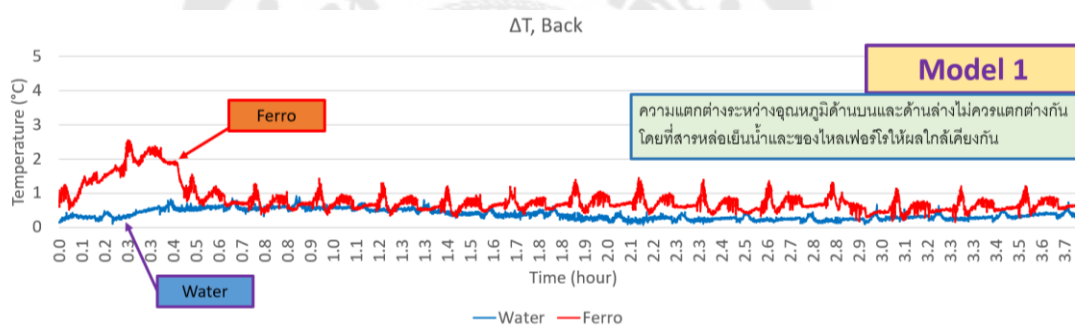
ภาพประกอบ 109 แสดงผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าและทางออก

จากภาพประกอบที่ 109 เป็นกราฟแสดงผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างทางเข้าและทางออกของน้ำหล่อเย็น และพบว่าสารหล่อเย็นเฟอร์โรมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงกว่าน้ำที่เป็นสารหล่อเย็น แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการพาความร้อนออกจากระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่สารหล่อเย็นเฟอร์โรดีกว่าน้ำที่เป็นสารหล่อเย็น



ภาพประกอบ 110 ผลต่างอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้านหน้า

จากภาพประกอบที่ 110 ผลต่างของอุณหภูมิด้านหน้าของสารหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิด ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีอุณหภูมิก่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลดีต่อแบตเตอรี่



ภาพประกอบ 111 ผลต่างอุณหภูมิของแบตเตอรี่ด้านหลัง

จากภาพประกอบ 111 ผลต่างของอุณหภูมิด้านหลังของสารหล่อเย็นทั้ง 2 ชนิด ไม่แตกต่างกัน เช่นเดียวกับด้านหน้า

จากกราฟที่เปรียบเทียบมาทั้งหมดสามารถสรุปผลจากการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงความเหมาะสม และความสารถในการดึงความร้อนออกจากระบบได้ดังตาราง 7

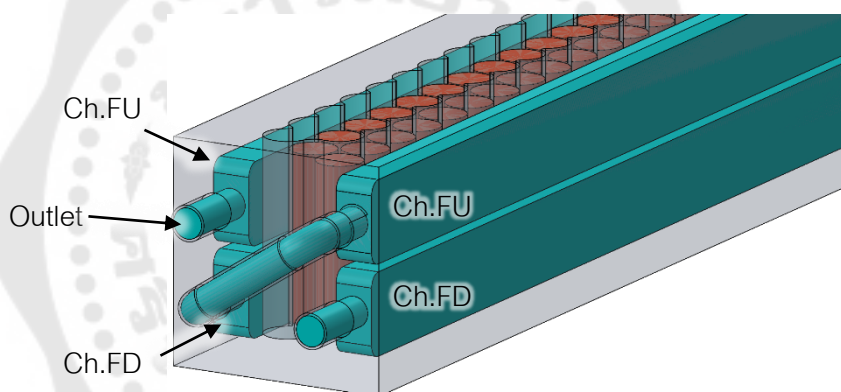
ตาราง 7 สรุปผลการเปรียบเทียบสารหล่อเย็นระหว่างน้ำ และของไหลเฟอร์โร

รายการเปรียบเทียบ	Water Coolant	Ferro Coolant	สารหล่อเย็นที่ดีกว่า
อุณหภูมิเฉลี่ยของแบตเตอรี่	28.87 °C	26.16 °C	Ferro
ผลต่างของอุณหภูมิเข้าและออก	1.16 °C	2.73 °C	Ferro
ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านหน้า	0.14 °C	0.28 °C	Ferro
ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านหลัง	0.37 °C	0.6 °C	ไม่แตกต่าง

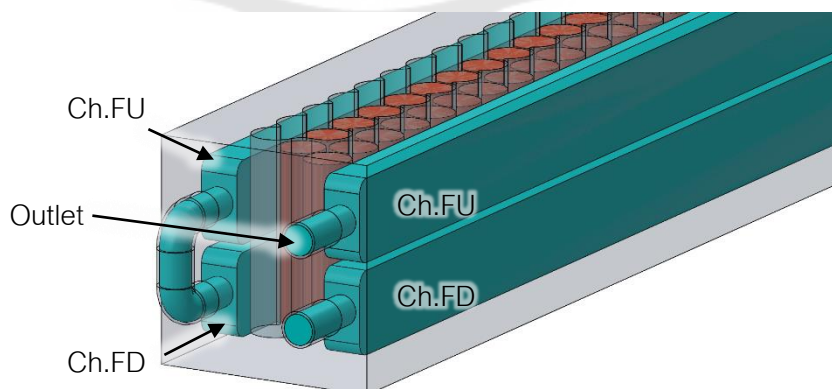
### 5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข

ในการคำนวณเชิงตัวเลขได้กำหนดขนาดของกริดและวิเคราะห์คำตอบ เพื่อให้การคำนวณโดยโปรแกรมผลเฉลยที่ได้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกริด และให้ได้ผลลัพธ์ของคำตอบที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด โดยการทำการวิเคราะห์กริด (Grid Independent Analysis) โดยตรวจสอบคำตอบของอนุภูมิภาค 5 ตำแหน่ง ดังนี้

1. อนุภูมิภาคของน้ำทางออก (Outlet)
2. อนุภูมิภาคของช่องทางน้ำไหลด้านหน้าส่วนล่าง (Ch.FD)
3. อนุภูมิภาคของช่องทางน้ำไหลด้านหน้าส่วนบน (Ch.FU)
4. อนุภูมิภาคของช่องทางน้ำไหลด้านหลังส่วนล่าง (Ch.BD)
5. อนุภูมิภาคของช่องทางน้ำไหลด้านหลังส่วนบน (Ch.BU)



(ก) แสดงตำแหน่งช่องทางน้ำไหลในโมเดลที่ 1



(ข) แสดงตำแหน่งช่องทางน้ำไหลในโมเดลที่ 2

ภาพประกอบ 112 แสดงตำแหน่งช่องทางน้ำไหลสำหรับใช้ในการตรวจสอบกริด

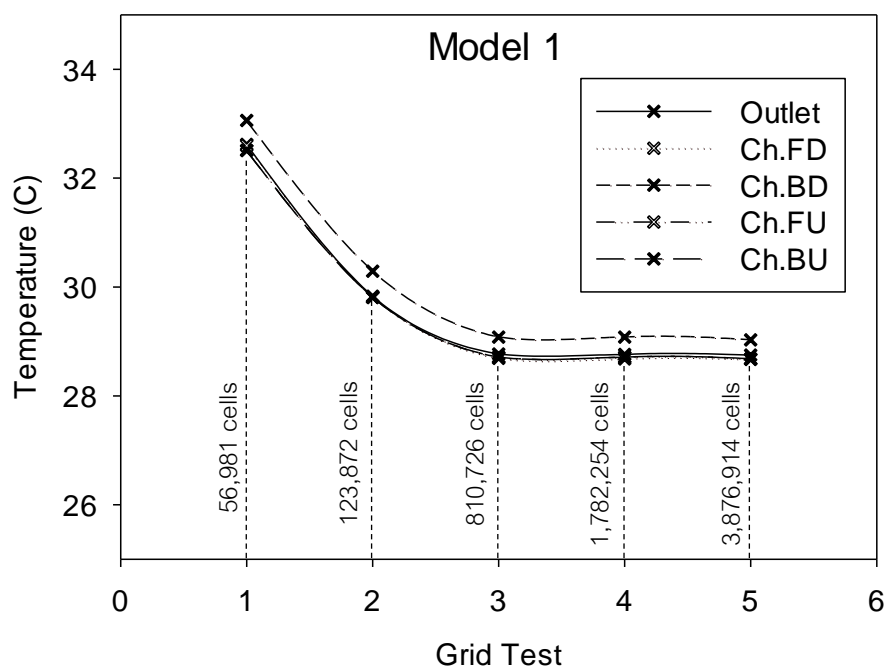
จากการวิเคราะห์ผลเฉลยคำตอบของกริดทั้ง 5 ตำแหน่งจากภาพประกอบที่ 112 ได้  
 คุณสมบัติที่กริดต่างๆ ดังตารางที่ 8

ตาราง 8 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 1

Model 1										
Grid	outlet	%error	Ch.FD	%error	Ch.BD	%error	Ch.FU	%error	Ch.BU	%error
56,981	32.62		32.60		33.06		32.51		32.51	
123,872	29.83	8.55	29.81	8.56	30.29	8.38	29.81	8.31	29.81	8.31
810,726	28.77	3.55	28.69	3.76	29.08	3.99	28.71	3.69	28.71	3.69
1,782,254	28.76	0.03	28.68	0.03	29.08	0.00	28.71	0.00	28.71	0.00
3,876,914	28.75	0.03	28.67	0.03	29.03	0.17	28.68	0.10	28.68	0.10

จากตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดย Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks โดยทำการตรวจเช็คข้อมูล 5 ตำแหน่ง ได้แก่คุณสมบัติทางออกของของไหล และช่องการไหลภายใน ชุดทดสอบระบบระบายความร้อนทั้ง 4 ช่อง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ ผลคำตอบของกริดที่ไม่ทำให้ข้อมูลเปลี่ยนแปลงได้ดังภาพประกอบที่ 113





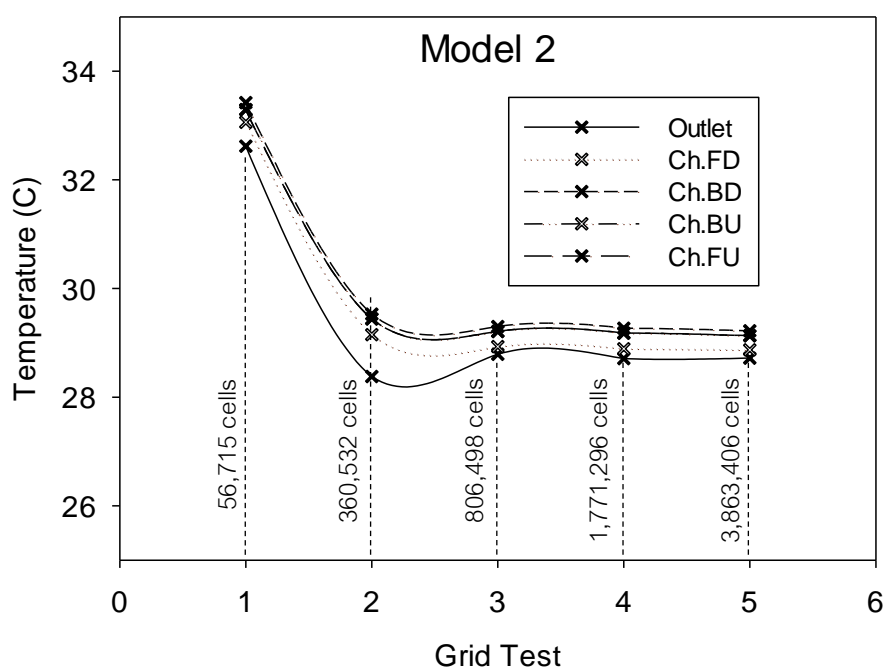
ภาพประกอบ 113 แสดงกราฟตรวจสอบกริดของโมเดลที่ 1

จากข้อมูลกริดต่างๆ ของโมเดลที่ 1 พบว่าที่ขนาดของกริด 810,726 เซลล์ เป็นต้นไปไม่ทำให้ผลเฉลยค่าตอบเปลี่ยนแปลง ดังนั้นโมเดลที่ 1 จึงเลือกผลคำตอบในการวิเคราะห์โดย Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks ที่ข้อมูลขนาดของกริด 810,726 เซลล์ และโมเดลที่ 2 มีข้อมูลดังตารางที่ 9

ตาราง 9 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 2

Model 2										
Grid	outlet	%error	Ch.FD	%error	Ch.BD	%error	Ch.BU	%error	Ch.FU	%error
56,715	32.62		33.06		33.42		33.29		33.29	
360,532	28.38	13.00	29.15	11.83	29.53	11.64	29.44	11.57	29.44	11.57
806,498	28.79	1.44	28.93	0.75	29.30	0.78	29.21	0.78	29.21	0.78
1,771,296	28.71	0.28	28.89	0.14	29.27	0.10	29.18	0.10	29.18	0.10
3,863,406	28.72	0.03	28.87	0.07	29.22	0.17	29.13	0.17	29.13	0.17

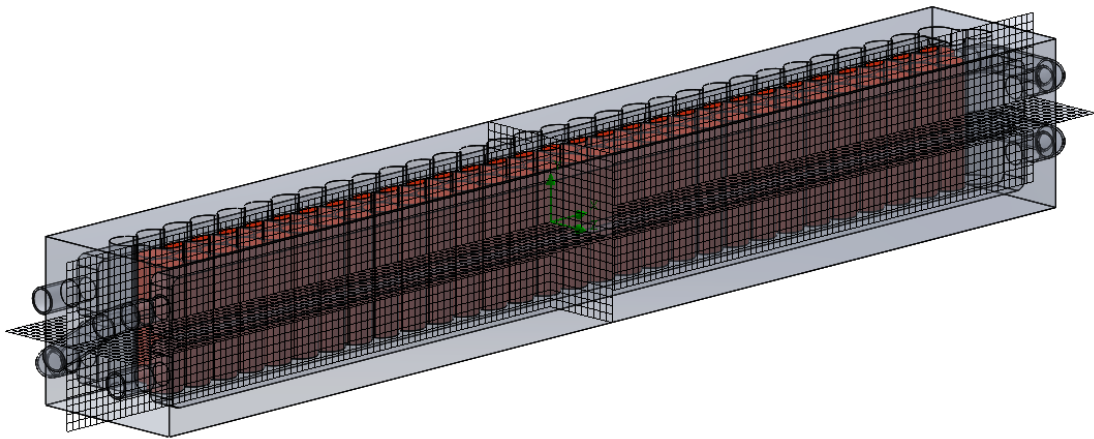
จากตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดย Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks โดยทำการตรวจเช็คข้อมูล 5 ตำแหน่ง ได้แก่ อุณหภูมิทางออกของของไหล และช่องการไหลภายใน ชุดทดสอบระบบระบายความร้อนทั้ง 4 ช่อง ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ ผลคำตอบของกริดที่ไม่ทำให้ข้อมูลเปลี่ยนแปลงได้ดังภาพประกอบที่ 114



ภาพประกอบ 114 แสดงกราฟตรวจสอบกริดของโมเดลที่ 2

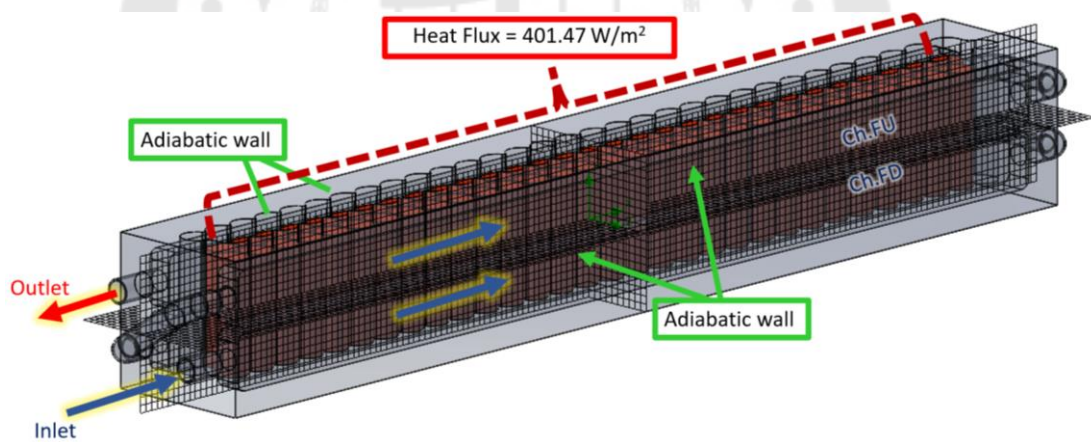
จากข้อมูลกริดของโมเดลที่ 2 พบว่าที่ขนาดของกริด 1,771,296 เซลล์ เป็นต้นไปไม่ทำให้ผลเฉลยคำตอบเปลี่ยนแปลง ดังนั้นโมเดลที่ 2 จึงเลือกผลคำตอบในการวิเคราะห์โดย Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks ที่ข้อมูลขนาดของกริด 1,771,296 เซลล์

เมื่อได้กริดที่เหมาะสมจากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 1 ดังภาพประกอบที่ 115

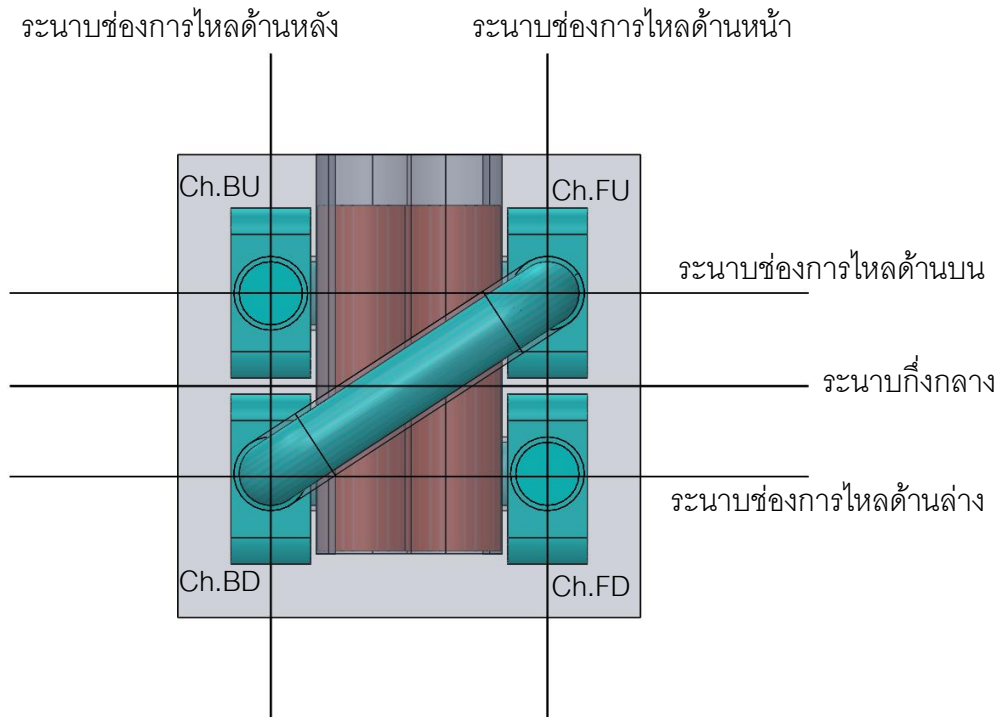


ภาพประกอบ 115 แสดงกริดของโมเดลที่ 1

การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จะถูกกำหนดทางเข้าออกของน้ำ และ กำหนดความร้อนที่เกิดขึ้นด้านในของบล็อกน้ำ (พื้นที่ของแบตเตอรี่)  $401.47 \text{ W/m}^2$  พื้นที่ส่วนอื่นเป็นผนังอะเดียแบติกไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนดังภาพประกอบ 116



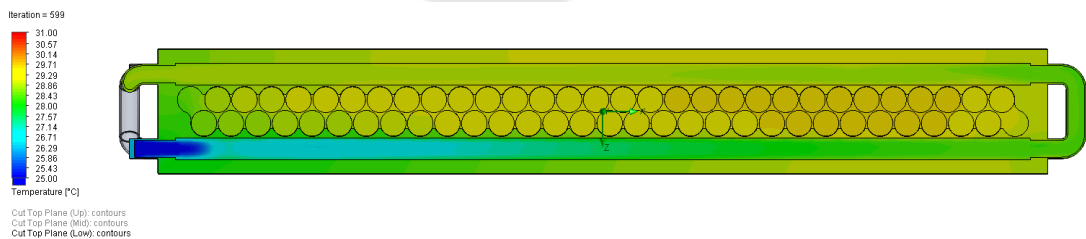
(ก) แสดงเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง



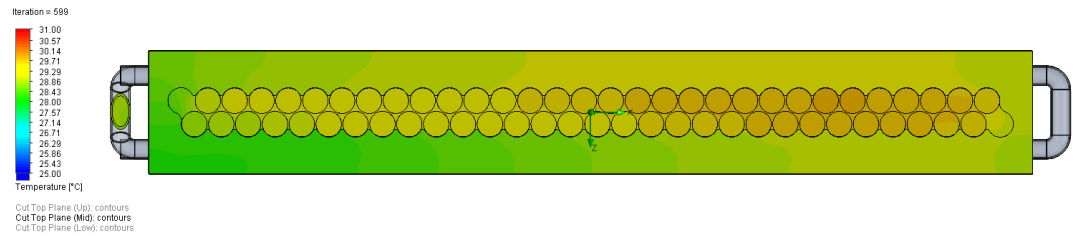
(ข) แสดงตำแหน่งของระนาบการแสดงผลเฉลยคำตอบ

ภาพประกอบ 116 แสดงเงื่อนไขการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 1

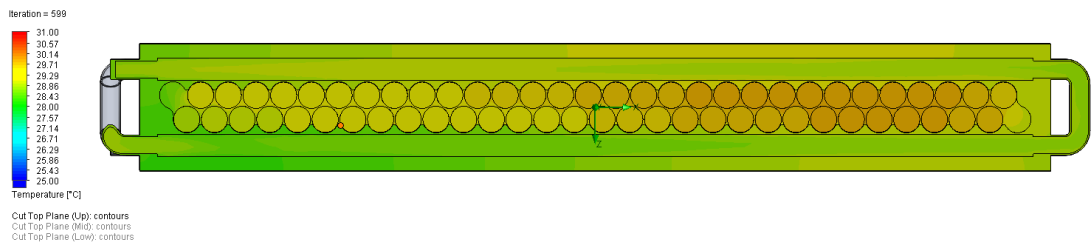
จากภาพประกอบ 116 ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks โดยทำการวิเคราะห์จนกระทั่งค่าเสถียรค้างคั้งที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งได้ผลเฉลยของอุณหภูมิสารหล่อเย็นของปัญหาดังแสดงในภาพประกอบ 117



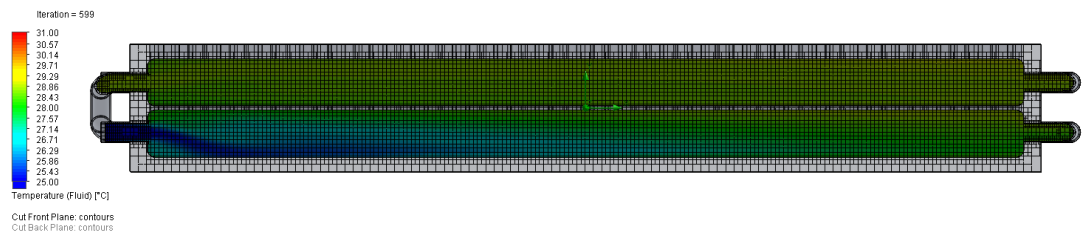
(ก) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณช่องน้ำไหลด้านล่าง



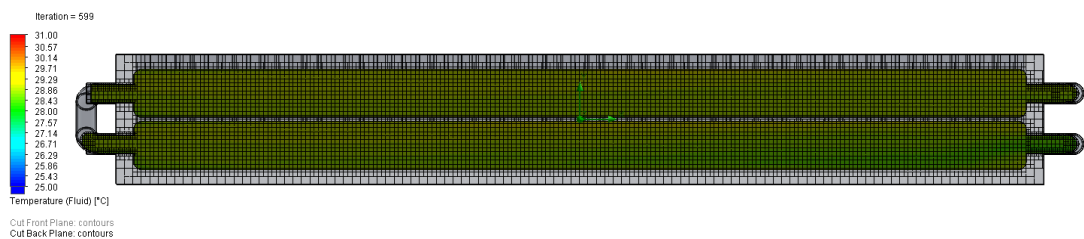
(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณกึ่งกลาง



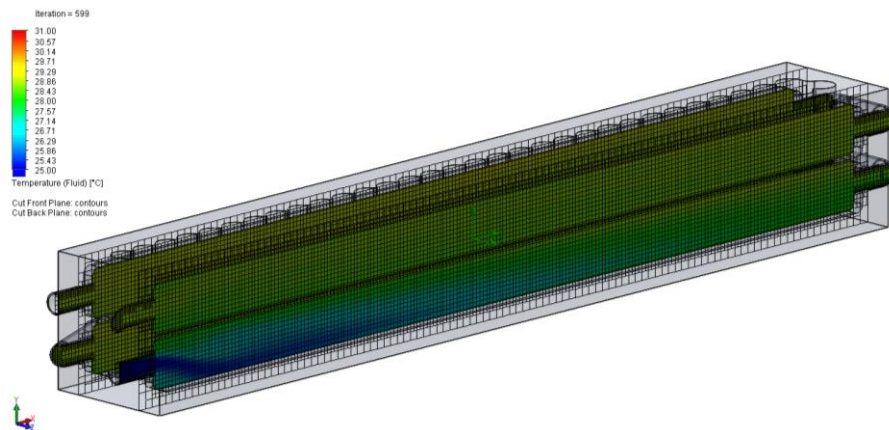
(ค) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณช่องน้ำไหลด้านบน



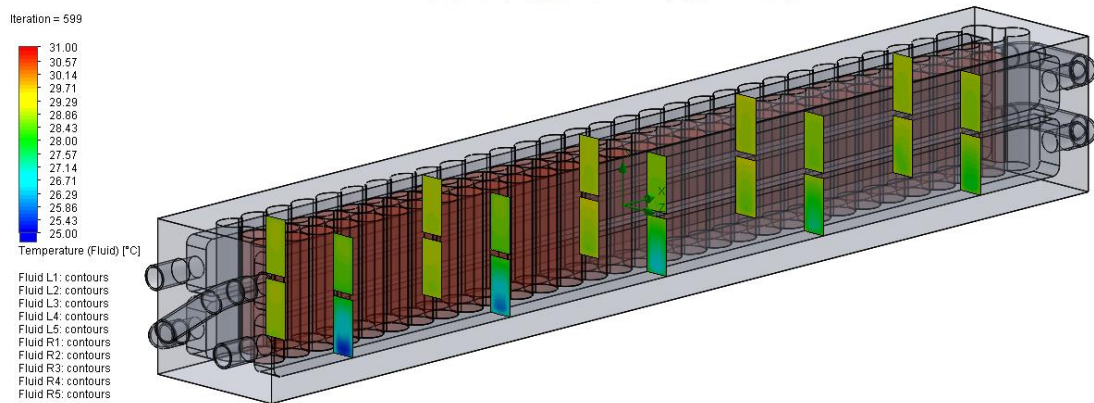
(ง) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านข้าง บริเวณช่องน้ำไหลด้านหน้า



(จ) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านข้าง บริเวณช่องน้ำไหลด้านหลัง



(จ) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองสามมิติ

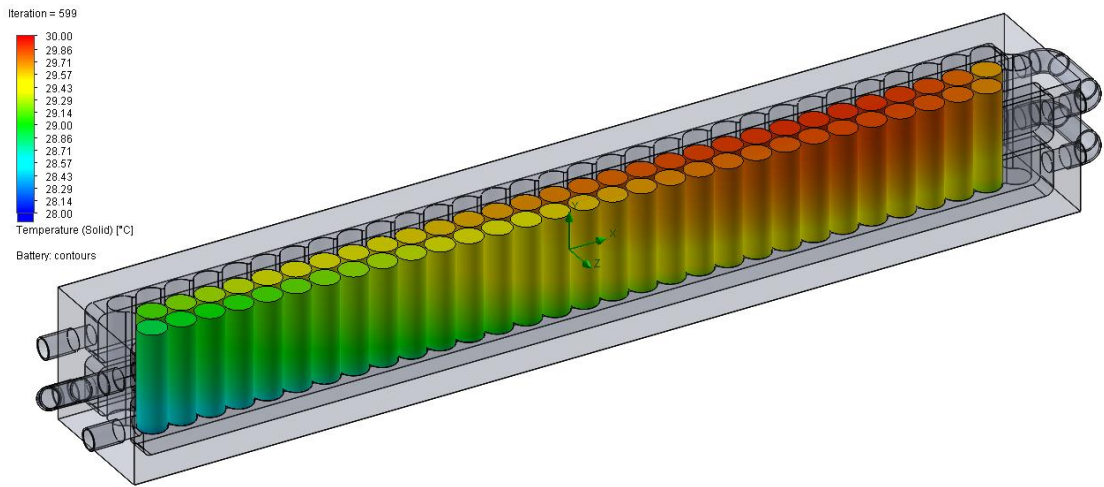


(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในช่องการไหลมุมมองสามมิติ

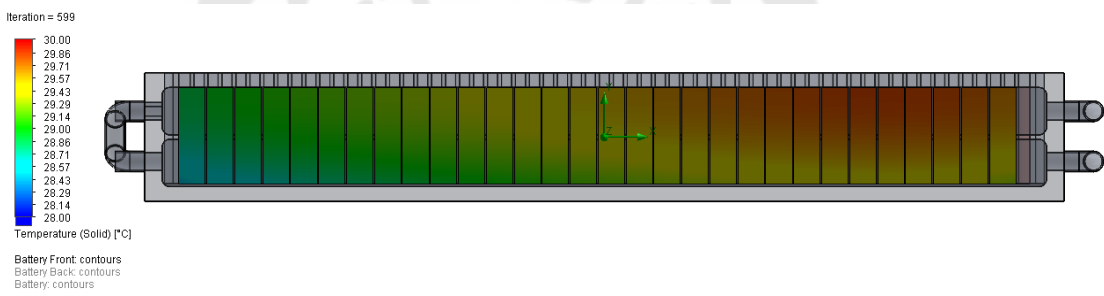
ภาพประกอบ 117 ผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 1

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถสรุปผลเฉลยของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดังภาพประกอบที่ 118

