

## 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 การถูกกระทำทางกายภาพเช่นการอัด บด ทิ่มแทงจากอุบัติเหตุ รวมถึงปัญหาทางระบบไฟฟ้า-เคมีของแบตเตอรี่ ปัญหาทางความร้อนนี้หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจส่งผลให้แบตเตอรี่เกิดการระเบิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมลรันอเวย์ ดังนั้นการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความสำคัญ และได้มีการศึกษาการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการออกแบบระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ เช่น โดยการใช้อากาศ ของเหลว รวมถึงการใช้ระบบผสมระหว่างอากาศร่วมกับของเหลวเป็นสารหล่อเย็น ซึ่งระบบการหล่อเย็นจะมีรูปแบบหรือลักษณะแตกต่างกัน ผลที่ได้ระบบหล่อเย็นโดยใช้ของเหลวเป็นสารหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามระบบระบายความร้อนทั้ง 3 แบบนั้นสามารถรักษาอุณหภูมิให้อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้ และสามารถนำระบบที่ปรับปรุงไปใช้ในรถยนต์ไฟฟ้าเพื่อยืดอายุการใช้งานและเพิ่มความปลอดภัยได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** เทอร์โมลรันอเวย์ 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 และในอนาคตอาจจะเป็นเทคโนโลยีที่มาแทนที่ยานยนต์ระบบเชื้อเพลิงที่ใช้น้ำมัน ซึ่งได้มีการมีการพัฒนาด้านระบบไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการสำรองไฟฟ้า ระบบขับเคลื่อน ระบบอัดประจุเพื่อการใช้งานใหม่อีกครั้ง โดยเทคโนโลยีดังกล่าวเมื่อใช้งานไปนานๆ อุปกรณ์ต่างๆ จะเริ่มเสื่อมตามสภาพการใช้งาน แต่การเสื่อมสภาพนั้นจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับการดูแลรักษา และการตรวจสอบสภาพของอุปกรณ์ และแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่ผู้ใช้มักจะขาดการดูแลรักษาที่ถูกต้อง เนื่องจากระบบของแบตเตอรี่นั้นมีความซับซ้อนและสายไฟเป็นจำนวนมาก หรือใช้งานจนเกิดปัญหาเกี่ยวกับการเก็บประจุไม่ได้ของแบตเตอรี่แล้วเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแบตเตอรี่ แต่หากรู้วิธีการดูแลรักษาที่ดีพอแล้ว จะช่วยเรื่องของการยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ซึ่งเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ใหม่ อีกทั้งแบตเตอรี่ที่ถูกเปลี่ยนจะส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นวัตถุอันตราย และจากปัญหาของแบตเตอรี่ที่พบกรณีแบตเตอรี่ระเบิดนั้น มาจะสถานะที่อุณหภูมิสูงขึ้นอย่างเฉียบพลันหรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่จะพบในแบตเตอรี่กลุ่มลิเทียม โดยมีปัจจัยการเกิดปรากฏการณ์นี้อยู่ประมาณ 3 แบบ คือ ปัจจัยทางกล ปัจจัยทางไฟฟ้า และปัจจัยทางความร้อน

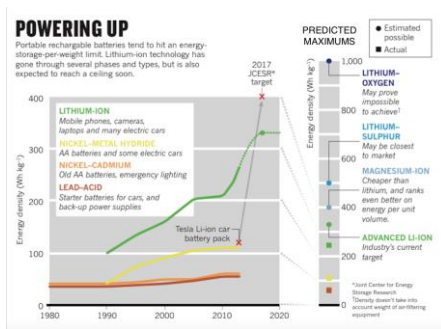
## 2. แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่นิยมใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ และยังเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับงานบางประเภท ซึ่งแบตเตอรี่นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทตามรูปแบบของการใช้งานคือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ หรือที่เรียกกันว่าแบตเตอรี่ใช้แล้วทิ้ง กับอีกแบบคือแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่สามารถนำและในส่วนของรถไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันนั้น อาศัยพลังงานหลักจากแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม เพราะเป็นแบตเตอรี่ที่มีความทนทาน และความจุในการเก็บพลังงานที่สูงมาก

