

การออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของ มอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4

Forced Air Design using Thermal Analysis and CFD Simulations of a Brushless DC Motor for the STC-4 Solar Car

วิฑูร หวนโคกสูง* ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน

สาขาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10600

Witoon Huankhoksung* Thamarat Yabsungnoen

Department of Modern Automotive Technology, Faculty of Engineering and Technology,

Siam Technology College, Bangkok, 10600, Thailand.

46 Charan Sanit Wong Rd, Khwaeng Wat Tha Phra, Bangkok, 10600, Thailand.

*Corresponding author Email: witoon_hks@live.com

(Received: February 5, 2025; Revised: June 18, 2025 ; Accepted: June 30, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการออกแบบใบพัดบังคับลมเพื่อระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) โดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งใบพัดบังคับลมของอากาศช่วยลดอุณหภูมิในส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดยอุณหภูมิของขดลวดทองแดงลดลงประมาณ 59% แกนเพลาลดลงประมาณ 47% และอากาศภายในมอเตอร์ลดลงประมาณ 63% ส่งผลให้การระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าดีขึ้น และลดความเสี่ยงต่อความเสียหายจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปอีกด้วย นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator Teeth) กับแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ รวมถึงฝาครอบมอเตอร์ ด้านหน้าและด้านหลัง ลดลงประมาณ 17% ซึ่งช่วยรักษาประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้ภาระเกินปกติ ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ BLDC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการทำงานต่อไป

คำสำคัญ: การออกแบบใบพัด, การวิเคราะห์ความร้อน, การจำลอง CFD, มอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน

ABSTRACT

This research studies the effect of an air-forced impeller design for cooling brushless direct current (BLDC) electric motors using thermal analysis and computational fluid dynamics (CFD) simulation. The simulation results show that installing an air-forced impeller reduces the temperature of various motor components. Specifically, the temperature of the copper coils is reduced by approximately 59%, the shaft core by approximately 47%, and the air inside the motor by approximately 63%, resulting in better cooling and reducing the risk of damage from overheating.

Furthermore, the air temperature between the stator teeth and rotor magnets, as well as the front and rear motor covers, is reduced by approximately 17%, which helps maintain efficiency and extend the motor's lifespan, especially under overload conditions. The results of this research provide guidelines for developing BLDC motor cooling systems to improve their efficiency and broaden their applications.

Keyword: Forced Air Design, thermal analysis, CFD simulations, brushless DC motor.

1. บทนำ

พลังงานและมลภาวะทางอากาศเป็นปัญหาสำคัญทั่วโลก [1] ดังนั้นการพัฒนายานยนต์พลังงานทางเลือกจึงมีความจำเป็น รถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สะอาดและปราศจากมลพิษ [2] วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ตระหนักถึงความสำคัญนี้และได้พัฒนารถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ที่เรียกว่า "STC" สำหรับการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge (BWSC) เป้าหมายคือการส่งเสริมนวัตกรรม ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน และเพิ่มศักยภาพให้สูงสุด นักศึกษาและอาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ ได้สร้างรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC จำนวน 3 รุ่น ซึ่งเผชิญกับความท้าทายจากความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบสำคัญที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนรถยนต์ [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 มีน้ำหนักมากกว่ารุ่นอื่น ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าต้องทำงานหนักขึ้นและสร้างความร้อนมากกว่าการใช้งานปกติ สิ่งนี้อาจลดประสิทธิภาพของมอเตอร์และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ สาเหตุหลักของความร้อนสะสมในมอเตอร์ไฟฟ้าคือระบบระบายความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพ ระบบระบายความร้อนที่ได้รับการออกแบบอย่างดีและมีประสิทธิภาพช่วยให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [4] การออกแบบใบพัดระบายความร้อนบนฝาครอบมอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาคาการสะสมความร้อนภายในมอเตอร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจใน

การศึกษาการออกแบบใบพัดระบายความร้อนและการวิเคราะห์ความร้อนของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน สำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 เป็นกรณีศึกษา การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการระบายความร้อนของมอเตอร์ และวิเคราะห์ผลการออกแบบใบพัดการระบายความร้อนของมอเตอร์

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคอมพิวเตอร์ (CFD) ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของอากาศรอบชิ้นส่วนที่หมุนได้ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นเกี่ยวกับการระบายความร้อนและการจัดการพลังงานที่สูญเสียจากการเสียดสีหรือกระแสไหลวนภายในระบบ การวิเคราะห์ CFD สามารถช่วยคาดการณ์อุณหภูมิภายในและรอบตัวมอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความทนทานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระยะยาว หนึ่งในแนวทางที่แพร่หลายในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลที่ซับซ้อนในระบบดังกล่าว คือการใช้โมเดลความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$ ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเสถียรและประสิทธิภาพในการประมวลผลกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (fully turbulent flow) โดยเฉพาะในระบบปิดหรือกรณีที่เราคาดณิคมมีความซับซ้อน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีช่องระบายอากาศ ร่องระบายความร้อน และการหมุนรอบแกน

จากงานวิจัยของ Jang et al. [5] ได้ทำการจำลองการหมุนของโรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) พร้อมกับการปล่อยพลังงานความร้อนจากการสูญเสียในขดลวดใช้โมเดล Standard $k-\epsilon$ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลและอุณหภูมิในโพรงของมอเตอร์

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณปลายโรเตอร์และช่องระบายอากาศมีการสะสมความร้อนสูง ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้าง เพื่อเสริมประสิทธิภาพการระบายความร้อน จากงานวิจัยของ Kim and Lee [6] ได้พัฒนาแบบจำลอง CFD ที่รวมการหมุนของชิ้นส่วนด้วยฟังก์ชัน Rotating Region เพื่อคำนวณผลของการหมุนต่อความเร็วลมและอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โมเดล Standard $k-\varepsilon$ ในกรณีของมอเตอร์ที่ติดตั้งในกล่องปิด การศึกษานี้ระบุว่า ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายในเนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ช่วยเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Convective ได้อย่างมีนัยสำคัญในบริบทของมอเตอร์ที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อากาศภายนอกมีบทบาท เช่น การระบายความร้อนผ่าน external airflow และของงานวิจัยของ Zhou et al. [7] ได้ทำการจำลองมอเตอร์ขณะหมุนภายใต้ลมที่ไหลจากภายนอกโดยใช้โมเดล Standard $k-\varepsilon$ พร้อม boundary condition แบบ external inlet-outlet flow พบว่าการจัดวางช่องระบายอากาศและรูทรงของ housing ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิสูงสุดของระบบ