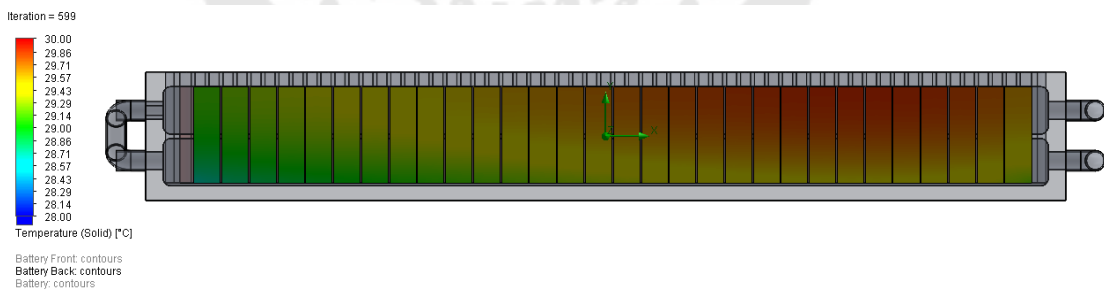




(ก) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่



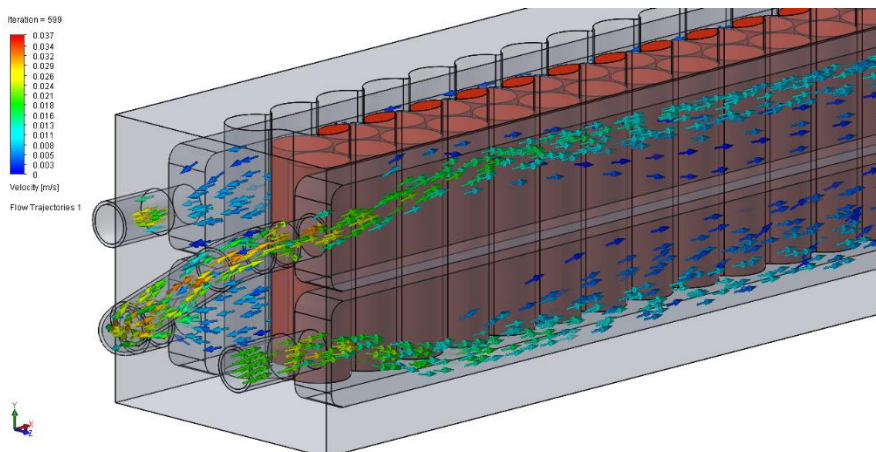
(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ แถวด้านหน้า



(ค) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ แถวด้านหลัง

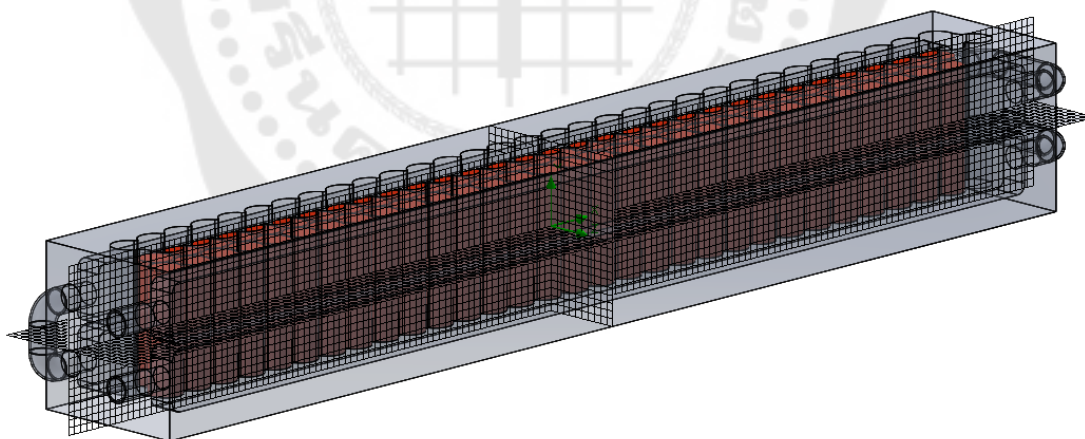
ภาพประกอบ 118 ผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 1

ความเร็วของสารหล่อเย็น รวมถึงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลภายในชุด  
ดังแสดงในภาพประกอบ 119



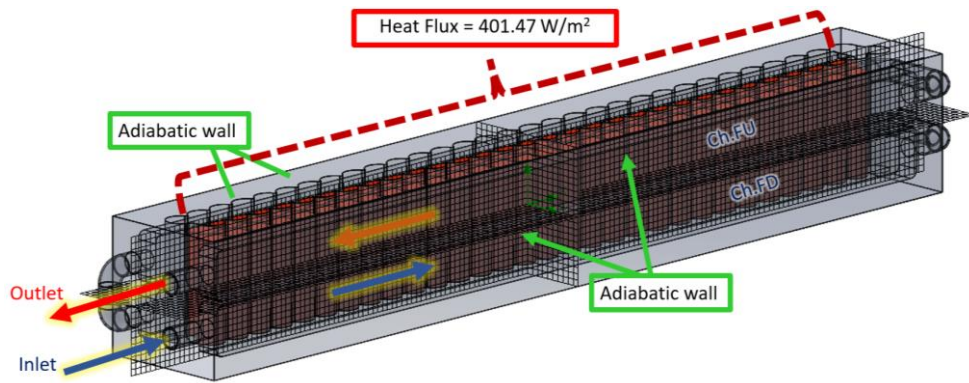
ภาพประกอบ 119 ผลเฉลยความเร็วการไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโมเดลที่ 1

ในส่วนของโมเดลที่ 1 นั้น องค์ประกอบ พารามิเตอร์ รวมถึงเงื่อนไขที่กำหนดในการวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้ทำการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับโมเดลที่ 2 โดยที่แตกต่างกันมีเพียงรูปแบบการไหลที่เป็นไปตามโมเดลที่ 2 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 2 ได้กริดดังภาพประกอบที่ 120

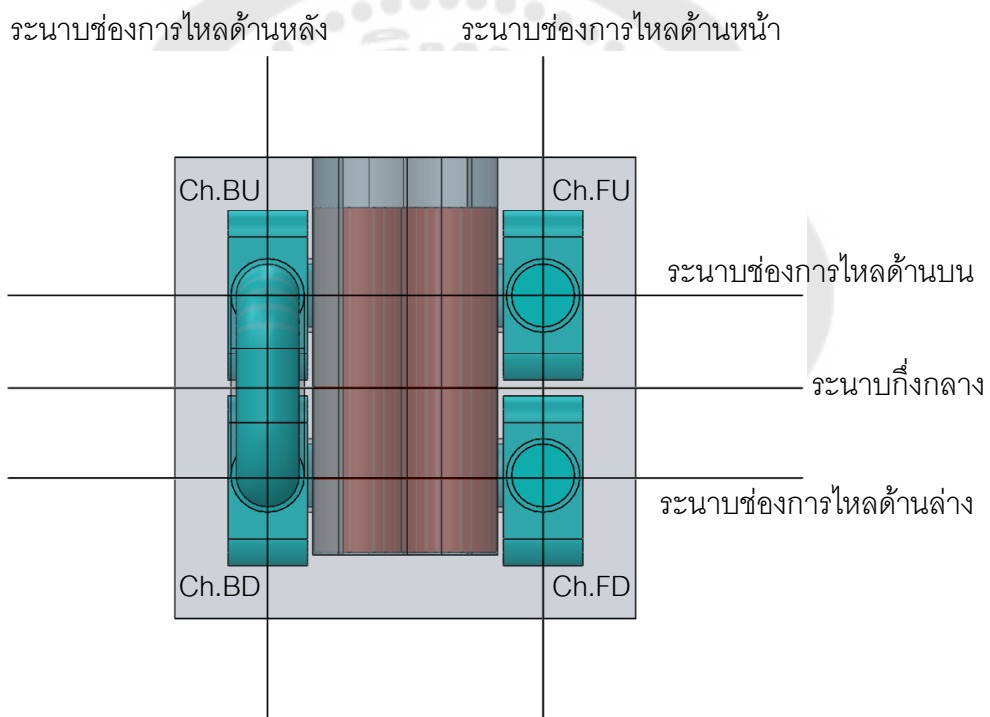


ภาพประกอบ 120 แสดงกริดของโมเดลที่ 2

การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในโมเดลที่ 2 จะถูกกำหนดทางเข้าออกของน้ำ และกำหนดความร้อนที่เกิดขึ้นด้านในของปลอกน้ำ (พื้นที่ของแบตเตอรี่)  $401.47 \text{ W/m}^2$  พื้นที่ส่วนอื่นเป็นผนังอะเดียแบติกไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน คล้ายกับโมเดล 1 โดยมีรายละเอียดดังภาพประกอบ 121



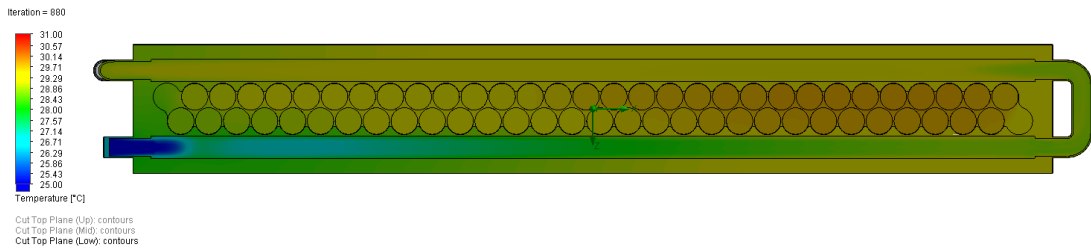
(ก) แสดงเงื่อนไขขอบเขตการทดลอง



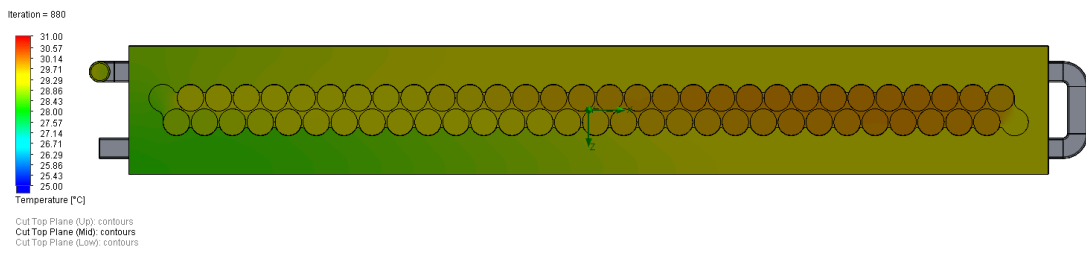
(ข) แสดงตำแหน่งของระนาบการแสดงผลเฉลยคำตอบ

ภาพประกอบ 121 แสดงเงื่อนไขการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 2

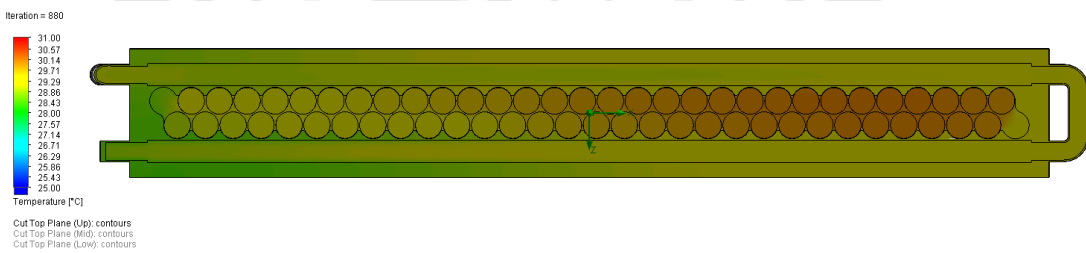
จากเงื่อนไขตามภาพประกอบ 121 ได้ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks โดยทำการวิเคราะห์จนกระทั่งค่าเสถียรค้างคั้งที่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งได้ผลเฉลยของอุณหภูมิสารหล่อเย็นของปัญหาดังแสดงในภาพประกอบ 122



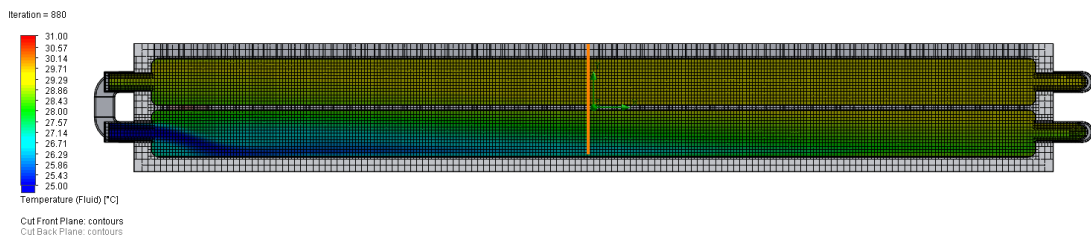
(ก) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณช่องน้ำไหลด้านล่าง



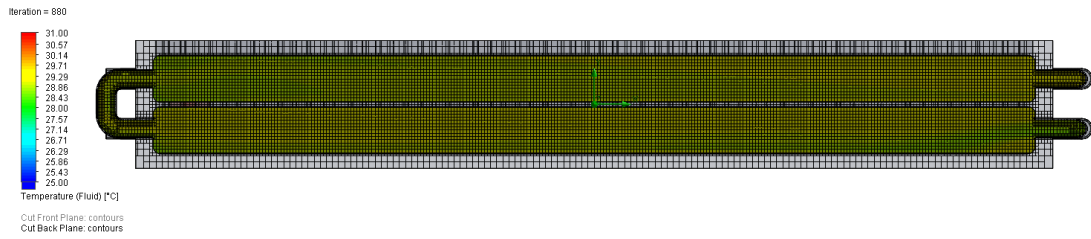
(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณกึ่งกลาง



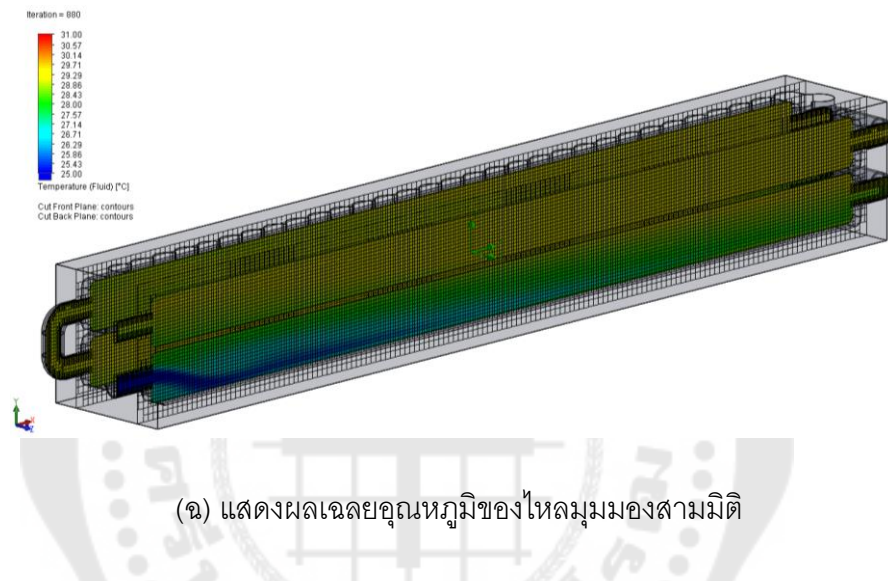
(ค) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านบน บริเวณช่องน้ำไหลด้านบน



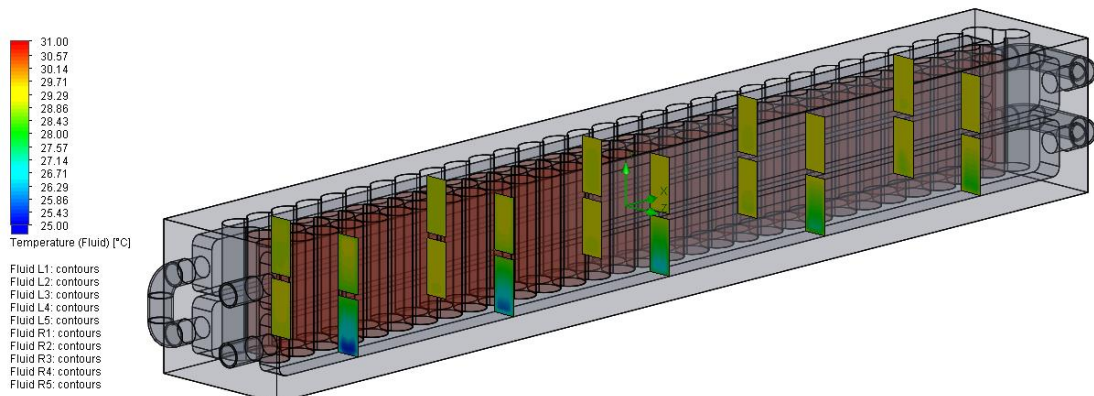
(ง) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านข้าง บริเวณช่องน้ำไหลด้านหน้า



(จ) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองด้านข้าง บริเวณช่องน้ำไหลด้านหลัง



(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลมุมมองสามมิติ

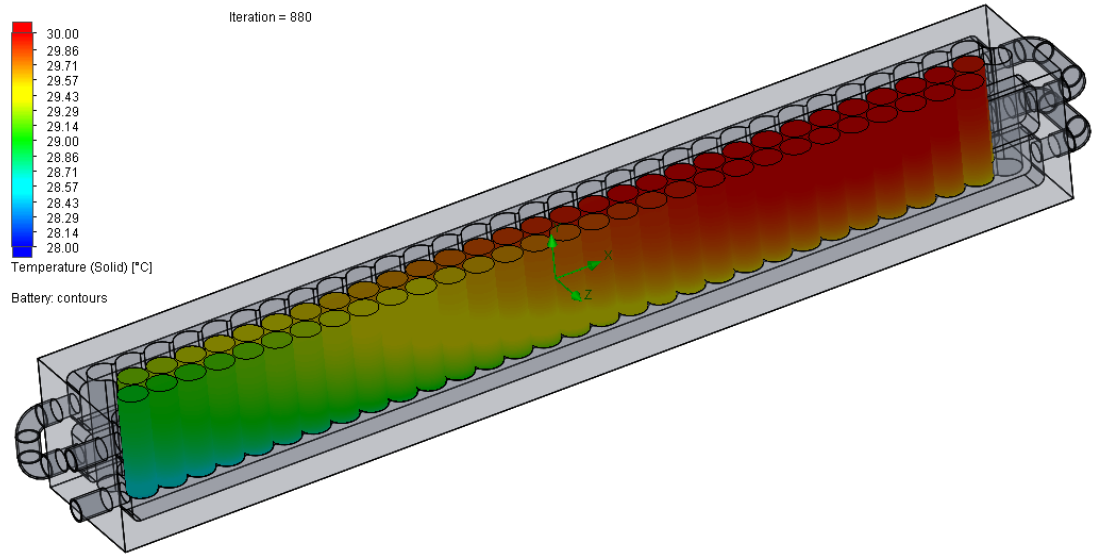


(ค) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในช่องการไหลมุมมองสามมิติ

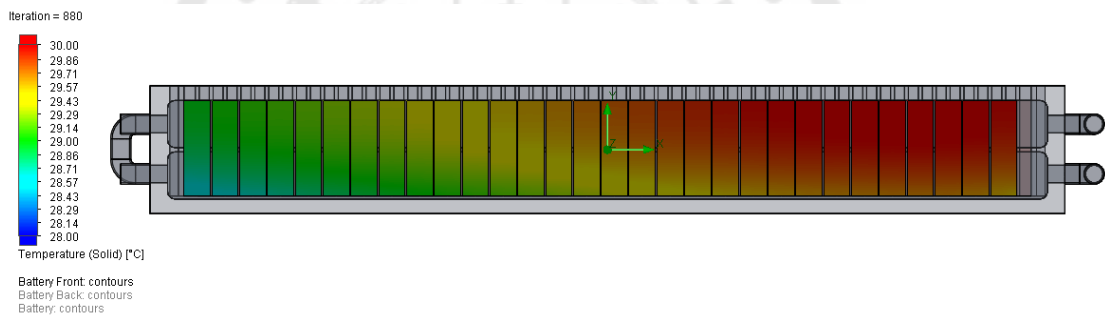
ภาพประกอบ 122 ผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 2

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถสรุปผลเฉลยของอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดังภาพประกอบที่ 123

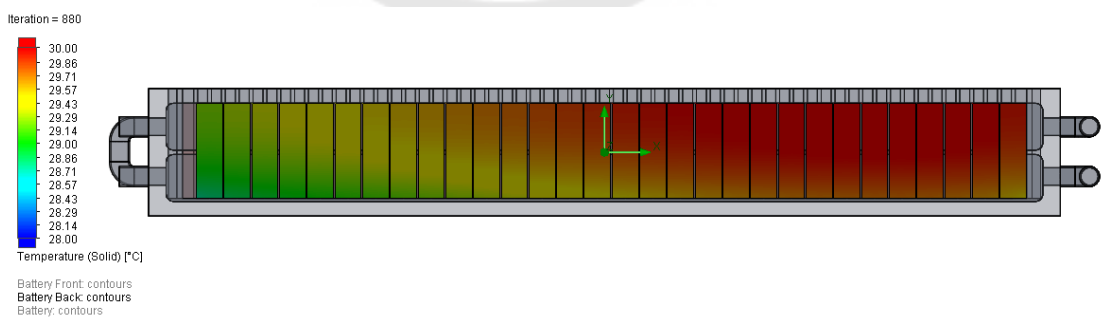




(ก) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่



(ข) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ แถวด้านหน้า

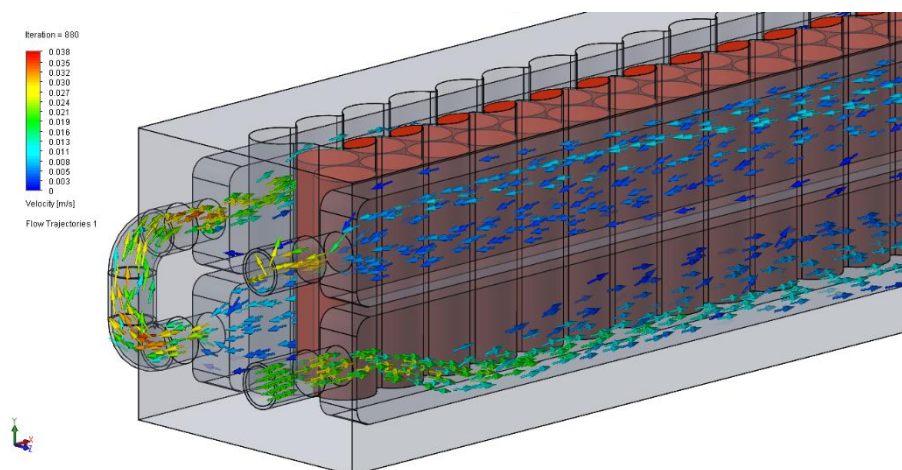


(ค) แสดงผลเฉลยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ แถวด้านหลัง

ภาพประกอบ 123 ผลเฉลยอุณหภูมิของไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โมเดลที่ 2



และความเร็วของสารหล่อเย็นในโมเดลที่ 2 รวมถึงรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นภายในช่องการไหลภายในชุดดังแสดงในภาพประกอบ 124



ภาพประกอบ 124 ผลเฉลยความเร็วการไหลในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโมเดลที่ 2

ผลเฉลยของปัญหาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยโปรแกรม Flow Simulation จากโปรแกรม Solidworks ทั้งโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ได้ผลคำตอบดังตารางที่ 10

ตาราง 10 ตารางแสดงผลคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

	Temperature (°C)				
	Outlet	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
Model 1 (810,726)	28.77	28.69	29.08	28.71	28.71
Model 2 (1,771,296)	28.71	28.89	29.27	29.18	29.18

#### หมายเหตุ

รูปแบบการไหล Model1 Ch1:FD > Ch2:BD > Ch3:FU > Ch4:BU

รูปแบบการไหล Model2 Ch1:FD > Ch2:BD > Ch3:BU > Ch4:FU

จากตารางอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ทางออก จะเป็นความสามารถในการพาความร้อน ออกจากระบบ เนื่องจากแหล่งพลังงานฟลักซ์ความร้อน และอุณหภูมิของสารหล่อเย็นทางเข้า มี เงื่อนไขเดียวกัน

ในการทดลองที่กล่าวมานั้น เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วย วิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายใต้เงื่อนไขเดียวกันคือ สารหล่อเย็นที่ทดสอบคือน้ำ อุณหภูมิทางเข้าประมาณ 25 องศาเซลเซียส และความร้อนที่เกิดขึ้นจากแบตเตอรี่ด้วยค่าฟลักซ์ ความร้อน  $401.47 \text{ W/m}^2$  และอ่านผลคำตอบเฉพาะอุณหภูมิทางออกของสารหล่อเย็นได้ผลดัง ตารางที่ 11 สำหรับโมเดลที่ 1 และตารางที่ 12 สำหรับโมเดล 2

ตาราง 11 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขใน โมเดลที่ 1

Ch.	การทดลอง	การวิเคราะห์เชิงตัวเลข	%error
Outlet	28.07	28.77	0.62
FD	26.6	28.69	1.89
BD	27.11	29.08	1.75
FU	26.34	28.71	2.15
BU	26.61	28.99	2.14

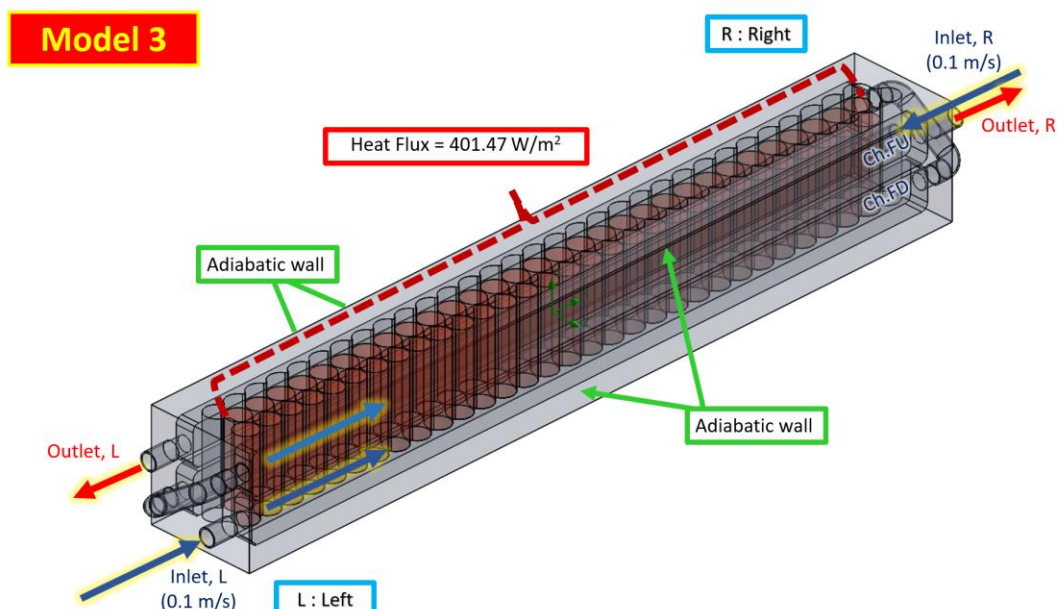
ตาราง 12 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลขใน โมเดลที่ 2

Ch.	การทดลอง	การวิเคราะห์เชิงตัวเลข	%error
Outlet	26.32	28.71	2.17
FD	27.43	28.89	1.30
BD	29.32	29.27	0.04
FU	28.09	28.97	0.77
BU	28.96	29.18	0.19

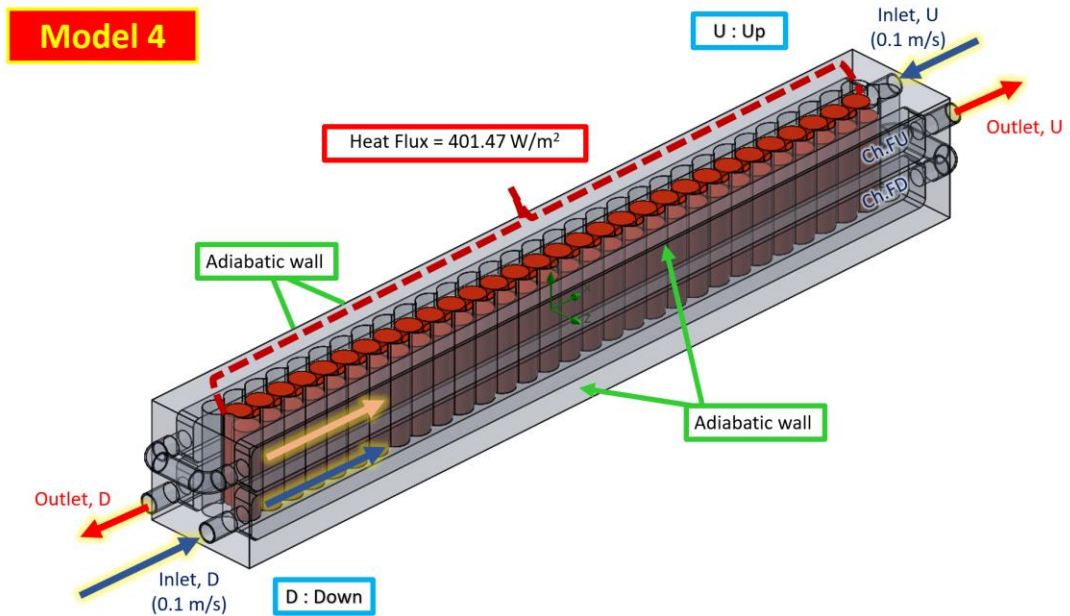
ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณได้ผลในทิศทางเดียวกันคือโมเดลที่ 1 สามารถพาความร้อนออกจากระบบได้ดีกว่า โดยผลคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองโดยมีค่าความแตกต่างไม่เกิน 2.17 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถทำนายรูปแบบและผลคำตอบได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

