



การปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยอากาศโดยอาศัยการจัดเรียงเซลล์ของชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

อิศเรศ ฐชกัลยา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

พัชรินทร์ แซ่จัน*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 8315 อีเมล: patcharin.s@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.007
รับเมื่อ 24 พฤษภาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 22 มิถุนายน 2564 ตอรับเมื่อ 1 กรกฎาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 7 กันยายน 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ด้วยอากาศ เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำ โครงสร้างการจัดเรียงที่ไม่ซับซ้อน และความเสถียรภาพของระบบที่สูง โดยทำการศึกษารูปร่างของชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรุ่น 1860B จำนวน 40 เซลล์ ที่มีโครงสร้างการจัดเรียงเซลล์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ แนวเดียวกัน แนวเอียง และแนวสลับ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการระบายความร้อนของแต่ละรูปแบบ นอกจากนี้ อิทธิพลของความเร็วอากาศ และอัตราการคายประจุก็ถูกใช้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วย เพื่อควบคุมให้เซลล์แบตเตอรี่ทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าไม่เกิน 40 °C โดยแบบจำลองความร้อนที่เกิดขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่ถูกจำลองขึ้นโดยอาศัยข้อมูลการทดสอบเซลล์แบตเตอรี่ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ จากผลการจำลองพบว่า เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระบบระบายความร้อนมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น โดยชุดแบตเตอรี่ที่ทำงานอย่างต่อเนื่องภายใต้อัตราการคายประจุ 0.5C อาจไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับ และในกรณีที่ชุดแบตเตอรี่ทำงานด้วยอัตราการคายประจุ 1C การระบายความร้อนจำเป็นต้องมีความเร็วของอากาศอย่างน้อย 1 m/s เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ให้อยู่ภายในช่วงที่กำหนด แต่ระบบจัดการความร้อนด้วยอากาศไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ได้ในกรณีที่มีการคายประจุอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การจัดเรียงเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพการระบายความร้อนคือการจัดเรียงแบบแนวเดียวกัน และช่องว่างที่เหมาะสมระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกันคือประมาณ 1.5 มม.

คำสำคัญ: การระบายความร้อนด้วยอากาศ การจัดเรียงเซลล์ ประสิทธิภาพการระบายความร้อน แบตเตอรี่ทรงกระบอก การจัดการความร้อน

การอ้างอิงบทความ: อิศเรศ ฐชกัลยา และ พัชรินทร์ แซ่จัน, “การปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายความร้อนของระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยอากาศโดยอาศัยการจัดเรียงเซลล์ของชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2565, doi: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.007.



Cell Arrangement of Lithium-ion Battery Pack for Improvement in Cooling Performance of Air-Cooled Battery Thermal Management System

Isares Dhuchakallaya

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

Patcharin Saechan*

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 8315, E-mail: patcharin.s@eng.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.007

Received 24 May 2021; Revised 22 June 2021; Accepted 1 July 2021; Published online: 7 September 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Air-cooled thermal management system has been numerically studied due to low manufacturing cost, simple layout structure and high reliability of the system. A set of Lithium-ion battery pack 18650B consisting of 40 cells was investigated under different cell arrangement structures, i.e., inline, offset, and staggered configurations in order to evaluate their cooling performances. Additionally, the effects of inlet velocity and discharge rate were taken into consideration to guarantee the temperature of batteries in operation within an optimal range, i.e., not over 40 °C. The heat simulation model of battery cells was developed based on the data acquired from the test under various ambient temperatures. The simulation results revealed that the increased air velocity resulted in better cooling performance of the system. The continuously operating battery pack under the discharge rate of 0.5C may not rely on the forced air-cooling system. When the battery pack discharging of 1C-rate, it required at least the air velocity of 1 m/s for cooling the battery within the optimal working temperature range. However, the forced-air cooling strategy was unable to control the temperature of the battery cell in case of fast discharging rate. Furthermore, the best cell arrangement in terms of cooling performance is the inline configuration and the appropriate gap between adjacent cells is about 1.5 mm.

Keywords: Air-cooled, Cell Arrangement, Cooling Performance, Cylindrical Battery, Thermal Management

Please cite this article in press as: I. Dhuchakallaya and Patcharin Saechan, "Cell arrangement of lithium-ion battery pack for improvement in cooling performance of air-cooled battery thermal management system," *The Journal of KMUTNB*, 2022 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.007.

1. บทนำ

ในทศวรรษที่ผ่านมา ถือได้ว่าเป็นช่วงแห่งการเปลี่ยนผ่านของอุตสาหกรรมยานยนต์สมัยใหม่ ซึ่งมีการพัฒนาและเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว รถยนต์ไฟฟ้า เช่น EV, HEV, PHEV, FCEV ได้รับความสนใจและใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ทดแทนรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เนื่องจากปัจจัยทางด้านราคา และปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีเหลืออย่างจำกัด รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ดังนั้นงานวิจัยในด้านเพิ่มสมรรถนะของระบบและแก้ไขข้อจำกัดของชิ้นส่วนรถยนต์ไฟฟ้าจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดยชุดแบตเตอรี่เป็นหัวใจสำคัญของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งพลังงานของรถยนต์เทียบเท่ากับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้ามากที่สุดเนื่องจากมีน้ำหนักเบาให้พลังงานต่อหน่วยความจุสูง และมีอายุการใช้งานนาน [1] นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่นิยมใช้ในรถยนต์ไฟฟ้ายังแบ่งย่อยออกเป็น ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO) ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (NMC) ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์อะลูมิเนียมออกไซด์ (NCA) ลิเทียมไททาเนตออกไซด์ (LTO) เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทก็มีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป [2] อย่างไรก็ตาม เมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีการอัดหรือคายประจุอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดความร้อนสูงในแบตเตอรี่ ซึ่งอุณหภูมิที่สูงนี้จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลงและประสิทธิภาพลดลง

ด้วยเหตุนี้ ชุดแบตเตอรี่จึงต้องมีระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมอุณหภูมิแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีค่าระหว่าง 0–40 °C [3], [4] ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C ประสิทธิภาพจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ช้าลงภายในแบตเตอรี่ ในทำนองตรงกันข้าม ถ้าแบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงกว่า 40 °C จะยิ่งเกิดปฏิกิริยาเคมีที่รุนแรงและรวดเร็ว ส่งผลให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว และถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 60 °C อาจนำไปสู่การลุกไหม้และระเบิดได้ ซึ่งเรียกว่า Thermal Runaway นอกจากนี้ Pesaran [5] ยังได้แนะนำว่า การกระจายตัว

(หรือความไม่สม่ำเสมอ) ของอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ควรมีความแตกต่างไม่เกิน 5 °C เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น ดังนั้นผลกระทบของความร้อนที่มีต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่เพื่อควบคุมอุณหภูมิการทำงานของแบตเตอรี่ให้เหมาะสม

ระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่สามารถเลือกใช้อากาศ ของเหลว วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) ฮีตปั๊ม เป็นต้น ในการระบายความร้อนได้ [6], [7] ในระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ เช่น ในรถยนต์ Toyota Prius, Toyota Highlander อากาศอาจถูกนำมาจากอากาศแวดล้อมภายนอกห้องโดยสาร หรือมาจากอากาศเย็นภายในห้องโดยสารก็ได้ สำหรับการระบายความร้อนด้วยของเหลว เช่น ในรถยนต์ Volvo C30, Mercedes S400 Blue Hybrid, Tesla Roadster ซึ่งของเหลวที่ใช้งานแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ ของเหลวที่ไม่นำไฟฟ้า ซึ่งสามารถสัมผัสกับแบตเตอรี่โดยตรง เช่น น้ำมันแร่ โดยเซลล์แบตเตอรี่จุ่มอยู่ในของเหลว และอีกประเภทหนึ่งคือ ของเหลวที่นำไฟฟ้า เช่น เอทิลีนไกลคอล น้ำ ซึ่งสัมผัสกับแบตเตอรี่ทางอ้อม เช่น ผ่านผนังท่อของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับวิธีทางเลือกของการระบายความร้อนของชุดแบตเตอรี่ เช่น วัสดุเปลี่ยนเฟส (PCM) ฮีตปั๊ม เทอร์โมอิเล็กทริก ยังไม่ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากความซับซ้อนและความเสถียรภาพของอุปกรณ์ โดยวัสดุเปลี่ยนเฟส คือวัสดุที่เก็บสะสมพลังงานความร้อนที่เกิดจากแบตเตอรี่ในรูปของความร้อนแฝง [8] แล้ววัสดุเปลี่ยนเฟสจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวเพื่อระบายความร้อนแฝงออกไปยังอากาศหรือของเหลวที่อยู่ล้อมรอบ ด้วยเหตุนี้ วัสดุเปลี่ยนเฟสจึงต้องทำงานร่วมกับระบบระบายความร้อนอื่นๆ เช่น ด้วยอากาศ [9], [10] หรือด้วยของเหลว [11], [12] สำหรับการระบายความร้อนด้วยฮีตปั๊มหรือเทอร์โมอิเล็กทริก มีความซับซ้อนของอุปกรณ์มากกว่ากรณีของวัสดุเปลี่ยนเฟส เนื่องจากพื้นผิวของฮีตปั๊มหรือเทอร์โมอิเล็กทริก ไม่สามารถสัมผัสกับเซลล์แบตเตอรี่ได้มากพอ จึงต้องใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสเป็นตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อนจากเซลล์แบตเตอรี่

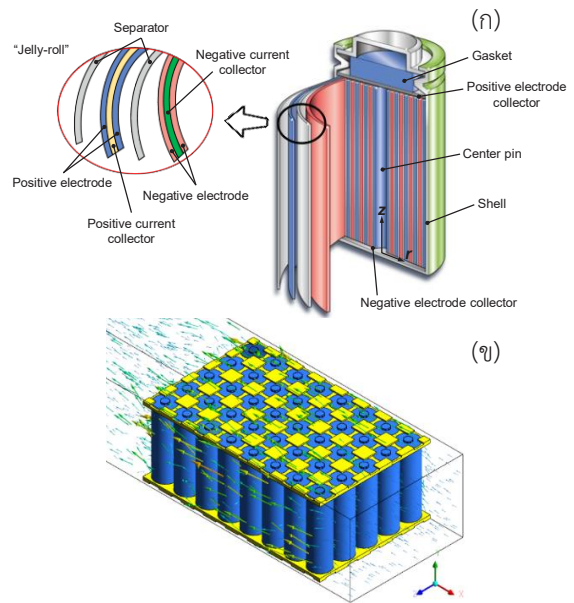
มายังฮีตไฟป์หรือเทอร์โมอิเล็กทริก หลังจากนั้นฮีตไฟป์หรือเทอร์โมอิเล็กทริกจะถูกระบายความร้อนสู่แวดล้อมด้วยอากาศหรือของเหลวต่อไป [13]–[15] นอกจากนี้เทอร์โมอิเล็กทริกยังต้องการพลังงานไฟฟ้าในการสร้างผลต่างของอุณหภูมิในการระบายความร้อนด้วย

จากเทคโนโลยีการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้น ถึงแม้ว่าระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ด้วยอากาศจะเป็นวิธีการที่ดั้งเดิม และมีอัตราการระบายความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่เป็นของเหลว แต่ก็มิตันทุนที่ต่ำ โครงสร้างไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบากว่า และมีความเสถียรภาพของระบบสูง ระบบนี้จึงถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในรถยนต์ไฟฟ้า เช่น Nissan Leaf, Toyota Prius, Toyota Highlander, Mitsubishi i-MiEV ด้วยเหตุนี้นักวิจัยหลายท่าน [16]–[18] จึงพยายามลดข้อด้อยของระบบนี้โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนให้สูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่หลากหลายของอัตราการคายประจุ และความเร็วของอากาศ ซึ่งงานวิจัยนี้ก็เป็นส่วนหนึ่ง โดยทำการศึกษารูปแบบการเรียงของเซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสม เช่น แนวเดียวกัน (Inline) แนวเยื้อง (Offset) หรือแนวสลับ (Staggered) และรวมถึงระยะห่างระหว่างเซลล์ที่เหมาะสม ถึงแม้ว่าจะมีนักวิจัยทำการศึกษาในลักษณะคล้ายกัน แต่ชนิดของเซลล์แบตเตอรี่ จำนวนเซลล์ และลักษณะการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน ก็ให้ผลลัพธ์ของสภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ระบบแบตเตอรี่

เซลล์แบตเตอรี่ Panasonic รุ่น NCR18650B ขนาด 3400-mAh ถูกจำลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาด 18 มม. สูง 65.3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 และรายละเอียดทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติเชิงความร้อนในพิกัดเชิงทรงกระบอกของเซลล์แบตเตอรี่ได้ดังนี้ $k_r = 0.951$, $k_z = k_\theta = 37.106$ W/m-K, $\rho = 3,602.12$ kg/m³ และ $c_p = 776.59$ J/kg-K



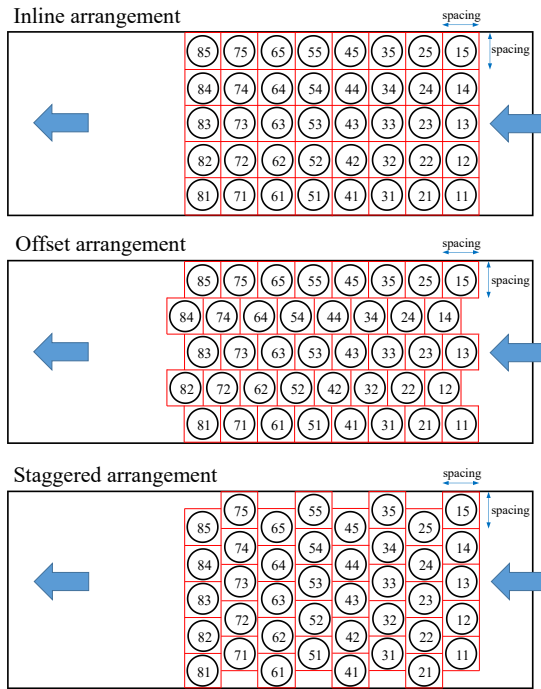
รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่ และ (ข) ชุดแบตเตอรี่

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่

โครงสร้าง	k (W/m-K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg-K)	ความหนา (μm)
positive electrode	0.72 ^[20]	5100 ^[20]	779 ^[21]	^a 125 ^[19]
negative electrode	5.7 ^[22]	2210 ^[22]	709 ^[22]	^a 110 ^[19]
positive current collector	237 ^[22]	2702 ^[22]	903 ^[22]	15 ^[23]
negative current collector	401 ^[22]	8933 ^[22]	385 ^[22]	15 ^[23]
separator	0.3344 ^[24]	1008.98 ^[24]	1978 ^[24]	20 ^[23]
Cell holder spacer	0.18 ^[25]	1050 ^[25]	1300 ^[25]	-

^a วัดความหนาที่เฉลี่ยรวมทั้งสองฝั่ง

โดยเริ่มต้นเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 1 เซลล์ ถูกจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเทียบกับการทดลองของ Xie และคณะ [19] ต่อจากนั้นทำการจำลองชุดแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 40 เซลล์ โดยมีลักษณะการเรียงตัวที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2 ภายใต้อัตราการคายประจุ และอัตราการระบายความร้อนต่างๆ เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม



รูปที่ 2 รูปแบบต่างๆ ของการจัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่ภายในชุดทดสอบที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยนี้

2.2 แบบจำลองความร้อนที่ผลิตขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่

ในขณะที่ทำการอัดหรือคายประจุ อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่ผลิตขึ้นทั้งแบบย้อนกลับได้และย้อนกลับไม่ได้ โดยความร้อนที่ผลิตขึ้นแบบย้อนกลับได้จะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปีในระหว่างเกิดการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์แบตเตอรี่ที่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า แล้วเหลือพลังงานบางส่วนอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งความร้อนที่ผลิตขึ้นแบบย้อนกลับได้อาจจะมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ขึ้นอยู่กับสถานะว่า เป็นการอัดประจุ หรือคายประจุ โดยความร้อนที่ผลิตขึ้นแบบย้อนกลับได้นี้สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{rev} = -I \left(T \frac{dU_{oc}}{dT} \right) \quad (1)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัด/คายประจุ T คือ

อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ และ dU_{oc}/dT คือสัมประสิทธิ์ความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับสถานะการอัดประจุ (SOC)

สำหรับความร้อนที่ผลิตขึ้นแบบย้อนกลับไม่ได้เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานภายในเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กโทรไลต์ และแผ่นรับกระแสไฟฟ้า โดยความร้อนที่ผลิตขึ้นเนื่องจากความต้านทานภายในนี้มีค่าเป็นบวกเท่านั้น และเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและอัตราการอัด/คายประจุ ซึ่งความร้อนที่ผลิตขึ้นแบบย้อนกลับไม่ได้นี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{irr} = I(U_{oc} - U) = I^2 R \quad (2)$$

เมื่อ U_{oc} คือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด U คือแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่ และ R คือความต้านทานภายในสมมูลของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานโอห์มมิกและความต้านทานการเกิดโพลาริเซชัน โดยความต้านทานดังกล่าวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ SOC ของเซลล์แบตเตอรี่

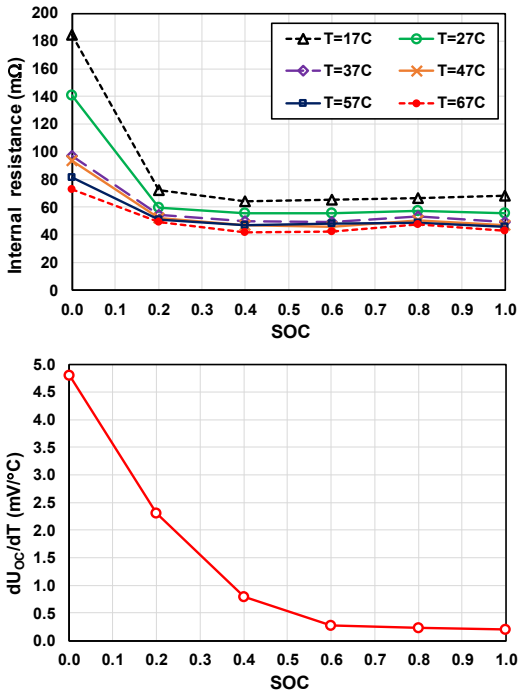
ดังนั้นความร้อนที่ผลิตขึ้นรวมภายในเซลล์แบตเตอรี่จึงสามารถเขียนรวมได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{irr} = I^2 R - IT \frac{dU_{ov}}{dT} \quad (3)$$

จากข้อมูลการทดลองของ Xie และคณะ [19] ในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในสมมูล dU_{oc}/dT และ SOC โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกใช้ในการคำนวณหาอัตราการผลิตความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและ SOC

2.3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลอง 3 มิติของแบตเตอรี่ที่ทรงกระบอกถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งอาศัยหลักการ Finite Volume และเลือกใช้แบบจำลองความร้อนไม่คงที่ เนื่องจากสภาวะการผลิตความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ SOC ที่แปรเปลี่ยนตามเวลา สำหรับการไหล



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานภายในสมมูล dU_{oc}/dT และ SOC [19]

ของอากาศและการถ่ายเทความร้อนระหว่างชุดแบตเตอรี่ และอากาศสามารถจำลองโดยอาศัยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการพลังงานดังนี้

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho_f \vec{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v}_f + \rho_f \mathbf{g} \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho_f c_{p,f} T_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} T_f \vec{v}_f) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) \quad (6)$$

สำหรับเซลล์แบตเตอรี่และแท่นรองแบตเตอรี่ใช้สมการ การนำความร้อนต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \rho_b c_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} &= \frac{k_{b,r}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_b}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{k_{b,\theta}}{r^2} \frac{\partial^2 T_b}{\partial \theta^2} + k_{b,z} \frac{\partial^2 T_b}{\partial z^2} + \dot{Q}_{gen} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\rho_{sp} c_{p,sp} \frac{\partial T_{sp}}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{sp} \nabla T_{sp}) \quad (8)$$

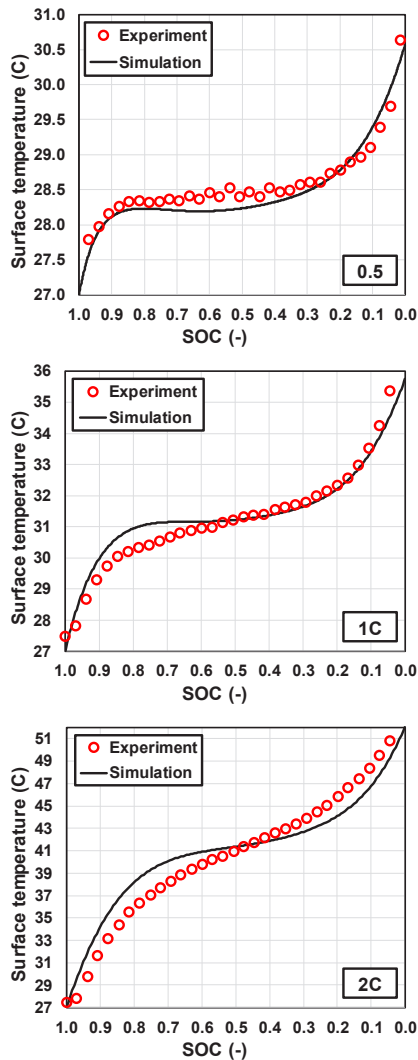
เมื่อ ρ , c_p , k และ T คือความหนาแน่น ค่าความจุ ความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และอุณหภูมิ ตามลำดับ โดยตัวห้อย f , b และ sp หมายถึงของไหล แบตเตอรี่ และแท่นรองแบตเตอรี่ ส่วนตัวแปร \vec{v} , p และ μ คือเวกเตอร์ ความเร็ว ความดันสถิต และความหนืดไดนามิกส์

ในสนามการไหลของอากาศเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$ เนื่องจากเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือสำหรับการหาผลเฉลยของชุดสมการควบคุมข้างต้น อาศัยวิธีการ SIMPLEC และใช้วิธีประมาณค่าอันดับสอง (Second Order Upwind) สำหรับตัวแปรความดัน โมเมนตัม พลังงาน และความปั่นป่วน สำหรับอัตราการผลิต ความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ และเวลา ถูกจำลองด้วย UDF (User Define Function) โดยทำการคำนวณทุก 10 วินาที และคำนวณซ้ำสูงสุด 500 ครั้งในแต่ละช่วง โดยกำหนดเงื่อนไขขอบทางเข้าเป็น Velocity-inlet ทางออกเป็น Pressure-outlet ความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างเซลล์แบตเตอรี่และอากาศเท่านั้น และไม่คิดผลกระทบของการแผ่รังสี สำหรับผนังทั้งหมด กำหนดเป็น Non-slip และใช้ Standard Wall Function

3. ผลการทดลอง

แบบจำลองของแบตเตอรี่เซลล์เดี่ยวถูกทดสอบความถูกต้องเพื่อหาความเหมาะสมของจำนวนกริด ตัวแปร และเงื่อนไขขอบต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง โดยอาศัยข้อมูลการทดลองของ Xie และคณะ [19] ในการเปรียบเทียบซึ่งแบตเตอรี่ถูกปล่อยประจุอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการคายประจุคงที่ ภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ แล้วทำการวัดอุณหภูมิผิวของเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 6 จุด (2 จุดบริเวณกึ่งกลาง 2 จุด บริเวณใกล้ขั้วลบ และอีก 2 จุด บริเวณใกล้ขั้วบวก) โดยผลเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลการวัดและผลการทำนายแสดงในรูปที่ 4

อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอในช่วงแรกของการคาย



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างผลการทำนายและข้อมูลการวัดของ Xie และคณะ [19] ภายใต้อัตราการคายประจุต่างๆ

ประจุ เนื่องจากอัตราการผลิตความร้อนที่ค่อนข้างคงที่และความร้อนส่วนใหญ่ยังสะสมอยู่ภายในเซลล์แบตเตอรี่ ต่อจากนั้น อุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้าลงในช่วงกลาง เนื่องจากการพาความร้อนเข้ามามีอิทธิพลมากขึ้น เมื่อ SOC มีค่าน้อยๆ เทอม dU_{OC}/dT และความต้านทานภายในของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นผลให้อัตราการผลิตความร้อนเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่าง

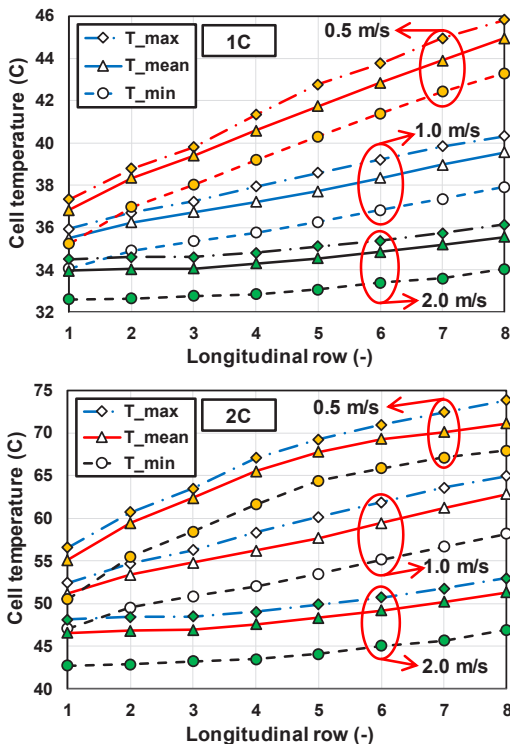
รวดเร็วในช่วงสุดท้ายของการคายประจุ

นอกจากนี้ อุณหภูมิของแบตเตอรี่ยังเพิ่มขึ้นตามอัตราการคายประจุ เพราะอัตราการผลิตความร้อนขึ้นอยู่ กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายของแบตเตอรี่ จากผลการเปรียบเทียบพบว่า ข้อมูลการทดลองและผลการทำนายมีค่าสอดคล้องกันค่อนข้างดีที่อัตราการคายประจุ 0.5C และความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและการทำนายของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการคายประจุมีค่าสูงขึ้น โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่อัตราการคายประจุ 0.5C, 1C และ 2C เท่ากับ 0.15 °C, 0.31 °C และ 1.39 °C ตามลำดับ ถึงแม้ว่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2.36 °C ซึ่งเกิดขึ้นที่อัตราการคายประจุ 2C นั้นจะมีค่าสูงก็ตาม แต่ก็มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 1.39 °C และความคลาดเคลื่อนในช่วงสุดท้ายของการคายประจุมีค่าเพียง 1.43 °C ซึ่งถือว่ายอมรับได้

จากการเปรียบเทียบที่กล่าวมานี้ สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองความร้อนที่ผลิตขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่มีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ และสามารถนำไปจำลองระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ได้ต่อไป

ที่อัตราการคายประจุ 0.5C ของการทดสอบข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่สามารถดำเนินการได้โดยอาศัยระบบระบายความร้อนตามธรรมชาติ เนื่องจากแบตเตอรี่มีอัตราการผลิตความร้อนที่น้อย ดังนั้นชุดแบตเตอรี่ที่มีอัตราการคายประจุที่สูงขึ้นจึงต้องดำเนินการโดยอาศัยการระบายความร้อนแบบบังคับ

