

# การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับการถ่ายโอนความร้อนจาก แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการ CFD Simulation and Analysis of Airflow for Heat Transfer from NMC Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using CFD Methods

รัฐพล โพธิ์ศรี ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน\*

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

Rattapon Phosri Thammarat Yabsungnoen \*

Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600

\*Corresponding author Email: rattaponp@siamtechno.ac.th

(Received: March 13, 2025; Revised: June 17, 2025 ; Accepted: June 30, 2025)

## บทคัดย่อ

รถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันมีความก้าวหน้าและถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันแพร่หลายซึ่งมีแนวโน้มจะเข้ามาแทนที่รถยนต์สันดาปภายใน หนึ่งในเทคโนโลยีที่สำคัญคือแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงระยะทางในการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าโดยปัจจุบันประเภทของแบตเตอรี่ที่สำคัญที่ใช้ในรถยนต์คือลิเทียมไอออน NMC เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานสูงแต่ก็มีข้อเสียคือประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ไวต่ออุณหภูมิจึงทำให้การออกแบบระบบระบายความร้อนมีความสำคัญต่อแบตเตอรี่เป็นอย่างมากโดยความร้อนนั้นเกิดจากการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ งานวิจัยของ Mohsen Akbarzadeh และคณะได้จำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการ CFD ซึ่งพบว่าการใช้อัตราการไหล 21 L/s ร่วมกับช่องเดินอากาศขนาด 5 mm นั้นเพียงพอต่อการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC ขนาด 3.7 V 43 Ah จำนวน 12 ก้อน ให้รักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับปกติ งานวิจัยนี้จึงได้นำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh มาประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ NMC ขนาด 180 Ah 3.7 V จำนวน 24 ก้อน ซึ่งจากการจำลอง CFD พบว่าแบตเตอรี่ยังมีอุณหภูมิที่สูงกว่าย่านการใช้งานปกติจึงมีการปรับปรุงอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็น 127 L/s ซึ่งสามารถรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในย่านการใช้งานปกติได้ แต่ยังคงมีความดันสูญเสียที่สูงจึงมีการปรับปรุงช่องการไหลของอากาศให้เป็น 7 mm ซึ่งทำให้ความดันสูญเสียลดลงแต่อุณหภูมิเกินย่านการใช้งานไป 10 °C จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

**คำสำคัญ:** CFD, ลิเทียมไอออน NMC, การระบายความร้อนด้วยอากาศ

## ABSTRACT

Electric vehicles have advanced significantly and are now widely used in daily life, with the potential to replace internal combustion engine vehicles. One of the key technologies in electric vehicles is the battery, which determines the driving range. Currently, one of the most important battery types used in electric vehicles is lithium-ion NMC due to its high energy density. However, a major drawback is that its efficiency is highly sensitive to temperature, making the design of an effective

cooling system crucial. Heat is primarily generated during the charging and discharging processes of the battery. A study by Mohsen Akbarzadeh and colleagues simulated airflow and heat transfer using CFD. Their findings suggested that an airflow rate of 21 l/s combined with 5 mm air channels was sufficient to cool a system of twelve 3.7 V 43 Ah NMC battery cells, maintaining the battery temperature within an optimal operating range. This research was then applied to a system of twenty-four 3.7V 180 Ah NMC battery cells. However, CFD simulations indicated that the battery temperature exceeded the normal operating range. To address this issue, the volumetric flow rate was increased to 127 l/s, which successfully maintained the battery temperature within the optimal range. However, this resulted in a high pressure drop. Consequently, the air channel size was increased to 7 mm, reducing the pressure drop but causing the battery temperature to exceed the optimal range by 10 °C, making the setup impractical for real-world applications.

**Keyword:** CFD, lithium-ion NMC, air-cooling system.

## 1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อรถยนต์ไฟฟ้า (EV) เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ทำให้สามารถเก็บพลังงานได้มากในขนาดที่กะทัดรัดและมีน้ำหนักเบากว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดหรือแบตเตอรี่ NiMH [1] นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมีประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุสูง ส่งผลให้สามารถรองรับการเร่งความเร็วของรถยนต์ได้ดีและมีระยะทางการขับขี่ต่อการชาร์จหนึ่งครั้งที่สูงขึ้น [2] อีกทั้งยังมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า [3] อย่างไรก็ตาม การจัดการความร้อนและระบบความปลอดภัยของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความไวต่ออุณหภูมิสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของรถ EV [4]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภท NMC (Nickel Manganese Cobalt) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากให้สมดุลที่ดีระหว่างความหนาแน่นของพลังงานและอายุการใช้งาน แบตเตอรี่ NMC สามารถเก็บพลังงานได้มากขึ้นในน้ำหนักที่เบากว่าแบตเตอรี่ลิเทียม

