

การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตระหว่าง ระบบทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมและ ระบบทำความเย็นแบบจุ่ม

Comparison of Heat Transfer of Battery Lithium Phosphate Between Air Cooling, Indirect Cooling and Immersion Cooling System

ธีรภัทร ทังทอง¹ อัญชนา วงษ์โต^{1*} วีรชัย ชัยวรพลกุล¹ ศุภพัชรี รอดเดชา² และ กษิตติศ พนมสุวรรณ³

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์¹

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์²

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์³

E-mail: teerapat.thung@ku.th, fengacw@ku.ac.th*, fengwcc@ku.ac.th,

fengsrro@ku.ac.th, fenggdp@ku.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (corresponding author)

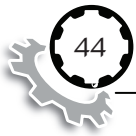
บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาและเปรียบเทียบการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยระบบทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบทำความเย็นแบบจุ่มด้วยการใช้สาร Novec 7100 จากผลการทดลองพบว่าระบบทำความเย็นแบบจุ่มมีความสามารถในการลดอุณหภูมิของพื้นที่ผิวแบตเตอรี่ได้ โดยมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจาก 34.61 เหลือเพียง 26.95 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังพบว่าระบบทำความเย็นแบบจุ่มเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากผิวของแบตเตอรี่สู่สาร Novec 7100 และอากาศภายในส่วนทดลองทำให้เลขนัสเซลล์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.45 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นอีกว่าระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมจะให้ค่าเลขนัสเซลล์ที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นรูปวิธีอื่น ๆ ในงานวิจัยนี้อีกด้วย การเปรียบเทียบของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนบนผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตของระบบทำความเย็นรูปแบบต่าง ๆ จะนำไปสู่การพัฒนาการจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ได้อย่างหลากหลายต่อไป ในอนาคต

 **คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน; แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต; ระบบทำความเย็นแบบจุ่ม; สาร Novec 7100

Abstract

This research studied and compared the heat transfer enhancement using air cooling, indirect cooling and immersion cooling system using Novec 7100 fluid. The results showed



that the immersion cooling system had the potential to decrease the temperature of the surface battery, having a value from 34.61 to 26.95 degrees Celsius. It was also found that the immersion cooling system enhances the heat transfer capability from the surface of the battery to Novec 7100 fluid and the air inside the test section, leading to a maximum increase in the Nusselt number by 3.45 times compared to the air cooling system. Additionally, the results showed that the indirect cooling system provides the lowest Nusselt number when compared to other cooling methods in this research. The comparison of the heat transfer enhancement on the lithium-ion battery surface of the various cooling systems contribute to the development of effective battery thermal management and also apply in engineering research or industries related to batteries in the future.

**Keywords:**

Heat transfer; Lithium phosphate battery; Immersion cooling system; Novec 7100 fluid

1. บทนำ



เนื่องจากในปัจจุบันแนวโน้มการใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันและถูกใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลายตามการเติบโตของแบตเตอรี่ขนาดเล็กภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้บริโภคไปจนถึงอุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า (Battery Electric Vehicle, BEV) [1] ซึ่งปัญหาส่วนใหญ่ที่พบเจอคือการเกิดความร้อนสูญเสียที่มากเกินไป ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์และอายุการใช้งานของแบตเตอรี่มีค่าน้อยลง ดังนั้นระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพ (Effective battery thermal management systems, BTMS) จึงเป็นสิ่งสำคัญในการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อม [2] เนื่องจากระบบการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ

จะช่วยยืดอายุการใช้งานและเพิ่มขีดความสามารถด้านพลังงาน รวมไปถึงการลดความร้อนออกจากผิวของแบตเตอรี่โดยการควบคุมอุณหภูมิบนผิวของแบตเตอรี่ให้ไม่เกินขีดจำกัดยังเป็นการป้องกันการระเบิดได้ [3, 4] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตระหว่างระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบการทำความเย็นแบบจุ่มด้วยการใช้สาร Novec 7100 โดยมีการกำหนดให้แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตทั้ง 2 แผ่นถูกอัดและคายประจุไฟฟ้าด้วยค่าคงที่เท่ากับ 10 แอมป์ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาการสร้างระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่และ

