

การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์หนึ่ง Analysis of Airflow around a Passenger Car

อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน* และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว*

บทคัดย่อ

รูปลักษณะของรถยนต์ มีผลโดยตรงต่อการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์เป็นอย่างมาก เนื่องจากรูปลักษณะของรถยนต์เป็นแหล่งกำเนิดหลักของการไหล ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงและโมเมนต์กระทำต่อยานพาหนะนั้นๆ ในการศึกษาครั้งนี้การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ได้ตรวจสอบผ่านทางจาลองเชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการศึกษากการไหล ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลของระยะระหว่างพื้นถนนและพื้นรถ และมุมลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถที่ 1/5 เท่าของแบบจาลองจริง วัดอุปสรรคเพื่อตรวจสอบกลไกการลดแรงต้านและแรงยก และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหล จากผลการคำนวณพบว่า ผลของระยะระหว่างพื้นถนนและพื้นรถที่ลดลง และการลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถที่สูงขึ้นระหว่างมุมลาดเอียง (θ) 0-10 องศา จะนำมาสู่การเปลี่ยนแปลงสนามการไหลของรถยนต์ที่ดี ซึ่งเป็นผลทำให้แรงต้านและแรงยกลดลง ผลการปรับปรุงทางอากาศพลศาสตร์นี้จะมีอิทธิพลอย่างสูงต่อการลดลงของแรงยก

คำสำคัญ : การคำนวณเชิงตัวเลข รถยนต์ แบบจาลอง ความปั่นป่วน

Abstract

The car aerodynamic was modified directly by the car configuration. Since the car configuration is primary source of the flow field, which cause of force and moment. In this study, the aerodynamics modifications are investigated through the numerical simulation. The commercial software, FLUENT, is used to study the flow.

The interest of modifications are focused on the influence of the ground clearance and the tapering angle of bottom upward or diffuser on the 1/5 scale model. The objective is to investigate the drag and lift reduction mechanism and to determine the change of the flow filed. The numerical result indicate that the less ground clearance and the more diffusely angle ($0 < \theta < 10$) give the better flow field which result the drag and lift reduction. The negative lift is more sensitive due to these aerodynamic modifications

1. บทนำ

ในปัจจุบันการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ได้กลายเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการออกแบบรถยนต์ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาการวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์ได้สนใจเฉพาะเพียงการลดแรงต้าน แต่ต่อมาความเร็วของรถยนต์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพในการขับขี่ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนน และเสถียรภาพในการขับขี่บนถนน การลดแรงยก จึงได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มขึ้นในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์

Nouzawa และ คณะ [1] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเวคที่มีคุณลักษณะไม่คงตัว (Unsteady) ต่อแรงต้าน โดยในการศึกษานี้ได้ใช้รถเก๋งท้ายหยัก (Notchback car) ที่มีรูปทรงด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical Afterbody Geometry) ในการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อรูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลในเวคอย่าง

* ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จับปล้น และเวกมีขนาดใหญ ทำให้เกิดแรงต้านสูง Horinouch [2] ได้ทำการศึกษาผลของความลาดเอียง ด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า (Spat) ที่ติดใต้บังโคลน (Wheel housing) โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และใช้ระเบียบวิธี ผลต่างสลับเนื่องในการสร้างสมการเชิงตัวเลข ผลที่ได้ สอดคล้องกับการทดลอง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน จะลดลงเมื่อความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดัน ที่ส่วนหลังของแบบจำลองสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์ แรงต้านจะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดชายหน้า ซึ่งเป็น อุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลที่ราบเรียบกว่าที่ล้อ Katz และ Dyhstra [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของปีกเครื่องบิน (Wing) ซึ่งนำมาติดด้านหลังของท้ายรถยนต์สำหรับแข่งขัน โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลไม่หนืด (Inviscid flow) ซึ่งผลจากการคำนวณพบว่า การติดตั้งปีก จะสร้างแรงกดสูงกว่าในกรณีที่ไม่ติดตั้งปีก ทำให้ ความเร็วในการเข้าโค้งสูงขึ้น และปรับปรุงสมรรถนะของ รถยนต์ให้ดีขึ้น