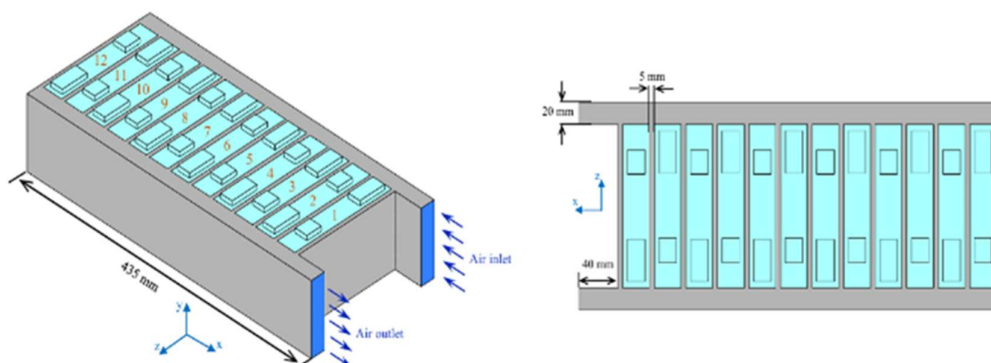
ไอออนประเภทอื่น เช่น LFP (Lithium Iron Phosphate) ทำให้เหมาะสำหรับรถ EV ที่ต้องการระยะทางขับขี่ที่ไกลขึ้นต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง [5] แม้ว่าแบตเตอรี่ NMC (Nickel Manganese Cobalt) จะมีความหนาแน่นของพลังงานสูงและรองรับการชาร์จเร็วได้ดี แต่หนึ่งในข้อจำกัดสำคัญคือการเกิดความร้อนระหว่างการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ NMC สามารถเกิดความร้อนจากกระบวนการชาร์จและการคายประจุ โดยเฉพาะในกรณีที่มีกระแสไฟฟ้าสูง เช่น การเร่งความเร็วหรือการใช้ระบบชาร์จเร็ว (Fast Charging) [6] นอกจากนี้ ความร้อนยังเกิดจากความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นเมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ [7] เมื่ออุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนด อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุขั้วไฟฟ้า (Electrode Degradation) และอาจนำไปสู่ปรากฏการณ์ Thermal Runaway ซึ่งเป็นภาวะที่อุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจนำไปสู่ความเสียหายรุนแรง [8] ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีการจัดการความร้อน (Thermal Management) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ NMC [5]

ปรากฏการณ์ Thermal Runaway ในแบตเตอรี่ NMC สามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 150-200°C [9] ระบบการระบายความร้อนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยโดยปกติแล้ว แบตเตอรี่ NMC ทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 15-45°C และหากไม่มีระบบจัดการความร้อนที่เหมาะสม ความร้อนที่สะสมภายในเซลล์อาจเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และเพิ่มความเสี่ยงของ Thermal Runaway [10] ดังนั้น ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooling), ของเหลว Liquid Cooling), หรือแผ่นระบายความร้อนแบบเฟสเซนจ์ (Phase Change Material, PCM) จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้คงที่ [7] การออกแบบระบบนี้ต้องคำนึงถึง การกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ, การลดจุดร้อน (Hot Spots), และการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ การผสมผสานเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิและซอฟต์แวร์ควบคุมอัจฉริยะ จะช่วยให้ระบบสามารถปรับการระบายความร้อนให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วย ยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ NMC และเพิ่มความปลอดภัยของรถยนต์ไฟฟ้า [6]

การใช้ SolidWorks และ Flow Simulation ด้วยวิธี FVM ทำให้สามารถวิเคราะห์และทดสอบแนวคิดการออกแบบ โดยไม่ต้องสร้างต้นแบบจริง ลดต้นทุนและเวลา

การพัฒนา นอกจากนี้ยังสามารถระบุจุดร้อน (Hot Spots) ที่อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น และช่วยปรับปรุงการไหลของของไหลเพื่อให้เกิดการระบายความร้อนที่สม่ำเสมอมากขึ้น เทคโนโลยีนี้ยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศและของเหลว รวมถึงการออกแบบโครงสร้างแบตเตอรี่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด ดังนั้น การใช้ซอฟต์แวร์จำลองทางวิศวกรรมจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC ให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยสำหรับการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า

โดยงานวิจัยของ Mohsen Akbarzadeh และคณะได้ทำระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศและของเหลวในโมดูลแบตเตอรี่พลังงานสูงสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยการใช้จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานเสริมและประสิทธิภาพการระบายความร้อนของทั้งสองระบบ ซึ่งพบว่าการใช้อากาศด้วยอัตราการไหล 21 l/s รวมกับการใช้ช่องอากาศขนาด 5 mm ดังรูปที่ 1 สามารถระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC 3.7 V 43Ah จำนวน 12 ก้อน ให้มีอุณหภูมิ 36-38 องศาเซลเซียส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh มาประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ NMC 180 Ah 3.7 V จำนวน 24 เซลล์ [11]



รูปที่ 1 โมเดลของ Mohsen Akbarzadeh ที่ใช้อากาศในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC จำนวน 12 เซลล์ [11]

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การจำลองระบบระบายความร้อนมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนหลักๆ 2 อย่างได้แก่ การนำความร้อน (conduction) และการพาความร้อน (convection) และเกี่ยวข้องกับการไหลในท่อโดยตรงโดยลักษณะการไหลในท่อมียู่สองแบบคือแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยทั่วไปเราสามารถทราบพฤติกรรมของการไหลได้อย่างดีด้วยการคำนวณค่า Reynolds Number ตามสมการที่ 1 การคำนวณมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของอากาศเริ่มต้น ค่าความหนาแน่นของของไหล ค่าคุณสมบัติความยาว (hydraulic diameter) ค่าความหนืดของอากาศ ในสมการที่ 1 ค่าคุณสมบัติความยาวขึ้นอยู่กับลักษณะหน้าตัดของท่อซึ่งใช้วิธีการคำนวณไม่เหมือนกัน สามารถคำนวณตามสมการที่ 2 [12] โดยขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 1.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

โดยที่ Re คือ ค่า Reynold Number

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C

U คือ ความเร็วของอากาศเริ่มต้น (m/s)

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ (pa • s)

$$D_h = \frac{4A}{S} \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ(m<sup>2</sup>)

S คือ ขนาดของเส้นรอบวงที่สัมผัสของไหล (m)

