

การออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเลียนแบบรูปร่างของ
นกเหยี่ยวเพเรกริน เพื่อลดแรงต้านอากาศ
Solar Electric Vehicle Body Design Inspired by the Peregrine Falcon for
Aerodynamic Drag Reduction

จิรวัดน์ กรุณา* ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

Jirawat Garluna^{1*} Thamarat Yabsungnoen²

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

*Corresponding author Email: jirawatg@siamtechno.ac.th

(Received: May 15, 2025; Revised: April July 1, 2025 ; Accepted: July 30, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แนวคิดการเลียนแบบชีวภาพจากรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกริน ซึ่งมีลักษณะลู่ลมและสามารถบินด้วยความเร็วสูง โดยมีการสร้างแบบจำลอง 3 รูปแบบและนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเทคนิคการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ภายใต้ความเร็วลม 80 และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่ 3 ซึ่งได้รับการปรับให้มีรูปร่างลู่ลมและสอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุด สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศจาก 0.164 เหลือ 0.139 อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงยกอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.0276 เป็น 0.095 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการแยกตัวของอากาศ และลดการเกิดอากาศวนที่บริเวณท้ายรถส่งผลให้รถต้นแบบมีประสิทธิภาพการไหลของอากาศที่ดีขึ้น นอกจากนี้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ยังช่วยลดเวลา และต้นทุนในการพัฒนารถต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการออกแบบที่เลียนแบบธรรมชาตินี้มีศักยภาพในการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแรงต้านอากาศต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบยานยนต์พลังงานสะอาดในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การออกแบบตัวถังรถยนต์ รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานงานแสงอาทิตย์ การลดแรงต้านอากาศ

ABSTRACT

This research presents the design of a solar-powered electric vehicle body using a biomimetic approach inspired by the shape of the Peregrine Falcon, a bird known for its streamlined form and high-speed flight. Three vehicle models were developed and analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) at wind speeds of 80 and 120 kilometers per hour. The study found that Model 3, which was refined to be more streamlined and practically applicable, achieved a reduction in the aerodynamic drag coefficient from 0.164 to 0.139. However, the lift coefficient increased from 0.0276 to 0.095. The improved model effectively reduced airflow separation and vortex formation at the rear of the vehicle,

resulting in better aerodynamic flow performance. Furthermore, the use of CFD simulations significantly reduced both the time and cost required for prototype development. The findings demonstrate that this nature-inspired design approach has strong potential for the development of low-drag solar electric vehicles and can be effectively applied to future clean energy vehicle design.

Keyword: Car body design, Solar-powered Electric Vehicle, aerodynamic drag reduction.

1. บทนำ

ภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้องได้รับการแก้ไข โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคขนส่งมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกประมาณ 20-25% [1] ด้วยเหตุดังกล่าวจำเป็นต้องเปลี่ยนผ่านไปสู่เทคโนโลยีที่ยั่งยืนมากขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจาก เป็นพลังงานสะอาด ทดแทนได้ และมีอยู่อย่างไม่จำกัด [2] เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านประสิทธิภาพและต้นทุน โดยเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงถึง 20-23% เนื่องจากสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ทั้งขณะขับขี่ หรือจอดอยู่กลางแจ้ง [3] นอกจากนี้การนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งเข้ากับตัวถังรถยนต์ จะช่วยเพิ่มระยะทางในการขับขี่ และลดต้นทุนพลังงาน [4]

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ การลดแรงต้านอากาศ ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศกระทบกับตัวถังของรถขณะที่รถเคลื่อนที่ ความต้านทานนี้ไม่เพียงแต่ทำให้รถต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่ แต่ยังมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ [5] ดังนั้นการออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มี แรงต้านอากาศต่ำจึงมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาหรือผิวของตัวรถเพื่อเก็บพลังงานจากแสงแดด การลดแรง

ต้านอากาศเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากแรงต้านอากาศที่สูงจะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการขับขี่ และทำให้พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานระยะยาว [6] ดังนั้นการออกแบบรูปทรงของตัวถังรถยนต์ที่สามารถลดแรงต้านอากาศได้ จะช่วยให้รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้พลังงานจากแสงแดด นอกจากนี้แรงต้านอากาศยังมีผลต่อการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าคิดเป็น 48% ของแรงต้านการขับขี่ทั้งหมดเมื่อใช้ความเร็วบนทางหลวง [7] สำหรับรถโดยสารทั่วไปจะเกิดแรงต้านอากาศในส่วนบนของตัวถังถึง 50% ส่วนด้านหน้ารถ ส่วนท้ายรถ ล้อ และซุ้มล้อ 25% และส่วนด้านล่างตัวถังรถ 25% [8]

นอกจากนี้การลดแรงต้านอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า โดยแรงต้านอากาศจะแปรผันตามรูปร่างของวัตถุ ความเร็ว และความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้นการออกแบบตัวถังรถยนต์ตามหลักอากาศพลศาสตร์ให้มีรูปทรงที่กลม จะช่วยลดแรงต้านอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้ประหยัดพลังงาน และเพิ่มระยะทางในการขับขี่ [9] การเลียนแบบชีวภาพเป็นแนวทางการออกแบบที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน [10] โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการศึกษารูปร่าง และการเคลื่อนไหวของสัตว์ต่าง ๆ เช่น นกเหยี่ยวเพเรกริน ซึ่งเป็นนกล่าเหยื่อที่สามารถบินด้วยความเร็วสูงถึง 320 กม./ชม. โดยยังคงมีความมั่นคงทางการทรงตัวและมีแรงต้านต่ำมาก [11] จากการศึกษาพบว่านกเหยี่ยวเพเรกรินมีลักษณะลำตัวที่เรียวยาว หัวมีความลาดเอียง และปีกกางเฉียงเพื่อควบคุมการไหลของอากาศให้แนบไปกับลำตัว ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรง

ด้านของนกมีค่าต่ำกว่า 0.18 ในขณะที่รถยนต์ทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.26 ถึง 0.35 [12]

นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ 10% สามารถเพิ่มระยะทางได้ 5% [13] การใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบ และปรับปรุงประสิทธิภาพอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ CFD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการไหลของอากาศรอบตัวถังรถยนต์ และสามารถช่วยนักออกแบบในการทดสอบรูปร่างของตัวถังรถยนต์ในสภาวะต่าง ๆ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างต้นแบบจริง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน และเวลาในการพัฒนา [14] การจำลองการไหลของอากาศยังสามารถใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงต้านอากาศ และแรงยก ในการออกแบบรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบรถยนต์มีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้นำเสนอการนำลักษณะรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกรินขณะบินมาออกแบบตัวถังรถยนต์ และศึกษาค่าอากาศพลศาสตร์ของรูปร่างตัวถังรถยนต์โดยใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้จำลองระบบการไหลของอากาศสำหรับออกแบบตัวถังรถยนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมไหลของอากาศโดยใช้ทฤษฎีดังต่อไปนี้