จากงานวิจัยดังกล่าวโมเดล Standard $k-\varepsilon$ จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของความเสถียรและเวลาคำนวณต่ำ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในกรณีที่มี separation flow หรือ vortex ขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดสูง ซึ่งในอนาคตอาจมีการเปรียบเทียบกับโมเดลที่ละเอียดกว่า เช่น Realizable $k-\varepsilon$ หรือ SST $k-\omega$

2. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบใบพัดระบายความร้อนและการวิเคราะห์ความร้อนของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 การออกแบบ

ดังนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาจากสมการควบคุมกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร และสมการควบคุมสมดุลพลังงานในการ

จำลองการไหลของ SolidWorks Flow Simulation [8] โดยมีพื้นฐานมาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งระบุว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจะเท่ากับพลังงานที่เพิ่มเข้ามาจากเปลี่ยนแปลงรูปพลังงาน ดังสมการที่ 1 [9]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_v \quad (1)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

T คืออุณหภูมิของวัสดุ ณ ขณะนั้น (K)

k คือค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

q_v คืออัตราการการเพิ่มความร้อนต่อปริมาตร (W/m^3)

∇ คือ Gradient operator

t คือเวลา (s)

แต่ในที่นี้การคำนวณเป็นแบบคงตัว (Steady State) ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาและการกำหนดพลังงานความร้อนเป็นแบบ Dirichlet boundary condition คือการกำหนดค่าเป็นอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพราะฉะนั้นจากสมการที่ 1 จึงลดเทอมลงเหลือเป็นสมการที่ 2

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

เบื้องหลังของสมการที่ 2 คือระบบจะเพิ่มพลังงานให้กับทองแดงจนได้ค่าอุณหภูมิที่เท่ากับที่ถูกกำหนดไว้ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนมีการหมุนของมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดการพาความร้อน โดยสามารถที่ใช้เป็นดัง สมการที่ 3 [10]

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{surface}} - T_{\infty}) \quad (3)$$

โดย $\frac{\partial T}{\partial n}$ คือ Temperature gradient

h คือสัมประสิทธิ์ค่าการพาความร้อน

$$(W/m^2 \cdot K)$$

$T_{surface}$ คืออุณหภูมิผิวของวัสดุ (K)

T_{∞} คืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (K)

เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์มีความเกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์โดยตรงเพราะฉะนั้นสมการควบคุมที่ใช้คือ Navier-Stokes ที่มีการปรับเปลี่ยนที่เกี่ยวข้องกับระบบการหมุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกล่าวถึงผลกระทบของการหมุนและการไหลของอากาศอันเนื่องมาจากรูปแบบตัวเรือนของมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมีการควบคุมเชิงปริมาตรของระบบที่กำหนดจะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราไหลของอากาศเป็นศูนย์ในสภาวะคงตัว จัดว่าอากาศเป็นของไหลที่อัดไม่ได้ ซึ่งทำให้ได้ สมการที่ 4

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4)$$

โดย V คือเวกเตอร์ความเร็วของอากาศ

จากสมการควบคุมพฤติกรรมของอากาศรอบมอเตอร์สามารถจะอธิบายได้ โดยการใช้สมการ Navier-Stokes ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความเร็ว ความดัน กับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และสุดท้ายคือแรงโคริโอลิส ดังสมการที่ 5 [11]

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + F_{body} \quad (5)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศซึ่งในที่นี้มีค่าคงที่ในสภาวะคงตัว (kg/m^3)

p คือความดันอากาศ (Pa)

μ คือพลศาสตร์ความหนืดของอากาศ
($N \cdot s/m^2$)

F_{body} คือแรงรวมของพฤติกรรมอากาศที่อยู่รอบมอเตอร์ในขณะที่หมุนซึ่งได้แก่แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโคริโอลิส โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถอธิบายได้ตาม สมการที่ 6 และแรงโคริโอลิสสามารถคำนวณได้ตาม สมการที่ 7

$$F_{Centrifugal\ force} = \rho \omega^2 r \quad (6)$$

โดย ω คือความเร็วเชิงมุม (rpm)

r คือรัศมีของมอเตอร์ (m)

$$F_{Coriolis\ force} = -2\rho(\omega \times V) \quad (7)$$

ในกรณีที่มอเตอร์ถูกทำให้มีรูสำหรับนำอากาศเข้าไปจะเป็นผลโดยตรงจากความแตกต่างระหว่างความดันข้างในมอเตอร์และความดันด้านนอกของมอเตอร์ซึ่งมีความเร็วของอากาศที่เข้า-ออกภายในมอเตอร์ สามารถอธิบายได้ตาม สมการที่ 8

$$V_{hole} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นของการคำนวณสามารถอ้างอิงได้จากตารางที่ 1

2.2 การตั้งค่าการจำลอง (Simulation Setup)

การกำหนดขนาดของต้นแบบและการแบ่งพื้นที่การจำลองตามรูปที่ 1 และจากตารางที่ 1 คือการจำลองสภาพแวดล้อมสำหรับมอเตอร์ โดยมอเตอร์ถูกกำหนดไว้ให้หมุนความเร็วเชิงมุม 900 รอบต่อวินาที ในสภาพความดันบรรยากาศปกติและเปิดโล่งอุณหภูมิของอากาศเริ่มต้นและอุณหภูมิเริ่มต้นของทุกชิ้นส่วนที่ 20 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นกับพฤติกรรมอากาศในขณะที่มอเตอร์หมุน โดยกำหนดขนาดความเข้มข้นการไหลปั่นป่วนอยู่ที่ 0.02 ชิ้นส่วนของขดลวดทองแดงและช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator Teeth) ถูกกำหนดในขอบเขตให้เป็นชิ้นส่วนขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator) โดยไหลทิศทางความร้อนถูกกำหนดที่ขดลวดทองแดง แบบเชิงปริมาตรด้วยขนาด 275 วัตต์ (กำหนดจากการอุณหภูมิสูงสุดที่มอเตอร์ทำงานได้) โดยการคำนวณในที่นี้ ไม่คิดผลเรื่องแรงเสียดทานจากการสัมผัสของชิ้นส่วน ซึ่งมีรายละเอียดของมอเตอร์ สามารถแสดงได้รูปที่ 1 ซึ่งได้จากการควบคุมการหมุนเชิง