### 2.1. พัฒนาการของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานมาก จากยุคช่วงแรกมาจนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง และด้วยเทคโนโลยีที่ปัจจุบันมีความทันสมัย 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 และยังมีการคาดการณ์องค์ประกอบร่วมในแบตเตอรี่ลิเทียมต่อไปอีก ดังรูปที่ 1

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

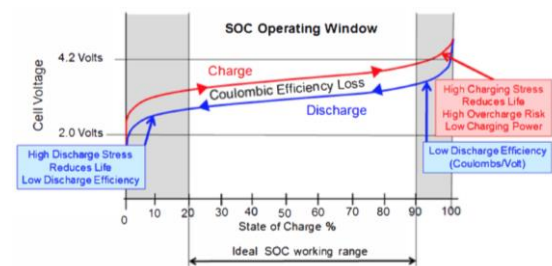


รูปที่ 1 กราฟแสดงแนวโน้มของแบตเตอรี่แต่ละชนิด [2]

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

## 2.2 เคมีไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียม

ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นจะมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆ รวมอยู่ด้วยเพื่อประสิทธิภาพการใช้งาน โดยส่วนมากจะแตกต่างกันที่ขั้วแคโทด เช่นลิเทียมโคบอล (LCO), ลิเทียมแมงกานีส (LMO), ลิเทียมฟอสเฟส (LFP), ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลออกไซด์ (NMC), ลิเทียมนิกเกิลโคบอลลูมิเนียมออกไซด์ (NCA), และลิเทียมไททาเนต (LTO) โดยที่ LMO ผสมรวมกับ NMC เพื่อให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น [2] และได้มีนักวิจัยทำการทดลองเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $\text{LiCoO}_2$  และ  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  ขนาดแบตเตอรี่ที่ทดลองมีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 18 มิลลิเมตร ยาว 65 มิลลิเมตร หรือแบตเตอรี่ 18650 โดยทดลองให้ความร้อนจากภายนอก และความร้อนจากภายใน ภายใต้สถานะประจุที่เท่ากัน (SOC เท่ากัน) พบว่า  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  มีอุณหภูมิที่มีความเสถียรมากกว่า  $\text{LiCoO}_2$  [4] นอกจากค่า 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 และระยะเวลาที่เหลือในการคายประจุ RDT แบตเตอรี่ลิเทียม และถ้าหากกระบวนการคายประจุของแบตเตอรี่ไม่ได้เป็นเชิงเส้นอาจจะทำให้การวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่ใช้ผิดพลาดได้ และการพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์มาเป็นระดับประจุในแบตเตอรี่ จึงได้ทดลองทางวงจรไฟฟ้าแบบวงจรเปิด โดยทดสอบทั้งแบบสถิติศาสตร์และพลศาสตร์ และได้สรุปว่าแรงดันใน

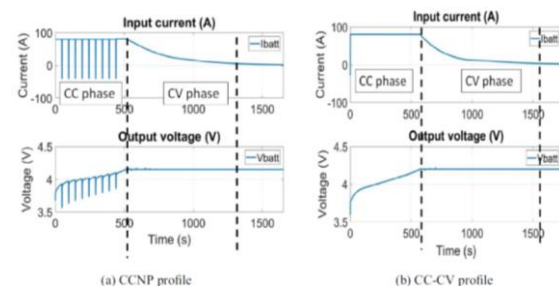
สถานะประจุของแบตเตอรี่ที่ระดับต่างๆ สามารถวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่จะใช้ในการคายประจุที่เหลือได้ [6]