#### 5.4 การพัฒนารูปแบบการระบายความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

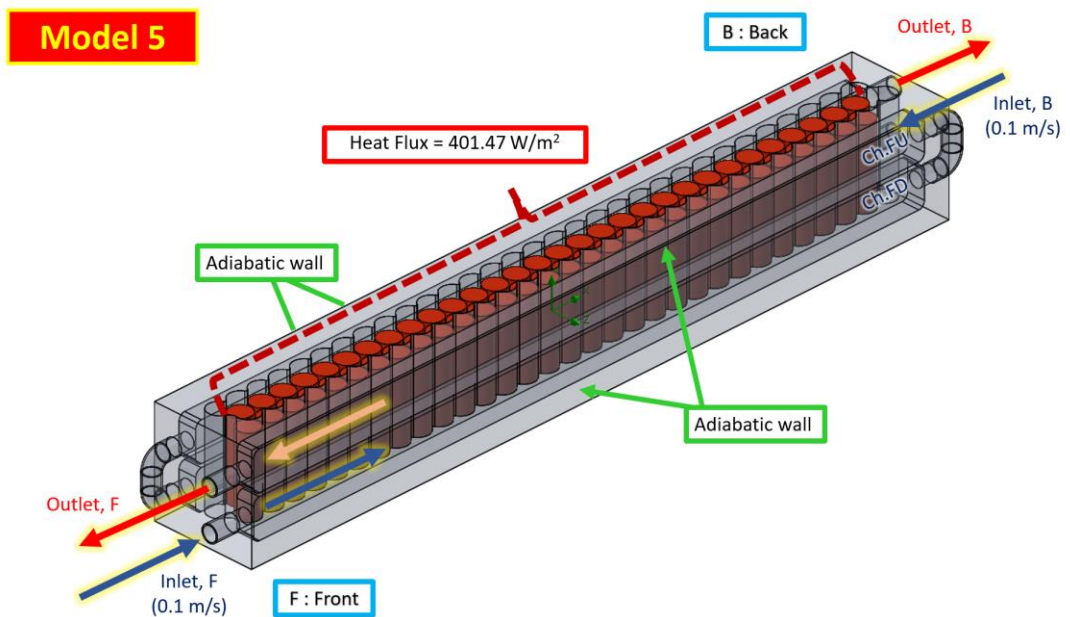
จากระบบระบายความร้อนที่ได้ออกแบบไว้ 2 โมเดล เป็นการระบายความร้อนแบบสารหล่อเย็นไหลเข้าทางเดียว ซึ่งให้ผลการระบายความร้อนมีข้อจำกัดเกี่ยวกับตำแหน่งความร้อนที่สะสมจากรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็น จึงได้เกิดเป็นแนวทางการพัฒนาจากรูปแบบที่ไหลเข้าทางเดียว เป็นสารหล่อเย็นไหลเข้า 2 ทาง ซึ่งได้ออกแบบรูปแบบการไหล ดังภาพประกอบ 125 (ก) โมเดลที่ 3 (ข) โมเดลที่ 4 และ (ค) โมเดลที่ 5 โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลองเหมือนกับโมเดล 1 และ โมเดล 2 ต่างกันที่อัตราการไหลทางเข้าของโมเดลที่ 3 โมเดลที่ 4 และ โมเดลที่ 5 เป็นครึ่งหนึ่งของโมเดลที่ 1 และ โมเดลที่ 2 เพื่อให้อัตราการไหลของสารหล่อเย็นรวมทั้งระบบเท่าเดิม



(ก) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของโมเดลที่ 3



(ข) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของโมเดลที่ 4



(ค) การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของโมเดลที่ 5

ภาพประกอบ 125 แสดงเงื่อนไขขอบเขตการทดลองของโมเดลต่างๆ

จากการกำหนดเงื่อนไข และขอบเขตข้อมูลตั้งต้น เพื่อวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทั้ง 3 โมเดลที่ออกแบบเพิ่มเติม โดยได้ผลเฉลยในกริดต่างๆ ดังตาราง

ตาราง 13 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 3

Model 3						
Grid	Outlet 1	Outlet 2	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
274,565	28.4	28.4	29.13	29.08	29.14	29.08
480,688	28.4	28.46	29	28.96	29	28.97
1,371,005	28.39	28.37	28.95	28.91	28.95	28.91
1,770,145	28.34	28.34	28.96	28.93	28.96	28.93
3,859,705	28.32	28.3	28.94	28.9	28.94	28.9

จากตารางที่ 13 ผลเฉลยคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 3 ให้ผลคำตอบใกล้เคียงกันในทุกกริด แต่ข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในการวิเคราะห์นั้น ได้เลือกข้อมูลมาใช้งานที่ขนาดกริด 1,770,145 เซลล์ สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

ตาราง 14 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 4

Model 4						
Grid	Outlet 1	Outlet 2	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
274,583	28.91	28.44	29.2	29.09	29.2	28.92
480,019	28.48	28.46	29.06	28.96	29.06	28.78
1,371,090	28.36	28.36	28.99	28.89	28.98	28.7
1,767,856	28.27	28.32	29.02	28.92	29.03	28.73
3,847,056	28.32	28.33	28.97	28.88	28.96	28.69

จากตารางที่ 14 ผลเฉลยคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 4 ให้ผลคำตอบในแต่ละกริดที่ค่าเฉลี่ยที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดในการวิเคราะห์นั้น ได้เลือกข้อมูลมาใช้งานที่ขนาดกริด 1,767,856 เซลล์ สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

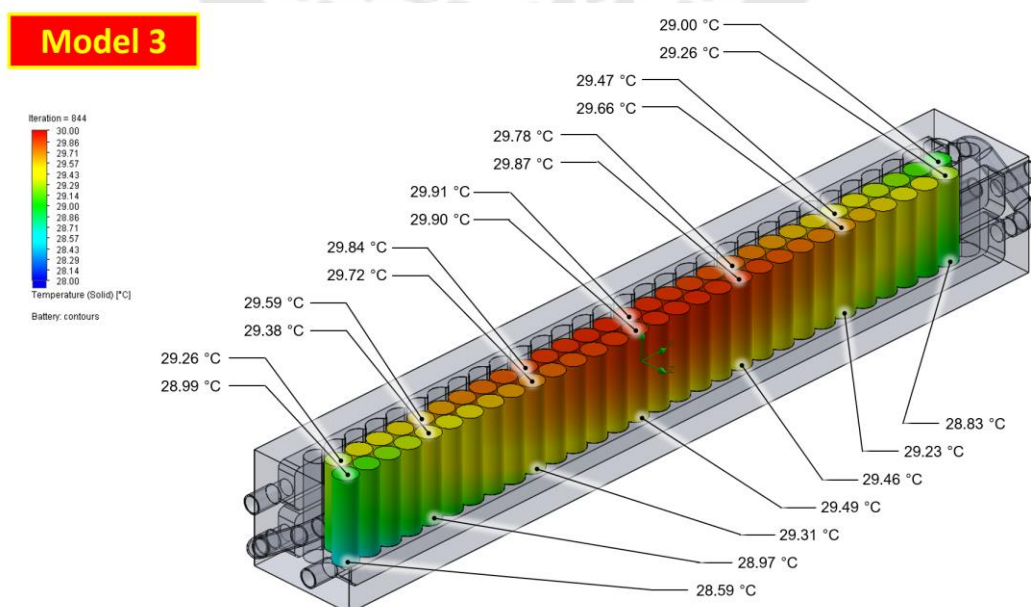


ตาราง 15 แสดงผลเฉลยจากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 5

Model 5						
Grid	Outlet 1	Outlet 2	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4
56,368	31.16	31.06	31.44	31.42	31.25	31.38
356,920	28.25	28.87	29.47	29.39	39.34	39.41
797,706	28.34	28.3	29.21	29.12	29.08	29.14
1,758,605	28.3	28.25	29.16	29.07	29.02	29.08
3,821,612	28.31	28.25	29.12	29.03	28.98	29.03

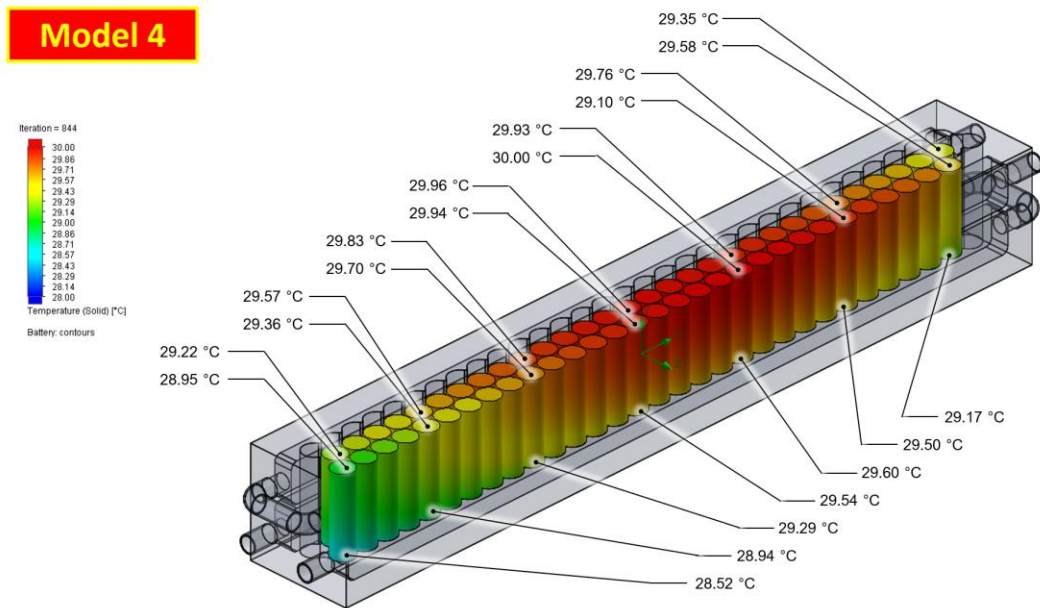
จากตารางที่ 15 ผลเฉลยคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโมเดลที่ 5 ในแต่ละกริด ได้เลือกข้อมูลมาใช้งานโดยข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดได้เลือกที่ขนาดกริด 1,758,605 เซลล์ สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการวิเคราะห์กริดที่ผลคำตอบไม่เปลี่ยนแปลงได้ผลเฉลยคำตอบของอุณหภูมิตำแหน่งด้านบน และด้านล่างของแบตเตอรี่ ดังภาพประกอบ 126 (ก) โมเดลที่ 3 (ข) โมเดลที่ 4 และ (ค) โมเดลที่ 5

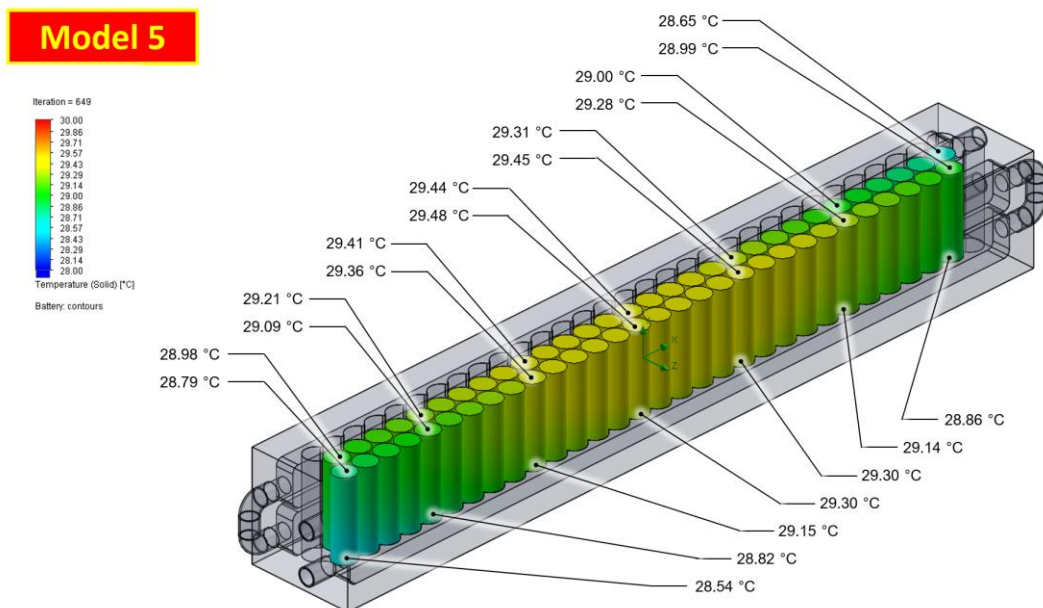


(ก) อุณหภูมิตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโมเดลที่ 3





(ข) อุณหภูมิตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโมเดลที่ 4

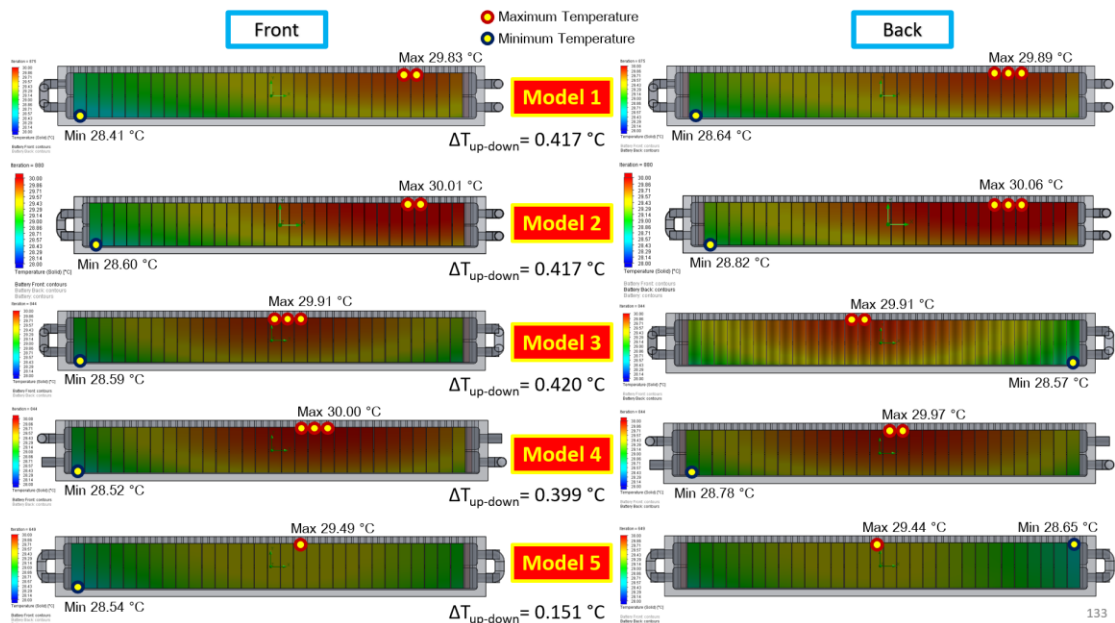


(ค) อุณหภูมิตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโมเดลที่ 5

ภาพประกอบ 126 แสดงอุณหภูมิตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของโมเดลต่างๆ

จากผลเฉลยคำตอบอุณหภูมิของโมเดลที่ 3 โมเดลที่ 4 และโมเดลที่ 5 มาวิเคราะห์ร่วมกับผลเฉลยคำตอบอุณหภูมิของโมเดลที่ 1 และ โมเดลที่ 2 เพื่อตรวจสอบตำแหน่งอุณหภูมิที่

ร้อนสุด และตำแหน่งอุณหภูมิที่เย็นที่สุดของในแต่ละโมเดล ได้ผลเฉลยคำตอบอุณหภูมิรูปภาพประกอบที่ 127



ภาพประกอบ 127 แสดงตำแหน่งอุณหภูมิที่สูงและต่ำสุดของแบตเตอรี่ในแต่ละโมเดล

จากภาพประกอบที่ 127 จะพบว่าการกระจายความร้อนในโมเดลที่ 3 และโมเดลที่ 5 มีความสมมาตรมากกว่าโมเดลที่ 1 โมเดลที่ 2 และโมเดลที่ 4 เป็นผลมาจากการกำหนดทิศทางการไหลของสารหล่อเย็นทางเข้า ทางออก โดยในโมเดลที่ 5 เป็นโมเดลที่มีอุณหภูมิของแบตเตอรี่ต่ำที่สุด

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

การเกิดความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมจากภาระทางไฟฟ้าจากการอัดและคายประจุจากการทดลองมีสมการความร้อนเป็น  $Y = (2 \times 10^{-12})X^3 - (1 \times 10^{-7})X^2 + (0.0019)X + 24.79$  โดยที่ Y คือความร้อนที่เกิดขึ้น หน่วยเป็นองศาเซลเซียส และ X คือเวลาในช่วง 0-15 ชั่วโมง แบตเตอรี่เมื่อมีการใช้งานไม่ว่าจะเป็นการอัดประจุ เพื่อเตรียมนำแบตเตอรี่มาใช้งาน และการคายประจุไฟฟ้า ในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดความร้อนทั้ง 2 แบบ แต่ความร้อนที่เกิดจากการคายประจุไฟฟ้าจะส่งผลด้านความร้อนมากกว่าการอัดประจุไฟฟ้า แต่ถ้าหากมีการใช้งานแบบผสมผสานกันดังผลการทดลองจะพบว่าเมื่อทำการอัดประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่จะมีอุณหภูมิลดลง โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิขณะที่ทำการอัดประจุจะน้อยกว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิขณะที่ทำการคายประจุ ซึ่งเป็นผลภาพรวมแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงขึ้น

การระบายความร้อนระหว่างโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 ด้วยน้ำหล่อเย็นขณะที่มีการอัดและคายประจุไฟฟ้า ความร้อนเกิดขึ้นในช่วงที่ภาระทางไฟฟ้าทำงานแม้ว่าจะในช่วงการระบายความร้อน แต่การระบายความร้อนที่เพียงพอจะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ โดยในการระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นหล่อเย็น ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าโมเดลที่ 1 จะมีความสามารถในการลดความร้อนของแบตเตอรี่ได้ดีกว่าโมเดลที่ 2 ซึ่งพิจารณาข้อมูลจาก อุณหภูมิของแบตเตอรี่พบว่าโมเดลที่ 1 สามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้มากกว่าโมเดลที่ 2 ผลความแตกต่างของอุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออกของสารหล่อเย็น โดยพบว่าโมเดลที่ 1 มีผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 1.16 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าโมเดลที่ 2 ที่มีผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 0.65 องศาเซลเซียส เป็นเหตุให้โมเดลที่ 1 สามารถดึงความร้อนออกจากระบบได้ดีกว่าโมเดลที่ 2 ผลการทดลองของความแตกต่างของอุณหภูมิส่วนบนและส่วนล่างหากแตกต่างกันมากจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งโมเดลที่ 1 จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิล็กน้อย ซึ่งแบบโมเดลที่ 2 อุณหภูมิส่วนบนและส่วนล่างของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกันมากในส่วนด้านหน้า ส่วนด้านหลังแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งภาพรวมของโมเดลที่ 2 ยังไม่ดีพอในการใช้งานในระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าโมเดลที่ 1 ลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้ดีกว่าโมเดลที่ 2 ที่ 1.84%

การระบายความร้อนระหว่างสารหล่อเย็นเฟอริโรและน้ำจากการทดลองการระบายความร้อนด้วยน้ำ พบว่าโมเดลที่ 1 มีประสิทธิภาพดีกว่าโมเดลที่ 2 จึงเลือกโมเดลที่ 1 มาทำการทดสอบ

การระบายความร้อนระหว่างสารหล่อเย็น 2 ชนิดคือน้ำ และของไหลเฟอริโร ผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่ พบว่าโมเดลที่ 1 ที่ใช้สารหล่อเย็นของไหลเฟอริโรสามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้มากกว่าน้ำ เล็กน้อย ผลความแตกต่างของอุณหภูมิทางเข้า และอุณหภูมิทางออกของสารหล่อเย็น พบว่าสารหล่อเย็นของไหลเฟอริโรในโมเดลที่ 1 มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกอยู่ที่ 2.23 องศาเซลเซียส มากกว่าสารหล่อเย็นชนิดน้ำในโมเดลที่ 1 ที่มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกอยู่ที่ 1.16 องศาเซลเซียส เป็นเหตุให้สารหล่อเย็นของไหลเฟอริโรในโมเดล 1 สามารถดึงความร้อนออกจากระบบได้ดีกว่าสารน้ำ ผลการทดลองของความแตกต่างของอุณหภูมิส่วนบนและส่วนล่างพบว่าสารหล่อเย็นของไหลเฟอริโรและน้ำในโมเดลที่ 1 ให้ผลที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกัน จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าสารหล่อเย็นของไหลเฟอริโรมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนดีกว่าสารหล่อเย็นที่เป็นน้ำ 6.69% และสามารถควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 28 – 30 องศาเซลเซียส ขณะที่ทำการอัดและคายประจุไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลการทดลองการระบายความร้อนระหว่างการทดลองกับการวิเคราะห์เชิงคำนวณ ทดสอบด้วยน้ำหล่อเย็นของโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 เทียบกับผลที่ได้จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิต่อสารหล่อเย็นที่ทางออกของผลที่ได้จากการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในโมเดลที่ 1 มีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 0.62% ส่วนโมเดลที่ 2 อุณหภูมิต่อสารหล่อเย็นที่ทางออกของผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีทางของไหลเชิงพลศาสตร์มีความแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 2.17% ซึ่งความแตกต่างของผลจากการทดลองเป็นผลมาจากการหมุนเวียนของสารหล่อเย็นกลับมาระบายความร้อนอย่างต่อเนื่องในการทดลอง โดยที่การวิเคราะห์เชิงตัวเลขไม่ได้พิจารณาเงื่อนไข อีกทั้งในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นได้กำหนดแหล่งความร้อนที่เกิดขึ้นโดยตรงที่ผนังของสารหล่อเย็น โดยที่ในการทดลองความร้อนได้ถูกส่งผ่านทางชุดทดสอบระบบระบายความร้อน ส่วนในการทดลองทั้งหมดนั้นระบบการไหลของของไหลเฟอริโรในรูปแบบการไหลแบบโมเดลที่ 1 มีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ได้ดีกว่าโมเดลที่ 2

จากโมเดลที่ 1 และ โมเดลที่ 2 ที่มีกรไหลของสารหล่อเย็นเป็นแบบไหลเข้าทางเดียว ซึ่งเป็นการพาความร้อนออกจากระบบตามเส้นทางการไหลของสารหล่อเย็น ซึ่งความร้อนที่สะสมตลอดเส้นทางการไหลนั้นจะมีความร้อนเพิ่มขึ้น จึงได้มีแนวคิดที่ทดลองออกแบบลักษณะการไหลของสารหล่อเย็นใหม่เป็นแบบไหลเข้า 2 ทางภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน ในโมเดลที่ 3 โมเดลที่ 4 และโมเดลที่ 5 ที่มีรูปแบบการไหลของสารหล่อเย็นเป็นแบบไหลเข้า 2 ทาง จากการวิเคราะห์

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพบว่าโมเดลที่ 5 มีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้ดีที่สุด และโมเดลที่ 2 เป็นโมเดลที่เกิดการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้น้อยที่สุด ซึ่งทำการเปรียบเทียบแต่ละโมเดลเทียบกับโมเดลที่ 2 พบว่าการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ในโมเดลที่ 5 ดีที่สุด คิดเป็น 1.896% เมื่อเทียบกับโมเดลที่ 2 ถัดมาเป็นโมเดลที่ 1 ดีกว่าโมเดลที่ 2 คิดเป็น 0.566% ถัดลงมาคือโมเดลที่ 3 ดีกว่าโมเดลที่ 2 ที่ 0.499% และโมเดลที่ 4 ดีกว่าโมเดลที่ 2 ที่ 0.199%

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมในโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2 เป็นการไหลของสารหล่อเย็นแบบอนุกรม ซึ่งหากมีการไหลแบบขนานอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนดีกว่าเดิม รวมไปถึงการลดความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ไรต์ที่ใช้ในการทดลองว่าปัจจัยด้านความเข้มข้นจะส่งผลอย่างไร และการเพิ่มเติมระบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ควบคุมรูปแบบการไหลเป็นช่วงๆ เพื่อให้การไหลราบเรียบจากปั๊มน้ำมีคุณสมบัติการไหลแบบปั่นป่วนแทนซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนได้อีกทาง

## บรรณานุกรม

- Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvart-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531530598X>
- Amietszajew, T., McTurk, E., Fleming, J., & Bhagat, R. (2018). Understanding the limits of rapid charging using instrumented commercial 18650 high-energy Li-ion cells. *Electrochimica Acta*, 263, 346-352. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468618301075>
- Aoxia, C., & Sen, P. K. (2016). Advancement in battery technology: A state-of-the-art review. *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1-10. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7731812>
- Bolsinger, C., & Birke, K. P. (2019). Effect of different cooling configurations on thermal gradients inside cylindrical battery cells. *Journal of Energy Storage*, 21, 222-230. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18305735>
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G.-H., Yang, C., & Pesaran, A. (2016). Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846-854. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115010613>
- Chen, K., Chen, Y., Li, Z., Yuan, F., & Wang, S. (2018). Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 393-401. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931018300176>
- Chen, K., Song, M., Wei, W., & Wang, S. (2018). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement. *Energy*, 145, 603-613. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217321539>



- Chen, K., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2017a). Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy. *Applied Thermal Engineering*, 123, 177-186. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117324845>
- Chen, K., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2017b). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, 943-952. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931016337139>
- Chen, Z., Sun, H., Dong, G., Wei, J., & Wu, J. (2019). Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 414, 158-166. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319300138>
- Cheng, J.-l., Li, X.-h., Wang, Z.-x., & Guo, H.-j. (2017). Mechanism for capacity fading of 18650 cylindrical lithium ion batteries. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7), 1602-1607. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632617601821>
- Deng, Y., Feng, C., E, J., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142, 10-29. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118320659>
- Drake, S. J., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzl, J. M., & Jain, A. (2014). Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 252, 298-304. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775313019502>
- E, J., Han, D., Qiu, A., Zhu, H., Deng, Y., Chen, J., . . . Peng, Q. (2018). Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 132, 508-520. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117353115>

- Erb, D. C., Kumar, S., Carlson, E., Ehrenberg, I. M., & Sarma, S. E. (2017). Analytical methods for determining the effects of lithium-ion cell size in aligned air-cooled battery packs. *Journal of Energy Storage*, *10*, 39-47. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X16303097>
- Feng, L., Zhou, S., Li, Y., Wang, Y., Zhao, Q., Luo, C., . . . Yan, K. (2018). Experimental investigation of thermal and strain management for lithium-ion battery pack in heat pipe cooling. *Journal of Energy Storage*, *16*, 84-92. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17305832>
- Feng, X., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wu, P., Kulp, C., & Prasser, S. (2015). Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25Ah LiNi<sub>x</sub>Co<sub>y</sub>Mn<sub>z</sub>O<sub>2</sub> large format lithium ion battery. *Applied Energy*, *154*, 74-91. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005814>
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, *10*, 246-267. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829716303464>
- Hong, S., Zhang, X., Chen, K., & Wang, S. (2018). Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *116*, 1204-1212. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017322627>
- Jaguemont, J., Omar, N., Abdel-Monem, M., Van den Bossche, P., & Van Mierlo, J. (2018). Fast-charging investigation on high-power and high-energy density pouch cells with 3D-thermal model development. *Applied Thermal Engineering*, *128*, 1282-1296. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117345428>
- Jarrett, A., & Kim, I. Y. (2014). Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates. *Journal of Power Sources*, *245*, 644-655. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531301121X>

Kitagawa, Y., Kato, K., & Fukui, M. (2014). Analysis and Experimentation for Effective Cooling of Li-ion Batteries. *Procedia Technology*, 18, 63-67. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017314005350>

Larsson, F., Bertilsson, S., Furlani, M., Albinsson, I., & Mellander, B.-E. (2018). Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO<sub>2</sub> cells at different levels of ageing. *Journal of Power Sources*, 373, 220-231. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317314398>

Li, K., Yan, J., Chen, H., & Wang, Q. (2018). Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 132, 575-585. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117312693>

Ling, Z., Cao, J., Zhang, W., Zhang, Z., Fang, X., & Gao, X. (2018). Compact liquid cooling strategy with phase change materials for Li-ion batteries optimized using response surface methodology. *Applied Energy*, 228, 777-788. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310122>

Liu, F., Lan, F., & Chen, J. (2016). Dynamic thermal characteristics of heat pipe via segmented thermal resistance model for electric vehicle battery cooling. *Journal of Power Sources*, 321, 57-70. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316304815>

Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304-330. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417307288>

Lu, Z., Meng, X. Z., Wei, L. C., Hu, W. Y., Zhang, L. Y., & Jin, L. W. (2016). Thermal Management of Densely-packed EV Battery with Forced Air Cooling Strategies. *Energy Procedia*, 88, 682-688. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021630162X>

- Lu, Z., Yu, X., Wei, L., Qiu, Y., Zhang, L., Meng, X., & Jin, L. (2018). Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement. *Applied Thermal Engineering*, 136, 28-40. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117378249>
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A., Mathew, M., & Fowler, M. (2018). Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129, 472-481. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117344393>
- Mendoza-Hernandez, O. S., Ishikawa, H., Nishikawa, Y., Maruyama, Y., & Umeda, M. (2015). Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge. *Journal of Power Sources*, 280, 499-504. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315001597>
- Mousavi, M., Hoque, S., Rahnamayan, S., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2011). Optimal design of an air-cooling system for a Li-Ion battery pack in Electric Vehicles with a genetic algorithm. *2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, 1848-1855. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5949840>
- Parhizi, M., Ahmed, M. B., & Jain, A. (2017). Determination of the core temperature of a Li-ion cell during thermal runaway. *Journal of Power Sources*, 370, 27-35. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775317313228>
- Pety, S. J., Tan, M. H. Y., Najafi, A. R., Barnett, P. R., Geubelle, P. H., & White, S. R. (2017). Carbon fiber composites with 2D microvascular networks for battery cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 513-522. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017311146>
- Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116343836>

- Ren, D., Liu, X., Feng, X., Lu, L., Ouyang, M., Li, J., & He, X. (2018). Model-based thermal runaway prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components. *Applied Energy*, 228, 633-644. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918309954>
- Ruiz, V., Pfrang, A., Kriston, A., Omar, N., Van den Bossche, P., & Boon-Brett, L. (2018). A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1427-1452. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308250>
- Saw, L. H., King, Y. J., Yew, M. C., Ching Ng, T., Chong, W. T., & Pambudi, N. A. (2017). Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery. *Energy Procedia*, 142, 2592-2597. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217359313>
- Saw, L. H., Ye, Y., Yew, M. C., Chong, W. T., Yew, M. K., & Ng, T. C. (2017). Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system. *Applied Energy*, 204, 1489-1499. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917304166>
- Shahid, S., & Agelin-Chaab, M. (2018). Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 351-363. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904917304249>
- Sheikh, M., Elmarakbi, A., & Elkady, M. (2017). Thermal runaway detection of cylindrical 18650 lithium-ion battery under quasi-static loading conditions. *Journal of Power Sources*, 370, 61-70. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531731337X>
- Sirikasemsuk, S., Wiriyasart, S., Naphon, P., & Naphon, N. (2021). Thermal cooling characteristics of Li-ion battery pack with thermoelectric ferrofluid cooling module. *International Journal of Energy Research*, 45(6), 8824-8836.
- Sirikasemsuk, S., Wiriyasart, S., Prurapark, R., Naphon, N., & Naphon, P. (2021).