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงได้ผลเปรียบเทียบชัดเจนจำกัดในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนของระบบระบายความร้อนทั้ง 3 ชนิด อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนตัวอย่างเช่น การช่วยระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่อยู่ภายในรถยนต์ไฟฟ้าหรือระบบจัดเก็บพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อไม่ให้ระบบมีอุณหภูมิเกินขีดจำกัดจนเกิดความเสียหายแก่แบตเตอรี่ได้ รวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอื่น ๆ นอกเหนือจากแบตเตอรี่ เช่น การพัฒนาและออกแบบระบบระบายความร้อนในศูนย์ข้อมูล (Data center) เพื่อให้คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นต้น

2. การตรวจเอกสาร

การลดอุณหภูมิบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ในระบบระบายความร้อนนั้นมีหลากหลายรูปแบบ ซึ่งระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบการทำความเย็นแบบจุ่มเป็นระบบที่มีความนิยมในการใช้งานในปัจจุบัน

ระบบการทำความเย็นด้วยอากาศเป็นหนึ่งในวิธีในการระบายความร้อนที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากบำรุงรักษาง่าย น้ำหนักเบา และใช้ทรัพยากรในการผลิตน้อย นอกจากนี้ยังไม่มีปัญหาเรื่องการรั่วซึมเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำความเย็นด้วยน้ำ [4-5] ระบบการทำความเย็น

ด้วยอากาศนั้นถูกพบว่ามีเพียงพอกับระบายความร้อนออกจากพื้นผิวของแบตเตอรี่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำความเย็นด้วยน้ำและอาจไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่หรือกำลังสูง อย่างไรก็ตาม ระบบการทำความเย็นด้วยอากาศยังคงมีแนวโน้มในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพที่ต้องการการกระจายความร้อนต่ำเท่านั้น [7] แตกต่างจากระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมซึ่งเป็นหนึ่งในระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสามารถในการรักษาการกระจายอุณหภูมิของภายในภาชนะได้อย่างสม่ำเสมอ อีกทั้งยังการควบคุมความร้อนได้ดี [8] ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมจะใช้ของเหลวเคลื่อนที่ไปตามช่องทางของท่อหรือแผ่นทำความเย็นเพื่อช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากแบตเตอรี่ โดยของเหลวจะไม่สัมผัสกับอุปกรณ์โดยตรง จากผลงานวิจัยพบว่าการลดอุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ในระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งการติดตั้งส่วนทำความเย็น โดยการติดตั้งส่วนทำความเย็นที่ด้านข้างของภาชนะจะมีส่วนช่วยให้อุณหภูมิบรรยากาศมีความสม่ำเสมอและยังช่วยลดอุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ได้ดีกว่าการติดตั้งส่วนทำความเย็นที่ด้านล่างของภาชนะเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสกับอุณหภูมิร้อนที่มากกว่า [9] อย่างไรก็ตาม ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมจะมีการใช้งานที่ซับซ้อนมากกว่าระบบทำความเย็นด้วยอากาศ

เนื่องจากส่วนประกอบเพิ่มเติมจะส่งผลให้ระบบมีน้ำหนักที่มากขึ้นและเสี่ยงต่อการรั่วไหลของน้ำหล่อเย็น อีกทั้งยังพบว่าความต้านทานความร้อนระหว่างแบตเตอรี่และสารหล่อเย็นจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากมีวัสดุมาขวางกันโดยตรง ทำให้ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมนั้นไม่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ที่มีการอัดและคายประจุไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง

ระบบการทำความเย็นแบบจุ่มเป็นการใช้ของเหลวระบายความร้อนหรือลดอุณหภูมิพื้นผิวของแบตเตอรี่โดยตรงด้วยการใช้สารเคมีเฉพาะทางที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและมีความเป็นขั้วสูงจึงมีความเป็นฉนวนไฟฟ้า และโดยส่วนใหญ่จะเป็นสารที่ไม่ติดไฟได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) และสารไฮโดรฟลูออโรอีเธอร์ (Hydrofluoroether, HFE) ซึ่งสารเคมีเหล่านี้สามารถทำหน้าที่เป็นสารหล่อเย็นได้เนื่องจากมีจุดเดือดที่ต่ำและมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงเหมาะสมกับการนำไปใช้ระบายความร้อนในอุปกรณ์ที่ต้องเกี่ยวข้องกับการใช้ไฟฟ้า ระบบการทำความเย็นแบบจุ่มถูกพบว่าเป็นระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและมีส่วนช่วยให้อุณหภูมิบนผิวของแบตเตอรี่มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับระบบการทำความเย็นทั้งหมด [10] นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นแบบจุ่มยังมีข้อดีกว่าระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมเนื่องจากพื้นผิวของแบตเตอรี่อยู่ในของเหลวและไม่มีค่าความต้านทานความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการมีวัสดุมาขวางกัน ระบบการทำความเย็นแบบจุ่มสามารถแบ่ง

ออกได้เป็น 2 วิธีได้แก่ ระบบการทำความเย็นแบบจุ่มอย่างเต็มรูปแบบ (Complete immersion cooling) ที่สารหล่อเย็นจะครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณผิวของแบตเตอรี่และเหมาะสมสำหรับการระบายความร้อนบนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูง และระบบการทำความเย็นด้วยแบบจุ่มบางส่วน (Partial immersion cooling) ที่สารหล่อเย็นจะครอบคลุมผิวของแบตเตอรี่เพียงบางส่วนเท่านั้น

3. สมการที่เกี่ยวข้อง

โดยปกติแล้วการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่, q (W/m^2) สามารถคำนวณได้จากกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่อุปกรณ์กำเนิดความร้อน, Q (W) ต่อพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน, A (m^2) ด้วยการใช้สมการของดังนี้

$$q = Q / A = IV / A \quad (1)$$

เมื่อ I และ V คือกระแสไฟฟ้า (A) และแรงดันไฟฟ้า (V) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) ระหว่างพื้นผิวแบตเตอรี่กับของไหลภายในส่วนทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$h = q / (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

โดย T_s คือค่าอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน ($^\circ C$) และ T_∞ คืออุณหภูมิของของไหลภายในส่วนทดลอง ($^\circ C$) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะนำมาสู่การคำนวณเพื่อหาค่าเลขนัสเซลล์ท์, Nu ดังสมการ

$$Nu = hL_c / k \quad (3)$$

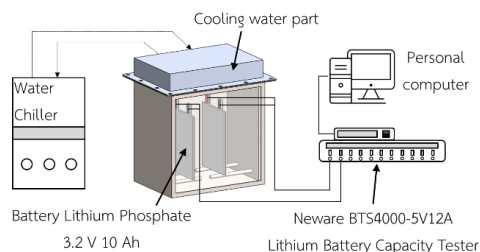
เมื่อ L_c คือความยาวสำคัญของอุปกรณ์กำเนิดความร้อน (m) และ k สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) โดยที่คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลที่ใช้ในการคำนวณสมการข้างต้นสามารถประเมินได้จากอุณหภูมิฟิล์ม, $T_f (^\circ\text{C})$ ดังนี้