ในการจำลองนี้ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\epsilon$ ร่วมกับระเบียบวิธีปริมาตรสลับเนื่อง มาทำการจำลองการไหลของอากาศรอบรถยนต์หนึ่ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ตรวจสอบกลไกการลด แรงต้านและแรงยกเนื่องจากผลของระยะระหว่างพื้นถนน และพื้นรถ และการลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ สำหรับ ขั้นตอนการวิจัยได้จัดทำดังนี้คือ 1. สรุปแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ต่างๆ ที่ใช้ 2. การกำหนดปัญหา 3. ตรวจสอบ ความสามารถในการทำนายของแบบจำลองการไหลแบบ ปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ร่วมกับระเบียบวิธีต่างดังนี้คือ ระบบวิธีผลต่างอัปวินลำดับหนึ่ง ระบบวิธีผลต่าง เพาเออร์ลือ ระบบวิธีผลต่างอัปวินลำดับสองและระบบ วิธีผลต่างควิก 4. ตรวจสอบผลของระยะระหว่างพื้นถนน และพื้นรถ และการลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ ที่ได้จาก Solver ที่เลือกใช้ และสุดท้าย 5. สรุปผลและเสนอแนะ

2. ทฤษฎี

สมการบังคับของการไหลแบบปั่นป่วนอัดตัวไม่ได้ เขียนได้ดังนี้

Navier-Stokes equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (1)$$

Continuity equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ซึ่งทุกตัวแปรของการไหลสามารถแยกออกเป็น ค่าเฉลี่ย และค่าการสั่นได้ดังนี้

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3)$$

หากสามารถหาคำตอบจากสมการข้างต้นได้จะเป็นคำตอบที่ถูกต้องมากที่สุด ในการคำนวณเชิงตัวเลข ต้องใช้วิธีคำนวณแบบตรง (DNS) ซึ่งสิ้นเปลืองเวลา และทรัพยากรคอมพิวเตอร์มาก ในทางปฏิบัติจึงต้องหา วิธีการอื่นมาช่วยในการแก้สมการนี้ วิธีที่ได้รับความนิยม ในการประมาณการไหลแบบปั่นป่วนคือ การเฉลี่ยของ เรย์โนลด์ (Reynolds Averaging) ซึ่งกำหนดให้ทุกๆ ขนาดของการไหลแบบปั่นป่วนถูกเฉลี่ย และผลของการเฉลี่ยทำให้เกิดตัวแปรที่ไม่รู้ค่า ซึ่งจำเป็นต้องจำลอง เพื่อให้ระบบเป็นสมการปิดที่สามารถหาคำตอบได้ จาก กระบวนการเฉลี่ยจะได้สมการบังคับใหม่ดังนี้คือ

Navier-Stokes equation:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 \bar{u}_i - \rho \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

Continuity equation:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

เรียกสมการข้างต้นนี้ว่าสมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (RANS)

โดยที่ $\tau_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j}$ (6)

τ_{ij} เรียกว่า Reynolds stress tensor

สำหรับการคำนวณ Reynolds stress นี้ร่วมกับ แบบจำลองมาตรฐาน $k-\epsilon$ ได้ขยายความสัมพันธ์ของ เบบัวซิเนส (Boussinesq) ดังนี้

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

ν_t คือ Eddy viscous

จากสมการที่ (7) พบว่ามีตัวแปรไม่รู้ค่าเพิ่มขึ้นมาคือ ν , ซึ่งจำเป็นต้องใช้แบบจำลองความปั่นป่วนมาจำลอง สำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้คือแบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ดังนี้

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \rho \epsilon \quad (8)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (9)$$

ซึ่งมีค่าคงที่ต่างๆ ดังนี้

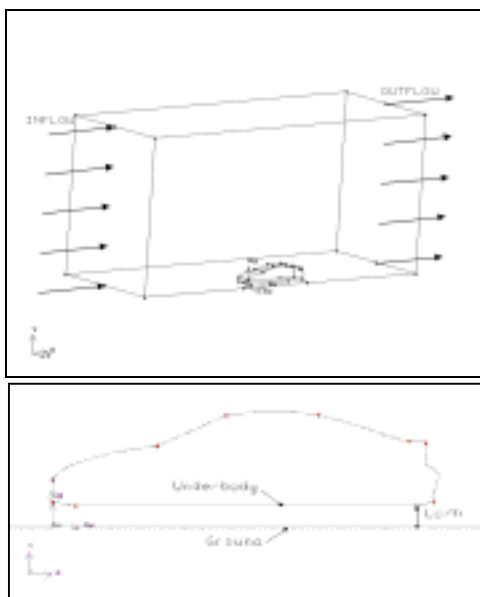
$$C_{1\epsilon} = 1.44 \quad C_{2\epsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