ปริมาตรที่มีเพียงชิ้นส่วนฝาครอบมอเตอร์เท่านั้นที่หมุน โดยผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนของมอเตอร์ที่ยังไม่ได้ทำรูนั้นจะถือว่าเป็นตัวชี้วัดของมอเตอร์ที่เจาะรู เพื่ออาศัยการไหลของอากาศในการระบายความร้อนออกจากด้านใน

จากตารางที่ 1 คือรายละเอียดของการกำหนดวัสดุในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการถ่ายเทความร้อน เช่น ความจุความร้อนและความหนาแน่นของวัตถุและตารางที่ 2 คุณสมบัติของมอเตอร์

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและขอบเขตหลักของจำลองมอเตอร์

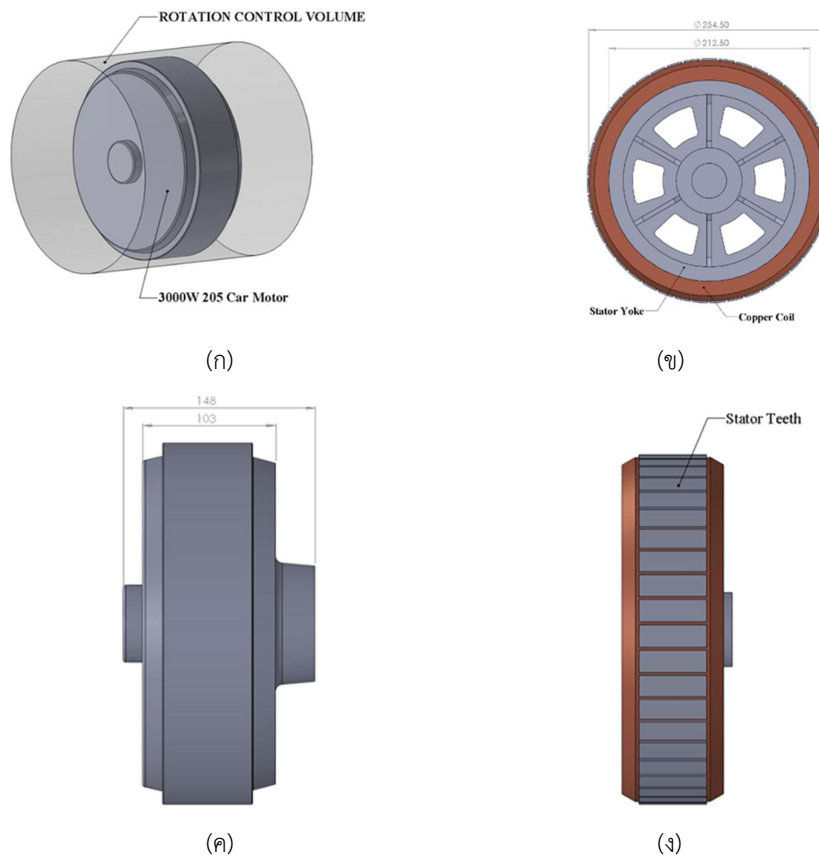
เงื่อนไขและขอบเขต	ค่าตัวเลขและชิ้นส่วนที่ถูกตั้งขอบเขต
- อัตราความเร็วเชิงมุม (ω)	900 RPM (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)
- ความดันสภาพแวดล้อม	1 atm
- อุณหภูมิของอากาศ	293 °K
- อุณหภูมิของเริ่มต้นของทุกชิ้นส่วน	293 °K
- โหลดทางความร้อนเริ่มต้นของทองแดง (W)	275 W
- การกำหนดชิ้นส่วนขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator)	แกนอลูมิเนียมและขดลวดทองแดง
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและนำความร้อน	ขึ้นกับวัสดุที่กำหนดและคุณสมบัติอากาศ
- ระดับความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วน (Turbulent intensity)	0.02
- Turbulent length scale	0.003 เมตร
- กำหนดชิ้นส่วนอลูมิเนียม	เปลือกมอเตอร์, Stator yoke, Stator Teeth
- กำหนดชิ้นส่วนทองแดง	Copper Coil

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมอเตอร์

Motor Type	DC Brushless Motor
Power	3000 W
Voltage Range	72 V
Working Temperature	70 °C
Net Weight	16 kg
Unit Packing Size	34 x 34 x 33 cm

ด้านหลังของฝาครอบมอเตอร์ ซึ่งเรียกการเจาะรูนี้เป็นรูปร่างลักษณะใบมีด เมื่อมอเตอร์ทำงานพื้นที่ใบมีดจะทำหน้าที่ในการบังคับอากาศไหลเข้าในตัวมอเตอร์ ซึ่งทำให้อากาศหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะไหลออกอีกด้านหนึ่ง ซึ่งใบมีดด้านขาออกจะมีทิศการเอียงตรงข้ามกับทางเข้า เป็นการบังคับให้อากาศไหลออก

จากรูปที่ 2 คือโมเดลของมอเตอร์ (3000W Car Motor) ที่ทำการออกแบบเจาะรูเรียงทั้งด้านหน้าและ