2.1 สมการ Reynold Number

สมการ Reynold Number [15] แสดงดังสมการที่ 1

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ

Re = เลข Reynold Number

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

u = ความเร็วของอากาศ

L = ความยาวของรถยนต์

μ = ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ

2.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) [16]

แสดงดังสมการที่ 2

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

เมื่อ

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

u = ความเร็วของอากาศ

$\nabla \cdot (\rho u)$ = การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว u ในแต่ละตำแหน่ง

2.3 สมการ Navier-Stokes

สมการ Navier-Stokes [17] ดังแสดงในสมการที่ 3 ใช้สำหรับการคำนวณการไหลของอากาศ และให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการกระจายของความดัน และการเคลื่อนที่ของอากาศในระหว่างการจำลอง CFD

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f \quad (3)$$

เมื่อ

u = ความเร็วของอากาศ

p = ความดันอากาศ

ν = ความหนืดจลน์

f = แรงภายนอก

$(u \cdot \nabla)u$ = การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามทิศทางของการไหล

∇p = การเปลี่ยนแปลงของความดันในแต่ละทิศทาง

$\nabla^2 u$ = การกระจายของความเร็วภายใต้ความหนืดของอากาศ

2.4 สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes

สมการ Reynolds - Averaged Navier - Stokes (RANS) [18] ดังแสดงในสมการที่ 4 ใช้สำหรับการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์ โดยใช้ Navier-Stokes โดยใช้ Reynolds averaging เพื่อคำนวณผลกระทบจากการหมุนวนของอากาศ

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nu \nabla^2 \bar{u} + \bar{f} - \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (4)$$

เมื่อ

 \bar{u} = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ \bar{p} = ความดันเฉลี่ยของอากาศ $\bar{\tau}$ = Reynolds Stress Tensor $(\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u}$ = การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเฉลี่ยของอากาศตามทิศทางของการไหล $\nabla\bar{p}$ = การเปลี่ยนแปลงของความดันเฉลี่ยของอากาศในแต่ละทิศทาง $\nabla^2\bar{u}$ = การกระจายของความเร็วเฉลี่ยภายใต้ความหนืดของอากาศ $\nabla \cdot \bar{\tau}$ = การกระจายของแรงภายในของไหล

2.5 สมการ Reynolds Stress Tensor

สมการ Reynolds Stress Tensor [19] ดังแสดงในสมการที่ 5 ใช้สำหรับคำนวณผลกระทบจากการหมุนวนของอากาศที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} \quad (5)$$

เมื่อ

 τ_{ij} = Reynolds Stress Tensor $\overline{u_i u_j}$ = อัตราการเฉลี่ยความเร็วเฉลี่ยที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

2.6 สมการ Eddy Viscosity

สมการ Eddy Viscosity [20] ดังแสดงในสมการที่ 6 ใช้สำหรับคำนวณการกระจายความหนืดจากการหมุนวนของอากาศที่ไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

เมื่อ

 v_t = ความหนืดเทอร์บิวลันต์ C_μ = ค่าคงที่ k = พลังงานจลน์เทอร์บิวลันต์ ϵ = อัตราการกระจายพลังงาน

2.7 โมเดล $k - \epsilon$

โมเดล $k - \epsilon$ [20] ดังแสดงในสมการที่ 7 - 8 ใช้เป็นโมเดลพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot (\mu_t \nabla k) + P_k - \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot (\mu_t \nabla \epsilon) + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

เมื่อ

 k = พลังงานจลน์ที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์ ϵ = อัตราการกระจายพลังงาน μ_t = ความหนืดเทอร์บิวลันต์ P_k = แหล่งพลังงานเทอร์บิวลันต์ $u \cdot \nabla k$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในเชิงพื้นที่ $\nabla \cdot (\mu_t \nabla k)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในเชิงปริมาตร

2.8 ค่าตัวประกอบคงที่สำหรับ Turbulent Model

ค่าตัวประกอบคงที่สำหรับ Turbulent Model [20] ได้แก่ $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ ใช้สำหรับแทนค่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์ที่แม่นยำ

2.9 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ [21] ดังแสดงในสมการที่ 9 ใช้สำหรับคำนวณแรงต้านอากาศที่กระทำต่อตัวถังรถยนต์

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (9)$$

เมื่อ

 C_d = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ F_d = แรงต้านอากาศ ρ = ความหนาแน่นของอากาศ v = ความเร็วของอากาศ A = พื้นที่หน้าตัดของตัวถังรถ

2.10 สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ

สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ [21] ดังแสดงในสมการที่ 10 ใช้สำหรับคำนวณแรงยกที่เกิดจากการไหลของอากาศที่กระทำกับตัวถังรถยนต์

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (10)$$

โดย

C_L = สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ

F_L = แรงยกอากาศ

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ

v = ความเร็วของอากาศ

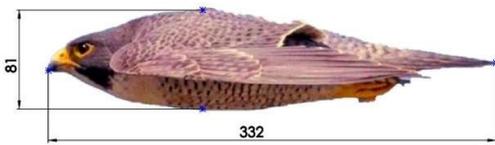
A = พื้นที่หน้าตัดของตัวถังรถ

3. การดำเนินการวิจัย

การนำลักษณะรูปร่างของนกเหยี่ยวขณะบินมา ออกแบบตัวถังรถยนต์ และศึกษาค่าอากาศพลศาสตร์ของ รูปทรงตัวถังรถยนต์โดยใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วย คอมพิวเตอร์ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

3.1 ศึกษาลักษณะเชิงมิติของนกเหยี่ยวขณะบิน

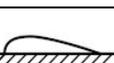
ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกนกเหยี่ยวสายพันธุ์ Peregrine Falcon ซึ่งเป็นนกนักล่าที่มีความสามารถในการบินเร็วที่สุดในโลก เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษารูปทรงทางอากาศพลศาสตร์ โดยนำภาพถ่ายด้านข้างของนกเหยี่ยวสายพันธุ์ดังกล่าวขณะบินดังแสดงใน รูปที่ 1 มา ศึกษาลักษณะเชิงมิติ จากการวัดความยาวลำตัวของนกเหยี่ยวได้ประมาณ 332 มิลลิเมตร และวัดความสูงลำตัว ได้ประมาณ 81 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างความ ยาวต่อความสูงได้เท่ากับ 4.1 ต่อ 1



รูปที่ 1 ขนาดความยาวและความสูงของนกเหยี่ยว สายพันธุ์ Peregrine Falcon [22]

