

การทดสอบการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการระบายความร้อนด้วยอากาศ

EXPERIMENTAL ON AIR COOLING FOR ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS

อำพล พิชัยเชิด¹, สัญชัย ไร่เพยพัด², บัณฑิต กฤตาคม², วริศราภรณ์ จรโคกกรวด²,
วัชรินทร์ ดงบัง³, อภิเดช บุญเจือ^{2*}

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

³ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (วิทยาเขตระยอง)

Aumpol Pichaicherd¹, Sanchai Ramphueiphad², Bundit Krittacom²,

Warisaraporn Jornkokkrud², Watcharin Dongbang³, Apidach Boonjue^{2*}

¹ Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

² Faculty of Engineering and Technology is the Engineering Rajamangala University of Technology Isan

³ Faculty of Science, Energy and Environment King Mongkut's University of Technology

North Bangkok (Rayong Campus)

Corresponding author: e-mail apidach.bo@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อสร้างชุดระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าด้วยอากาศแบบตกกระทบ (Air Impinging) และศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศขณะมีการอัดประจุไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระยะห่างผิวแบตเตอรี่ 2 mm 3 mm และ 4 mm ในการทดลองเลือกใช้แบตเตอรี่ลิเทียม 18650 ความจุ 1200 mAh ต่อขนานกัน 4 เซลล์ โดยอุณหภูมิของอากาศที่นำมาใช้ในการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ แบบตกกระทบ คือ 20 °C 25 °C และ 30 °C ในทุกการทดลองจะใช้ความเร็วอากาศก่อนเข้าแพ็คเกจแบตเตอรี่ 5 m/s เท่ากัน อัตราการอัดประจุที่ใช้ มี 3 อัตรา คือ 1C 2C และ 3C จากผลการทดลอง พบว่าระยะห่างระหว่างผิวเซลล์แบตเตอรี่ มีผลต่อการระบายความร้อน ซึ่งระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ที่ 4 mm จะเพิ่มพื้นที่การไหลของอากาศระหว่างผิวแบตเตอรี่ ทำให้อากาศสัมผัสกับความร้อนที่แบตเตอรี่กระจายตัวออกมาได้เพิ่มขึ้น จึงทำให้การระบายความร้อนออกได้ดีขึ้นด้วย

คำสำคัญ : การระบายความร้อนด้วยอากาศ, แพ็คเกจแบตเตอรี่, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน, ชุดระบายความร้อนแบตเตอรี่

Abstract

This research aims to create electrical vehicle battery cooling by Air Impinging and study the heat transfer rate of the battery to the air during charging for comparing the differences in the battery surface distance at 2 mm, 3 mm and 4 mm In the experiment, 4 lithium 18650 batteries with a capacity of 1200 mAh were used in parallel. The cooling

temperature by Air Impinging was set at 20 °C, 25 °C and 30 °C. For all period of the experiment, the same air velocity prior to the battery pack of 5 m/s. were used at 3 rates of charging, including 1C, 2C and 3C. The result showed that distances between battery cell surfaces can affect battery cooling. The distance between the battery surfaces at 4mm can increase the airflow area between the battery surfaces showed that more air was exposed to the heat dissipated by the battery, so it resulted in better heat dissipation.

Keywords: Air cooling, Battery pack, Lithium-ion battery, Battery cooling

บทนำ

ปัจจุบันประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญกับความมั่นคงด้านพลังงาน เนื่องจากแหล่งพลังงานฟอสซิลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป และยังเป็นสาเหตุหลักของปัญหามลภาวะทางอากาศและภาวะโลกร้อน เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว หลายประเทศจึงเร่งส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดจากแหล่งพลังงานทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ ควบคู่ไปกับการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากเวทีประชุมสหประชาชาติว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สมัยที่ 21 ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส (เชษฐวิทย์มมุสิกะศิริ, 2009, Thitima.K, 2021, อนุสรณ์ สุขเกษม, 2006, Sirikasemsuk, S, Saksusron, P, 2021) โดยประเทศไทยได้มีการผลักดันยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกลง 20 - 25 เปอร์เซ็นต์ ภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มมีการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาดซึ่งรวมถึงพลังงานทดแทนกันอย่างจริงจังมากขึ้น อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่มีฐานการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดใหญ่ แต่โดยส่วนมากจะเป็นยานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Rao et al, 2017) ส่วนการผลิตยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย มีอุตสาหกรรมการผลิตจำนวนน้อย เพื่อเตรียมความพร้อมในการรองรับการเข้ามาของเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า การวิจัยเพื่อสนับสนุนการสร้างความพร้อม ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ของยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะแหล่งพลังงานหลักของยานยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จะมีอายุการใช้งานประมาณ 6-8 ปี (Lu et al, 2016, พิมพ์ ลิ้มทองกุล, 2064, สุริยา พันธุ์พาณิชย์, 2549, กรรชัย เทียงลิ้ม, 2562, Quantunscape, 2021, AEC Hybrid Plus, 2022) แต่ปัจจุบันยังมีราคาค่อนข้างสูง หากใช้งานอย่างไม่ถูกวิธีหรือไม่ได้รับการดูแลรักษาจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงหรือร้ายแรงกว่านั้นอาจทำให้เกิดการเสียหายของแบตเตอรี่ ดังนั้นการพัฒนาแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญอย่างมาก

ทางผู้วิจัยเห็นความสำคัญในการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของการระบายความร้อนให้กับแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จึงเกิดงานวิจัยนี้ขึ้น โดยมุ่งเน้นที่จะศึกษาการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศที่มีความแตกต่างของระยะห่างระหว่างผิวของแบตเตอรี่

วัตถุประสงค์การวิจัย

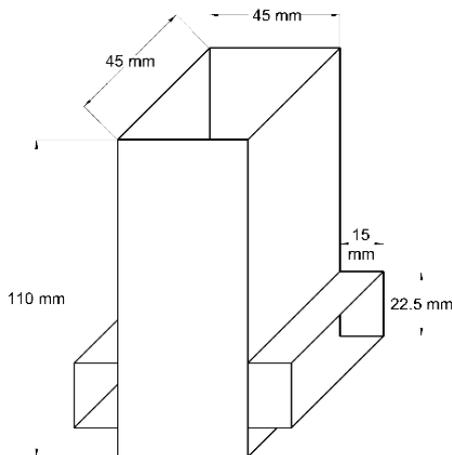
- 1 เพื่อสร้างชุดทดลองระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า
- 2 เพื่อศึกษาการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองเกี่ยวกับการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศแบบไหลตกกระทบ เพื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ ที่มีอุณหภูมิที่ใช้ระบายความร้อน 20, 25, 30 °C จึงมีส่วนประกอบของอุปกรณ์หลัก ๆ และขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

