

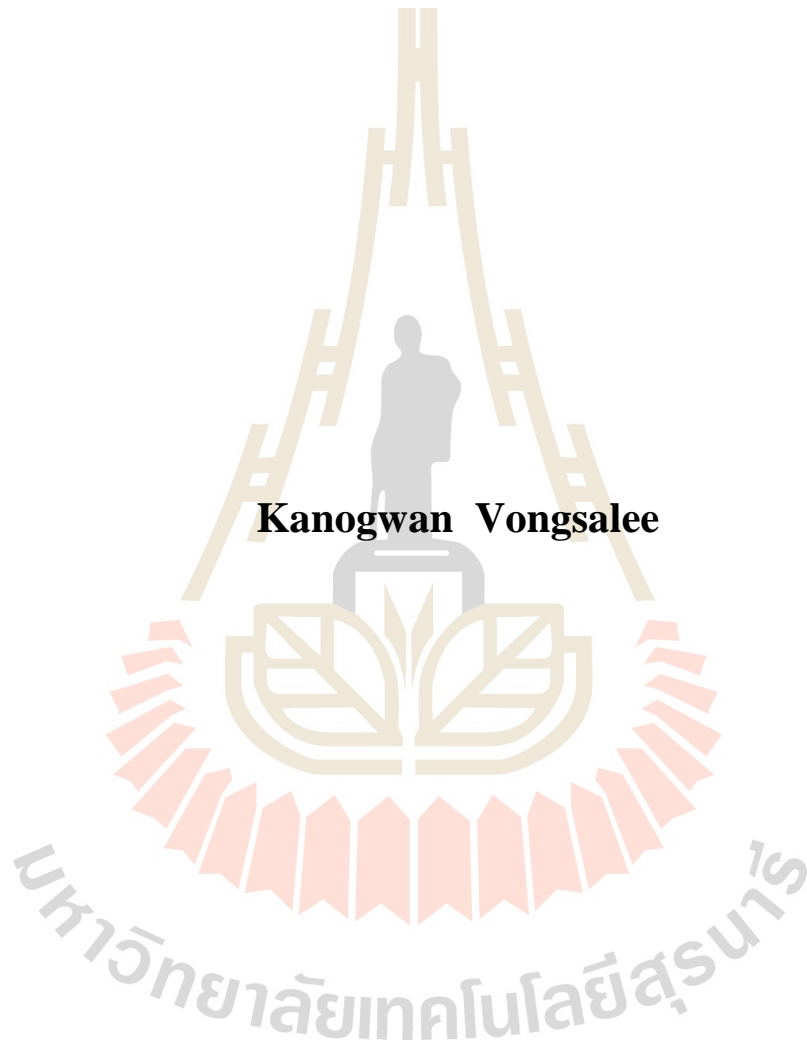
การออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศสำหรับติดตั้ง  
บนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง



นางสาวกนกวรรณ วงศ์สาดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2560

**DESIGN OF DRAG REDUCTION DEVICE FOR  
INSTALLING ON INTERCITY BUS BODY**



**Kanogwan Vongsalee**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

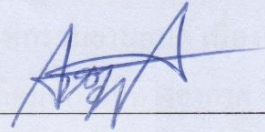
**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2017**

# การออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



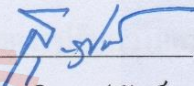
(ผศ. ดร. จตุพร ทองศิริ)

ประธานกรรมการ



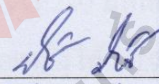
(ผศ. ดร. กิรติ สุกข์เกษม)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



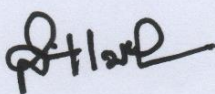
(ผศ. ดร. สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ



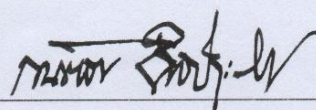
(นายเสกฐาวรช สุจริตกวัตสกุล)

กรรมการ



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กนกวรรณ วงศ์สาตี : การออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง (DESIGN OF DRAG REDUCTION DEVICE FOR INSTALLING ON INTERCITY BUS BODY) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์, 94 หน้า.

การลดแรงต้านอากาศเป็นเป้าหมายหลักสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากแรงต้านส่งผลโดยตรงต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์และก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ โดยปกติแรงต้านเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับรูปทรงของรถที่ถูกออกแบบ ในปัจจุบันได้มีผลการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการลดแรงต้านของรถมากมายทั้งรถยนต์ รถบรรทุก และรถโดยสาร จนได้หลักการและวิธีการลดแรงต้านรวมถึงอุปกรณ์ปรับแต่งอากาศพลศาสตร์ของรถประเภทต่าง ๆ อย่างไรก็ตามสำหรับรถโดยสารพบว่าการศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การปรับเปลี่ยนรูปทรงของรถโดยสารซึ่งมีข้อจำกัดสำหรับภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย เนื่องจากโรงงานที่ผลิตมักมีรูปแบบของลำตัวรถโดยสารที่ชัดเจนอยู่แล้ว ดังนั้นการปรับเปลี่ยนรูปทรงของรถโดยสารจึงส่งผลกระทบต่อสายการผลิต งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง เพื่อลดแรงต้านอากาศด้วยการติดตั้ง Vortex generators (VG) การศึกษามุ่งหาขนาดที่เหมาะสมด้วยการปรับความยาวและระยะห่างระหว่าง VG โดยใช้กระบวนการทางซีเอฟดี ด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 ผลการศึกษาพบว่ารถโดยสารระหว่างเมืองมีสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.387 ภายหลังจากติดตั้ง VG ขนาดความสูง 110 มิลลิเมตร ความยาว 220 มิลลิเมตรและระยะห่างระหว่าง VG 220 มิลลิเมตรที่หลังคาทำรถสามารถลดแรงต้านลงได้ 8.53 เปอร์เซ็นต์ ช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 4.19 เปอร์เซ็นต์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา กนกวรรณ วงศ์สาตี  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Dr.

KANOGWAN VONGSALEE : DESIGN OF DRAG REDUCTION DEVICE

FOR INSTALLING ON INTERCITY BUS BODY. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA, Ph.D., 94 PP.

BUS/ FLOW SIMULATION/ DRAG REDUCTION

The aerodynamic drag reduction is a major goal in automotive industries because of its directly affect to fuel consumption and emission. Normally, drag is directly relate to vehicle designed shape. In present, there are many studies on drag reduction methods for various vehicle such as car, truck, and bus leading to obtaining of concept and method to reducing the drag including various kind of aero parts. However, for bus typical studies were focus on shape design to reduce drag, which have limit for applying in Thailand industries because of their shape are specific for each bus type. Therefore, changing bus shape has to be effect to production line. This research is aims to study airflow behavior over Intercity bus body in order to reduce aerodynamic drag by installing of vortex generators (VG). The study aims to find the optimum size of VG by using CFD method with ANSYS Fluent 14.0. The results found that drag coefficient of Intercity bus without VG is equal to 0.387. After installing the VG with the optimal size of 100 mm height, 220 mm length and 220 mm spacing at rear-end roof position. It is found that drag is reduced by 8.53 percent which has results in 4.19 percent reduction in fuel saving.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Kanogwan

Advisor's Signature K. Suluk

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้เลยหากไม่ได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุกัญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสในการศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังเป็นผู้ให้ความรู้ คอยให้คำแนะนำ ซึ่งแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และคอยกระตุ้นให้ผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำงานวิจัยต่อไป

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับโอกาสในการศึกษา และทุนการศึกษา

ขอขอบคุณคุณสมภพ มหาโคตร นายช่างเทคนิค ประจำศูนย์เครื่องมือ ฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ

ขอขอบคุณคณาจารย์ในสาขาวิชา ที่คอยติดตามการดำเนินงาน ให้กำลังใจและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ ๆ เลขานุการ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการเตรียมเอกสารต่าง ๆ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ ๆ ในกลุ่มวิจัยกลศาสตร์เชิงคำนวณ รวมถึงพี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในการเรียนและการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

กนกวรรณ วงศ์สาลี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ปรัชณวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 รถโดยสาร .....	5
2.1.1 คำจำกัดความรถโดยสาร .....	5
2.1.2 มาตรฐานของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร .....	5
2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD).....	9
2.2.1 กระบวนการซีเอฟดี .....	10
2.2.2 ขั้นตอนของซีเอฟดี .....	11
2.3 ทฤษฎีการไหล.....	12
2.3.1 ชนิดของการไหล .....	12
2.3.2 ชั้นซิดผิว (Boundary layer).....	16
2.3.3 สมการควบคุมการไหล .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	แบบจำลองการไหลปั่นป่วน .....	18
2.4	แรงต้านของรถโดยสาร .....	23
2.4.1	ชนิดของแรงต้าน .....	24
2.5	อากาศพลศาสตร์ยานยนต์ .....	25
2.5.1	แรงยก (Lift) .....	25
2.5.2	แรงต้านอากาศ (Aerodynamic Drag) .....	26
2.6	การลดแรงต้านอากาศ .....	29
2.6.1	การปรับปรุงรูปทรงรถโดยสาร .....	30
2.6.2	การติดอุปกรณ์ลดแรงต้าน .....	32
2.7	อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสาร .....	34
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	
3.1	การตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ .....	37
3.2	การจำลองการไหลผ่านรถโดยสาร .....	42
3.2.1	การเขียนแบบรถโดยสารและเตรียมไฟล์สำหรับจำลองการไหล .....	43
3.2.2	การสร้างกริด (Meshing) และทดสอบความเป็นอิสระของกริด .....	45
3.2.3	การตั้งค่า .....	47
3.3	ออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ .....	50
3.4	จำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ติดอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ .....	54
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล</b>	
4.1	ผลการเลือกโมเดลสำหรับจำลองการไหล .....	55
4.2	ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง .....	59
4.3	ผลจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ .....	66
4.3.1	ผลการออกแบบความสูงเริ่มต้นของ VG .....	67
4.3.2	ผลการออกแบบระยะห่างของ VG .....	67



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.3 ผลการออกแบบความยาวของ VG.....	69
4.3.4 ผลการออกแบบความสูงของ VG .....	70
4.3.5 ผลการออกแบบตำแหน่งติดตั้ง VG .....	71
4.4 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการติดตั้ง VG .....	71
4.5 เปรียบเทียบการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง .....	78
<b>5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
รายการอ้างอิง .....	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	86
ประวัติผู้เขียน .....	94

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	จำนวนรถโดยสารที่จดทะเบียนสะสมทั่วประเทศ ตั้งแต่ปี 2554 – 2559 .....1
2.1	ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $k - \epsilon$ .....19
2.2	ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน $SST k - \omega$ ....23
2.3	หลักการลดแรงต้านอากาศประเภทต่าง ๆ.....30
3.1	เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่าน Ahmed body .....40
3.2	เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง.....46
3.3	การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง .....47
4.1	สัมประสิทธิ์แรงต้านของ Ahmed Body จากการทดลองและการจำลองการไหลบนคอมพิวเตอร์ด้วยแบบจำลองการไหลต่าง ๆ.....52
4.2	สัดส่วนแรงต้านอากาศที่ส่วนต่าง ๆ ของรถโดยสาร .....62
4.3	ผลแรงต้านจากการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติดตั้ง VG ตำแหน่งต่าง ๆ .....64
4.4	สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อมีการปรับระยะห่างการติดตั้ง VG...67
4.5	สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อมีการปรับความยาวของ VG.....68
4.6	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของ VG ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน .....69
4.7	เปรียบเทียบแรงต้านแต่ละส่วนของรถโดยสารระหว่างเมือง ทั้งแบบไม่ติด VG และแบบติด VG.....74
4.8	ค่าคงที่ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสาร ...76

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	รถโดยสารพื้นต่ำ รถโดยสารระหว่างเมือง และรถโดยสารสองชั้น (จากซ้ายไปขวา) .....2
2.1	ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 1 และ 2 ก, ข .....6
2.2	ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 2 ค, ง, จ และ 3 ค, ง, จ, ฉ .....7
2.3	ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 4 .....8
2.4	ขั้นตอนของซีเอฟดี .....12
2.5	การไหลแบบราบเรียบ (บน) และปั่นป่วน (ล่าง) .....14
2.6	การไหลอุดมคติไม่เกิดการแยกไหล (ซ้าย) และการแยกไหลของของไหลผ่านทรงกระบอก (ขวา) .....15
2.7	ชั้นซิกมิตของการไหลผ่านแผ่นราบ .....16
2.8	การเติบโตของชั้นซิกมิตบนหลังการรถโดยสาร (Barnard, 1996) .....17
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วรถกับแรงต้านอากาศและแรงต้านการหมุนของล้อ .....24
2.10	สัดส่วนระหว่างแรงต้านความดันและแรงเสียดทานผิวของรถแต่ละประเภท .....27
2.11	เปรียบเทียบระหว่างรถสองชนิดที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านต่างกัน แต่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน พร้อมทั้งหลักการหาพื้นที่หน้าตัดของรถ .....28
2.12	สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถประเภทต่าง ๆ .....29
2.13	รถสองคันที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน .....30
2.14	การออกแบบหน้ารถเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Barnard, 1996) .....31
2.15	การปรับปรุงรูปทรงของรถโดยสารเพื่อลดแรงต้าน .....32
2.16	Boat tail .....32
2.17	การติด flap ทุกขอบของผิวด้านท้ายของ Ahmed body .....33
2.18	อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะประเภทต่าง ๆ (ไม่ลืต่อแกลลอน) .....35
3.1	ขนาดและรูปร่างของ Ahmed Body (มิลลิเมตร) .....38
3.2	ลักษณะโดเมนและการกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับการไหลผ่าน Ahmed Body .....38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3	กริดสำหรับการไหลผ่าน Ahmed body (ซ้าย) และกริดแบบปริซึมจำนวน 5 ชั้น ถัดจากผิวของ Ahmed body (ขวา).....39
3.4	ค่า $y^+$ ของแบบจำลอง Ahmed body.....40
3.5	แผนผังแสดงกระบวนการทาง CFD ของการวิเคราะห์การไหล.....43
3.6	รูปทรงรถโดยสารระหว่างเมือง (ซ้าย) และแบบจำลอง 3 มิติสำหรับจำลองการไหลผ่านรถ โดยสาร (ขวา).....43
3.7	ขนาดของรถโดยสารระหว่างเมือง.....44
3.8	ขนาดโดเมนของอากาศรอบรถโดยสาร.....44
3.9	การกำหนดขนาดกริดให้เล็กเฉพาะบริเวณที่สนใจ.....45
3.10	กริดแบบปริซึมจำนวน 5 ชั้น นับจากชั้นชิดผิวของรถโดยสาร.....46
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิทธิพลและสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสาร ....47
3.12	เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง.....48
3.13	ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ Vortex generator.....50
3.14	ขอบเขตของการออกแบบความสูงของ VG.....51
3.15	การติดตั้ง Vortex generator บนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมืองแต่ละกรณี.....53
3.16	กริดแบบปริซึมจากชั้นชิดผิวของรถโดยสารระหว่างเมืองบริเวณ VG.....54
4.1	โปรไฟล์ความเร็วของอากาศที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed body.....51
4.2	เส้นการไหลที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed.....57
4.3	คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed (บน) และคอนทัวร์ของ ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed (ล่าง).....57
4.4	สัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวของ Ahmed body ที่ระนาบกึ่งกลาง.....58
4.5	เส้นการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ระนาบกึ่งกลางของโดเมนอากาศจาก มุมมองด้านข้าง (บน) และจากมุมมองด้านบน (ล่าง).....59
4.6	เวกเตอร์ความเร็วของอากาศท้ายรถโดยสารที่ระนาบกึ่งกลางของโดเมนการไหล.....60
4.7	คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหลของรถโดยสาร (บน) และคอนทัวร์ ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหลของรถโดยสาร (ล่าง).....61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	คอนทัวร์ความดันบนผิวรถโดยสาร (ซ้าย) ด้านหน้า และ (ขวา) ด้านหลังสำหรับการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง .....59
4.9	การกระจายความดันบริเวณหลังคาและใต้ท้องรถที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสาร .....63
4.10	การกระจายความดัน (บน) ที่ผิวหน้า และ (ล่าง) ด้านหลัง ของรถโดยสารระหว่างเมือง...64
4.11	สัดส่วนของแรงต้านความดันที่กระทำบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง .....66
4.12	ความสูงออกแบบเริ่มต้นของ VG .....67
4.13	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อปรับระยะห่าง (s) ของการติดตั้ง VG.....68
4.14	เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อปรับความยาว (l) ของ VG .....69
4.15	เส้นการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG .....72
4.16	คอนทัวร์ความเข้มข้นการปั่นป่วนที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนอากาศของการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG.....73
4.17	คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG .....73
4.18	เส้นการไหลของอากาศที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG .....74
4.19	คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG .....75
4.20	คอนทัวร์ความดันของรถโดยสารระหว่างเมืองจากมุมมองด้านหลังรถ (ซ้าย) แบบไม่ติด VG และ (ขวา) แบบติด VG.....76
4.21	การกระจายความดันที่ผิวด้านหลังรถโดยสารระหว่างเมือง.....77
4.22	แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองที่ความเร็วต่าง ๆ .....78

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A$	=	พื้นที่หน้าตัด
$\rho$	=	ความหนาแน่น
$C_d$	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
$C_f$	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิว
$C_l$	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
$C_p$	=	สัมประสิทธิ์ความดัน
$C_f$	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ผิว
$C_l$	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
$C_p$	=	สัมประสิทธิ์ความดัน
$C_r$	=	สัมประสิทธิ์ความเค้นเฉือน
Re	=	เลขเรย์โนลด์
$L$	=	ความยาว
$u$	=	ความเร็วในแนวแกน $x$
$v$	=	ความเร็วในแนวแกน $y$
$w$	=	ความเร็วในแนวแกน $z$
$G_k$	=	ค่าการแพร่ของพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)
$\varepsilon$	=	อัตราการแยกสลาย (Turbulent Dissipation rate)
$\mu$	=	ความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)
$\nu$	=	ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity)
$\mu_t$	=	ความหนืดการปั่นป่วน (Turbulent Viscosity)
$C_\mu$	=	สัมประสิทธิ์ความหนืด
$k$	=	พลังงานจลน์ความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)
$t$	=	เวลา

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การขนส่งทางบกในปัจจุบัน เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ที่ต้องการเดินทาง โดยมีทั้งการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล หรือการใช้บริการของรถโดยสารสาธารณะ ซึ่งการเดินทางโดยใช้รถโดยสารสาธารณะเป็นวิธีที่นิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นทางเลือกที่สะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย และประหยัดค่าใช้จ่าย ดังจะเห็นได้จากเมื่อเปรียบเทียบสถิติการใช้สถานีขนส่งผู้โดยสารที่กรมการขนส่งทางบกกำกับดูแล ทั่วประเทศ ในไตรมาสที่ 2 (มกราคม - มีนาคม) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 พบว่า สถิติการใช้สถานีขนส่งผู้โดยสารเพิ่มขึ้นทั้งจำนวนเที่ยว จำนวนผู้โดยสารและจำนวนเงินค่าบริการ โดยจำนวนเที่ยวเพิ่มขึ้น ร้อยละ 4.65 จำนวนผู้โดยสารเพิ่มขึ้น ร้อยละ 0.52 และจำนวนเงินค่าบริการ เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.19 (กองแผนงาน กลุ่มสถิติการขนส่ง, 2557) ประกอบกับข้อมูลจำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 จำนวนรถโดยสารที่จดทะเบียนสะสมทั่วประเทศ ตั้งแต่ปี 2554 - 2559

ปี พ.ศ.	2559	2558	2557	2556	2555	2554
รถโดยสาร ประจำทาง	83,803	85,758	86,441	87,514	88,902	89,085
รถโดยสาร ไม่ประจำทาง	60,992	55,130	46,536	40,843	37,467	34,824
รถโดยสาร ส่วนบุคคล	12,220	11,969	11,796	11,490	11,240	11,064
รวม (คัน)	157,015	152,857	144,773	139,847	137,609	134,973

รถโดยสารที่ใช้ในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ รถโดยสารพื้นต่ำ (Low Floor) สำหรับการขนส่งระยะสั้นในเมือง เช่นรถโดยสารของ ขสมก. รถโดยสารระหว่างเมือง (Intercity Bus) สำหรับการขนส่งระหว่างจังหวัดซึ่งเป็นรถโดยสารขนาดชั้นครึ่ง และรถโดยสารสองชั้น (Double Decker Bus) เช่น รถโดยสารนำเที่ยว เป็นต้น และในส่วนของภาคอุตสาหกรรม การต่อรถโดยสารในประเทศไทย ประกอบด้วย 3 กลุ่มผู้ประกอบการใหญ่ได้แก่ บริษัทอู่เชิดชัย

อุตสาหกรรมจำกัด จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นผู้ต่อตัวถังรถโดยสารรายใหญ่ที่สุดในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีกำลังการผลิตรถโดยสาร 1,200 – 1,500 คัน/ปี (ยุทธศักดิ์ คณาสวัสดิ์, 2552) บริษัทพานทองกลการจำกัด จ.ฉะเชิงเทรา และกลุ่มต่อตัวถังรถยนต์บ้านโป่ง จ.ราชบุรี ในสัดส่วนการผลิตแต่ละ 30 % และผู้ประกอบการรายย่อยอื่น ๆ อีก 10% โดยประมาณ ซึ่งกลุ่มต่อตัวถังรถยนต์บ้านโป่ง จ.ราชบุรี มีผู้ประกอบการในเครือมากกว่า 20 บริษัท



รูปที่ 1.1 รถโดยสารพื้นต่ำ รถโดยสารระหว่างเมือง และรถโดยสารสองชั้น (จากซ้ายไปขวา)

เมื่อมีความต้องการใช้รถโดยสารมากขึ้น น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับใช้ในการขับเคลื่อนรถก็ถูกใช้เพิ่มขึ้นตามปริมาณรถที่มากขึ้น ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงก็แปรผันตามกำลังของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถเพื่อเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หากมีแรงต้านกระทำกับรถในปริมาณมาก เครื่องยนต์ก็ต้องใช้กำลังมากขึ้นในการเอาชนะแรงต้านเหล่านั้น ดังนั้นหากสามารถลดแรงต้านที่กระทำกับรถได้ก็จะส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลงด้วย และยิ่งในปัจจุบันปริมาณน้ำมันดิบที่มีนั้นลดน้อยลงเรื่อยๆ หากเราสามารถลดปริมาณการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงลงได้ จะช่วยให้เรามีน้ำมันใช้นานขึ้น