### 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 ต่อไปได้นอกจากนั้นยังมีการทดลองการวัดความร้อนเอนนิโซโทรปิก การนำความร้อน และความจุความร้อน ของแบตเตอรี่ลิเทียม  $\text{LiFePO}_4$  ขนาด 26650 และ 18650 และวิเคราะห์ผลการทดลองของรัศมีของความร้อนด้วยวิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์ได้ค่าน้อยสุดช่วง  $0.15-0.2 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  สำหรับขนาด 26650 และ 18650 โดยกล่าวอีกว่าการทดลองนี้จะทำให้เข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ของความร้อนที่เกิดขึ้น อาจจะนำไปสู่รูปแบบการเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยได้ [8]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น มีการทดลองการอัดประจุแบบไว ที่เรียกกันว่าควิกชาร์จ (Quick Charge) หรือฟาสชาร์จ (Fast Charge) การอัดประจุไฟฟ้าแบบไว เพื่อเพิ่มแนวทางการตลาดของแบตเตอรี่ลิเทียม โดยทำการทดลองหาพารามิเตอร์การชาร์จเร็วสูงสุดนั้นเป็นเท่าไร และต้องปลอดภัยด้วย โดยทดลองกับแบตเตอรี่ชนิดทรงกระบอก 18650 ซึ่งมีกระแส 3 แอมป์แปร์ 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 อุณหภูมิของแบตเตอรี่ที่บรรจุแบตเตอรี่ลิเทียมจะเป็นอย่างไร ซึ่งใช้แบบจำลองทางอุณหภูมิแบบ 3 มิติ และแบ่งการทดลองเป็น 2 แบบ คือแบบกระแสและแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CC-CV) และแบบสัญญาณพัลส์ติดลบของกระแสและแรงดัน (CCNP-CV) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงกราฟของกระแส และแรงดันไฟฟ้า [11]

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

และแบบกระแสแบบเดียวคงที่ ผลการทดลองสรุปว่า กระแสสูงช่วงแรกและกระแสต่ำช่วงหลังอุณหภูมิต่ำและประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าอีก 2 แบบ [12]

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

### 3. การจัดการด้านความร้อนของแบตเตอรี่

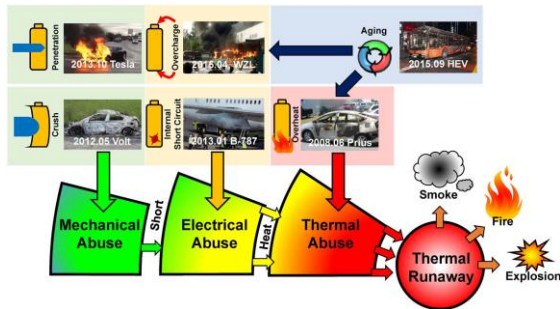
ในการจัดการทางความร้อนนั้น เป็นการใช้วิธีต่างๆ เพื่อการควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ไม่ให้สูงจนถึงจุดวิกฤต เพื่อเป็นการเลี่ยงความเสียหายที่รุนแรง จากการเกิด ปรากฏการณ์อุณหภูมิสูงขึ้นแบบเฉียบพลัน หรือที่เรียกว่า Thermal Runaway (TR) โดยการจัดการความร้อนของ แบตเตอรี่ (BTMS) มีการค้นคว้าการระบายความร้อนด้วย 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% ในการทดลองภายใต้สภาวะการขับขี่แบบ เดียวกัน อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ถูกตรวจสอบความ จุกจกผลกระทบนี้พบว่า SOC ลดลง 10.60% 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]

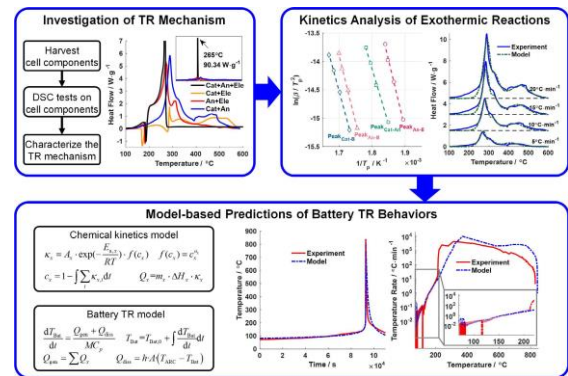
ในการเกิด TR ส่วนใหญ่เกิดจากปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับทางกลเช่นอุบัติเหตุที่ส่งผลต่อแบตเตอรี่ไม่ว่าจะเป็นการบิดหรือถูกเจาะ ซึ่งอาจจะส่งผลถึงระดับถัดมาคือ การลัดของวงจรไฟฟ้าของแบตเตอรี่โดยมีโอกาสดังกล่าวทั้ง กรณีภายในแบตเตอรี่คือวงจรภายในเกิดการลัดวงจร หรือ

กรณีภายนอกแบตเตอรี่เช่นการชาร์ตประจุเกิน และในระดับนี้จะพบเป็นสาเหตุหลักหรือปัญหาหลักที่เจอโดยทั่วไป และอาจจะส่งผลต่อระดับถัดมาคือด้านความร้อน 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]