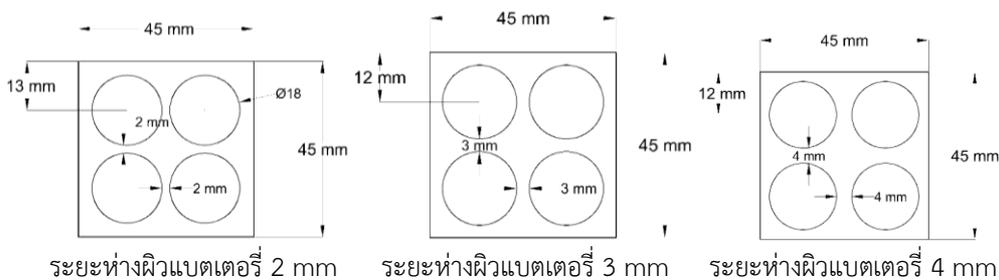
1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยชุดแบตเตอรี่แพ็คเกจ 18650 ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน มีความจุ 1200 mAh แรงดันไฟฟ้า 3.7 V ในการประกอบแพ็คเกจแบตเตอรี่ ต้องวงจรแบบขนาน ใช้ลวดนิเกิล ขนาด 0.1 mm ความกว้าง 5 mm เชื่อมต่อขั้วแบตเตอรี่ และใช้วัสดุแผ่นอะคริลิก ที่มีความหนา 2 mm นำมาประกอบเป็นกล่องบรรจุชุดแบตเตอรี่ดังภาพที่ 1 ซึ่งมีทางเข้าของอากาศที่ระบายความร้อนมีขนาด 45 x 45 mm และมีทางออกของอากาศที่ส่วนล่างของด้านข้าง 2 มีขนาด 15 x 22.5 mm ฐานของชุดแพ็คเกจแบตเตอรี่ ในการทดลองกำหนดให้ระยะห่างผิวแบตเตอรี่ที่ต่างกัน คือ 2, 3, และ 4 mm ตามลำดับดังภาพที่ 2

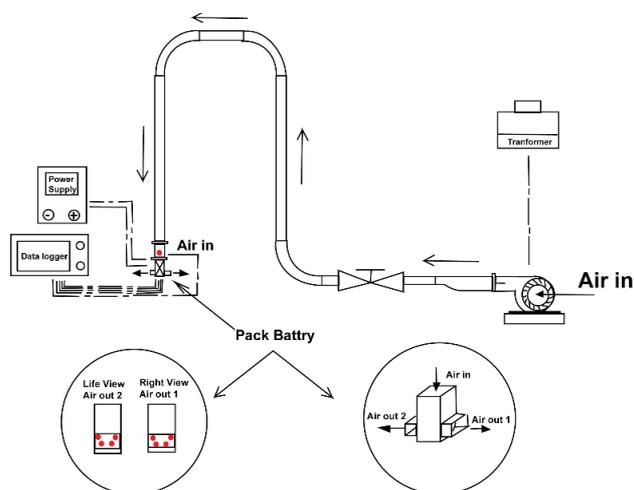


ภาพที่ 1 ชุดกล่องบรรจุชุดแพ็คเกจแบตเตอรี่

การทดลองมีการกำหนดให้ระยะห่างผิวแบตเตอรี่ที่ต่างกันคือ 2, 3, และ 4 mm โดยมีการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ ดังภาพที่ 2 เป็นการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ระยะห่าง 2 mm ส่วนการออกแบบระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ระยะห่าง 3 และ 4 mm แสดงในภาพที่ 2



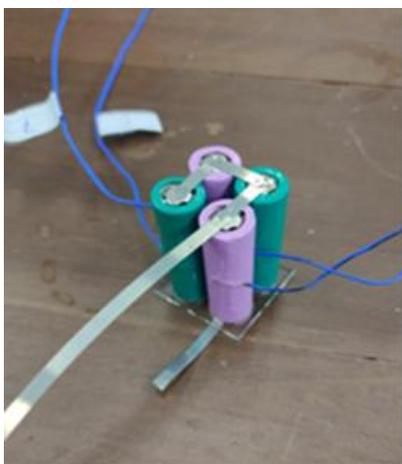
ภาพที่ 2 รายละเอียดการจัดระยะห่างผิวแบตเตอรี่



ภาพที่ 3 ชุดทดลองและอุปกรณ์ที่ใช้

2. วิธีการทดลองการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย มอเตอร์พัดลม ซึ่งสามารถสร้างความเร็วลมได้สูงสุด 10 m/s โดยมี ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้า สำหรับปรับลดความเร็วลมให้เหมาะสมกับการทดลองที่ระดับ 5 m/s ลมที่ได้จะถูกส่งผ่าน วาล์วควบคุม และ ชุดจัดเรียงอากาศ เพื่อระบายความร้อนให้กับ ชุดทดลองแพ็กแบตเตอรี่ ตามที่แสดงในรูปภาพที่ 3 สำหรับการวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ ได้มีการติดตั้ง สายวัดอุณหภูมิบนผิวของเซลล์แบตเตอรี่ จำนวน 5 จุด (ต่อเซลล์) ดังภาพที่ 4 เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างละเอียด ในส่วนของการต่อวงจร ได้เชื่อมต่อที่ ขั้วแบตเตอรี่ ด้วยลวดนิกเกิล โดยใช้การต่อแบบวงจรถาวร และประกอบรวมไว้ภายใน ชุดกล่องแพ็กแบตเตอรี่ นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ลม เพื่อวัดอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านชุดทดลอง



ภาพที่ 4 การต่อวงจรในแบตเตอรี่

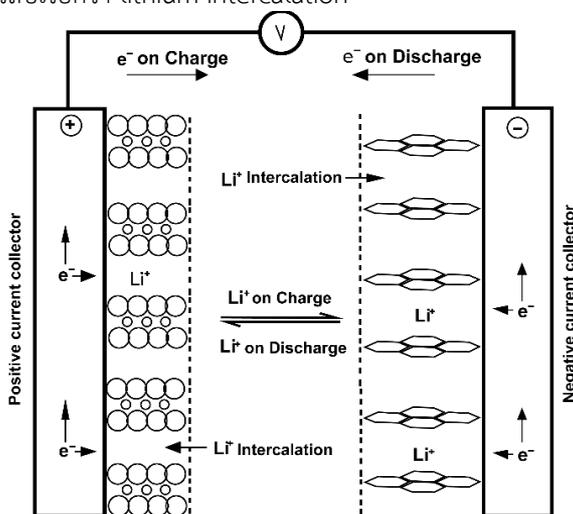
เงื่อนไขของการทดลองใช้มอเตอร์พัดลมที่ความเร็วลมคงที่ 5 m/s จัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่โดยเว้น ระยะห่างระหว่างผิวแบตเตอรี่ เป็นระยะ 2, 3 และ 4 mm อุณหภูมิของลมก่อนเข้าสู่ชุดทดลองถูกกำหนดไว้ที่ 20°C, 25°C และ 30°C ตามรายละเอียดใน ตารางที่ 1 ส่วนอัตราการคายประจุต่อระยะเวลา (C-rate) ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ 1C, 2C และ 3C สำหรับแต่ละกรณีจะควบคุมความจุแบตเตอรี่และอุณหภูมิเริ่มต้นให้สอดคล้องกันตามเงื่อนไขการทดลอง