แรงต้านที่กระทำกับรถโดยสารมาจากหลายส่วนด้วยกัน ทั้งแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ แรงต้านทางชัน รวมถึงแรงต้านความเฉื่อยขณะเร่งเครื่องยนต์ แต่หากพิจารณารถโดยสารขณะเคลื่อนที่บนทางระดับด้วยความเร็วคงตัวแล้ว แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถจะมาจาก 2 ส่วน คือแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ ซึ่งที่ความเร็วมากกว่า 65-80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านอากาศจะมีความโดดเด่นกว่าแรงต้านการหมุนของล้อมาก (Barnard, 1996) หรือคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 60% ของแรงต้านทั้งหมด (Pamoti, 2012) ดังนั้นการออกแบบรถโดยสารที่มีแรงต้านอากาศน้อย หรือการออกแบบรูปทรงเพื่อลดแรงต้านอากาศจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่วิศวกรให้ความสนใจเป็นอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วรถโดยสารนั้นถูกออกแบบโดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ รูปทรงของรถ ความสบายของผู้โดยสาร และอากาศพลศาสตร์ ทั้งนี้การออกแบบต้องอยู่ภายใต้ระเบียบข้อบังคับของกรมการขนส่งทางบก โดยทั่วไปรูปทรงของรถโดยสารมักถูก



ออกแบบให้ตรงกับความต้องการของลูกค้า ภายหลังจากออกแบบรถแล้ว มักจะมีการสร้างต้นแบบรถเพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติของรถ ไม่ว่าจะเป็น การทดสอบโครงสร้างรถ ความแข็งแรง เสถียรภาพของรถ ทดสอบการลาดเอียง ส่วนด้านอากาศพลศาสตร์ก็มักมีการทดสอบการไหลของอากาศผ่านตัวรถโดยสารเช่นกัน เนื่องจากพฤติกรรมการไหลของอากาศส่งผลต่อเสียงและแรงที่กระทำกับตัวรถ แต่การทดสอบรถด้วยการสร้างรถต้นแบบทุกครั้งเป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนสูง เนื่องจากเมื่อทดสอบแล้วต้องมีการปรับปรุงและนำมาทดสอบใหม่ ซ้ำไปเรื่อย ๆ ดังนั้นจึงมีการนำวิธีทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics : CFD) เข้ามาใช้ ซึ่งวิธีการนี้จะใช้ต้นทุนต่ำกว่าการสร้างแบบจำลองจริง ทั้งนี้ความถูกต้องของวิธีการนี้ก็ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต สมมติฐาน และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ถูกป้อนเข้าไป

แม้ว่าในปัจจุบัน การออกแบบ โดยใช้เทคนิคด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์แล้วก็ตาม แต่สำหรับรถโดยสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่เน้นศึกษาเรื่องการออกแบบรูปทรงเพื่อลดแรงต้านอากาศ ซึ่งพบว่าในภาคอุตสาหกรรมไทยมีการนำไปประยุกต์ใช้จริงค่อนข้างน้อย เนื่องจากรถโดยสารแต่ละรุ่นที่ถูกผลิตออกมามักมีขนาด หรือรูปแบบของลำตัวรถโดยสารที่ชัดเจนอยู่แล้ว การปรับเปลี่ยนรูปทรงของลำตัวรถถือเป็นเรื่องที่กระทบกับสายการผลิตค่อนข้างมาก ไม่ตอบโจทย์ภาคอุตสาหกรรมเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเรื่องการออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารเพื่อลดแรงต้านอากาศซึ่งมีส่วนมากกว่าแรงต้านประเภทอื่น สำหรับรถโดยสารระหว่างเมือง โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 จำลองการไหลที่สภาวะคงตัว ขณะรถเคลื่อนที่บนพื้นระดับด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ความเร็วจำกัดตาม พรบ.จราจรทางบก พ.ศ. 2522) ผลการวิจัยนี้จะช่วยให้ได้รูปแบบของอุปกรณ์เสริมที่ติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารเพื่อช่วยลดแรงต้าน นำไปสู่การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงและลดการปล่อยมลภาวะทางอากาศเนื่องจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง ซึ่งเป็นรถโดยสารมาตรฐาน 1 ขนาดความกว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ  $2.5 \times 12 \times 3.8$  เมตร ตามลำดับ

1.2.2 เพื่อออกแบบอุปกรณ์เสริมที่ใช้ติดตั้งบนลำตัวรถเพื่อช่วยลดแรงต้านของอากาศที่กระทำต่อรถโดยสารระหว่างเมือง

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 จำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง ขณะวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ความเร็วจำกัดตาม พรบ. จราจรทางบก พ.ศ. 2522)

1.3.2 จำลองการไหลแบบคงตัว

1.3.3 วิเคราะห์การไหลบนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน ( $SST k-\omega$ ,  $k-\epsilon$ ) ใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 จำลองการไหลแบบสามมิติ

1.3.4 ไม่พิจารณาลมขวาง (Cross wind) ที่กระทำกับลำตัวรถโดยสารขณะเคลื่อนที่

1.3.5 ตรวจสอบความถูกต้องกับกรณีศึกษา Ahmed body

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 พฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศที่เกิดขึ้นกับรถโดยสาร

1.4.2 อุปกรณ์เสริมสำหรับลดแรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมือง

1.4.3 แนวทางสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เสริม เพื่อช่วยลดแรงต้านของลำตัวรถโดยสารปรับอากาศ

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมการใช้และแรงต้านที่กระทำกับรถโดยสารระหว่างเมือง เพื่อออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารนั้น ผู้วิจัยต้องทราบข้อมูลของรถโดยสารที่ทำการศึกษา ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องของทฤษฎีการไหล แรงทางอากาศพลศาสตร์ที่กระทำกับรถโดยสาร และการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับทำนายการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง ดังหัวข้อต่อไปนี้

#### 2.1 รถโดยสาร

รถโดยสาร หรือที่นิยมเรียกกันว่า รถเมล์ เป็นระบบขนส่งมวลชนระบบหนึ่งที่ทำให้บริการบนถนน โดยมีลักษณะเป็นรถขนาดใหญ่ที่บรรทุกผู้โดยสารเป็นจำนวนมาก โดยกำหนดเส้นทางให้บริการ และมีการเก็บค่าโดยสารโดยวิธีต่าง ๆ กันไป สำหรับในประเทศไทย พบว่า รถโดยสารที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้ 3 ประเภท ได้แก่ รถโดยสารพื้นต่ำ (Low Floor) รถโดยสารระหว่างเมือง (Intercity Bus) และรถโดยสารสองชั้น (Double Decker)

##### 2.1.1 คำจำกัดความรถโดยสาร

รถโดยสารประจำทาง หมายถึง รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารเพื่อสัณจ้างตามเส้นทางที่กำหนด

รถโดยสารไม่ประจำทาง หมายถึง รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารเพื่อสัณจ้างโดยไม่จำกัดเส้นทาง

รถโดยสารส่วนบุคคล หมายถึง รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารเพื่อการค้าหรือธุรกิจของตนเองซึ่งบรรทุกผู้โดยสารได้ตั้งแต่ 12 ที่นั่งขึ้นไป และมีน้ำหนักรถเกินกว่า 1,600 กิโลกรัมขึ้นไป

##### 2.1.2 มาตรฐานของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร

รถโดยสาร คือ “รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร” ตามกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบกซึ่งกฎกระทรวงฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2524) ออกตามความในพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2522 ได้แบ่งประเภทรถโดยสารตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 7 มาตรฐาน ซึ่งในแต่ละมาตรฐาน

สามารถแบ่งย่อยออกเป็นมาตรฐาน ก – จ ซึ่งเป็นการระบุจำนวนที่นั่ง ผู้โดยสารยืน เครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องขยายเสียง ฯลฯ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

#### มาตรฐาน 1 รถปรับอากาศพิเศษ

มาตรฐาน 1 ก มีที่นั่งผู้โดยสารแยกจากห้องขับรถ จัดวางที่นั่งผู้โดยสารขนานกับความกว้างของตัวรถไม่เกินแถวละ 3 ที่นั่ง มีที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ห้องสุขภัณฑ์และที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ไม่มีที่ขึ้น

มาตรฐาน 1 ข มีที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ห้องสุขภัณฑ์และที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ไม่มีที่ขึ้น

#### มาตรฐาน 2 รถปรับอากาศ

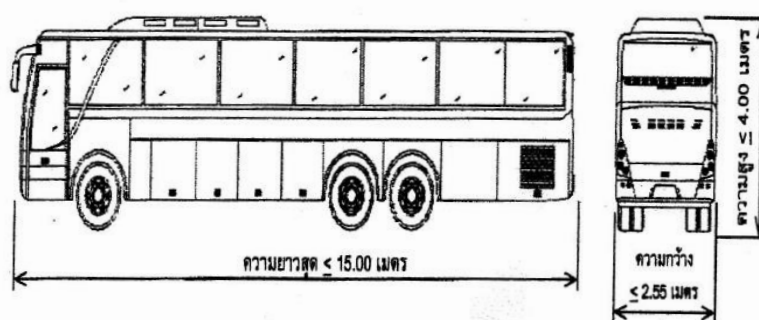
มาตรฐาน 2 ก มีที่นั่งผู้โดยสารเกิน 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ส่วนที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียงและประชาสัมพันธ์ จะมีหรือไม่มีก็ได้ ไม่มีที่ขึ้น

มาตรฐาน 2 ข มีที่นั่งผู้โดยสารเกิน 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์และที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ส่วนที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียงและประชาสัมพันธ์ จะมีหรือไม่มีก็ได้ มีที่ขึ้น

มาตรฐาน 2 ค มีที่นั่งผู้โดยสาร 21 - 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ส่วนที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียงและประชาสัมพันธ์ จะมีหรือไม่มีก็ได้ ไม่มีที่ขึ้น

มาตรฐาน 2 ง มีที่นั่งผู้โดยสาร 21 - 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์และที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ส่วนที่เก็บสัมภาระ อุปกรณ์ให้เสียงและประชาสัมพันธ์ จะมีหรือไม่มีก็ได้ มีที่ขึ้น

มาตรฐาน 2 จ มีที่นั่งผู้โดยสารไม่เกิน 20 ที่นั่ง (ประเภทรถตู้โดยสาร)



รูปที่ 2.1 ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 1 และ 2 ก, ข

#### มาตรฐาน 3 รถที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศ

มาตรฐาน 3 ก มีที่นั่งผู้โดยสารเกิน 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และที่เก็บสัมภาระ มีที่ขึ้น

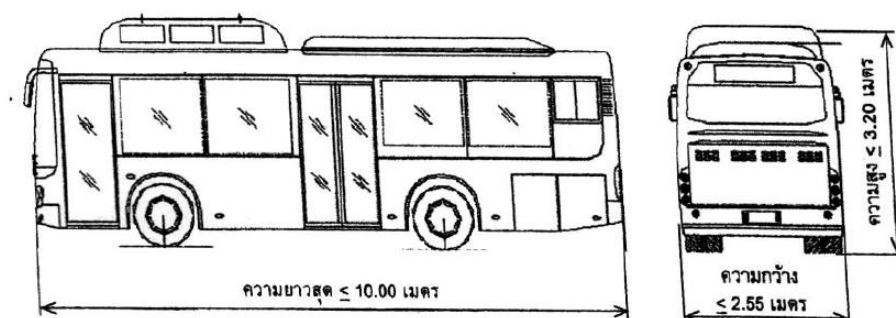
มาตรฐาน 3 ข มีที่นั่งผู้โดยสารเกิน 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม มีที่เก็บสัมภาระ ไม่มีที่ยืน

มาตรฐาน 3 ค มีที่นั่งผู้โดยสาร 21 - 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และที่เก็บสัมภาระ มีที่ยืน

มาตรฐาน 3 ง มีที่นั่งผู้โดยสาร 21 - 30 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม มีที่เก็บสัมภาระ มีที่ยืน

มาตรฐาน 3 จ มีที่นั่งผู้โดยสาร 13 - 24 ที่นั่ง ที่ยืนและที่เก็บสัมภาระมีหรือไม่มีก็ได้

มาตรฐาน 3 ฉ มีที่นั่งผู้โดยสารไม่เกิน 12 ที่นั่ง (ประเภทรถตู้โดยสารหรือรถสองแถว) ไม่มีที่ยืน ที่เก็บสัมภาระมีหรือไม่มีก็ได้



รูปที่ 2.2 ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 2 ก, ง, จ และ 3 ค, ง, ฉ, ฉ

มาตรฐาน 4 รถสองชั้น

มาตรฐาน 4 ก รถสองชั้นปรับอากาศไม่เกิน 61 ที่นั่ง ที่นั่งแต่ละแถวห่างกันไม่น้อยกว่า 90 เซนติเมตร มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และอุปกรณ์ให้เสียงประชาสัมพันธ์ ไม่มีที่ยืน

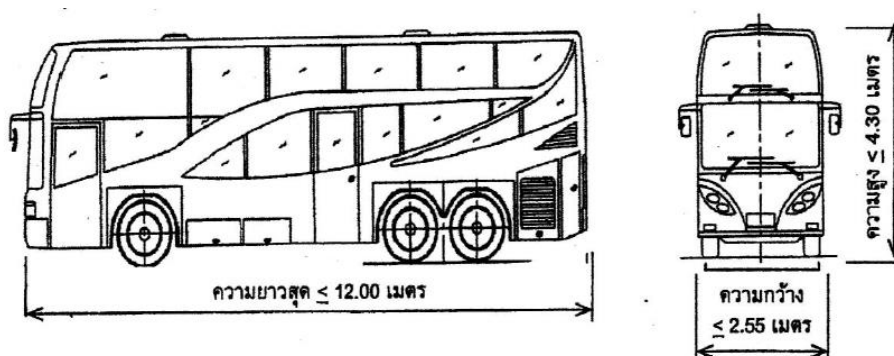
มาตรฐาน 4 ข รถสองชั้นปรับอากาศไม่เกิน 61 ที่นั่ง ที่นั่งแต่ละแถวห่างกันไม่น้อยกว่า 75 เซนติเมตร มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และอุปกรณ์ให้เสียงประชาสัมพันธ์ ไม่มีที่ยืน

มาตรฐาน 4 ค รถสองชั้นปรับอากาศไม่เกิน 61 ที่นั่ง ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ส่วนที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และอุปกรณ์ให้เสียงประชาสัมพันธ์ มีหรือไม่มีก็ได้ ไม่มีที่ยืน

มาตรฐาน 4 ง รถสองชั้นปรับอากาศไม่เกิน 61 ที่นั่ง ชั้นล่างกำหนดให้มีผู้โดยสารยืน ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม ส่วนที่เก็บสัมภาระ และอุปกรณ์ให้เสียงประชาสัมพันธ์ มีหรือไม่มีก็ได้

มาตรฐาน 4 จ รถสองชั้น ไม่มีเครื่องปรับอากาศ ชั้นล่างกำหนดให้มีผู้โดยสารยืน ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม และที่เก็บสัมภาระ

มาตรฐาน 4 ฉ รถสองชั้น ไม่มีเครื่องปรับอากาศ ไม่มีห้องสุขภัณฑ์ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม มีที่เก็บสัมภาระ



รูปที่ 2.3 ขนาดสัดส่วนของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร มาตรฐาน 4

#### มาตรฐาน 5 รถพ่วง

มาตรฐาน 5 ก รถพ่วงปรับอากาศ จะมีผู้โดยสารยืนหรือไม่ก็ได้ ส่วนที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ที่เก็บสัมภาระ และห้องสุขภัณฑ์ มีหรือไม่ก็ได้

มาตรฐาน 5 ข รถพ่วงไม่มีเครื่องปรับอากาศ จะมีผู้โดยสารยืนหรือไม่ก็ได้ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ที่เก็บสัมภาระ และห้องสุขภัณฑ์ มีหรือไม่ก็ได้

#### มาตรฐาน 6 รถกึ่งพ่วง

มาตรฐาน 6 ก รถกึ่งพ่วงปรับอากาศ จะมีผู้โดยสารยืนหรือไม่ก็ได้ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ที่เก็บสัมภาระ และห้องสุขภัณฑ์ มีหรือไม่ก็ได้

มาตรฐาน 6 ข รถกึ่งพ่วงไม่มีเครื่องปรับอากาศ จะมีผู้โดยสารยืนหรือไม่ก็ได้ ที่เตรียมอาหารและเครื่องดื่ม อุปกรณ์ให้เสียง และประชาสัมพันธ์ ที่เก็บสัมภาระ และห้องสุขภัณฑ์ มีหรือไม่ก็ได้

#### มาตรฐาน 7 รถโดยสารเฉพาะกิจ

มาตรฐาน 7 มีลักษณะพิเศษเพื่อใช้ในกิจการใดกิจการหนึ่งโดยเฉพาะ เช่นรถพยาบาล รถถ่ายทอดวิทยุหรือโทรทัศน์ รถบริการไปรษณีย์ รถบริการธนาคาร เป็นต้น

## 2.2 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือเรียกย่อว่าซีเอฟดี เป็นหนึ่งในสามวิธีของกระบวนการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่งได้แก่ วิธีการเชิงวิเคราะห์ วิธีทดลอง และวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกัน ดังนี้

1.) **วิธีการเชิงวิเคราะห์** เป็นการแก้สมการควบคุมของปัญหาโดยตรง โดยใช้กฎเกณฑ์ทางแคลคูลัส ตรีโกณมิติ พีชคณิตและอื่น ๆ เข้าช่วย ให้ได้มาซึ่งผลเฉลยเชิงวิเคราะห์หรือผลเฉลยแม่นยำตรงแต่วิธีการเชิงวิเคราะห์มีข้อเสียคือใช้แก้ปัญหาได้เฉพาะปัญหาที่ไม่ซับซ้อนเท่านั้น

2.) **วิธีทดลอง** ถูกใช้เมื่อปัญหามีความยาก จนไม่สามารถแก้สมการควบคุมได้ ข้อดีคือได้ข้อมูลที่สมจริงเพราะวัดจากตัวปัญหาจริง ข้อเสียคือใช้ไม่ได้ผลกับทุกปัญหา ความถูกต้องของผลการทดลอง ขึ้นอยู่กับความน่าเชื่อถือ และขีดจำกัดของเครื่องมือวัดและผู้วัด

3.) **วิธีเชิงตัวเลข** เป็นการแก้ปัญหาคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณ ซึ่งช่วยแก้ไขข้อจำกัดของทั้งสองแนวทางข้างต้น วิธีเชิงตัวเลขอาศัยการประมาณค่าช่วยหาผลเฉลยเฉพาะจุดที่สนใจ ความแม่นยำของผลเฉลยขึ้นอยู่กับจำนวนจุดและวิธีประมาณค่าที่ใช้ในการคำนวณ ผลเฉลยที่ได้เรียกว่าผลเฉลยเชิงตัวเลขซึ่งเป็นผลเฉลยโดยประมาณและเป็นผลเฉลยเชิงปริมาณ ต้องอาศัยการแปรความอีกรอบหนึ่งเพื่อให้เห็นแนวโน้มของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น เช่น นำไปแสดงผลเป็นกราฟ เวกเตอร์ คอนทัวร์ เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถประยุกต์ใช้ได้กับทุกปัญหา แต่ความถูกต้องของผลลัพธ์ที่วิเคราะห์ออกมา ขึ้นอยู่กับความถูกต้องและความสมจริงของข้อมูลที่ป้อนเข้าไป

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นกรนำเอาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลและพิจารณาให้ของไหลมีความต่อเนื่อง อยู่ในลักษณะถูกแบ่งเป็นช่วงโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ วิธีการที่ใช้คือการแบ่งช่วงโดเมนปริภูมิให้เป็นเซลล์เล็ก ๆ เรียกว่า “กริด (Grid)” แล้วใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมในการแก้สมการของการเคลื่อนที่คือสมการนาเวียร์-สโตกส์ นอกจากนี้ กริดอาจมีลักษณะรูปทรงแบบไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน (Unstructured Mesh) เช่น มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมในสองมิติ หรือเป็นรูปทรงปริมาตรในสามมิติ หรืออาจมีรูปทรงแบบมีโครงสร้างที่แน่นอน (Structured Mesh) ก็ได้ ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณยังเป็นเพียงการประมาณค่าเท่านั้น

### 2.2.1 กระบวนการซีเอฟดี

#### ดิสครีไทเซชัน

กระบวนการดิสครีไทเซชัน เป็นการแปลงสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตเพื่อให้เหมาะสมในการคำนวณเชิงตัวเลข มีหลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเชิงตัวเลขมี 3 วิธี ได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Different Method) ระเบียบวิธีอิเลเมนต์

สี่เหลี่ยม (Finite Element Method) และระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) ซึ่งแต่ละระเบียบวิธีมีรายละเอียด ดังนี้

**ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม** เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นใช้ในยุคแรก เป็นการหาค่าผลเฉลยของตัวแปรที่จุดต่อ ซึ่งถูกสร้างขึ้นกระจายบนเส้นกริดในโดเมน อาศัยการประมาณค่าบนพื้นฐานอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's Series) แปลงสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่าง (Difference Equation) หรือสมการดิครีไทท์ (Discretized Equation) ซึ่งเป็นพีชคณิต ประยุกต์เข้ากับแต่ละจุดต่อสร้างเป็นระบบสมการ มีข้อดี คือความสะดวกในการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ที่กำหนดให้มาอยู่ในรูปแบบของผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่าง ๆ ได้โดยง่าย อีกทั้งการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้ง่าย ดังนั้นระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมจึงเป็นวิธีที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ แต่ในขณะที่เดียวกันระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมก็มีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ ความสะดวกในการประยุกต์ระเบียบวิธีนี้เข้ากับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน และความสะดวกในการประยุกต์เงื่อนไขขอบที่ต่างกันของปัญหานั้น ๆ

**ระเบียบวิธีอีลิเมนต์สี่เหลี่ยม** มีหลักการเริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นหลาย ๆ ชิ้น เรียกว่า "อีลิเมนต์" จากนั้นสร้างสมการสำหรับแต่ละอีลิเมนต์บนหลักการที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นต้องสอดคล้องกับสมการควบคุมของปัญหาที่พิจารณาอยู่ ข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือสามารถสร้างอีลิเมนต์ที่มีขนาดต่างกันได้ง่าย จึงสามารถจำลองรูปร่างของปัญหาได้อย่างใกล้เคียงกับรูปร่างของปัญหาจริงได้มากที่สุด ดังนั้นค่าของผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จึงมีความแม่นยำมากตามไปด้วย (ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์, 2555)

**ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม** ใช้หลักการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อย จากนั้นอินทิเกรตสมการควบคุมบนปริมาตรควบคุม แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่างและคำนวณหาผลเฉลยที่จุดต่อต่าง ๆ โดยใช้วิธีคำนวณซ้ำ การอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมเป็นหลักทำให้วิธีนี้แตกต่างจากวิธีดิครีไทท์เซชันแบบอื่น เป็นหลักพื้นฐานของความอนุรักษ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม จึงสอดคล้องกับกายภาพของการไหลเป็นอย่างดี ข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ ใช้ได้ผลดีกับการไหลทุกรูปแบบ ทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน จึงถูกนำไปพัฒนาซอฟต์แวร์ซีเอฟดีทั่วไป

ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์ (2555) กล่าวว่า การเข้าใจความหมายทางกายภาพของปัญหาที่เราสนใจจะช่วยทำให้สามารถเลือกระเบียบวิธีทางตัวเลขที่เหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมได้โดยตรง แต่หากผู้ใช้ไม่มีความเข้าใจในพื้นฐานของระเบียบวิธีเชิงตัวเลข อาจส่งผลให้เลือกใช้โปรแกรมไม่เหมาะสมกับปัญหา เนื่องจากหลักความจริงที่ว่า



1. ไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขใด ที่สามารถแก้ปัญหาได้ทุกชนิด
2. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมักให้ผลเฉลยที่มีความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ
3. ไม่มีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีใดที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาในทุก ๆ กรณี

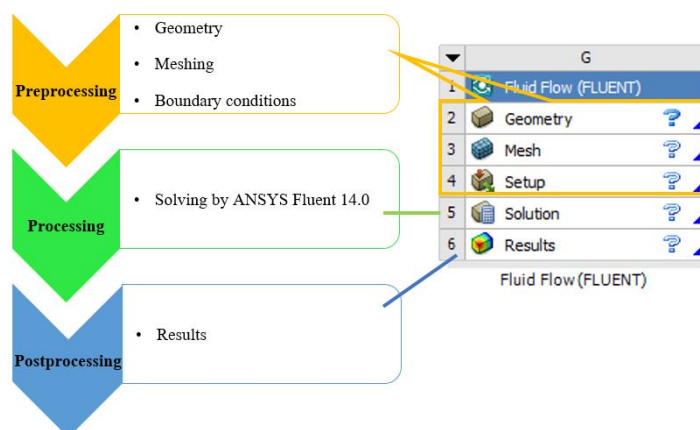
### 2.2.2 ขั้นตอนของซีเอฟดี

โปรแกรมซีเอฟดีที่พัฒนาขึ้นเองหรือซอฟต์แวร์ซีเอฟดีสำเร็จรูป มีการทำงานแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การประมวลผลก่อน (Pre-processor) การประมวลผล (Processor) การประมวลผลหลัง (Post-processor) โดยมีรายละเอียดดังนี้

*การประมวลผลก่อน* ประกอบด้วยการกำหนดข้อมูลให้กับโปรแกรม ได้แก่ สร้างรูปทรงของโดเมนที่จะวิเคราะห์ สร้างกริดหรือปริมาตรควบคุมหรือเอลิเมนต์ การกำหนดค่าคุณสมบัติของการไหล เป็นต้น ความแม่นยำของผลเฉลยที่แก้ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง หนึ่งในปัจจัยหลักคือจำนวนจุดต่อใช้ โดยทั่วไปจำนวนจุดต่อมากย่อมได้ความถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนจุดต่อน้อย แต่จำนวนจุดต่อมากย่อมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ประมาณว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของเวลาที่ใช้ทั้งหมดถูกใช้ไปกับการเตรียมข้อมูลกริดที่เหมาะสมให้กับปัญหา ดังนั้นการป้อนข้อมูลให้กับการคำนวณเพื่อแก้ปัญหาต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของจำนวนจุดต่อที่ใช้เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องยอมรับได้ และใช้เวลาประมวลผลที่ไม่นานเกินไป

*การประมวลผล* เป็นขั้นตอนการเลือกรูปแบบดิสกรีไทเซชันเพื่อสร้างสมการดิสกรีไทส์ โดยปกติในซอฟต์แวร์ซีเอฟดีแต่ละแบบจะถูกพัฒนาบนกระบวนการดิสกรีไทเซชันเพียงอันใดอันหนึ่ง ในขั้นตอนการประมวลผลนี้ ผู้พัฒนาหรือผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องเลือกแบบแผนการประมาณค่าเชิงตัวเลข (Numerical scheme) ที่เหมาะสมให้กับการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลคำนวณที่ได้มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพตามต้องการ

*การประมวลผลหลัง (Post-processor)* เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการซีเอฟดี ขั้นตอนนี้รับค่าผลเฉลยจากขั้นตอนการคำนวณมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟฟิกต่าง ๆ เช่น รูปร่างของปัญหาและกริด กราฟเวกเตอร์ กราฟคอนทัวร์ กราฟพื้นผิว การเปลี่ยนตำแหน่ง เช่น การเคลื่อนตัว การหมุน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของซีเอฟดี

## 2.3 ทฤษฎีการไหล

### 2.3.1 ชนิดของการไหล

การไหลของของไหลอาจจำแนกได้หลายวิธีแล้วแต่ตัวแปรที่กำลังพิจารณาอยู่ เช่น หากพิจารณาลักษณะทางกายภาพของอากาศ ณ จุดใดจุดหนึ่งในช่วงเวลาหนึ่ง อาจแยกได้ว่าการไหลนั้นเป็นแบบคงตัวหรือไม่คงตัว หากพิจารณาที่เลขเรย์โนลด์ อาจแบ่งการไหลออกเป็น การไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน หรือหากพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของไหลและความเร็วการไหล อาจแยกชนิดของไหลออกเป็น ของไหลแบบอัดตัวได้หรืออัดตัวไม่ได้ หรือหากพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของการไหล อาจแยกได้ว่าการไหลเป็นแบบการไหลภายนอกหรือการไหลภายใน

#### 1.) การไหลคงตัวและการไหลไม่คงตัว

การไหลของอากาศผ่านวัตถุ อาจเป็นการไหลแบบคงตัว หรือไหลแบบไม่คงตัวก็ได้ ซึ่งการไหลแบบคงตัวนั้น เมื่อพิจารณาที่จุดใดจุดหนึ่งในสนามการไหล ในช่วงเวลาที่วิเคราะห์ ลักษณะทางกายภาพของอากาศ เช่น ความดัน ความเร็ว จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ส่วนการไหลแบบไม่คงตัวนั้นจะตรงข้ามกัน ซึ่งการไหลในสภาพจริงมักพบการไหลเป็นแบบไม่คงตัวอย่างไรก็ตามการไหลคงตัวเป็นสมมติฐานหนึ่งที่มีนิยมใช้ในการพิจารณาการไหลในเบื้องต้น เนื่องจากสมมติฐานนี้จะทำให้พจน์ที่เกี่ยวกับเวลาในสมการควบคุมมีค่าเป็นศูนย์ จึงลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ได้ในระดับหนึ่ง

#### 2.) การไหลแบบราบเรียบและการไหลปั่นป่วน

นอกจากการพิจารณาการไหลแบบคงตัวหรือไม่คงตัวแล้ว อาจพิจารณาการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน ถ้าเป็นการไหลแบบราบเรียบ อนุภาคของการไหลจะเคลื่อนที่

อย่างเป็นระเบียบไปตามเส้นทางที่แน่นอน เส้นการไหลของของไหลในแต่ละชั้น (Layer) ที่ติดกัน ต่างก็ไหลอยู่ในชั้นของตัวเองไม่มีการไหลเข้าไปผสมในชั้นอื่น ๆ การไหลประเภทนี้มักเกิดขึ้นกับของไหลที่มีความหนืดสูง หรือการไหลที่มีความเร็วต่ำมาก ๆ ส่วนการไหลปั่นป่วน อนุภาคของไหลจะเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบ ไร้ทิศทาง มีเส้นทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน ดังแสดงในรูป 2.5 โดยทั่วไปเกิดขึ้นกับของไหลที่มีความหนืดต่ำ หรือการไหลด้วยความเร็วสูง ซึ่งการจำแนกรูปแบบการไหลสามารถบอกได้ด้วยเลขเรย์โนลด์ (Reynold's number)

เลขเรย์โนลด์เป็นตัวเลขไร้มิติ ใช้เป็นดัชนีบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล ค่าของเลขเรย์โนลด์ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหล ความเร็วการไหล ความหนืด และความยาวของวัตถุที่ของไหลไหลผ่าน ซึ่งเลขเรย์โนลด์เป็นตัวกำหนดว่าการไหลนั้นเป็นการไหลแบบใด สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็น

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.1)$$

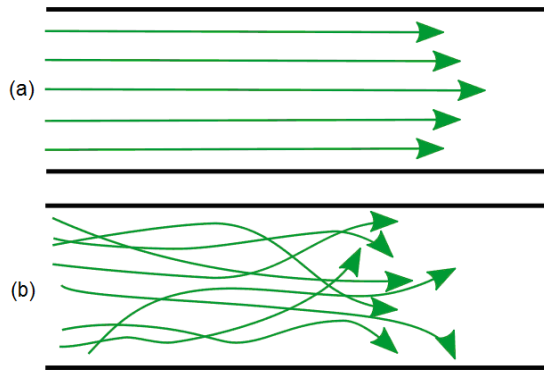
เมื่อ	Re	คือ เลขเรย์โนลด์
	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )
	v	คือ ความเร็วของการไหล (m/s)
	L	คือ ความยาวอ้างอิง (m)
	$\mu$	คือ ความหนืดของของไหล ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ )

สำหรับการไหลบนแผ่นระนาบเรียบ รูปแบบการไหลกำหนดด้วยช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ค่าต่าง ๆ กัน ดังนี้

Re อยู่ในช่วง 0 – 300,000 เป็นการไหลแบบราบเรียบ

Re อยู่ในช่วง 300,000 – 500,000 เป็นการไหลทรานสิชัน

Re อยู่ในช่วงมากกว่า 500,000 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนโดยสมบูรณ์



รูปที่ 2.5 การไหลแบบราบเรียบ (บน) และปั่นป่วน (ล่าง)

ตัวอย่างการคำนวณเลขเรย์โนลด์์ของรถโดยสารระหว่างเมือง

เลขเรย์โนลด์์เทียบกับความยาวรถโดยสาร ( $L$ )

$$\rho_{air} = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$v = \frac{80 \text{ km} / \text{h}}{18 / 5} = 22.22 \text{ m} / \text{s}$$

$$L = 12 \text{ m}$$

$$\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg} / \text{ms}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho v L}{\mu}$$

$$= \frac{1.225 \times 22.22 \times 12}{1.7894 \times 10^{-5}}$$

$$= 18,253,828$$

### 3.) การไหลแบบอัดตัวได้/อัดตัวไม่ได้

การไหลสามารถจำแนกเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ หากเปลี่ยนความดันและอุณหภูมิของการไหลแล้วส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยนไป แต่หากความดันและอุณหภูมิของการไหลเปลี่ยนแล้วแต่ไม่ส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยนหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การไหลนั้นจัดเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ และการพิจารณาว่าการไหลเป็นแบบอัดตัวได้หรือไม่นั้นพิจารณาจากเลขมัคของการไหลนั้น หากเลขมัคมีค่าน้อยกว่า 0.3 สามารถพิจารณาว่าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ โดยเลขมัคนิยามดังนี้

$$M = \frac{v}{a} \quad (2.2)$$

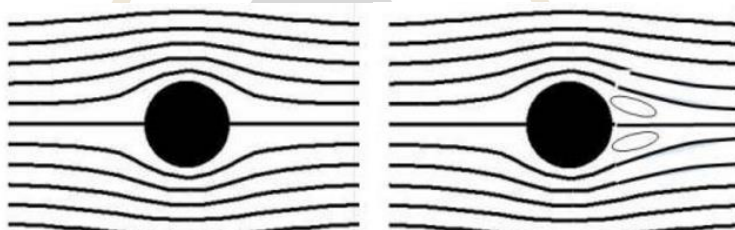
เมื่อ  $M$  คือ เลขมัค

$v$  คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

$a$  คือ ความเร็วเสียงในของไหลนั้น ๆ (m/s)

### 3.) การไหลภายนอกและการไหลภายใน

การไหลภายนอกหรือการไหลรอบวัตถุซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 เขตการไหล คือการไหลที่ห่างจากวัตถุ ซึ่งถือได้ว่าเป็นแบบอุดมคติซึ่งไม่มีความเสียดทาน และการไหลใกล้ผิววัตถุซึ่งจะเกิดขึ้นของความเค้นเฉือนขึ้น (ที่ผิววัตถุความเร็วมีค่าเป็นศูนย์) ซึ่งความหนืดและความปั่นป่วนมีความสำคัญ ชั้นของความเสียดทานนี้เรียกว่าชั้นซิกผิว ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน และการไหลที่ด้านท้ายของวัตถุจะเกิดกระแสไหลวน ซึ่งการไหลในส่วนนี้มีความแตกต่างจากส่วนอื่นและเป็นบริเวณที่มีกระแสปั่นป่วนรุนแรงและมีความดันต่ำ จึงทำให้เกิดแรงดูดเนื่องจากกระแสวน ตัวอย่างการไหลภายนอกแสดงในรูป 2.6 การไหลผ่านทรงกระบอก

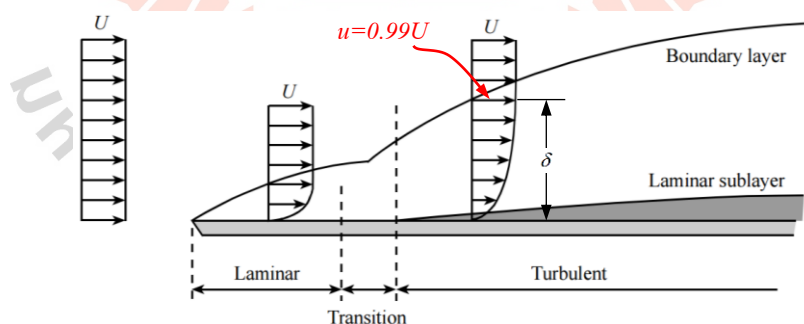


รูปที่ 2.6 การไหลแบบอุดมคติไม่เกิดการแยกไหล (ซ้าย) และการแยกไหลของของไหลผ่านทรงกระบอก (ขวา)

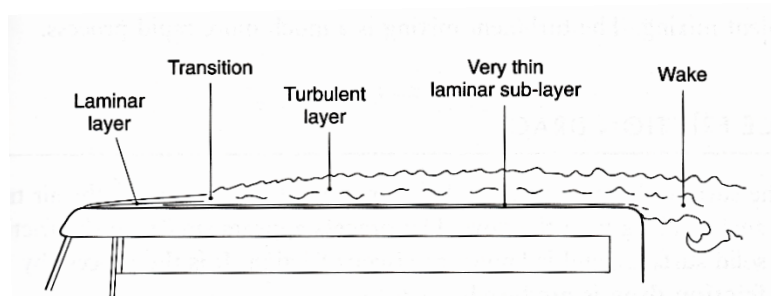
การไหลภายใน คือการไหลที่ถูกจำกัดด้วยผนัง เช่นการไหลภายในท่อ ราง หัวฉีด และในเครื่องกลของไหล การไหลในรางส่วนใหญ่อาจประมาณว่าเป็นการไหลอุดมคติถ้าของไหลเป็นแก๊ส แม้ว่าจะมีชั้นซิกผิวแบบปั่นป่วนเกิดที่ผนัง ทั้งการไหลแบบมีความหนืดและแบบปั่นป่วน ชั้นซิกผิวจะหนาเพิ่มขึ้นไปตามระยะทาง และในที่สุดก็จะขยายจนครอบคลุมทั้งรางและท่อ

### 2.3.2 ชั้นซิดผิว (Boundary layer)

พิจารณาการไหลผ่านแผ่นราบในรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นการไหลมีความเร็วสม่ำเสมอ การไหลภายในชั้นซิดผิวเริ่มต้นด้วยการไหลราบเรียบ และความหนาของชั้นซิดผิวจะโตขึ้นไปตามพื้นผิวจนเข้าสู่ช่วงทรานสิชันและจะกลายเป็นแบบปั่นป่วนในชั้นซิดผิวถ้าพื้นผิวนั้นมีความยาวเพียงพอ ดังนั้นในทุกการไหลจะเกิดลำดับการไหลแบบราบเรียบ-ทรานสิชัน-ปั่นป่วนเสมอ ไม่ว่าการไหลอิสระจะเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน แต่ถ้าระดับของความปั่นป่วนมีค่ามาก จะเกิดการทรานสิชันเร็วขึ้นนั่นคือเกิดซิดขอบทางเข้า ในชั้นซิดผิวนั้นทั้งแรงหนืด (Viscous force) และแรงเฉื่อย (Inertia force) มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้นค่าเรย์โนลด์ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืด จึงถูกใช้ในการวิเคราะห์การไหล โดยค่าเรย์โนลด์เป็นตัวแปรสำหรับบอกจุดเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน จะใช้ค่าเรย์โนลด์เท่ากับ 500,000 เป็นมาตรฐาน ชั้นซิดผิวแบบปั่นป่วนจะโตรวดเร็วกว่าชั้นซิดผิวแบบราบเรียบมาก และภายในชั้นซิดผิวที่อยู่ติดผิววัตถุนั้น ความหนืดจะมีอิทธิพลต่อการไหลมากเช่นเดียวกับในชั้นซิดผิวแบบราบเรียบ ในบริเวณนี้จึงเรียกว่าชั้นซิดผิวย่อยราบเรียบ (Laminar sublayer หรือ Viscous sublayer) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แต่ในการไหลจริงนั้นชั้นต่าง ๆ ไม่ได้แบ่งแยกให้เห็นอย่างชัดเจนเช่นในการบรรยายแต่จะต่อเนื่องกันไปจากบริเวณหนึ่งสู่อีกบริเวณหนึ่ง และถึงแม้ว่าชั้นซิดผิวนั้นจะบางมากแต่ก็มีบทบาทอย่างมากในด้านกลศาสตร์ของไหล เช่น แรงต้านของน้ำต่อเรือ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางวิศวกรรมหลายชนิด อาทิ การไหลผ่านคอมเพรสเซอร์ ขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นซิดผิวที่เกิดขึ้น (พีระพงษ์ ทัฬหสกุล, 2548)



รูปที่ 2.7 ชั้นซิดผิวของการไหลผ่านแผ่นราบ



รูปที่ 2.8 การเติบโตของชั้นซิดผิวบนหลังการรถโดยสาร (Barnard, 1996)

อากาศเป็นของไหลที่มีความหนืด เมื่ออากาศไหลผ่านวัตถุก็จะมีแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุกับอากาศ ความเร็วของอากาศที่สัมผัสกับผิววัตถุจะเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะห่างจากผิววัตถุจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับความเร็วของกระแสอากาศอิสระ (Free stream velocity) ดังนั้นแล้วความหนาของชั้นซิดผิว ( $\delta$ : Boundary layer thickness) มักถูกนิยามว่าเป็นระยะทางจากพื้นผิววัตถุในแนวตั้งไปถึงจุดที่กระแสอากาศมีความเร็วเป็น 99 เปอร์เซ็นต์ของความเร็วกะแสอิสระ

### 2.3.3 สมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลล้วนถูกสร้างบนกฎมูลฐานของ (1) ความอนุรักษ์มวล ที่ว่ามวลย่อมไม่เพิ่มขึ้นหรือสูญหายไปจากระบบ (2) ความอนุรักษ์โมเมนตัม ที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมย่อมเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน และ (3) ความอนุรักษ์พลังงาน ที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานย่อมเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำกับปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นสำหรับการไหลที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนหรือพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงสามารถหาคำตอบของสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ในสมการนาเวียร์ - สโตกส์ สำหรับการไหลแบบคงตัวและไม่พิจารณาผลของความโน้มถ่วงในรูปของน้ำหนัก (Body force) ดังสมการต่อไปนี้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

โมเมนตัมทิศทาง x

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

โมเมนตัมทิศทาง y

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

โมเมนตัมทิศทาง z

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

### 2.3.4 แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

1) แบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  นิยมนำไปใช้ในการจำลองปัญหาการไหลในภาคอุตสาหกรรม เพื่อจำลองการไหล การถ่ายเทความร้อน เนื่องจากประหยัด ช่วยให้ได้ผลเฉลยที่สามารถนำไปออกแบบทางวิศวกรรมได้ แบบจำลองความปั่นป่วนมีหลายรูปแบบมาก แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานซึ่งเป็นแบบจำลองแบบ 2 สมการประกอบด้วยสมการพลังงานจลน์ความปั่นป่วน  $k$  (Turbulence Kinetic Energy) และสมการอัตราการแยกสลายพลังงานจลน์  $\varepsilon$  (Dissipation Rate) แบบจำลอง  $k-\varepsilon$  มาตรฐานนี้สร้างอยู่บนพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ จึงเหมาะสำหรับใช้จำลองการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k-\varepsilon$  มาตรฐาน ประกอบด้วยสมการดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.7)$$

และ



สมการอัตราการแยกสลายพลังงานจลน์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $G_k$  คือ ค่าการแพร่ของพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน  
 $Y_M$  คือ represents the contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate  
 $\sigma_k$  คือ turbulent Prandtl numbers for  $k$   
 $\sigma_\varepsilon$  คือ turbulent Prandtl numbers for  $\varepsilon$   
 $S_k, S_\varepsilon$  คือ พจน์แหล่งกำเนิด  
 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$  เป็นค่าคงที่ของแบบจำลอง

โดยค่าความหนืดการปั่นป่วน  $\mu_t$  (Turbulent Viscosity) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ของตัวแปรสำหรับสมการขนส่งของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k - \varepsilon$

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	0-1.0

2) แบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST (Shear Stress Transport Turbulence Model) พัฒนารุ่นขึ้นโดย F.R. Menter ในปี ค.ศ. 1994 ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เนื่องจากแบบจำลองนี้เกิดจากการรวบรวมข้อดีของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k - \omega$  มาตรฐานและ  $k - \varepsilon$  มาตรฐานเข้าด้วยกัน ทำให้แบบจำลองนี้ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิ การไหลผ่านแพนอากาศ คลื่นกระแทก เป็นต้น แบบจำลอง SST ประกอบด้วยสมการของแบบจำลอง 2 สมการดังนี้

สมการพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.10)$$

และ

สมการอัตราการผลิตพลังงานจลน์

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.11)$$

- เมื่อ  $\tilde{G}_k$  คือ การเกิดพลังงานจลน์ของการปั่นป่วนเนื่องจาก velocity gradients เฉลี่ย  
 $D_\omega$  คือ cross-diffusion term  
 $\mu_t$  คือ ค่าความหนืดการปั่นป่วน  
 $Y_k, Y_\omega$  คือ การกระจาย  $k$  และ  $\omega$  เนื่องจากความปั่นป่วน  
 $\sigma_k, \sigma_\omega$  คือ turbulent Prandtl numbers ของ  $k$  และ  $\omega$  ตามลำดับ  
 $S_k, S_\omega$  คือ พจน์แหล่งกำเนิด

โดย

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10 \rho \beta^* k \omega) \quad (2.12)$$

และ

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (2.13)$$

เมื่อ  $S$  คือ modulus of the mean rate-of-strain tensor

และ

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (2.14)$$

$$G_\omega = a \frac{\omega}{k} G_k \quad (2.15)$$

โดยที่

$$a = \frac{a_\infty}{a^*} \left( \frac{a_0 + \text{Re}_t / R_\omega}{1 + \text{Re}_t / R_\omega} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อ  $R_\omega = 2.95a^*$  และ  $\text{Re}_t$  แสดงในสมการที่ 2.17

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (2.17)$$

และ  $a^*$  แสดงในสมการที่ 2.18

$$a^* = a_\infty^* \left( \frac{a_0^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$a_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (2.19)$$

และค่าคงที่ของแบบจำลองเป็นดังนี้

$R_k = 6$ ,  $\beta_i = 0.072$ ,  $a^* = a_\infty^* = 1$  ที่เลขเรย์โนลด์สูงๆ

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (2.20)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (2.21)$$