และ Eddy viscosity จำลองโดย

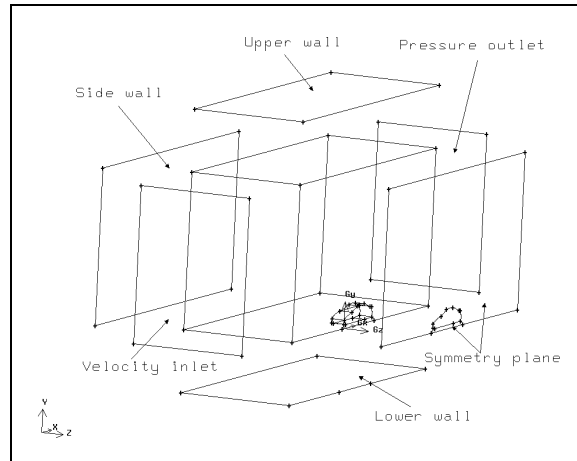
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (10)$$

3. การคำนวณเชิงตัวเลข

กำหนดแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Analytical model) ขนาดสนามการคำนวณเป็นลักษณะกล่องสี่เหลี่ยม ดังแสดงในภาพที่ 1 ระยะความยาวของรถเป็น L ระยะจากด้านอากาศเข้าถึงด้านหน้ารถเป็น $2L$ ด้านท้ายรถถึงทางออกเป็น $3L$ ความสูงจากพื้นถนนถึงผนังด้านบนเป็น $2L$ ระยะด้านข้างตัวรถ (คิดเฉพาะครึ่งคันรถ) เป็น W ระยะจากด้านข้างตัวรถถึงผนังด้านข้างเป็น $9W$ ระยะจากพื้นถนนถึงพื้นรถคือ L_c ระยะความสูงของตัวรถคือ h ใช้ระบบแกนใน 3 มิติ แกนอ้างอิงติดอยู่กับที่



ภาพที่ 1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพที่ 2 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณดังภาพที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศที่ผิวรถยนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของความหนืด (No slip boundary condition)
2. สมมุติให้ความเร็วรถคงที่และคงตัว (Uniform Velocity inlet)
3. ความดันในสนามความเร็วที่ทางออก (Pressure outlet) ไม่ถูกรบกวนด้วยตัวรถ และให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

ในงานวิจัยนี้สมมุติให้เป็นการไหลที่ไม่มีลมปะทะด้านข้าง (Cross wind) ฉะนั้นจึงสามารถพิจารณาการไหลข้ามตัวรถเป็นแบบสมมาตรตามแนวยาวของตัวรถได้ (Symmetry Flow)

4. ที่ระนาบ $Z = 0$ (ระนาบสมมาตร - Symmetry plane) ของแบบจำลองของรถสมมุติให้ของไหลไม่มีการเคลื่อนที่ผ่านระนาบสมมาตรนี้ (ไม่มีฟลักซ์เนื่องจากการพา - Convective flux และไม่มีฟลักซ์เนื่องจากการแพร่ - Diffusive flux)

5. ที่ผนังด้านบน (Upper wall) และด้านข้าง (Side wall) สมมุติเช่นเดียวกับข้อที่ 4 เพื่อลดอิทธิพลของผนังที่มีผลต่อการไหล