- Water/Nanofluid Pulsating Flow in Thermoelectric Module for Cooling Electric Vehicle Battery Systems. *International Journal of Heat and Technology*, 39(5), 1618-1626.
- Spinner, N. S., Hinnant, K. M., Mazurick, R., Brandon, A., Rose-Pehrsson, S. L., & Tuttle, S. G. (2016). Novel 18650 lithium-ion battery surrogate cell design with anisotropic thermophysical properties for studying failure events. *Journal of Power Sources*, 312, 1-11. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316301033>
- Sturm, J., Rheinfeld, A., Zilberman, I., Spingler, F. B., Kosch, S., Frie, F., & Jossen, A. (2019). Modeling and simulation of inhomogeneities in a 18650 nickel-rich, silicon-graphite lithium-ion cell during fast charging. *Journal of Power Sources*, 412, 204-223. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775318312849>
- Sun, H., & Dixon, R. (2014). Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack. *Journal of Power Sources*, 272, 404-414. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531401372X>
- Tan, M. H. Y., Najafi, A. R., Pety, S. J., White, S. R., & Geubelle, P. H. (2018). Multi-objective design of microvascular panels for battery cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 135, 145-157. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117357332>
- Taniguchi, S., Shironita, S., Konakawa, K., Mendoza-Hernandez, O. S., Sone, Y., & Umeda, M. (2019). Thermal characteristics of 80 °C storage-degraded 18650-type lithium-ion secondary cells. *Journal of Power Sources*, 416, 148-154. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319300977>
- Tian, Z., Gan, W., Zhang, X., Gu, B., & Yang, L. (2018). Investigation on an integrated thermal management system with battery cooling and motor waste heat recovery for electric vehicle. *Applied Thermal Engineering*, 136, 16-27. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117379528>
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). Thermal runaway caused



fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208, 210-224.

Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775312003989>

Wang, S., Li, Y., Li, Y.-Z., Mao, Y., Zhang, Y., Guo, W., & Zhong, M. (2017). A forced gas cooling circle packaging with liquid cooling plate for the thermal management of Li-ion batteries under space environment. *Applied Thermal Engineering*, 123, 929-939. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117314138>

Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51-59. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316315427>

Wiriyasart, S., Hommalee, C., Sirikasemsuk, S., Prurapark, R., & Naphon, P. (2020).

Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules. *Case Studies in Thermal Engineering*, 18, 100583. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19304836>

Xie, J., Ge, Z., Zang, M., & Wang, S. (2017). Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 126, 583-593. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117316587>

Xu, J., Lan, C., Qiao, Y., & Ma, Y. (2017). Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with minichannel cooling. *Applied Thermal Engineering*, 110, 883-890. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116315101>

Xu, M., Wang, R., Reichman, B., & Wang, X. (2018). Modeling the effect of two-stage fast charging protocol on thermal behavior and charging energy efficiency of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 20, 298-309. Retrieved from

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18303438>

Yuan, C., Wang, Q., Wang, Y., & Zhao, Y. (2019). Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium-ion battery

- module. *Applied Thermal Engineering*, 153, 39-50. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118356783>
- Zhang, T., Gao, Q., Wang, G., Gu, Y., Wang, Y., Bao, W., & Zhang, D. (2017). Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process. *Applied Thermal Engineering*, 116, 655-662. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117303915>
- Zhao, C., Cao, W., Dong, T., & Jiang, F. (2018). Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, 751-762. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017337948>
- Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*, 103, 157-165. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041500597X>
- สรารวุฒิ, ส., สงกรานต์, ว., & ไพศาล, น. (2021). ทบทวนการจั้ดการควมร้อนในแบตเตอรืลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า. *SWU Engineering Journal*, 16(1), 93-107.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

รายละเอียดคุณสมบัติของอุปกรณ์

ตาราง 16 แสดงข้อมูลจำเพาะของ BMS 6s 40a

Detail	Specifications	Typical	Unit
Discharge	Continuous	40(max)	A
	Discharging Current		
	Instantaneous	70	A
Charge	Discharge Current		
	Charging Voltage	25.5	V
Overcharge Protect	Charging Current	40(Max)	A
	Over-charge Detect	4.25±0.025	V
Balance	Protect Delay	1.0±0.5	S
	Over-charge release	4.15±0.05	V
	Detect Voltage	4.125±0.025	V
Over-discharge Protect	Release Voltage	4.125±0.05	V
	Over-discharge Detect	2.7±0.1	V
	Over-discharge Detect delay	1.0±0.5	mS
Over-current Protect	Release Voltage	3.0±0.1	V
	Detect Voltage	100	mV
	Detect Delay	1±0.3	mS
	Current Detect	75±5	A
Short-circuit Protect	Release Condition	Cut Load	
	Protect Condition	Out Cut Load	
	Detect Delay	250	uS
Temperature Protect	Release Condition	Cut Load	
Resistance	Temperature Protect	/	°C
Self-Consumption	Inner	≤20	mΩ
	Working Current	≤40	uA
Working Temperature	Sleep Current (when Over-discharge)	≤10	uA
	Range	-0.375	°C

ตาราง 17 ตารางคุณสมบัติของสารแมกนีไทต์

แมกนีไทต์ (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	คุณสมบัติ
ขนาดอนุภาค	20 - 30 nm
ชนิดของอนุภาค	กลม
สี	ดำ
จุดหลอมเหลว	1,538 °C
Density, $\rho$	5180 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat, Cp	670 J/kg.K
Thermal conductivity, k	80.4 W/m.K

ตาราง 18 แสดงข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์แสดงข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าแบบดิจิตอล

รายการ	คุณสมบัติ
Size	48mm x 29mm x 22mm.
Display	dual three digit 0.28" LED digital tube
Operating voltage	DC 4 ~ 30V
Measure voltage	DC 0 ~ 100V
Measure current	0-100 A
Minimum resolution (V)	0.1V
Refresh rate	$\geq$ 300ms / times
Measure accuracy	1% ( $\pm$ 1 digit)
Minimum resolution (A)	0.1A
Operating Current	<20mA
Operating temperature	-10 to 65°C
Wire Length	15 cm
Mounting cutout	46mm x 27mm



ตาราง 19 อุปกรณ์ตัวต้านทานปรับค่าได้สำหรับคายประจุของแบตเตอรี่

รายการ	คุณสมบัติ
Model	RX20 1000W4RJ
Weight	1.7 กิโลกรัม
Color	เขียว
Product dimensions	6 x 30 x 17 เซนติเมตร
Package Size	39 x 11.5 x 17.5 เซนติเมตร
Packing List	1x RX1000W4RJ
Working temperature	-55 °C ~ +375 °C
มาตรฐานที่ใช้บังคับ	GB / T5729-2003 GB5732-85

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่น Battery K-1 Model 18650 ผลิตโดย Shenzhen Wanshantong Science & Technology CO., LTD ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน และนำเข้ามาโดยบริษัท เค-วัน แอลอีดี จำกัด เป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิทรงกระบอก ระบบไฟฟ้าขั้วลงเป็น Carbon และระบบไฟฟ้าขั้วบวกเป็น  $\text{Li}(\text{Co}, \text{Mn}, \text{Ni})\text{O}_2$  มาตรฐาน มอก.2217-2548

ตาราง 20 ตารางแสดงข้อมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 40 ก้อน

No.	v	mAh	mR
1	4.2	1309	46
2	4.19	1270	51
3	4.19	1420	46
4	4.2	1482	49
5	4.2	1223	58
6	4.2	1529	48
7	4.19	1426	60
8	4.19	1493	53
9	4.19	1394	46
10	4.19	1217	52
11	4.2	1644	49
12	4.19	1312	44
13	4.19	1344	46
14	4.2	974	62

No.	v	mAh	mR
15	4.19	1626	37
16	4.19	1048	63
17	4.2	1361	38
18	4.19	1321	42
19	4.2	1300	42
20	3.96	1626	37
21	4.2	1333	56
22	4.19	985	125
23	4.19	684	69
24	4.2	1169	74
25	4.2	891	67
26	4.2	894	76
27	4.19	985	64
28	4.19	1169	56
29	4.19	1412	41
30	4.19	1225	61
31	4.19	1287	61
32	4.19	1281	55
33	4.2	1536	50
34	4.19	1338	54
35	4.2	1305	49
36	4.2	1317	50
37	4.19	1459	49
38	4.2	1455	17
39	4.2	922	76
40	4.19	1367	48
Max	4.2	1644	125
Min	3.96	684	17
Average	4.1885	1283.325	54.175



ภาคผนวก ข  
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

(สรารวุฒิ, สงกรานต์, & ไพศาล, 2021, น. 93-107) การทบทวนวรรณกรรมในบทที่ 2 และการเผยแพร่บทความวิชาการในวารสารวิชาการระดับชาติ SWU Engineering Journal, 16(1), 93-107. เรื่อง ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของวิชา DME703 สัมมนาทางวิศวกรรมเครื่องกล 3 (MECHANICAL ENGINEERING SEMINARS III)

SWU Engineering Journal (2021) 16(1), 93-107

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2564

### ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles

สรารวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาล นามผล\*  
ห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (TFHT),  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
63 ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120  
Sarawut Sirikasemsuk Songkran Wiriyasart Paisarn Naphon  
Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT)  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University,  
63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakornnayok, 26120 Thailand.

\*Corresponding author Email: paisarnn@swu.ac.th  
(Received: April 30, 2020; Accepted: March 25, 2021)

#### บทคัดย่อ

แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานที่สำคัญสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน ซึ่งประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะสูงขึ้นเมื่อมีการรักษาอุณหภูมิขณะใช้งานให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ 15 - 40 องศาเซลเซียส โดยความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่นั้นมาจากการใช้งาน การอัดประจุกลับ การถูกระงับทางกายภาพเช่นการอัด บด ทิ่มแทงจากอุบัติเหตุ รวมถึงปัญหาทางระบบไฟฟ้า-เคมีของแบตเตอรี่ ปัญหาทางความร้อนนี้หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดการระเบิดจากปรากฏการณ์เทอร์มอลรันอเวย์ ดังนั้นการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความสำคัญ และได้มีการศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการออกแบบระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ เช่น โดยการใช้อากาศ ของเหลว รวมถึงการใช้ระบบผสมระหว่างอากาศร่วมกับของเหลวเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งระบบการหล่อเย็นจะมีรูปแบบหรือลักษณะแตกต่างกัน ผลที่ได้ระบบหล่อเย็นโดยใช้ของเหลวเป็นสารหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดีสุด แต่อย่างไรก็ตามระบบระบายความร้อนทั้ง 3 แบบนั้นสามารถรักษาอุณหภูมิให้มีอุณหภูมิสูงไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้ และสามารถนำระบบที่ปรับปรุงไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความปลอดภัยได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** เทอร์มอลรันอเวย์ ยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ลิเทียม การจัดการความร้อนในแบตเตอรี่

#### ABSTRACT

At the present, batteries are essential energy storage for electrical vehicles. The efficiency and lifetime of the battery can be extended by keeping the working temperature about 15°C - 40°C. The generated heat inside the batteries can be generated by the charging, discharging, physical actions such as compression crushing or piercing from an accident including the electrical-chemical system problems of the battery. The thermal problem, the high temperature causes the battery overheating and explosion due to the thermal runaway phenomenon. Therefore, the thermal management systems are

essential for cooling the battery system, and have been designed with different cooling techniques; air, liquid, and hybrid coolants. From the review process, it is found that the cooling technique with liquid as coolant gives the highest thermal efficiency. However, the operating temperatures obtained from three cooling techniques are less than 40°C. The cooling techniques can be used to design and apply for developing electric vehicle battery system with high lifetime and more safety too.

**Keyword:** Thermal Runaway, Electrical Vehicles, Lithium Batteries, Battery Thermal Management System.

## 1. บทนำ

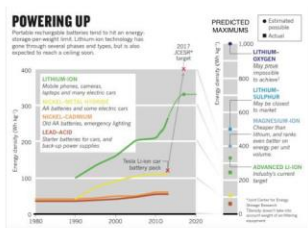
ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ เริ่มมีบทบาทมากขึ้น และในอนาคตอาจจะเป็นเทคโนโลยีที่มาแทนที่ยานยนต์ระบบเชื้อเพลิงที่ใช้ น้ำมัน ซึ่งได้มีการพัฒนาด้านระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการสำรองไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน ระบบอัดประจุเพื่อการใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยเทคโนโลยีดังกล่าวเมื่อใช้งานไปนานๆ อุปกรณ์ต่างๆ จะเริ่มเสื่อมตามสภาพการใช้งาน แต่การเสื่อมสภาพนั้นจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับการดูแลรักษา และการตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ และแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ผู้ใช้มักจะขาดการดูแลรักษาที่ถูกต้อง เนื่องจากระบบของแบตเตอรี่นั้นมีความซับซ้อนและสายไฟเป็นจำนวนมาก หรือใช้งานจนเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเก็บประจุไม่ได้ของแบตเตอรี่แล้วเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแบตเตอรี่ แต่หากรู้วิธีการดูแลรักษาที่ดีพอแล้ว จะช่วยเรื่องของการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ซึ่งเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ อีกทั้งแบตเตอรี่ที่ถูกเปลี่ยนจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวัตถุอันตราย และจากปัญหาของแบตเตอรี่ที่พบกรณีแบตเตอรี่ระเบิดนั้น มาจะสภาวะที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเฉียบพลันหรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่พบในแบตเตอรี่กลุ่มลิเทียม โดยมีปัจจัยการเกิดปรากฏการณ์นี้อยู่ประมาณ 3 แบบ คือ ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางไฟฟ้า และปัจจัยทางความร้อน

## 2. แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และยังเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับงานบางประเภท ซึ่งแบตเตอรี่นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทตามรูปแบบของการทำงานคือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ หรือที่เรียกกันว่าแบตเตอรี่ใช้แล้วทิ้ง กับอีกแบบคือแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่สามารถนำและในส่วนของรถไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนั้น อาศัยพลังงานหลักจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม เพราะเป็นแบตเตอรี่ที่มีความทนทาน และความจุในการเก็บพลังงานที่สูงมาก

### 2.1. พัฒนาการของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานมาก จากยุคช่วงแรกมาจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและด้วยเทคโนโลยีที่ปัจจุบันมีความทันสมัย ทำให้แบตเตอรี่ ถูกพัฒนาอย่างก้าวกระโดด อีกทั้งยังได้รับความนิยมในการใช้งานที่หลากหลาย ซึ่งสามารถทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ได้อีกมากมาย แบตเตอรี่เริ่มเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1747 (พ.ศ. 2291) โดย Benjamin Franklin และได้ถูกพัฒนามาเป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในปี 1859 (พ.ศ. 2402) โดย Gaston Plante จนในปัจจุบันแบตเตอรี่ได้ถูกพัฒนามาจนเป็นแบตเตอรี่ลิเทียม [1] ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น ถือว่าเป็นเทคโนโลยีด้านแบตเตอรี่ที่ดีที่สุดในเวลานี้ และยังมีคาดการณ์องค์ประกอบร่วมในแบตเตอรี่ลิเทียมต่อไปอีก ดังรูปที่ 1

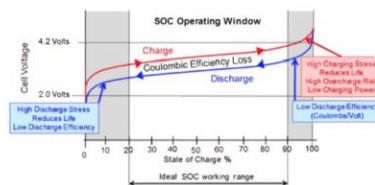


รูปที่ 1 กราฟแสดงแนวโน้มของแบตเตอรี่แต่ละชนิด [2]

จากรูปที่ 1 แบตเตอรี่ได้ถูกพัฒนาดังแต่กรดตะกั่ว มาเป็นแบตเตอรี่นิกเกิล จนในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมได้ถูกนำมาใช้งาน ซึ่งในอนาคตนั้น ยังมีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิด ลิเทียม-ออกซิเจน อีกทั้งการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อายุการใช้งาน และความปลอดภัยเมื่อนำมาใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าอีกด้วย [3]

2.2 เคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม

ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ รวมอยู่ด้วยเพื่อประสิทธิภาพการใช้งาน โดยส่วนมากจะแตกต่างกันที่ขั้วแคโทด เช่นลิเทียมโคบอล (LCO), ลิเทียมแมงกานีส (LMO), ลิเทียมฟอสเฟส (LFP), ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ (NMC), ลิเทียมนิกเกิลโคบอลอลูมิเนียมออกไซด์ (NCA), และลิเทียมไททาเนต (LTO) โดยที่ LMO ผสมรวมกับ NMC เพื่อให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [2] และได้มีนักวิจัยทำการทดลองเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $LiCoO_2$  และ  $LiMn_2O_4$  ขนาดแบตเตอรี่ที่ทดลองมีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 มิลลิเมตร ยาว 65 มิลลิเมตร หรือแบตเตอรี่ 18650 โดยทดลองให้ความร้อนจากภายนอก และความร้อนจากภายใน ภายใต้สถานะประจุที่เท่ากัน (SOC เท่ากัน) พบว่า  $LiMn_2O_4$  มีอุณหภูมิที่มีความเสถียรมากกว่า  $LiCoO_2$  [4] นอกจากนี้ค่า SOC ที่เท่ากันแล้ว ยังมีงานวิจัยที่ทดลองภายใต้การเปลี่ยนแปลงของ SOC ไม่ว่าจะเป็นการทดลองโดยการเพิ่มขึ้นของ SOC (การอัดประจุไฟฟ้าหรือการชาร์จ: Charge) หรือการลดลงของ SOC (การคายประจุไฟฟ้าหรือการดิสชาร์จ: Discharge) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกราฟการอัดและการคายประจุ [2]

จากรูปที่ 2 ในการใช้งานแบตเตอรี่นั้นควรให้ประจุไฟในแบตเตอรี่ (SOC) อยู่ในช่วงระหว่าง 20% ถึง 90% โดยอุณหภูมิของแบตเตอรี่ลิเทียมช่วงที่มีการอัดประจุนั้นจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 0 ถึง 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิช่วงคายประจุอยู่ที่ -20 ถึง 60 องศาเซลเซียส และถ้าแบตเตอรี่ลิเทียมถูกใช้งานไปมากกว่า 500 รอบ [5] จะเกิดความสูญเสียประจุไฟฟ้าในแบตเตอรี่ไป 12.9% โดยวิเคราะห์จาก XRD, SEM, EIS และ CV และได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบลดลงหลังจากรอบการใช้งานแบตเตอรี่ผ่านไป 500 รอบ

ขั้ว	รอบ	เปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบ						
		C	O	F	P	Mn	Co	Ni
แคโทด	0	37	30	8	-	7.51	5	12.4
	500	36	32	8	-	7.37	4.6	11.8
แอโนด	0	88	6	5	0.49	-	-	-
	500	83	8	8.8	0.54	-	-	-

จากตารางที่ 1 พบว่าเปอร์เซ็นต์เศษส่วนมวลของธาตุองค์ประกอบลดลงหลังจากที่มีการใช้งานแบตเตอรี่ผ่านไป 500 รอบ ส่วนความสัมพันธ์ของค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ SOC และระยะเวลาที่เหลือในการคายประจुरुบ RDT แบตเตอรี่ลิเทียม และถ้าหากกระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ไม่ได้เป็นเชิงเส้นอาจจะทำให้การวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่ใช้ผิดพลาดได้ และการพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์มาเป็นระดับประจุในแบตเตอรี่จึงได้ทดลองทางวงจรไฟฟ้าแบบวงจรเปิด โดยทดสอบทั้งแบบสถิตศาสตร์และพลศาสตร์ และได้สรุปว่าแรงดันใน



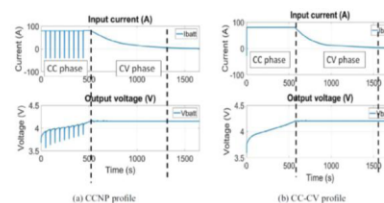
สถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ระดับต่างๆ สามารถวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่จะใช้ในการคายประจุที่เหลือได้ [6]

### 2.3 คุณสมบัติ และประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียม

แบตเตอรี่ที่มีขนาด 18650 นั้น มีการทดลองโดยการจำลองแบตเตอรี่ที่มีขนาดเท่ากัน โดยอาศัยแผ่นสแตนเลสและแผ่นไมก้าสลับกัน ซึ่งเมื่อวัดคุณสมบัติของแบตเตอรี่จำลองนี้ได้ความหนาแน่นวัดได้  $1,593 \pm 30 \text{ kg/m}^3$  ความจุความร้อน  $727 \pm 18 \text{ J/kg-K}$  การนำความร้อนคำนวณได้  $5.1 \pm 0.6 \text{ W/m-K}$  การแผ่ความร้อนได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล จากการเพิ่มความจุความร้อนเป็น  $805 \pm 23 \text{ J/kg-K}$  พบว่าการแผ่ความร้อนอยู่ระหว่าง  $0.12$  และ  $0.197 \text{ W/m-K}$  ความร้อนที่แผ่ได้ของแบตเตอรี่จำลองอยู่ที่  $43-71$  องศาเซลเซียส และสรุปว่าแบตเตอรี่จำลองนี้มีความร้อนที่ใกล้เคียงกันกับแบตเตอรี่ 18650 [7] ซึ่งสามารถนำแบตเตอรี่จำลองนี้ไปทำการทดสอบในด้านต่างๆ ต่อไปนี้ นอกจากนี้ยังมีการทดลองการวัดความร้อนแอนนิโซโทรปิก การนำความร้อน และความจุความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียม  $\text{LiFePO}_4$  ขนาด 26650 และ 18650 และวิเคราะห์ผลการทดลองของรัศมีของความร้อนด้วยวิธีทางไฟน์อิลิเมนต์ได้ค่าน้อยสุดช่วง  $0.15-0.2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  สำหรับขนาด 26650 และ 18650 โดยกล่าวอีกว่าการทดลองนี้จะทำให้เข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้น อาจนำไปสู่รูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยได้ [8]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียมนั้น มีการทดลองการอัดประจุแบบไว ที่เรียกกันว่าควิกชาร์จ (Quick Charge) หรือฟาสชาร์จ (Fast Charge) การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว เพื่อเพิ่มแนวทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทำการทดลองหาพารามิเตอร์การชาร์จเร็วสูงสุดนั้นเป็นเท่าไร และต้องปลอดภัยด้วย โดยทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 ซึ่งมีกระแส 3 แอมป์แอมป์ และทดลองพบว่าการอัดประจุแบบไวนั้นปลอดภัยที่กระแสสูงสุด 6A หรือ 2C [9] และการอัดประจุ และคายประจุกับเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด

18650 ชนิด NMC-811/SiC และ NMC-111/graphite ด้วยวิธี p2D โดยในการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่าระดับการอัดเก็บประจุไฟฟ้าเกินกว่า 60% สามารถทำได้น้อยกว่า 18 นาที [10] ซึ่งได้มีการทดลองการชาร์จแบบเร็วของแบตเตอรี่ ว่าหากมีกำลังไฟสูง หรือมีพลังงานที่สูง ฉุกเฉินหรือภาวะที่บรรจแบตเตอรี่ลิเทียมจะเป็นอย่างไร ซึ่งใช้แบบจำลองทางอุณหภูมิตัวแบบ 3 มิติ และแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ คือแบบกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC-CV) และแบบสัญญาณพัลส์ที่ติดลบของกระแสและแรงดัน (CCNP-CV) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกราฟของกระแส และแรงดันไฟฟ้า [11]

จากการทดสอบแบตเตอรี่ที่อุณหภูมิ 10, 25 และ 45 องศาเซลเซียส โดยทดสอบกับแบตเตอรี่ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ ( $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{CoO}_2$ : NMC) และลิเทียมไททาเนต ( $\text{Li}_{1.33}\text{Ti}_{1.67}\text{O}_4$ : LTO) และวิเคราะห์ผลโดย CFD และได้สรุปผลการชาร์จประจุแบบเร็วหรือที่เรียกว่าควิกชาร์จนั้นทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส และจากแบบจำลองทางอุณหภูมิตัวแบบ 3 มิติ พบว่า NMC ให้พลังงานสูง ส่วน LTO ให้กำลังสูง [11] การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว หรืออัดประจุแบบรวมเร็วของแบตเตอรี่ลิเทียม ผู้คนจะให้ความสำคัญเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่เพื่อเลือกการเกิดความร้อนที่สูงแบบเฉียบพลัน และหาผลที่เกิดขึ้นจากการชาร์จประจุแบบไวจากพฤติกรรมความร้อนที่เกิด และประสิทธิภาพทางพลังงานของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทดลอง 30 นาที ถึงความจุ 80% และชาร์จด้วยกระแสคงที่แบบผสม 2 กระแส (two-stage constant current: 2SCC) โดยทดสอบแบบ กระแสสูง-กระแสต่ำ กระแสต่ำ-กระแสสูง

และแบบกระแสแบบเดียวคงที่ ผลการทดลองสรุปว่า กระแสสูงช่วงแรกและกระแสต่ำช่วงหลังอุณหภูมิต่ำและประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าอีก 2 แบบ [12]

เทคโนโลยีปัจจุบันที่ใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมเป็นหลัก และใช้ในปริมาณมาก และเป็นที่ยอมรับหลายในตลาดของ แบตเตอรี่ก็มีด้านรถยนต์ไฟฟ้า กับระบบเก็บไฟฟ้าจาก พลังงานทางเลือกอื่นๆ โดยในนี้จะมีข้อกล่าวถึงการใช้งาน ของรถยนต์ไฟฟ้า และปัญหาใหญ่ที่นักวิจัยให้ความสำคัญ กันมากในช่วงนี้คือเรื่องความปลอดภัย เพราะอุบัติเหตุที่ เกิดจากแบตเตอรี่นั้นสามารถสร้างความเสียหายอย่าง รุนแรง โดยเฉพาะแบตเตอรี่หากขาดการดูแลที่ดี และ ปลดปล่อยอยู่ในสภาวะที่แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่า 80 องศาเซลเซียสจะเสี่ยงต่อการเกิดปรากฏการณ์ TR ได้ และในการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ ได้มีนักวิจัยทำ การทดลองโดยใช้ระบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นน้ำ/ไกลคอล, น้ำมัน, ของไหลนาโน, โลหะเหลวและไอออนโลหะ [13] รวมถึงท่อระบายความร้อน ซึ่งสามารถทำการทดลองและ เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยโปรแกรม CFD ท่อที่ใช้ ในการทดลองและวิเคราะห์เป็นท่อขนาดเส้นระดับไมโคร (ultra-thin micro heat pipe: UMHP) และใช้โมเดล ความร้อนแบบ 3 มิติ แบบแยกส่วน เพราะมีทั้งตัวแปร ต่างๆ เกี่ยวกับความร้อนในท่อ รวมถึงเงื่อนไขของโมเดล ทางความร้อน ซึ่งภายในท่อขนาดเล็กลักษณะการพา ความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ โดยผลลัพธ์จาก การวิเคราะห์โดยโปรแกรมเหมือนกับการทดลอง [14] เท่ากับการทดลองบางกรณีที่มีความเสี่ยงสูงนั้น จะ สามารถวิเคราะห์โดยโปรแกรมเพื่อหาสมการทาง คณิตศาสตร์ในการออกแบบ ก่อนการทดลองจริงได้ ทั้งนี้ เทคโนโลยีแบตเตอรี่ลิเทียมที่เป็นแบตเตอรี่ที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากพลังงาน และการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจำเป็นต้องอยู่บนความปลอดภัยในการใช้งาน อีกทั้ง การแข่งขันทางการตลาด จะทำให้ในอนาคตของแบตเตอรี่ มีราคาที่ถูกลง ประสิทธิภาพสูงขึ้น อายุการใช้งานเพิ่มมากขึ้น อัตราการเก็บประจุ และการคายประจุจะดีขึ้น [15]

### 3. การจัดการด้านความร้อนของแบตเตอรี่

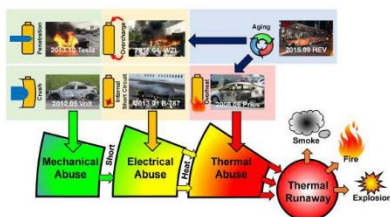
ในการจัดการทางความร้อนนั้น เป็นการใช่วิธีต่างๆ เพื่อการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ไม่ให้สูงจนถึงจุดวิกฤต เพื่อเป็นการเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง จากการเกิด ปรากฏการณ์อุณหภูมิสูงขึ้นแบบเฉียบพลัน หรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) โดยการจัดการความร้อนของ แบตเตอรี่ (BTMS) มีการค้นคว้าการระบายความร้อนด้วย วิธีต่างๆ เช่น การใช้อากาศ การใช้ของเหลว การใช้ไอ ระเหย ท่อความร้อน รวมถึงการใช้วัสดุที่เปลี่ยนสถานะได้ (PCM) ในการระบายความร้อน และการระบายความร้อน แบบทางตรง ทางอ้อม ซึ่งในการจัดการด้านความร้อน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยการจัดการที่ดีนั้นจะช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าได้อีกด้วย [16] ซึ่งความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้า (EVTMS) โดยระบบ ระบายความร้อน และความร้อนเหลือทิ้งนั้นทำให้การทำ ความเย็นลดลง 26.30-32.10% และความร้อนเหลือทิ้ง อยู่ระหว่าง 18.73-45.17% และ COP อยู่ระหว่าง 0.68- 21.05% ในการทดลองภายใต้สภาวะการขับซีแบบ เดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ถูกตรวจสอบความ จุกจุกผลกระทบนี้นพบว่า SOC ลดลง10.60% และ COP ให้ความร้อนเพิ่มขึ้น 25.55% เมื่อเทียบกับความร้อน PTC พบว่าระบบ EVTMS นั้นดีกว่า 31.71% [17]

#### 3.1 Thermal Runaway (TR)

การเกิด TR นั้นมักจะสร้างความเสียหายเป็นอย่างมากต่อรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมาจากการจัดการความร้อนที่ไม่ดี การระบายความร้อนที่ไม่ดี การลัดวงจรภายในที่มาจาก วงจรไฟฟ้าหรือปฏิกิริยาทางเคมี และได้มีนักวิจัยทดลอง ใช้วัสดุด้านแคโทดเป็น  $\text{LiFePO}_4$  เป็นวัสดุที่ราคาถูกและมีความปลอดภัยสูง และการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงกว่า 110 องศาเซลเซียส จะช่วยป้องกันการเกิด TR ได้ [18]

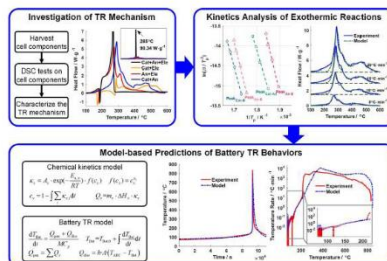
ในการเกิด TR ส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับทางกลเช่นอุบัติเหตุที่ส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่ไม่ว่าจะ เป็นการบดหรือถูกเจาะ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อระดับถัดมาคือ การลัดของวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยมีโอกาเกิดได้ทั้ง กรณีภายในแบตเตอรี่คือวงจรภายในเกิดการลัดวงจร หรือ

กรณีภายนอกแบตเตอรี่เช่นการชาร์จประจุเกิน และในระดับนี้จะพบเป็นสาเหตุหลักหรือปัญหาหลักที่เจอโดยทั่วไป และอาจจะส่งผลต่อระดับถัดมาก็คือด้านความร้อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดควัน ไฟ หรือการระเบิดของแบตเตอรี่ได้ [19] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพสรุปการเกิด TR [19]

ในการเกิดปรากฏการณ์ TR นั้นมีนักวิจัยได้ทำการทดสอบการเกิด TR โดยการนำ แบตเตอรี่ลิเทียม (Graphite-LiCoO<sub>2</sub>) โดยเก็บที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงทดสอบให้ความร้อน 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที ผลที่ได้คือแบตเตอรี่ลิเทียมจะเกิด TR ที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส [20] และยังมีนักวิจัยทำการทดสอบโดยเริ่มจากการทดสอบแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) โดยมีองค์ประกอบ 3 ตัวคือ Cathode (Cat), Anode (An) และ Electrolyte (Ele) จากนั้นทดสอบ TR โดยความร้อนของเตาเริ่มต้นที่ 130 องศาเซลเซียส และ 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้ความร้อนแก่แบตเตอรี่ และเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการลดอุณหภูมิ โดยผลของการทดลองของแบตเตอรี่จากอุณหภูมิเตาเริ่มต้นที่ 130 องศาเซลเซียส สามารถทำให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงสุดที่ 185.84 องศาเซลเซียส จากการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้อุณหภูมิ 179.43 องศาเซลเซียส ส่วนที่เตาอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 150 องศาเซลเซียส นั้น มีอุณหภูมิขึ้นสูงสุดถึง 857.74 องศาเซลเซียส [21] ซึ่งมีกระบวนการทดลองดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทดลอง [21]

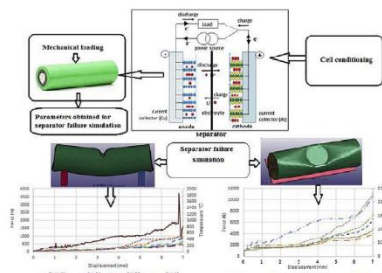
ซึ่งการทดลองแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) นั้นมีผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าการทดลองแบบแยกส่วน [21]

Kinetics parameters of the exothermic reactions.