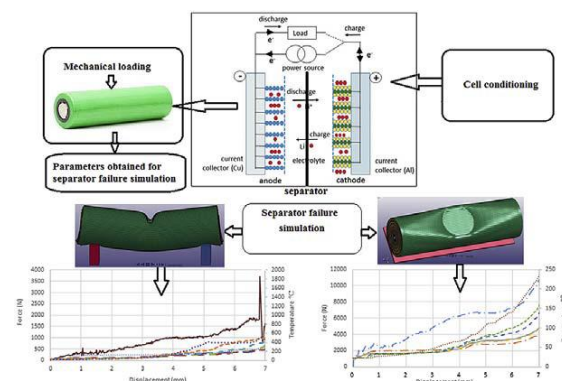
ซึ่งการทดลองแบบแยกส่วน (Differential Scanning Calorimetry: DSC) นั้นมีผลการทดลองได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่าการทดลองแบบแยกส่วน [21]

Kinetics parameters of the exothermic reactions.

| Sample | x      | $A_x/s^{-1}$            | $E_{a,x}/J\ mol^{-1}$ | $n_x$ | $\Delta H_x/J\ g^{-1}$ |
|--------|--------|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|
| 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                  |

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



รูปที่ 5 การทดลองรูปแบบทางกายภาพแบบต่างๆ เพื่อให้เกิด TR [22]

จากรูปที่ 5 การทดลองในรูปแบบต่างๆ ได้ผลการทดลอง และวิเคราะห์ความเสียหายทางกายภาพที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ด้วยวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ 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] ส่วนถ่านำแบตเตอรี่ลิเทียมชนิด  $\text{LiCoO}_2$  มาทำการทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และมีการเปลี่ยนแปลงค่าสถานะประจุ ในระดับต่างๆ พบว่าแบตเตอรี่ 100% SOC มีอัตราการเกิด TR ต่ำที่สุด [24] อีกทั้งแบตเตอรี่ลิเทียมที่เสื่อมสภาพ หรือเสียแล้วก็ยังมีโอกาสที่จะเกิด TR ได้อยู่ การเกิด TR นั้นมักจะเกิดที่แกนของแบตเตอรี่ [25] ดังนั้นขนาดของแบตเตอรี่ที่พิจารณาย้อนกลับการการนำความร้อน 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]

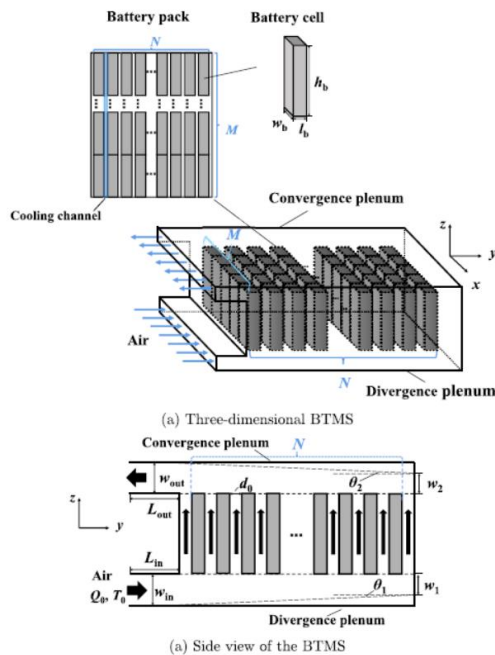
ในการเกิด TR จะเหมือนปฏิกิริยาลูกโซ่ ที่ความร้อนจะส่งต่อไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียง โดยได้มีนักวิจัยอีกจำนวนหนึ่งได้ออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อยับยั้งการลุกลามของปรากฏการณ์ TR โดยได้ทำระบบท่อระบายความร้อนขนาดเล็ก (minichannel cooling) โดยวิเคราะห์จากแบบจำลอง the conjugate heat transfer model และ the reaction kinetics model ซึ่งสามารถป้องกันการลุกลามของ TR กับเซลล์แบตเตอรี่อื่นๆ แต่ไม่สามารถป้องกันการเกิด TR กับแบตเตอรี่เซลล์ตัวมันเองได้ [27] และยังมีนักวิจัยทำการทดลองวัสดุคั่นระหว่างแบตเตอรี่ของรถยนต์ไฟฟ้าชนิด 18650 ที่จำลองโมดูลมาจำนวนหนึ่ง โดยวัสดุที่ใช้ต้องสามารถป้องกันความร้อนแผ่ไปยังแบตเตอรี่ข้างเคียงเมื่อเกิด TR โดยได้พบว่าแผ่นคอมโพสิตกราฟไฟท์ และอลูมิเนียมเอกซ์ทูดสามารถป้องกันความร้อนที่จะส่งผลให้แบตเตอรี่ข้างเคียงจนนำไปสู่การเกิด TR [28]

การจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียม นั้น มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานในสภาวะที่เหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังเป็นการยืดอายุการใช้งานได้อีกด้วย ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ดีนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาศัยตัวกลางที่ดึงความร้อนจากแบตเตอรี่เพื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอากาศ หรือของเหลว

### 3.2 ระบบการระบายความร้อนด้วยอากาศ

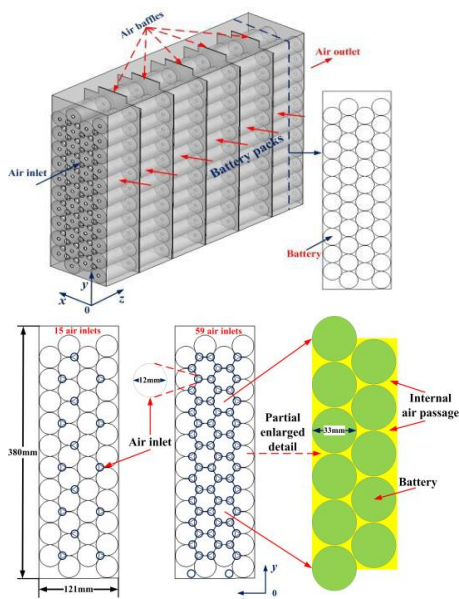
การระบายความร้อนด้วยอากาศ เป็นวิธีการระบายความร้อนวิธีหนึ่ง ที่สามารถกำหนดทิศทางการไหลของอากาศได้จากอุปกรณ์ทดลอง และแหล่งจ่ายบังคับทิศทาง ซึ่งได้มีนักวิจัยที่ทำการออกแบบชุดระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยการบังคับอากาศให้ไหลผ่านช่องว่างด้วยเงื่อนไขต่างๆ เช่นมุมทางเข้าของอากาศ มุมทางออกของอากาศ ขนาดช่องทางเข้าของอากาศ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





รูปที่ 6 โมเดลการระบายความร้อน  
ด้วยอากาศแบบบังคับ [34]

รวมถึงท่อที่ใช้สำหรับบังคับอากาศซึ่งมีการวิจัยถึงขนาดความยาวของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ช่องว่างระหว่างท่อ กับแบตเตอรี่ จำนวนท่อและการจัดเรียงรูปแบบของท่อ ดังรูปที่ 7 [30], [31], [34]-[35], [38]-[40]



รูปที่ 7 แสดงโมเดลการจัดเรียงแบตเตอรี่  
ช่องว่างระหว่างแบตเตอรี่และท่ออากาศที่ใช้ [40]

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

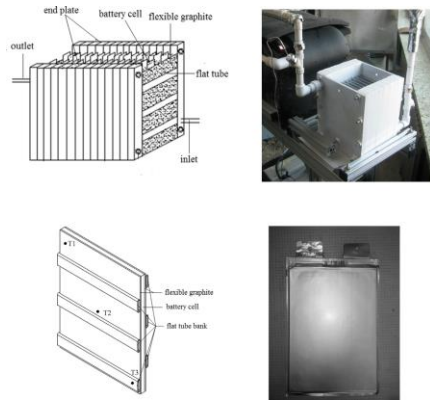
ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่มุ่งการประสิทธิภาพในการจัดการความร้อนโดยการหาอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้พบว่ามีมุมทางเข้าออกที่ดีที่สุดคือ 25 องศา โดยทางเข้าและทางออกควรมีขนาดเท่ากัน การไหลแบบตัว U ช่วยให้ความต่างของอุณหภูมิลดลงได้ถึง 70% และการปรับรูปแบบที่เหมาะสม สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 40 องศาเซลเซียสได้และพลังงานที่ใช้น้อยลงรวมถึงต้นทุนที่ลดลงด้วย