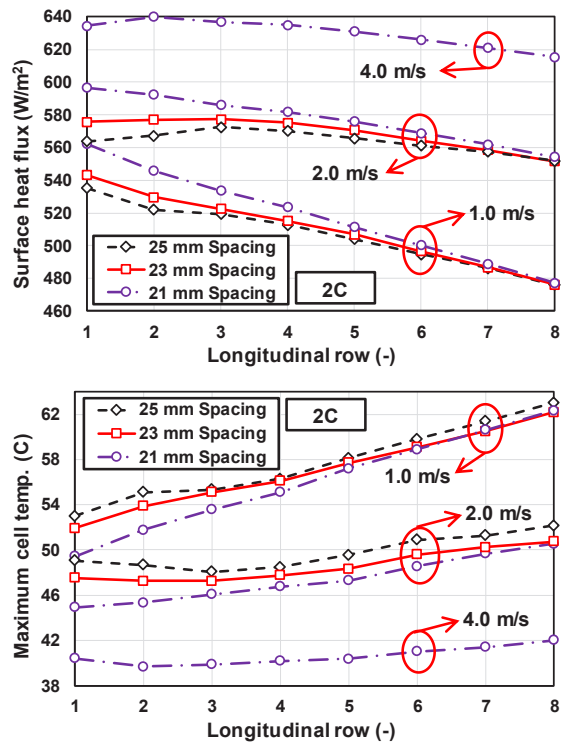
ในรูปที่ 5 เมื่อสิ้นสุดการคายประจุ อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ในแต่ละแถวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกือบเป็นเชิงเส้นตามทิศการไหลของอากาศ และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น มีผลให้อุณหภูมิลดลง สำหรับอัตราการคายประจุ 1C อุณหภูมิสูงสุดของชุดแบตเตอรี่ภายใต้ความเร็ว 1 m/s มีค่าเท่ากับ 40.3 °C ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ 40 °C เล็กน้อย และความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดมีค่า 1.8 °C ซึ่งต่ำกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 5 °C แต่ในกรณีของอัตราการคายประจุ 2C ภายใต้ความเร็ว 2 m/s พบว่า อุณหภูมิสูงสุดมีค่ามากถึง 53.0 °C และความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดมีค่า



รูปที่ 5 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชุดแบตเตอรี่ภายใต้ความเร็วอากาศต่างๆ (ที่ระยะห่างระหว่างเซลล์ 23 มม.)

5.1 °C ถึงแม้ว่าจะใช้ความเร็วสูงสุดในการระบายความร้อนแล้วก็ตาม แต่ค่าเหล่านี้ก็ยังมีเกินเกณฑ์อุณหภูมิการทำงานที่แนะนำของแบตเตอรี่ ดังนั้นภายใต้สภาพการใช้งานปกติ (ด้วยอัตราการคายประจุ 1C) ระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ด้วยอากาศจึงเพียงพอ แต่ในกรณีโหมดคายประจุอย่างรวดเร็ว (Fast Discharge) ระบบจัดการความร้อนข้างต้นอาจจะไม่เพียงพอ จึงต้องปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางเซลล์แบตเตอรี่ต่อไป เพื่อลดอุณหภูมิสูงสุดและความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่

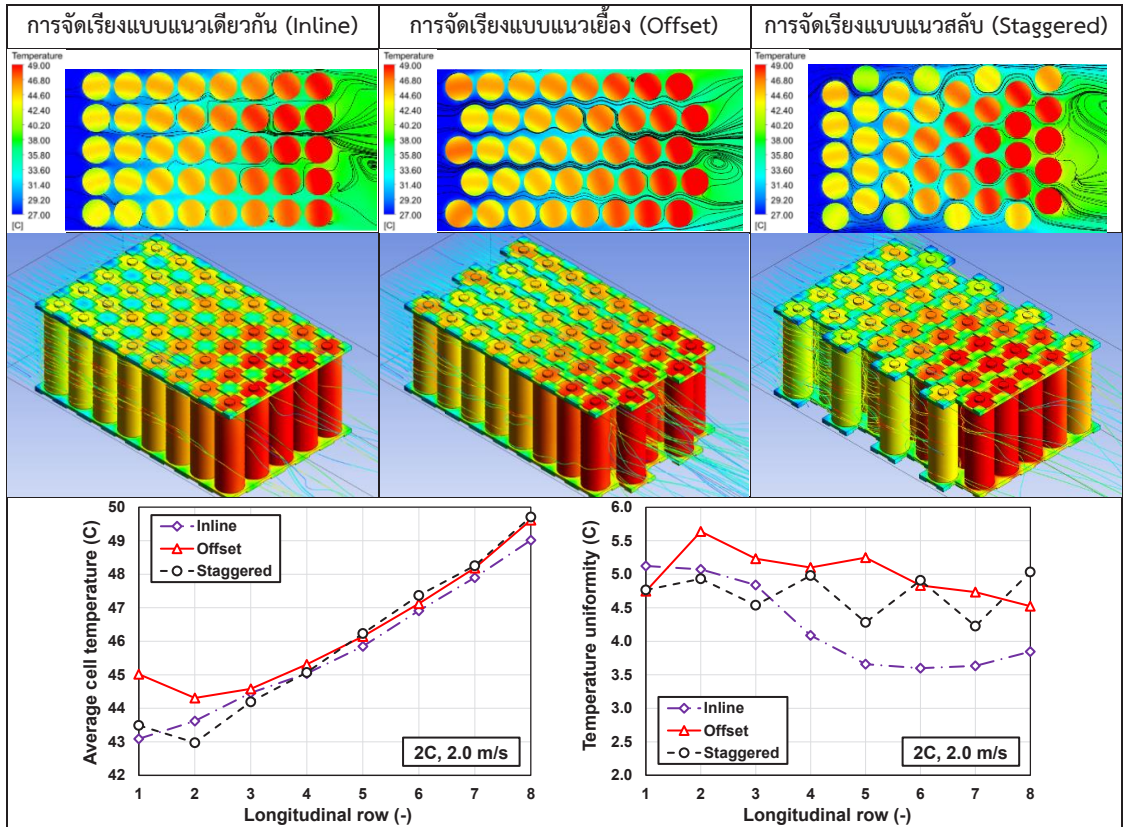
การปรับระยะห่างระหว่างเซลล์ที่อยู่ติดกันก็มีผลต่อความหนาแน่นจำเพาะทางพลังงาน และความสามารถในการระบายความร้อนของชุดแบตเตอรี่ด้วย ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วระยะห่างที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนเนื่องจากปริมาณอากาศที่ไหลผ่านมากขึ้น แต่จะ