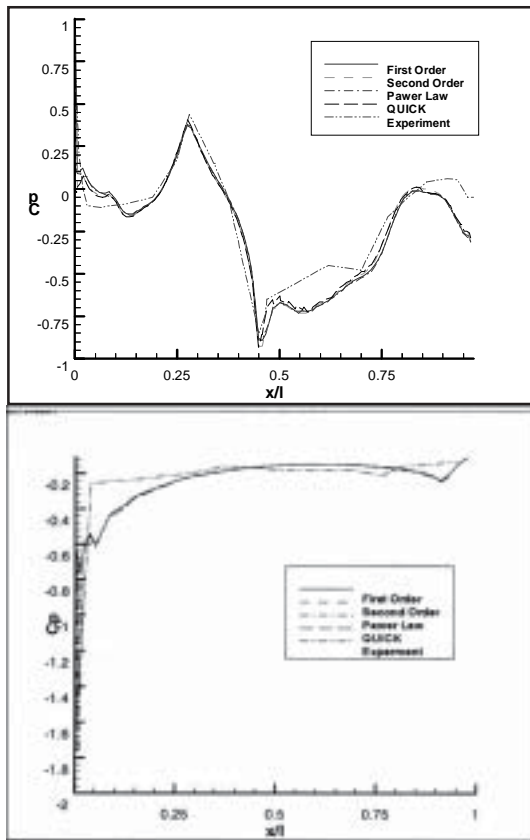
6. ผนังด้านล่าง (Lower wall) หรือพื้นถนน ใช้เงื่อนไข เช่นเดียวกับข้อที่ 4 และสมมุติให้เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับท้องถนน (Slip condition) เนื่องจากการจำลองต้องการให้เสมือนว่ารถเคลื่อนที่เข้าไปยังอากาศหนึ่ง

4. การตรวจสอบความสามารถของ Solver

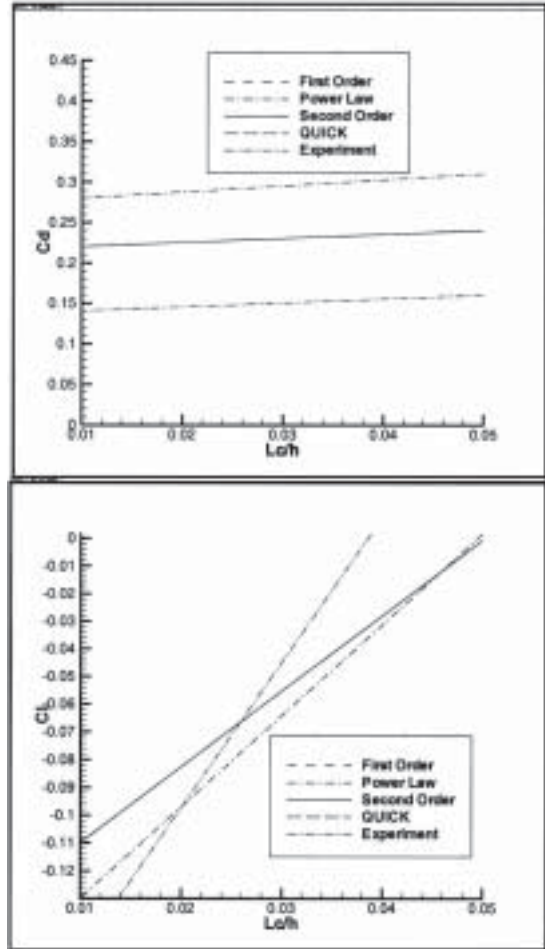
อันดับแรกทำการตรวจสอบความสามารถของ Solver โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม [1] จากภาพที่ 3 จะเห็นว่าความสามารถในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความดัน (CP) ของวิธีต่างๆ มีความใกล้เคียงกันคำนวณที่จำนวนของกริด (Grid) 144,500 เอลิเมนต์ (Element) และลักษณะแนวโน้มของกราฟ จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับการทดลอง สำหรับค่า C_d และ C_l จากการทดลองและที่ $L_c/h = 0.24$ จากการคำนวณในแต่ละระบบวิธีนั้นสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าการคำนวณค่า

ตารางที่ 1 แสดงค่า C_d และ C_l ที่ได้คำนวณในแต่ละระบบ วิธีและผลที่ได้จากการทดลอง ที่ $L_c/h = 0.24$

	1 st order	Power-law	2 nd order	QUICK	Exp.
C_d	3.1E-1	3.1E-1	2.4E-1	2.4E-1	1.6E-1
C_l	1.5E-3	1.5E-3	-7.78E-4	-7.78E-4	6E-2