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองก่อนการทดลอง

อุณหภูมิห้อง °C	อุณหภูมิทางเข้า °C	อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ °C
20 ±2	20 ±2	20 ±2
25 ±2	25 ±2	25 ±2
30 ±2	30 ±2	30 ±2

3. การอัดประจุและการคายประจุแบตเตอรี่

เมื่อมีการอัดประจุ (charge) ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนออกจากโครงสร้างของขั้วบวกผ่านเยื่อเลือกผ่านเข้าสู่ขั้วลบเกิดเป็นสารประกอบของลิเทียม และคาร์บอน และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนตัว จากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และขณะเกิดการคายประจุ (discharge) ปฏิกิริยาจะเกิดในทางตรงกันข้ามดังรูปภาพที่ 5 กระบวนการที่ไอออนของลิเทียมสอดแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุขั้วบวกหรือขั้วลบเรียกว่า lithium intercalation



ภาพที่ 5 การทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขณะอัดประจุ Li จะเข้าทางขั้วลบ และคายประจุ Li จะเข้าทางขั้วบวก

4. การคำนวณหาความร้อนของแบตเตอรี่

การคำนวณหาความร้อนของแบตเตอรี่ในกรณีที่เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติเนื่องจากก่อนที่จะทำการจัดทำชุดระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศนั้น ต้องทราบถึงอัตราการกระจายตัวความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \tag{1}$$

- โดยที่
- Q คือ การพาความร้อนที่แบตเตอรี่ (W)
 - h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W / m².K)
 - A คือ พื้นที่แบตเตอรี่กระจายความร้อนให้กับอากาศ (m²)
 - T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ (K)
 - T_∞ คือ อุณหภูมิอากาศรอบๆแบตเตอรี่ (K)

จากการหาการกระจายตัวความร้อนของแบตเตอรี่ให้กับอากาศ จะได้ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิว

และอุณหภูมิอากาศรอบๆ เซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้นจึงนำมาหาอุณหภูมิ T_f เพื่อนำไปใช้หาคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ T_f (ตารางคุณสมบัติอากาศ) ดังสมการที่ 2

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2} \quad (2)$$

โดยที่ T_f คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวแบตเตอรี่และอุณหภูมิ อากาศรอบๆภายในกล่อง (K)

5. เรย์เลย์นัมเบอร์ (Ra)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (convection) ในของไหลของอากาศ ที่ใช้ในการทดลองระบายอากาศของแบตเตอรี่ โดยการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ค่าเรย์เลย์นัมเบอร์เป็นตัวบ่งชี้ถึงแนวโน้มของการเกิด "พาความร้อนแบบธรรมชาติ" (natural convection) ในของไหล ที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในระบบ ดังสมการที่ 3

$$Ra = GrPr = \frac{g\Delta TL^3}{\nu^2} \beta \quad (3)$$

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m / s^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่และอุณหภูมิรอบๆแบตเตอรี่ (K)

L คือ ความสูงของแบตเตอรี่ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ ($W / m^2 K$)

ν คือ ค่าความหนืดของอากาศ (m^2 / s)

β คือ อัตราการขยายตัวทางความร้อน

6. นัสเซลนัมเบอร์ (Nu)

นัสเซลนัมเบอร์ คือ จำนวนไร้มิติที่ใช้บ่งบอกว่า "การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน" มีความสำคัญมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับ "การถ่ายเทความร้อนแบบนำ" ในระบบของไหลหรือพื้นผิวที่กำลังแลกเปลี่ยนความร้อน ของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ ดังสมการที่ 4

$$Nu = 0.68 + \frac{0.70Ra^{1/4}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{1/4}]^{4/9}} \quad (4)$$

Pr คือ แพททอนนัมเบอร์

7. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของระบบแบตเตอรี่ คือค่าที่ใช้วัดว่าระบบระบายความร้อนสามารถพาความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้ดีเพียงใด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แสดงออกดังสมการที่ 5

$$h = \frac{Nuk}{L} \quad (5)$$

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 K$)

8. อัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการพาความร้อนออกจากแบตเตอรี่ คือพลังงานความร้อนที่จะถูกระบายออกในแต่ละวินาที โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$Q_{conv} = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (6)$$

โดยที่ Q_{conv} คือ อัตราการพาความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ (W)
 C_p คือ ความจุความร้อนของอากาศ (kJ / kg.K)
 T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางออก (K)
 T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศที่ทางเข้า (K)

การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (m) จะได้จากการที่ทางที่ผู้ทำการทดลอง กำหนดความเร็วลม (V) ที่ทางเข้า 5 m/s จึงคำนวณได้ดังสมการ 7

$$\dot{m} = \rho AV \tag{7}$$

โดยที่ \dot{m} คือ มวลของอากาศที่จะต้องนำมาระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ (kg / s)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg / m³)
 A คือ พื้นที่ทางไหลของอากาศ (m²)
 V คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

ผลการวิจัย

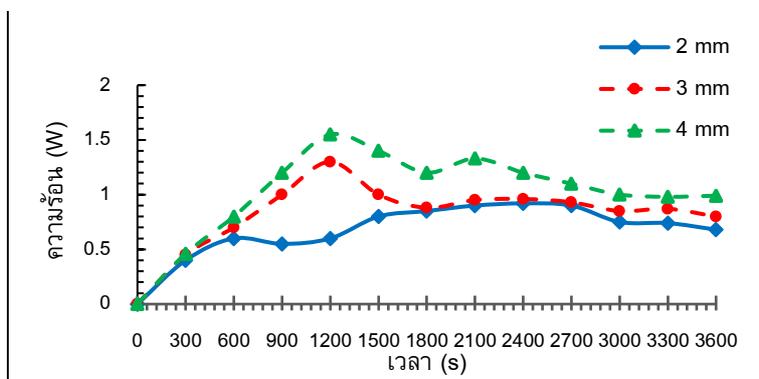
การทดลองการระบายความร้อนจากแพ็คแบตเตอรี่ด้วยอากาศแบบไหลตกกระทบ (Impinging Air) ดังภาพที่ 6 การทดลองจะให้อากาศไหลตกกระทบกับชุดแบตเตอรี่และลงจะกระจาย โดยการบังคับออกด้านข้าง เป็นการระบายความร้อนที่เกิดจากการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน(Li-ion) 18650 ได้ทำตามขั้นตอนการทดลอง โดยจะมีผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 6 อุปกรณ์ทดลองและชุดแพ็คแบตเตอรี่