$$T_f = (T_s - T_\infty) / 2 \quad (3)$$

4. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตจำนวน 2 ตัวที่ถูกใส่ไว้ในส่วนทดลองมีขนาดกว้าง 0.20 เมตร $\times$ ยาว 0.20 เมตร $\times$ สูง 0.20 เมตร ทำมาจากแผ่นสแตนเลสที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 เมื่อมีการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนด้วยระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อม จะมีการปล่อยให้น้ำไหลผ่านส่วนทำความเย็นด้านบนของส่วนทดลองและจะมีการควบคุมอุณหภูมินี้ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 22 ± 0.3 องศาเซลเซียส ตลอดทุกกรณีของการทดลองด้วยการใช้น้ำหล่อเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็น (Water chiller) แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตแบบแผ่นจำนวน 2 ตัวที่มีแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.2 โวลต์และ 10 แอมป์ตามลำดับ ซึ่งจะผลิตกำลังได้มากที่สุดถึง 32 วัตต์ โดยแผ่นแบตเตอรี่จะมีความกว้าง 12.8 เซนติเมตรและสูง 18.3 เซนติเมตรดังแสดงในภาพที่ 2 จะถูกติดตั้งให้ห่างจากแนวกึ่งกลางของส่วนทดลองเป็นระยะ 5 เซนติเมตร รวมทั้งติดตั้งห่างจากพื้นของส่วนทดลองด้านล่างที่ระยะ 2.5 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้าที่เข้าแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตแบบแผ่นถูกควบคุมด้วยเครื่องทดสอบ

ความจุของแบตเตอรี่รุ่น Neware BTS4000-5V12A Lithium Battery Capacity Tester ให้มีค่าเท่ากับ 10 แอมป์ชั่วโมงตลอดทุกกรณีในการทดลอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนด้วยระบบการทำความเย็นแบบจุ่ม จะมีการเติมสาร Novec 7100 ให้มีความสูงเท่ากับ 12 เซนติเมตรซึ่งเป็นระบบการทำความเย็นแบบจุ่มบางส่วนเพื่อเพิ่มการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่และอุณหภูมิของของไหลภายในภาชนะ



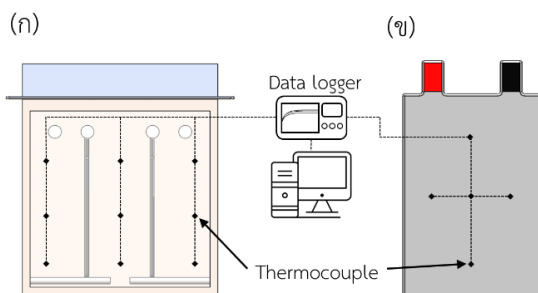
ภาพที่ 1 แผนภาพส่วนทดลอง



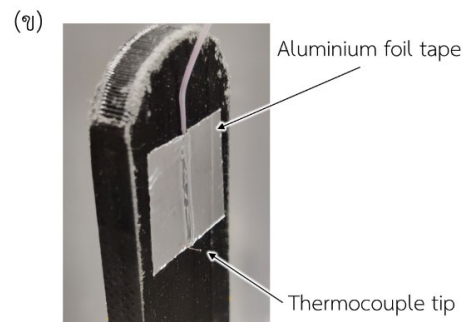
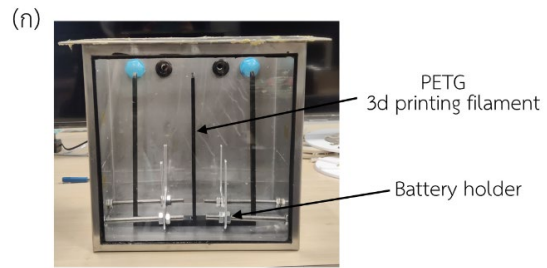
ภาพที่ 2 แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต

ในงานวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวด (T-Type thermocouple) จำนวน 9 ตัว ที่มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดเท่ากับ ± 0.3 เปอร์เซ็นต์ ถูกติดตั้งไว้ที่ 3 ระดับจากฐานเพื่อวัดอุณหภูมิของ