### 3.3 ระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว

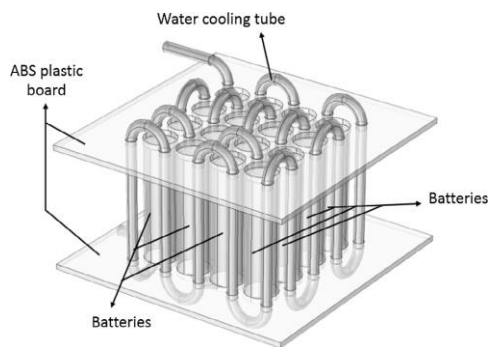
นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศดังที่กล่าวในข้างต้น ยังมีการระบายความร้อนด้วยของเหลว ไม่ว่าจะเป็นการให้ของเหลวไหลผ่านท่อ หรือช่องทางการไหลเพื่อระบายความร้อน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถพาความร้อนได้ดีกว่าการระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยในการระบายความร้อนด้วยของเหลวนั้นได้มีกลุ่มนักวิจัยออกแบบการทดลองจากวัสดุวัสดุเสริม หรืออุปกรณ์ที่ทำขึ้นมาเป็นโมเดลที่มีทั้งแบตเตอรี่และช่องทางการไหลของของเหลว โดยวัสดุที่ใช้ในไดมอนด์นักวิจัยได้ทดลองใช้อลูมิเนียมบล็อก ที่ทำขึ้นมาเฉพาะการทดลองนั้นๆ [45] หรือได้มีการทดลองใช้อลูมิเนียมที่มีความพรุน [46] รวมถึงการนำท่ออลูมิเนียมมาทดลองร่วมกับวัสดุกราฟไฟแบบยืดหยุ่น ดังรูปที่ 8 [47] หรือคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ [48] พร้อมกับทดสอบทางไฟฟ้าที่แรงดันทางไฟฟ้า กระแสทางไฟฟ้า



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

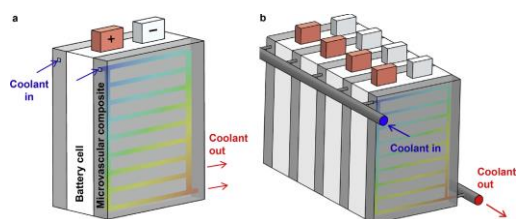


รูปที่ 8 โมเดลการระบายความร้อนโดยใช้ท่ออลูมิเนียมร่วมกับกราฟไฟชนิดยืดหยุ่น [47]



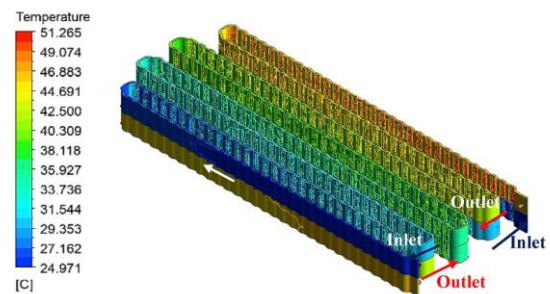
รูปที่ 9 ระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำ [50]

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



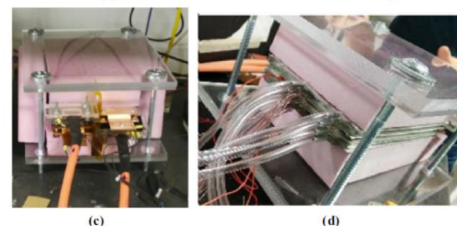
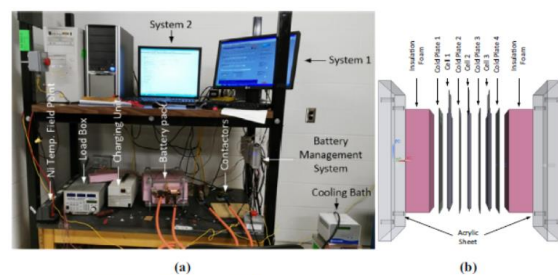
รูปที่ 10 ระบบระบายความร้อนที่ทำจากคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีช่องระบายความร้อนขนาดเล็ก [48]