Sample	x	A <sub>0</sub> /s <sup>-1</sup>	E <sub>a</sub> /J mol <sup>-1</sup>	n <sub>c</sub>	ΔH <sub>0</sub> /J g <sup>-1</sup>
An + Ele	SEI	6.3623 × 10 <sup>9</sup>	1.0960 × 10 <sup>5</sup>	5.5	578.7
	An-E	5.15 × 10 × 10 <sup>17</sup>	2.0377 × 10 <sup>5</sup>	1	255.2
	An-B	4.9679 × 10 <sup>15</sup>	1.9549 × 10 <sup>5</sup>	1	108.5
Cat + An	Cat-An	2.4262 × 10 <sup>17</sup>	1.6201 × 10 <sup>5</sup>	1	560.6
	Cat-R	6.5439 × 10 <sup>13</sup>	1.7785 × 10 <sup>5</sup>	2	452.1
	Cat	5.3481 × 10 <sup>5</sup>	1.0934 × 10 <sup>5</sup>	1.5	434.0

อีกทั้งมีนักวิจัยได้ทำการทดลองหาการเกิด TR ของแบตเตอรี่ 18650 โดยเงื่อนไขการทดลองการบีบอัดทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Rod, Circular punch, three-point bend และ flat ที่อัตราประจุภายในแบตเตอรี่ต่างกัน ดังการทดลองรูปที่ 5



รูปที่ 5 การทดลองรูปแบบทางกายภาพต่างๆ เพื่อให้เกิด TR [22]

จากรูปที่ 5 การทดลองในรูปแบบต่างๆ ได้ผลการทดลอง และวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ด้วยวิธีทางไฟนอลิเมนต์ และในการทดลองระยะการบีบอัด และเวลาใช้ในการบีบอัดของแบตเตอรี่นั้น พบว่าอุณหภูมิของแบตเตอรี่สูงขึ้นถึง 700 องศาเซลเซียส และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลมาจากการลัดวงจรภายในแบตเตอรี่ [22]

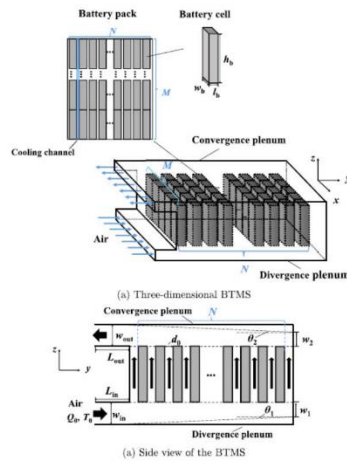
ในการทดลองการเกิด TR ยังได้มีกลุ่มนักวิจัยได้ทำการทดสอบกับแบตเตอรี่แพ็คที่ต่อไว้แบบขนาน 4 ก้อน และนำมาต่ออนุกรม 10 ชุด (10s4p) รวม 2.85 Ah และทดสอบโดยการเจาะแบตเตอรี่ด้วยตะปู และระบบที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมินั้นจะทดสอบด้วยระบบ phase change composite materials (PCC™) และเปรียบเทียบกับกรณีไม่มีระบบนี้ และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อเซลล์แบตเตอรี่เกิด TR [23] ส่วนถ้านำแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $\text{LiCoO}_2$  มาทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และมีมีการเปลี่ยนแปลงค่าสถานะประจุ ในระดับต่างๆ พบว่าแบตเตอรี่ 100% SOC มีอัตราเกิด TR ต่ำที่สุด [24] อีกทั้งแบตเตอรี่ลิเทียมที่เสื่อมสภาพ หรือเสียแล้วก็ยังมีโอกาสที่จะเกิด TR ได้อยู่ การเกิด TR นั้นมักจะเกิดที่แกนของแบตเตอรี่ [25] ดังนั้นขนาดของแบตเตอรี่ที่พิจารณาอันกลับการนำความร้อน จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิจริงๆ ที่เกิด TR จากแกนของแบตเตอรี่ และด้วยพื้นฐานการเกิด TR ที่อธิบายจะสามารถนำมาพิจารณาการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยลดการเกิด TR ลงได้ ส่วนแบตเตอรี่ชนิด  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  ได้มีนักวิจัยทดสอบที่ขนาด 25 Ah โดยในการทดลองนั้นได้ใช้แบตเตอรี่ที่มีประจุเต็ม ต่อพ่วงกัน 6 ก้อน และทดลองให้เกิด TR ซึ่งผลที่ได้คือ TR เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 469 องศาเซลเซียส พลังงานไฟฟ้าลดลง 75% หรือน้อยกว่า ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน และเกิดการกระจายความร้อนสูงกว่า  $70 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  โดย ความร้อนระหว่างแบตเตอรี่ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร มีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า  $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$  [26]

ในการเกิด TR จะเหมือนปฏิกิริยาลูกโซ่ ที่ความร้อนจะส่งต่อไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียง โดยได้มีนักวิจัยอีกจำนวนหนึ่งที่ออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อยับยั้งการลุกลามของปรากฏการณ์ TR โดยได้ทำระบบท่อระบายความร้อนขนาดเล็ก (minichannel cooling) โดยวิเคราะห์จากแบบจำลอง the conjugate heat transfer model และ the reaction kinetics model ซึ่งสามารถป้องกันการลุกลามของ TR กับเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิด TR กับแบตเตอรี่เซลล์ตัวมันเองได้ [27] และยังมีนักวิจัยทำการทดลองวัสดุคั่นระหว่างแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด 18650 ที่จำลองโมดูลมาจำนวนหนึ่ง โดยวัสดุที่ใช้ต้องสามารถป้องกันความร้อนแม้ไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียงเมื่อเกิด TR โดยได้ผลว่าแผ่นคอมโพสิตกราฟไฟท์ และอลูมิเนียมแอคซิทรูตสามารถป้องกันความร้อนที่จะส่งผลให้แบตเตอรี่ข้างเคียงจนนำไปสู่การเกิด TR [28]

การจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานในสภาวะที่เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังเป็นการยืดอายุการใช้งานได้อีกด้วย ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ต้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาศัยตัวกลางที่ตั้งความร้อนจากแบตเตอรี่เพื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอากาศ หรือของเหลว

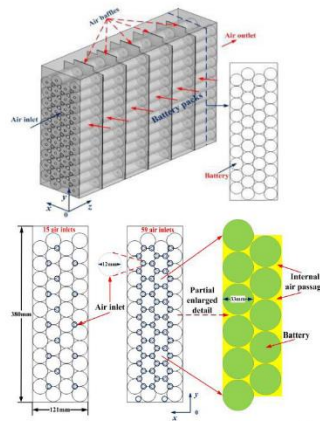
### 3.2 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ

การระบายความร้อนด้วยอากาศ เป็นวิธีการระบายความร้อนวิธีหนึ่ง ที่สามารถกำหนดทิศทางการไหลของอากาศได้จากอุปกรณ์ทดลอง และแหล่งจ่ายบังคับทิศทาง ซึ่งได้มีนักวิจัยที่ทำการออกแบบชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยการบังคับอากาศให้ไหลผ่านช่องทางด้วยเงื่อนไขต่างๆ เช่นมุมทางเข้าของอากาศ มุมทางออกของอากาศ ขนาดช่องทางเข้าของอากาศ ขนาดช่องทางออกของอากาศ ลักษณะรูปแบบอากาศที่ไหลผ่าน ช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่กับแบตเตอรี่ที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ ดังรูปที่ 6 [29]-[37]



รูปที่ 6 โมเดลการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับ [34]

รวมถึงท่อที่ใช้สำหรับบังคับอากาศซึ่งมีการวิจัยถึงขนาดความยาวของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ช่องว่างระหว่างท่อกับแบตเตอรี่ จำนวนท่อและการจัดเรียงรูปแบบของท่อตั้งรูปที่ 7 [30], [31], [34]-[35], [38]-[40]



รูปที่ 7 แสดงโมเดลการจัดเรียงแบตเตอรี่ช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่และท่ออากาศที่ใช้ [40]

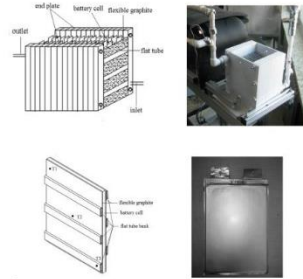
โดยการปรับความเร็ว อัตราการไหล และปริมาณมวลอากาศที่ป้อนเข้าในระบบ [32], [38]-[42] รวมถึงการทดสอบผลกระทบทางไฟฟ้าโดยการกำหนดแรงดันทางไฟฟ้า กระแสที่ใช้ในการทดสอบ C-Rate การอัดประจุ Charge การคายประจุ Discharge รวมถึงสังเกตพฤติกรรมด้านความร้อนของแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงของปริมาณพลังงาน SOC [33]-[34], [43] รวมถึงการศึกษาเพื่อให้ได้ต้นทุนที่ต่ำ และสามารถนำมาใช้ในการระบายความร้อนของรถยนต์ไฟฟ้าได้ [44]

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งการประสิทธิภาพในการจัดการความร้อนโดยการหาอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความหนาแน่นของอุณหภูมิ โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้เน้นพบว่ามุมทางเข้าออกที่ดีที่สุดคือ 25 องศา โดยทางเข้าและทางออกควรมีขนาดเท่ากัน การไหลแบบตัว U ช่วยให้ความต่างของอุณหภูมิลดลงได้ถึง 70% และการปรับรูปแบบที่เหมาะสม สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดไม่ให้เกิน 40 องศาเซลเซียสได้และพลังงานที่ใช้น้อยลงรวมถึงต้นทุนที่ลดลงด้วย

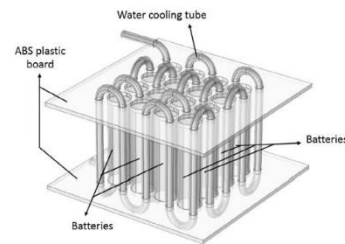
3.3 ระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว

นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศดังที่กล่าวในข้างต้น ยังมีการระบายความร้อนด้วยของเหลว ไม่ว่าจะเป็นการให้ของเหลวไหลผ่านท่อ หรือช่องทางการไหลเพื่อระบายความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยในการระบายความร้อนด้วยของเหลวนั้นได้มีกลุ่มนักวิจัยออกแบบการทดลองจากวัสดุวัสดุเสริม หรืออุปกรณ์ที่ทำขึ้นมาเป็นโมเดลที่มีทั้งแบตเตอรี่และช่องทางการไหลของของเหลว โดยวัสดุที่ใช้นั้นได้มีนักวิจัยได้ทดลองใช้อลูมิเนียมบล็อก ที่ทำขึ้นมาเฉพาะการทดลองนั้นๆ [45] หรือได้มีการทดลองใช้อลูมิเนียมที่มีความพูน [46] รวมถึงการนำท่ออลูมิเนียมมาทดลองร่วมกับวัสดุกราฟไฟแบบฮีตซิงค์ ตั้งรูปที่ 8 [47] หรือคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ [48] พร้อมกับทดสอบทางไฟฟ้าที่แรงดันทางไฟฟ้า กระแสทางไฟฟ้า

C-Rate ที่อัตราต่างๆ [49]-[51] ร่วมกับการปรับตัวแปรทางกลได้แก่ อัตราการไหลหรืออัตราการไหลเชิงมวลตั้งรูปที่ 9 [45], [49], [52]-[54]

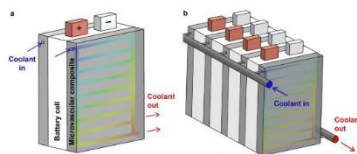


รูปที่ 8 โมเดลการระบายความร้อนโดยใช้ท่อลูมิเนียมร่วมกับกราฟไฟซินติอีตหุ่น [47]



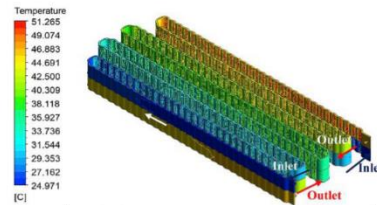
รูปที่ 9 ระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำ [50]

พื้นที่ผิวสัมผัสของท่อหรือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อตามความยาวของท่อ [37], [45], [53] จำนวนท่อ [47], [52]-[53] ขนาดของท่อ [48], [52]-[53], [55] รวมถึงการใช้ท่อขนาดเล็กในการระบายความร้อนดังรูปที่ 10 [48], [55]



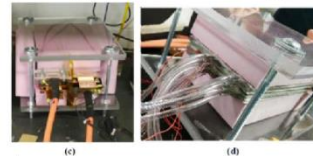
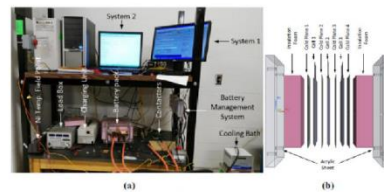
รูปที่ 10 ระบบระบายความร้อนที่ทำจากคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีช่องระบายความร้อนขนาดเล็ก [48]

การใช้ครีระบายความร้อน [37], [46] หรือการใช้เทคนิคการไหลสวนทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนดังรูปที่ 11 [56]



รูปที่ 11 ระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ไหลแบบสวนทาง [56]

ในการศึกษาการระบายความร้อนด้วยของเหลว นั้น นักวิจัยทำการศึกษาหาอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อม โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้ นั้นพบว่าหากกระแสไฟฟ้า C-Rate ยิ่งสูงมากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ก็สูงตามโดยมีการทดลองดังรูปที่ 12 ส่วนการใช้ท่อขนาดเล็กนั้นจะต้องใช้กำลังของปั๊มเพิ่มมากขึ้น และการใช้ท่อแบบแผ่นที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสนั้นจะช่วยรักษาอุณหภูมิสูงสุดไว้ที่ 40 องศาเซลเซียสได้

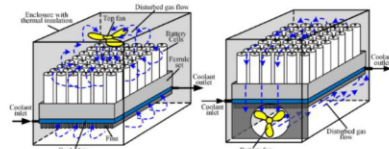


รูปที่ 12 ระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวเย็นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [51]



ในส่วนประสิทธิภาพการระบายความร้อนนั้น จำนวนท่อระบายความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคืออัตราการไหล ถัดมาคือความยาวท่อ และขนาดท่อมีผลน้อยที่สุด

นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศ และด้วยของเหลวยังมีการนำระบบทั้ง 2 มาทำงานร่วมกันอย่าง เชียงนั้น พริง และคณะ [57] ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ สำหรับการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยก๊าซเย็นไหลแบบบังคับ ร่วมกับของเหลวเย็น และวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณเพื่อหาก๊าซเย็นที่ไหลแบบบังคับ โดยความปั่นป่วนของก๊าซเย็นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อน พร้อมกับเทียบวิธีระบายความร้อนแบบสูญญากาศ โดยแบตเตอรี่นั้นได้สร้างความร้อนภาพรวมไว้ที่ 576 วัตต์ และระบบดังกล่าวสามารถทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงได้ 3.45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของความแตกต่าง 3.88 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น 2.46 องศาเซลเซียส ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดีดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โมเดลการระบายความร้อนด้วยอากาศเย็น ร่วมกับของเหลวเย็นในการระบายความร้อน [57]

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นจะใช้พลังงานมากกว่าแบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว 2 ถึง 3 เท่า ส่วนแบบครีระบายความร้อน จะทำให้ระบบการระบายความร้อนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40% ส่วนการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ดีที่สุด แม้ว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะน้อย

กว่าแบบระบายด้วยของเหลวทางตรง แต่ก็น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมได้ เสนอว่าสามารถนำไปใช้งานจริงได้ [37] ในการระบายความร้อนด้วยของเหลว นั้นยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของของไหลได้ด้วยการเติมสารนาโน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน [56]

#### 4. สรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่าปัญหาของแบตเตอรี่ลิเทียมที่นักวิจัยกล่าวถึงนั้น ได้แก่ความปลอดภัยจากความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุ การคายประจุ รวมถึงอุบัติเหตุต่างๆ จนเกิด TR หรือความร้อนที่เกินกว่าช่วงอุณหภูมิทำงานที่ 25 – 40 องศาเซลเซียส และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยในการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถใช้อากาศ หรือของเหลวในการระบายความร้อน ด้วยตัวแปรอัตราการไหล มุมทิศทาง การไหล ความยาวท่อ หน้าตัดท่อ จำนวนท่อ วัสดุที่ใช้ ขนาดป้อน หรือพัลลัม รวมถึงการใช้ครีระบายความร้อนช่วย และทำการทดลอง ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD เพื่อหาประสิทธิภาพการระบายความร้อน อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ ผลต่างและค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อมในกรณีของเหลว ส่วนการพัฒนาโมดูลของแบตเตอรี่นั้นอยู่ที่การใช้งานจากแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจจะมีทั้งขนาดใหญ่ หรือขนาดเล็กอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ จำนวนแบตเตอรี่เพื่อให้ได้แรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงระบบการระบายความร้อน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านในห้องปฏิบัติการเทอร์โม-ของไหลและการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน. (TFHT) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในการสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการวิจัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Limtongkun, "Energy knowledge get to know battery part 1," *E-magazine of National and Metal and Materials Technology Center*, July - September 2014.
- [2] A. Chen and P.K. Sen, "Advancement in Battery Technology: A State-of-the-Art Review," *IEEE 2016-ESC-0713*, pp. 1-10, 2016.
- [3] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P.V. Bossche and L. Boon-Brett, "A review of international abuse testing standards and regulations for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 1427-1452, 2018.
- [4] O.S. Mendoza-Hernandez, H. Ishikawa, Y. Nishikawa, Y. Maruyama and M. Umeda, "Cathode material comparison of thermal runaway behavior of Li-ion cells at different state of charges including over charge," *Journal of Power Source*, Vol.280, 15 April 2015, pp. 499-504, 2016.
- [5] J. CHENG, X. LI, Z. WANG and H. GUO, "Mechanism for capacity fading of 18650 cylindrical lithium-ion batteries," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 27, pp. 1602-1607, 2017.
- [6] Z. Chen, H. Sun, G. Dong, J. Wei and J. Wu, "Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 414, pp. 158-166, 2019.
- [7] N.S. Spinner, K.M. Hinnant, R. Mazurick, A. Brandon, S.L. Rose-Pehrsson and S.G. Tuttle, "Novel 18650 lithium-ion battery surrogate cell design with anisotropic thermophysical properties for studying failure events," *Journal of Power Sources*, Vol.312, pp. 1-11, 2016.
- [8] S.J. Drake, D.A. Wetz, J.K. Ostanek, S.P. Miller, J.M. Heinzel and A. Jain, "Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 252, pp. 298-304, 2014.
- [9] T. Amietszajew, E. McTurk, J. Fleming and R. Bhagat, "Understanding the limits of rapid charging using instrumented commercial 18650 high-energy Li-ion cells," *Electrochimica Acta*, Vol. 263, pp. 346-352, 2016.
- [10] J. Sturm, A. Rheinfeld, I. Zilberman, F.B. Spingler, S. Kosch, F. Frie and A. Jossen, "Modeling and simulation of inhomogeneities in a 18650 nickel-rich, silicon-graphite lithium-ion cell during fast charging," *Journal of Power Sources*, Vol. 412, pp. 204-223, 2019.
- [11] J. Jaguemont, N. Omar, M. Abdel-Monem, P.V. Bossche and J.V. Mierlo, "Fast-charging investigation on high-power and high-energy density pouch cells with 3D-thermal model development," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, pp. 1282-1296, 2018.
- [12] M. Xu, R. Wang, B. Reichman and X. Wang, "Modeling the effect of two-stage fast charging protocol on thermal behavior and charging energy efficiency of lithium-ion batteries". *Journal of Energy Storage*, Vol. 20, pp. 298-309, 2018.

- [13] Y. Deng, C. Feng, E. Jiaqiang, H. Zhu, J. Chen, M. Wen and H. Yin, "Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, pp.10–29, 2018.
- [14] F. Liu, F. Lan and J. Chen, "Dynamic thermal characteristics of heat pipe via segmented thermal resistance model for electric vehicle battery cooling," *Journal of Power Sources*, Vol. 321, pp. 57-70, 2016.
- [15] S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvant-Moyno and F. Huet, "Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review," *Journal of Power Sources*, Vol. 306, pp. 178-192, 2016.
- [16] H. Liu, Z. Wei, W. He and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review," *Energy Conversion and Management*, Vol. 150 pp. 304–330, 2017.
- [17] Z. Tian, W. Gan, X. Zhang, B. Gu and L. Yang, "Investigation on an integrated thermal management system with battery cooling and motor waste heat recovery for electric vehicle," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 16–27, 2018.
- [18] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 208, 15 June 2012, Paper 210–224, 2012.
- [19] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia and X. Heab, "Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, Vol. 10, pp. 246–267, 2018.
- [20] F. Larsson, S. Bertilsson, M. Furlani, I. Albinsson and B.E. Mellandera, "Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO<sub>2</sub> cells at different levels of ageing," *Journal of Power Sources*, Vol. 373, pp. 220–231, 2018.
- [21] D. Ren, X. Liu, X. Feng, L. Lu, M. Ouyang, J. Li and X. He, "Model-based thermal runaway prediction of lithium-ion batteries from kinetics analysis of cell components," *Applied Energy*, Vol. 228, pp. 633–644, 2018.
- [22] M. Sheikh, A. Elmarakbi and M. Elkady, "Thermal runaway detection of cylindrical 18650 lithium-ion battery under quasi-static loading conditions," *Journal of Power Sources*, Vol. 370, pp. 61–70, 2017.
- [23] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb and S. Al-Hallaj, "Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study," *Journal of Power Sources*, Vol. 340, pp. 51-59, 2017.
- [24] S. Taniguchi, S. Shironita, K. Konakawa, O.S. Mendoza-Hernandez, Y. Sone and M. Umeda, "Thermal characteristics of 80°C storage-degraded 18650-type lithium-ion secondary cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 416, pp. 148–154, 2019.
- [25] M. Parhizi, M.B. Ahmed and A. Jain, "Determination of the core temperature of a

- Li-ion cell during Thermal Runaway," *Journal of Power Sources*, Vol. 370, pp. 27-35, 2017.
- [26] X. Feng, X. He, M. Ouyang, L. Lu, P. Wu, C. Kulp and S. Prasser, "Thermal runaway propagation model for designing a safer battery pack with 25 Ah  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  large format lithium ion battery." *Applied Energy*, Vol. 154, pp. 74-91, 2015.
- [27] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb and S. Al-Hallaj, "Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 110, pp. 883-890, 2017.
- [28] C. Yuan, Q. Wang, Y. Wang and Y. Zhao, "Inhibition effect of different interstitial materials on thermal runaway propagation in the cylindrical lithium-ion battery module," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 153, pp. 39-50, 2019.
- [29] K. Chen, Y. Chen, Z. Li, F. Yuan and S. Wang, "Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127, pp. 393-401, 2018.
- [30] J. Xie, Z. Ge, M. Zang and S. Wang, "Structural optimization of lithium-ion battery pack with forced air cooling system," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, pp. 583-593, 2017.
- [31] S. Hong, X. Zhang, K. Chen and S. Wang, "Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, pp. 1204-1212, 2018.
- [32] K. Chen, S. Wang, M. Song and L. Chen, "Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 177-186, 2017.
- [33] K. Chen, S. Wang, M. Song and L. Chen, "Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 943-952, 2017.
- [34] K. Chen, M. Song, W. Wei and S. Wang, "Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement," *Energy*, Vol. 145, pp. 603-613, 2018.
- [35] H. Sun and R. Dixon., "Development of cooling strategy for an air cooled lithium-ion battery pack," *Journal of Power Sources*, Vol. 272, pp. 404-414, 2014.
- [36] S. Shahid and M. Agelin-Chaab, "Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries," *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 5, pp. 351-363, 2018.
- [37] D. Chen, J. Jiang, G.H. Kim, C. Yang and A. Pesaran, "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 94, pp. 846-854, 2016.

- [38] M Mousavi, S. Hoque, S. Rahnamayan, I. Dincer and G.F. Naterer, "Optimal Design of an Air-Cooling System for a Li-Ion Battery Pack in Electric Vehicles with a Genetic Algorithm," *IEEE*, pp. 1848-1855, 2011.
- [39] Z. Lu, X. Yu, L. Wei, Y. Qiu, L. Zhang, X. Meng and L. Jin, "Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 28–40, 2018.
- [40] 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.
- [41] Y. Kitagawa, K. Kato and M. Fukui, "Analysis and Experimentation for Effective Cooling of Li-Ion Batteries," *Procedia Technology*, Vol. 18, pp. 63 – 67, 2014.
- [42] L.H. Saw, Y.J. King, M.C. Yew, T.C. Ng, W.T. Chong and N.A. Pambudi, "Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery," *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 2592–2597, 2017.
- [43] C. Bolsinger and Kai Peter Birke, "Effect of different cooling configurations on thermal gradients inside cylindrical battery cells," *Journal of Energy Storage*, Vol. 21, pp. 222–230, 2019.
- [44] D.C. Erb, S. Kumar, E. Carlson, I.M. Ehrenberg and S.E. Sarma, "Analytical methods for determining the effects of lithium-ion cell size in aligned air-cooled battery packs," *Journal of Energy Storage*, Vol. 10, pp. 39–47, 2017.
- [45] 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," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 1514–1522, 2017.
- [46] L.H. Saw, Y. Ye, M.C. Yew, W.T. Chong, M.K. Yew and T.C. Ng, "Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-Ion battery cooling system," *Applied Energy*, Vol. 204, pp. 1489–1499, 2017.
- [47] T. Zhang, Q. Gao, G. Wang, Y. Gu, Y. Wang, W. Bao and D. Zhang, "Investigation on the promotion of temperature uniformity for the designed battery pack with liquid flow in cooling process," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 655–662, 2017.
- [48] S.J. Pety, M.H.Y. Tan, A.R. Najafi, P.R. Barnett, P.H. Geubelle and S.R. White, "Carbon fiber composites with 2D microvascular networks for battery cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 115, pp. 513–522, 2017.
- [49] C. Zhao, W. Cao, T. Dong and F. Jianga, "Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 751–762, 2018.
- [50] K. Li, J. Yan, H. Chen and Q. Wang, "Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal

- management system,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 575–585, 2018.
- [51] M. Malik, I. Dincer, M.A. Rosen, M. Mathew and M. Fowler, “Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 472–481, 2018.
- [52] J. Zhao, Z. Rao and Y. Li, “Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 103, pp. 157–165, 2015.
- [53] E. Jiaqiang, D. Han, A. Qiu, H. Zhu, Y. Deng, J. Chen, X. Zhao, W. Zuo, H. Wang, J. Chen and Q. Peng, “Orthogonal experimental design of liquid-cooling structure on the cooling effect of a liquid-cooled battery thermal management system,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 508–520, 2018.
- [54] A. Jarrett and I.Y. Kim, “Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates,” *Journal of Power Sources*, Vol. 245, pp. 644–655, 2014.
- [55] M.H.Y.Tan, A.R.Najafi, S.J. Pety, S.R. White and P.H. Geubelle, “Multi-objective design of microvascular panels for battery cooling applications,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 135, pp. 145–157, 2018.
- [56] S. Wiriyasart, C. Hommalee, S. Sirikasemsuk, R. Prurapark, P. Naphon, “Thermal management system with nanofluids for electric vehicle battery cooling modules,” *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 18, pp. 1–11., 2020.
- [57] S. Wang, Y. Li, Y.Z. Li, Y. Mao, Y. Zhang, W. Guo and M. Zhong, “A forced gas cooling circle packaging with liquid cooling plate for the thermal management of Li-ion batteries under space environment,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 123, pp. 929–939, 2017.