จากรูปที่ 1 พบว่ารูปทรงลำตัวของนกเหยี่ยวเป็น รูปทรงที่ใกล้เคียงกับรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีค่า สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ รูปทรงต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศสำหรับรูปทรง ต่าง ๆ [23]

Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cube		1.05
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

3.2 สร้างแบบจำลองตัวถังรถยนต์

ในการออกแบบตัวถังรถยนต์ต้นแบบแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

3.2.1 สร้างแบบจำลองจากรูปทรงนกเหยี่ยวเพเรกริน

จากการศึกษารูปร่างของนกเหยี่ยว พบว่า อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูง 4.1 ต่อ 1 ผู้วิจัยได้นำอัตราส่วนดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการ ออกแบบรูปทรงรถยนต์ต้นแบบ โดยอ้างอิงลักษณะ รูปร่างของนกเหยี่ยวดังแสดงในรูปที่ 1 และสร้าง แบบจำลอง 3 มิติ โดยได้มีการปรับขนาดแบบจำลอง ให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง โดยกำหนดความยาว ของตัวรถที่ 4,900 มิลลิเมตร ความสูง 1,195 มิลลิ เมตร และความกว้าง 1,800 มิลลิ เมตร แบบจำลองนี้ถูกกำหนดให้เป็น แบบจำลองที่ 1 ซึ่งจะ ใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนา และปรับปรุงเพิ่มเติม ในขั้นตอนถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองเลียนแบบรูปร่างนกเหยี่ยว

3.2.2 ประเมินข้อจำกัดของแบบจำลองเบื้องต้น

แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2 ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง เนื่องจากขนาด และสัดส่วนของห้องผู้โดยสารยังไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

3.2.3 ปรับปรุงแบบจำลองตามมาตรฐาน BWSC

การปรับปรุงแบบจำลองโดยอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในรายการ Bridgestone World Solar Challenge (BWSC) รุ่น Cruiser [24] เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านความปลอดภัย และการใช้งานจริง ผลจากการปรับปรุงทำให้ได้ขนาดของตัวถังรถยนต์ดังนี้ ความยาว 4,900 มิลลิเมตร ความสูง 1,172 มิลลิเมตร และความกว้าง 1,800 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูง 4.180 ต่อ 1 อัตราส่วนนี้มีความใกล้เคียงกับรูปร่างของนกเหยี่ยวที่ใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบ โดยแบบจำลองหลังการปรับปรุงถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองที่ 2 ดังแสดงใน รูปที่ 3

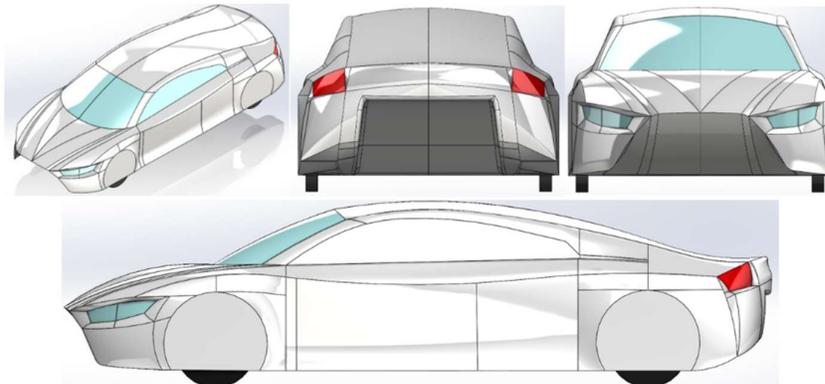


รูปที่ 3 แบบจำลองตัวถังรถยนต์จากรูปร่างของนกเหยี่ยว

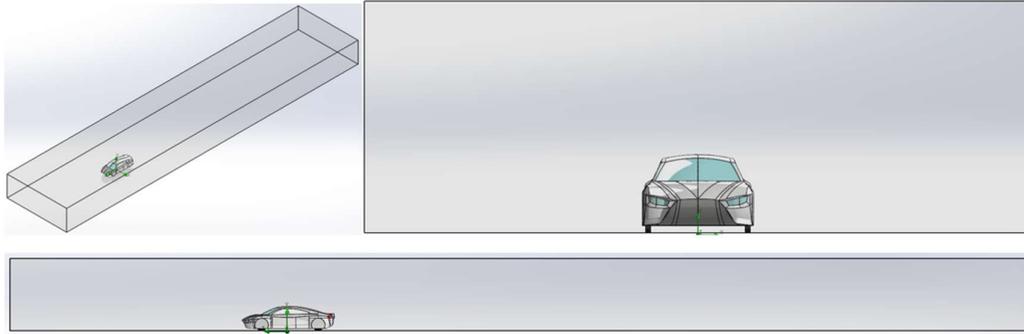
จากนั้นได้นำแบบจำลองที่ 2 มาทำการปรับแต่งเพิ่มเติม โดยเน้นที่การลดพื้นที่หน้าตัดของตัวรถซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดแรงต้านอากาศ พร้อมทั้งเพิ่มรายละเอียดของพื้นผิว ส่วนโค้ง และการจัดวางองค์ประกอบต่าง ๆ บนตัวถัง เพื่อให้รูปทรงโดยรวมมีความใกล้เคียงกับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถใช้งานได้ ทั้งในด้านรูปลักษณะ ความสมดุล และความเป็นไปได้ในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ แบบจำลองที่ได้ปรับแต่งนี้ถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4

3.3 สร้างห้องทดสอบจำลองในคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการไหลของอากาศรอบตัวถังรถยนต์ ด้วยวิธี CFD จำเป็นต้องสร้างห้องจำลองการทดสอบเพื่อกำหนดขอบเขตของการไหลของอากาศรอบแบบจำลองให้เหมาะสม และลดผลกระทบของขอบเขตที่อาจมีผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างขอบเขตสามมิติที่ล้อมรอบแบบจำลองตัวถังรถยนต์ โดยกำหนดระยะห่างของขอบเขตจากตัวรถในแต่ละทิศทางดังนี้ ด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบน กำหนดให้มีระยะห่างจากตัวรถเท่ากับ 3 เท่าของความยาวรถ ด้านหลังกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 8 เท่าของความยาวรถ ด้านล่างตัวแบบจำลองถูกจัดวางให้ติดกับพื้นล่างของขอบเขต [25] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แบบจำลองของตัวถังรถยนต์ที่ปรับลดพื้นที่หน้าตัด และเพิ่มรายละเอียดต่าง ๆ บนตัวถัง



รูปที่ 5 ขนาดของห้องจำลองการไหลของอากาศ

3.4 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดสอบ

แบบจำลองทั้ง 3 แบบมีการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก โดยจำลองผ่านโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ซึ่งคำนวณด้วยวิธีการ FVM (Finite Volume Method) ความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นอยู่กับขอบเขตของการจำลองและการลู่ออกของคำตอบโดยกำหนดขอบเขตของการจำลองดังแสดงในตารางที่ 2

1) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย ความดันอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความหนาแน่นอากาศ ที่อุณหภูมิ 25°C ผนัง ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบ และรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

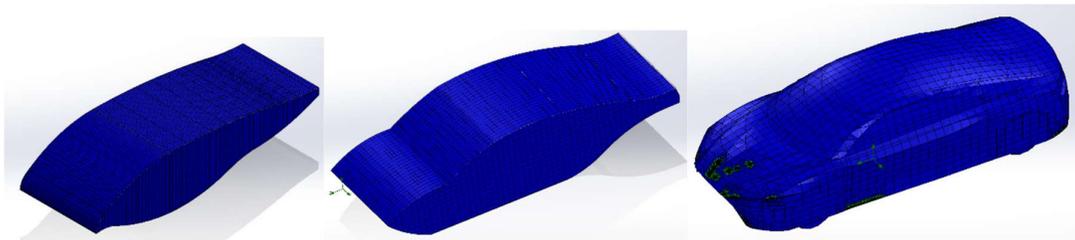
2) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย ความเร็วอากาศ ขนาดพื้นที่ตัดของแบบจำลอง

3) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก แรงยก แรงต้านอากาศ ความดันสัมพัทธ์ที่ผิว พื้นที่ความเร็วอากาศ และทิศทางเวกเตอร์

โดยการทดสอบจะพิจารณาจากการลู่ออกของคำตอบขึ้นกับการแบ่งพื้นที่ของแบบจำลอง (meshing) จนคำตอบของการจำลองเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1% ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 2 เงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองเชิงตัวเลข

ตัวต้นแบบ	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2	แบบจำลองที่ 3
ตัวแปรควบคุม	ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 25°C ความหนาแน่น 1.225 kg/m^3 ทุกวัสดุในระบบมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่: 25°C ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับผนังของระบบ: Adiabatic Wall โมเดลของการไหลปั่นป่วน $K - \epsilon$ ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2 ไม่คิดผลจากการถ่ายเทความร้อน		
ตัวแปรต้น			
ความเร็วของอากาศ	80 km/h, 120 km/h	80 km/h, 120 km/h	80 km/h, 120 km/h
พื้นที่หน้าตัดของแบบจำลอง	2.23 m^2	2.11 m^2	1.985 m^2
ตัวแปรตาม	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ, ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก, แรงยก, แรงต้านอากาศ, ความดันสัมพัทธ์ที่ผิว, พื้นที่ความเร็วอากาศ และทิศทางเวกเตอร์		



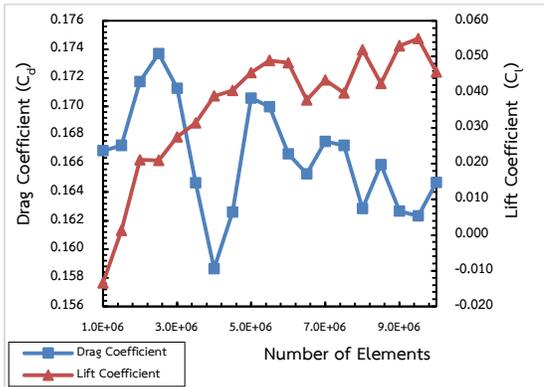
รูปที่ 6 แบบจำลองต่าง ๆ หลังจากถูกแบ่งพื้นที่ (Meshing)

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

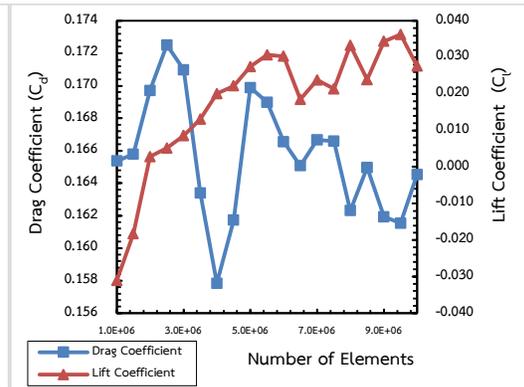
ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Study) โดยใช้จำนวนเมชที่หลากหลายระดับตั้งแต่ระดับ 1 ล้านองค์ประกอบ (elements) จนถึงระดับกว่า 10 ล้านองค์ประกอบ เพื่อประเมินผลกระทบของความละเอียดเมชต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_d) และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) จากรูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนเมชเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงน้อยในกรณีที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับหลักการของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameters) [26] อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงยกยังคงมีความผันผวนบางประการ โดยเฉพาะในแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ทั้งกรณีความเร็วลม 80 km/h และ 120 km/h ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะของการแยกตัวของกระแสลมบริเวณท้ายแบบจำลอง [27] หรือจากความละเอียดของเมชที่ยังไม่เพียงพอในบางพื้นที่สำคัญ แม้ว่าการศึกษาความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Study) ในครั้งนี้จะยังไม่สามารถแสดงการเข้าสู่ภาวะคงที่อย่างสมบูรณ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในบางช่วงความเร็ว แต่จำนวนเมชที่ใช้ในแต่ละกรณีถือว่าอยู่ในระดับที่สูงและเพียงพอในเชิงวิศวกรรมสำหรับการเปรียบเทียบเชิงสัมพัทธ์ระหว่างรูปทรงแบบจำลองแต่ละแบบ ทั้งนี้ได้มีการกำหนดจำนวนเมชให้ใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษา เพื่อให้ผลการจำลองมีความ

เที่ยงตรง และสามารถสะท้อนแนวโน้มทางอากาศพลศาสตร์ของแต่ละแบบจำลองได้อย่างเหมาะสมภายใต้กรอบแนวทางการศึกษาในครั้งนี้นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศในแบบจำลองเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างระหว่างความเร็วลมที่แตกต่างกัน

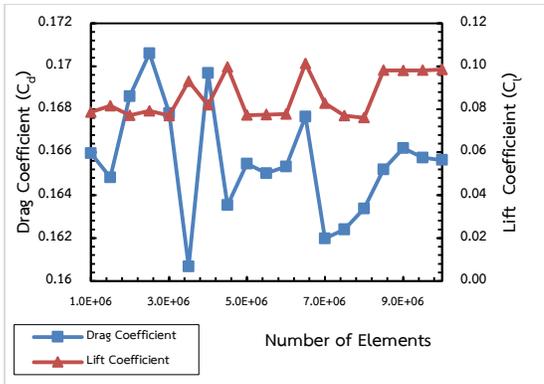
เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 8 (ก) พบว่าแรงต้านอากาศของทั้งสามแบบจำลองเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วของอากาศจาก 80 km/h เป็น 120 km/h แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกลับไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากค่าดังกล่าวพิจารณาตามสมการสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ดังสมการที่ 9 จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำสุดคือ 0.139 ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 สูงสุด มีค่าสูงสุดคือ 0.164 ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ดีขึ้นในแบบจำลองที่ 3 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกตามรูปที่ 8 (ข) จะพบว่าค่าดังกล่าวลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าดังกล่าวพิจารณาตามสมการสัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ ดังสมการที่ 10 และลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งสามแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดคือ 0.095 ที่ความเร็ว 80 km/h ขณะที่แบบจำลองที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำที่สุดคือ 0.0276 ที่ความเร็ว 120km/h ดังนั้นจากรูปที่ 8 จึงแสดงให้เห็นถึงผลของรูปทรงที่มีต่อแรงยกภายใต้ความเร็วเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานโดย Kumar และคณะ [28]