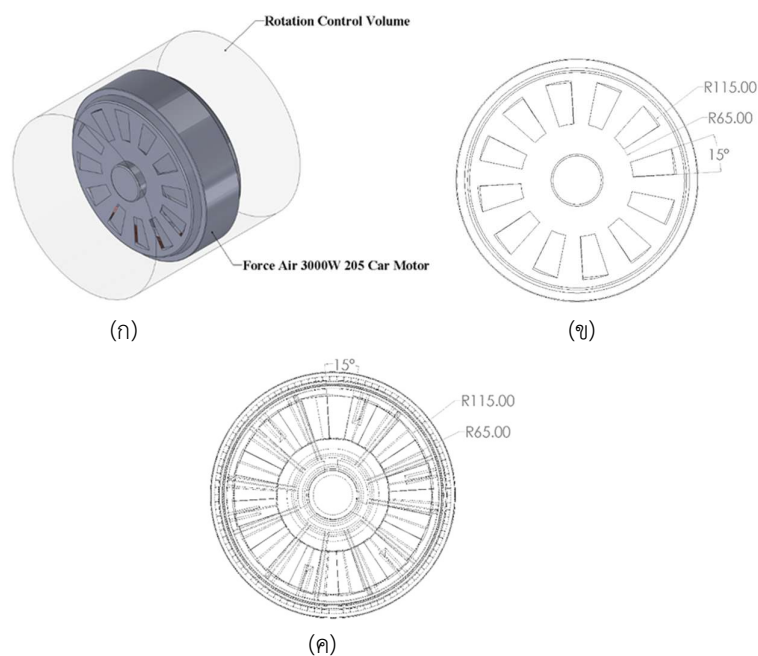


รูปที่ 1 (ก) การกำหนดควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรมอเตอร์ (ข) ขนาดของขดลวดทองแดงและโครงยึดขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (ค) ขนาดความกว้างของฝาครอบมอเตอร์ และ(ง) รายละเอียดของช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่กับขดลวดทองแดง

โดยผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนของมอเตอร์ที่ใบพัดจะถูกเปรียบเทียบกับตัวชี้วัด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ให้มีความแม่นยำของผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนด้วยวิธีการไฟไนต์อีลิเมนต์ขึ้นอยู่กับการคำนวณสามารถทำให้คำตอบใกล้เคียงค่าสถิติ ค่าที่ลู่เข้านั้นมีผลมาจากจำนวนตาราง หรือกริดที่แบ่งในโปรแกรมจำลองซึ่งหากกริด มีจำนวนมากจะทำให้รอบของการคำนวณนั้นมากขึ้น นั่นหมายถึงผลการจำลองก็ลู่เข้าสู่ค่าสถิติได้มากขึ้น ซึ่งตามการแบ่งกริดการคำนวณนั้น จะต้องเริ่มจากจำนวนกริดน้อยจนไปถึงจำนวนกริดที่กำหนดค่ามีการเปลี่ยนแปลงต่อให้เพิ่มจำนวนกริดที่กำหนด โดยมอเตอร์

ต้นแบบเป็นตัวชี้วัด ใช้จำนวนกริด ทั้งหมด 3,296,844 (กริดของไหลจำนวน 1,595,716 เซลล์ และกริดของแข็ง 1,701,128 เซลล์) จำนวนรอบการคำนวณ จำนวน 933 รอบมอเตอร์ใบพัดใช้จำนวน กริดทั้งหมด 3,390,620 กริด (กริดของไหลจำนวน 1,649,880 เซลล์ และกริดของแข็ง 1,740,740 เซลล์) จำนวนรอบการคำนวณ จำนวน 946 รอบ รวมถึงตัวอย่างของต้นแบบที่ถูกแบ่งจำนวนกริดและผลการจำลองที่ลู่เข้าได้ค่าสถิติ (คงที่) แสดงได้ดังรูปที่ 3 ผลจากการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์ทั้งสองจะถูกนำมาวิเคราะห์ผล โดยสรุปข้อมูลเปรียบเทียบดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตามผลจากการจำลองครั้งนี้ได้การแบ่งเซลล์ (Near-Wall refinement) โดยขึ้นอยู่กับค่า Global และแบบวิธีการ Cartesian-based CFD Code ที่ไม่มีการ Layer Mesh Refinement ที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ล่วงหน้า สร้าง Boundary layer Mesh แบบเฉพาะเจาะจง โดยเฉพาะบริเวณผิวที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งและ (Inflation Layer) แต่มีการ Refinement บริเวณผิววัตถุ ของไหลซึ่งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง



รูปที่ 2 (ก) ภาพรวมของมอเตอร์หลังจากทำไบพัตที่ฝาครอบมอเตอร์ (ข) ขนาดความกว้างของไบพัต และ(ค) ระยะห่างของรูด้านหลังก้ามอเตอร์หน้า

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะของโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2

คุณสมบัติของโมเดล	โมเดล 1	โมเดล 2
ลักษณะเปลือกของมอเตอร์	เรียบ	รูเจาะ
ปริมาณของกริดของแข็ง (เซลล์)	1,595,716	1,649,880
ปริมาณของกริดของไหล (เซลล์)	1,701,128	1,740,740
จำนวนรอบการคำนวณ	933	946
จำนวนรูไบพัต	-	12
องศาจากจุดศูนย์กลาง	-	15 องศา
รัศมีภายใน (mm)	-	65
รัศมีภายนอก	-	115
มุมเอียงของการเจาะ	-	15 องศา

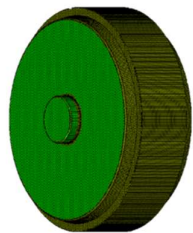
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ตัวชี้วัด

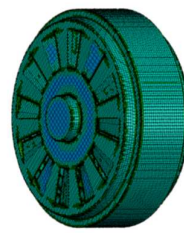
ผลจากการจำลองอุณหภูมิและของไหลที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่วัด ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ไม่ใช่ค่าเกิดที่เกิดจากการเฉลี่ยค่ามากที่สุดหรือต่ำสุด รวมถึงพื้นที่แสดงระดับทางปริมาณต่าง ๆ ที่นำเสนอต่อไปนี้

จากรูปที่ 4 (ก) แสดงพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบมอเตอร์ในสภาวะคงที่ พบว่าอากาศเกิดการไหลเข้ามาทั้งสองฝั่งของมอเตอร์อากาศถูกเหวี่ยงออกจากด้านข้างของมอเตอร์ ซึ่งยืนยันผลจากรูปที่ 4 (ข) ซึ่งแสดงเวกเตอร์ของอากาศที่ถูกเหวี่ยงออกด้านข้างใน รูปที่ 4 (ค) สามารถเห็นเวกเตอร์อากาศที่เข้ามาทั้งสองฝั่งและมีทิศทางพุ่งออกจากมอเตอร์ โดยความเร็วสูงสุดของอากาศอยู่ที่ 13.195 เมตรต่อวินาที ซึ่งเกิดขึ้นภายในมอเตอร์และความเร็ว