ส่วน  $F_1$  และ  $F_2$  นิยามด้วย

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (2.22)$$

โดยที่

$$\Phi_1 = \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (2.23)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[ 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (2.24)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2.25)$$

$$\Phi_2 = \min \left[ \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ  $y$  คือ ระยะจุดประชิดผนังที่ใกล้ที่สุด

$D_\omega^+$  คือ positive portion of the cross-diffusion term

$$Y_k = \rho\beta\omega^2 \quad (2.27)$$

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1-F_1)\beta_{i,2} \quad (2.28)$$

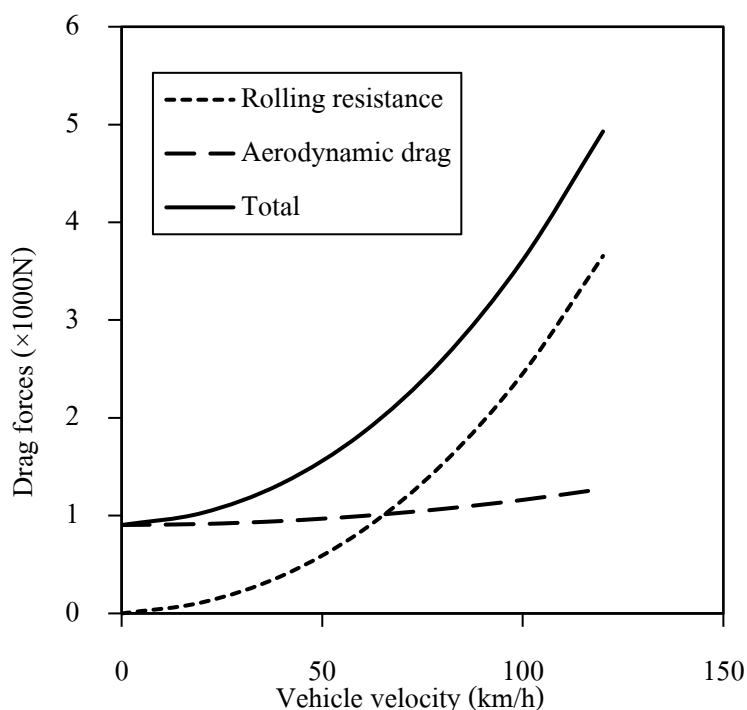
ค่าคงที่ของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $SST\ k-\omega$ 

$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,2}$	$a_1$	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$
1.176	2.0	1.0	1.168	0.31	0.075	0.0828

## 2.4 แรงต้านของรถโดยสาร

ในการออกแบบรถ ปัจจัยสำคัญด้านอากาศพลศาสตร์ที่ต้องพิจารณาคือ แรงต้าน เนื่องจากในขณะที่รถเคลื่อนที่ เครื่องยนต์จะต้องทำงานเพื่อเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหลายทั้งจาก ความเสียดทานของรถยนต์ ความเสียดทานจากถนน แรงต้านอากาศ และแรงต้านการหมุนของล้อ จากการศึกษาอิทธิพลของแรงต้านต่าง ๆ รวมถึงลักษณะการจับยึดต่อความประหยัดน้ำมัน ได้พบ ข้อมูลที่น่าสนใจว่า การจับยึดในเมืองหลวงที่รถมีการเคลื่อนที่และหยุดบ่อย ๆ นั้น แรงต้านจากความเสียดทาน (จากการออกตัวและการเบรก) ส่งผลต่อการใช้พลังงาน 35 เปอร์เซ็นต์ ความเสียดทานของถนนมีผลประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ แรงต้านจากอากาศมีผลประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และแรงต้านการหมุนของล้อนี้อาจมีผลประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การจับยึดรถยนต์นอกเมือง (จับด้วยความเร็วคงที่) ถือว่าไม่มีการออกตัวและเบรกเหมือนการจับยึดในเมือง แรงต้านจากความเสียดทานจึงไม่ถูกรวมเข้ามา ดังนั้นแรงต้านที่เหลือจึงมีเพียงแรงเสียดทานจากถนนที่มีผลประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่แรงต้านการหมุนของล้อนี้อาจมีผลประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ แต่แรงต้านจากอากาศจะมีผลถึง 60 เปอร์เซ็นต์ (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์) ซึ่งแรงต้านอากาศจะมีอิทธิพลเมื่อความเร็วของรถมากกว่า 65 – 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดย Muthuveil (2013) กล่าวว่าแรงต้านการหมุนของล้อนี้อาจมีค่ามากกว่าแรงต้านอากาศเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ในทางกลับกันเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นแรงต้านอากาศจะส่งผลมากกว่าแรงต้านการหมุนของล้อ ดังแสดงในรูป 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วรถกับแรงต้านอากาศและแรงต้านการหมุนของล้อ (ที่มา: <http://www.part20.eu/en/background/fuel-consumption/>)

#### 2.4.1 ชนิดของแรงต้าน

แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance) ขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกัน ทั้งการยุบตัวของยางและผิวถนน ผิวสัมผัสของถนน ขนาดของล้อ ความดันลมยาง เป็นต้น ซึ่งแรงต้านการหมุนของล้อแปรผันตรงกับน้ำหนักรถ นั่นคือยิ่งน้ำหนักรถมาก ก็จะมีแรงต้านการหมุนล้อมากขึ้น หรือกล่าวได้ว่าแรงต้านการหมุนล้อของรถบรรทุกจะมีค่ามากกว่าของรถยนต์นั่นเอง

แรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag) เกิดขึ้นเมื่อรถเคลื่อนที่ปะทะอากาศ ทำให้เกิดการกระจายความดันบนพื้นผิววัตถุและแรงเสียดทานผิวเนื่องจากความหนืดของอากาศ ดังรายละเอียดที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

แรงต้านทางชัน (Gradient resistance) เกิดเมื่อรถวิ่งบนพื้นที่มีการเอียงท่ามุมกับแนวระดับหรือในขณะรถวิ่งขึ้นเนิน ทำให้น้ำหนักของรถถ่ายเทมาในทิศทางขนานกับพื้นถนนกลายเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ แต่ในทางกลับกันหากรถวิ่งลงเนินน้ำหนักรถก็จะมีทิศทางเสริมแรงขับเคลื่อน

แรงต้านเฉื่อย (Inertia resistance) เป็นแรงต้านของเครื่องยนต์ซึ่งเกิดขณะที่เร่งเครื่องยนต์

## 2.5 อากาศพลศาสตร์ยานยนต์

อากาศพลศาสตร์ของยานยนต์ เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านยานยนต์ ซึ่งก่อให้เกิดแรงกระทำกับรถ 2 แรง ได้แก่ แรงต้านและแรงยก ปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อแรงต้านอากาศที่รูปร่างของยานยนต์ ระยะช่องว่างระหว่างพื้นรถกับถนน เป็นต้น โดย Hucho, W.H. (1993) กล่าวว่าในทางกลศาสตร์ของไหล ยานพาหนะทางบกก็เปรียบเหมือนตัวขวางการไหล (Bluff body) ที่เคลื่อนที่ใกล้กับพื้นมาก ซึ่งรูปร่างของรถมีความซับซ้อนมาก การไหลผ่านรถเป็นแบบสามมิติ ชั้นซิดผิวเป็นแบบปั่นป่วนและมักเกิดการไหลแยกชั้นของการไหล (Separate flow) บางครั้งมี Reattach flow มีช่วงเวก (Wake) ขนาดใหญ่เกิดขึ้นบริเวณท้ายรถ

สำหรับยานพาหนะทางบกทั่วไป แรงต้านมักเป็นประเด็นหลักสำหรับการพิจารณาด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งแรงต้านส่วนใหญ่มาจากแรงต้านความดัน (ตรงข้ามกับเครื่องบินและเรือที่แรงต้านส่วนใหญ่มาจากแรงเสียดทานผิว) ดังนั้นวัตถุประสงค์สำหรับอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์คือ หลีกเลี่ยงหรือควบคุมการเกิดการไหลแยกชั้นของอากาศ แต่ในทางกลับกัน ในการออกแบบรูปร่างรถที่นำมาใช้จริง รูปร่างของรถจะถูกกำหนดด้วยประเภทการใช้งาน ความคุ้มทุน และเหตุผลด้านความสวยงามเป็นหลัก โดยคำนึงถึงหลักอากาศพลศาสตร์ด้วย แต่ไม่ใช่เหตุผลหลักของการออกแบบรูปร่างรถ ดังนั้นเมื่อวัตถุประสงค์ในการใช้งานของรถแต่ละประเภทก็ต่างกันออกไป คุณสมบัติด้านอากาศพลศาสตร์ของรถแต่ละประเภทจึงมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น แรงกด (Down force/ Negative lift) มีความสำคัญสำหรับความสามารถในการเข้าโค้งของรถแข่ง แต่ไม่ใช่สำหรับรถบรรทุก, สำหรับรถยนต์และรถโดยสารควรมีเสียงรบกวนในห้องโดยสารน้อย แต่ไม่จำเป็นสำหรับรถแข่ง เป็นต้น

### 2.5.1 แรงยก

แรงยกกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้น แรงยกจะส่งผลต่อความสามารถในการยึดเกาะถนนของยางลดลง ทำให้รถทรงตัวไม่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะที่เกี่ยวข้องด้วยอัตราเร็วสูง อาจส่งผลให้รถลื่นไถลหรือเสียหลักได้ (ธีระยุทธ สุวรรณประทีป, 2555) ดังนั้นการออกแบบรถจึงต้องการให้แรงยกมีค่าน้อย หรือมีค่าเป็นลบเพื่อเพิ่มเสถียรภาพขณะการขับขี่ ซึ่งแรงยกสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A \quad (2.29)$$

- เมื่อ  $L$  คือ แรงยก  
 $C_L$  คือ สัมประสิทธิ์แรงยก  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v$  คือ ความเร็วของอากาศ ( $\text{m/s}$ )  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดรถ ( $\text{m}^2$ )

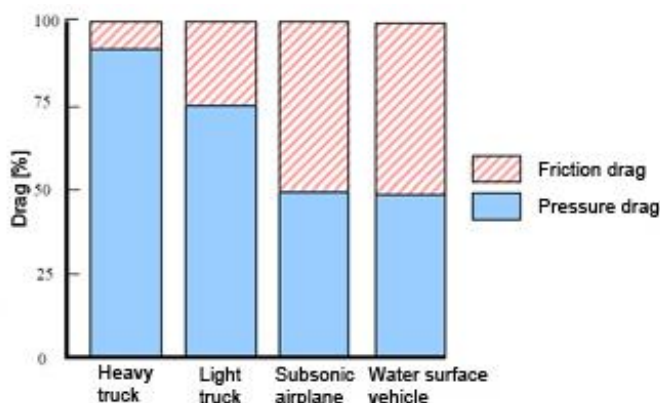
### 2.5.2 แรงต้านอากาศ

เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านอากาศ จะเกิดแรงกระทำกับวัตถุในทิศทางตรงข้ามการเคลื่อนที่ของวัตถุหรือทิศทางเดียวกับความเร็วของอากาศ แรงต้านอากาศเป็นผลรวมของแรงต้านความดันและแรงต้านเสียดทานหรือแรงเสียดทานผิว โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) แรงต้านความดัน เป็นแรงต้านส่วนใหญ่ที่กระทำกับรถ อาจมีสัดส่วนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Barnard, 1996) เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังรถ บริเวณผิวด้านหน้ารถที่ปะทะกับอากาศมีความดันสูง ในขณะที่บริเวณท้ายรถอากาศมีการไหลปั่นป่วนและมีความดันต่ำ จึงเกิดเป็นแรงผลักที่หน้ารถ และเกิดแรงดูดจากท้ายรถ รวมเป็นแรงกระทำกับรถในทิศต้านการเคลื่อนที่

2.) แรงเสียดทานผิว เป็นผลมาจากความหนืดของอากาศ เมื่ออากาศไหลผ่านวัตถุ อากาศที่อยู่ติดกับผิววัตถุจะถูกหน่วง ทำให้เกิดแรงเฉือนในชั้นการไหลของอากาศ กระทำในทิศทางขนานกับผิววัตถุ สำหรับยานพาหนะทางบก แรงเสียดทานผิวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับแรงต้านความดัน ขนาดของแรงขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นขีดผิวและเลขเรย์โนลด์ กล่าวคือแรงเสียดทานผิวจะลดลงเมื่อเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับแรงต้านความดันที่แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับเลขเรย์โนลด์เลย สำหรับรูปทรงที่มีสัดส่วนระหว่างผลรวมของพื้นที่ผิวในแนวขนานทิศทางการเคลื่อนที่ต่อพื้นที่หน้าตัดมีค่าประมาณ 10 พบว่าแรงต้านเสียดทานมีค่าเพียง 0.02 ส่วน จากสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้งหมด 1 หน่วย คิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ของสัมประสิทธิ์แรงต้านสำหรับรถทั่วไป แต่หากพิจารณาว่าผิวรถไม่ได้เรียบตลอดทั้งคัน อาจมีขอบกระจกหรือประตู ที่ก่อให้เกิดแรงเสียดทานผิวเพิ่มขึ้น อาจส่งผลให้แรงเสียดทานผิวมีสัดส่วนถึง 10-15 เปอร์เซ็นต์ (Hilliard, J. C., 1984)





รูปที่ 2.10 สัดส่วนระหว่างแรงต้านความดันและแรงเสียดทานผิวของรถแต่ละประเภท  
(ที่มา: <http://www.part20.eu/en/background/aerodynamics/>)

Patten, J., et al. (2012) กล่าวว่าสำหรับยานพาหนะขนาดใหญ่ เช่น รถพ่วง หรือรถโดยสาร แรงต้านเนื่องจากความดันโดดเด่นกว่าเนื่องจากมีพื้นผิวขนาดใหญ่ปะทะกับอากาศที่ไหลเข้ามา ประกอบกับมีการไหลปั่นป่วนที่บริเวณด้านท้ายของรถที่มีรูปทรงตัดด้านท้าย ถึงแม้ว่าแรงเสียดทานผิวจะเกิดขึ้นตลอดทั้งพื้นผิวภายนอกตัวรถ โดยเฉพาะที่ผิวด้านบน และด้านข้างของรถ แต่ผลรวมแรงเสียดทานผิวก็มีค่าน้อยมาก (ประมาณร้อยละ 10 หรือน้อยกว่า) ดังนั้นเทคโนโลยีการลดแรงต้านจึงมุ่งเน้นไปที่การลดแรงต้านเนื่องจากความดัน เช่นเดียวกับ Lanfrut, M., (2005) ที่กล่าวว่าสำหรับรถยนต์ แรงต้านความดันก็มีความโดดเด่นกว่าแรงเสียดทานผิวเช่นกัน ดังนั้นความถูกต้องของการทำนายค่าแรงยกและแรงต้านจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการทำนายค่าการกระจายแรงดันสถิตบนลำตัวรถ ซึ่งแรงดันสถิตนี้เป็นผลกระทบต่อเนื่องมาจากตำแหน่งการแยกไหลของอากาศ และเมื่อพิจารณาที่แรงต้านความดันสำหรับรถในปัจจุบันที่ให้ความสำคัญกับเรื่องอากาศพลศาสตร์ สัดส่วนของแรงต้านที่กระทำกับส่วนหน้ารถจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงต้านที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหลังรถ ดังนั้นปัญหาหลักของอากาศพลศาสตร์จึงอยู่ที่ด้านท้ายรถ (Hucho, W. H., 1993)

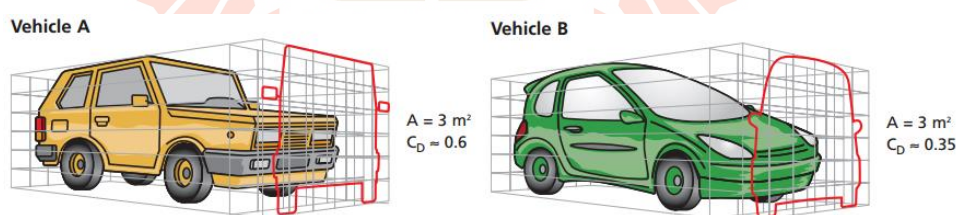
แรงต้านอากาศมักจะถูกเปรียบเทียบในรูปของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน สำหรับบอกว่าวัตถุนั้นมีค่าความต้านทานการเคลื่อนที่เท่าใด สัมประสิทธิ์แรงต้าน เขียนแทนด้วย  $C_D$  เป็นตัวแปรไร้หน่วยที่แสดงถึงความต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุผ่านอากาศ ใช้ในการเปรียบเทียบค่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถที่มีรูปทรงต่างกัน โดยไม่คำนึงถึงขนาด หรือความเร็วในการขับขี่ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถ ถ้าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าน้อย หมายความว่าวัตถุดังกล่าวมีสมบัติด้านอากาศพลศาสตร์ดีกว่าวัตถุที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านมาก ในปัจจุบันสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์มีค่าอยู่ในช่วง 0.26-0.35 ในขณะที่รถบรรทุกจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่ระหว่าง 0.8-1.5 ส่วนรถโดยสารมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่ในช่วง 0.6-0.7 สำหรับรถ

โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยกว่า ไม่ได้หมายความว่าแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถนั้นจะน้อยกว่าไปด้วย เนื่องจากแรงต้านขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของรถที่อากาศปะทะ ดังนั้นหากจะพิจารณาว่ารถคันใดมีแรงต้านกระทำมากกว่าจึงมักพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านคูณกับพื้นที่หน้าตัดของรถ ( $C_D \times A$ ) โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านคำนวณได้จากความสัมพันธ์นี้

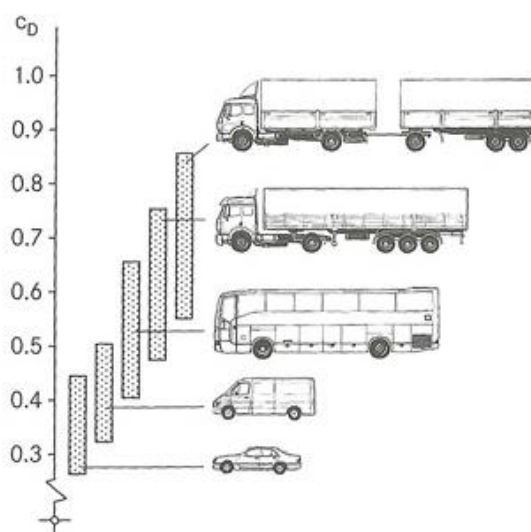
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.30)$$

- เมื่อ  $C_D$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน  
 $D$  คือ แรงต้านอากาศ  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $v$  คือ ความเร็วของอากาศ ( $\text{m/s}$ )  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดรถ (Frontal Projected Area) ( $\text{m}^2$ )

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นได้ว่า แรงต้านจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนยกกำลังสองของความเร็ว หากรถมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากัน รถที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงกว่าจะเกิดแรงต้านมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบระหว่างรถสองชนิดที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านต่างกัน แต่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน พร้อมทั้งหลักการหาพื้นที่หน้าตัดของรถ (ที่มา: [http://www.dimnp.unipi.it/guiggiani-m/Michelin\\_Tire\\_Rolling\\_Resistance.pdf](http://www.dimnp.unipi.it/guiggiani-m/Michelin_Tire_Rolling_Resistance.pdf))

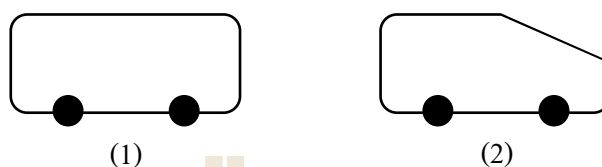


รูปที่ 2.12 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถประเภทต่าง ๆ (ที่มา <http://www.part20.eu/en/>)

## 2.6 การลดแรงต้านอากาศ

ส่วนสำคัญที่สุดในการศึกษาเรื่องอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์คือการลดแรงต้าน ซึ่งจากรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วมากกว่า 65 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านอากาศมีความโดดเด่นมากกว่าแรงเสียดทานของล้อ ดังนั้นสำหรับรถโดยสารระหว่างเมืองที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การลดแรงต้านอากาศส่งผลต่อรถโดยสารมากกว่าการลดแรงต้านการหมุนของล้อ ที่ผ่านมามีการศึกษาวิธีการลดแรงต้านอากาศขณะรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกคือการลดพื้นที่หน้าตัดของรถหรือก็คือการลดพื้นที่ผิวปะทะอากาศซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดแรงต้านความดัน ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ตามสมการของแรงต้านดั่งที่กล่าวไว้ในสมการที่ 2.30 ว่าแรงต้านอากาศแปรผันตามพื้นที่หน้าตัดของรถ หรือปรับรูปทรงรถให้เพรียวลม ยกตัวอย่างเช่นรถ 2 คันที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน รถคันแรกมีรูปทรงคล้ายกล่องสี่เหลี่ยม ส่วนรถคันที่ 2 มีการปรับรูปทรงด้านหลังให้หลังคาเอียงลง ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันที่ 2 จะน้อยกว่าคันที่ 1 เนื่องจากรถคันที่ 2 มีการปรับหลังคาด้านหลังให้ลู่ลม ทำให้อากาศสามารถไหลแนบไปกับพื้นผิวได้ ลดการเกิดการไหลแยกชั้นของอากาศและลดขนาดของบริเวณที่อากาศไหลวนด้านหลังรถ ในขณะที่รถคันที่ 1 ด้านหลังรถที่เป็นรูปทรงกล่องทำให้บริเวณที่อากาศไหลวนด้านหลังรถมีขนาดใหญ่กว่า แรงต้านที่กระทำกับผิวหลังรถคันที่ 1 จึงมากกว่าคันที่ 2 ส่วนวิธีที่สองคือการติดตั้งอุปกรณ์เสริมสำหรับลดแรงต้านอากาศ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ช่วยควบคุมการไหลของอากาศให้อากาศไม่ไหลแยกตัวออกจากผิวรถ ทั้งนี้การลดแรงต้านอากาศทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมาล้วนมุ่งเน้นที่การปรับปรุงการไหลรอบ ๆ รถเพื่อป้องกันการไหลแยกตัวของ

อากาศ ลดขนาดช่วงเวก และเพิ่มพลังงานให้กับอากาศชั้นซิดผิว โดย Barnard (1996) ได้สรุปแนวทางการลดแรงต้านไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.3



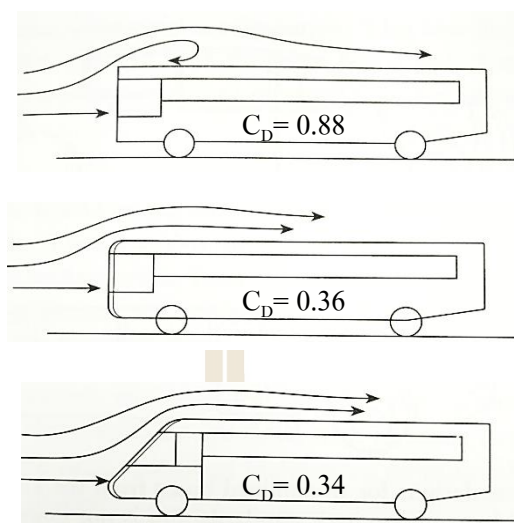
รูปที่ 2.13 รถสองคันที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ตารางที่ 2.3 หลักการลดแรงต้านอากาศประเภทต่าง ๆ