ตารางที่ 1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้คำนวณค่า Reynold Number ของอากาศ ณ ความดันอากาศ 1 atm และอุณหภูมิ 25 °C

| ตัวแปรที่ใช้คำนวณ            | ขนาดของตัวแปร                |
|------------------------------|------------------------------|
| ความเร็วของอากาศ             | 30.48 m/s                    |
| ความหนืดไดนามิกของอากาศ      | 1.98 x 10 <sup>-5</sup> Pa.s |
| ความหนาแน่นของอากาศ          | 1.215 kg/m <sup>3</sup>      |
| ความกว้างของหน้าตัด          | 0.044 m                      |
| ความยาวของหน้าตัด            | 0.095 m                      |
| พื้นที่หน้าตัดของท่อ         | 0.0352 m <sup>2</sup>        |
| ขนาดเส้นรอบวงที่สัมผัสของไหล | 0.128 m                      |

ตามสมการที่ 2 และข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถคำนวณหา Reynold Number เบื้องต้นได้เท่ากับ 112,476 ซึ่งมากกว่า 4,000 ทำให้ทราบว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วนดังนั้นสมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมของการไหลของอากาศในระบบต้องเป็นสมการอนุรักษ์มวล (mass conservation) (สมการที่ 3) และสมการอนุรักษ์ (momentum conservation) ซึ่งโดยรูปทั่วไปสำหรับการไหลแบบ

ปั่นป่วนจะต้องจัดสมการใหม่เป็น Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (RANS) (สมการที่ 4) ซึ่งเป็นสมการที่อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย [13]

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u} \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \rho(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\nabla \bar{p} + \mu[\nabla^2 \bar{u} + \nabla(\nabla \cdot \bar{u})] - \nabla[(\rho \bar{u} \bar{u})] + \rho \bar{g} \quad (4)$$

จากสมการที่ 3 พจน์แรกของสมการคืออัตราการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลา โดยปกติโปรแกรมจะเริ่มต้นการคำนวณด้วยสมการนี้ซึ่งการจำลองการไหลของระบบเป็นแบบคงตัว (Steady State) ทำให้พจน์แรกของสมการกลายเป็น 0 ในที่สุด การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนคอมพิวเตอร์จะต้องใช้รูปสมการที่เหมาะสมและผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงในทางปฏิบัติมากที่สุด ซึ่งทำให้สมการที่ 4 จะต้องคำนวณร่วมกับโมเดล  $k - \varepsilon$  เพื่อให้ผลของการจำลองมีความสมจริงมากขึ้นโดยสมการนี้มีความสัมพันธ์กับ Reynold Stress Tensor ตามสมการที่ 5 ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์แบบ Boussinesq [14]

$$\tau_{ij} = -\rho \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

ซึ่งสามารถนิยาม Reynold Stress Tensor ได้ตามสมการที่ 6

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} \quad (6)$$

จากสมการที่ 5 เห็นได้ว่า Reynold Stress Tensor มีความสัมพันธ์กับสมการที่ 4 อย่างไรก็ดีตามต้องมีการนิยามเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถใช้โมเดล  $k - \varepsilon$  ได้ต้องมีการอธิบายผ่านสมการ Turbulent kinematic viscosity ตามสมการที่ 7

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

สมการที่ 7 มีความสัมพันธ์กับ Eddy Viscosity ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Eddy Viscosity ซึ่งเป็นค่าตัวแปรสมมติเพื่อให้การไหลแบบปั่นป่วนบนการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้นซึ่งถูกอธิบายผ่านสมการที่ 8

$$\mu_t = \rho \nu_t \quad (8)$$

สุดท้ายสำหรับการจำลองพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อถูกอธิบายผ่านโมเดล  $k - \varepsilon$  ทำให้ได้ความสัมพันธ์ผ่านสมการที่ 9 และ 10 ดังนี้

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla[(uk)] = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla[(\mu \varepsilon)] = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_2 \quad (10)$$

โดยสมการมีค่าตัวแปรคงที่เพื่อใช้ประกอบการคำนวณ Turbulent Model ได้แก่  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$  สมการดังกล่าวเบื้องต้นเป็นสมการที่ใช้ในการจำลองการไหลของระบบ โดยต่อไปนี้เป็นสมการควบคุมการจำลองถ่ายเทความร้อนซึ่งมีได้แก่การนำความร้อนและการพาความร้อนในอุปกรณ์ซึ่งจะเริ่มการอธิบายด้วยสมการการกำเนิดความร้อนดังสมการที่ 11 [15]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + \dot{q} \quad (11)$$

โดย  $\rho$  คือความหนาแน่นของแบตเตอรี่ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $c_p$  คือความจุจำเพาะความร้อน ( $^\circ\text{C}$ )  
 $T$  คืออุณหภูมิของแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้น ( $^\circ\text{K}$ )  
 $k$  คือค่าการนำความร้อนของ ( $\text{W/m}, ^\circ\text{K}$ )  
 $\nabla^2 T$  คือ Laplacian สำหรับอุณหภูมิ  
 $\dot{q}$  คืออัตราการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร ( $\text{W/m}^3$ )

จากสมการที่ 11 เป็นสมการควบคุมทั่วไปที่อยู่ในรูปของ Transient การจำลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาในกรณีเป็น Steady เพราะฉะนั้นพจน์ฝั่งขวาของเครื่องหมายเท่ากับจะกลายเป็น 0 ในที่สุด จากค่า Reynold Number ที่คำนวณเบื้องต้นทำให้ทราบว่าการไหลของ