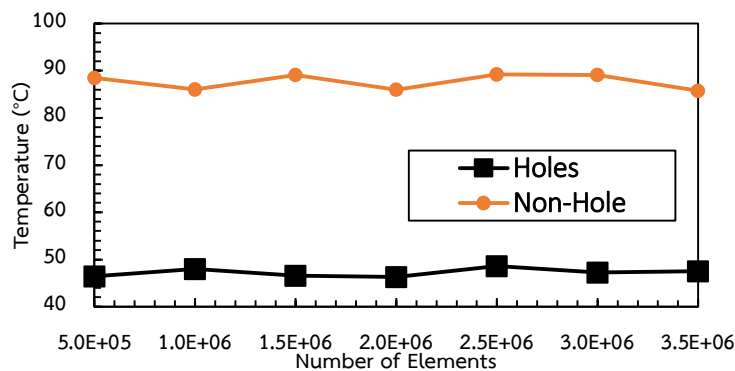
อากาศที่ผิวมอเตอร์จะอยู่ที่ 4.507-3.059 เมตรต่อวินาที ในด้านการกระจายตัวของอุณหภูมิในสภาวะคงที่ผลจากการจ่ายไฟฟ้า 2750 วัตต์ภายใต้การทำงานเกินพิกัดในรูปที่ 5 (ก) อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในขดลวดทองแดงจะมีอุณหภูมิสูงสุด 118.42 องศาเซลเซียส โดยแกนเพลลาอุณหภูมิเท่ากับ 68.05 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของอากาศภายในมอเตอร์ 63.81 องศาเซลเซียส ถึง 52.87 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องพันขดลวดตัวนำ กับแม่เหล็กอยู่ที่ 57.93 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของแม่เหล็กจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่า 55 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิของทองแดงเพิ่มขึ้นจนใกล้ 120 องศาเซลเซียส มีความเสี่ยงที่ระบบของมอเตอร์ซึ่งตัดการทำงานและทำให้ประสิทธิภาพตัวนำมีค่าลดลง



(ก)

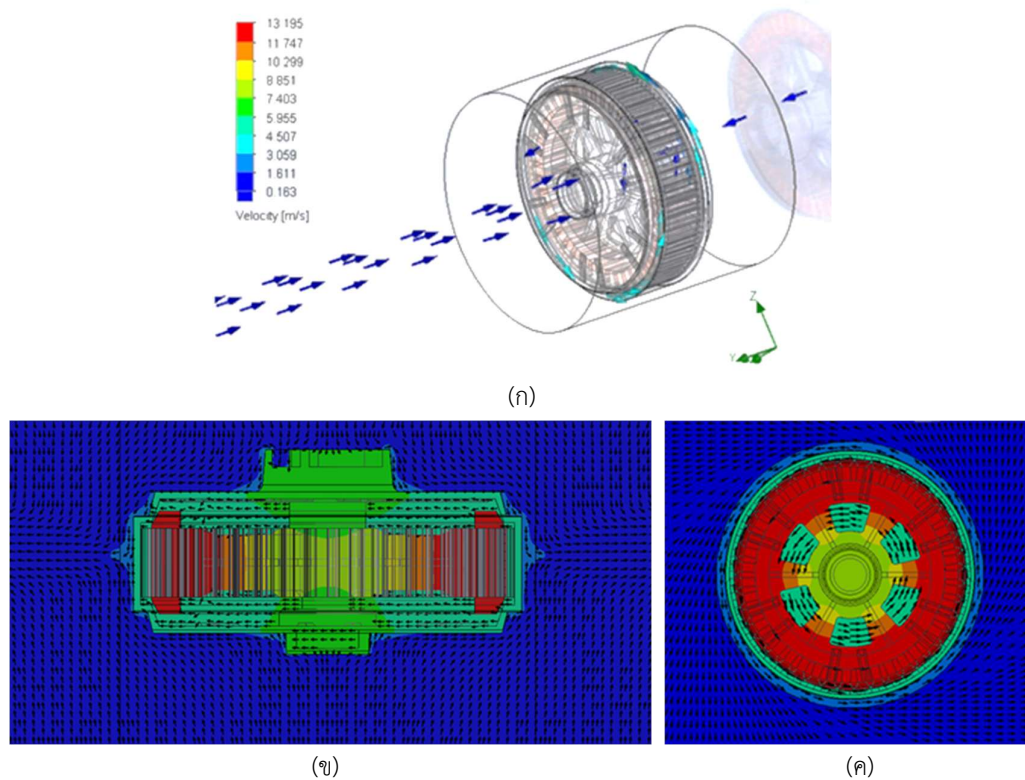


(ข)



(ค)

รูปที่ 3 (ก) การแบ่งกริดบนมอเตอร์ 3000 W 205 Car Motor (ข) การแบ่งกริดบนมอเตอร์ 3000 W 205 Car Motor ที่ทำใบพัดสำหรับบังคับลมเข้า (ค) จำนวนรอบการคำนวณเพื่อทำให้คำตอบจากการจำลองเข้าสู่ของคำตอบ



รูปที่ 4 (ก) พฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านปริมาตรควบคุมการหมุน (ข) ภาพฉายเวกเตอร์ของอากาศด้านหน้ามอเตอร์ และ(ค) ภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์