รูปที่ 6 ผลของระยะห่างระหว่างเซลล์ที่มีต่อฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดของชุดแบตเตอรี่

ลดโอกาสในการใช้พื้นที่ของชุดแบตเตอรี่ จากรูปที่ 6 เมื่อระยะห่างระหว่างเซลล์เพิ่มขึ้น ฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวก็ลดลง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความเร็วทางเข้าคงที่ แต่มีระยะห่างระหว่างเซลล์ที่แคบลง จึงทำให้อากาศไหลผ่านพื้นผิวเซลล์ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลดังกล่าวมีแนวโน้มที่เบาบางลง เมื่ออากาศไหลผ่านแถวแบตเตอรี่ออกไปไกลขึ้น ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า มีอิทธิพลของความปั่นป่วนและการผสมที่เพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาพบว่า ระยะห่างระหว่างเซลล์ที่แคบลงมีผลให้อุณหภูมิสูงสุดของชุดแบตเตอรี่ลดลง และมีโอกาสการใช้พื้นที่เพิ่มสูงขึ้น โดยระยะห่างระหว่างเซลล์ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 21 มม. (หรือช่องว่างระหว่างเซลล์ที่ติดกันเท่ากับ 1.5 มม.) แต่อย่างไรก็ควรคำนึงถึงความต้านทานการไหลที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะห่างระหว่างเซลล์ลดลง



รูปที่ 7 ผลของการจัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่รูปแบบต่างๆ ภายใต้การคลายประจุอย่างรวดเร็วที่ความเร็วอากาศ 2 m/s

หลังจากปรับระยะห่างระหว่างเซลล์ให้เหมาะสมและใช้ความเร็วอากาศสูงมากถึง 4 m/s แล้ว พบว่า อุณหภูมิสูงสุดและความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเซลล์แบตเตอรี่ลดลงเหลือ 42.0 °C และ 5.2 °C ตามลำดับ แต่ก็ยังมีค่าเกินช่วงการทำงานที่เหมาะสมของแบตเตอรี่อยู่เล็กน้อย โดยการค้นพบนี้สามารถบ่งบอกได้ว่า โครงสร้างอย่างง่ายของระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ด้วยอากาศอาจจะไม่เพียงพอที่จะจัดการกับการคายประจุที่รวดเร็วของแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงต้องออกแบบระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ใหม่

จากรูปที่ 7 แสดงผลของการจัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่ในรูปแบบต่างๆ โดยอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราเกือบคงที่ตามระยะการไหลของอากาศ และอุณหภูมิเฉลี่ยของเซลล์แบตเตอรี่ของทุกรูปแบบการจัดเรียงมีแนว

โน้มที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งมีค่าต่ำสุดอยู่ในแถวที่สอง ทั้งนี้เป็นเพราะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และมีค่าสูงสุดประมาณแถวที่สอง แล้วมีแนวโน้มที่ลดลงในแถวถัดๆ มา ซึ่งผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hwang และ Lui [26] และ Mon [27]

จากรูปแบบการจัดเรียงต่างๆ ของชุดแบตเตอรี่ในระหว่างการคายประจุอย่างรวดเร็ว พบว่า การจัดเรียงแบบแนวเดียวกัน (inline) ให้ทั้งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชุดแบตเตอรี่ต่ำที่สุด และความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงสุดท้ายของการคายประจุก็น่าจะมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 40 °C นั้นหมายความว่า ต้องใช้ความเร็วอากาศมากกว่า 2 m/s ซึ่งนำไปสู่การสิ้นเปลืองพลังงานอย่างมาก ดังนั้นแง่มุมของการใช้พลังงาน โอกาสในการใช้พื้นที่ จึงต้องนำมาพิจารณาเพื่อ

หาความเหมาะสมในการออกแบบระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ต่อไปในอนาคต

4. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขของระบบจัดการความร้อนของชุดแบตเตอรี่ทรงกระบอกด้วยอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบายความร้อนในระหว่างการคายประจุ โดยโครงสร้างที่เรียบง่ายของชุดแบตเตอรี่ถูกจัดเรียงในรูปแบบต่างๆ เช่น แนวเดียวกัน แบบแนวเอียง และแบบแนวสลับ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการระบายความร้อนและแบบจำลองความร้อนที่ผลิตขึ้นในเซลล์แบตเตอรี่ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยข้อมูลการทดลองของ Xie และคณะ [9] ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อัตราการผลิตความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่มีค่าเกือบคงที่ในช่วงแรกและช่วงกลางของกระบวนการคายประจุ หลังจากนั้นอัตราการผลิตความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสุดท้ายของกระบวนการคายประจุ ทั้งนี้เป็นเพราะสัมประสิทธิ์ความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี และความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ มีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากในช่วง SOC ต่ำๆ