ภาพที่ 3 การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันคำนวณด้วยวิธีต่างๆ เทียบกับการทดลอง ชาย-ผิวบน (หลังการถ) ขวา-ผิวล่าง (พื้นรถ)



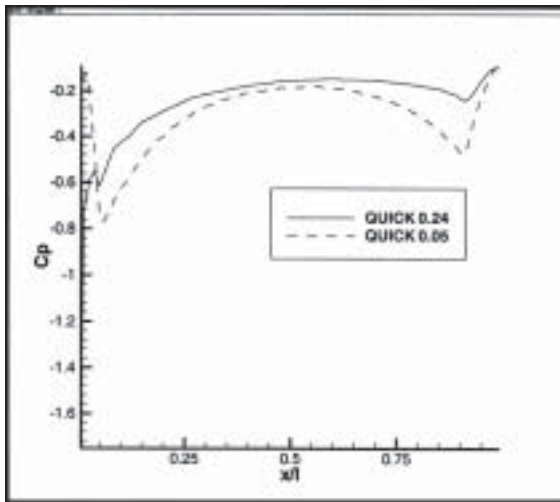
ภาพที่ 4 แสดงค่า C_d และ C_l ที่ได้คำนวณในแต่ละระบบวิธีและผลที่ได้จากการทดลอง

สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยใช้ระบบวิธีผลต่างควิก และผลต่างอัฟวินอันดับสอง ให้ผลการประมาณที่ใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการคำนวณด้วยระบบวิธีผลต่างอัฟวินอันดับหนึ่งและระบบวิธีผลต่างเพาเออร์ลอ ส่วนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจะให้ผลการคำนวณคล้ายกันในทุกๆ ระบบวิธี

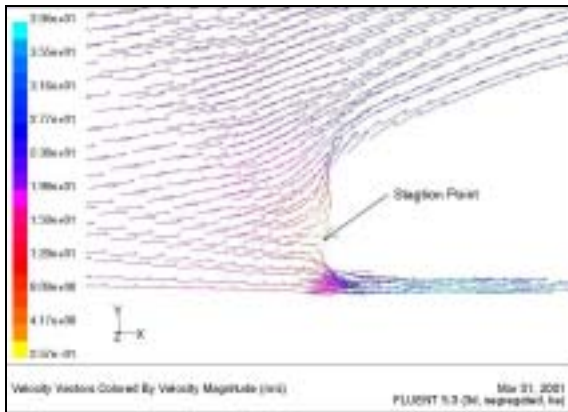
5. ผลที่ได้จากการคำนวณ

5.1 ผลของความสูงระหว่างพื้นรถและพื้นถนน

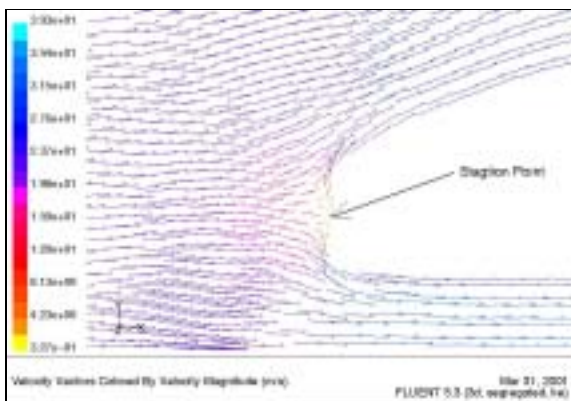
จากภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่าระยะความสูงระหว่างพื้นถนนและพื้นรถมีผลเป็นอย่างมากต่อสัมประสิทธิ์แรงยกและมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านเพียงเล็กน้อย โดยวิธีที่ใช้สามารถประมาณลักษณะแนวโน้มของการลดแรงต้านและแรงยกได้ดีทุกระบบวิธี แต่ระบบวิธีผลต่างควิก และผลต่างอัฟวินลำดับสอง ให้ค่าที่ใกล้เคียงมากกว่าจากผลของการเปรียบเทียบ Solver ข้างต้น ดังนั้นจึงเลือก