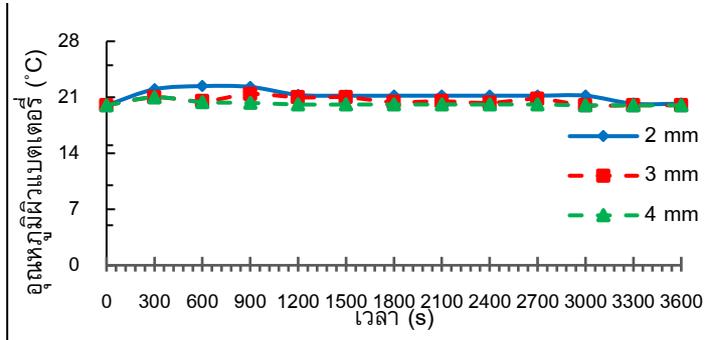
1. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็คแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C

ผลการทดลองนี้ จะเป็นผลการทดลองที่มีความแตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 °C 25 °C และ 30 °C

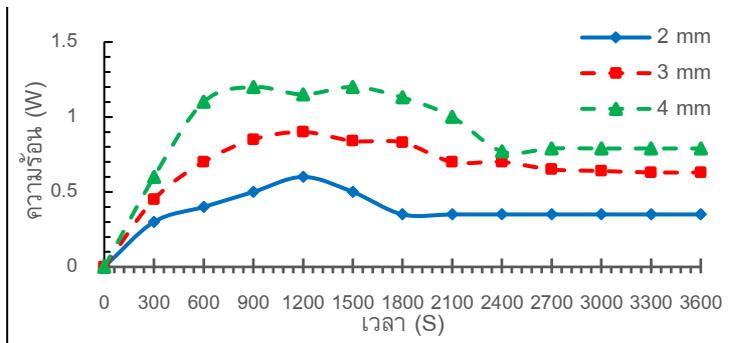


ภาพที่ 7 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

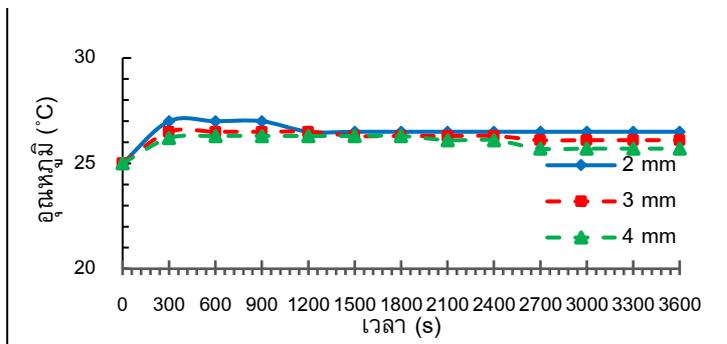
จากการทดลองภายใต้เงื่อนไขการชาร์จที่อัตรา 1C อุณหภูมิอากาศเข้า 20°C และความเร็วลมคงที่ 5 m/s พบว่า ระยะห่างระหว่างเซลล์แบตเตอรี่มีผลต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน โดยทดสอบที่ระยะห่าง 2 mm, 3 mm และ 4 mm ผลการทดลองแสดงให้เห็นดังภาพที่ 8 เมื่อระยะห่างระหว่างเซลล์เพิ่มขึ้น การระบายความร้อนจะดีขึ้นตามลำดับ โดยแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm สามารถระบายความร้อนได้สูงสุดถึง 1.6 W ซึ่งมากกว่าระยะห่าง 3 mm มีความร้อน 1.0 W และ 2 mm 0.7 W อย่างไรก็ตาม แม้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนจะสูงสุดที่ระยะห่าง 4 mm แต่อุณหภูมิผิวเซลล์กลับต่ำกว่าระยะห่างอื่น โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20–25°C ดังแสดงในภาพที่ 9 สะท้อนว่าอากาศสามารถไหลผ่านช่องว่างได้ดีขึ้นเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลดความร้อนสะสมบนผิวเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 8 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

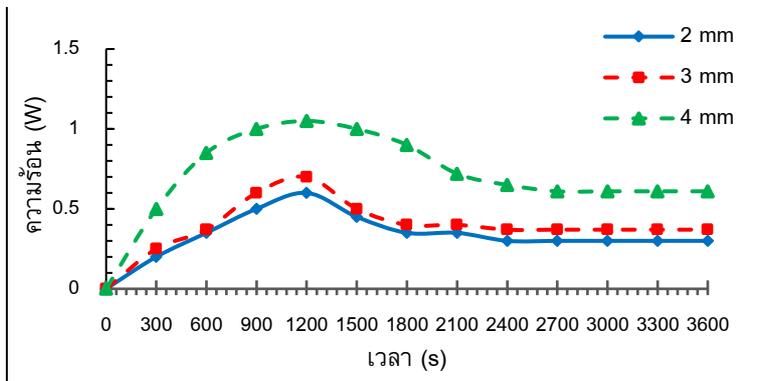


ภาพที่ 9 ความร้อนที่ถูกระบายออกที่อัตราการชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C

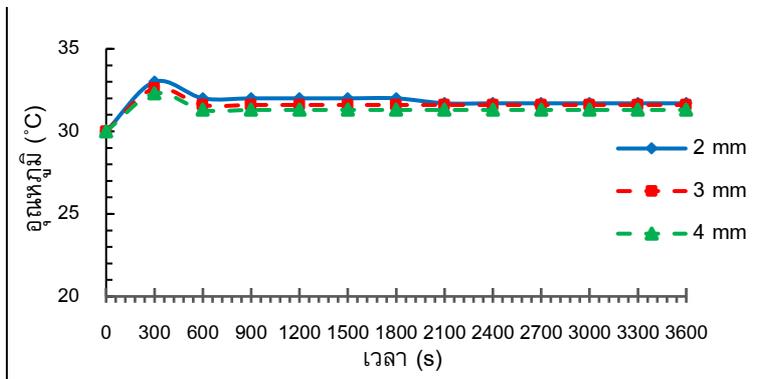


ภาพที่ 10 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการระบายความร้อนให้กับแบตเตอรี่ ดังรูปภาพที่ 10 พบว่าผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 2, 3 และ 4 mm ภายใต้เงื่อนไขการอัดประจุที่ 1C อุณหภูมิอากาศขาเข้า 25°C และความเร็วลม 5 m/s ผลการทดลองพบว่า ระยะห่าง 4 mm ให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุด โดยสามารถระบายความร้อนได้สูงสุด 1.3 W ขณะที่ระยะห่าง 3 mm และ 2 mm ระบายความร้อนได้ 0.9 W และ 0.3 W ตามลำดับ ด้านอุณหภูมิผิวเซลล์ แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm แสดงอุณหภูมิต่ำที่สุดในช่วง 25–30°C ซึ่งสอดคล้องกับผลในรูปภาพที่ 7 และรูปภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าระยะห่างมากช่วยเพิ่มการพาความร้อนและลดอุณหภูมิสะสมที่ผิวเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 11 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 1C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