2. ชุดแบตเตอรี่ที่คายประจุในอัตรา 0.5C สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ให้อยู่ภายในช่วงการทำงานที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ได้ โดยอาศัยการระบายความร้อนด้วยอากาศตามธรรมชาติ

3. ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของชุดแบตเตอรี่จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น แต่การระบายความร้อนด้วยอากาศแบบบังคับก็อาจจะไม่เพียงพอสำหรับจัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นจากการคายประจุอย่างรวดเร็ว เช่น ที่อัตรา 2C

4. ที่อัตราการคายประจุ 1C ความเร็วของอากาศ 1 m/s ก็เพียงพอสำหรับการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชุดแบตเตอรี่ โดยอุณหภูมิสูงสุดและความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิยังคงอยู่ภายในช่วงการทำงานที่เหมาะสม

5. ระยะห่างระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ที่แคบลงสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดได้ และช่องว่างระหว่างเซลล์ที่เหมาะสมใน

ที่นี้ มีค่าประมาณ 1.5 มม.

6. รูปแบบการจัดเรียงเซลล์แบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพในแง่ของการจัดการความร้อนคือ แบบแนวเดียวกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Kim, J. Oh, and H. Lee, "Review on battery thermal management system for electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 192–212, 2019.
- [2] I. Dincer, H. S. Hamut, and N. Javani, *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*. JohnWiley & Sons, 2017.
- [3] X. Li, F. He, and L. Ma, "Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation," *Journal of Power Sources*, vol. 238, pp. 395–402, 2013.
- [4] Á. G. Miranda and C. W. Hong, "Integrated modeling for the cyclic behavior of high power Li-ion batteries under extended operating conditions," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 681–689, 2013.
- [5] A. A. Pesaran, "Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions," in *Advanced Automotive Battery Conference*, pp. 10, 2001.
- [6] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, "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*, vol. 64, pp. 106–128, 2016.
- [7] J. Jaguemont and J. Van Mierlo, “A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles,” *Journal of Energy Storage*, vol. 31, pp. 101551, 2020.
- [8] C. Liu, D. Xu, J. Weng, S. Zhou, W. Li, Y. Wan, S. Jiang, D. Zhou, J. Wang, and Q. Huang, “Phase change materials application in battery thermal management system: A review,” *Materials (Basel, Switzerland)*, vol. 13, 2020, Art. no. 4622.
- [9] R. D. Jilte, R. Kumar, M. H. Ahmadi, and L. Chen, “Battery thermal management system employing phase change material with cell-to-cell air cooling,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 161, 2019, Art. no. 114199.
- [10] X. Wu, C. Mo, J. Xie, Y. Xu, X. Yang, and G. Zhang, “Experimental study of a novel strategy to construct the battery thermal management module by using tubular phase change material units,” *Journal of Energy Storage*, vol. 39, 2021, Art. no. 102585.
- [11] H. Zhang, X. Wu, Q. Wu, and S. Xu, “Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, 2019, Art. no. 113968.
- [12] D. Kong, R. Peng, P. Ping, J. Du, G. Chen, and J. Wen, “A novel battery thermal management system coupling with PCM and optimized controllable liquid cooling for different ambient temperatures,” *Energy Conversion and Management*, vol. 204, 2020, Art. no. 112280.
- [13] S. Abbas, Z. Ramadan, and C. W. Park, “Thermal performance analysis of compact-type simulative battery module with paraffin as phase-change material and flat plate heat pipe,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 173, 2021, Art. no. 121269.
- [14] Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Zhang, F. He, and Y. Li, “Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. 1092–1100, 2018.
- [15] L. Jiang, H. Zhang, J. Li, and P. Xia, “Thermal performance of a cylindrical battery module impregnated with PCM composite based on thermoelectric cooling,” *Energy*, vol. 188, 2019, Art. no. 116048.
- [16] H. Park, “A design of air flow configuration for cooling lithium ion battery in hybrid electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 239, pp. 30–36, 2013.
- [17] 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.
- [18] T. Wang, K. J. Tseng, J. Zhao, and Z. Wei, “Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies,” *Applied Energy*, vol. 134, pp. 229–238, 2014.
- [19] Y. Xie, W. Li, Y. Yang, and F. Feng, “A novel resistance-based thermal model for lithium-ion batteries,” *International Journal of Energy Research*, vol. 42, pp. 4481–4498, 2018.



- [20] C. Huber, "Phase change material in battery thermal management applications," Ph.D. dissertation, Technische Universität München, German, 2017.
- [21] A. Loges, S. Herberger, P. Seegert, and T. Wetzel, "A study on specific heat capacities of Li-ion cell components and their influence on thermal management," *Journal of Power Sources*, vol. 336, pp. 341–350, 2016.
- [22] H. S. Lee, *Thermoelectrics: Design and Materials*, 1st ed., John Wiley & Sons, 2016.
- [23] Z. Du, D. L. Wood, C. Daniel, S. Kalnaus, and J. Li, "Understanding limiting factors in thick electrode performance as applied to high energy density Li-ion batteries," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 47, pp. 405–415, 2017.
- [24] S. C. Chen, C. C. Wan, and Y. Y. Wang, "Thermal analysis of lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 140, pp. 111–124, 2005.
- [25] T. A. Osswald, E. Baur, S. Brinkmann, K. Oberbach, and E. Schmachtenberg, *International Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers*, 4th ed. Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [26] J.-J. Hwang and C.-C. Lui, "Measurement of endwall heat transfer and pressure drop in a pin-fin wedge duct," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 877–889, 2002.
- [27] M. S. Mon, "Numerical investigation of Air-side heat transfer and pressure drop in circular finned-tube heat exchangers," Ph.D. dissertation, TU-Bergakademie, Freiberg, Germany, 2003.