ของไหลทั่วทั้งบริเวณภายในส่วนทดลองดังแสดงในภาพที่ 3 (ก) นอกจากนี้อุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตจะถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบบางจำนวน 5 ตัวต่อ 1 พื้นที่ผิวเพื่อวัดอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดเวลาที่มีการอัดและคายประจุไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) สัญญาณของอุณหภูมิจะถูกบันทึกด้วยอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Graphtec midi LOCKER GL240) และถูกส่งไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดนั้นมีความอ่อนมาก ผู้วิจัยจึงสร้างแท่นที่ทำมาจากวัสดุ PETG ซึ่งมีค่าการนำความร้อนต่ำมากและนำมายึดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) โดยใช้เทปอะลูมิเนียมในการติดระหว่างสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดและแท่นยึด ยกเว้นที่ปลายของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดเพื่อให้เกิดการจับสัญญาณอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในภาพที่ 4 (ข)



ภาพที่ 3 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวด (ก) ในส่วนทดลองและ (ข) บนพื้นที่ผิวแบตเตอรี่

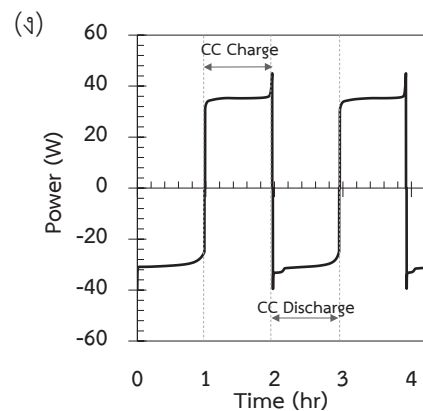
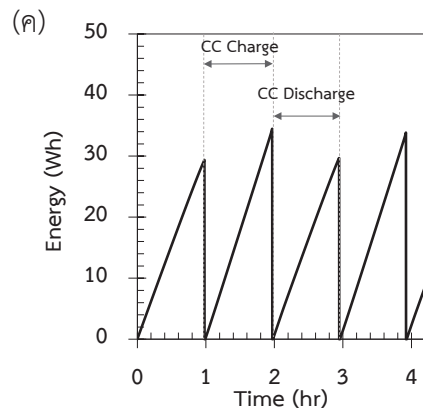
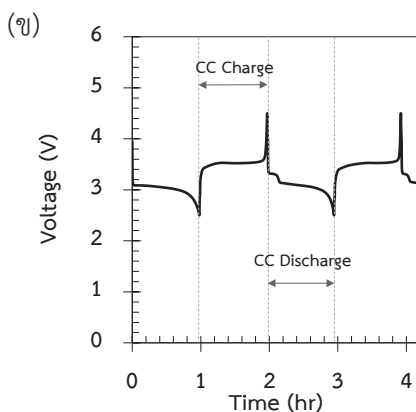
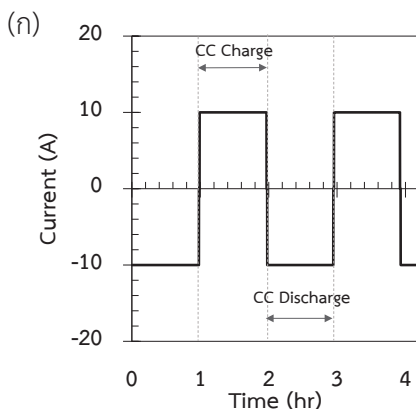


ภาพที่ 4 การติดตั้ง (ก) แท่นยึดและ (ข) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดในงานวิจัยนี้

5. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยในส่วนนี้ได้มีการแสดงค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า พลังงานและกำลังของแบตเตอรี่เทียบกับเวลาที่ได้จากเครื่อง Neware BTS4000-5V12A Lithium Battery Capacity Tester ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก)–(ง) ตามลำดับ โดยมีการกำหนดให้มีการอัดและคายประจุไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับ 10 แอมป์ตลอดการทดลอง ภาพที่ 5 (ก)–(ข) แสดงกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่เกิดขึ้นจริงในแบตเตอรี่เมื่อแบตเตอรี่ถูกอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปด้วยค่าคงที่เท่ากับ 10 แอมป์จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 4.5 โวลต์ จากนั้นระบบจะเริ่มกระบวนการคายประจุไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ด้วยค่าคงที่เท่ากับ 10 แอมป์ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้า