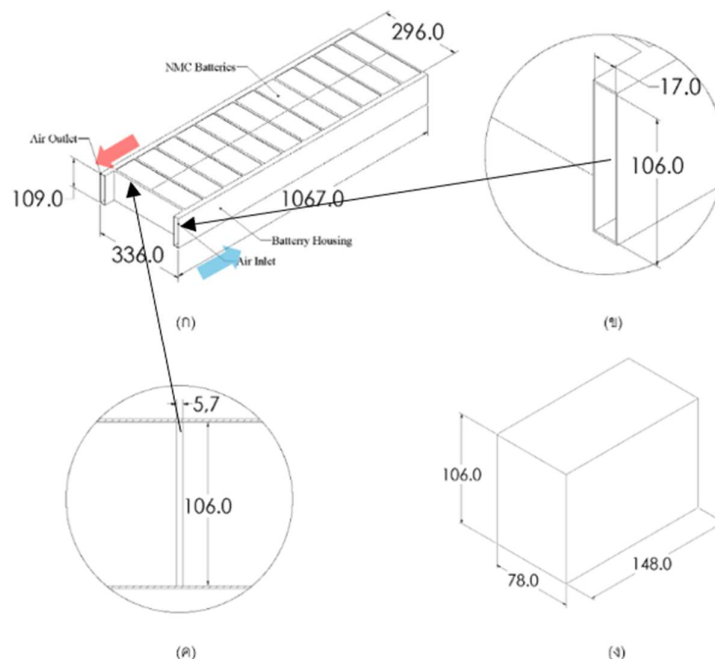
ระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เพราะฉะนั้นกลไกการพาความร้อนจึงเป็นแบบบังคับซึ่งสมการที่ใช้เป็นไปตามสมการที่ 12 และมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับ  $k - \varepsilon$  [16]

$$\nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - (\vec{r}_{eff} \cdot \vec{v})) \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 สมการพลังงานซึ่งอธิบายการส่งพลังงานผ่านของไหลเนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบการพาความร้อน การนำความร้อนและการกระจายความหนืด เทอมในฝั่งซ้ายมือได้อธิบายถึงพลังงานที่ถูกย้ายด้วยกลไกการพาความร้อน โดยที่ E คือพลังงานทั้งหมดต่อมวลซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานภายใน (Internal Energy) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) อีกกลไกหนึ่งคืองานที่ถูกสร้างด้วยแรงดัน ส่วนในเทอมฝั่งขวาของสมการโดยพจน์แรกของสมการคือการนำความร้อนและการกระจายพลังงาน

เนื่องจากความเค้นเฉือนที่คล้ายกันแตกต่างกันที่ (ค) ขนาดของช่อง 5 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร (ง) ขนาดของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 2 คือรายละเอียดของโมเดลที่ 1 และ โมเดลที่ 2 โดยโมเดลที่ 1 ในงานวิจัยของ Mohsen และคณะ เป็นโมเดลที่ดีที่สุดในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยรายละเอียดของแต่ละโมเดลอยู่ในตารางที่ 2 ซึ่งในตารางมีข้อมูลของโมเดลที่ 1 และที่ 2 ผลจากการศึกษาของ Mohsen และคณะ พบว่าอัตราความเร็วของอากาศที่ 21 V/s สามารถรักษาอุณหภูมิของผิวอยู่ที่ 34-37 °C เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาโมเดลของ Mohsen และคณะ มาปรับใช้กับแบตเตอรี่ขนาด 180 Ah 3.7 V NMC จำนวน 24 เซลล์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่างานวิจัยของ โดยการจำลองเริ่มต้นด้วยใช้อากาศระบายความร้อนแบบบังคับอัตราการไหลเชิงปริมาตร 21 V/s และ 127 V/s เพื่อใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่โดยเทียบกับโมเดลที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดของโมเดลที่ 1 และ 2 (ก) รูปแบบทั่วไปของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ (ข) ขนาดช่องของท่ออากาศ ซึ่งมีรูปแบบแนวทางการเดิน (ค) ขนาดท่ออากาศคั่นเซลล์แบตเตอรี่ (ง) ขนาดแบตเตอรี่ลิเทียม NMC

โดยการเลือกใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 L/s มาจากการเลือก Blower กระแสตรง ยี่ห้อ SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A 270 CFM โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองคือ SolidWorks Flow Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธีการ Finite Volume Method (FVM) ซึ่งเหมาะกับการจำลองของไหลผ่านวัตถุ (CFD) โดยการใช้จำลองด้วยวิธี FVM จะต้องกำหนดประเภทการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและเป็นการไหลภายในท่อ (internal flow) เงื่อนไขและขอบเขตตามตารางที่ 4 คุณสมบัติ Thermal Conductivity ของ Aluminum 6061 และอากาศเป็นคุณสมบัติแบบ Isentropic ยกเว้น Battery NMC ที่ถูกกำหนดให้เป็น Orthotropic เนื่องจากส่วนประกอบภายในของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติแตกต่างกันตามแนวแกน

จากตารางที่ 3 คือการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองระบบโดยเริ่มจากการควบคุมสภาพแวดล้อมโดยกำหนดผนังของระบบกับสภาพแวดล้อมไม่มีการถ่ายโอนพลังงาน (Adiabatic wall) เพราะฉะนั้นการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นเฉพาะแบตเตอรี่ผนังอลูมิเนียมและอากาศ มีการควบคุมระบบด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนั้นที่

ทางออกของท่อหลักถูกกำหนดให้มีความดันบรรยากาศ กำหนดค่าความร้อนเชิงปริมาตรของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 41,825 W/m<sup>3</sup> ซึ่งได้จากปริมาณความร้อนที่วัดได้จากการคลายประจุใช้อัตรา 2C จาก 80 % เหลือ 20 % [11] ทั้งนี้อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรและความเร็วอากาศในแต่ละช่องเป็นปริมาณเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิว

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าตัวแปรตามใช้วิธีการดูการลู่เข้าของคำตอบ (convergence) ซึ่งต้องตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคำตอบว่าน้อยกว่า 1 % หรือไม่ ด้วยการลู่เข้าของคำตอบมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณเซลล์ที่ทำการแบ่ง (meshing) โดยกระบวนการจะเริ่มต้นด้วยการแบ่งกริดจนได้จำนวนเริ่มต้น 100,000 กริด และทำการคำนวณจนได้ค่าตัวแปรตามออกมาซึ่งคำตอบนั้นอาจจะไม่ใช่ค่าที่แท้จริง จึงต้องทำการแบ่งกริดให้ละเอียดมากขึ้นและทำการคำนวณอีกครั้งหนึ่งและวัดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบว่าน้อยกว่า 1% หรือ ถ้ายังไม่ได้ตามที่กล่าวก็ทำการแบ่งกริดใหม่อีกครั้งให้ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมและคำนวณซ้ำอีกครั้งจนคำตอบเข้าสู่การลู่เข้า จากรูปที่ 3 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคำตอบที่ขึ้นอยู่กับการแบ่งเซลล์ [17]