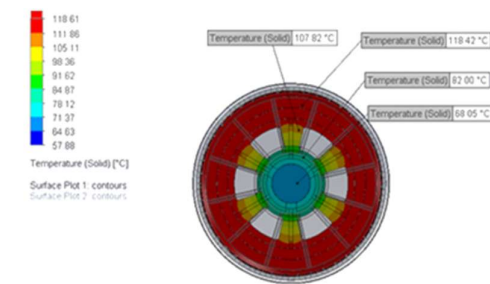
3.2 มอเตอร์ที่จะรูดน้ำบังคับอากาศเข้า

จากการจำลองการไหลและการทำความร้อนของตัวชี้วัดมอเตอร์ ทำให้เห็นถึงกระบวนการของการระบายความร้อน เนื่องจากการรับโหลดเกินพิกัด ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของขดลวดทองแดงที่สะสม ดังนั้นจึงมีการหาวิธีการแก้ไขโดยการทำใบพัดบังคับลมให้ระบายความร้อนภายในของมอเตอร์ ในรูปที่ 6 (ก) พฤติกรรมการไหลของอากาศด้านหน้าของมอเตอร์สังเกตได้จากเวกเตอร์ของอากาศไหลผ่านรูเจาะด้วยความเร็ว 0.945 ถึง 1.897 เมตรต่อวินาที ในรูปที่ 6 (ข) และรูปที่ 6 (ค) หลังจากอากาศผ่านใบพัดความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 4.713 เมตรต่อวินาที ถึง 8.481 เมตรต่อวินาที ซึ่งลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวน จากรูปที่ 6 (ง) ความเร็วของอากาศลดลงเหลือ 2.829 เมตรต่อวินาที การนำอากาศเข้าไปในตัว

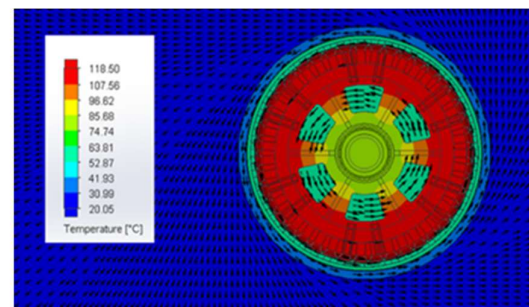
มอเตอร์สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นส่วนภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 7 (ก) อุณหภูมิของขดลวดทองแดงจาก 118.50 องศาเซลเซียส เหลือ 48.27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแกนเพลาลดลงเหลือ 35.96 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอากาศด้านในเหลือ 23.65 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 7 (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องฟันขดลวดตัวนำ และแม่เหล็กอยู่ที่ 48.05 องศาเซลเซียส โดยภาพรวมของอุณหภูมิชิ้นส่วนภายในลดลงอย่างชัดเจนซึ่งช่วยรักษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้สามารถทำงานได้นานขึ้นภายใต้สภาวะโหลดเกินพิกัด จากรูปที่ 7 (ข) กับรูปที่ 7 (ค) คือการยืนยันการไหลของอากาศของอากาศที่ผ่านใบพัดซึ่งสังเกตได้จากทิศทางของเวกเตอร์อากาศ ในรูปที่ 8 (ก) คือการกระจายตัวของอุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์ด้านหน้าโดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 34.85 – 30.20 องศาเซลเซียส และรูปที่ 8

(ค) คือการกระจายตัวของอุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์ด้านหลังซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 36.18 - 32.86 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาพร้อมกับรูปที่ 8 (ข) จะสามารถสังเกตรูปแบบการกระจายอุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์โดยด้านหน้าอุณหภูมิของมอเตอร์จะต่ำกว่าด้านหลังเนื่องจากด้านหลังได้รับการถ่ายความร้อนจากอากาศที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนกับขดลวดทองแดง สุดท้ายจากรูปที่ 9 การสร้างใบพัดบังคับอากาศสามารถทำให้อากาศไหลผ่านการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรโดย

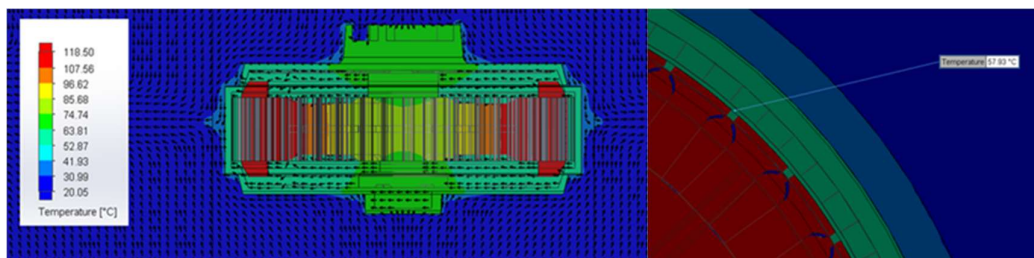
อากาศไหลเข้าผ่านช่องใบพัดทางเข้าได้เท่ากับ 0.0044 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และด้านหลังอากาศก็มีการไหลเข้าเช่นเดียวกันโดยมีค่าเท่ากับ 0.0273 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สิ่งที่น่าสนใจอากาศไม่สามารถไหลเข้าได้ในช่องใบพัดด้านหลัง โดยอากาศทั้งหมดจะถูกเหวี่ยงออกจากการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรด้วยอัตราไหล 0.0314 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีมวลตามสมการที่ 4



(ก)

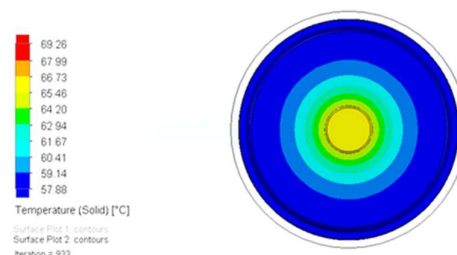


(ข)