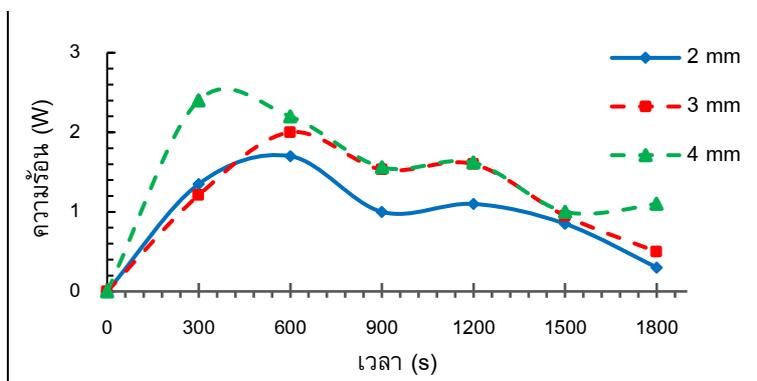


ภาพที่ 12 ความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 1C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

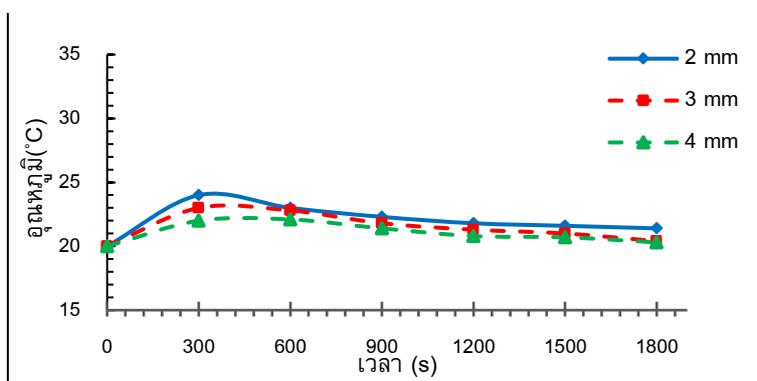
ภายใต้เงื่อนไขการอัดประจุ 1C โดยเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าเป็น 30°C และความเร็วลม 5 m/s ดังรูปภาพที่ 11 พบว่า ระยะห่าง 4 mm ให้การระบายความร้อนสูงสุดที่ 1.0 W ขณะที่ระยะ 3 mm และ 2 mm อยู่ที่ 0.6 W และ 0.5 W ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิดังรูปภาพที่ 12 ที่ระยะห่าง 4 mm อยู่ในช่วง 30–35°C ซึ่งต่ำกว่าระยะอื่น ๆ สะท้อนให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าในสภาวะเดียวกัน

2. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็กแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 2C

ผลการทดลองนี้ จะเป็นผลการทดลองที่แตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 25 และ 30 °C

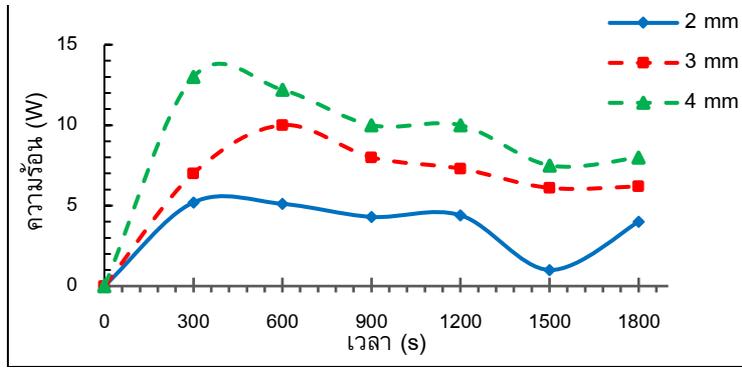


ภาพที่ 13 ความร้อนที่ถูกระบายออกที่อัตราการชาร์จ 2 C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

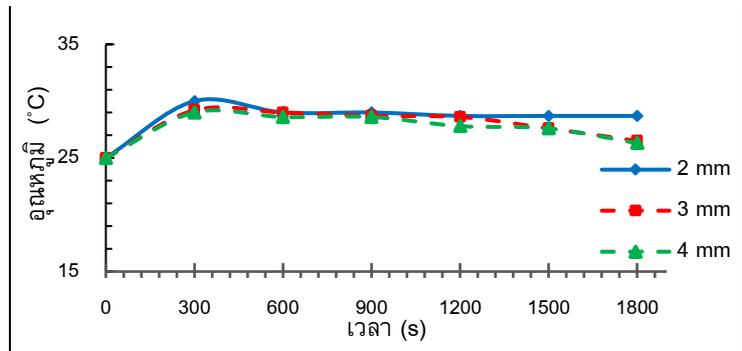


ภาพที่ 14 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

จากภาพที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็กแบตเตอรี่ ภายใต้สภาวะการชาร์จที่อัตรา 2C โดยมีอุณหภูมิอากาศขาเข้า 20°C และความเร็วลม 5 m/s ผลการทดลองพบว่า แพ็กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 มม. สามารถระบายความร้อนได้สูงสุดที่ 2.2 W ซึ่งสูงกว่าระยะห่าง 3 มม. 2.0 W และ 2 มม. 1.9 W สำหรับอุณหภูมิที่ผิวเซลล์แบตเตอรี่ พบว่า ระยะห่าง 4 มม ส่งผลให้อุณหภูมิผิวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่าง 3 มม. และ 2 มม. ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 14 โดยอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 20–30 °C