(Sirikasemsuk, Wiriyasart, Naphon, & Naphon, 2021, pp. 8824-8836) เป็นบทความตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในเรื่อง Thermal cooling characteristics of Li-ion battery pack with thermoelectric ferrofluid cooling module. ลงในวารสาร *International Journal of Energy Research*, 45(6) หน้า 8824-8836. ฐานข้อมูล Q1



Received: 19 October 2020 | Revised: 16 December 2020 | Accepted: 18 December 2020  
DOI: 10.1002/er.6417

RESEARCH ARTICLE

INTERNATIONAL JOURNAL OF  
ENERGY RESEARCH WILEY

## Thermal cooling characteristics of Li-ion battery pack with thermoelectric ferrofluid cooling module

Sarawut Sirikasemsuk<sup>1</sup> | Songkran Wiriyasart<sup>1</sup> | Paisarn Naphon<sup>1</sup> | Nittaya Naphon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Thailand

<sup>2</sup>Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, Ongkharak, Thailand

### Correspondence

P. Naphon, Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Srinakharinwirot University 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok, 26120, Thailand.  
Email: paisarnn@g.swu.ac.th

### Summary

The batteries have been continuously for obtaining the high voltage platform and high density of energy with long lifecycle. The operating temperature of the battery cell has a significant effect on the thermal performance. This paper aims to consider the 18 650-type lithium-ion battery pack's thermal characteristics with the thermoelectric module using ferrofluid as a coolant. The experiment apparatus is test to determine the lithium-ion battery pack's temperature distributions. Effects of the relevant parameters; hot and cold side flow rates (0.03-0.05 m<sup>3</sup>/hr), supplied voltage through thermoelectric (8-12 V), coolant types (De-ionized water and ferrofluid), and ferrofluid concentrations (0.005%-0.015% by volume) on the battery pack's cooling performance are considered. It is found that the thermoelectric cooling system significantly affects the battery pack cooling and gives the temperature of battery below 30°C. Higher cold and hot side flow rates can decrease average battery cell temperature by 3°C to 5°C, and the obtained uniformity temperature is below 3°C. Besides, ferrofluid concentration significantly reduces the average battery cell temperature when compared with deionized water. The proposed cooling system demonstrates the advantage of the electrical vehicle battery pack with the thermal cooling system. However, the optimized battery thermal management system still performs much better than the original one for various coolant flow rates and for the situation of heat generation rate.

### KEYWORDS

cooling characteristics, ferrofluid, Li-ion battery, thermoelectric module

## 1 | INTRODUCTION

Electric vehicle (EV) batteries for electric vehicles have focused on higher voltage platform, high density, and reduce self-discharge rate.<sup>1</sup> The main Li-ion battery is classified into three different kinds of chemistries (LiCoO<sub>2</sub> (LCO), LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (LMO), LiFePO<sub>4</sub> (LFP)). LCO battery has more density but low thermal stability and low power density, short lifespan.<sup>2</sup> It has better thermal

stability for LMO but faster charging and discharging processes, less lifecycle, and lower density than the LCO.<sup>3</sup> The LFP cell battery has the longest lifecycle, the highest density, and the best thermal stability than the LCO and LMO cells' battery. However, it has a low energy density.<sup>4</sup> The battery physicochemical characteristics<sup>5</sup> depend on its temperature. Therefore, the range of operating temperature is small gap between 20°C and 40°C.<sup>6</sup> The physicochemical characteristics depend on

both too high and too low temperatures, which are related to the charged and discharged processes. As the generated heat is more than the dissipated, its temperature increases continuously. The thermal runaway of the battery cell occurs as its temperature is higher than 80°C.<sup>7</sup> The thermal runaway can be observed from the harmful gases, smokes, fires, and explosions.<sup>8,9</sup> The charged process with high rate at too low temperature reduces lifecycle.<sup>10</sup> For the rechargeable battery cells, the charge and discharge current loads are measured using C-rate. The nominal battery capacity magnitude is a C-rate stand for a current rate reading. For the charged and discharged processes, a higher load increases as C-rate increases, and the generated heat also increases. This means that the thermal stability decreases and results in higher battery degradation. To keep the operating temperature, the cooling system is also critical. Many papers presented on the numerical analysis of the different battery models, Newman's P2D with three-dimensional approach model,<sup>11</sup> in which Newman's P2D model is most commonly applied to consider the problem.<sup>12,13</sup> However, the P2D approach model is usually employed to solve the problem.<sup>14,15</sup> To ensure an excellent charged/discharged processes, the cooling system is critical. The cooling system can be divided into an air-cooling system, phase change material, and a liquid cooling system.

For air cooling systems, there are many advantages, including; simple system, less weight, and inexpensive.<sup>16</sup> However, the limitation of coolant thermal properties, therefore, the cooling system is not appropriately<sup>17</sup> to reduce the temperature with uniformity. However, cooling system can be developed to obtain higher thermal performance by using the various flow channels.<sup>18-20</sup>

Water gives higher specific heat and higher thermal conductivity as compared with air. For the cooling system, water and oil are used as coolants in the various systems. Therefore, water has an essential role in the various cooling systems such as machining system, electronic components, and engine cooling system.<sup>21-24</sup> In the battery system, water is used in various systems. However, the water is separated from the main heat source such as the cooling surfaces, jacket, and tubes<sup>25,26</sup> to avoid electrical short. However, these liquid cooling systems are a higher complex for the battery pack. Rao et al<sup>27</sup> applied a single-phase model to analyze the heat transfer performance of the liquid cooling system. Wang et al<sup>28</sup> enhanced the water cooling system's cooling capacity and stability. The obtained results showed that the higher performance increased the water flow rate. For the optimum flow rate, the highest operating temperature must keep lower than 48.7°C. The temperature

distribution inside the battery is within 5°C. Panchal et al<sup>29</sup> dissipated the generated heat from the electrical battery pack using water as a coolant. The maximum temperature reduces and small enough temperature uniformity is obtained. The effects of liquid cooling with a double cold plate<sup>30</sup> and the microchannel cold plate<sup>31</sup> on the lithium-ion pouch cell's thermal performance have been considered.

Phase change material (PCM) cooling is the cooling technique with the latent heat mode absorbing the generated heat. The phase change material has a simple structure, lightweight, and uniform temperature.<sup>32</sup> However, the cooling system is not good due to the phase change material's thermal conductivity limitation. Many works presented battery cooling with this method. Rao et al<sup>33</sup> considered the effects of coolant flow, temperature, and thermal conductivity value on the battery pack's thermal cooling performance. They found that the highest operating temperature of battery packs tend to decrease with increasing flow channels. Next, Karimi et al<sup>34</sup> studied the PCM's thermal characteristics with changing material composites. Due to their low weight, flexible geometry, small compact structure, and do not require an outside power source, the heat pipes are also applied for the cooling system.<sup>35</sup> Wang et al<sup>36</sup> reviewed the cooling system with phase change material techniques. However, it usually combined the heat pipe with other cooling techniques to obtain better cooling performance.<sup>37</sup> Cao et al<sup>38</sup> fabricated and characterized a novel-shaped PCM for the battery pack's cooling. Kizilel et al<sup>39</sup> compared the PCM cooling system's cooling performance with other cooling techniques. It is found that the PCM cooling system is superior in cooling performance. However, due to the limitation of the total heat capacity, the PCM cooling system should be combined with other cooling systems.<sup>17</sup> Chen et al<sup>40</sup> considered the effect of liquid cooling plate on the Li-ion battery module. With the same input power, the battery unit's reduction temperature is higher than 1.87°C. Ammar et al<sup>41,42</sup> considered the flow behavior and heat transfer of the R134a refrigerant in the flat tube with small fin. The friction pressure drop tends to increase with higher mass flux and vapor quality and reduce temperature. Ali et al<sup>43</sup> considered the two-phase heat transfer enhancement of the steam-ethanol mixture in the horizontal fin tubes heat exchanger. The heat transfer augmentation of three times is obtained, and the condensate retention tends to decrease for the pure steam condensation. Besides, Ali<sup>44</sup> also reviewed the studies presented on the thermal efficiency augmentation of the PV/T using phase change material in the cooling system. The maximum heat transfer enhancement up to 20% in PV efficiency is obtained. Next, Rehman et al<sup>45</sup>

considered the effect of rotational angle on the condensate retention. Zhao et al<sup>46</sup> studied the performance of the two-phase heat pipe with various heat source modes. The fluctuation magnitude of heat source modes significantly affects the vapor pressure plug and displacement of liquid slug. Next, the PCM in the cooling system, especially for the microencapsulated protocols, has been considered.<sup>47</sup> The relevant parameters are also investigated and 84.50% encapsulation efficiency is obtained. Choudhari et al<sup>48</sup> numerically studied the battery thermal management system with different fin configurations. Chen et al<sup>49</sup> determined the appropriate temperature distribution for the fast charging process. The obtained highest temperature is 306 K with SD of 1.2 K.

As the literature reviewed above, the air-cooling system is simple system, less weight, more energy-saving. However, the cooling performance is not good as possible as for reducing temperature with uniformity. The liquid cooling system gives higher thermal efficiency but needs a circulation of coolant inside the system that adds a complicated system, more weight, and more energy consumption. Then the PCM system gives the best cooling thermal performance; however, it depends on the volume of PCM. The heat transferability depends on the coolant's thermophysical properties and flow conditions. Water and oil are mostly used in the cooling systems. Besides, ferrofluid application as a coolant in heat transfer augmentation thermal devices has received a great deal of attention. Ferrofluid properties include viscosity and conductivity and are sensitive with magnetic field effect. Ferrofluid has the capability of heat transfer enhancement. As mentioned above, there are many techniques for decreasing the temperature distribution problems of the battery system. Therefore, this study aims to study an EV Li-ion battery pack's transient thermal characteristics using a newly designed liquid cooling module with a separated flow channel with ferrofluid as a coolant. *Lithium-ion batteries* are commonly used for portable electronics and electric vehicles and are growing in popularity for various applications. Therefore, the *Lithium-ion batteries* are used in the present study. A newly designed electrical battery cooling system configuration is proposed and thermoelectric application for cooling the battery system is performed. The coolant is chilled by the thermoelectric cooling module, which decreases inlet temperature before entering the battery cooling system and then a higher cooling performance battery pack. Effects of hot and cold sides' coolant flow rates supplied voltage to the thermoelectric plate, charge and discharge current rate, and coolant types, and ferrofluid concentrations on the battery module's thermal characteristics have been considered.

## 2 | EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURE

### 2.1 | Experimental apparatus

Figure 1 demonstrates the experimental system for the cylindrical lithium-ion battery unit. There are four main loops, including refrigeration cooling loop, hot side ferrofluid loop, cold side cooling loop, and electrical control loop. The refrigeration cooling loop is used to chill the hot side coolant loop before entering the thermoelectric module's hot side flow channel. The inlet hot side coolant ( $T_5$ ) before entering the thermoelectric cooling module is chilled and controlled by a storage coolant tank maintained by the R134a refrigeration cooling system. The hot side ferrofluid cooling loop consists of an ultrasonic bath, magnetic pump, and a peristaltic pump. The ferrofluid is sucked from the ultrasonic bath, flows through the flowmeter, flows into the TCM's hot side

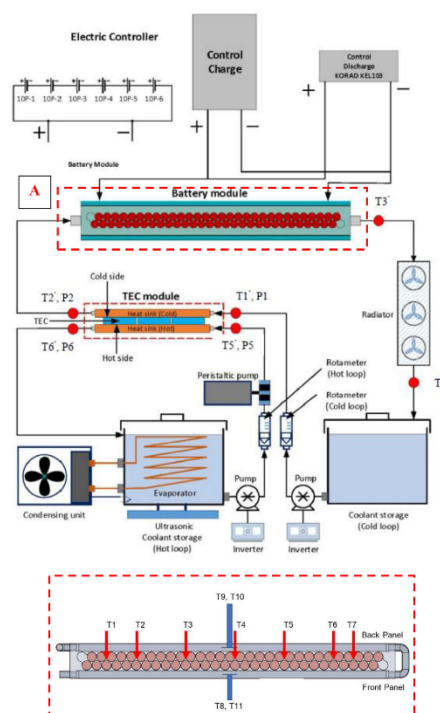


FIGURE 1 Schematic diagram of the experimental apparatus [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

flow channel, and then flows back into the ultrasonic bath. The flow rate is measured by the precise receiver and stopwatch. The digital weight scale is used to measure the fluid mass with accuracy of 0.01% full-scale reading, while the flowmeters are only used for monitoring the flow rate of coolants. The continuous ferrofluid flowing through the thermoelectric cooling module is performed by the water pump, while the pulsating flow of ferrofluid can be performed by the Longer peristaltic pump (YZ1515X). It comprised the peristaltic pump head, coupling module, silicone tubing, and AC motor. The three rollers' rotation speed is measured and controlled by the tachometer (Testo 470) and inverter, respectively. Two type-T thermocouples have an accuracy of 0.1% of full-scale reading for measuring the coolant temperatures at the inlet and outlet ports of the TCM hot side ( $T5'$ ,  $T6'$ ) and are recorded every 3 seconds by the Datalogger DT85, which is connected to the personal computer. The cold side water loop comprised the test section unit (battery pack), radiator, flowmeter, magnetic pump, and storage tank. The coolant is pumped and fed into the TCM's cold side for decreasing temperature before entering the test section (electric vehicle battery pack) and then flows into the heat exchanger to release heat into the environment and after that flows back to the tank. Four type-T thermocouples are applied for measuring the coolant temperature at various positions ( $T1'$ ,  $T2'$ ,  $T3'$ ,  $T4'$ ), which are precalibrated with a dry block-type calibrator.

## 2.2 | Thermoelectric cooling module

The thermoelectric cooling module (TCM) used in this study consists of three parts: hot side heat sink unit, cold side heat sink unit, and three thermoelectric plates. The heat sink unit (water block) configuration is designed and analyzed by the computational fluid dynamic method<sup>50</sup> and fabricated from the aluminum block to obtain higher heat removal capacity from the thermoelectric, as shown in Figure 2. The thermoelectric surfaces are attached with two water blocks and covered and locked with two acrylic plates. A thin material with 1.5 W/[m °C] thermal conductivity is applied to interfaces to reduce thermal contact resistance. An acrylic plate and Aeroflex sheets are applied to insulate the TCM for reducing heat loss. Both side surface temperatures of thermoelectric plates can be measured by machining both side water block surfaces with a dimension of 1 × 1 mm in a straight groove and then attached with four type-T thermocouples with the special glue ( $T7'$ ,  $T8'$ ,  $T9'$ ,  $T10'$ ).

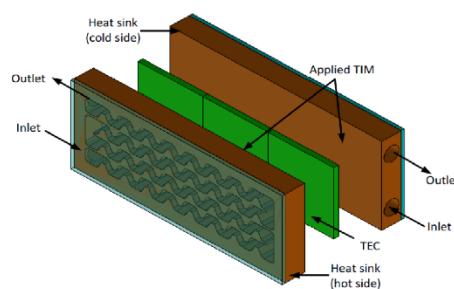


FIGURE 2 Details of the thermoelectric cooling module [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

## 2.3 | Ferrofluid preparation

The properties of an iron oxide nanoparticle ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) are shown in Table 1. As shown in Figure 3, due to the stick in a flow channel, the ferrofluid with very lean concentrations of 0.005% and 0.015% by volume, which dispersed by an ultrasonic unit (DELTA). The ultrasonic bath's moving process has continuously been done for 1 hour until the stable ferrofluid is obtained. However, to keep the stable ferrofluid stationary state during experiment, the ultrasonic unit has been kept on-mode for 20 minutes each hour (confirmed by observing the precipitation of nanoparticles suspending in the base fluid after 8 hours left as shown in Figure 3). The published correlations<sup>51-54</sup> are applied to calculate all properties of ferrofluid are determined as follows.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\varphi)\mu_w, \quad (1)$$

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_w - 2\varphi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + \varphi(k_w - k_p)} \right] k_w, \quad (2)$$

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_w, \quad (3)$$

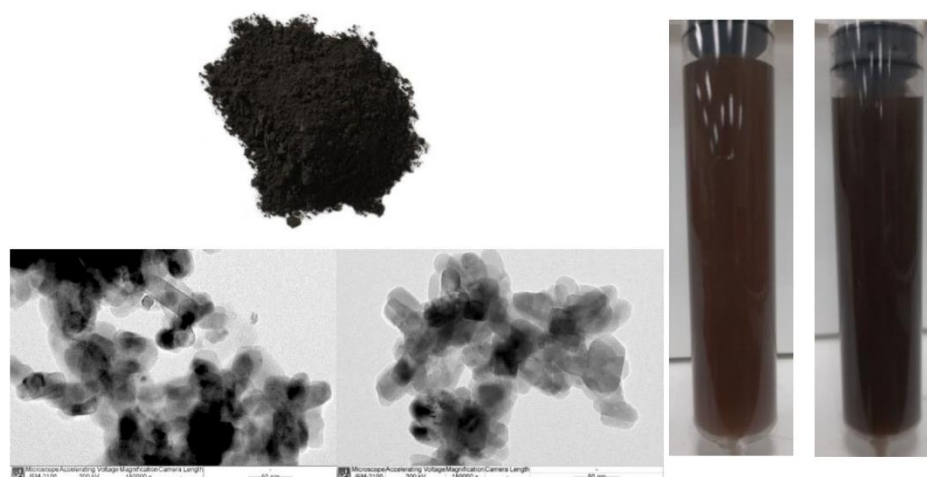
$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi(\rho C_p)_p + (1 - \varphi)(\rho C_p)_w, \quad (4)$$

where  $\varphi$  is the ferroparticle volume fraction,  $k_{nf}$  is the ferrofluid thermal conductivity,  $k_w$  is the base fluid thermal conductivity,  $k_p$  is the ferroparticles thermal conductivity,  $(\rho C_p)_{nf}$  is the ferrofluid heat capacity,  $(\rho C_p)_w$  is the base fluid heat capacity,  $(\rho C_p)_p$  is the ferroparticles heat capacity,  $\rho_{nf}$  is the ferrofluid density,  $\rho_p$  is the ferroparticles density,  $\rho_w$  is the base fluid density,  $\mu_{nf}$  is the ferrofluid viscosity, and  $\mu_w$  is the base fluid viscosity.



Properties	Temperature (°C)	Water	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	25 ± 1	996.875	5180
Thermal conductivity, $k$ (W/m.K)		0.60965	80.4
Viscosity, $\mu$ (mPa S)		0.7275	-
Specific heat, $C_p$ (J/kg.K)		4181	670
Purity (%)		-	>99.9
Average diameter (nm)		-	23

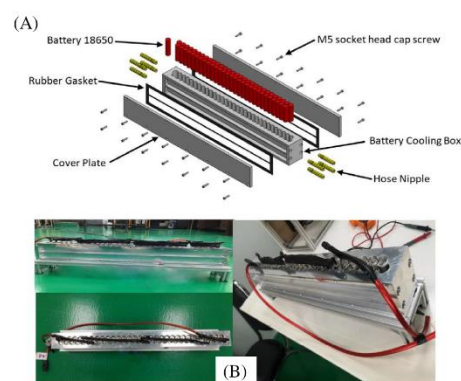
**TABLE 1** Thermo-physical properties of water and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>3</sup>



**FIGURE 3** Photograph of the ferroparticles (SEM) and ferrofluid [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

#### 2.4 | The liquid cooling package and electrical battery pack

*Li-ion batteries* are commonly used for portable electronics and electric vehicles and are growing in popularity for various applications. There are many battery modules in HEVs/EV, and each module is composed of many battery cells. For tesla EV, the EV's electrical battery modules are 16 modules, and each module is composed of 444 cylindrical battery cells, which have eight row arrangement. In this work, the only row of the cylindrical battery cell is used to analyze, in which there are 60 cylindrical lithium-ion battery cells. Figure 4 shows the electric vehicle battery pack's schematic diagram, which consists of a liquid cooling package and the battery pack. The liquid cooling package consists of the main cooling block and two cover plates, fabricated from an aluminum block. In the central zone, the main cooling block is machined into the 60 cylindrical holes with a diameter\*height of



**FIGURE 4** Details of the A, the battery cooling module, and B, photograph of the battery cooling module [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

18.44\*65.21 mm for inserted cylindrical battery cells, while the left-and right-hand side surfaces of the main cooling block are machined into the top and below flow channels as shown in Figure 4B. The rubber gasket is used to attach both side interfaces between the main cooling block and the cover plate, lock both sides with the screws, and be covered with the thermal insulator Aeroflex sheet to prevent heat loss. The coolant flows into the liquid cooling package at the below left-hand side flow channel, below right-hand side, top right-hand side flow channel, and then flow in the top left-hand side flow channel liquid cooling package. Before testing the battery pack, all battery cells must have a capacity not less than 75% of the maximum capacity (current). The details of the 18 650 cylindrical battery cells are shown in Table 2. The electrical battery pack (60 cells) consists of six segments (10P-1 to 10P-6), in which each segment is composed of 10 battery cells and is connected in series to obtain 4.2 V and 30 A. Each segment is connected in parallel to obtain 24 V and 30 A. The poles of the battery cells are connected with brazing the nickel plate by pulse spot welding machine (SUNKCO 709A), in which the nickel plates are commonly applied in the BTMs of EVs and connected with the copper cables through control system. The supplied voltage and current to the battery unit are controlled through BMS unit. The power supply and the relevant instruments used in the charged and discharged processes are shown in Figure 5, while the adjusted resistor load bar with capacity of 1000 W is used for the discharged process, as shown in Figure 5D. All thermocouples used for the temperature distribution measuring are connected to the Datataker DT85, which is connected to the personal computer. As shown in Figure 6, a total of 7 type-T thermocouples are installed

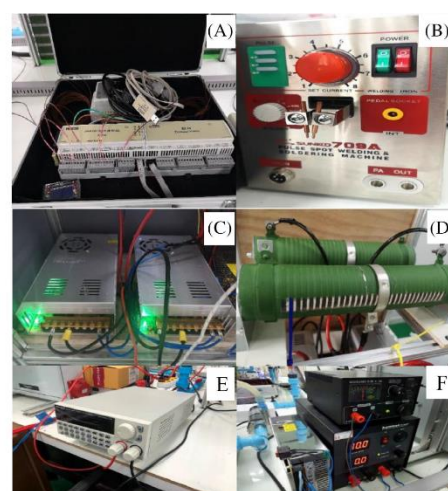
on principle surface battery cells (T1-T7) in the middle zone of the battery cell height while four thermocouples are installed to measure the coolant temperature (T8-T11) as shown in Figure 6C.

## 2.5 | Experimental test method

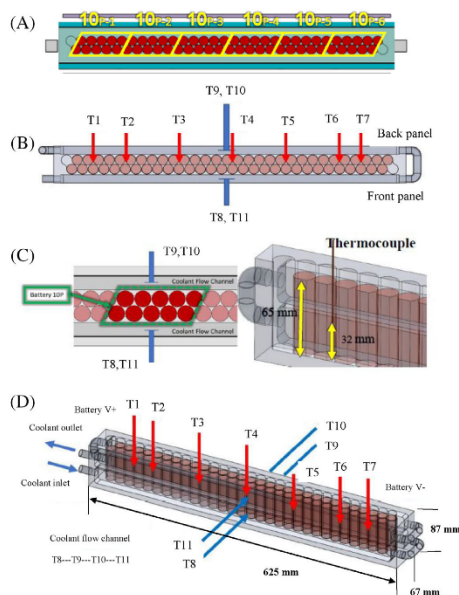
This is because the ambient air temperature affects the thermal performance of EV battery pack. Therefore, the test room temperature is controlled at constant ambient temperature of 25°C. The relevant instruments have the uncertainty and accuracy as shown in Table 3. First of all, in this experiment, the procedure of the charged and discharged processes is performed without liquid cooling circulation for different current rates (1 A, 2 A, 4 A) to consider the transient thermal response of the battery unit with operating time. As expected, the discharge/charge current rates show significant effect on the module overall temperature. If using a very high charge/discharge current, the battery cell is full and runs out quickly, and it is difficult to observe the battery temperature changing. Therefore, the procedure of the charged and discharged processes is performed for the current rates of 1 A, 2 A, and 4 A. Because the electrical battery pack is connected to an AC power supply and control through the BMS, the voltage and current are calibrated with the standard calibrator with the voltage and current

**TABLE 2** Details of the 18 650-type cylindrical battery cell<sup>55</sup>

Properties	Specification
Electrolyte material chemistry	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Diameter	18.43 mm
Height	65.21 mm
Weight	40.6 g
Nominal capacity	1283.325 mAh
Nominal voltage	3.7 V
Charge cut-off voltage	4.2 V (100% SOC)
Discharge cut-off voltage	3 V (0% SOC)
Calculated internal resistance	54.175 mR
Internal resistance of battery cell	54.175 mΩ
Cathode and anode materials	Aluminum
Cathode and anode thermal conductivity	205 W/(mK)



**FIGURE 5** Photograph of instruments [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]



**FIGURE 6** Details of A, battery pack, B, the temperature battery measurement positions, C, position of the vertical temperature battery measurement, and D, position of the coolant temperature measurement flowing through the battery pack [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

**TABLE 3** Uncertainty and accuracy of the instruments

Instruments	Accuracy	Uncertainty
Voltage supplied by power source (voltage)	0.20%	$\pm 0.50$
Current supplied by power source (ampere)	0.20%	$\pm 0.50$
Digital weight scale (gram)	0.01%	$\pm 0.01$
Thermocouple type T, Data logger ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.10%	$\pm 0.10$
Differential pressure transducer	0.02%	$\pm 0.02$

uncertainties of  $\pm 0.5$  V and  $\pm 0.05$  A, respectively. Experiments have been performed with various coolant flow rates and supplied voltage through the TCM, significantly affecting the battery module's cooling performance. For a given cold side working fluid flow rate and voltage provided into the TCM, the ferrofluid flowing into the TCM's hot side is increased in small increments. As mentioned above, the temperature at various positions, pressure

drop, voltage input, the thermoelectric plate temperature, and coolant flow rates are recorded. The details of experimental conditions are listed, as shown in Table 4. The friction pressure drop of the coolant across the thermoelectric cooling module is recorded with the transducer (Yokagawa). To repeatability of the measured data, the relevant parameters are recorded three times. The uncertainty of the relevant parameters<sup>56</sup> can be determined as follows:

$$UN = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial V_i} UV_i \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

where  $UV_i$  and  $UN$  are the error of each relevant parameter and the total error, respectively. For all cases, the maximum absolute uncertainty is  $< 10\%$ .

### 3 | RESULTS AND DISCUSSION

The operating conditions are controlled at a constant temperature of  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . The trickle method is used for the charged process and a constant current rate at 4 A for the discharged process. The cut-off voltages of 4.2 V and 3.0 V are set for the charging process and the discharging process, respectively. First of all, to observe the accumulated heat from the charged and discharged processes, the battery pack is operated (charged and discharged processes) without liquid cooling circulation. Without liquid cooling circulation, the battery pack temperatures at various positions are continuously increased due to heat accumulation. Because of the low reaction for the charged process, the temperature increases for the discharged process are more than that for the charged process, as shown in Figure 7A. The reaction's heat is caused by lithium-ion embedding on/off between two poles. For the charged and discharged processes, the reactions are endothermic reaction and exothermic reaction, respectively. Generally, the generated heat from the battery is divided into two modes as reversible and irreversible heat modes. Reversible heat mode is produced from entropy change inside the battery, and overpotential resistance and electrical resistance cause the irreversible mode. The equation for the generated heat from the battery is proposed by Bernardi et al<sup>55</sup> as follows:

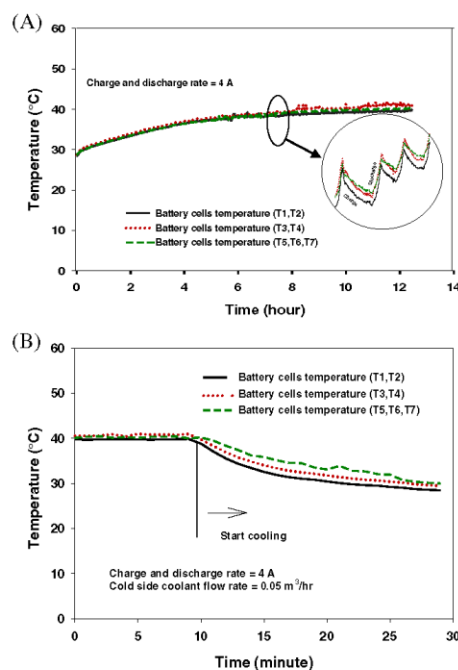
$$Q = \pm I(U_{ca} - U_{an} - U) - I \left( T \frac{d(U_{ca} - U_{an})}{dT} \right), \quad (6)$$

where  $I(U_{ca} - U_{an} - U)$  is the irreversible heat mode,  $I$  is current,  $U_{ca}$  is the cathode pole for open circuit potential (OCP),  $U_{an}$  is an anode pole for open circuit potential



**TABLE 4** Details of experimental conditions

Battery pack	Cold side loop	Hot side cooling loop	Thermoelectric cooling module
-Charge process; Trickle method	-Coolant; De-ionized water	-Coolants; De-ionized water, Ferrofluid with concentrations of 0.005, 0.015%vol.	Supplied voltage; 8.12 V
Discharge process; 1 A, 2 A, 4 A	Flow rate; 0.03, 0.05 m <sup>3</sup> /h	-Flow rate; 0.03, 0.05 m <sup>3</sup> /h	

**FIGURE 7** Variations of battery cells temperature at various positions for charge and discharge rate (119 loops) A, without cooling system and B, with cooling system [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

(OCP),  $U$  is the terminal voltage, and  $T$  is the temperature. The second term is the entropy change which results in the reversible heat changing. Entropy coefficient ( $d[U_{ca} - U_{an}]/dT$ ) is a function of density of energy, state of charge (SOC), and temperature. The changing sign of this term depends on the charged and discharged processes, and it equal to zero as there is no current in the system.<sup>55</sup> The reversible heat dominates for a low current rate and the irreversible heat for a high current rate.<sup>57</sup> The irreversible heat increases both the charged

and discharged process and also increases with increase in the current rate or the nominal battery capacity.<sup>58</sup> The reversible heat can be either positive or negative, which depends on the entropic coefficient sign. The battery system's liquid cooling module is a newly designed configuration in this study. Therefore, there are no previously published data for validation of the measured data. However, the charged and discharged processes' battery temperature trends are similar to the previously published results,<sup>59</sup> as shown in Figure 7A.

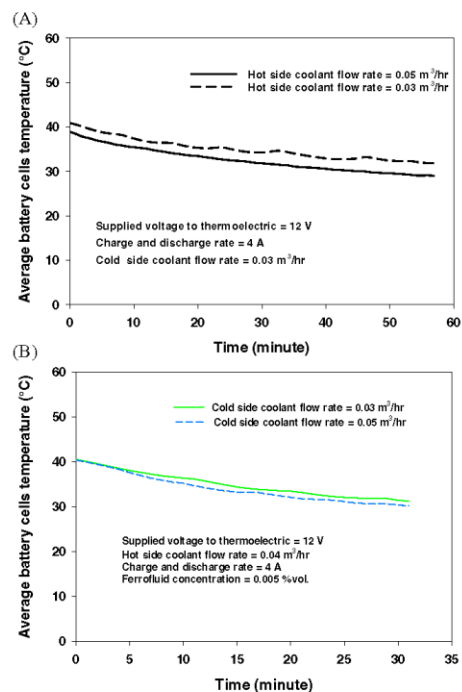
### 3.1 | Effect of the liquid cooling system

Figure 7A shows the battery cell temperature with operating time without a cooling system. The battery cell is divided into six segments. T1 to T7 represent the battery cell temperature at various positions along the coolant flow channel; T1 and T7 represent the battery cell temperature at the first segment (10P-1) and the last segment (10P-6), which measured the surface battery cell at the middle zone of each segment; and T2, T3, T4, T5, and T6 represent the battery cell temperature between each segment, as shown in Figure 6. For without coolant circulation, the generated heat is transferred to the battery block by conduction mode and then convection mode to the surrounding. The generated heat is more than the removal of heat capacity. Therefore, the central zone's battery pack temperature is the highest without liquid cooling circulation due to heat accumulation during the charged and discharged processes. Generally, to enhance the battery pack's stability and safety, the lithium-ion battery pack's optimal operating temperature is in the range of 25°C to 40°C.<sup>59</sup> In the charged and discharged processes, the battery cell temperature significantly tends to increase with operating time. However, as the operating time is more than 6 hours, the battery cell temperature slightly increases. An average battery cell temperature reaches 40°C as the operating time is 8 hours with the cycling of 110. Figure 7B also shows the battery cell temperature with the cooling system. In the test procedure, the battery pack is charged by the trickle method and the discharged process is done with the constant supplied

current rate of 4 A until the battery pack temperature reaches 40°C, and then the coolant circulation flowing through the battery pack is performed. The liquid cooling has a significant effect on the battery system's removal performance, which reduces the accumulated heat inside the battery pack, and the appropriate value is not over 30°C. It is seen that the battery cell temperatures drop obviously with the coolant circulation and decrease to 30°C. The liquid cooling system's removal capacity is higher than the generated heat. The battery cell temperature at various positions drops obviously with the coolant circulation and decreases to 30°C as the liquid cooling circulation started at 25 minutes. The heat removal depends on the difference in temperature between battery cell and coolant. Therefore, the temperature of the battery cell at the inlet port (T1, T2) of the battery pack is lower than the middle zone and another end with a difference of 2°C to 3°C as shown in Figure 7B.