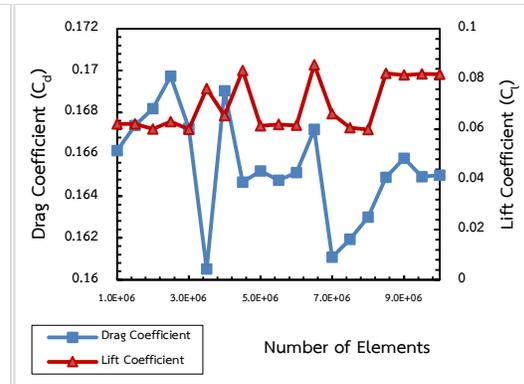
(ก) แบบจำลองที่ 1 ภายใต้อัตราเร็วลม 80 km/h



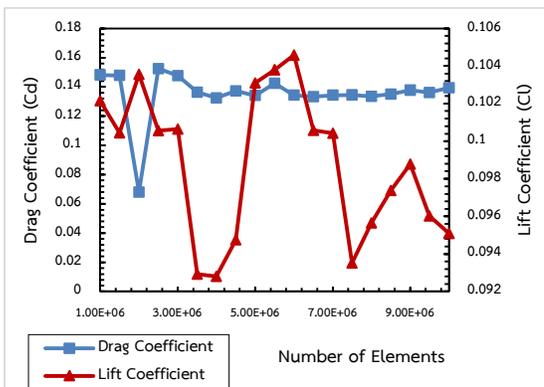
(ข) แบบจำลองที่ 1 ภายใต้อัตราเร็วลม 120 km/h



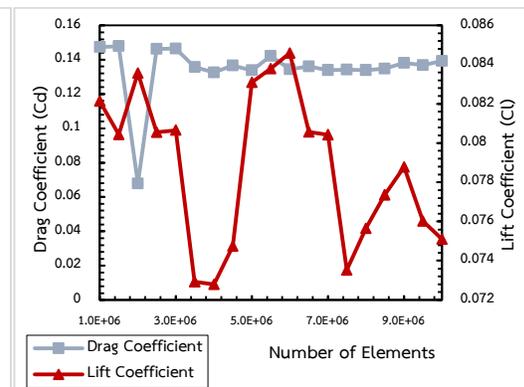
(ค) แบบจำลองที่ 2 ภายใต้อัตราเร็วลม 80 km/h



(ง) แบบจำลองที่ 2 ภายใต้อัตราเร็วลม 120 km/h

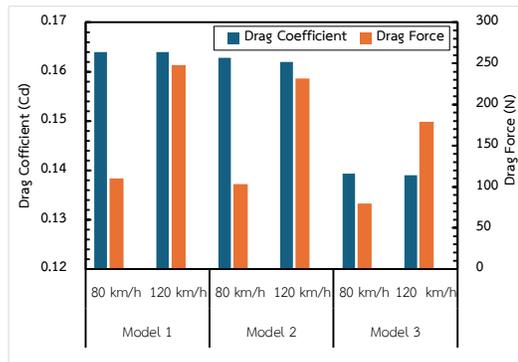


(จ) แบบจำลองที่ 3 ภายใต้อัตราเร็วลม 80 km/h

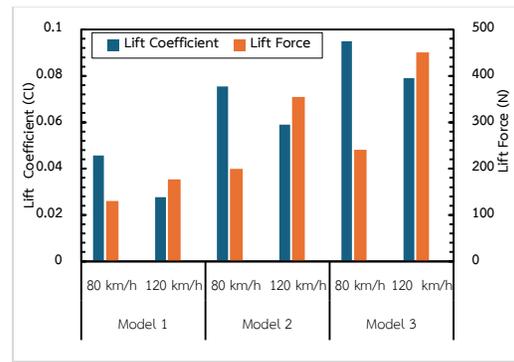


(ฉ) แบบจำลองที่ 3 ภายใต้อัตราเร็วลม 120 km/h

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงดูด และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ภายใต้อัตราเร็วลม 80 km/h และ 120 km/h ตามลำดับ