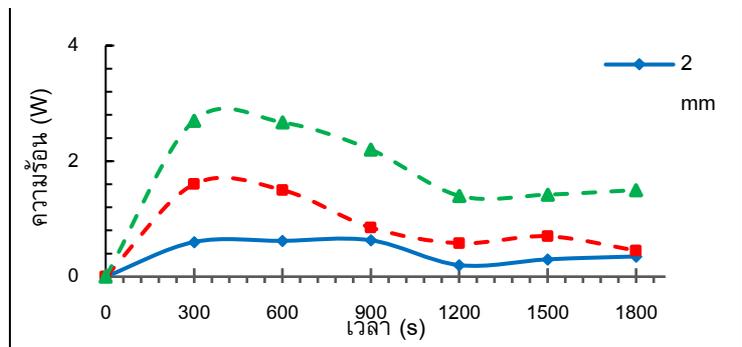


ภาพที่ 15 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C

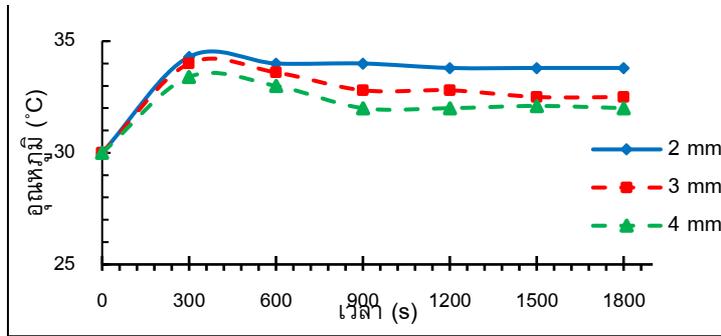


ภาพที่ 16 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศขาเข้าเป็น 25 °C ภายใต้สภาวะการชาร์จที่อัตรา 2C และความเร็วลม 5 m/s เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแพ็คเกจเตอรี่ ดังภาพที่ 18 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แพ็คเกจเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีอัตราการระบายความร้อนสูงสุดที่ 12.1 W ซึ่งสูงกว่าระยะห่าง 3 mm ที่สามารถระบายความร้อนได้สูงสุด 10 W และระยะห่าง 2 mm ที่ระบายความร้อนได้เพียง 6 W นอกจากนี้ในภาพที่ 16 พบว่า อุณหภูมิที่ผิวเซลล์ของแพ็คเกจเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีค่าต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับระยะห่าง 3 mm และ 2 mm โดยอุณหภูมิผิวอยู่ในช่วง 25–30°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้



ภาพที่ 17 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 2C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C

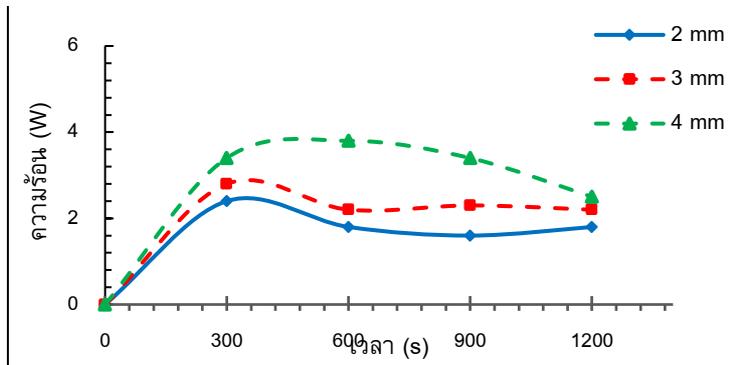


ภาพที่ 18 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 2C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

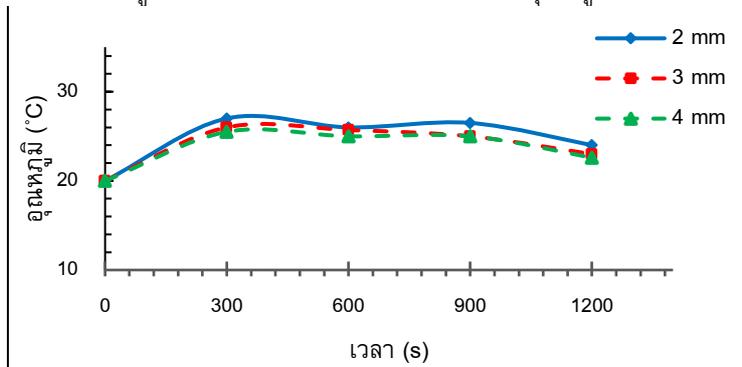
ส่วนภาพที่ 17 เป็นแสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบการระบายความร้อนของแพ็คเกจแบตเตอรี่ ภายใต้การอัดประจุที่ 2C อุณหภูมิอากาศเข้า 30°C และความเร็วลม 5 m/s พบว่า แพ็คเกจแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm และ 3 mm มีการระบายความร้อนสูงสุดเท่ากันที่ 3.0 W ส่วนระยะห่าง 2 mm ระบายความร้อนได้น้อยกว่าที่ 1.0 W อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ดังรูปภาพที่ 17 และสอดคล้องกับรูปที่ 18 พบว่า แบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีอุณหภูมิผิวต่ำที่สุด อยู่ในช่วง 30-35°C

3. ผลการทดลองการระบายความร้อนแพ็คเกจแบตเตอรี่ด้วยอากาศและอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อนที่อัตราการชาร์จ 3 C

ผลการทดลองนี้จะเป็นผลการทดลองที่แตกต่างของระยะห่างของผิวแบตเตอรี่ที่ใช้อุณหภูมิในการระบายความร้อน 20 25 และ 30 °C

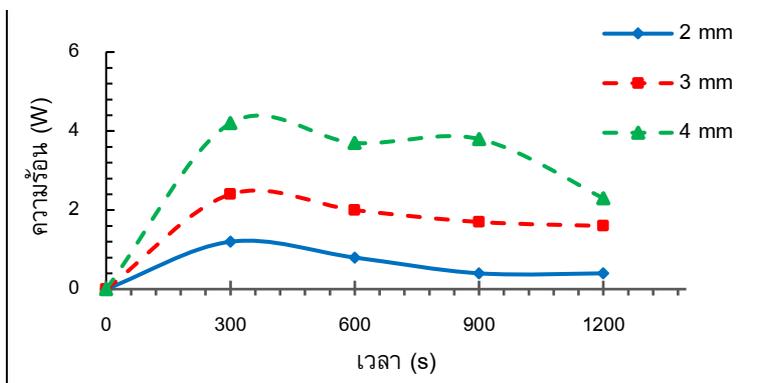


ภาพที่ 19 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 20 °C

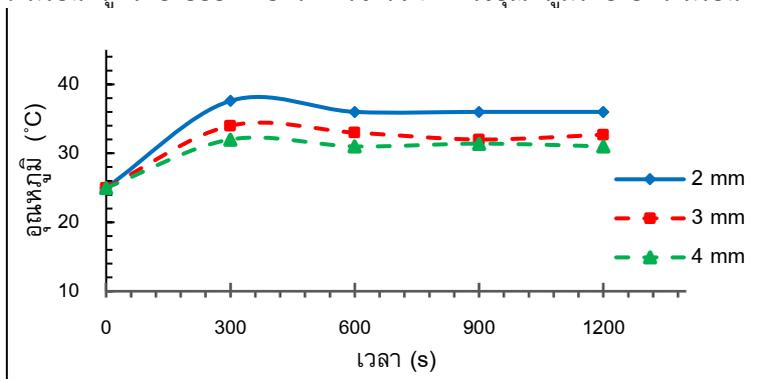


ภาพที่ 20 อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 20 °C

จากภาพที่ 18 พบว่าแพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 4 mm มีอัตราการระบายความร้อนสูงสุด โดยสูงสุดที่ประมาณ 4 W ขณะที่ระยะ 3 mm มีอัตราสูงสุดประมาณ 3.5 W และระยะ 2 mm อยู่ที่ประมาณ 2 W ก่อนที่จะลดลงเล็กน้อยในช่วงหลัง ในช่วงเวลาประมาณ 300-600 วินาที แสดงให้เห็นว่าแต่ละระยะห่างเข้าสู่ช่วงที่อัตราการระบายความร้อนสูงสุด และมีแนวโน้มคงที่หรือลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป แสดงถึงการเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน ส่วนอุณหภูมิผิวแพ็คเกจเตอร์พบว่าแพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างผิวเซลล์ 4 mm มีอุณหภูมิผิวต่ำที่สุดตลอดช่วงเวลา โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 26.5°C รองลงมาคือระยะ 3 mm ที่ประมาณ 27°C และ 2 mm สูงที่สุดที่ประมาณ 28°C ดังรูปภาพที่ 20 มีแนวโน้มของกราฟชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิของผิวแพ็คเกจเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-300 วินาที และค่อย ๆ คงที่หลังจากนั้น ซึ่งแสดงถึงการเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลความร้อน