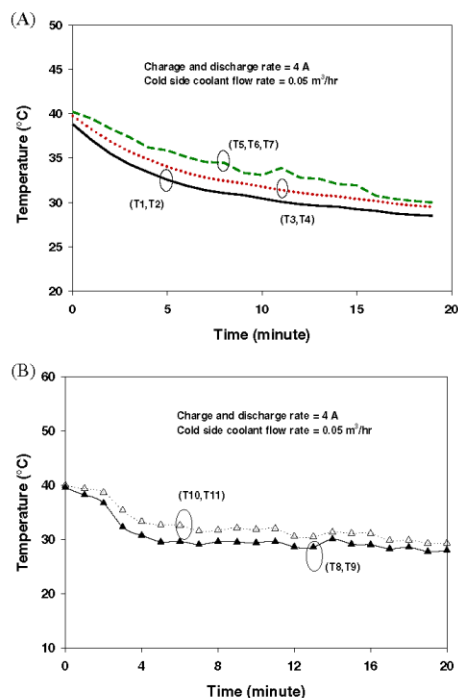
### 3.2 | Effect of hot and cold sides coolant flow rate

The thermoelectric cooling module (TCM) operates by the Peltier effect. As DC electric feeds into the device, it results in heat transfer from one side to the other so that one side gets cooler and the other side gets hotter. Generally, to enhance the TCM's cooling performance, two sides are also attached to the heat sink. For this study, two sides are attached with newly designed two heat sink water blocks, as shown in Figure 2. In the test, the deionized water flows into the cold side of TCM to decrease temperature before entering the battery pack and, after that, flows into the heat exchanger for releasing heat into the surrounding, while another side is deionized water/ferrofluid. The TCM performance is a function of relevant parameters, including ambient temperature, hot and cold side heat sinks, hot and cold side coolant conditions, thermal load, Peltier module's geometry, and Peltier electrical parameters. The cooling loop's energy balance, the cooling effect of TCM, and the radiator's released thermal are dominated than the absorbed heat by the coolant in the battery pack. Therefore, the battery pack temperature tends to decrease with operating time and results in increased performance. The higher hot side coolant flow rate gives higher cooling performance and then higher battery pack performance. Therefore, the battery cell temperatures are significantly reduced by the increased hot side coolant flow rate, as shown in Figure 8A. As seen, the temperature differences between two cases coolant flow rates are within 4°C to 5°C for the battery cell temperature. The effects of cold side coolant flow rate on the battery cell temperature are



**FIGURE 8** Effects of A, hot side coolant flow rates and B, cold side coolant flow rates on average battery cells temperature [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

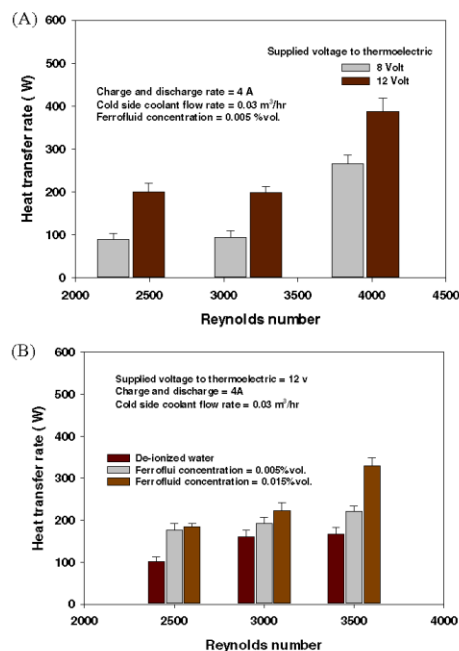
also shown in Figure 8B. As expected, the TCM's thermal cooling performance increases with increasing the cold side coolant flow rate, which results in the increased cooling performance. Therefore, the battery cell temperatures are significantly reduced by the increased cold side coolant flow. The battery pack's transient temperature at various positions (T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7) is shown in Figure 9A. The heat removal from the battery cells accumulates continuously, which increases battery cell temperature. The cells adjacent to the pack inlet's battery cell temperature are lower than those near the middle zone and another end. For the coolant flowing through the battery pack, it flows into the battery pack at the left-hand side below flow channel (T8), right-hand side below flow channel (T9), right-hand side top flow channel (T10), and then left-hand side top flow channel as shown in Figure 6D. The coolant temperature continuously increases as there is a higher distance from the inlet port as shown in Figure 9B.



**FIGURE 9** Variation of A, coolant temperature and B, battery cells' temperature at various positions [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

### 3.3 | Effect of supplied voltage through the thermoelectric cooling module

Figure 10 shows the effects of supplied voltage through the thermoelectric cooling module and hot side coolant types on the battery pack cooling performance for different working fluid mass flow. As shown in Figure 10A, the thermoelectric cooling capacity increases with increasing supplied voltage, which decreases the inlet coolant temperature entering the battery pack. This means that cooling performance at the supplied voltage = 12 V is more than at 8 V. Higher coolant flow rate results in increase removal capacity. Therefore, the cooling performance from a higher coolant flow rate is more than that lower ones. Effect of hot side coolant types on the cooling performance is considered. The difference in coolant types (De-ionized water or ferrofluid) flows in the test section, entering the hot side of the TCM, while de-ionized water for another side. Due to the higher thermophysical properties of ferrofluid



**FIGURE 10** Effect of A, supplied voltage to thermoelectric and B, hot side coolant types on heat transfer rate [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

flowing through the hot side of TCM, the cooling capacity in the hot side significantly increases and gives increasing cooling performance at another side (decrease inlet coolant temperature). The cooling capacity of ferrofluid is more than that of de-ionized water. Besides, higher ferrofluid concentration results in increasing thermophysical properties and higher cooling capacity, as shown in Figure 10B.

## 4 | CONCLUSION

The thermal cooling system has a significant effect on maintaining the operating temperature of the electric battery vehicle. In the present study, the EV battery pack's thermal characteristics with the thermoelectric cooling module using water and ferrofluid as coolants is investigated. The results showed that the battery cell temperatures are below 40°C as the liquid cooling circulation system. A higher cold and hot side flow rate can decrease the average battery cell temperature by 3°C to 5°C, and the uniformity temperature of the battery cells arranged

in the cooling pack is below 3°C. Ferrofluid concentration significantly decreases the average battery cell temperature. Therefore, the proposed battery ferrofluid cooling pack can optimize the electric vehicle battery pack's thermal management system. However, it will be more explored in future including; higher battery cells, different battery types, the charged and discharged current rate, the coolant flow direction, and the optimized coolant flow rate.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their appreciation to the Srinakharinwirot University (SWU) for providing financial support for this study.

#### NOMENCLATURE

BMS	battery management system (–)
BTMS	battery thermal management system (–)
C-rate	the battery discharge/charge rate relative to its maximum capacity (–)
2D	two dimensional (–)
3D	three dimensional (–)
EV	electrical vehicle (–)
HEV	hybrid electrical vehicle (–)
$I$	current (ampere)
$I(U_{ca}-U_{an}-U)$	irreversible heat (W)
Li-ion	lithium ion (–)
OPC	open circuit potential (–)
PCM	phase change material (–)
P2D	pseudo two-dimensional (–)
SOC	state of charge (–)
$T$	temperature (°C)
TCM	thermoelectric cooling module (–)
$U_{ca}$	open circuit potential of the cathode (voltage)
$U_{an}$	open circuit potential of the anode (voltage)
$U$	terminal voltage (voltage)
$\varphi$	ferroparticle's volume fraction (%)
$k_{nf}$	ferrofluid thermal conductivity ( $W m^{-1} \circ C^{-1}$ )
$k_w$	base fluid thermal conductivity ( $W m^{-1} \circ C^{-1}$ )
$k_p$	ferroparticle's thermal conductivity ( $W m^{-1} \circ C^{-1}$ )
$(C_p)_{nf}$	ferrofluid specific heat capacity ( $kJ kg^{-1} \circ C^{-1}$ )
$(C_p)_w$	base fluid specific heat capacity ( $kJ kg^{-1} \circ C^{-1}$ )
$(C_p)_p$	ferroparticle's specific heat capacity ( $kJ kg^{-1} \circ C^{-1}$ )
$\rho_{nf}$	ferrofluid density ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_p$	ferroparticle's density ( $kg m^{-3}$ )
$\rho_w$	base fluid density ( $kg m^{-3}$ )
$\mu_{nf}$	ferrofluid viscosity (Pa s)
$\mu_w$	base fluid viscosity (Pa s)
$UV_i$	error of each relevant parameter
UN	total error (%)

#### ORCID

Paisarn Naphon  <https://orcid.org/0000-0001-9184-7466>

#### REFERENCES

- Yang N, Zhang X, Li G, Hua D. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: a comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Appl Therm Eng*. 2015;80:55-65.
- Zhao C, Kang W, Zhao S, Shen Q. Hydrazine-hydrothermal synthesis of pure phase O-LiMnO<sub>2</sub> for lithium-ion battery application. *Micro Nano Lett*. 2011;6:820-829.
- Shan C, Guanghui G, Fangfang L. Study on the performance of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> using spent Zn-Mn batteries as manganese source. *J Solid State Electrochem*. 2013;18:1495-1502.
- Julien C, Mauger A, Zaghbi K, Groult H. Comparative issues of cathode materials for li-ion batteries. *Inorganics*. 2014;2:132-154.
- Xu J, Lan C, Qiao Y, Ma Y. Prevent thermal runaway of lithium-ion batteries with mini-channel cooling. *Appl Therm Eng*. 2017;110:883-890.
- Yan J, Wang Q, Li K, Sun J. Numerical study on the thermal performance of a composite board in battery thermal management system. *Appl Therm Eng*. 2016;106:131-140.
- Wang Q, Ping P, Zhao X, Chu G, Sun J, Chen C. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *J Power Sources*. 2012;208:210-224.
- Shah K, Chalise D, Jain A. Experimental and theoretical analysis of a method to predict thermal runaway in Li-ion cells. *J Power Sources*. 2016;330:167-174.
- Zinth V, Von Lüders C, Hofmann M, et al. Lithium plating in lithium-ion batteries at sub-ambient temperatures investigated by in situ neutron diffraction. *J Power Sources*. 2014;271:152-159.
- E J, Liu T, Yang WM, Li J, Gong J, Deng Y. Effects of fatty acid methyl esters proportion on combustion and emission characteristics of a biodiesel fueled diesel engine. *Energy Convers Manag*. 2016;117:410-419.
- Wu B, Yufit V, Marinescu M, Offer G, Martinez-Botas R, Brandon N. Coupled thermal-electrochemical modelling of uneven heat generation in lithium-ion battery packs. *J Power Sources*. 2013;243:544-554.
- He F, Ma L. Thermal management of batteries employing active temperature control and reciprocating cooling flow. *Int J Heat Mass Transf*. 2015;83:164-172.
- Fan L, Khodadadi JM, Pesaran AA. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *J Power Sources*. 2013;238:301-312.
- Mahamud R, Park C. Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *J Power Sources*. 2011;196:5685-5696.
- Sasmito A, Birgersson E, Mujumdar A. A novel flow reversal concept for improved thermal management in polymer electrolyte fuel cell stacks. *Int J Therm Sci*. 2012;54:242-252.
- Lee DW. Development of BLDC motor and multi-blade fan for HEV battery cooling system. *Int J Automot Technol*. 2014;15:1101-1106.
- Ling Z, Wang F, Fang X, Gao X, Zhang Z. A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase

- change materials with forced-air cooling. *Appl Energy*. 2015; 148:403-409.
18. Cho GY, Choi JW, Park JH, Cha SW. Transient modeling and validation of lithium ion battery pack with air cooled thermal management system for electric vehicles. *Int J Automot Technol*. 2014;15:795-803.
  19. Xu XM, He R. Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling. *J Power Sources*. 2013; 240:33-41.
  20. Chen D, Jiang J, Duan Y, Wang Z, Wen F. Fluid and thermal analysis of power Li-ion battery pack and experimental verification. Paper presented at: Proceedings of the Int. Con. Electrical and Information Technologies for Rai Transportation (EITRT2013), Vol. 2, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 161-170, 2014.
  21. Wang B, Chen F, Liu F, Wang W, Xue P, Ma Z. Enhanced mechanical properties of friction stir welded 5083Al-H19 joints with additional water cooling. *J Mater Sci Technol*. 2017;33: 1009-1014.
  22. Bayomy AM, Saghir MZ, Yousefi T. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: experimental and numerical approach. *Int J Therm Sci*. 2016;109:182-200.
  23. Chen Y, Han W, Jin H. Investigation of an ammonia-water combined power and cooling system driven by the jacket water and exhaust gas heat of an internal combustion engine. *Int J Refrig*. 2017;82:174-188.
  24. Choi BC. Thermodynamic analysis of a transcritical CO<sub>2</sub> heat recovery system with 2-stage reheat applied to cooling water of internal combustion engine for propulsion of the 6800 TEU container ship. *Energy*. 2016;107:532-541.
  25. Tong W, Somasundaram K, Birgersson E, Mujumdar AS, Yap C. Numerical investigation of water cooling for a lithium-ion bipolar battery pack. *Int J Therm Sci*. 2015;94:259-269.
  26. Panchal S, Dincer I, Agelin-Chaab M, Fraser R, Fowler M. Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO<sub>4</sub> battery. *Int J Heat Mass Transf*. 2016;101:1093-1102.
  27. Rao Z, Zhang Y, Wang S. Energy saving of power battery by liquid single-phase convective heat transfer. *Energy Educ Sci Technol Part: A Energy Sci Res*. 2012;30:103-112.
  28. Wang C, Zhang G, Li X, et al. Experimental examination of large capacity LiFePO<sub>4</sub> battery pack at high temperature and rapid discharge using novel liquid cooling strategy. *Int J Energy Res*. 2017;13:1-11.
  29. Panchal S, Dincer I, Agelin-Chaab M, Fraser R, Fowler M. Thermal modeling and validation of temperature distributions in a prismatic lithium-ion battery at different discharge rates and varying boundary conditions. *Appl Therm Eng*. 2016;96: 190-199.
  30. Patil MS, Seo JH, Panchal S, Lee MY. Numerical study on sensitivity analysis of factors influencing liquid cooling with double cold-plate for lithium-ion pouch cell. *Int J Energy Res*. 2020. <https://doi.org/10.1002/er.5946>.
  31. Panchal S, Gudlanarva K, Tran MK, Fraser R, Fowler M. High Reynold's number turbulent model for Micro-Channel cold plate using reverse engineering approach for water-cooled battery in electric vehicles. *Energies*. 2020;13:1638.
  32. Alipanah M, Li X. Numerical studies of lithium-ion battery thermal management systems using phase change materials and metal foams. *Int J Heat Mass Transf*. 2016;102:1159-1168.
  33. Rao Z, Wang Q, Huang C. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled. *Appl Energy*. 2016;164:659-669.
  34. Karimi G, Azizi M, Babapoor A. Experimental study of a cylindrical lithium ion battery thermal management using phase change material composites. *J Storage Mater*. 2016;8:168-174.
  35. Putra N, Ariantara B, Pamungkas RA. Experimental investigation on performance of lithium-ion battery thermal management system using flat plate loop heat pipe for electric vehicle application. *Appl Therm Eng*. 2016;99:784-789.
  36. Wang Q, Jiang B, Li B, Yan Y. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016;64:106-128.
  37. Wu W, Yang X, Zhang G, Chen K, Wang S. Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system. *Energy Convers Manag*. 2017;138:486-492.
  38. Cao R, Li X, Chen S, Yuan H, Zhang X. Fabrication and characterization of novel shape-stabilized synergistic phase change materials based on PHDA/GO composites. *Energy*. 2017;138: 157-166.
  39. Kizilel R, Sabbah R, Selman JR, Al-Hallaj S. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *J Power Sources*. 2009;194:1105-1112.
  40. Chen S, Peng X, Bao N, Garg A. A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module. *Appl Therm Eng*. 2019; 156:324-339.
  41. Ammar SM, Abbas N, Abbas S, et al. Condensing heat transfer coefficients of R134a in smooth and grooved multiport flat tubes of automotive heat exchanger: an experimental investigation. *Int J Heat Mass Transf*. 2019;134:366-376.
  42. Ammar SM, Abbas N, Abbas S, Ali HM, Hussain I, Janjua MM. Experimental investigation of condensation pressure drop of R134a in smooth and grooved multiport flat tubes of automotive heat exchanger. *Int J Heat Mass Transf*. 2019;130:1087-1095.
  43. Ali H, Kamran MS, Ali HM, Imran S. Condensation heat transfer enhancement using steam-ethanol mixtures on horizontal finned tube. *Int J Therm Sci*. 2019;140:87-95.
  44. Ali HM. Recent advancements in P.V. cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – a comprehensive review. *Sol Energy*. 2020;197:163-198.
  45. Rehman HU, Ali HM, Ahmad S, Baluch MA. Experimental investigation of condensate retention on horizontal pin fin tube with varying pin angle. *Case Stud Therm Eng*. 2020;17:100549.
  46. Zhao J, Wu C, Rao Z. Numerical study on heat transfer enhancement of closed loop oscillating heat pipe through active incentive method. *Int Commun Heat Mass Transfer*. 2020;115:104612.
  47. Liu C, Du P, Fang B, Li Z, Chen B, Rao Z. Experimental study on a functional microencapsulated phase change material for thermal management. *Int Commun Heat Mass Transfer*. 2020; 118:104876.
  48. Choudhari VG, Dhoble AS, Panchal S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization. *Int J Heat Mass Transf*. 2020;163:120434.



49. Chen S, Bao N, Peng X, Garg A, Chen Z. A thermal design and experimental investigation for the fast charging process of a lithium-ion battery module with liquid cooling. *J Electrochem Energy Convers Storage*. 2020;17:021109.
50. Naphon P, Wiryasart S. Experimental and numerical study on thermoelectric liquid cooling module performance with different heat sink configurations. *Heat Mass Transf*. 2019;55:2445-2454.
51. Pak BC, Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp Heat Transfer*. 1998;11:151-170.
52. Xuan Y, Roetzel W. Conceptions of heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transf*. 2000;43:3701-3707.
53. Drew DA, Passman SL. *Theory of Multicomponent Fluids*. Berlin: Springer; 1999.
54. Maxwell JC. *A Treatise on Electricity and Magnetism, Second Ed*. Oxford University, England: Clarendon Press; 1881.
55. Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems. *J Electrochem Soc*. 1985;132: 5-12.
56. Coleman HW, Steele WG. *Experimental and Uncertainty Analysis for Engineers*. New York, NY: John Wiley & Sons; 1989.
57. Heubner C, Schneider M, Lämmel C, Michaelis A. Local heat generation in a single stack lithium ion battery cell. *Electrochem Acta*. 2015;186:404-412.
58. Nazari A, Farhad S. Heat generation in lithium-ion batteries with different nominal capacities and chemistries. *Appl Therm Eng*. 2017;125:1501-1517.
59. Pesaran AA. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *J Power Sources*. 2002;110:377-382.

**How to cite this article:** Sirikasemsuk S, Wiryasart S, Naphon P, Naphon N. Thermal cooling characteristics of Li-ion battery pack with thermoelectric ferrofluid cooling module. *Int J Energy Res*. 2021;45:8824–8836. <https://doi.org/10.1002/er.6417>



(Sirikasemsuk, Wiriyasart, Prurapark, Naphon, & Naphon, 2021) เป็นบทความตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในชื่อเรื่อง Water/Nanofluid Pulsating Flow in Thermoelectric Module for Cooling Electric Vehicle Battery Systems. ลงในวารสาร *International Journal of Heat and Technology*, 39(5), หน้า 1618-1626.ฐานข้อมูล Q3



**Water/Nanofluid Pulsating Flow in Thermoelectric Module for Cooling Electric Vehicle Battery Systems**



Sarawat Sirikasemsuk<sup>1</sup>, Songkran Wiriyasart<sup>1</sup>, Ruktai Prurapark<sup>2</sup>, Nittaya Naphon<sup>3</sup>, Paisarn Naphon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Thermo-Fluid and Heat Transfer Enhancement Lab. (TFHT), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok 26120, Thailand

<sup>2</sup> Department of Petroleum and Natural Gas Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok 26120, Thailand

<sup>3</sup> Department of Pharmaceutical Chemistry, Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, 63 Rangsit-Nakhornnayok Rd., Ongkharak, Nakhorn-Nayok 26120, Thailand

Corresponding Author Email: [paisarnn@g.swu.ac.th](mailto:paisarnn@g.swu.ac.th)

<https://doi.org/10.18280/ijht.390525>

**ABSTRACT**

**Received:** 20 May 2021

**Accepted:** 18 September 2021

**Keywords:**

*electric vehicle battery, thermoelectric cooling module, pulsating flow, nanofluid*

We investigated the results of the cooling performance of the pulsating water/nanofluids flowing in the thermoelectric cooling module for cooling electric vehicle battery systems. The experimental system was designed and constructed to consider the effects of the water block configuration, hot and cold side flow rates, supplied power input, and coolant types on the cooling performance of the thermoelectric module. The measured results from the present study with the Peltier module are verified against those without the thermoelectric module. Before entering the electric vehicle battering system with a Peltier module, the inlet coolant temperatures were 2.5-3.5°C lower than those without the thermoelectric system. On the hot side, the maximum COP of the thermoelectric cooling module was 1.10 and 1.30 for water and nanofluids as coolant, respectively. The results obtained from the present approach can be used to optimize the battery cooling technique to operate in an appropriate temperature range for getting higher energy storage, durability, lifecycles, and efficiency.

**1. INTRODUCTION**

Due to higher power density, lower weight, and a small area that results in higher generated heat, choosing a cooling technique for electronic battery modules in the designated temperature is warranted for obtaining higher energy storage, durability, and efficiency, especially for the modern battery pack. There are many advantages to this: high reliability, small size, stationary parts, lightweight, and without coolant. Thermoelectric cooling modules have been considered for various applications. Gould et al. [1] studied the power generation with the cooling system of the standard desktop computer. Martinez et al. [2] proposed a novel thermoelectric cooling solution with zero energy consumption. Kinsella et al. [3] designed a prototype electrical generator using a thermoelectric module. Suh et al. [4] used a thermoelectric system for cooling an electric vehicle's energy storage system. Huang et al. [5] studied a power generator with a loop heat pipe. Borisyuk et al. [6] considered the effect of film properties based on metal nanoclusters (Au, Pd, Pt) on thermoelectric performance. Kiflemariam and Lin [7] analyzed the geometric and system parameters affecting thermoelectric performance. Zhang et al. [8] estimated the internal battery temperature using a novel simplified thermoelectric model. Atouei et al. [9] experimentally investigated a two-stage Peltier generator system. Liu et al. [10] applied the generalized predictive control couple with a thermoelectric module to charge a LiFePO<sub>4</sub> battery. Rao et al. [11] proposed a liquid cooling system for the electric battery. Chen et al. [12-16] developed

the thermal efficiency of the battery pack cooling system with parallel/ U-type/ secondary vent air-cooled BTMS. Lu et al. [17] studied the channel width, and coolant flow rate on the thermal characteristics of storage arranged battery packs. Zhao et al. [18] applied a thermal-lumped treatment to analyze a single battery's heat generation. Arora [19] installed a temperature controller near a specified state to identify the potential candidate. Cao et al. [20] proposed a new heat pipe-assisted thermoelectric generator for the automobile heat recovery system. Daghigh and Khaledian [21] applied the cooling and heating systems with thermoelectrics in the photovoltaic collector. Ebrahimi and Derakhshan [22] investigated a combined fuel cell and thermoelectric cooler. Li et al. [23] developed the air conditioning system's hybrid model with a thermoelectric cooling system. Muralidhar et al. [24] applied thermoelectric generators to an electric vehicle. Song et al. [25] used phase materials and a semiconductor thermoelectric device cooling system for a thermal management system. Wang et al. [26] constructed a new thermoelectric hybrid battery system to utilize FeS<sub>2</sub> battery waste. Abedi et al. [27] studied a thermoelectric generator based on a catalytic combustor to approach electrical output. Cai et al. [28] considered the relevant parameters on the energy and entropy performance of TAC and TSC systems. Comamala et al. [29] proposed using an ATEG in an electric vehicle. Dan et al. [30] applied the micro heat pipe in the thermal cooling system. Darcovich et al. [31] combined the micro and macro-scale cooling systems in the battery pack's thermal state. Dufo-López et al. [32] optimized the supplied

electricity in off-grid systems using a thermo electric generator. Fotso et al. [33] analyzed a solar thermoelectric generator's thermal performance with a vortex tube for hybrid vehicles. Jiang et al. [34] studied a thermo electric cooler's performance in the thermal management of a cylindrical battery module. Kwan et al. [35] reviewed the energy management method for a fuel cell thermoelectric hybrid system. Lan et al. [36] studied a bifunctional thermoelectric generator that was applied in vehicle engines. Lyu et al. [37] studied the battery thermal cooling technique for emerging electric vehicles. Massaguer et al. [38] analyzed the behavior of an ATEG in a mid-size vehicle under a world harmonized light vehicle test procedure. Sulaiman et al. [39] combined the thermoelectric generator, heat pipe, and heat sink system in the heat recovery process. Shinaev et al. [40] used an AC/DC converter in the thermoelectric generator system of automotive. Finally, Toan et al. [41] studied the effectiveness of a thermal electrochemical generator with nano-flow channels. It is clear that air cooling as a technique is not appropriate for reducing battery temperature. This is due to the limitation of air's thermal properties. As a result, cooling systems have been continuously developed for obtaining higher thermal efficiency using different channel configurations [42-45] or by changing coolant. There are many applications of thermal cooling systems using nanofluid applications as a working fluid. Nanofluid has more heat capability. Many papers presented on the application of different nanofluids in the cooling systems; photovoltaic thermal system [46], flow regimes [47], automotive radiator [48], and tube convective heat transfer enhancement [49]. In addition, Ambreen et al. [50] and Babar and Ali [51] used nanofluid flowing through the Airfoil shaped pin-fin heat sink to determine thermal efficiency.

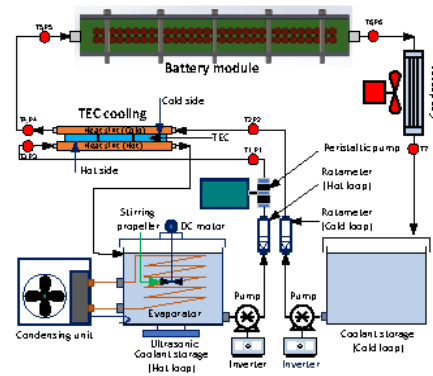
The literature review above shows that many works have considered the thermoelectric applications or thermal cooling of the electric vehicle battery module with different coolant types. Although the air-cooling technique is lower in weight, its cooling efficiency is low. The liquid cooling techniques result in higher thermal efficiency but are more complicated systems and have higher energy requirements. Generally, water and oil are mostly used as coolant in thermal cooling systems. In addition, nanofluid applications as a coolant in heat transfer augmentation have provided excellent heat transfer enhancements. However, no works are reported on the thermoelectric applications for the electric vehicle battery module, especially with nanofluids in pulsating flow conditions—some techniques for decreasing the operating temperature of the battery pack. The working fluid is cooled by the TCM, which reduces the inlet temperature, before flowing into the battery pack with greater cooling efficiency. The objective of the current study is to consider the thermal performance of the thermoelectric cooling module with water/nanofluids in a pulsating flow for an electric vehicle battery system. The effects of the relevant parameters, including the water block configurations, the flowrate of both sides of the working fluids, supplied power to the Peltier plate, and different coolants on the thermoelectric cooling module's cooling efficiency, were investigated.

**2. EXPERIMENTAL APPARATUS AND PROCEDURE**

**2.1 Experimental apparatus**

Figure 1 shows the experimental apparatus of the pulsating

water/nanofluids flowing in the cooling module of the electric vehicle battery system. The system is classified by two main loops: the hot side coolant loop for the hot side of the Peltier module and the cold side water loop for the cold side of the Peltier module. The hot side water/nanofluid's loop consists of a sonicated system, water pump, peristaltic pump, and radiator. The water/nanofluids flow out of the sonicated bath and into the peristaltic pump and then flow into the hot side of the Peltier cooling system before returning to the sonicated bath. The cold side loop consists of an electric vehicle battery system, radiator, flow meter, pump, and storage tank. Two water pumps (Model: MD-30R) operate in the system to circulate two side coolants. The coolant flows out of the water tank and into the cold side to reduce its temperature. It then flows through the radiator to cool the environment before returning to the storage tank.



**Figure 1.** Schematic illustration of the thermoelectric cooling system for the battery module

**2.2 Nanofluids preparation**

Experiment: Two different TiO<sub>2</sub> nanofluid concentrations (0.005% and 0.015% by volume) were prepared for the present study by being suspended in the base fluid (water) and stirred by a sonicated system. The titanium dioxide nanoparticles had an average diameter of 21 nm with a purity of > 99.9%. Before the experiment, the nanofluid was stirred continuously for an hour until stable nanofluids were obtained, as shown in Figure 2. However, to get the stable ferrofluid for the whole experiment, the sonicated unit was run for 20 minutes each hour which can be confirmed by monitoring the nanoparticle's precipitation after 8 hours. Physical nanofluid properties are determined from the proposed correlations [52-55].