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านกับแรงต้านอากาศ

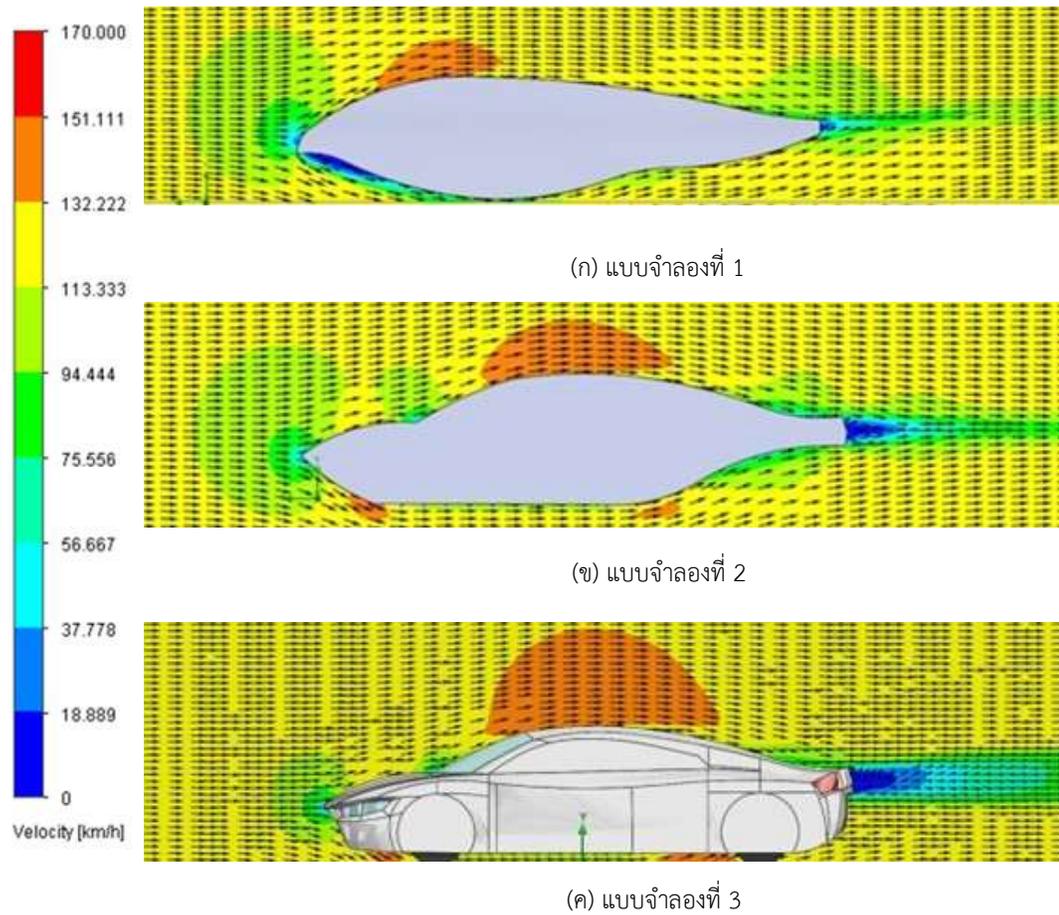


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับแรงยกอากาศ

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบจำลองส่งผลต่อการไหลของอากาศ และการเกิดอากาศวนซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงยกโดยตรง แบบจำลองที่ 1 ดังรูปที่ 9 (ก) พบว่ามีพื้นที่ความเร็วสูงบริเวณด้านบน (พื้นที่สีส้ม) มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสามแบบจำลอง ส่งผลให้แรงยก และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของนกขณะโจมตีเหยื่อที่ต้องการแรงกดเพื่อเสถียรภาพในการทรงตัว [29]. นอกจากนี้ยังพบลักษณะอากาศวน (Vortex) บริเวณใต้ส่วนหัวของแบบจำลอง ส่งผลให้มีความเร็วลมต่ำ และแรงยกอยู่ในระดับต่ำ สำหรับแบบจำลองที่ 2 ดังรูปที่ 9 (ข) ได้ปรับให้มีรูปทรงเพื่อให้ใกล้เคียงกับรูปทรงของตัวถังรถยนต์ ทำให้บริเวณด้านบนของแบบจำลองมีพื้นที่ความเร็วสูงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ 1 ส่งผลให้แรงยกและค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้บริเวณใต้ท้ายของแบบจำลองที่ 2 พบพื้นที่ความเร็วต่ำ (พื้นที่สีเขียวอ่อน) โดยเฉพาะเมื่อมีการลดความหนาของส่วนท้าย ส่งผลให้แรงยกในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองที่ 2 ยังแสดงให้เห็นการสะสมของอากาศบริเวณส่วนท้าย เนื่องจากความลาดชันของแนวผิว

ด้านหลังที่มีลักษณะเกือบตั้งฉากส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลลื่นไปตามพื้นผิวได้อย่างราบเรียบเกิดการแยกตัวของกระแสลมและก่อตัวเป็นบริเวณความเร็วต่ำ (พื้นที่สีน้ำเงิน) บริเวณท้ายแบบจำลอง การแยกตัวของอากาศนำไปสู่การก่อตัวของอากาศวน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น [30] แม้จะมีการไหลของอากาศแนวผิวที่ดีขึ้น แต่การแยกตัวบริเวณท้ายทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 ในส่วนของแบบจำลองที่ 3 ได้มีการปรับรูปทรงให้มีความใกล้เคียงกับรูปร่างของรถยนต์ที่ใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะบริเวณด้านท้ายมีการปรับให้มีพื้นที่เพื่อรองรับการติดตั้งมอเตอร์บริเวณล้อหลัง จากรูปที่ 9 (ค) พบว่าแบบจำลองที่ 3 มีลักษณะการกระจายความเร็วของอากาศคล้ายคลึงกับแบบจำลองที่ 2 แต่แรงยกที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกระทบต่อความสามารถในการยึดเกาะถนนของรถยนต์ โดยเฉพาะในช่วงความเร็วสูง นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองที่ 3 มีขนาดของอากาศวนบริเวณส่วนท้ายเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากอากาศถูกบีบใต้ส่วนท้ายของรูปทรง ทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีความเร็วมากขึ้นจนทำให้อากาศวนเกิดมากขึ้น



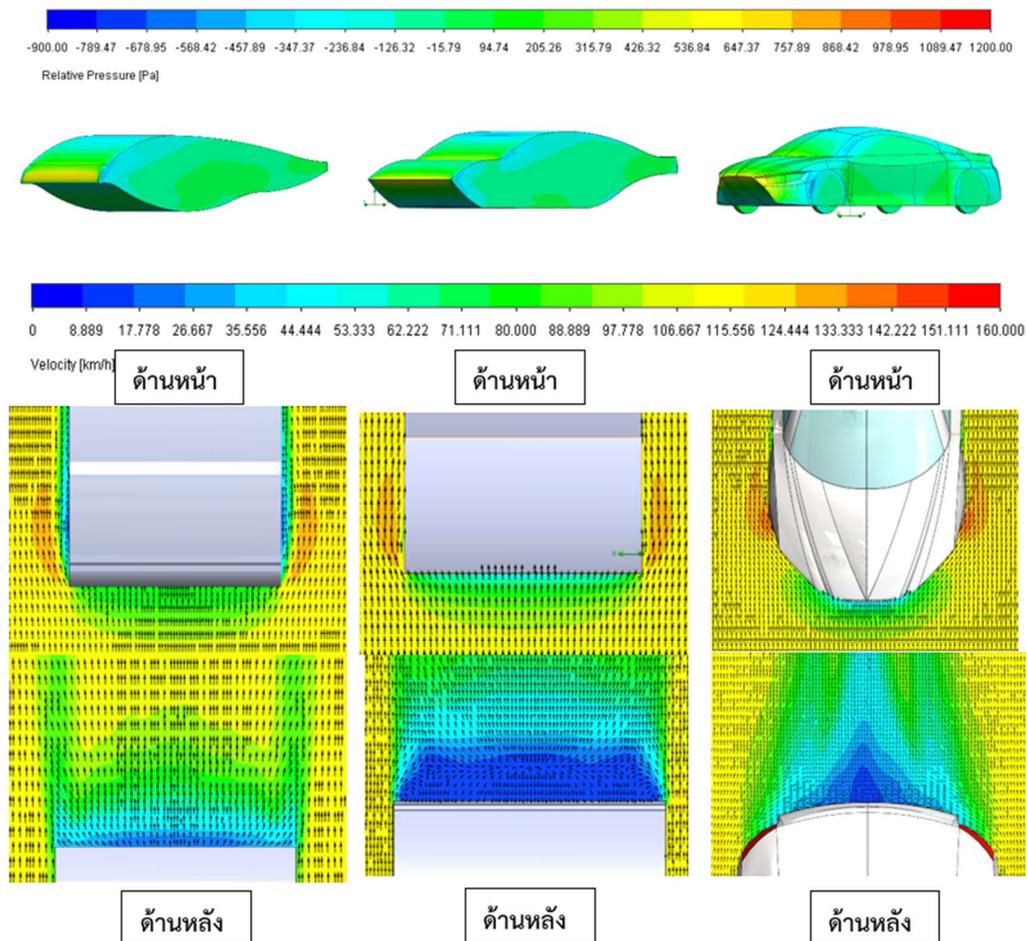
รูปที่ 9 การกระจายความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองที่ความเร็ว 120 km/h