แรงต้านเสียดทาน	แรงต้านความดัน
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ปรับผิวรถให้เรียบ</li> <li>- ทำให้ผิวต่อเนื่อง หลีกเลี่ยงรอยต่อซึ่งเป็นช่องว่างเล็ก ๆ</li> <li>- สร้างแผ่นปิดใต้ท้องรถให้เป็นผิวเรียบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำให้อากาศไหลราบเรียบไปกับผิวรถได้ไกลที่สุด หลีกเลี่ยงจุดที่ทำให้เกิดการแยกไหล</li> <li>- ปรับผิวรถให้มีความต่อเนื่อง เลี้ยงขอบและมุมเหลี่ยม</li> <li>- หน้าตัดของท้ายรถต้องค่อย ๆ ลดลงคล้ายรูปหยดน้ำ เพื่อให้อากาศยังคงไหลราบเรียบไปกับผิวรถ ป้องกันการเกิดอากาศแยกไหล</li> </ul>

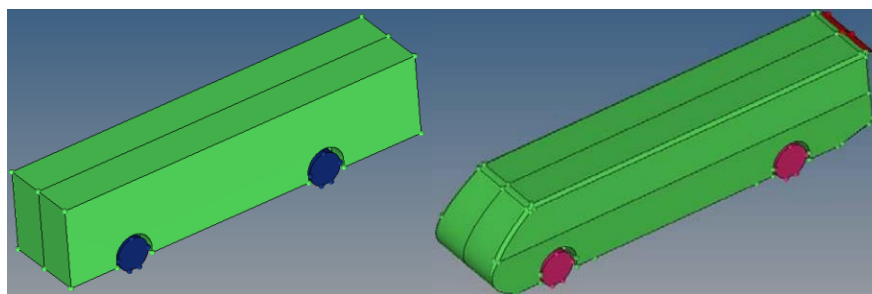
### 2.6.1 การปรับปรุงรูปทรงรถโดยสาร

การปรับปรุงรูปทรงรถโดยสารได้มีการศึกษาอย่างยาวนาน แต่เดิมก่อนที่อากาศพลศาสตร์จะเข้ามามีบทบาทกับการออกแบบรถโดยสารนั้น รถโดยสารมีรูปทรงสี่เหลี่ยมคล้ายอิฐ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารมีค่าสูงมาก (ประมาณ 1 หรือมากกว่า) จากนั้นเมื่อมีการให้ความสำคัญกับอากาศพลศาสตร์จึงมีการปรับปรุงทรงของรถเพื่อลดแรงต้านมาเรื่อย ๆ โดยการลบมุมระหว่างผิวด้านหน้ากับหลังคา รวมถึงการปรับผิวด้านหน้ารถให้เอียงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การออกแบบหน้ารถเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Barnard, 1996)

Raveendran A., et. al (2009) ได้ทำการปรับปรุงรูปทรงรถโดยสารด้วยการปรับแชสซีจากแบบพื้นสูงเป็นแบบพื้นต่ำเพื่อลดพื้นที่หน้าตัดและปรับปรุงรูปทรงเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ผลการออกแบบรูปทรงภายนอกของรถโดยสารใหม่ด้วยการลบมุมด้านหน้ารถโดยสารให้มีรัศมีความโค้งอย่างน้อย 150 มิลลิเมตร ปรับมุมกระจกหน้าให้เอียง 15 องศา เพิ่มแผ่นปิดใต้ท้องรถให้เรียบ ปรับลำตัวของรถให้ถูกลงจากด้านข้างและด้านหน้า นำกระจกมองข้างออก การปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านจากเดิม 0.53 เหลือ 0.29 ลดลง 60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้น Bhawe A. และ Taherian H. (2014) ได้นำแนวคิดนี้ไปปรับปรุงรูปทรงรถโดยสารจากแบบเดิมที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมคล้ายกล่องเพื่อลดแรงต้าน ด้วยการปรับกระจกด้านหน้าให้โค้งเพริยวลม เป็นการลดความดันที่จุดชะงักไหล (Stagnation pressure) พร้อมทั้งปรับผิวใต้ท้องรถด้านหลังให้เอียงขึ้นเป็น Diffuser เพื่อลดความเร็วอากาศใต้ท้องรถลงทำให้ความดันหลังรถเพิ่มขึ้น และติดตั้งเอียงขึ้นจากหลังการรถด้านหลังเพื่อลดการไหลแยกตัวของอากาศทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสารลดลงจาก 0.8782 เหลือ 0.3872 ลดลง 55.92 เปอร์เซ็นต์ ลดกำลังของเครื่องยนต์ลงได้ 20 เปอร์เซ็นต์ หรือ 43.6 กิโลวัตต์ และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศได้ 18.02-84.22 ตันต่อปี รวมถึง Muthuvel et al. (2013) ได้ปรับปรุงรูปทรงของรถโดยสารเพื่อลดแรงต้านอากาศด้วยการสร้างแบบจำลองขนาด 1: 30 ทดสอบการไหลในอุโมงค์ลม ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองรถโดยสารที่ปรับปรุงทรงด้านหน้ารถให้โค้งกลมคล้ายส่วนของวงรี หลังคาและผิวด้านข้างมีความลาดเอียงเข้าหากัน (Tapering) เกิดแรงต้านน้อยสุด ซึ่งลดลงจากแบบเดิม 30 – 34 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง 8 – 23 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ STAR-CCM+



รูปที่ 2.15 การปรับปรุงรูปทรงของรถโดยสารเพื่อลดแรงต้าน (Bhave A. and Taherian H.,2014)

### 2.6.2 การติดอุปกรณ์ลดแรงต้าน

จากหลักการลดแรงต้านดังแสดงในตารางที่ 2.3 นำไปสู่การศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านประเภทต่าง ๆ ดังนี้

#### 1. Boat tail



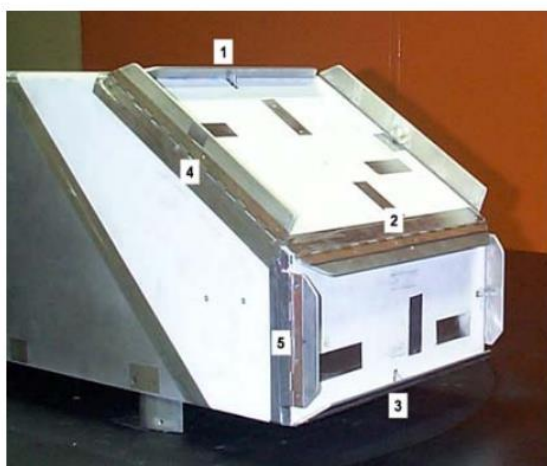
รูปที่ 2.16 Boat tail

Boat tails เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งต่อจากท้ายรถ มีรูปทรงเรียวคล้ายหางเรือทำให้ท้ายรถมีลักษณะกลม อากาศสามารถไหลซัดผิวไปกับตัวอุปกรณ์ได้ ทำให้ขนาดของ wake ท้ายรถลดลง แรงต้านอากาศจากท้ายรถจึงลดลงด้วย จากการทดสอบการไหลผ่านรถบรรทุกพ่วงที่ติด boat tail ในอุโมงค์ลมของ Lancer et. al (1991) พบว่าการติด boat tail ช่วยเพิ่มความดันที่ท้ายรถทำให้แรงต้านอากาศลดลง จากนั้น Khalinghi et. al (2001) ทำการศึกษาต่อจาก Lancer ด้วยการทดสอบการไหลในอุโมงค์ลมร่วมกับจำลองการไหลทั้งการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัวด้วยวิธีทางซีเอฟดี เปรียบเทียบระหว่างรถที่ติดและไม่ติด boat tail พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง 6 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการจำลองการไหลแบบคงตัว และ 18 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการจำลองแบบไม่คงตัว และลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบในอุโมงค์ลม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการจำลองแบบไม่คงตัวให้คำตอบที่

ถูกต้องและเป็นประโยชน์มากกว่าในการศึกษาการไหลในช่วงเวก นอกจากนี้ Hoffmann et al. (2015) ได้ศึกษาการลดแรงต้านอากาศของรถบรรทุกด้วยการติด Boat tail หรือเรียกว่า Base flap ความยาว 100 มิลลิเมตรบนแบบจำลองย่อส่วนขนาด 10 เปอร์เซ็นต์ของรถบรรทุกพร้อมกับการใช้ Vortex generators เพื่อเพิ่มมุมเอียงของ Base flap พบว่าการปรับมุมเอียงของ Base flap เท่ากับ 15 องศา ช่วยลดแรงต้านได้มากที่สุด 33 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อติดตั้ง VG ร่วมกับ Base flap จะช่วยเพิ่มมุมเอียงของ Base flap ได้เป็น 20 องศา และลดแรงต้านได้ 26 เปอร์เซ็นต์

## 2. Flap/ Deflector

Lee and Co (2009) ได้ทำการศึกษาการไหลบริเวณด้านหลัง Gurney-type flap พบว่า flap ที่มีการเจาะรูมีประสิทธิภาพในการลดแรงต้าน และลดขนาดช่วงเวก ได้ดีกว่าแบบไม่เจาะรู แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ศึกษาการไหลผ่าน flap เพียงอย่างเดียวไม่ได้ติดตั้งบนรถ Fouree et al. (2011) ทำการทดลองติดและปรับมุม deflector บนรถยนต์พบว่าลดแรงต้านได้สูงสุด 9 เปอร์เซ็นต์ ต่อมา Beaudoin and Aider (2008) ทำการทดลองโดยใช้แบบจำลอง Ahmed body เป็นตัวเปรียบเทียบระหว่างก่อนติดและหลังติด flap ทุกขอบของผิวด้านหลังรถและพบว่าตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านมากที่สุดคือ flap ทั้งสองอันที่ติดอยู่ด้านข้างของ slant (หมายเลข 4) ลดแรงต้านได้ 17.6 เปอร์เซ็นต์ โดยรวมแล้วการติด flap ที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถลดแรงต้านลงได้ 25 เปอร์เซ็นต์ และลดแรงยกได้ 107 เปอร์เซ็นต์, Altaf et.al (2014) พบว่าสามารถลดแรงต้านจากท้ายรถได้ 6-11 เปอร์เซ็นต์ เมื่อติดตั้ง flap ที่ท้ายรถ ด้วยความยาวและรูปทรงที่ต่างกันไป



รูปที่ 2.17 การติด flap ทุกขอบของผิวด้านท้ายของ Ahmed body (Beaudoin and Aider, 2008)

### 3. Vortex generators (VG)

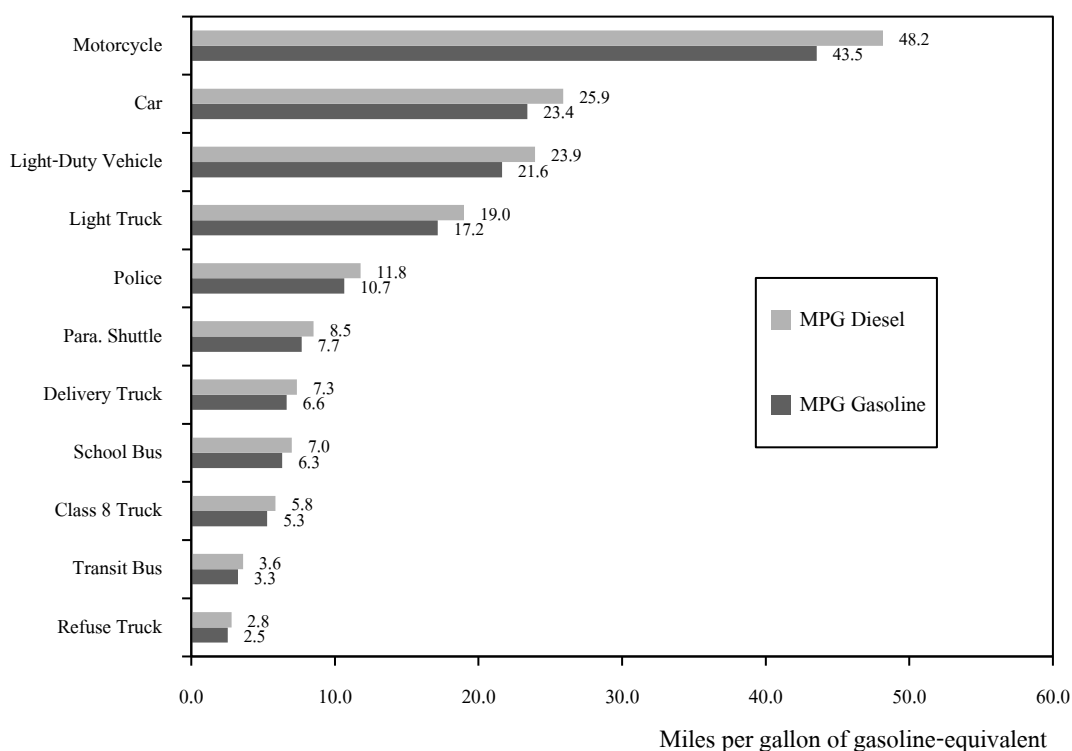
Vortex generators หรือเขียนแทนด้วย VG นิยมใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการควบคุมการเปลี่ยนแปลงชั้นซิกผิวจากแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน รวมถึงการควบคุมการไหลแยกชั้นของอากาศด้วยการถ่ายโอน โมเมนตัมจากอากาศนอกชั้นซิกผิวให้กับอากาศในชั้นซิกผิว (Kuya, Y. et.al, 2009) พบได้บ่อยบนปีกเครื่องบิน การติด VG ช่วยชะลอการไหลแยกของอากาศออกจากปีกเครื่องบินซึ่งจะส่งผลให้เครื่องบินสูญเสียแรงยก (Stall) ช่วยให้ปีกเครื่องบินสามารถทำมุมปะทะกับอากาศได้สูงขึ้นโดยไม่สูญเสียแรงยก ขนาดความสูงของ VG เท่ากับความสูงของชั้นซิกผิว ณ ตำแหน่งติดตั้ง หากติดตั้ง VG ก่อนจุดเปลี่ยนแปลง (Transition point) จะช่วยลดการไหลแยกที่ชั้นซิกผิวแบบราบเรียบ (Laminar separation) และชะลอการเปลี่ยนแปลงชั้นซิกผิวจากชั้นซิกผิวแบบราบเรียบเป็นแบบปั่นป่วน หรือในบางกรณีการติด VG ในบริเวณที่ไหลปั่นป่วนเพื่อเพิ่มพลังงานให้ชั้นซิกผิวและชะลอการแยกไหล (Katz and Morey, 2008) ภายหลังได้มีการนำ VG มาใช้ในรถยนต์ประเภทต่าง ๆ เช่นรถแข่ง ด้วยการติด VG ไว้ใต้ท้องรถแข่งเพื่อสร้างแรงกดจากการทำให้ใต้ท้องรถมีความดันต่ำกว่าผิวด้านบน จากนั้น Katz และ Morey ได้ทดสอบการไหลผ่าน VG ที่ติดไว้ใต้ท้องรถแข่ง (Underwing) ในอุโมงค์ลมเพื่อหารูปร่าง ความยาว และมุมติดตั้งที่เหมาะสม พบว่า VG รูปร่างสามเหลี่ยม แบบสั้น ทำมุม 20 องศา กับทิศทางการไหลของอากาศให้สัดส่วนแรงยกต่อแรงต้านมากที่สุด, Lav (2013) ได้ติดตั้ง VG รูปทรงสามเหลี่ยมวางตัวขนานกับทิศทางการไหลของอากาศ ที่ตำแหน่งขอบท้ายหลังคาของหัวรถลาก (Tractor) และด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของท้ายรถพ่วง (Trailer) พบว่าแรงต้านอากาศลดลง 3.969 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มความสูงของหัวรถลากขึ้น 5 มิลลิเมตร และเมื่อติดตั้ง VG เพิ่มที่ขอบหัวรถลากและท้ายรถพ่วงจำนวนรวม 11 ชิ้นสามารถลดแรงต้านได้สูงสุด 9.074 เปอร์เซ็นต์

#### 2.7 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสาร

อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถ หมายถึง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขับเคลื่อนต่อระยะทาง ในปัจจุบันการวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถทำได้ 2 แบบ คือ วัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อหน่วยระยะทาง แสดงในหน่วยลิตรต่อ 100 กิโลเมตร ซึ่งถ้าตัวเลขที่ได้มีค่าน้อย หมายความว่ารถใช้น้ำมันเชื้อเพลิงน้อยในระยะทาง 100 กิโลเมตร หรืออีกแบบหนึ่งคือ ระยะทางต่อหน่วยเชื้อเพลิงที่ใช้ แสดงในหน่วยกิโลเมตรต่อลิตร ซึ่งถ้าตัวเลขมีค่ามาก แปลว่ารถคันนั้นมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงน้อย หรือสามารถวิ่งได้ระยะทางมากต่อการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 1 ลิตร



Average Fuel Economy of Major Vehicle Categories



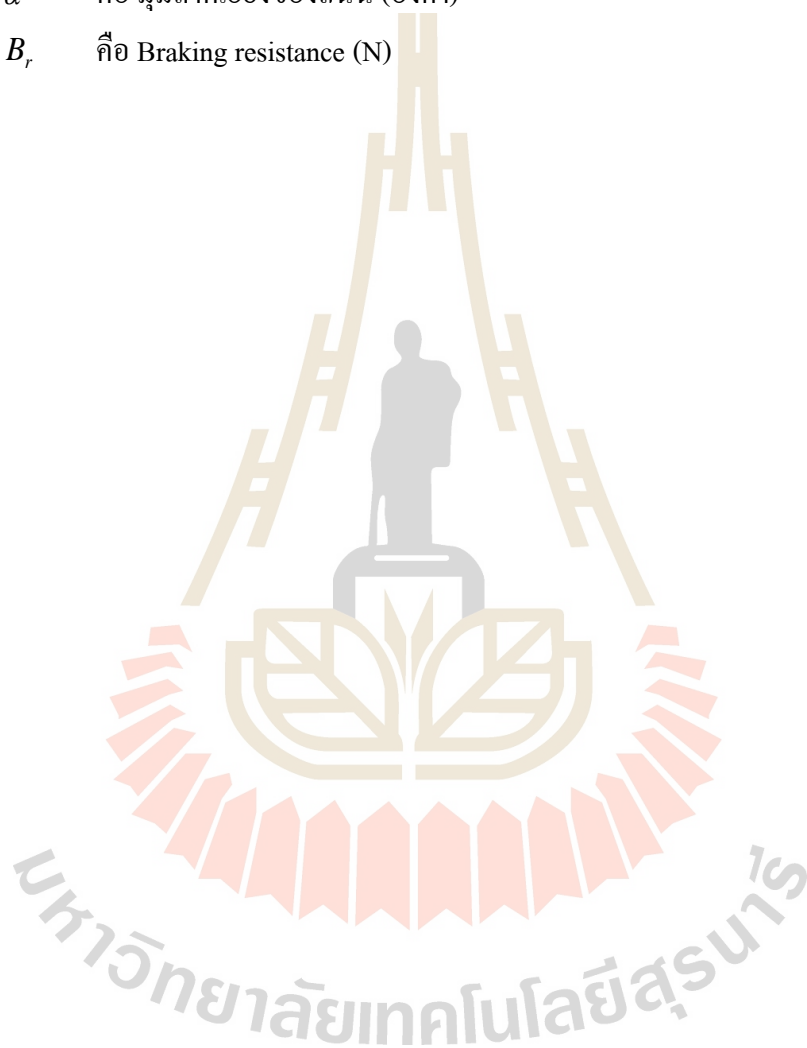
รูปที่ 2.18 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะประเภทต่าง ๆ (ไมล์ต่อแกลลอน)  
(AFDC, 2014)

ข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของยานพาหนะทางบกประเภทต่าง ๆ จากการรวบรวมข้อมูลของศูนย์ข้อมูลเชื้อเพลิงทดแทน (AFDC) กระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา, 2014 แสดงในรูป 2.18 โดยพบว่ารถโดยสารหรือรถบัสนั้นมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทเบนซินและดีเซลเป็นจำนวน 3.3 และ 3.6 ไมล์ต่อแกลลอน หรือคิดเป็น 1.40 และ 1.53 กิโลเมตรต่อลิตรตามลำดับ

การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$B_e = \frac{\int b_e \cdot \frac{1}{\eta_u} \left[ \left( m \cdot f \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{\rho}{2} C_D A v^2 \right) + m(a + g \sin \alpha) + B_r \right] \cdot v dt}{\int v dt} \quad (2.31)$$

เมื่อ	$B_e$	คือ Distance consumption (g/m)
	$b_e$	คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption: g/kWh)
	$m$	คือ มวลของรถ (kg)
	$f$	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ
	$g$	คือ ความเร่งโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )
	$\alpha$	คือ มุมลาดเอียงของถนน (องศา)
	$B_r$	คือ Braking resistance (N)



## บทที่ 3

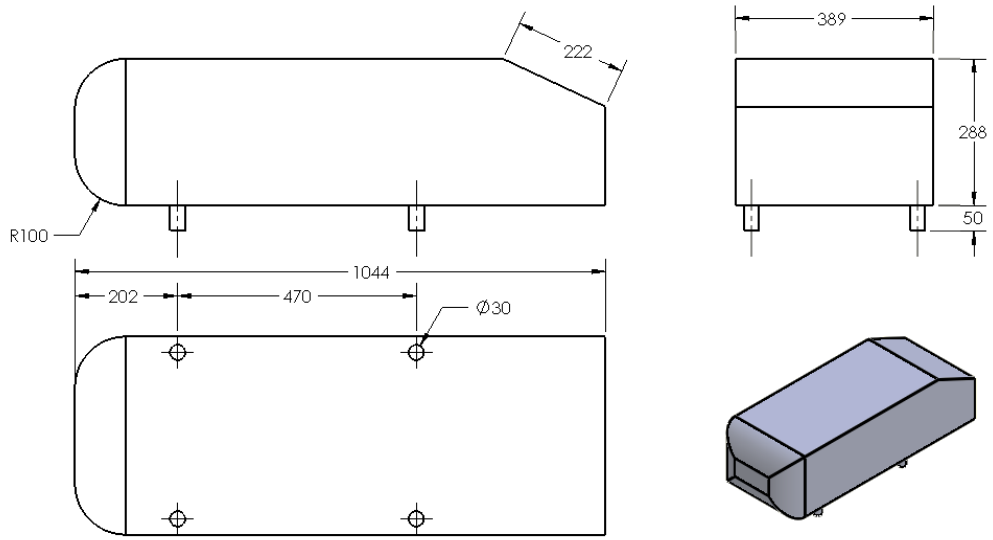
### วิธีการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการลดแรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมืองโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปทรงของรถด้วยการออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง อาศัยเทคนิคด้านซีเอฟดีเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถโดยสาร โดยขั้นตอนการศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการตรวจสอบกระบวนการใช้งานของซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 ให้เกิดความน่าเชื่อถือ ส่วนที่สองคือการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสาร เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงต้านและตำแหน่งที่เกิดแรงต้านมากที่สุดซึ่งนำไปสู่การออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศเพื่อแก้ปัญหาคาร์บอนไดออกไซด์ที่ติดต่อกับรถโดยสาร ส่วนที่สามคือการออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ และจำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้าน เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์