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi)\mu_w \tag{1}$$

$$k_{nf} = \left[ \frac{k_p + 2k_w - 2\phi(k_w - k_p)}{k_p + 2k_w + \phi(k_w - k_p)} \right] k_w \tag{2}$$

$$\rho_{nf} = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_w \tag{3}$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi(\rho C_p)_p + (1 - \phi)(\rho C_p)_w \tag{4}$$

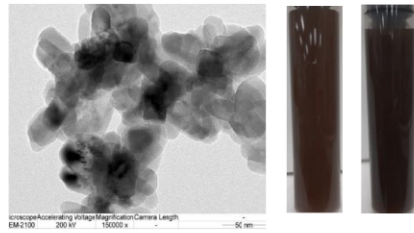


Figure 2. Photograph of the TiO<sub>2</sub> nanoparticles (SEM) used in the present study

2.3 Test section

As shown in Figure 3, the Peltier cooling module consists of two water blocks and three Peltier plates. The present study tested the water heat sink with two different configurations (see Figure 4 for details). The optimized heat sink configuration was obtained from the numerical analysis using the CFD method, which is fabricated from the aluminum block. Two sides of three Peltier plates were attached with a water block using glue with high thermal conductivity to reduce interface thermal resistance. The details of the Peltier plates are listed in Table 1. The cold water obtained from the thermoelectric cooling module's cold side was used for cooling the electric vehicle battery system in which the hot water replaces the generated heat from the cylindrical electric vehicle battery system with a constant temperature of 70°C. Type-T thermocouples were utilized to measure the hot and cold water inlet temperatures. An additional six thermocouples were used to measure the hot and cold surface temperatures of the Peltier plates (see Figure 3). The side surface temperatures of the Peltier plates were measured by machining the heat sink surface in a straight groove and then attaching three thermocouples to it. Acrylic and insulator sheets were used to insulate the TCM to decrease the energy loss during the experimental process. To repeat the experimental results, all parameters were measured and recorded five times using a Datalogger DT85 and a personal computer.

Table 1. Details of thermoelectric plate

Details	Ranges
Voltage (V)	12
V <sub>max</sub> (V)	15.2
I <sub>max</sub> (A)	6
Q <sub>max</sub> (W)	92
DeltaT <sub>max</sub> (°C)	75
Internal (Ω)	1.98±10%
Size (mm <sup>3</sup> )	40×40

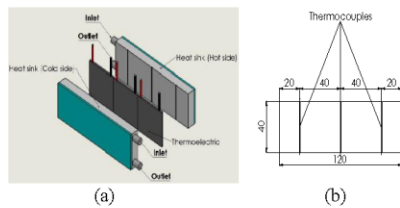


Figure 3. Schematic diagram of (a) TCM (b) positions of installed thermocouples

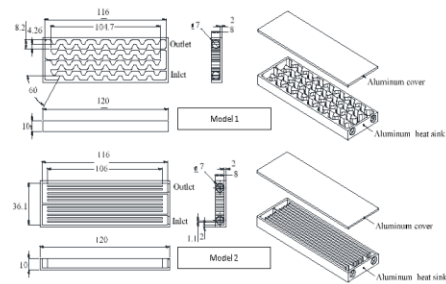


Figure 4. Schematic diagram of heat sinks with different configurations (Water block)

2.4 Experimental procedure

Experiments were performed with different working fluid flow rates, supplied power input to the thermoelectric plate, and a pulsating flow frequency of coolant. For a given coolant flow rate and power provided to the thermoelectric plate, the nanofluids flowing through the thermoelectric module were increased in small increments. The experimental unit approached the steady-state condition before some relevant parameters were measured and recorded. All temperatures, pressure drop, supplied power to the Peltier plate, and working fluid flow rates were recorded five times. The working fluid flow rate was monitored and measured by flowmeters and the precise container was measured with a stopwatch, respectively. The collected fluid mass flowing in the system was measured using a digital weight scale (a 0.01% full-scale reading). A precision multi-meter was applied to measure and record the supplied current and voltage in the variation-controlled DC power supply (SP-Series: 60 V). The details of the experimental conditions are listed in Table 2. All data collection was performed using a data acquisition system. The pressure drop across the TCM was measured with the transducer (Yokakawa, MT120).

Table 2. Details of experimental conditions

Details	Ranges
Hot side flow rate of coolant (m <sup>3</sup> /hr)	0.03-0.07
Cold side flow rate of coolant (m <sup>3</sup> /hr)	0.03-0.07
Pulsating flow frequency (Hz)	10, 15, 20
Supplied voltage (V)	8, 10, 12
Nanofluids concentration (%vol.)	0.005, 0.015
Constant temperature of cell electrical vehicle batteries (°C)	70

2.5 Data reduction process

The input power given to the thermoelectric module, the heat removed by the nanofluids from the hot side channel, and water flowing through the cold side channel of the TCM was determined from the following equations;

$$Q_p = IV \tag{5}$$

$$Q_{h,rf} = \dot{m}_{h,rf} C_{p,rf} (T_{h,out} - T_{h,in})_{rf} \tag{6}$$

$$Q_{c,w} = \dot{m}_{c,w} C_{p,w} (T_{c,in} - T_{c,out})_w \quad (7)$$

The heat transfer coefficient and Nusselt number in the hot side channel of the TCM was determined from:

$$h = \frac{Q_{h,nf}}{A_s (\Delta T_{LMTD})} = \frac{(\rho A_s U)_{nf} C_{p,nf} (T_{out,nf} - T_{in,nf})}{A_s \left[ \Delta T_{LMTD} = \frac{(T_p - T_{out,nf}) - (T_p - T_{in,nf})}{\ln \left( \frac{T_p - T_{out,nf}}{T_p - T_{in,nf}} \right)} \right]} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho_{nf} U_{nf} D_{inlet}}{\mu_{nf}} \quad (9)$$

The cold side and hot side coefficient of performance of the thermoelectric cooling module was calculated from:

$$COP_c = \frac{Q_c}{Q_{c,w}} = \frac{Q_c}{\dot{m}_{c,w} C_{p,w} (T_{c,in} - T_{c,out})_w} \quad (10)$$

$$COP_h = \frac{Q_p}{Q_{h,nf}} = \frac{Q_p}{\dot{m}_{h,nf} C_{p,nf} (T_{h,out} - T_{h,in})_{nf}} \quad (11)$$

where,  $A_s$  is the surface area of the flow channel,  $T_{in,nf}$ ,  $T_{out,nf}$  are the temperatures at the inlet and outlet ports of the nanofluids,  $\Delta T_{LMTD}$  is the logarithm mean temperature difference,  $\dot{m}_{c,w}$  is the coolant mass flow rate,  $U_{nf}$  is the coolant velocity,  $h$  is the average heat transfer coefficient,  $D_{inlet}$  is the diameter at the inlet port of the flow channel,  $\Delta P$  is the pressure drop across the test section,  $Q_{h,nf}$  is the heat transfer of the nanofluids,  $T_{hp}$  is the hot side thermoelectric plate temperature, and Re is the Reynolds number.

## 2.6 Uncertainty analysis

Based on the uncertainties and accuracy (as shown in Table 3), the calculated maximum uncertainties [56] of the heat transfer coefficient and COP obtained from the calculation process are  $\pm 5.0\%$ ,  $\pm 5.0\%$ , calculated from the following equations:

$$\text{Uncertainty of } h = \sqrt{\left( \frac{\partial h}{\partial U} \Delta U \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_p} \Delta T_p \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_m} \Delta T_m \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial T_{out}} \Delta T_{out} \right)^2} \quad (12)$$

$$\text{Uncertainty of } COP = \sqrt{\left( \frac{\partial COP}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left( \frac{\partial COP}{\partial I} \Delta I \right)^2 + \left( \frac{\partial COP}{\partial \dot{m}_s} \Delta \dot{m}_s \right)^2 + \left( \frac{\partial COP}{\partial T_{h,out}} \Delta T_{h,out} \right)^2 + \left( \frac{\partial COP}{\partial T_{h,in}} \Delta T_{h,in} \right)^2} \quad (13)$$

**Table 3.** Accuracy and uncertainty of the instruments

Instruments	Accuracy (%)	Uncertainty
Power supply, V	0.2	$\pm 0.5$
Type-T thermocouple	0.1	$\pm 0.1$
Pressure transducer	0.02%	$\pm 0.02$
Data taker ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.1	$\pm 0.1$
Multi-meter	0.1	$\pm 0.05$

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

Based on the electric battery system review, it was found that most prior studies were numerically performed. The present analysis was done experimentally on the constant generated heat from the battery cell of 12.24 W (1860 type, 3.4A, 3.6V). For the generated heat that was less than 10W/cell, the battery cell surface temperature must be less than  $40^{\circ}\text{C}$  and less than  $70^{\circ}\text{C}$  for the generated heat 20-40W/cell [3]. The battery system's liquid cooling module and the TCM's water block were a newly designed configuration in the present study. Therefore, there are no previously published results with the same conditions for validation of the measured data. However, some papers presented the COP of the thermoelectric liquid chiller with similar conditions [57, 58]. In the present study, an electric vehicle battery's generated heat was replaced by an electric heater, which kept a constant temperature of  $70^{\circ}\text{C}$ . Figure 5 shows the variations of (A) the hot side heat transfer coefficient and (B) the hot side COP of the TCM for different water block configurations. Two water blocks with different configurations, as shown in Figure 4, were tested for obtaining the highest thermal performance of the TCM. The hot side heat transfer coefficient and COP were determined from Eqns. (8) and (11), respectively. For a given supplied power input and cold side working fluid flow rate, a higher hot side coolant flow rate increases the heat transfer coefficient. This is because the removal cooling capability depends on the coolant flow rate. As seen in Figure 4, the coolant path lines in water block model I are wavy, while model II has straight lines, which gives a higher heat transfer rate. Therefore, the hot side heat transfer coefficient and COP obtained from the heat sink unit model I are higher than those from the heat sink unit model II. Based on the thermoelectric cooling module's maximum thermal performance with water block model I, the effect of cold side coolant flow rate on the hot side heat transfer coefficient and hot side COP of the TCM is shown in Figure 6. As expected, the hot side's removal capability depends on the coolant flow rates of the hot and cold sides. As the hot and cold coolant flow rates increase, so does the COP and heat transfer coefficient. We found that the present COP of the thermoelectric liquid cooling module was in the range of 0.5-1.2, while the COP obtained from Faraji et al. [57] and Liu et al. [58] were found to be in the range of 0.2-1.4, and 0.2-1.2, respectively.

Figure 7 shows the effect of input power on the thermoelectric plates on the hot side heat transfer coefficient and the hot side COP of the TCM. For a given hot side coolant Reynolds number of 830, the hot side heat transfer coefficient and COP of the thermoelectric cooling module was 2400 W/(m<sup>2</sup> °C) and 1.1 with an input voltage of 8V, respectively. By contrast, the hot side heat transfer coefficient and COP of 2200 W/(m<sup>2</sup> °C) and 0.9 were obtained with an input voltage of 12 V. This means that higher input voltage to the Peltier

plate increases the Joule heating and Fourier conduction effects which dominate over the Peltier effect. Therefore, the heat transfer coefficient and COP decrease as the input power increases.

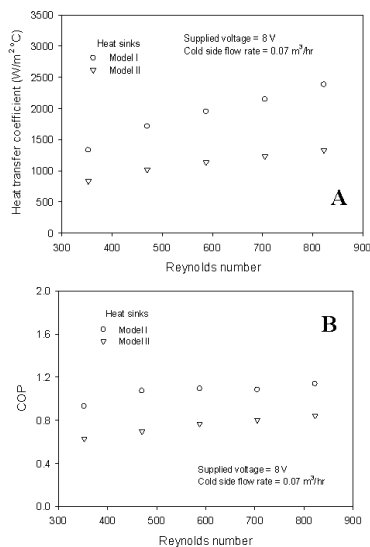


Figure 5. Variations of (A) hot side heat transfer coefficient and (B) COP for different heat sinks

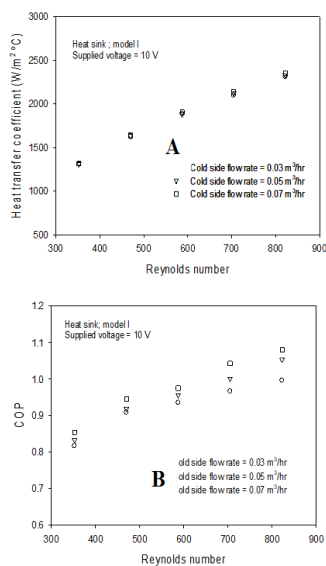


Figure 6. Variations of (A) hot side heat transfer coefficient and (B) COP for different cold side flow rates

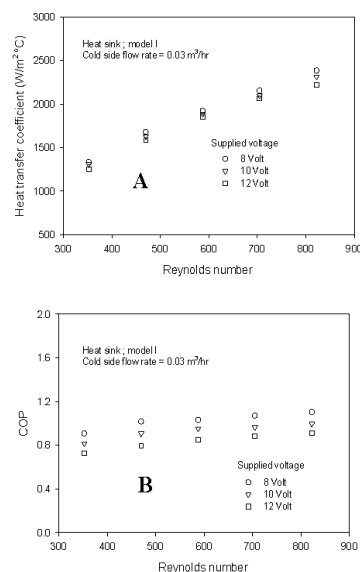


Figure 7. Variations of (A) hot side heat transfer coefficient and (B) COP for different supplied voltages

Figure 8 shows the hot side heat transfer coefficient variations and COP of the thermoelectric cooling module for different pulsating hot side coolant flow frequencies. At cold and hot side working fluid flow rates of 0.03 m<sup>3</sup>/hr and 0.05 m<sup>3</sup>/hr, the experiment was conducted at various pulsating hot side flow frequencies. The pulsating flow frequency had a significant influence on the turbulent intensity of coolant by increasing removal capacity. Therefore, the pulsating flow frequency increases the heat transfer coefficient and COP of the TCM compared with using a continuous flow. Also, a higher pulsating flow frequency gives a higher mixing flow intensity, which increases the heat transfer coefficient and COP, as shown in Figure 8.

Figure 9 shows the effect of coolant types on the COP of the thermoelectric cooling module. Nanoparticles with an average diameter of 21 nm were used in an experiment in which nanoparticle suspension in the base fluid (water) influenced the nanofluid properties and the effect on turbulent intensity. Therefore, the coolant capability of nanofluid is greater than that of water, that is, the hot side heat transfer rate and COP of the thermoelectric cooling module were higher for nanofluids than for water. A larger heat transfer surface area and molecular collisions, higher nanofluid concentration yields an increase in cooling capability and COP. However, this also slightly increases the pressure drop across the test section. The thermal physical properties tend to increase due to nanoparticles being suspended in the base fluid when compared to water. Nevertheless, different nanofluid concentrations, like those used in the present experiment, have slightly different influences on the pressure drop increases (see Figure 10).

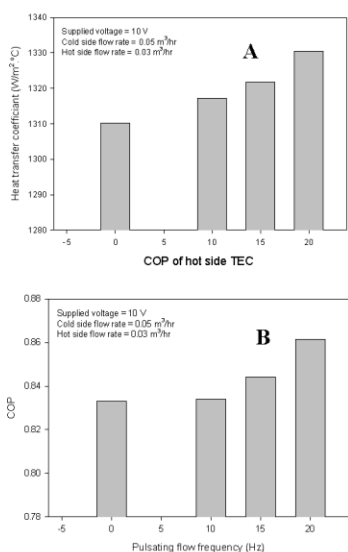


Figure 8. Effect of pulsating flow frequency on (A) heat transfer coefficient and (B) COP

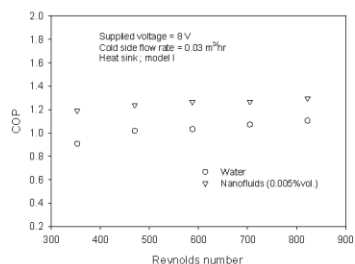


Figure 9. Variations of heat transfer rate and COP for different coolants

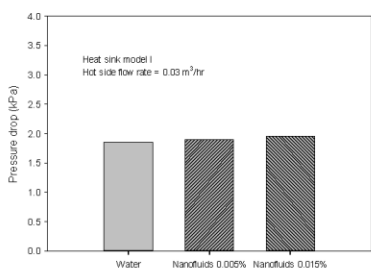


Figure 10. Variations of pressure drop for different coolants at supplied voltage=10V and cold side flow rate=0.03 m<sup>3</sup>/hr

4. CONCLUSIONS

Due to higher power density and heat generation inside the modern electric vehicle battery system, choosing cooling solutions for these devices significantly affects the maintenance of their operating temperature. The water/nanofluids pulsating flow results in the thermoelectric module for cooling electric vehicle battery systems were presented. We found that the designed heat sink model I (water block) yields a higher heat transfer coefficient and COP compared to model II. The coolant two side flow rates, power input, and coolant types have a significant influence on the thermoelectric cooling module's thermal performance. The thermoelectric module yields around 2.5-3.5°C lower inlet temperatures before entering the electric vehicle battery system relative to those without a thermoelectric module. The proposed water block model from this study was used to optimize the battery thermal management system for obtaining higher performance.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their appreciation to the Srinakharinwirot University (SWU) for providing financial support for this study.

REFERENCES

- [1] Gould, C.A., Shamma, N.Y.A, Grainger, S., Taylor, I. (2011). Thermoelectric cooling of microelectronic circuits and waste heat electrical power generation in a desktop personal computer. *Materials Science and Engineering B*, 176(4): 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.09.010>
- [2] Martinez, A., Astrain, D., Rodriguez, A. (2011). Experimental and analytical study on thermoelectric self-cooling of devices. *Energy*, 36(8): 5250-5260. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.029>
- [3] Kinsella, C.E., O'Shaughnessy, S.M., Deasy, M.J., Duffy, M., Robinson, A.J. (2014). Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module. *Applied Energy*, 114: 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.025>
- [4] Suh, I.S., Cho, H., Lee, M. (2014). Feasibility study on thermoelectric device to energy storage system of an electric vehicle. *Energy*, 76: 436-444. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.040>
- [5] Huang, B.J., Hsu, P.C., Tsai, R.J., Hussain, M.M. (2015). A thermoelectric generator using loop heat pipe and design match for maximum-power generation. *Applied Thermal Engineering*, 91: 1082-1091. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.059>
- [6] Borisyyuk, P.V., Krasavin, A.V., Tkalya E.V., Lebedinskii, Y.Y., Vasiliev, O.S., Yakovlev, V.P., Kozlova, T.I., Fetisov, V.V. (2016). Nanocluster metal films as thermoelectric material for radioisotope mini battery unit. *Chemical Physics*, 478: 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2016.07.010>
- [7] Kiflemariam, R., Lin, C.X. (2016). Experimental investigation on heat driven self-cooling application based on thermoelectric system. *International Journal of*



- Thermal Sciences, 109: 309-322. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.001>
- [8] Zhang, C., Li, K., Deng, J. (2016). Real-time estimation of battery internal temperature based on a simplified thermoelectric model. *Journal of Power Sources*, 302: 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.052>
- [9] Atouei, S.A., Ranjbar, A.A., Rezaia, A. (2017). Experimental investigation of two-stage thermoelectric generator system integrated with phase change materials. *Applied Energy*, 208: 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.032>
- [10] Liu, K., Li, K., Zhang, C. (2017). Constrained generalized predictive control of battery charging process based on a coupled thermoelectric model. *Journal of Power Sources*, 347: 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.039>
- [11] Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., Li, Y. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123: 1514-1522. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059>
- [12] Chen, K., Wang, S., Song, M., Chen, L. (2017). Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an optimization strategy. *Applied Thermal Engineering*, 123: 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.060>
- [13] Chen, K., Wang, S., Song, M., Chen, L. (2017). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111: 943-952. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.026>
- [14] Chen, K., Song, M., Wei, W., Wang, S. (2018). Structure optimization of parallel air-cooled battery thermal management system with U-type flow for cooling efficiency improvement. *Energy*, 145: 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.110>
- [15] Chen, K., Hong, S., Zhang, X., Wang, S. (2018). Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116: 1204-1212. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.092>
- [16] Chen, K., Chen Y., Li, Z., Yuan, F., Wang, S. (2018). Design of the cell spacings of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127: 393-401. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.131>
- [17] Lu, Z., Yu, X., Wei, L., Qiu, Y., Zhang, L., Meng, X., Jin, L. (2018). Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement. *Applied Thermal Engineering*, 136: 28-40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.080>
- [18] Zhao, C., Cao, W., Dong, T., Jiang, F. (2018). Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120: 751-762. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.083>
- [19] Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies. *Journal of Power Sources*, 400: 621-640. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020>
- [20] Cao, Q., Luan, W., Wang, T. (2018). Performance enhancement of heat pipes assisted thermoelectric generator for automobile exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 130: 1472-1479. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.134>
- [21] Daghigh, R., Khaledian, Y. (2018). Effective design, theoretical and experimental assessment of a solar thermoelectric cooling-heating system. *Solar Energy*, 162: 561-572. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.012>
- [22] Ebrahimi, M., Derakhshan, E. (2018). Design and evaluation of a micro combined cooling, heating, and power system based on polymer exchange membrane fuel cell and thermoelectric cooler. *Energy Conversion and Management*, 171: 507-517. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.007>
- [23] Li, X., Xie, C., Quan, S., Huang, L., Fang, W. (2018). Energy management strategy of thermoelectric generation for localized air conditioners in commercial vehicles based on 48 V electrical system. *Applied Energy*, 231: 887-900. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.162>
- [24] Muralidhar, N., Himabindu, M., Ravikrishna, R.V. (2018). Modeling of a hybrid electric heavy duty vehicle to assess energy recovery using a thermoelectric generator. *Energy*, 148: 1046-1059. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.023>
- [25] Song, W., Bai, F., Chen, M., Lin, S., Feng, Z., Li, Y. (2018). Thermal management of standby battery for outdoor base station based on the semiconductor thermoelectric device and phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 137: 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.072>
- [26] Wang, C., Niu, Y., Jiang, J., Chen, Y., Tian, H., Zhang, R., Zhou, T., Xia, J., Pan, Y., Wang, S. (2018). Hybrid thermoelectric battery electrode FeS<sub>2</sub> study. *Nano Energy*, 45: 432-438. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.01.025>
- [27] Abedi, H., Migliorini, F., Dondè, R., De Iulius, S., Passaretti, F., Fanciulli, C. (2019). Small size thermoelectric power supply for battery backup. *Energy*, 188: 116061. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116061>
- [28] Cai, Y., Wang, W.W., Ding, W.T., Yang, G.B., Liu, D., Zhao, F.Y. (2019). Entropy generation minimization of thermoelectric systems applied for electronic cooling: Parametric investigations and operation optimization. *Energy Conversion and Management*, 186: 401-414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.064>
- [29] Comamala, M., Massaguer, A., Massaguer, E., Pujol, T. (2019). Validation of a fuel economy prediction method based on thermoelectric energy recovery for mid-size vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 153: 768-778. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.004>
- [30] Dan, D., Yao, C., Zhang, Y., Zhang, H., Zeng, Z., Xu, X. (2019). Dynamic thermal behavior of micro heat pipe array-air cooling battery thermal management system based on thermal network model. *Applied Thermal Engineering*, 162: 114183. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114183>
- [31] Darovich, K., MacNeil, D.D., Recoskie, S., Cadic, Q.,

- Ilinca, F. (2019). Comparison of cooling plate configurations for automotive battery pack thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 155: 185-195.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.146>
- [32] Dufo-López, R., Champier, D., Gibout, S., Lujano-Rojas, J.M., Domínguez-Navarro, J.A. (2019). Optimisation of off-grid hybrid renewable systems with thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 196: 1051-1067.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.057>
- [33] Fotso, B.E.M., Talawo, R.C., Feudjio, N.M.C., Fogue, M. (2019). Modeling and thermal analysis of a solar thermoelectric generator with vortex tube for hybrid vehicle. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15: 100515. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100515>
- [34] Jiang, L., Zhang, H., Li, J., Xia, P. (2019). Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling. *Energy*, 188: 116048.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116048>
- [35] Kwan, T.H., Shen, Y., Yao, Q. (2019). An energy management strategy for supplying combined heat and power by the fuel cell thermoelectric hybrid system. *Applied Energy*, 251: 113318.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113318>
- [36] Lan, S., Smith, A., Stobart, R., Chen, R. (2019). Feasibility study on a vehicular thermoelectric generator for both waste heat recovery and engine oil warm-up. *Applied Energy*, 242: 273-284  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.056>
- [37] Lyu, Y., Siddique, A.R.M., Majid, S.H., Biglarbegian, M., Gadsden, S.A., Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5: 822-827.  
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.016>
- [38] Massaguer, E., Massaguer, A., Pujol, T., Comamala, M., Montoro, L., Gonzalez, J.R. (2019). Fuel economy analysis under a WLTP cycle on a mid-size vehicle equipped with a thermoelectric energy recovery system. *Energy*, 179: 306-314.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.004>
- [39] Sulaiman, M.S., Singh, B., Mohamed, W.A.N.W. (2019). Experimental and theoretical study of thermoelectric generator waste heat recovery model for an ultra-low temperature PEM fuel cell powered vehicle. *Energy*, 179: 628-646. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.022>
- [40] Shiriaev, P., Shishov, K., Osipkov, A. (2019). Electrical network of the automotive multi-sectional thermoelectric generator with MPPT based device usage. *Materials Today: Proceedings*, 8(Part 2): 642-651.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.064>
- [41] Toan, N.V., Hasnan, M.M.I.M., Udagawa, D., Inomata, N., Toda, M., Said, S.M., Sabri, M.F.M., Ono, T. (2019). Thermoelectric power battery using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanochannels of 10 nm diameter for energy harvesting of low-grade waste heat. *Energy Conversion and Management*, 199: 111979.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111979>
- [42] Naphon, P., Sriromrui, P. (2006). Single-phase heat transfer and pressure drop in the micro-fin tubes with coiled wire insert. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, 33(2): 176-183.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.08.012>
- [43] Naphon, P., Sookkasem, A. (2007). Investigation on heat transfer characteristics of tapered cylinder pin fin heat sinks. *Energy Conversion and Management*, 48(10): 2671-2679.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.020>
- [44] Naphon, P., Kornkumjayrit, K. (2008). Numerical analysis on the fluid flow and heat transfer in the channel with V-shaped wavy lower plate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(7): 839-843.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.03.010>
- [45] Naphon, P., Wongwises, S., Wiriyasart, S. (2013). Application of two-phase vapor chamber technique for hard disk drive cooling of PCs. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, 40: 32-35.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.014>
- [46] Abbas, N., Awan, M.W., Amer, M., Ammar, S.M., Sajjad, U., Ali, H.M., Zahra, N., Hussain, M., Badshah, M.A., Jafry, A.T. (2019). Applications of nanofluids in photovoltaic thermal systems: A review of recent advances. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 536: 122513.  
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122513>
- [47] Javed, S., Ali, H.M., Babar, H., Khan, M.S., Janjua, M.M., Bashir, M.A. (2020). Internal convective heat transfer of nanofluids in different flow regimes: A comprehensive review. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 538: 122783.  
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122783>
- [48] Abbas, F., Ali, H.M., Shah, T.R., Babar, H., Janjua, M.M., Sajjad, U., Amer, M. (2020). Nanofluid: Potential evaluation in automotive radiator. *Journal of Molecular Liquids*, 297: 112014.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112014>
- [49] Ali, H.M. (2020). In tube convection heat transfer enhancement:  $\text{SiO}_2$  aqua based nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 308: 113031.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113031>
- [50] Ambreen, T., Saleem, A., Ali, H.M., Shehzad, S.A., Park, C.W. (2019). Performance analysis of hybrid nanofluid in a heat sink equipped with sharp and streamlined micro pin-fins. *Powder Technology*, 355: 552-563.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.087>
- [51] Babar H., Ali, H.M. (2019). Airfoil shaped pin-fin heat sink: Potential evaluation of ferric oxide and titania nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 202: 112194.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112194>
- [52] Pak, B.C., Cho, Y.I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experiment Heat Transfer*, 11(2): 151-170. <https://doi.org/10.1080/08916159808946559>
- [53] Xuan, Y., Roetzel, A. (2000). Conceptions of heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19): 3701-3707.  
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00369-5](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00369-5)
- [54] Drew, D.A., Passman, S.L. (1999). *Theory of Multicomponent Fluids*. Springer, Berlin.
- [55] Maxwell, J.C. (1881). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Second ed. Clarendon Press, Oxford University, UK.

- [56] Coleman, H.W., Steele, W.G. (1989). *Experimental and Uncertainty Analysis for Engineers*. John Wiley&Sons, New York.
- [57] Faraji, A.Y., Goldsmid, H.J., Akbarzadeh, A. (2014). Experimental study of a thermoelectrically-driven liquid chiller in terms of COP and cooling down period. *Energy Conversion and Management*, 77: 340-348. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.047>
- [58] Liu, Y., Su, Y. (2018). Experimental investigations on COPs of thermoelectric module frosting systems with various hot side cooling methods. *Applied Thermal Engineering*, 144: 747-756. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.056>

#### NOMENCLATURES

<i>ATEG</i>	automotive thermoelectric generator
<i>AC/DC</i>	alternating current/direct current, A
<i>BTMS</i>	battery thermal management system
<i>TCM</i>	thermoelectric cooling module
$C_p$	specific heat, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
<i>COP</i>	coefficient of performance
<i>D</i>	diameter, m

$k$	thermal conductivity, $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
$m_{nf}$	nanofluids mass flow rate, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>Pr</i>	Prandtl number
$\dot{Q}$	heat transfer rate, kW
<i>Re</i>	Reynolds number
<i>T</i>	temperature, $^\circ\text{C}$
<i>TAC</i>	thermoelectric active cooling
<i>TCM</i>	thermoelectric cooling module
<i>TSC</i>	thermoelectric self-cooling
<i>U</i>	velocity, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

#### Greek symbols

$\phi$	nanofluids concentration, %
$\rho$	density, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\mu$	viscosity, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

#### Subscripts

<i>ave</i>	average
<i>in</i>	inlet
<i>nf</i>	nanofluids
<i>p</i>	particles
<i>out</i>	outlet

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสรารุฒิ สิริเกษมสุข
วัน เดือน ปี เกิด	20 สิงหาคม 2527
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2549 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2551 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ที่อยู่ปัจจุบัน	99/65 หมู่ 4 ติวานนท์ บางกะดี เมือง ปทุมธานี 12000
ผลงานตีพิมพ์	1. Sirikasemsuk, S., Wiriyasart, S., Naphon, P., และ Naphon, N. (2021). Thermal cooling characteristics of Li-ion battery pack with thermoelectric ferrofluid cooling module. International Journal of Energy Research, 45(6), 8824-8836. 2. Sirikasemsuk, S., Wiriyasart, S., Prurapark, R., Naphon, N., และ Naphon, P. (2021). Water/Nanofluid Pulsating Flow in Thermoelectric Module for Cooling Electric Vehicle Battery Systems. International Journal of Heat and Technology, 39(5), 1618-1626.