ภาพที่ 5 การกระจายตัวของความดันบนพื้นรถที่ $L_c/h = 0.05, 0.24$

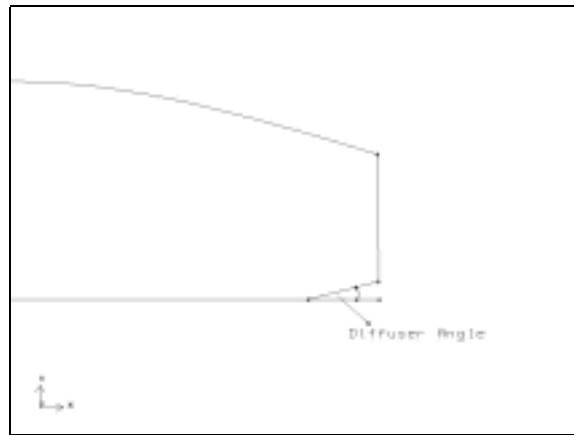


$L_c/h = 0.05$



$L_c/h = 0.24$

ภาพที่ 6 แสดงจุดที่อากาศชนปะทะกับหน้ารถเมื่อค่า L_c/h แตกต่างกัน

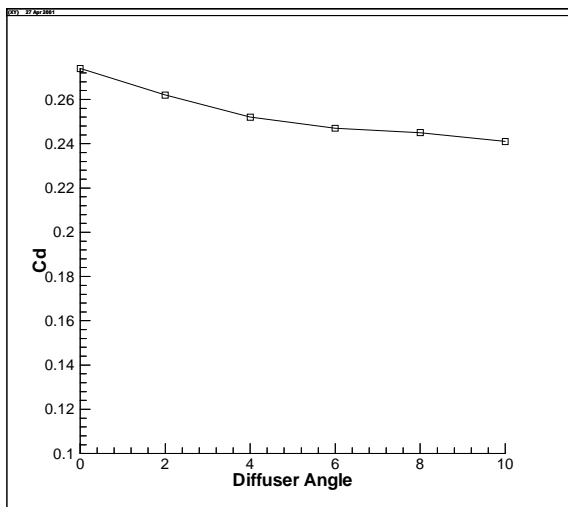
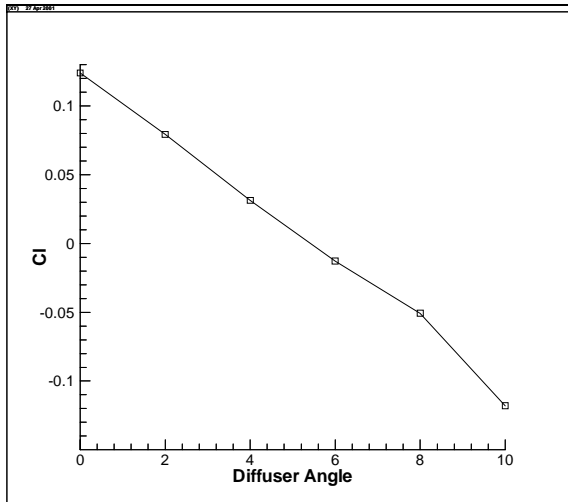


ภาพที่ 7 แสดงแบบจำลองการลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ

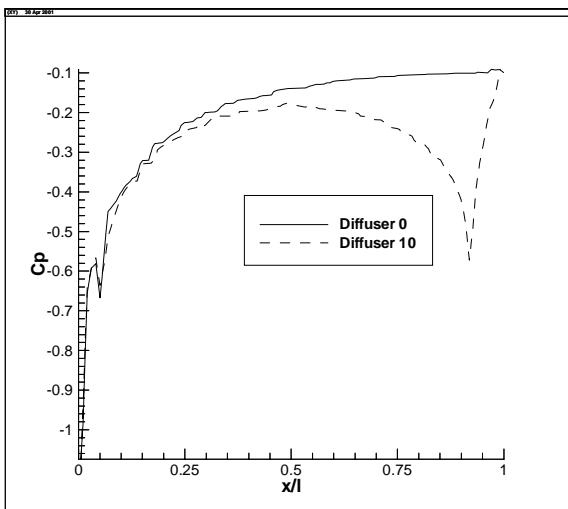
ใช้ระบบวิธีคิวคิกในการตรวจสอบกลไกของการลดแรงต้านแรงยก และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการไหลเนื่องจากอิทธิพลของความสูงจากพื้นถนนที่ระดับความสูง $L_c/h = 0.05$ และ $L_c/h = 0.24$ ในภาพที่ 5 แสดงลักษณะการกระจายตัวของความดันที่พื้นรถที่ $L_c/h = 0.05$ จะให้ค่าต่ำกว่าที่ $L_c/h = 0.24$