จากรูปที่ 10 พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเป็นผลจากแรงต้านอากาศที่กระทำบนผิวของแบบจำลอง ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์บริเวณด้านหน้าของแบบจำลองทั้งสามแบบแสดงถึงบริเวณที่มีความดันสัมพัทธ์สูง (พื้นที่สีเหลือง) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 536.84 Pa ถึง 647.37 Pa อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ 3 ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง มีการลมนุ่ม และโค้งมนบริเวณส่วนหน้าของรถทำให้อากาศสามารถไหลผ่านได้ราบเรียบมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของเวกเตอร์การไหลของอากาศ (ลูกศรสีดำ) และการกระจายพื้นที่ความเร็วสูงบริเวณด้านหน้าของแบบจำลองที่ 3 (พื้นที่สีเหลือง) ซึ่งมีความต่อเนื่องและราบเรียบกว่ารูปแบบอื่น [31] ในทาง

ตรงกันข้าม แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีจุดที่เกิดความเร็วสูง โดยเฉพาะบริเวณขอบแหลมของแบบจำลอง (พื้นที่สีเข้ม) ความเร็วมากกว่า 120 km/h ลักษณะดังกล่าวเป็นผลจากการไหลของอากาศผ่านขอบที่ไม่มีการลมนุ่ม ทำให้อากาศเปลี่ยนทิศทางกะทันหัน และความเร็วลดลงหลังจากผ่านวัตถุ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากทิศทางของเวกเตอร์ และพื้นที่สีน้ำเงิน (ความเร็วต่ำ) ที่เกิดขึ้นบริเวณท้ายแบบจำลอง สำหรับแบบจำลองที่ 1 แม้การไหลของอากาศบริเวณส่วนท้ายค่อนข้างราบเรียบเนื่องจากส่วนท้ายมีความหนาน้อย แต่พบว่ามีกรก่ตัวของอากาศวนบริเวณใต้ส่วนด้านหน้าของแบบจำลอง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงต้านเพิ่มขึ้น [32] สำหรับแบบจำลองที่ 2 พบว่ามีกรก่ตัวของอากาศวนบริเวณส่วนท้าย เนื่องจากการ

แยกตัวของอากาศที่เกิดการแทนที่ระหว่างอากาศความเร็วสูง และความเร็วต่ำลักษณะการไหลเวียนบริเวณดังกล่าวส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 [33] ส่วนแบบจำลองที่ 3 มีการไหลของอากาศบริเวณส่วนท้ายที่ราบเรียบกว่าอย่างชัดเจนเนื่องจากโครงสร้างผิวที่โค้งมนทำให้อากาศไหลออก

ด้านหลังได้อย่างต่อเนื่อง แม้จะยังคงมีลักษณะอากาศไหลวนอยู่บ้างแต่มีความรุนแรงน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 และ 2 ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองที่ 3 มีค่าต่ำสุดคือ 0.139 ขณะที่แบบจำลองที่ 2 และ 1 มีค่าเท่ากับ 0.162 และ 0.164 ตามลำดับ



รูปที่ 10 พื้นที่ความดันสัมพัทธ์ของแบบจำลองและลักษณะการกระจายของอากาศด้านหน้าและด้านหลัง

5. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์

การศึกษานี้ซึ่งเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ได้ผลดังนี้

5.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำที่สุด คือ 0.139 แสดงถึงประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ดีที่สุด ขณะที่

แบบจำลองที่ 1 มีค่าสูงสุด คือ 0.164 ซึ่งสะท้อนถึงรูปทรงที่ไม่เหมาะสมต่อการไหลของอากาศ โดยเฉพาะในส่วนของหน้าของตัวถังที่มีขอบคมและก่อให้เกิดอากาศวนมาก

5.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก

แบบจำลองที่ 3 มี ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด อยู่ที่ 0.095 ที่ความเร็ว 80 km/h ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงยกมากเกินไปเมื่อใช้ความเร็วสูงและส่งผลกระทบต่อกรวยใต้เกาะถนน ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 มี แรงยกต่ำที่สุด อยู่ที่ 0.0276 ที่ความเร็ว 120 km/h ซึ่งเหมาะสำหรับความมั่นคงและเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ แต่แลกด้วยแรงต้านที่สูงกว่า

5.3 แรงต้านอากาศ

แรงต้านอากาศของแบบจำลองทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มจาก 80 km/h เป็น 120 km/h ตามสมการแรงต้าน อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ 3 ให้ค่าแรงต้านต่ำที่สุดในทุกระดับความเร็ว เนื่องจากการออกแบบที่ช่วยให้อากาศไหลผ่านตัวถังได้อย่างราบเรียบทั้งด้านหน้าและท้าย

5.4 แรงยก

ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองที่ 1 มีแรงยกต่ำที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะการออกแบบที่ช่วย “กด” ตัวรถให้แนบถนน เหมาะสำหรับการทรงตัวแบบเสถียร เช่นเดียวกับพฤติกรรมของนกเหยี่ยวขณะโจมตีเหยื่อ ส่วนแบบจำลองที่ 3 แม้มีแรงยกมากที่สุด ซึ่งส่งผลกระทบต่อควมคุมรถที่ความเร็วสูง

5.5 การกระจายความดันสัมพัทธ์ที่ผิว

จากผลการทดสอบการกระจายความดันพบว่าแบบจำลองที่ 3 มีการจัดการความดันบริเวณด้านหน้าได้ดีที่สุด โดยมีการลบลมและโค้งมน ส่งผลให้อากาศสามารถไหลผ่านได้อย่างต่อเนื่องและลดการสะสมของความดันสูงขณะที่แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีจุดที่เกิดความดันสูงเฉพาะจุด ส่งผลให้เกิดแรงต้านสะสม

5.6 พื้นที่ความเร็วอากาศ

แบบจำลองที่ 3 แสดงพื้นที่การกระจายของความเร็วอากาศบริเวณด้านบนที่ต่อเนื่องและกว้างขวางมากกว่าแบบอื่น แสดงถึงการไหลแบบผิวที่ตี ในขณะที่แบบจำลอง