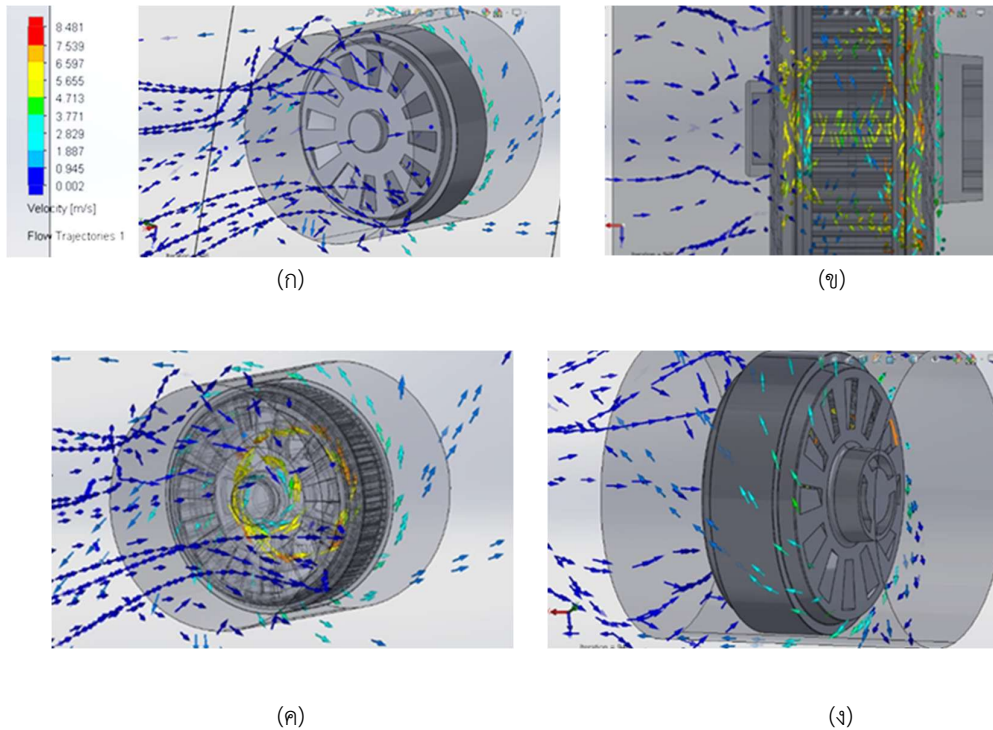
(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 5 (ก) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในมอเตอร์ (ข) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในรวมถึงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความหนาของมอเตอร์ (ภาพด้านหน้า) (ค) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในรวมถึงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างมอเตอร์ (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างแม่เหล็กและช่องพันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (จ) พื้นที่อุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์



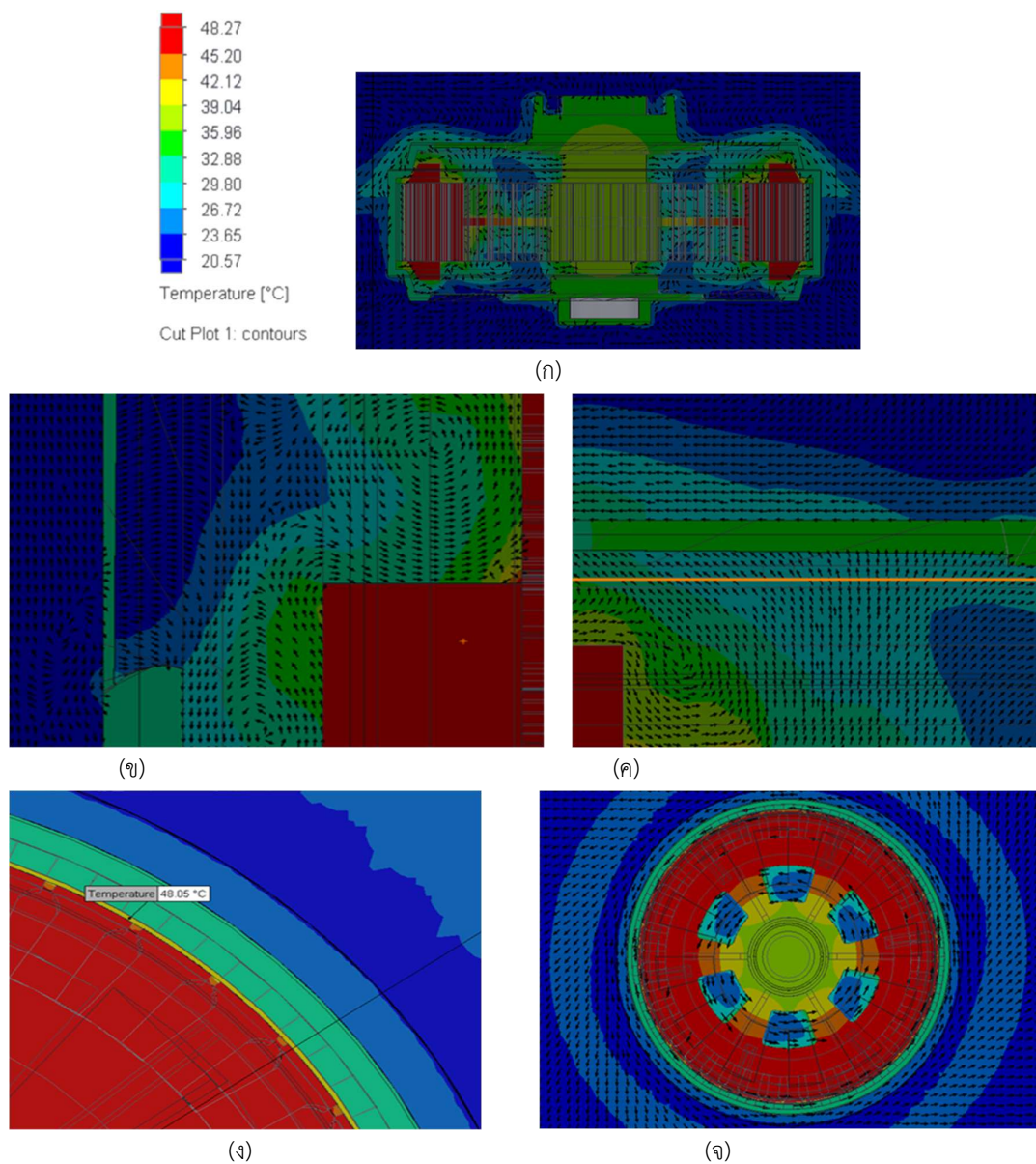
รูปที่ 6 (ก) การไหลของอากาศเข้าสู่มอเตอร์ผ่านช่องว่างของใบพัด (ข) การไหลของอากาศออกจากตัวมอเตอร์ผ่านช่องว่างของใบพัดด้านหลัง (ค) พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในมอเตอร์ในมุมมอง Isometric และ(ง) พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในมอเตอร์ในมุมมองด้านข้าง