เนื่องจากความเร็วของอากาศใต้พื้นรถที่ $L_c/h = 0.05$ สูงกว่า $L_c/h = 0.24$ (พิจารณาจากสมการเบอร์นูลลี) เป็นเหตุให้แรงยกของรถลดลงและยังผลให้พลังงานจลน์จากย่านภายนอก (Outer Region) Boundary Layer ส่งถ่ายเข้าสู่ย่านภายใน (Inner Region) มากขึ้นทำให้เพิ่มโมเมนต์ในการเอาชนะความเค้นเนื่องจากความหนืด (Viscous Stress) ได้สูงขึ้น และส่งผลให้ความดันท้ายรถสูงขึ้นและการไหลที่ใกล้กับพื้นรถราบเรียกว่าเป็นเหตุให้แรงต้านของรถยนต์ลดลง ส่วนผลการคำนวณของการกระจายตัวของความดันที่ผิวบนที่ $L_c/h = 0.05$ และบริเวณช่วงหน้ารถ ($x/l = 0-0.25$) ความดันที่ผิวบนที่ $L_c/h = 0.05$ ต่ำกว่าที่ $L_c/h = 0.24$ เป็นเหตุให้แรงต้านของรถลดลง

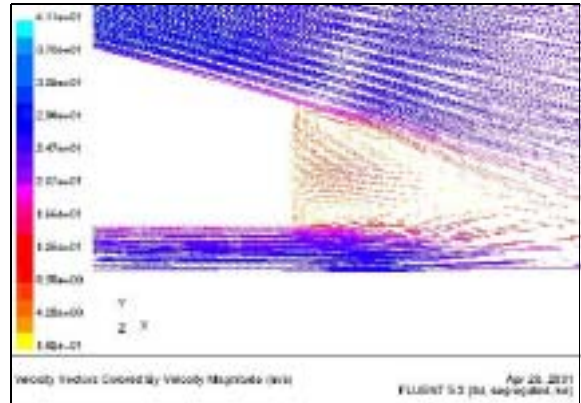
จากลักษณะการไหลที่ระนาบศูนย์กลางที่แสดงดังภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าจุดชนปะทะ (Stagnation Point) ที่ $L_c/h = 0.05$ มีระยะต่ำกว่า $L_c/h = 0.24$ เป็นเหตุให้ความดันที่จุดชนปะทะที่ $L_c/h = 0.05$ ต่ำกว่า $L_c/h = 0.24$ และส่งผลให้กระจายตัวของความดันบริเวณช่วงหน้ารถต่ำลง ที่ $L_c/h = 0.05$ ความดันที่จุดชนปะทะที่ต่ำลงอาจจะได้รับผลมาจากอิทธิพลมาจากความดันต่ำที่พื้นรถ (พลังงานส่วนหนึ่งได้ส่งถ่ายให้ของไหล) และตำแหน่งของจุดชนปะทะเปลี่ยนไป



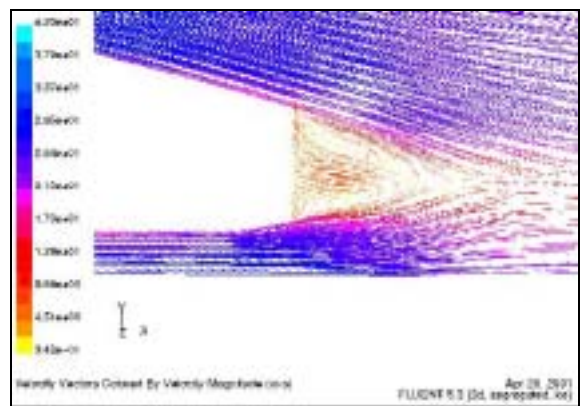
ภาพที่ 8 แสดงอิทธิพลของความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถต่อสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้าน



ภาพที่ 9 แสดงการกระจายของความดันที่ผิวล่าง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 แสดงขอบเขตของเวค (Wake) ที่มุมเอียงขึ้น 0 องศา (ก) และ 10 องศา (ข)