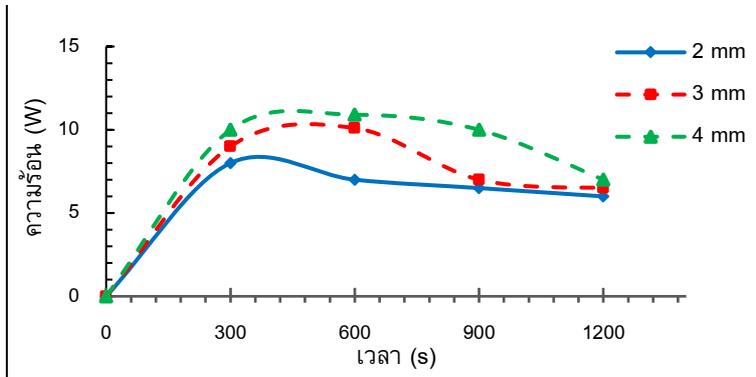
ภาพที่ 21 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 25 °C



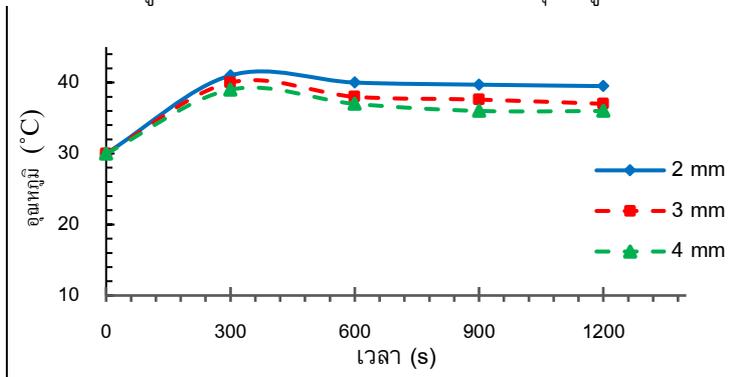
ภาพที่ 22 อุณหภูมิที่ผิวแพ็คเกจเตอร์ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C

การเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออก ของแพ็คเกจเตอร์เมื่อเวลาผ่านไป ภายใต้ระยะห่างระหว่างเซลล์ 2, 3 และ 4 mm อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 25 °C อัตราการชาร์จ 3C ดังภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าแพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่างระหว่างเซลล์ 4 mm มีพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออกสูงที่สุดตลอดช่วงเวลาการทดลอง โดยค่าสูงสุดประมาณ 4.1 W ที่เวลาประมาณ 300 วินาที จากนั้นค่าค่อย ๆ ลดลง แต่ยังคงสูงกว่าแพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่าง 2 และ 3 mm อย่างชัดเจน ในขณะที่แพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่าง 3 mm มีค่าการระบายความร้อนสูงสุดที่ประมาณ 2.0 W และระยะห่าง 2 mm. มีค่าต่ำที่สุด โดยค่าสูงสุดประมาณ 1.3 W การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวของแพ็คเกจเตอร์ที่มีระยะห่าง

ระหว่างเซลล์ 2, 3 และ 4 mm ภายใต้การชาร์จที่อัตรา 3C ดังภาพที่ 22 พบว่า แพ้กที่มีระยะห่าง 4 mm ให้ค่าอุณหภูมิผิวต่ำที่สุดตลอดช่วงเวลา โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 33°C ขณะที่ระยะ 3 และ 2 mm มีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 35°C และ 39°C ตามลำดับ และมีแนวโน้มอุณหภูมิคงที่หลังจาก 600 วินาที สะท้อนถึงภาวะสมดุลทางความร้อน



ภาพที่ 23 ความร้อนที่ถูกระบายออก ที่อัตราการชาร์จ 3C ที่ใช้อุณหภูมิระบายความร้อน 30 °C



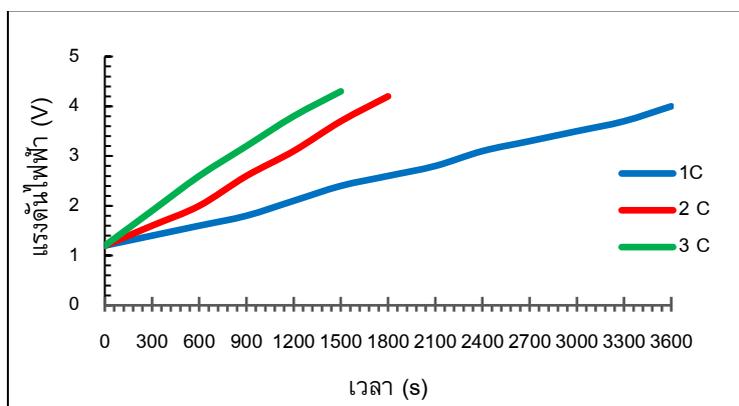
ภาพที่ 24 ความร้อนที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ที่อัตราการชาร์จ 3C ใช้อุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้า 30 °C

เมื่อทำการทดลองเพิ่มอุณหภูมิระบายความร้อนที่ทางเข้าเป็น 30 °C ดังภาพที่ 23 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ถูกระบายออก เปรียบเทียบการระบายความร้อนของแพ้กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่างระหว่างผิวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ พบว่าแพ้กแบตเตอรี่ที่มีระยะห่าง 4 mm มีความร้อนที่ถูกระบายออก สูงสุดอยู่ที่ 12 W มากกว่า 3 mm ที่มีความร้อนที่ถูกระบายออกสูงสุดอยู่ที่ 11 W และ 2 mm มีความร้อนที่ถูกระบายออก 8 W ส่วนอุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ขณะมีการระบายความร้อน ดังภาพที่ 24 จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ผิวแบตเตอรี่ระยะ 4 mm จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าระยะ 3 mm และ 2 mm ซึ่งมีแนวโน้มดังภาพที่ 24 และอุณหภูมิมียอยู่ในช่วง 30 - 40 °C และอุณหภูมิคงที่หลังจาก 600 วินาที สะท้อนถึงภาวะสมดุลทางความร้อน

4. เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้า (V) และเวลา (t) ในการอัดประจุ

แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อชาร์จด้วยอัตรา 1C, 2C และ 3C ดังรูปภาพที่ 27 เป็นการเปรียบเทียบค่าแรงดันในแต่ละอัตราการชาร์จ พบว่า แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในทุกอัตราการชาร์จ โดยอัตรา 3C มีการเพิ่มของแรงดันรวดเร็วที่สุด ใช้เวลาประมาณ 1,500 วินาที จนถึงแรงดันสูงสุด รองลงมาคืออัตรา 2C และ 1C ที่ใช้เวลาชาร์จจนานที่สุดประมาณ 3,600 วินาที พบว่า อัตราการ

ชาร์จที่สูงขึ้นช่วยลดเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ได้อย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตาม อัตราการชาร์จที่สูงขึ้นอาจทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในเซลล์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง



ภาพที่ 25 เวลาที่ใช้ในการอัดประจุกับเวลาที่ใช้ในแต่ละอัตรา

สรุปผล

การทดลองศึกษาการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 18650 โดยเปรียบเทียบระหว่างระหว่างเซลล์ที่ 2 mm, 3 mm และ 4 mm ภายใต้การชาร์จที่อัตรา 1C, 2C และ 3C ที่อุณหภูมิอากาศ 20°C, 25°C และ 30°C ผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ระยะห่าง 4 mm ให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงสุดในทุกกรณี โดยที่อุณหภูมิ 25°C ความร้อนที่ระบายได้อยู่ที่ 12.1 W มากกว่าระยะห่าง 3 mm และ 2 mm ซึ่งอยู่ที่ 3.0 W และ 2.2 W ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่อยู่ในช่วง 20–40°C ซึ่งเหมาะสมต่อการทำงานของแบตเตอรี่ สรุปได้ว่า ระยะห่างที่มากขึ้นช่วยให้อากาศไหลผ่านได้ดีขึ้น ลดความดันและเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากอุณหภูมิมีความสำคัญกับผลการทดลองอย่างมาก ควรตรวจสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ให้พร้อมก่อนทำการทดลอง เช่น อุณหภูมิผิวแบตเตอรี่ก่อนทำการทดลอง และอุณหภูมิอากาศที่ใช้ระบาย ควรใกล้เคียงกันทำการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยให้ความอนุเคราะห์สถานที่ รวมทั้งแหล่งความรู้ในการสืบค้นงานวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- เขมฐวิทย์ มุสิกะศิริ. (2562). “มาตรการทางกฎหมายในการประกอบกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า”. *วารสารบัณฑิตศึกษานิติศาสตร์*, 12(1), 1-10.
- เขมฐวิทย์ มุสิกะศิริ. (2552) “มาตรการทางกฎหมายในการประกอบกิจการสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า”. *Graduate Law Journal*, 12(1), 1-10.
- อนุสรณ์ สุขเกษม, ไพศาล นาผล, จุฑารัตน์ คุรุเจริญ, และพิชัย อัญมมงคล. (2006). การถ่ายเท ความร้อนโดยการพาของกลุ่มครีบทรงกรวย. *วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระ จุฬจอมเกล้า*, 4(1), 229-235.

- สรราวุฒิ สิริเกษมสุข สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และไพศาล นาผล. (2564). ทบทวนการจัดการความร้อนในแบตเตอรี่ลิเทียมสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(1), 93-107.
- บุญยวีร์ สุขสุสร สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และไพศาล นาผล (2564). การระบายความร้อนแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้าด้วยโมดูลการทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริก. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 16(1), 50-58.
- โครงการศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า. (2564.July.5) *การศึกษาและพัฒนาระบบหล่อเย็นสำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย*: www.thaiauto.or.th
- พิมพ์ ลิ้มทองกุล และคณะ. (2021.July.5) *การวิจัยแบตเตอรี่ต้นแบบสำหรับรถยนต์นั่งไฟฟ้า* [ระบบออนไลน์] www.thaiauto.or.th
- สุริยา พันธุ์พาณิชย์. (2549) *การทดสอบแบตเตอรี่*. วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยนเรศวร
- กรรชัย เทียงลิ้ม. (2562) *การศึกษามลกระทบของการระบายความร้อนที่ขั้วแบตเตอรี่ลิเทียม*. วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- ดร.วรวริศ กอปรสิริพัฒน์ (2022 Aug 6) *สารพันความร้อนด้านพลังงาน* [Online] <https://www2.mtec.or.th>
- Z. Rao, Z. Qian, Y. Kuang, & Y. Li. (2017) *Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface*. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 1514–1522,
- Sadighi Dizaji, H., Jafarmadar, S., Khalilarya, S., & Moosavi, A. (2016). An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit. *Applied Energy*, 181, 357-366
- Rao,Z, & Wang,S. (2011). A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4554-4571
- Z. Lu, X. Z. Meng, L. C. Wei, W. Y. Hu, L. Y. Zhang, & L. W. Jin, “Thermal management of densely-packed EV battery with forced air cooling strategies,” *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 682–688, 2016
- L. H. Saw, Y. Ye, A. A. O. Tay, W. T. Chong, S. H. Kuan, & M. C. Yew, “Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling,” *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 783–792, 2016
- Quantumscape (2021.July.5) *Distinguishing Charge rates For next-generation batteries* [Online] <https://www.quantumscape.com>
- AEC Hybrid Plus (2022 Aug 5) *Series and parallel battery connection* [Online] <https://th.aec-rnginerring.com>

Translated Thai References

- Chetthawit Musikasiri. (2009) “Legal Measures Related To The Operation Of Charging Stations For Electric Vehicles”. *Graduate Law Journal*, 12(1), 1-10.

- Anusorn Sukkasem, Paisarn Naphon, Chutarat Kurucharoen, & Pichai Athamongkhon. (2006). On the Convective Heat Transfer of the Cylindrical Taper Pin Fins Array. *Chulachomklao Royal Military Academy*, 4(1), 229-235.
- Sirikasemsuk, S., Naphon, P., & Wiriyasart, S. (2021). Review Thermal Management System of Battery for Electrical Vehicles. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(1), 93-107.
- Suksusron, P., Wiriyasart, S., & Naphon, P. (2021). Electrical Vehicle Battery Cooling by Thermoelectric Cooling Module. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 16(1), 50-58.
- The Learning Center Project for Technology and Innovation Development in the Electric Vehicle Industry (July 5, 2021). *A Study and Development of a Cooling System for Electric Vehicle Batteries in Thailand*. www.thaiauto.or.th
- Limthongkul, P., & colleagues. (2021, July 5). *A study on prototype battery development for electric passenger cars*. www.thaiauto.or.th
- Phanpanit, S. (2006). *Battery testing* (Unpublished bachelor's thesis). Naresuan University, Department of Electrical Engineering.
- Thianglim, K. (2019). *A study on the effects of cooling at the terminals of lithium batteries* (Unpublished master's thesis). Kasetsart University, Department of Mechanical Engineering.
- Korpsiripat, W. (2022, August 6). *Various thermal issues in energy*. <https://www2.mtec.or.th>