ที่ 1 มีพื้นที่ความเร็วสูงน้อยที่สุด สะท้อนถึงอากาศที่ถูกกีดขวางมากและไหลไม่ราบเรียบ

5.7 ทิศทางการไหลของอากาศ

แบบจำลองที่ 3 แสดงการกระจายของเวกเตอร์อากาศที่ราบเรียบและต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณด้านหน้าและด้านข้าง ช่วยให้อากาศไหลผ่านโดยไม่มีจุดแยกตัวแบบรุนแรง ขณะที่แบบจำลองที่ 1 มีการไหลของอากาศเปลี่ยนทิศกะทันหันบริเวณขอบคม ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกตัวเร็วและแรงต้านสูง นอกจากนี้แบบจำลองที่ 1 มีอากาศวนเกิดขึ้นบริเวณใต้ส่วนหน้าของตัวถัง ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มแรงต้าน ส่วนแบบจำลองที่ 2 มีอากาศวนบริเวณท้ายรถ อันเป็นผลจากการออกแบบผนังด้านหลังที่เกือบตั้งฉาก ขณะที่แบบจำลองที่ 3 แม้จะมีอากาศวนท้ายรถเช่นกัน แต่มีขนาดเล็กเนื่องจากผิวโค้งที่ช่วยให้การแยกตัวของอากาศลดลง

จากการวิเคราะห์ทั้งหมดสรุปได้ว่า รูปทรงของแบบจำลองส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมกรรมการไหล และค่าพลศาสตร์อากาศของแบบจำลอง การลดมุมหรือการปรับรูปร่างให้มีความกลมมากขึ้นสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านได้อย่างชัดเจน แต่ต้องคำนึงถึงแรงยกหากมีค่ามากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัย และเสถียรภาพของรถยนต์ในขณะที่ความเร็วสูง ดังนั้นการออกแบบที่เหมาะสมจึงควรสร้างสมดุลระหว่างแรงต้านและแรงยกและอาจต้องพิจารณาอุปกรณ์เสริมทางด้านพลศาสตร์ เช่น สปอยเลอร์หรือดิฟฟิวเซอร์ เพื่อควบคุมแรงยกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck,

- A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds., IPCC, Geneva, Switzerland, 2022.
- [2] A. Chauhan, A. Singh, P. Baredar and V. Pant, "Solar powered electric vehicles and their charging infrastructure: A review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1875-1891, 2021.
- [3] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis and X. Hao, "Solar cell efficiency tables (version 61)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 3-12, 2023.
- [4] S. Chauhan, *et al.*, "Integration of solar cells into electric vehicles: A review of technologies, design, and performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111021, 2021.
- [5] K. Li and L. Wu, "Computational Fluid Dynamics for Vehicle Aerodynamics," *SAE Int. J. Passenger Cars - Mechanical Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 93-101, 2017.
- [6] H. Yeo and S. Hwang, "Design of a Solar-Powered Vehicle Using Biomimetic Principles for Drag Reduction," *Energy Convers. Manage.*, vol. 185, pp. 88-98, 2019.
- [7] H. Lohse-Busch, M. Duoba, E. Rask and K. Stutenberg, "Ambient temperature (20°F, 72°F and 95°F) impact on fuel and energy consumption for several conventional vehicles, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles and battery electric vehicle," SAE Technical Report, SAE International, 2013.
- [8] S. Sebben and A. Vdovin, *Aerodynamics of Passenger Vehicles*, class lecture, Road Vehicle Aerodynamics VT16, Chalmers Technical University, Gothenburg, Sweden, 2016.
- [9] J. Han, M. Zhang and X. Gong, "Aerodynamic drag reduction of electric vehicles based on flow control: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 156, p. 111974, 2022.
- [10] D. Yang, Q. Zhao and H. Zhang, "Biomimicry in engineering design: A comprehensive review," *J. Bionic Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–27, 2023.
- [11] L. R. Tucker, "The deep dive: Peregrine falcon high-speed stoops and aerodynamic efficiency," *Nature*, vol. 509, no. 7500, pp. 473–476, 2014.
- [12] J. Katz and A. Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [13] R. Palin, V. Johnston, S. Johnson, *et al.*, "The aerodynamic development of the Tesla Model S – Part 1: Overview," SAE Technical Paper 2012-01-0177, SAE International, 2012.
- [14] S. Suman, A. Kumar and P. R. Sharma, "Computational fluid dynamics simulations for vehicle aerodynamics: Recent advances and applications," *Appl. Energy*, vol. 296, p. 117059, 2021.
- [15] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2000, pp. 264–377.
- [16] H. Wang, *A Guide to Fluid Mechanics*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2023, pp. 57–107
- [17] I. Khalil and I. Lakkis, *Computational Fluid Dynamics: An Introduction to Modeling and*

- Applications*. New York, NY, USA: McGraw Hill, 2023.
- [18] M. A. Leschziner, "Reynolds-Averaged Navier–Stokes methods," in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, vol. 3, J. D. Anderson and M. J. L. Turner, Eds. Chichester, U.K.: Wiley, 2010, pp. 1–10.
- [19] B. E. Launder and B. Rodi, *The Turbulence Model: A Second-Moment Closure*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1981.
- [20] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974.
- [21] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015, pp. 45–60.
- [22] BurningCandleSample. (2020, May 1). PsBattle: Peregrine falcon diving in the air, side view [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/photoshopbattles/comments/g9jn6r/psbattle_peregrine_falcon_diving_in_the_air_side/
- [23] X-engineer.org. How to calculate aerodynamic drag force [Online]. Available: <https://x-engineer.org/aerodynamic-drag/>
- [24] BWSC. (2025). Vehicle Specifications and Regulations, Bridgestone World Solar Challenge [Online]. Available: <https://www.worldsolarchallenge.org/rules/vehicle-specifications/>
- [25] SimScale. (2023). Aerodynamic Flow Behavior Around a Vehicle Tutorial [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/>
- [26] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2016.
- [27] J. D. Anderson, Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*, 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017.
- [28] S. Kumar et al., "Effect of air speed on aerodynamic drag and lift forces on a sport utility vehicle," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 181–188, 2016.
- [29] R. L. DeLaurier, "Aerodynamics of birds," *Comp. Biochem. Physiol. A: Mol. Integr. Physiol.*, vol. 133, no. 1, pp. 3–14, 2002.
- [30] H. Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Design*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [31] B. E. Larcombe, "The aerodynamics of blunt bodies," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 97–164, 1972.
- [32] D. R. Kuethe and C.-Y. Chow, *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1997.
- [33] S. F. Hoerner and H. V. Borst, *Fluid-Dynamic Drag: Theoretical, Experimental and Statistical Information*. Midland Park, NJ: Hoerner Fluid Dynamics, 1985.