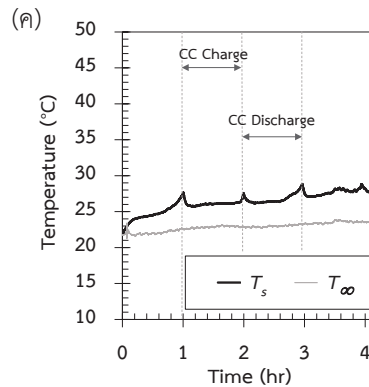
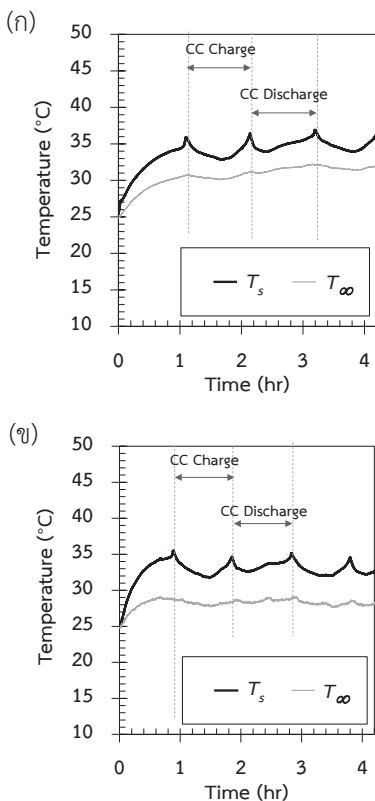
ที่มีค่าเท่ากับ 4.5 โวลต์มีค่าลดลงจนกระทั่งแรงดันไฟต่ำมีค่าต่ำกว่าจุดใช้งาน (Cut off voltage) เท่ากับ 2.5 โวลต์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าถึงค่านี้แล้วระบบจะเริ่มกระบวนการอัดประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่เป็นวัฏจักรต่อไป เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากภาพที่ 5 (ก)–(ข) มาคำนวณเพื่อหาค่าพลังงานและกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปจะได้ค่าสัญญาณเทียบกับเวลาดังแสดงในภาพที่ 5 (ค)–(ง) จากกราฟพบว่า การอัดหรือคายประจุจะมีการให้พลังงานและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 31.475 วัตต์ชั่วโมงและ 32.43 วัตต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 5 (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า
(ค) พลังงานและ (ง) กำลังของแบตเตอรี่ขณะอัด
และคายประจุไฟฟ้าเทียบกับเวลา

อุณหภูมิที่ถูกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการอัดและคายประจุไฟฟ้าจะถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบลวดจำนวน 5 ตำแหน่งต่อผิวของแบตเตอรี่ 1 ด้าน ผลเหล่านี้ถูกนำเสนอเทียบกับเวลาเพื่อศึกษาพฤติกรรมความร้อนที่เกิดภายใต้ระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบการทำความเย็นแบบจุ่มดังแสดงในภาพที่ 6 (ก)–(ค) ผลจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวโดยเฉลี่ยภายใต้ระบบทำความเย็นทั้ง 3 แบบมีค่าสูงขึ้นในช่วงแรกและเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ชั่วโมง