ตารางที่ 3 เงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองเชิงตัวเลข

| ตัวต้นแบบ                                                            | โมเดลที่ 1                                                                                                                                                                                                          | โมเดลที่ 2      |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ตัวแปรควบคุม                                                         | ค่าความร้อนเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ : 41,825 W/m <sup>3</sup><br>ทุกวัสดุในระบบมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C<br>ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับผนัง Adiabatic wall<br>ขนาดท่อความกว้างและสูง 20 x 109 mm |                 |
| ตัวแปรต้น<br>อัตราการไหลเชิงปริมาตร<br>ขนาดท่ออากาศคันเซลล์แบตเตอรี่ | 21 และ 127 L/s<br>6 mm                                                                                                                                                                                              | 127 L/s<br>7 mm |
| ตัวแปรตาม                                                            | อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตร ความดันสูญเสีย                                                                                                                               |                 |

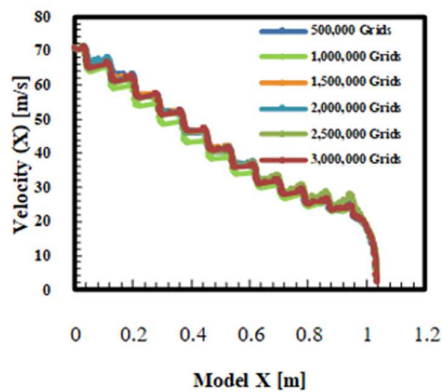
### 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากรูปที่ 3 (ก) และ (ข) คือกราฟแสดงถึงการลู่เข้าของคำตอบที่ได้จากจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโมเดลที่ 1 คำตอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่จำนวนเซลล์ 3,000,000 เซลล์ ในขณะที่โมเดลที่ 2 คำตอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1% ที่จำนวนเซลล์ 6,000,000 เซลล์ ทั้งสองโมเดลทดสอบที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 L/s รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศตามแนวแกน  $x$  มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3 (ค) ทั้งนี้ จำนวนเซลล์ดังกล่าวใช้กับอัตราการไหลเชิง 21 L/s เช่นเดียวกัน โดยรูปที่ 3 (จ) และ (ฉ) แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน 1,000,000 และ 6,000,000 เซลล์จากการนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh และคณะ ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แบตเตอรี่ 24 เซลล์ ของงานวิจัยนี้ ซึ่งผลการจำลองการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนสำหรับอัตราการไหลของอากาศ 21 L/s ของโมเดลที่ 1 เป็นไปตามรูปที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในของแบตเตอรี่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดคือ  $94.33^{\circ}\text{C}$  และต่ำสุดคือ  $42.33^{\circ}\text{C}$  ซึ่งยังเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสำหรับการใช้งานปกติของแบตเตอรี่คือ  $25\text{--}40^{\circ}\text{C}$  สำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของงานวิจัย Mohsen Akbarzadeh และคณะ ไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่จำนวน 24 เซลล์ โดยรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิสามารถเสริมการอธิบายได้โดยรูปที่ 4 (ค) โดยอุณหภูมิของเซลล์ที่ 1 และ 2 มีอุณหภูมิต่ำสุดคือ  $42.33^{\circ}\text{C}$  ถึง  $77^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลและการไหลเชิงปริมาตรของช่องที่หนึ่งและช่องที่สองซึ่งมีอัตราการไหล  $0.0016\text{ kg/s}$  กับ  $1.556\text{ L/s}$  และ  $0.002\text{ kg/s}$  กับ  $2\text{ L/s}$  หลังจากช่องที่สองเป็นต้นไปอัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรมีค่าลดลงจนต่ำสุดที่ช่องที่ 5  $0.0008\text{ kg/s}$  และ  $0.7966\text{ L/s}$  ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เซลล์ที่ 14 และ 15 มีอุณหภูมิสูงมีค่า  $94.33^{\circ}\text{C}$  หลังจากช่องที่ 5 เป็นต้นไป ค่าอัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงช่องที่ 8 มีค่าอัตรา

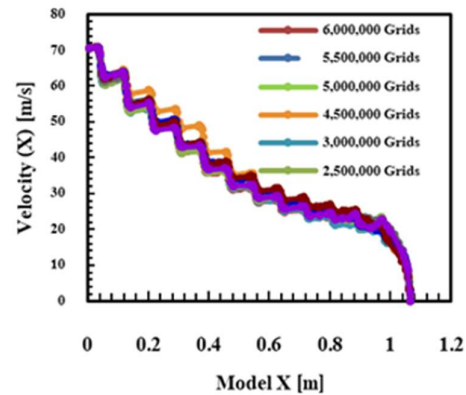
การไหลเชิงมวล  $0.0016\text{ kg/s}$  และอัตราการไหลเชิงปริมาตร  $1.60\text{ L/s}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่องที่ 1 แบตเตอรี่เซลล์ที่ 14 และ 15 กลับมีอุณหภูมิที่สูงมากคือ  $93.33^{\circ}\text{C}$  เหตุผลที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดคือแบตเตอรี่เซลล์ที่ 15 และ 16 ได้รับอิทธิพลการถ่ายเทความร้อนจากเซลล์ที่ 13 14 17 และ 18 ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูงเช่นเดียวกันทำให้มีอิทธิพลมากกว่าการพาความร้อนในช่องที่ 8 และ 9 หลังจากช่องที่ 8 ค่าอัตราการไหลของอากาศ โดยผลการจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัย [19] มีค่าลดลงจนต่ำสุดที่ช่อง 11 ซึ่งจุดนี้ เซลล์ที่ 19 และ 20 มีพื้นที่อุณหภูมิสูงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลต่ำสุดของช่องที่ 11 คือ  $0.0007\text{ kg/s}$  และ  $0.7209\text{ L/s}$  หลังจากช่องที่ 11 อัตราการไหลของแต่ละช่องมีค่าเพิ่มขึ้นมาและทำให้พื้นที่อุณหภูมิของเซลล์ที่ 21 22 23 และ 24 มีค่าลดลง ดังนั้นการนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh และคณะ มาใช้กับแบตเตอรี่ NMC 24 เซลล์ โดยใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตร 21 L/s นั้นไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนจากแบตเตอรี่ จึงทำการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็น 127 L/s