4. สรุปผลการวิจัย

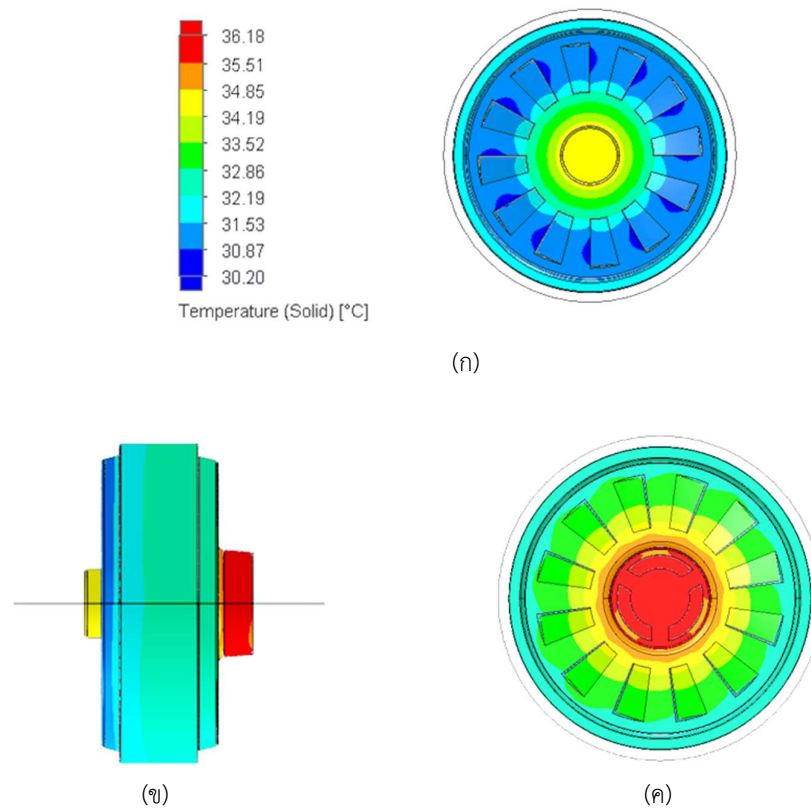
ผลจากการศึกษาการออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน จากการจำลองพบว่า การติดตั้งใบพัดบังคับการไหลของอากาศช่วยลดอุณหภูมิของขดลวดทองแดงได้ประมาณ 59% ส่วนแกนเพลาลดลงได้ประมาณ 47% และอากาศภายในลดลงได้ประมาณ 63% ส่งผลทำให้การระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าดีขึ้น และลดความเสี่ยงต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นเกินพิกัด นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องพันขดลวดตัวนำอยู่ใกล้กับแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ รวมถึงฝาครอบมอเตอร์ด้านหน้า

และด้านหลัง สามารถลดอุณหภูมิลงได้ประมาณ 17% เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพและการใช้งานของมอเตอร์ภายใต้ภาระเกินพิกัดได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบายความร้อนของมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ ต่อไป

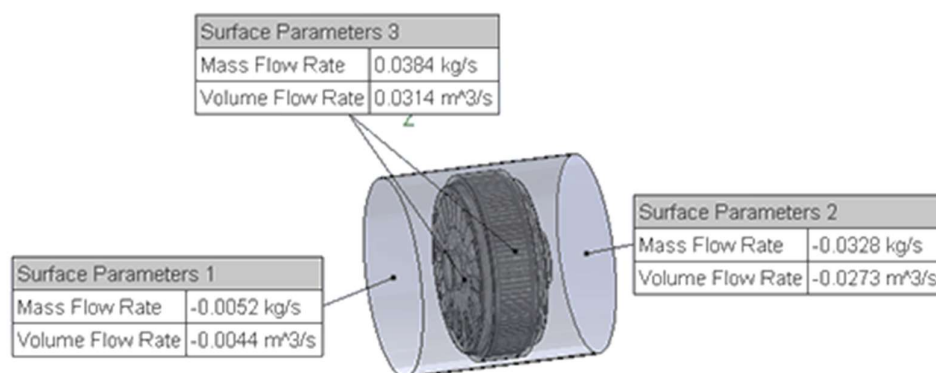
อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองแม้ว่าจะถูกต้องตามการคำนวณวิธีระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์แต่ยังต้องรอผลทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลจริง ทั้งนี้ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือการออกแบบเป็นหลักเพื่อศึกษาแนวทางในการลดอุณหภูมิของมอเตอร์ก่อนที่จะนำไปสร้างจริง



รูปที่ 7 (ก) พื้นที่อุณหภูมิชิ้นส่วนและอากาศพร้อมภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์ภาพด้านบน (ข) เวกเตอร์การไหลของอากาศในบริเวณใบพัดขาเข้า (ค) เวกเตอร์การไหลของอากาศในบริเวณใบพัดขาออก (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างแม่เหล็กและช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ และ(จ) พื้นที่อุณหภูมิชิ้นส่วนและอากาศพร้อมภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์ภาพด้านบน



รูปที่ 8 (ก) ภาพด้านหน้าอุณหภูมิจากมอเตอร์ (ข) ภาพด้านข้างอุณหภูมิจากมอเตอร์ (ค) ภาพด้านหลังอุณหภูมิจากมอเตอร์



รูปที่ 9 อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรผ่านการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022*. Paris, France: IEA Publications, 2022.
- [2] [S. Shafiee and E. Topal, “When will solar cars become commercially available,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 113–119, Jan. 2009.
- [3] [J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Madison, WI, USA: Motor Design Books LLC, 2011.
- [4] X. Yu, Y. Zhang, J. Wang and Y. Guo, “Thermal analysis and optimization of a permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pp. 129–138, 2015.
- [5] H. Jang *et al.*, “Thermal-fluid analysis of rotating electric motors using CFD with heat source modelling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, pp. 45–53, 2019.
- [6] S. Kim and D. Lee, “Numerical investigation of cooling characteristics in an enclosed electric motor with internal heat generation,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1293–1302, 2021.
- [7] L. Zhou *et al.*, “External airflow cooling of high-speed electric machines using CFD simulation,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 209, p. 112621, 2020.
- [8] T. Gammaidoni, J. Zembi, M. Battistoni, G. Biscontini and A. Mariani, “CFD analysis of an electric motor's cooling system: Model validation and solutions for optimization,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 49, p. 103349, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103349.
- [9] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [10] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [11] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.