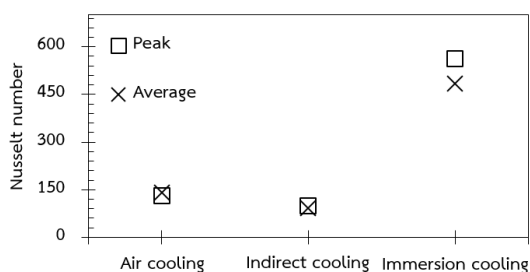
ที่ 1 เป็นต้นไป อุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวนี้จะมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงที่สุดในช่วงที่กระบวนการอัดและคายประจุเสร็จสิ้น โดยมีค่าเท่ากับ 36.29 34.81 และ 27.48 องศาเซลเซียสตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าขณะที่แบตเตอรี่มีอุณหภูมิผิวสูงที่สุดจะส่งผลให้อุณหภูมิของของไหลในส่วนท่อลงมีค่าเท่ากับ 31.26 28.31 และ 23.18 องศาเซลเซียสตามลำดับ หลังจากนั้นเมื่อระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบการทำความเย็นแบบจุ่มมีสภาวะคงที่ที่ถูกพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวของแบตเตอรี่โดยเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 34.61 32.94 และ 26.95 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิโดยรอบผิวของแบตเตอรี่ในส่วนท่อลงเฉลี่ยเท่ากับ 31.26 28.31 และ 23.18 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพที่ 6 อุณหภูมิผิวเทียบกับเวลาของ (ก) ระบบทำความเย็นด้วยอากาศ (ข) ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมและ (ค) ระบบทำความเย็นแบบจุ่ม

ผลอุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่และอุณหภูมิบรรยากาศโดยเฉลี่ยจากการทดลองในภาพที่ 6 (ก)–(ค) จะถูกเปลี่ยนเป็นเลขนัยสเกลต์ด้วยสมการที่ (3) ดังแสดงในภาพที่ 7 เลขนัยสเกลต์เฉลี่ยจะถูกคำนวณมาจากอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของแบตเตอรี่และอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลภายในส่วนท่อลง ในขณะที่เลขนัยสเกลต์สูงสุด (Peak) จะถูกคำนวณมาจากค่าอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิของของไหลภายในส่วนท่อลงในช่วงที่สิ้นสุดกระบวนการอัดหรือคายประจุไฟฟ้าซึ่งจะให้ค่าอุณหภูมิผิวที่สูงที่สุด ผลการทดลองพบว่าระบบทำความเย็นด้วยอากาศจะมีเลขนัยสเกลต์เฉลี่ยเท่ากับ 141.01 ในทางกลับกัน เลขนัยสเกลต์เฉลี่ยภายใต้ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมถูกพบว่ามีค่าลดลงเหลือเพียง 91.88 ซึ่งมีค่าการระบายความร้อนน้อยกว่าระบบทำความเย็นด้วยอากาศ เนื่องจากในระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมนี้มีค่าการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวของแบตเตอรี่

และอากาศภายในส่วนทดลอง ($T_s - T_\infty$) มีค่ามากที่สุดดังที่แสดงในภาพที่ 6 (ข) ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณเลขนัสเซลท์ซึ่งแปรผกผันกับค่านี้นี้ จึงทำให้ได้ค่าเลขนัสเซลท์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นรูปแบบอื่น ในขณะที่การลดลงของอุณหภูมิผิวเนื่องจากผลกระทบของสาร Novec 7100 ในระบบทำความเย็นแบบจุ่มส่งผลให้เลขนัสเซลท์เฉลี่ยของแบตเตอรี่เพิ่มสูงขึ้นถึง 483.17 หรือคิดเป็น 3.45 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับเลขนัสเซลท์เฉลี่ยที่ได้จากระบบทำความเย็นด้วยอากาศ นอกจากนี้เลขนัสเซลท์ในจุดที่ความร้อนเกิดขึ้นสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกับเลขนัสเซลท์เฉลี่ยยกเว้นระบบทำความเย็นแบบจุ่มที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 562.9 เป็นผลอันเนื่องมาจากความร้อนแผ่กระจายไปเป็นไอของสาร Novec 7100 ที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ที่เพิ่มขึ้น

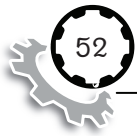


ภาพที่ 7 เลขนัสเซลท์เฉลี่ยและเลขนัสเซลท์สูงสุดบนพื้นผิวของแบตเตอรี่ภายใต้ระบบการทำความเย็นทั้ง 3 รูปแบบ

6. สรุปผลการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตจำนวน 2 แผ่นที่มี

ขนาดกว้าง 12.8 เซนติเมตรและสูง 18.3 เซนติเมตรด้วยระบบทำความเย็นด้วยอากาศ ระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบทำความเย็นแบบจุ่ม แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟตที่มีแรงดันและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3.2 โวลต์และ 10 แอมป์ตามลำดับ จะถูกควบคุมการอัดและคายประจุไฟฟ้าให้มีค่าคงที่เท่ากับ 10 แอมป์ชั่วโมงด้วยเครื่อง Neware BTS4000-5V12A Lithium Battery Capacity Tester และถูกวางไว้ในส่วนทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดกว้าง 0.2 เมตร × ยาว 0.3 เมตร × สูง 0.3 เมตร ในระบบทำความเย็นแบบทางอ้อมและระบบทำความเย็นแบบจุ่มด้วยสาร Novec 7100 ที่ถูกกำหนดให้มีความสูงเท่ากับ 12 เซนติเมตร จะมีการควบคุมอุณหภูมิผนังด้านบนของส่วนทดลองให้มีค่าคงที่เท่ากับ 22 ± 0.3 องศาเซลเซียส การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบจะถูกกำหนดให้เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จากผลการวิเคราะห์พบว่าระบบทำความเย็นแบบจุ่มส่งผลให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิลดลงสูงที่สุด นอกจากนี้ยังทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากผิวของแบตเตอรี่สู่สาร Novec 7100 และอากาศภายในภาชนะมีค่าสูงขึ้น โดยเลขนัสเซลท์จะเพิ่มขึ้นสูงขึ้นเท่ากับ 3.45 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการทำความเย็นด้วยอากาศ อีกทั้งยังสามารถลดอุณหภูมิผิวโดยเฉลี่ยจาก 34.61 เหลือเพียง 26.95 องศาเซลเซียสได้อีกด้วย ในขณะที่ระบบการทำความเย็นแบบทางอ้อมจะมีค่าเลขนัสเซลท์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นรูปแบบอื่นในงานวิจัยนี้ โดยมีค่าเลขนัสเซลท์เฉลี่ยเพียง 92.42



7. กิตติกรรมประกาศ



ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง



[1] Roe C, Feng X, White G, Li R, Wang H, Rui X, Li C, Zhang F, Null V, Parkes M, Patel Y, Wang Y, Wang H, Ouyang M, Offer G, Wu B (2022). Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review. *Journal of Power Sources*, 525: 231094.

[2] Qiao Q, Zhao F, Liu Z, He X, Hao H (2019). Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy*, 177: 222–333.

[3] Wang Q, Jiang B, Li B, Yan Y (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64: 106–128.

[4] Hakeem Akinlabi A A, Solyali D (2020). Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 125: 109815.

[5] Fan Y, Bao Y, Ling C, Chu Y, Tan X, Yang S (2019). Experimental study on the

thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 155: 96–109.

[6] Al-Zareer M, Dincer I, Rosen M A (2018). A review of novel thermal management systems for batteries. *International Journal of Energy Research*, 42 : 3182–3205.

[7] 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.

[8] Chen S, Peng X, Bao N, Garg A (2019). A comprehensive analysis and optimization process for an integrated liquid cooling plate for a prismatic lithium-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 156: 324–339.

[9] Tranter T G, Timms R, Shearing P R, Brett DJL (2020). Communication-prediction of thermal issues for larger format 4680 cylindrical cells and their mitigation with enhanced current collection. *Journal of The Electrochemical Society*, 167: 160544.

[10] Pambudi N A, Sarifudin A, Firdaus R A, Ulfa D K, Gandidi I M, Romadhon R (2022). The immersion cooling technology: Current and future development in energy saving. *Alexandria Engineering Journal*, 61: 9509–9527.