5.2 ผลกระทบของการลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ

ผลจากมุมที่ลาดเอียงขึ้นท้ายรถดังภาพที่ 7 ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีค่าลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน (แรงยกเพิ่มขึ้น) ดังภาพที่ 8 แต่ความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถจะมีผลกระทบกับการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมากกว่าการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมาก จากการคำนวณพบว่าความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถ จะไม่มีผลต่อการกระจายตัวความดันที่ผิวบนของรถยนต์มากนัก แต่จากค่าความดันพื้นรถในกรณีที่ไม่มีกรวยขึ้นของท้ายรถ (0 องศา) จะสูงกว่าในกรณีที่ทำมุม 10 องศา ดังแสดงในภาพที่ 9 เนื่องจากในกรณีที่พื้นด้านท้ายรถทำมุม 10 องศา นั้น บังคับให้เกิดการหักตัวของอากาศซึ่งทำให้ต้องใช้แรง (โมเมนตัม) เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงยกลดลง

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นว่าขอบเขตของเวค (Wake) ที่มุมเอียงขึ้น 10 องศา นั้นมีขนาดเล็กกว่าที่

มุมเอียงเป็น 0 องศา และจากลักษณะของความดันที่พื้นรถต่ำลงเมื่อมุมเอียงมากขึ้น เป็นเหตุให้สัมประสิทธิ์แรงต้าน และสัมประสิทธิ์แรงยกลดลง

5. บทสรุป

การใช้แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ร่วมกับระบบวิธีต่างๆ ให้ผลการคำนวณการกระจายตัวของความดันที่ผิวบน ผิวล่าง สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งมีความสอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลมเป็นอย่างดี และลักษณะของการไหลไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนมาตรฐาน $k-\epsilon$ ร่วมกับระบบวิธีต่างๆ นั้นใช้ตรวจสอบกลไกของการลดแรงต้านแรงยก และลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเปลี่ยนระยะความสูงระหว่างพื้นรถและพื้นถนนได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะมีความผิดพลาดในข้อมูลเชิงปริมาณ

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เป็นเหตุมาจากการขาดแคลนข้อมูลที่ใช้ได้ถูกต้องด้วยกันทั้งนี้ ความไม่ถูกต้องของแบบจำลองของความปั่นป่วน ความผิดพลาดของการแสดงของเค้าโครงของรถยนต์ จำนวนกริดที่ใช้น้อยเกินไป และเงื่อนไขขอบเขตของผนัง

จากผลของความสูงระหว่างพื้นถนนกับพื้นรถ และผลของความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถจะได้ว่าระยะความสูงระหว่างพื้นถนนกับพื้นรถที่น้อยลงและความลาดเอียงขึ้นของพื้นท้ายรถที่มากขึ้น ควรนำมาใช้ในการออกแบบรถยนต์ เพื่อให้มีลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ที่ดี

สัญลักษณ์

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{\mu}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	ค่าคงที่จากการทดลอง
L	ความยาวรถยนต์
W	ความกว้างรถยนต์
P	Turbulence production

\bar{U}	Mean velocity
u'	Fluctuating velocity
\bar{P}	Mean pressure
k	Turbulence kinetic energy

Greek Symbols

δ_{ij}	Kronecker delta tensor
ϵ	dissipation rate
ϕ'	Fluctuating variable
$\bar{\phi}$	Mean variable
μ	Dynamic viscosity
μ_t	Eddy viscosity
τ_{ij}	Reynolds Stress tensor

Subscripts

i, j, k	Cartesian index
t	Turbulence

Superscripts and Overbars

'	Fluctuating quantity
—	Mean quantity

เอกสารอ้างอิง

1. Takahide Nouzawa, et al. *Unsteady-Wake Analysis of the Aerodynamic Drag of a Notchback Model with Critical Afterbody Geometry*. SAE 920202, February 1992.
2. Nariaki Horinouchi, et al. *Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System*. SAE 950628, February 1995.
3. Joseph Katz and Lee Dykstra. *Effect of Wing/Body Interaction on the Aerodynamic of Two Generic Racing Cars*. SAE 920202, February 1992.