จากรูปที่ 7 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มขนาดของช่องจาก 5 mm เป็น 7 mm ในขณะที่ไหลตรงความร้อนของแบตเตอรี่ยังมีขนาดเท่าเดิม เมื่อพิจารณาพิจารณาสมการที่ 12 ตัวแปรที่สำคัญของการพาความร้อนหรือความเร็วของอากาศซึ่งโมเดลที่ 2 อัตราการไหลของอากาศ 127 L/s มีความเร็วอากาศในแต่ละช่องที่ต่ำกว่าในโมเดลที่ 1 ในอัตราการไหล 127 L/s เพราะฉะนั้นโมเดลที่ 2 หากต้องการให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้มากกว่าเดิมนั้นจะต้องทำการเลือกเครื่องเป่าอากาศขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนและทำให้อุณหภูมิลดลง เพราะฉะนั้นการเลือกปั๊ม SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A 270 CFM ใช้กับโมเดลที่หนึ่งสามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับที่ใช้งานได้

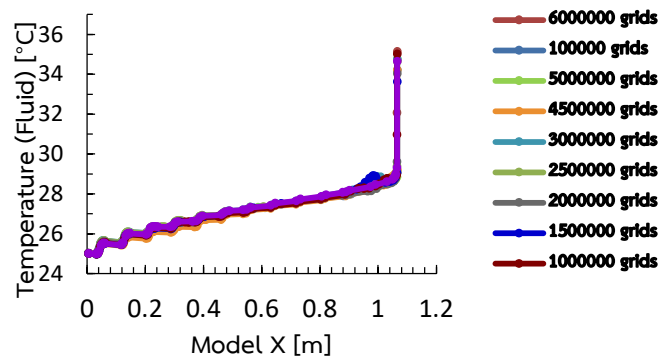




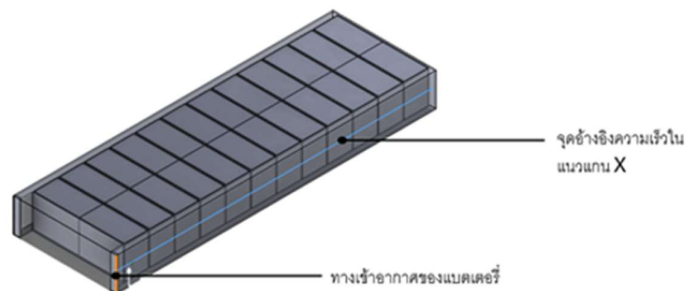
(ก)



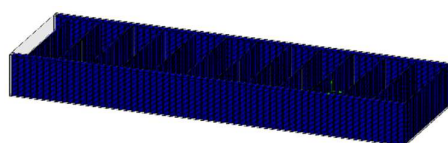
(ข)



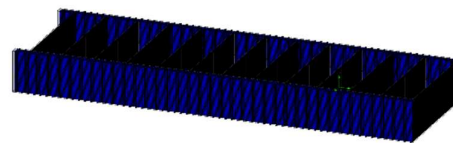
(ค)



(ง)

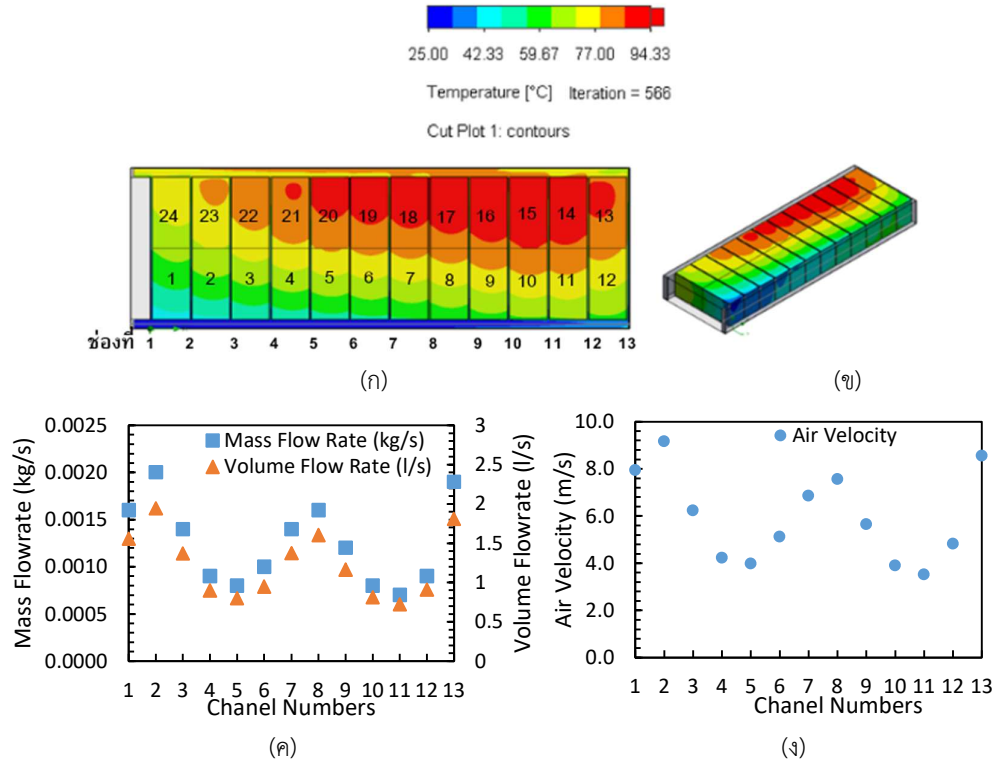


(จ)