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



รูปที่ 11 ระบบการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่ไหลแบบสวนทาง [56]

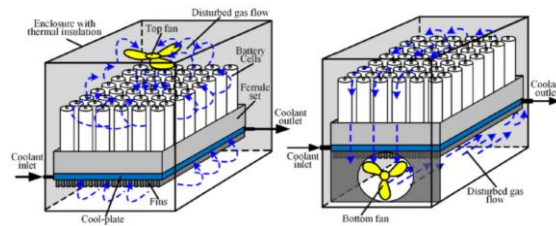
ในการศึกษาการระบายความร้อนด้วยของเหลว นั้น มีนักวิจัยทำการศึกษาค่าอุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ผลต่างของอุณหภูมิ  $\Delta T$  อุณหภูมิเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ ความดันตกคร่อม โดยการทดลองร่วมกับวิธีวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงตัวเลข CFD และผลที่ได้ นั้นพบว่าหากกระแสไฟฟ้า C-Rate ยิ่งสูงมากค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ก็สูงตามโดยมีการทดลองดังรูปที่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



รูปที่ 12 ระบบระบายความร้อนด้วยของเหลวเย็นที่มีลักษณะเป็นแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [51]

ในส่วนประสิทธิภาพการระบายความร้อนนั้น จำนวนท่อระบายความร้อนจะมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดมากที่สุด รองลงมาคืออัตราการไหล ถัดมาคือความยาวท่อ และขนาดท่อมีผลน้อยที่สุด

นอกจากการระบายความร้อนด้วยอากาศ และด้วยของเหลวยังมีการนำระบบทั้ง 2 มาทำงานร่วมกันอย่างเดียวกัน ฟัวัง และคณะ [57] ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์สำหรับการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยก๊าซเย็นไหลแบบบังคับ ร่วมกับของเหลวเย็น และวิเคราะห์จากวิธีเชิงตัวเลขพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณเพื่อหาก๊าซเย็นที่ไหลแบบบังคับ โดยความปั่นป่วนของก๊าซเย็นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อน พร้อมกับเทียบวิธีระบายความร้อนแบบสูญเสียอากาศ โดยแบตเตอรี่นั้นได้สร้างความร้อนภาพรวมไว้ที่ 576 วัตต์ และระบบดังกล่าวสามารถทำให้อุณหภูมิสูงสุดลดลงได้ 3.45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิมีความแตกต่าง 3.88 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น 2.46 องศาเซลเซียส ผลของการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการระบายความร้อนนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ได้เป็นอย่างดีดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โมเดลการระบายความร้อนด้วยอากาศเย็นร่วมกับของเหลวเย็นในการระบายความร้อน [57]

ในการระบายความร้อนด้วยอากาศนั้นจะใช้พลังงานมากกว่าแบบการระบายความร้อนด้วยของเหลว 2 ถึง 3 เท่า ส่วนแบบครีระบายความร้อน จะทำให้ระบบการระบายความร้อนมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 40% ส่วนการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ดีที่สุด แม้ว่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะน้อย

กว่าแบบระบายด้วยของเหลวทางตรง แต่ก็น้อยกว่าเพียงเล็กน้อยซึ่งการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อมได้เสนอว่าสามารถนำไปใช้งานจริงได้ [37] ในการระบายความร้อนด้วยของเหลวนั้นยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของของไหลได้ ด้วยการเติมสารนาโน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน [56]

#### 4. สรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่าปัญหาของแบตเตอรี่ลิเทียมที่นักวิจัยกล่าวถึงนั้น ได้แก่ความปลอดภัยจากความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุ การคายประจุ รวมถึงอุบัติเหตุต่างๆ จนเกิด TR หรือความร้อนที่เกิดขึ้นกว่าช่วงอุณหภูมิทำงานที่ 25 – 40 องศาเซลเซียส และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยในการควบคุมอุณหภูมินั้นสามารถใช้อากาศ หรือของเหลวในการระบายความร้อน ด้วยตัวแปรอัตราการไหล มุมทิศทางการไหล ความยาวท่อ หน้าตัดท่อ จำนวนท่อ วัสดุที่ใช้ ขนาดปั๊ม หรือพัดลม 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. Heinzl 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. Sauvart-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, Pape 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.