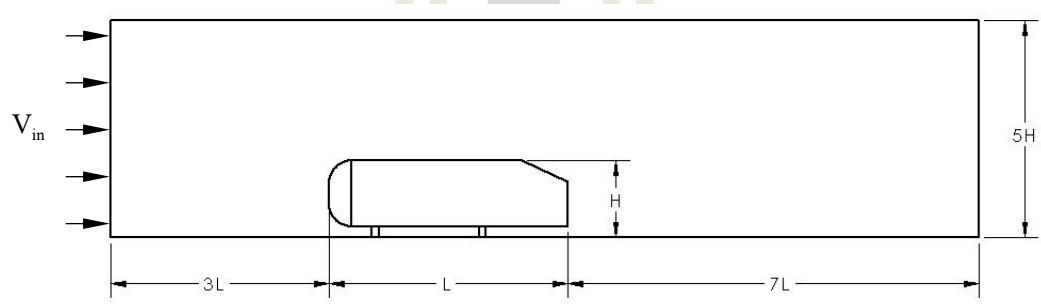
#### 3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์

ในการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของกระบวนการใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 ผ่านกรณีทดสอบ Ahmed body ที่ผิวเอียง (Slant) ทำมุม 25 องศา กับแนวระดับ ซึ่งนำเสนอโดย S. R. Ahmed ในปี ค.ศ. 1984 ด้วยการเปรียบเทียบผลจากการจำลองการไหลด้วยซอฟต์แวร์กับค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จากแหล่งข้อมูลของ ERCOFTAC (Lienhart et al., 2000)

Ahmed Body ได้รับความนิยมและการยอมรับความถูกต้องสำหรับใช้เป็นกรณีเปรียบวัดสำหรับการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านยานยนต์ เนื่องจากแบบจำลอง Ahmed body เป็นรูปทรงอย่างง่ายของยานยนต์ที่ยังคงพฤติกรรมการไหลเฉพาะตัวหลัก ๆ ของอากาศพลศาสตร์ยานยนต์ พฤติกรรมเหล่านั้นประกอบด้วย การไหลวน (Vortex) การไหลแยกชั้น (Separated flow) และการไหลบรรจบ (Reattach flow) รูปทรงของ Ahmed Body เป็นรูปทรงอย่างง่ายของรถ ไม่มีอุปกรณ์เสริมหรือล้อ ลำตัวเป็นทรงสี่เหลี่ยม กว้าง 0.389 เมตร ยาว 1.044 เมตร สูง 0.288 เมตร มีผิวโค้งบริเวณด้านหน้า และผิวเอียงบริเวณด้านหลัง 25 องศา ส่วนล้อถูกแทนด้วยทรงกระบอก 4 แห่ง แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดและรูปร่างของ Ahmed Body (มิลลิเมตร)



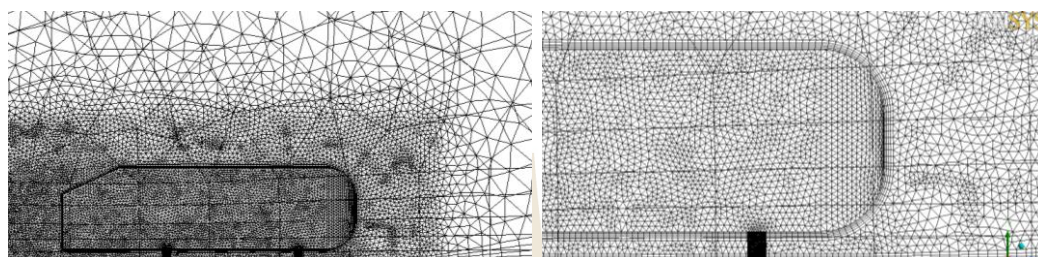
รูปที่ 3.2 ขนาดโดเมนของอากาศสำหรับจำลองการไหลผ่าน Ahmed Body

ขั้นตอนการเปรียบเทียบวัดความถูกต้องของซอฟต์แวร์และการหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมผ่านแบบจำลองมาตรฐาน Ahmed Body เพื่อนำไปใช้กับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง มีดังนี้

1.) การสร้างกริด

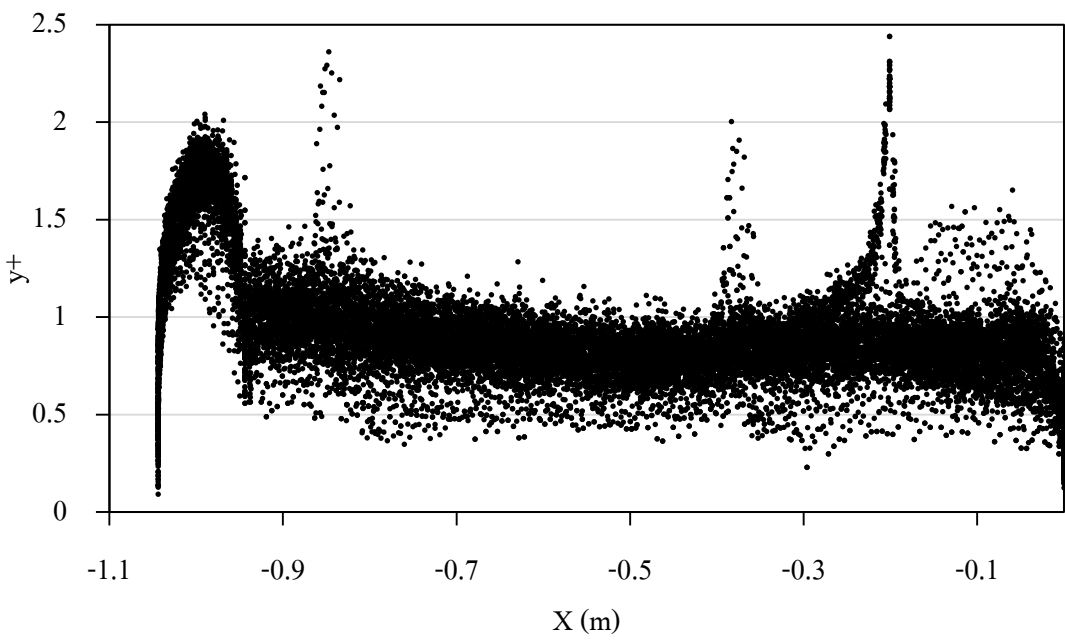
ขั้นตอนการสร้างกริดเป็นขั้นตอนต่อจากการสร้างโดเมนอากาศรอบ Ahmed Body ตามขนาดที่แสดงในรูปที่ 3.2 กริดที่ใช้เป็นกริดแบบไร้โครงสร้าง รูปทรงสี่หน้า และสร้างชั้นกริดปริซึมถัดจากผิวของ Ahmed body จำนวน 5 ชั้น โดยใช้คำสั่ง Inflation และสร้างกริดที่อยู่รอบ ๆ แบบจำลองให้มีขนาดเล็กกว่ากริดบริเวณที่อยู่ไกลออกไป ด้วยคำสั่ง Body of influence สร้างกล่องสี่เหลี่ยมครอบแบบจำลอง และกำหนดขนาดให้กริดในกล่องสี่เหลี่ยมนั้นมีขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่น

และทดสอบความเป็นอิสระของกริดด้วยการสร้างกริดที่ใช้ในการจำลองการไหลด้วยขนาดต่าง ๆ กัน โดยผลจากการทดสอบความเป็นอิสระของกริดทำให้ได้กริดสำหรับการจำลอง ซึ่งมีจำนวน 445,518 จุดต่อและ 2,069,091 อิlemenต์ ได้จากการกำหนดขนาดของผิวแบบจำลองขนาด 10 มิลลิเมตร, ขนาดล้อ 2 มิลลิเมตร และขนาดกริดรอบ ๆ แบบจำลอง 15 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 กริดสำหรับการไหลผ่าน Ahmed body (ซ้าย) และกริดแบบปริซึมจำนวน 5 ชั้น ถัดจากผิวของ Ahmed body (ขวา)

ภายหลังจากการสร้างกริดด้วยวิธีข้างต้นแล้ว ต้องตรวจสอบว่ากริดที่ทำการสร้างไปเพียงพอสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมกริดและแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองหรือไม่ เนื่องจาก กริดส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำของแบบจำลองการไหลและคำตอบหรือผลการจำลอง กริดคุณภาพต่ำส่งผลให้ความถูกต้องของคำตอบลดลงด้วย สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน สิ่งสำคัญคือบริเวณชั้นขีดผิวควรสร้างกริดแบบมีโครงสร้าง (Structured grid) (กริดสี่เหลี่ยมสำหรับสองมิติและ กริดปริซึมหรือหกหน้าสำหรับสามมิติ) ให้ครอบคลุมตลอดความหนาชั้นขีดผิว จากนั้นจึงพิจารณาค่า  $y^+$  ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติ แสดงระยะห่างจากผนังถึงจุดต่อแรกของกริด (ค่าเทียบกับความเร็วของไหลที่ กริดนั้น ๆ) โดยค่า  $y^+$  ที่แนะนำให้ใช้สำหรับชั้นขีดผิวคือ  $y^+ \sim 1$  แต่หากใช้ wall function ด้วยควรหลีกเลี่ยงกริดที่มีค่า  $y^+$  ต่ำกว่า 30 จากรูป 3.4 แสดงการกระจายค่า  $y^+$  บนผิวของแบบจำลอง Ahmed body ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1



รูปที่ 3.4 ค่า y+ ของแบบจำลอง Ahmed body

2.) การกำหนดเงื่อนไขขอบ

การกำหนดเงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหล ต้องกำหนดให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของผลเฉลย ซึ่งเงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลของอากาศผ่าน Ahmed body แสดงในตารางที่ 3.1 และค่าคงที่ของอากาศและแบบจำลอง Ahmed body มีดังนี้

1. ความหนืดเชิงจลนศาสตร์ ( $\nu$ ):  $15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
2. ความหนาแน่นอากาศ ( $\rho$ ):  $1.225 \text{ kg/m}^3$
3. ความสูงของแบบจำลอง Ahmed: 288 mm
4. เลขเรย์โนลด์เทียบกับความสูงของแบบจำลอง Ahmed: 768,000

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่าน Ahmed body

ขอบเขต (Boundary)	เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)	ขนาด
ทางเข้า	Velocity Inlet  Turbulence specification method: Intensity and viscous ratio 1:10	40 เมตร/วินาที

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่าน Ahmed body (ต่อ)

ขอบเขต (Boundary)	เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)	ขนาด
ทางออก	Pressure Outlet  Turbulence specification method:  Intensity and viscous ratio 5:10	0 ปาสคาล
Ahmed body	Wall	-
ผนังอิมโงค์ลิม	Symmetry	0 เมตร/วินาที

### 3.) การจำลองการไหล

การจำลองการไหลใช้แบบจำลองการไหล 3 แบบ คือ แบบจำลองการไหลราบเรียบ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k - \epsilon$  ที่ใช้ Standard wall function และแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $SST k - \omega$  เพื่อหาแบบจำลองการไหลที่ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เพื่อนำไปใช้กับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารในขั้นตอนต่อไป

#### 3.1) จำลองการไหลแบบราบเรียบ

การจำลองการไหลแบบราบเรียบ กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ จำลองการไหลแบบคงตัว ใช้วิธีการแก้ปัญหาปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างดันทลม (Upwind differencing scheme) กำหนดค่า Under-Relaxation factors สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, แรงเท่ากับ 1 โมเมนตัมเท่ากับ 0.7

#### 3.2) จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง $k - \epsilon$

การจำลองการไหลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $k - \epsilon$  มีการตั้งค่าสำหรับการแก้ปัญหาดังนี้ จำลองการไหลแบบคงตัว ใช้วิธีการแก้ปัญหาปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างดันทลม กำหนดค่า Under-Relaxation factors สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, แรงเท่ากับ 1, โมเมนตัมเท่ากับ 0.7, Turbulent kinetic energy เท่ากับ 0.8, Specific dissipation rate เท่ากับ 0.8 และ Turbulent viscosity เท่ากับ 1

#### 3.3) จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง $SST k - \omega$

ในการจำลองการไหลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $SST k - \omega$  มีการตั้งค่าสำหรับการแก้ปัญหาดังนี้ จำลองการไหลแบบคงตัว ใช้วิธีการแก้ปัญหาปฏิสัมพันธ์ความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างดันทลม (Upwind differencing scheme) กำหนดค่า Under-Relaxation factors

สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, สำหรับความหนาแน่นเท่ากับ 1, แรงเท่ากับ 1, โมเมนตัมเท่ากับ 0.7, Turbulent kinetic energy เท่ากับ 0.8, Specific dissipation rate เท่ากับ 0.8 และ Turbulent viscosity เท่ากับ 1

เงื่อนไขการเข้าสู่และหยุดจำลองการไหลมีสองเงื่อนไข กำหนดให้ค่า Residuals เท่ากับ  $10^{-4}$  เงื่อนไขแรกซอฟต์แวร์จะหยุดการคำนวณเมื่อความคลาดเคลื่อนของคำตอบทุกสมการ ทั้งสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัม และสมการการไหลปั่นป่วน (สำหรับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST  $k - \omega$  และ  $k - \epsilon$ ) ต่ำกว่า  $10^{-4}$  หรือเงื่อนไขที่สองคือหากค่า Residuals ไม่ลดลงจนต่ำกว่า  $10^{-4}$  จะหยุดการคำนวณเพื่อบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อกราฟ Residual ของทุกสมการ มีแนวโน้มคงที่เป็นเส้นตรง จากนั้นเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลอง Ahmed body ที่รอบห่างกันทุก ๆ 1,000 รอบ เมื่อสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 1,000 รอบที่ติดกันมีค่าใกล้เคียงกัน จึงหยุดการคำนวณ

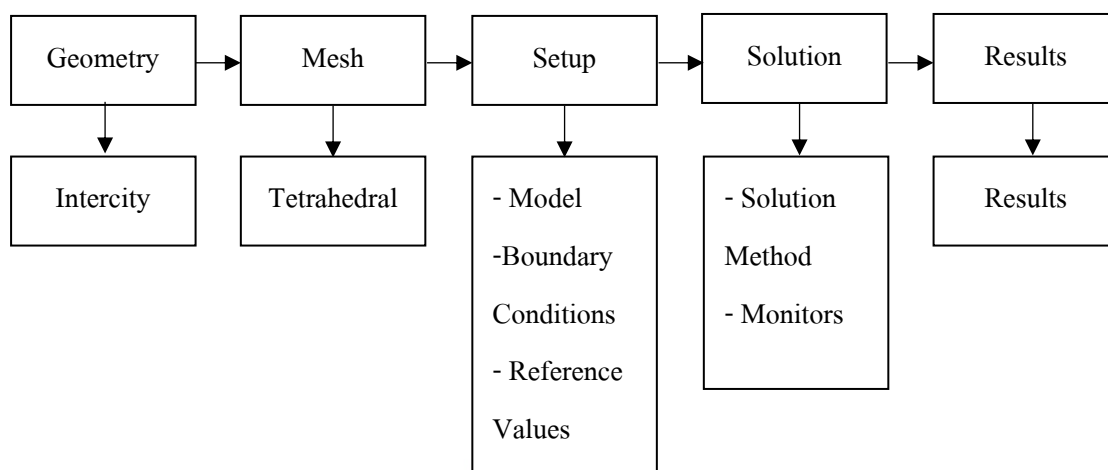
#### 4.) การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล

ภายหลังจากการจำลองการไหลผ่านแบบจำลอง Ahmed body แล้ว จึงทำการเปรียบเทียบผลความเร็วของอากาศบริเวณระนาบกึ่งกลางโดเมนอากาศของแบบจำลอง ที่ระยะต่าง ๆ ในทิศทางตามความยาวของแบบจำลอง รวมถึงการเปรียบเทียบแรงต้านของแต่ละแบบจำลอง การไหลเพื่อหาแบบจำลองการไหลที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลมน้อยที่สุด เพื่อนำไปใช้กับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารต่อไป

### 3.2 การจำลองการไหลผ่านรถโดยสาร

ภายหลังจากการเปรียบเทียบวัดความถูกต้องของซอฟต์แวร์รวมถึงหาแบบจำลองการไหลสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสารขนาดจริงแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ยังไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศใด ๆ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศให้ทราบถึงตำแหน่งที่เกิดแรงต้านอากาศมากที่สุดบนลำตัวรถ หรือบริเวณที่การไหลมีพฤติกรรมที่ส่งผลต่อแรงต้านอากาศที่กระทำกับลำตัวรถ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ติดตั้งเพื่อลดแรงต้าน โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขบนพื้นฐานระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 วิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วน โดยกระบวนการวิเคราะห์การไหลของโปรแกรม ANSYS แสดงในรูป 3.5

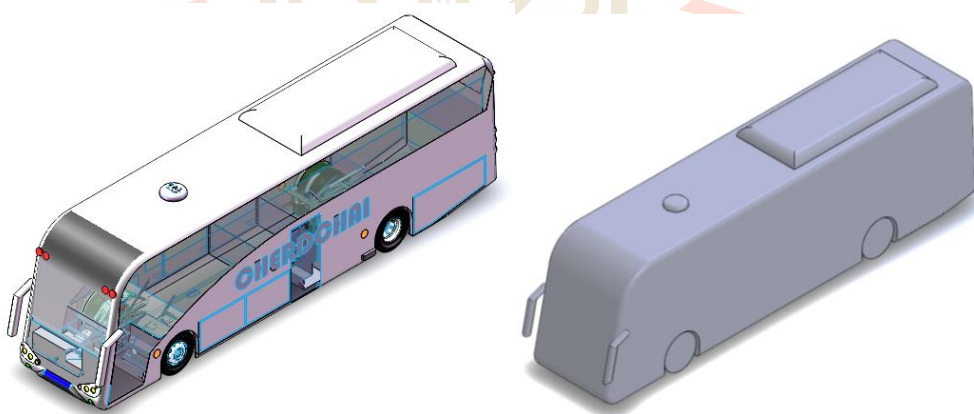




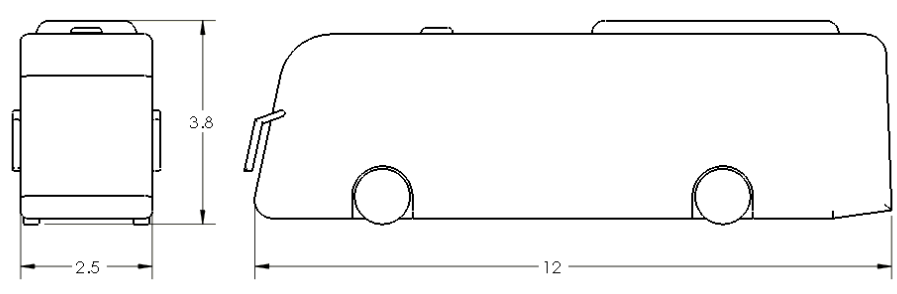
รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงกระบวนการทาง CFD ของการวิเคราะห์การไหล

### 3.2.1 การเขียนแบบรถโดยสารและเตรียมไฟล์สำหรับจำลองการไหล

เขียนแบบรถโดยสารระหว่างเมืองด้วยโปรแกรม SolidWorks และลดรายละเอียดที่ซับซ้อนของรูปทรงรถโดยสารจริงออกไป เหลือเพียงโครงร่างภายนอกของรถ กระบอก และล้อเท่านั้น ขนาดของรถกว้าง (W) 2.5 เมตร สูง (H) 3.8 เมตร และความยาวลำตัว (L) 12 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7

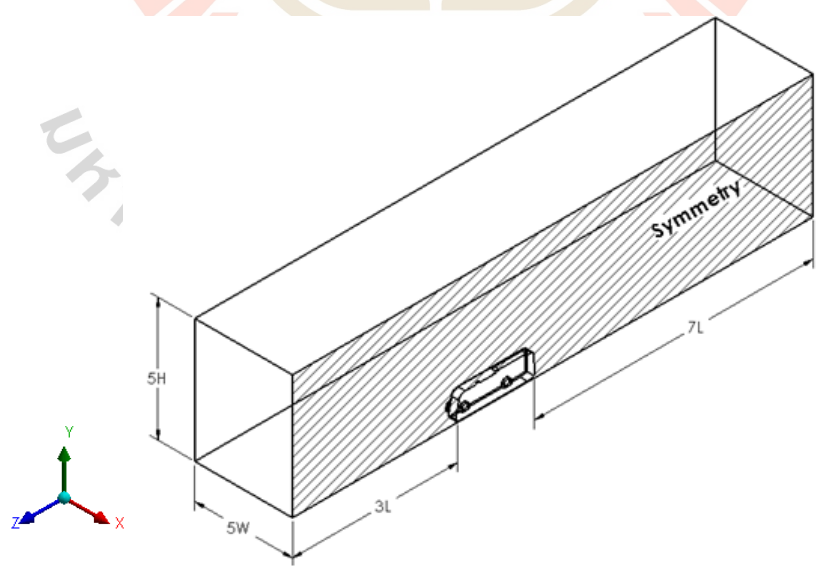


รูปที่ 3.6 รูปทรงรถโดยสารระหว่างเมือง (ซ้าย) และแบบจำลอง 3 มิติสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสาร (ขวา)



รูปที่ 3.7 ขนาดของรถโดยสารระหว่างเมือง

ก่อนทำการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 นั้น ต้องทำการสร้างโดเมนของอากาศรอบลำตัวรถก่อน ด้วยการสร้างกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง ความยาวและความสูง เท่ากับ  $5 \times 10 \times 5$  เท่าของความกว้าง ความยาวและความสูงของรถโดยสาร แทนอากาศที่อยู่รอบรถโดยสาร จากนั้นเจาะกล่องเป็นรูปรถโดยสาร ห่างจากปลายกล่องเป็นระยะ 3 เท่าของความยาวรถแทนบริเวณที่เป็นลำตัวรถโดยสาร ทั้งนี้ความยาวโดเมนแบ่งเป็นความยาวจากด้านหน้าของรถ 3 เท่าและจากด้านหลังรถ 7 เท่า และเนื่องจากรถโดยสารมีรูปทรงสมมาตรตามแนวยาว ในงานวิจัยนี้จัดทำบนสมมติฐานว่าอากาศไหลแบบไม่มีลมปะทะด้านข้างจึงสามารถพิจารณาการไหลเป็นแบบสมมาตรตามแนวความยาวของตัวรถได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงลดโดเมนของการจำลองการไหลเหลือเพียงครึ่งเดียวเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทั้งนี้เพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณ

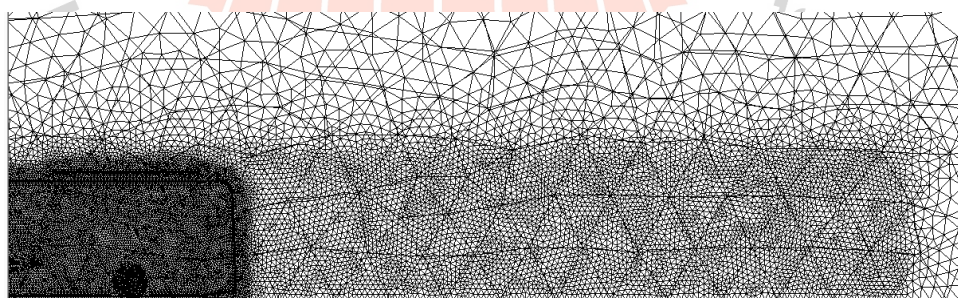


รูปที่ 3.8 ขนาดโดเมนของอากาศรอบรถโดยสาร

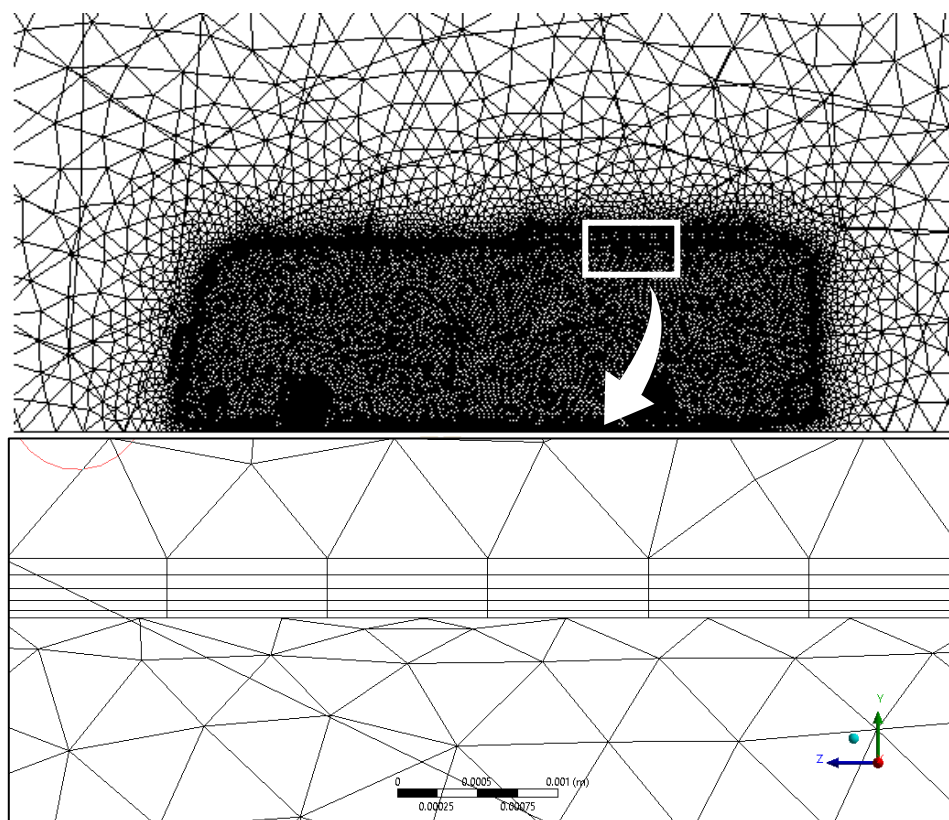
### 3.2.2 การสร้างกริด (Meshing) และทดสอบความเป็นอิสระของกริด

#### 1.) การสร้างกริด

กริดที่ใช้กับการจำลองการไหลมีหลายรูปทรง สำหรับกริดแบบสามมิตินั้นกริดรูปทรงหกหน้าและรูปทรงปริซึมให้ผลเฉลยที่แม่นยำกว่ากริดรูปทรงอื่น แต่กริดรูปทรงสี่หน้าสามารถจัดวางเข้ากับรูปทรงซับซ้อนได้ง่ายกว่า ดังนั้นสำหรับรูปทรงของรถโดยสารระหว่างเมืองที่มีรายละเอียดซับซ้อนในบางจุด กริดรูปทรงสี่หน้าจึงถูกนำมาใช้สำหรับโดเมนอากาศล้อมรอบลำตัวรถโดยสาร แต่ที่ชั้นซิดผิวซึ่งผลของความหนืดของอากาศส่งผลต่อพฤติกรรมกรไหลและแรงต้านเสียดทานผิวจะใช้กริดแบบปริซึมจำนวน 5 ชั้นนับจากผิวรถโดยสารเพื่อให้สามารถทำนายพฤติกรรมชั้นซิดผิวซึ่งส่งผลต่อแรงที่กระทำกับผิวรถได้ (Lanfrut, 2005) และกำหนดความสูงแรกของกริดชั้นแรกจากชั้นซิดผิวของรถโดยสารให้มีค่า  $y^+$  เท่ากับ 1 ตามข้อกำหนดของการใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ SST  $k-\omega$  โดยความสูงเบื้องต้นของกริดชั้นแรกคำนวณด้วยการนำค่า Re, ความเร็วของรถ ฯลฯ และได้ค่าความสูงเริ่มต้นของกริดเท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร และกำหนดให้ Growth rate มีค่า 1.2 กริดถัดจากชั้นกริดปริซึมออกไปจะถูกปรับเป็นรูปทรงสี่หน้าและขนาดของกริดจะใหญ่ขึ้นตามระยะที่ออกห่างจากผิวรถโดยสาร ขนาดกริดบริเวณลำตัวรถโดยสารกำหนดให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร และสร้างกริดขนาดเล็กกว่าบริเวณโดยรอบไว้ด้านท้ายรถโดยสารเนื่องจากท้ายรถเป็นบริเวณที่อากาศมีการไหลวนส่งผลต่อแรงต้านความดันของรถโดยสาร ด้วยการสร้างโดเมนรูปสี่เหลี่ยมไว้บริเวณดังกล่าวด้วยขนาด กว้าง  $\times$  สูง  $\times$  ยาว เท่ากับ  $2.5 \times 4.5 \times 20$  เมตร และกำหนดขนาดกริดด้วยคำสั่ง Body of influence ขนาด 150 มิลลิเมตร กริดสำหรับโดเมนอากาศรอบลำตัวรถโดยสารระหว่างเมืองแสดงในรูป 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 การกำหนดขนาดกริดให้เล็กเฉพาะบริเวณที่สนใจ

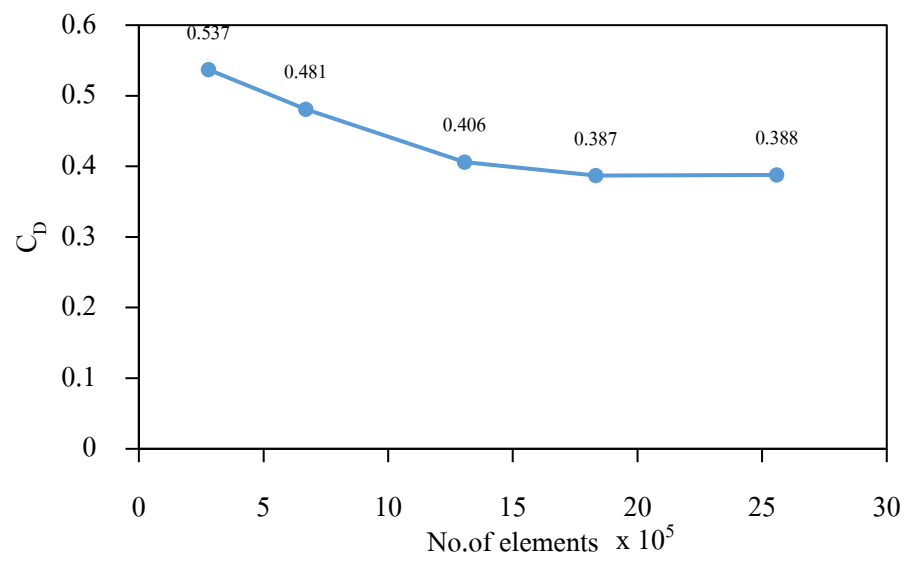


รูปที่ 3.10 กริดแบบปริซึมจำนวน 5 ชั้น นับจากชั้นชิดผิวของรถโดยสาร

## 2.) การทดสอบความเป็นอิสระของกริด

การทดสอบความเป็นอิสระของกริด เพื่อทดสอบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการไหลนั้นไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนกริด ทำได้โดยการสร้างกริดที่มีจำนวนอิลิเมนต์ต่างกันหลาย ๆ ชุด จากนั้นจำลองการไหลโดยใช้กริดต่างชุดกัน แล้วจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน หากกริดสองชุดใดที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันให้เลือกใช้กริดชุดที่มีจำนวนอิลิเมนต์น้อยกว่า ทั้งนี้เพื่อประหยัดเวลาในการจำลองการไหลของคอมพิวเตอร์ สำหรับการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารนี้ ได้สร้าง กริดจำนวนต่างกันทั้งหมด 5 ชุด ได้แก่กริดที่มีจำนวน 279,509, 670,238, 1,306,542, 1,833,155 และ 2,559,317 อิลิเมนต์ตามลำดับ เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่กระทำกับรถโดยสารเทียบกับจำนวนอิลิเมนต์แล้ว พบว่ากริดชุดที่มีจำนวนอิลิเมนต์ 1,833,155 และ 2,559,317 อิลิเมนต์ ให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.387 และ 0.388 ตามลำดับ จึงเลือกใช้กริดชุด ที่มี 1,833,155 อิลิเมนต์ในการจำลองการไหล ซึ่งได้จากการกำหนดขนาดพื้นผิวของรถโดยสารให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร และให้กริดชั้นแรกจากผิวรถโดยสารเป็นรูปทรงปริซึม ขนาด

ความสูง 0.02 มิลลิเมตร และกำหนดขนาดกริดในกล่องสี่เหลี่ยมด้านท่ายรถโดยสารขนาด 150 มิลลิเมตร โดยผลการเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกับจำนวนอีลิเมนต์แสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสาร

### 3.2.3 การตั้งค่า

#### 1.) การเลือกแบบจำลองการไหล

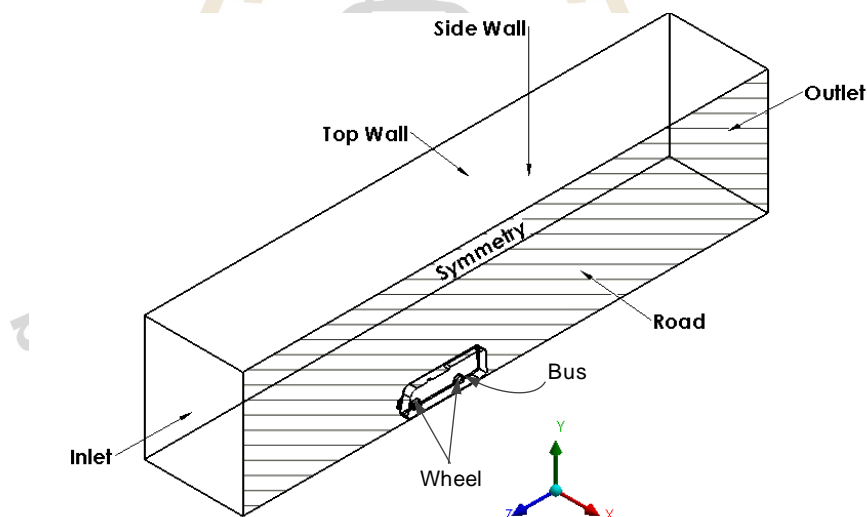
เลือกใช้แบบจำลองการไหลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องจากขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

#### 2.) การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถโดยสาร พบว่าขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง อากาศรอบตัวรถและถนนจะอยู่นิ่ง ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาให้ความเร็วสัมพัทธ์ของรถโดยสารเท่าเดิมแล้ว พบว่าผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกับพิจารณาให้รถอยู่นิ่งแต่อากาศกับถนนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสาร จึงพิจารณาให้รถโดยสารอยู่กับที่แต่อากาศและถนนเคลื่อนที่ผ่านรถโดยสาร โดยกำหนดเงื่อนไขขอบในการจำลองการไหลดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.12

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง

ขอบเขต (Boundary)	เงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)	ขนาด
ทางเข้า (Inlet)	Velocity Inlet Turbulence specification method: Intensity and viscous ratio 1:10	22.2 เมตร/วินาที
ทางออก (Outlet)	Pressure Outlet Turbulence specification method: Intensity and viscous ratio 5:10	0 ปาสกาล
ถนน (Road)	No slip - Moving Wall	22.2 เมตร/วินาที
รถโดยสาร (Bus)	Stationary Wall	0 เมตร/วินาที
ล้อรถ (Wheel)	Moving Wall – Rotational	42.4 เรเดียน/วินาที
ผนังด้านบนและด้านข้าง (Top wall, Side wall)	Symmetry	-



รูปที่ 3.12 เงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง

### 3.) การกำหนดค่าอ้างอิง

กำหนดค่าอ้างอิงสำหรับใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณ ดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดครึ่งหนึ่งของรถโดยสาร  $4.87 \text{ m}^2$
2. ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าโดเมน  $22.22 \text{ m/s}$
3. ความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$
4. ความหนืดของอากาศ  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}$

จากค่าคงที่ดังกล่าวทำให้สามารถคำนวณเลขเรย์โนลด์เทียบกับความยาวของรถโดยสาร (12 เมตร) ได้เท่ากับ  $18.25 \times 10^6$

### 4.) กำหนดวิธีการแก้ปัญหา ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การตั้งค่าวิธีการแก้ปัญหาสำหรับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง

Solver time	Steady
Pressure-velocity Coupling Scheme	SIMPLE
Discretization (Interpolation schemes)	Upwind differencing scheme
Under-Relaxation factors	
Pressure	0.3
Force	1
Momentum	0.7
Turbulent kinetic energy	0.8
Specific dissipation rate	0.8
Turbulent viscosity	1
Residuals	$1 \times 10^{-4}$ for all equations

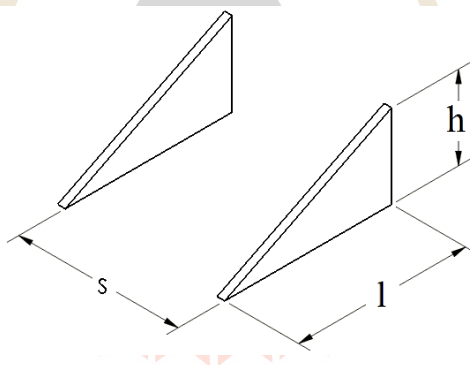
หมายเหตุ คอมพิวเตอร์ core i7 Ram 8 GB ระยะเวลาจำลองการไหล 12 ชั่วโมงต่อเคส

### 5.) การแสดงผล

ในระหว่างการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองจะตั้งค่าซอฟต์แวร์ให้แสดงผลของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารในแต่ละรอบของการทำนายค่าทั้งแบบที่เป็นตัวเลขและเป็นกราฟ เพื่อดูความลู่เข้าของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศควบคู่ไปกับกราฟ Residuals โดยกำหนดทิศทางของแรงต้านไปในทิศทางเดียวกับอากาศที่ทางเข้าโดเมนอากาศ (0, 0, -1)

### 3.3 ออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ

หลักการออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง ภายใต้แนวคิดว่าอุปกรณ์ดังกล่าวต้องไม่เพิ่มพื้นที่หน้าตัดของรถโดยสาร เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มแรงต้านอากาศของรถโดยสาร จึงเลือกใช้ Vortex Generator (VG) รูปทรงสามเหลี่ยมในการลดแรงต้านอากาศเนื่องจากเป็นรูปทรงพื้นฐาน และมีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านซึ่ง Chitrarth (2013) ได้ทำการทดสอบแล้วว่า VG รูปทรงสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านมากกว่ารูปทรงอื่นเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง VG ประเภท bump และ vane นอกจากนี้ VG ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย โดยเบื้องต้นจะติดตั้ง VG บริเวณที่เกิดแรงต้านอากาศกระทำกับรถโดยสารมากที่สุด คือบริเวณท้ายรถโดยสาร ตัวแปรออกแบบของ VG ประกอบด้วย ความสูง ( $h$ ) ระยะห่างระหว่าง VG ( $s$ ) และความยาว ( $l$ ) ดังแสดงในรูป 3.13 จากนั้นทำการออกแบบขนาดของ VG ประกอบด้วยการออกแบบความสูงเริ่มต้น ระยะห่างระหว่าง VG และความยาว จากนั้นนำสัดส่วนขนาดที่เหมาะสมไปปรับความสูงของ VG และนำไปออกแบบตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่ VG มีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุด โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการออกแบบ VG ดังนี้



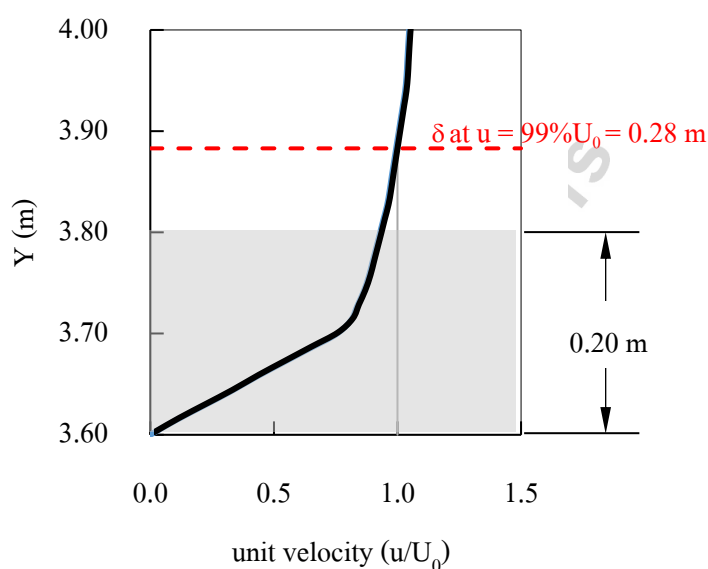
รูปที่ 3.13 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ Vortex generator

#### 1. การออกแบบความสูงเริ่มต้นของ VG

ความสูงของ VG เป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ เนื่องจาก VG ทำหน้าที่ในการชะลอการไหลแยกชั้นของอากาศด้วยการทำให้อากาศที่ไหลผ่าน VG ที่อยู่ภายในและภายนอกชั้นขีดผิวไหลผสมกัน เป็นการเพิ่มพลังงานให้อากาศในชั้นขีดผิว อากาศจึงสามารถไหลยึดเกาะกับชั้นขีดผิวได้ดีขึ้น ดังนั้นความสูงของ VG จึงเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ โดยมีนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสูงของ VG ไว้ดังนี้ Lin (2002) ได้ศึกษา VG ขนาดเล็กและขนาดใหญ่



พบว่า VG ขนาดเล็กที่มีความสูงเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชั้นซิดผิว มีประสิทธิภาพเท่ากับ VG ขนาดใหญ่ที่มีความสูงเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชั้นซิดผิว ขณะที่ Koike (2004) และ Katz (2008) ได้แนะนำว่า VG ควรสูงเท่ากับความหนาชั้นซิดผิว ณ ตำแหน่งติดตั้งเนื่องจาก VG จะทำให้อากาศในชั้นซิดผิวและอากาศนอกชั้นซิดผิว (กระแสอากาศอิสระ) ไหลผสมกัน ทำให้อากาศในชั้นซิดผิวมีพลังงานมากขึ้น ส่งผลให้อากาศมีความสามารถในการไหลยึดติดไปกับพื้นผิวมากยิ่งขึ้น ถ้าติดตั้ง VG ก่อนจุดทรานสิชันจะช่วยลดการเกิดการแยกไหลแบบราบเรียบ (Laminar separation) และชะลอการเติบโตของชั้นซิดผิวจากชั้นซิดผิวแบบราบเรียบเป็นชั้นซิดผิวแบบปั่นป่วน หรือถ้าติดตั้งในช่วงที่มีการไหลปั่นป่วนก็จะช่วยเพิ่มพลังงานให้ซัดซิดผิวและชะลอการแยกไหลของอากาศได้ และ Vinodhini (2016) แนะนำว่าความสูง VG ไม่ควรเกินขนาดความหนาของชั้นซิดผิวของอากาศซึ่งจะทำให้ VG มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในขณะที่ขนาดของรถโดยสารระหว่างเมือง ซึ่งเป็นรถโดยสารมาตรฐาน 1 (รถปรับอากาศพิเศษ) ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 4 ตามพระราชบัญญัติขนส่งทางบก พ.ศ. 2522 ขนาดความกว้างไม่เกิน 2.5 เมตร ความยาวไม่เกิน 12 เมตร ความสูงไม่เกิน 3.8 เมตร แต่ความสูงจากพื้นถึงหลังคารถโดยสารเท่ากับ 3.6 เมตร ดังนั้นอุปกรณ์ที่ติดตั้งเพิ่มขึ้นไปต้องมีขนาดไม่เกิน 0.2 เมตร จึงออกแบบความสูงเริ่มต้นของ VG เท่ากับ 110 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความสูงที่ไม่เกินข้อกำหนดของ กรมขนส่งทางบกและสูงไม่เกินความหนาชั้นซิดผิวของอากาศซึ่งหนาเท่ากับ 280 มิลลิเมตร ส่วนความหนาของ VG กำหนดให้เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ขอบเขตการออกแบบความสูงของ VG แสดงดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 ขอบเขตของการออกแบบความสูงของ VG

## 2. การออกแบบระยะห่างของ VG

ระยะห่างระหว่าง VG ออกแบบให้มีขนาดตั้งแต่ 1-2.5 เท่าของความสูง VG หรือตั้งแต่ 110 ถึง 275 มิลลิเมตร โดยปรับเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.25 เท่าหรือ 27.5 มิลลิเมตร ซึ่งที่ระยะห่างแต่ละขนาดจะมีจำนวน VG ที่ติดตั้งบนรถโดยสารระหว่างเมืองต่างกัน รายละเอียดแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.4 ระยะห่างออกแบบของ VG

s/h	s (mm)	No. of Item
1.00	110.0	21
1.25	137.5	17
1.50	165.0	14
1.75	192.5	12
2.00	220.0	11
2.25	247.5	9
2.50	275.0	9

## 3. การออกแบบความยาวของ VG

ภายหลังจากออกแบบ VG ที่มีความสูง 110 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่าง VG ที่ทำให้ลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุดแล้ว จึงนำขนาดความสูงและระยะห่างที่ได้มาออกแบบความยาวของ VG โดยปรับสัดส่วนความยาวเทียบกับความสูง (l/h) ให้มีขนาดเป็น 1-2.5 เท่าของความสูง หรือ 110-275 มิลลิเมตร รายละเอียดแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.5 ความยาวออกแบบของ VG

l/h	l (mm)	No. of Item
1.00	110.0	11
1.25	137.5	11
1.50	165.0	11
1.75	192.5	11
2.00	220.0	11
2.25	247.5	11
2.50	275.0	11

#### 4. การออกแบบความสูงของ VG

หลังจากการออกแบบระยะห่างและความยาวของ VG แล้ว จะนำสัดส่วนของระยะ ออกแบบดังกล่าวที่สามารถลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุดมาปรับความสูงของ VG โดยปรับความ สูงลดลงและเพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างละ 1 เท่า เป็นความสูงเท่ากับ 55 และ 220 มิลลิเมตรตามลำดับ