(ฉ)

**รูปที่ 3** (ก) ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าในโมเดลที่ 1 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 L/s เทียบกับระยะทางเข้าทางแกน x (ข) ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าในโมเดลที่ 2 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 L/s เทียบกับระยะทางเข้าทางแกน x (ค) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวอ้างอิง X (ง) เส้นสีน้ำเงินจุดอ้างอิงความเร็วในแนวแกน X (จ) โมเดลหลังจากการแบ่งจำนวนเซลล์หนึ่งล้านเซลล์ และ (ฉ) โมเดลหลังจากการแบ่งโมเดลหกล้านเซลล์

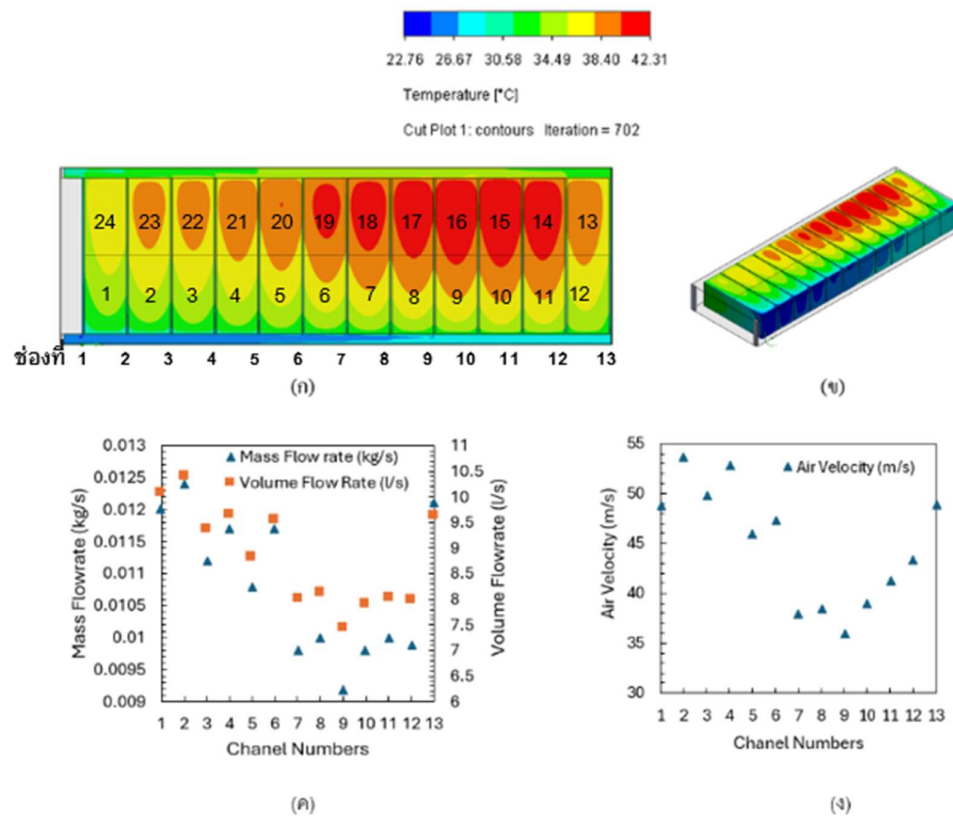


**รูปที่ 4** ผลการจำลองของโมเดลที่ 1 อัตราการไหล 21 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวล และเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ

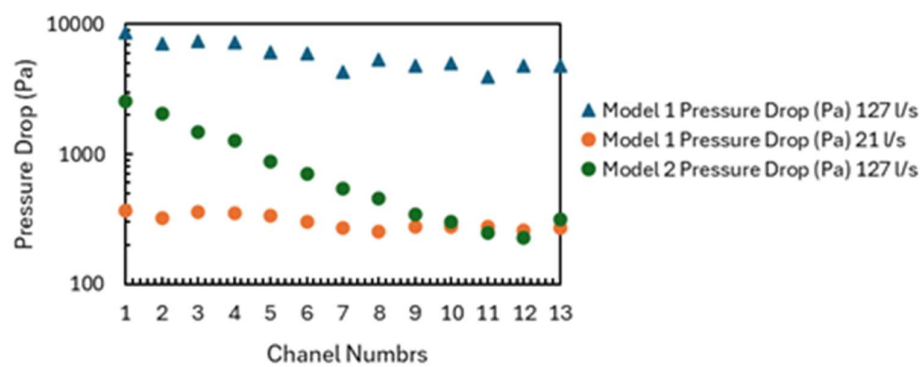
#### 4. สรุป

การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับถ่ายโอนความร้อนจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าทำให้ทราบว่าโมเดลที่ 1 ของงานวิจัย Mohsen Akbarzadeh และคณะ ด้วยอัตราไหลเชิงปริมาตร 21 l/s ไม่สามารถระบายความร้อนได้อย่างเพียงพอที่จะทำให้แบตเตอรี่ NMC จำนวน 24 เซลล์ 180 Ah มีอุณหภูมิทำงานได้อย่างเหมาะสมที่ 40-45 °C จึงมีการปรับปรุงโดยการเลือกพัดลม SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A ขนาดอัตราการไหล 270 CFM ซึ่งเป็นขนาดที่เพียงพอกับโมเดลที่ 1 ที่ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่อยู่

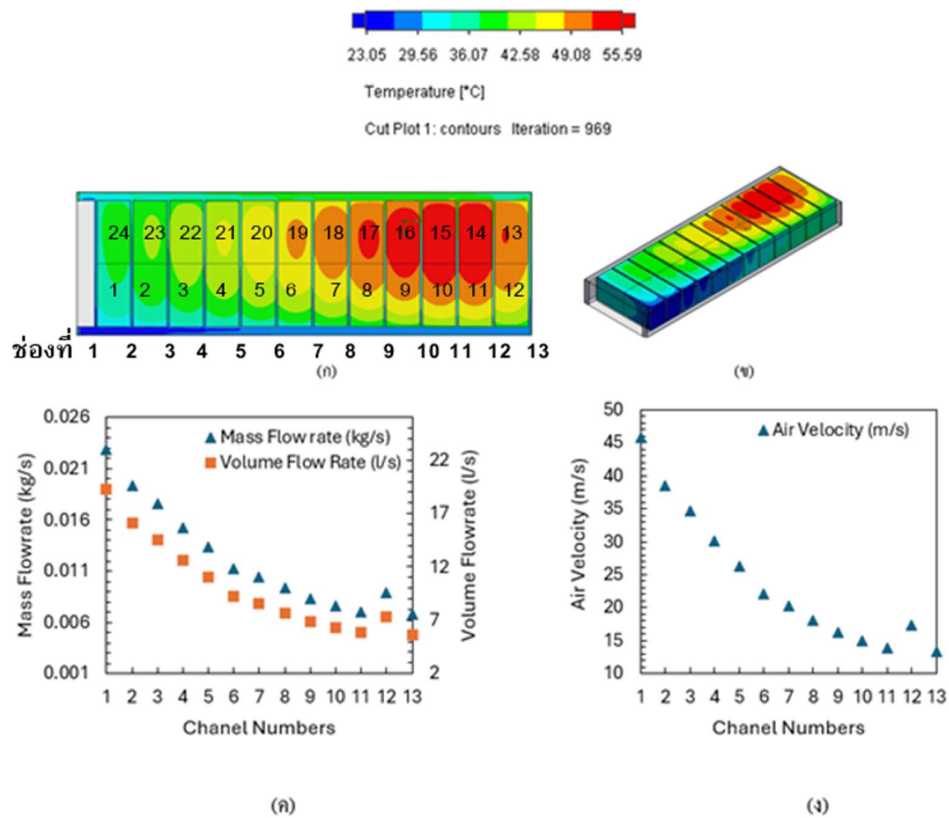
ในช่วงที่เหมาะสม เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ค่าความดันสูญเสียมีค่ามากขึ้นจึงมีการปรับขนาดของช่องจาก 5 mm เป็น 7 mm ในโมเดลที่ 2 ซึ่งทำให้ค่าความดันสูญเสียมีค่าลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ความเร็วของช่องอากาศนั้นลดลงจนทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มขนาดของปั๊มอากาศ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์แนวการวางช่องของอากาศซึ่งอาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนโดยใช้ปั๊มขนาด 270 CFM เท่าเดิมซึ่งในอนาคตจะนำปัจจัยการวางแนวช่องมาศึกษา



รูปที่ 5 ผลการจำลองของโมเดลที่ 1 อัตราการไหล 127 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวล และเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความดันสูญเสีย (Pressure Drop) ในแต่ละโมเดล



รูปที่ 7 ผลการจำลองของโมเดลที่ 2 อัตราการไหล 127 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ

## 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed and A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771–789, 2017.
- [2] [M. M. Thackeray, C. Wolverton and E. D. Isaacs, "Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 7, pp. 7854–7863, 2012.
- [3] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 4, pp. 329–332, 2015.
- [4] K. T. Chau, C. C. Chan and C. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2246–2257, Jun. 2008.
- [5] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of

- the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292–308, 2018.
- [6] A. Pesaran, M. Keyser, G. H. Kim, S. Santhanagopalan and K. Smith, "Lithium-ion batteries for electric vehicles: Thermal issues and mitigation strategies," *SAE Int. J. Altern. Powertrains*, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, 2013.
- [7] Y. Wang, X. Zhang, J. Li and B. Wu, "A review of lithium-ion battery thermal management systems and strategies for electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 65–91, 2020.
- [8] [R. Zhao, J. Liu and J. Gu, "The effects of thermal management strategies on the cycle life of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 240, pp. 8–21, 2019.
- [9] X. Feng et al., "Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246–267, 2018.
- [10] T. M. Bandhauer, S. Garimella and T. F. Fuller, "A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 3, pp. R1–R25, 2011.
- [11] M. Akbarzadeh et al., "A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for high-energy lithium-ion battery module," *Energy*, vol. 233, 121108, 2022.
- [12] Thermodynamics Society, "Flow regime in pipes [Figure]," *ThermoFluid Engineering*, Apr. 12, 2020.
- [13] R. D. Moser and P. Moin, "A numerical study of turbulent channel flow at low Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, vol. 275, pp. 41–78, 1999.
- [14] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*, 8th ed. Berlin, Germany: Springer, 2000, pp. 607–609.
- [15] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, La Cañada, CA, USA: DCW Industries, 1998.
- [17] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, UK: Pearson Education, 2007.
- [18] Y. Wang and J. Xu, "Effect of airflow distribution on thermal performance in battery thermal management system for electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 254–261, 2018.
- [19] Z. Li and J. Dong, "Effect of flow velocity and distribution on heat dissipation in a lithium-ion battery pack," *J. Power Sources*, vol. 446, 227324, 2020.