#### 5. การออกแบบตำแหน่งติดตั้ง VG

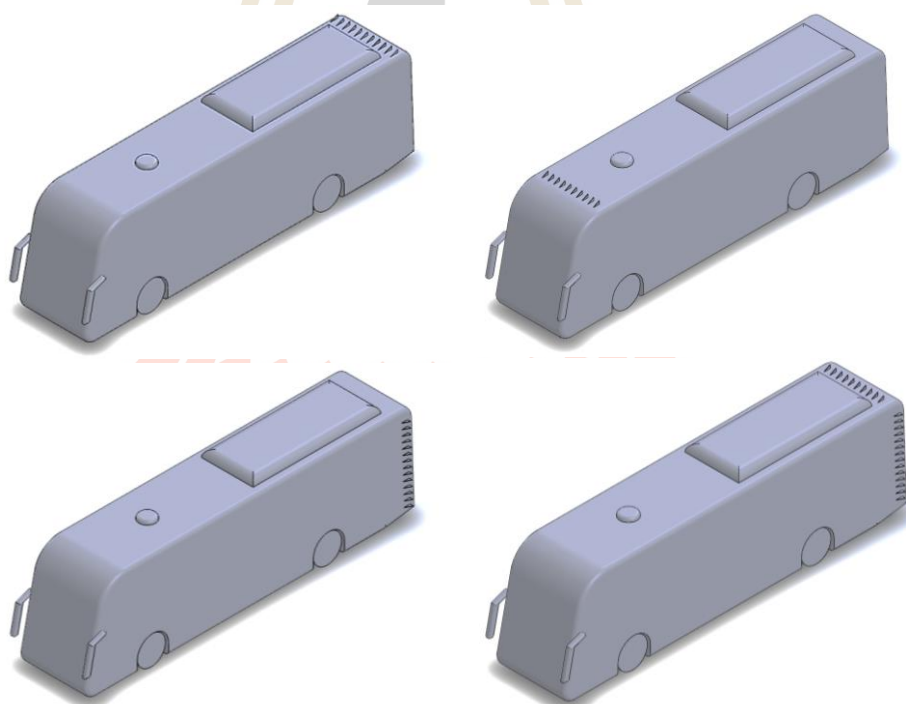
การออกแบบตำแหน่งติดตั้ง VG โดยติดตั้งในบริเวณที่อากาศไหลแยกชั้นจากผิวของ รถโดยสาร บริเวณหน้ารถโดยสารได้แก่ขอบหลังคาด้านหน้ารถ และบริเวณด้านหลังรถได้แก่ผิว ด้านข้างและด้านบนหลังคา โดยออกแบบตำแหน่งติดตั้ง VG ต่าง ๆ กันดังนี้

กรณีที่ 1 ติดตั้ง Vortex generator บนหลังคาด้านหลัง

กรณีที่ 2 ติดตั้ง Vortex generator บนหลังคาด้านหน้า

กรณีที่ 3 ติดตั้ง Vortex generator ด้านข้างลำตัวรถ

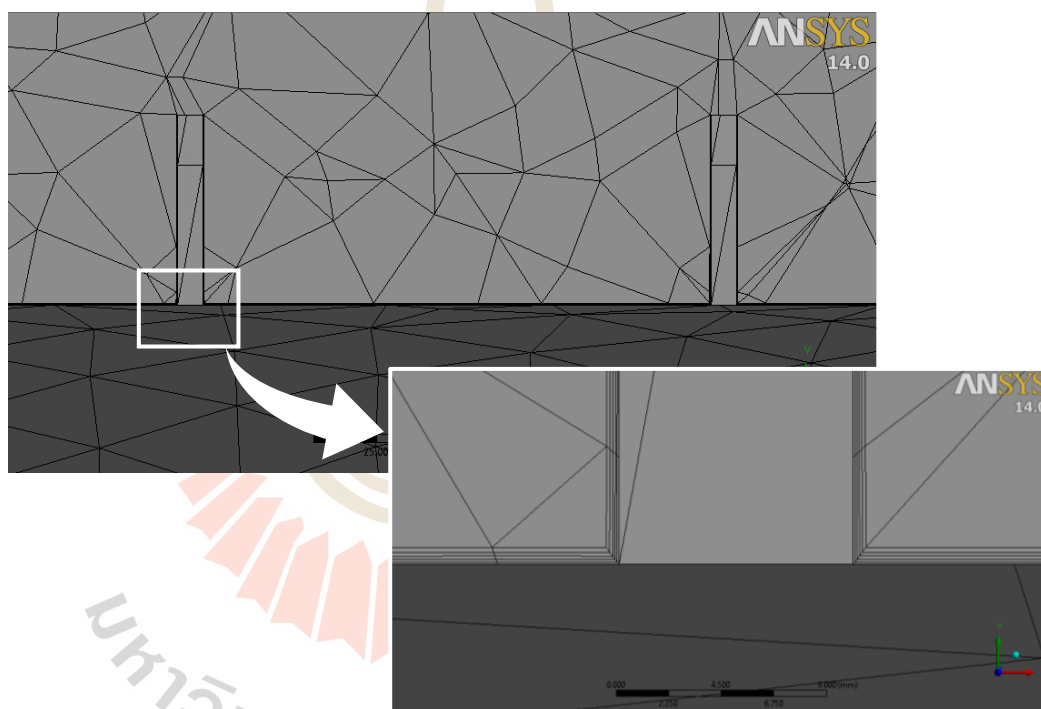
กรณีที่ 4 ติดตั้ง Vortex generator บนหลังคาด้านหลังและด้านข้างลำตัวรถ



รูปที่ 3.15 การติดตั้ง Vortex generator บนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมืองแต่ละกรณี

### 3.4 จำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ติดอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ

ภายหลังจากออกแบบขนาดต่าง ๆ ของอุปกรณ์ได้แล้ว ในขั้นตอนนี้ เป็นการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้าน เพื่อเปรียบเทียบผลของแรงต้านที่กระทำกับรถ เพื่อนำไปปรับปรุงรูปทรงของอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งขั้นตอนและวิธีการเหมือนกับการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 3.2 ทุกประการ คือ เริ่มจากการเตรียมแบบจำลองของรถโดยสารที่ติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้าน สร้างกริดโดยใช้การกำหนดขนาดของกริดตามขั้นตอนการสร้างกริดของรถโดยสารระหว่างเมืองแบบไม่ติด VG และปรับปรุงกริดเพื่อให้ได้ค่า  $y^+$  ที่เหมาะสม ดังแสดงในรูป 3.16 และตั้งค่าซอฟต์แวร์โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ตั้งเหมือนเดิมทุกประการ



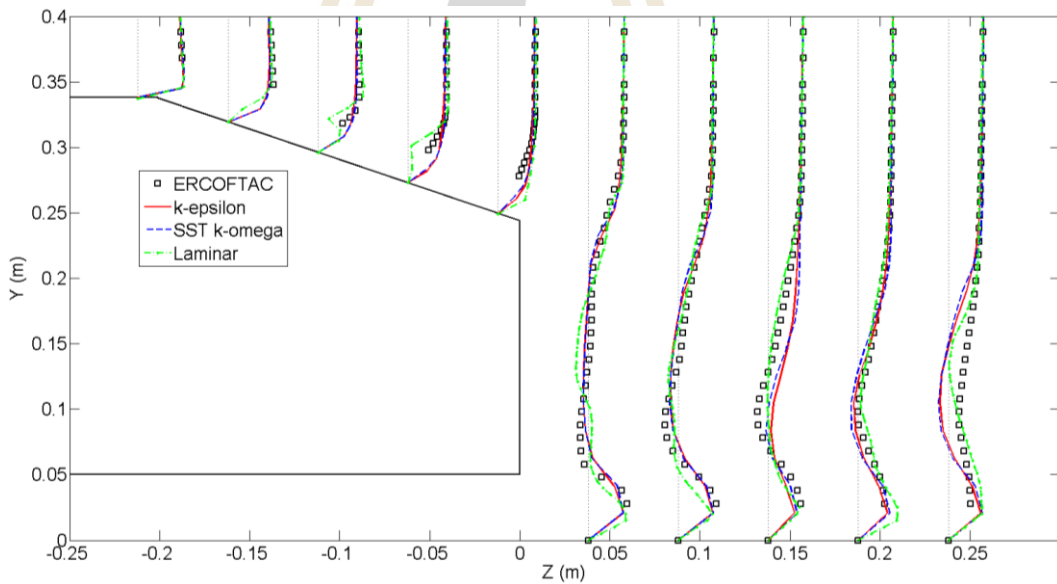
รูปที่ 3.16 กริดแบบปรับจูนจากชั้นขีดผิวของรถโดยสารระหว่างเมืองบริเวณ VG

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการเลือกโมเดลสำหรับจำลองการไหล

ผลจากการจำลองการไหลผ่านแบบจำลอง Ahmed body ด้วยแบบจำลองการไหลราบเรียบ และแบบจำลองการไหลปั่นป่วนทั้ง 2 แบบถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบอากาศไหลผ่านแบบจำลอง Ahmed body ในอุโมงค์ลมของ ERCOFTAC โดย H. Lienhart และคณะ ในรูปแบบของโปรไฟล์ความเร็วอากาศที่ระยะ Z ต่าง ๆ (ตามแนวยาวของแบบจำลอง) บนระนาบกึ่งกลาง โดเมนอากาศของการจำลองการไหลตั้งแต่บริเวณผิวเอียงด้านหลังของแบบจำลองไปจนถึงด้านหลังแบบจำลองเป็นระยะ 0.25 เมตร แสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 โปรไฟล์ความเร็วของอากาศบนระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed body

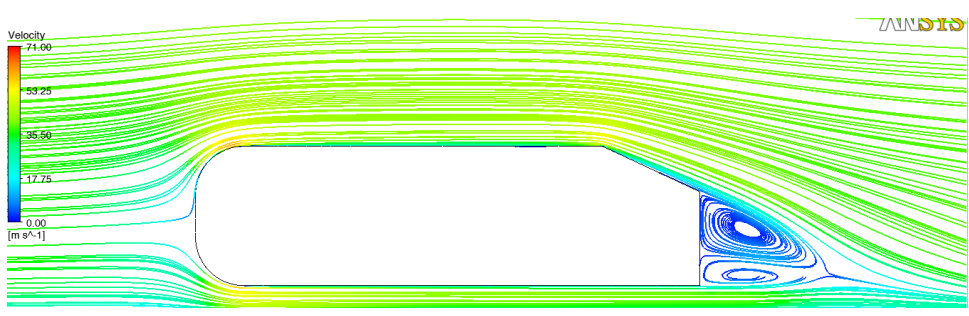
จากรูป 4.1 เมื่อพล็อตกราฟความเร็วหนึ่งหน่วยของอากาศที่ไหลผ่าน Ahmed body บนระนาบกึ่งกลางแล้ว จะเห็นว่าความเร็วอากาศบริเวณชิดผิวแบบจำลองมีค่าเป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะที่ห่างจากผิวรถ จนกระทั่งมีความเร็วคงที่เท่ากับความเร็วกระแสอิสระในที่สุด เมื่ออากาศไหลผ่านไปทางด้านท้ายแบบจำลอง โปรไฟล์ความเร็วแสดงให้เห็นการไหลย้อนกลับของ

อากาศเข้ามาหาท้ายแบบจำลอง แสดงถึงการไหลวนของอากาศในบริเวณดังกล่าว ที่ตำแหน่งใกล้ท้ายแบบจำลองบริเวณที่อากาศไหลย้อนกลับมีขนาดประมาณความสูงของผิวด้านหลัง (Base) และมีขนาดลดลงเมื่อห่างจากท้ายแบบจำลองมากขึ้น ผลความเร็วที่ได้จากทุกแบบจำลองการไหลมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการทดลองและความเร็วที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่ตำแหน่งหลังคา (Slant) ของ Ahmed body ผลความเร็วที่ได้จากการจำลองการไหลด้วยแบบจำลองการไหลราบเรียบมีความแตกต่างจากแบบจำลองอื่น ดังนั้นการเปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วการไหลของอากาศเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบ่งบอกถึงแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่สุดในการจำลองการไหลผ่านแบบจำลอง Ahmed body ได้ จึงทำการเปรียบเทียบแรงต้านของ Ahmed body จากแต่ละแบบจำลองการไหลเทียบกับผลการทดลองของ Ahmed (1984) และหาค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตาราง 4.1

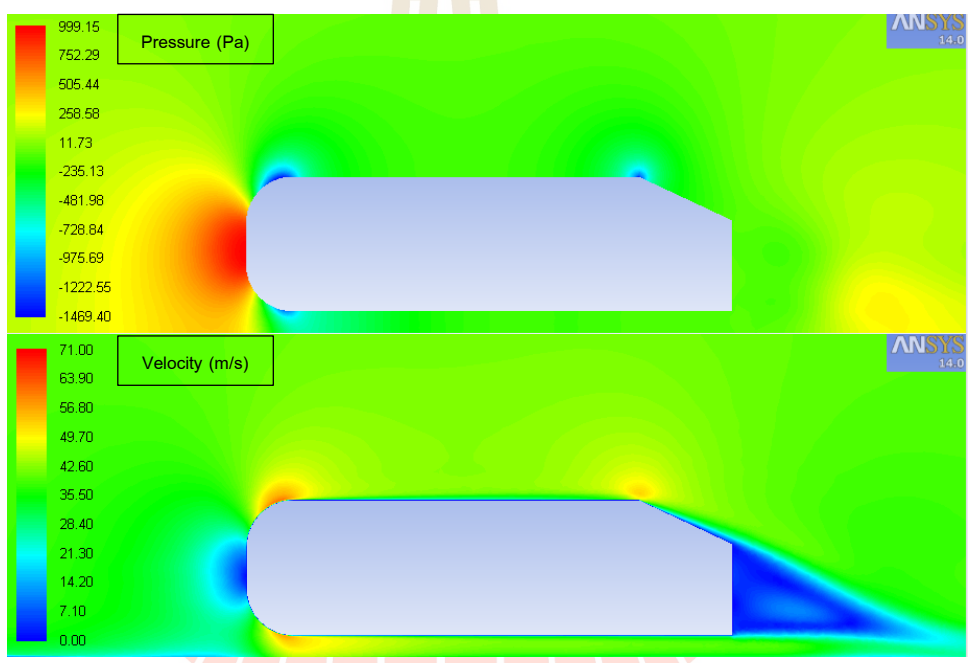
ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านของ Ahmed Body จากการทดลองและการจำลองการไหลบนคอมพิวเตอร์ด้วยแบบจำลองการไหลต่าง ๆ

Model	Pressure Coefficient			Skin Friction	Total	%different
	Nose	Slant	Base			
Ahmed et al.	0.020	0.140	0.070	0.055	0.285	-
Laminar	0.029	0.143	0.111	0.008	0.291	2.1
$SST\ k-\omega$	0.024	0.131	0.079	0.049	0.283	0.7
$k-\varepsilon$	0.030	0.134	0.087	0.054	0.305	7.0

ตาราง 4.1 แสดงการเปรียบเทียบแรงต้านที่กระทำกับ Ahmed body ด้วยแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $SST\ k-\omega$  และ  $k-\varepsilon$  พบว่าแบบจำลองการไหลราบเรียบให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.1 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อดูรายละเอียดตามประเภทของแรงต้านแล้วพบว่าแบบจำลองการไหลราบเรียบแทบจะไม่สามารถประมาณค่าแรงต้านเสียศานได้ ส่วนแบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ  $SST\ k-\omega$  ให้ค่าแรงต้านอากาศรวมใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองของ Ahmed (1984) มากที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อน 0.7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ  $k-\varepsilon$  มีความคลาดเคลื่อน 7 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ  $SST\ k-\omega$  สำหรับใช้ในการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารในขั้นตอนต่อไป



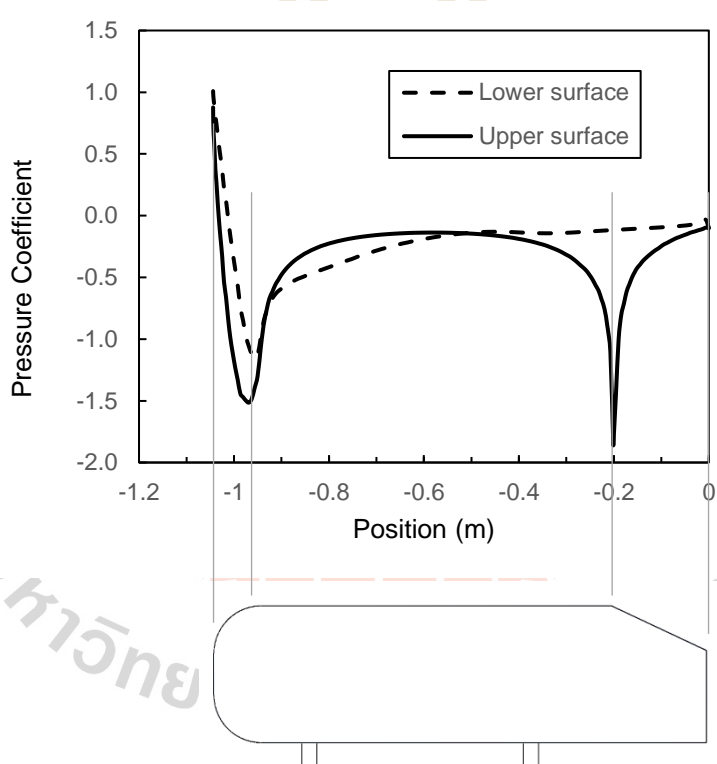
รูปที่ 4.2 เส้นการไหลที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed



รูปที่ 4.3 คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed (บน) และคอนทัวร์ของความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางของแบบจำลอง Ahmed (ล่าง)

จากรูป 4.2 เส้นการไหลของอากาศผ่าน Ahmed body ที่ระนาบสมมาตรแสดงให้เห็นพฤติกรรมของการไหลของอากาศ เมื่ออากาศไหลปะทะกับด้านหน้าของแบบจำลองแล้ว อากาศจะแยกออกเป็น 2 กระแสไหลไปตามผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของแบบจำลองด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นจากตอนที่ไหลปะทะด้านหน้าแบบจำลอง จากนั้นเมื่ออากาศจากด้านบนไหลถึงส่วนท้ายแบบจำลองที่ทำมุมเอียง 25 องศากับแนวระดับแล้ว ความเร็วอากาศจะลดลงเนื่องจากอากาศพยายามรักษารูปแบบการไหลให้ชิดผิวแบบจำลอง อากาศที่เพิ่งไหลพ้นจากผิวด้านบนและล่างของแบบจำลองจะไหลไปผสมกับอากาศนิ่งด้านท้ายแบบจำลองเกิดเป็นบริเวณที่อากาศไหลวนซึ่งมีความเร็วต่ำกว่าอากาศ

บริเวณอื่น ๆ ดังจะเห็นได้จากคอนทัวร์ของความเร็วยุโรปแบบจำลอง Ahmed body บริเวณที่คอนทัวร์เป็นสีฟ้าด้านหลังแบบจำลองดังแสดงในรูป 4.3 (ล่าง) นอกจากนี้คอนทัวร์ของความเร็วและความดันในรูป 4.3 ยังแสดงถึงตำแหน่งที่อากาศเกิดการชะงักไหล เมื่อไหลปะทะกับหน้ารถ และบริเวณที่อากาศไหลแยกชั้นจากผิวของแบบจำลอง โดยจุดชะงักไหลความเร็วมีค่าเท่ากับศูนย์ (บริเวณคอนทัวร์สีฟ้าด้านหน้าแบบจำลองในรูป 4.3 ล่าง) และเกิดความดันมากที่สุด ณ ตำแหน่งนั้น (คอนทัวร์สีแดงในรูป 4.3 บน) ส่วนบริเวณที่อากาศไหลแยกจากผิวของแบบจำลองเนื่องจากความเร็วสูงเกินไปไปอากาศจึงไม่สามารถยึดเกาะกับผิวได้ เกิดที่ส่วนโค้งด้านหน้าแบบจำลองและจุดเปลี่ยนความชันของหลังคา คอนทัวร์ความดันของบริเวณที่อากาศแยกไหลจะแสดงเป็นสีฟ้า เนื่องจากเป็นบริเวณที่ความดันต่ำ ส่วนความดันของอากาศท้ายแบบจำลองมีค่าเป็นลบเนื่องจากความดันต่ำกว่าบรรยากาศส่งผลให้เกิดแรงดูด (แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถ)



รูปที่ 4.4 สัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวของ Ahmed body ที่ระนาบกึ่งกลาง

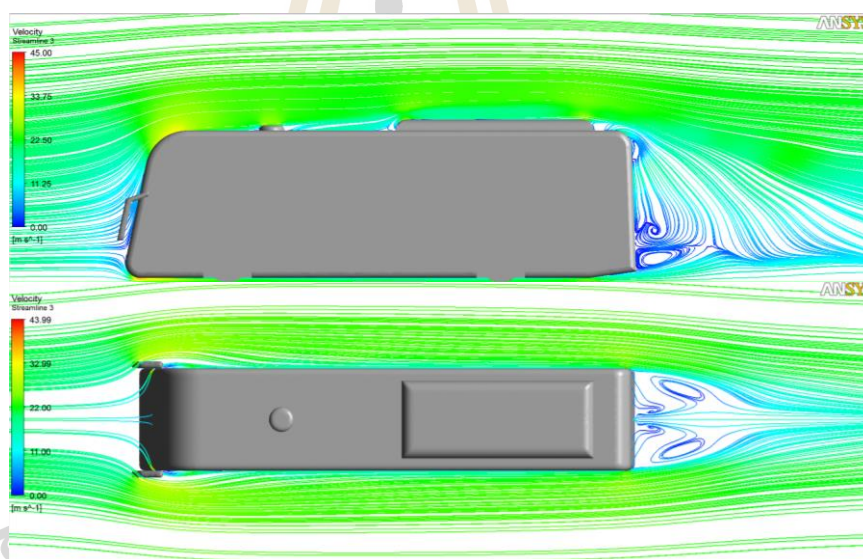
รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายความดันบนผิวด้านบนและด้านล่างของแบบจำลอง Ahmed body จะเห็นว่าจุดที่ความดันมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันคือจุดที่รูปทรงของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนความชันของพื้นผิว เป็นต้น ซึ่งได้แก่บริเวณขอบโค้งด้านหน้าของ



แบบจำลองทั้งด้านบนและด้านล่าง รวมถึงผิวเชิงด้านหลังของแบบจำลอง สัมประสิทธิ์ความดันมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1 ณ ตำแหน่งที่เกิดการชะงักไหลคือบริเวณหน้ารถที่อากาศไหลเข้ามาปะทะ ส่วนตำแหน่งที่สัมประสิทธิ์ความดันมีค่าติดลบมากกว่าบริเวณอื่นมักเป็นจุดที่อากาศเกิดการไหลแยกชั้นออกจากผิวของแบบจำลอง ซึ่งก็คือบริเวณส่วนโค้งหน้ารถทั้งด้านบนและด้านล่าง และจุดเปลี่ยนความชันที่หลังคาของแบบจำลอง

#### 4.2 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง

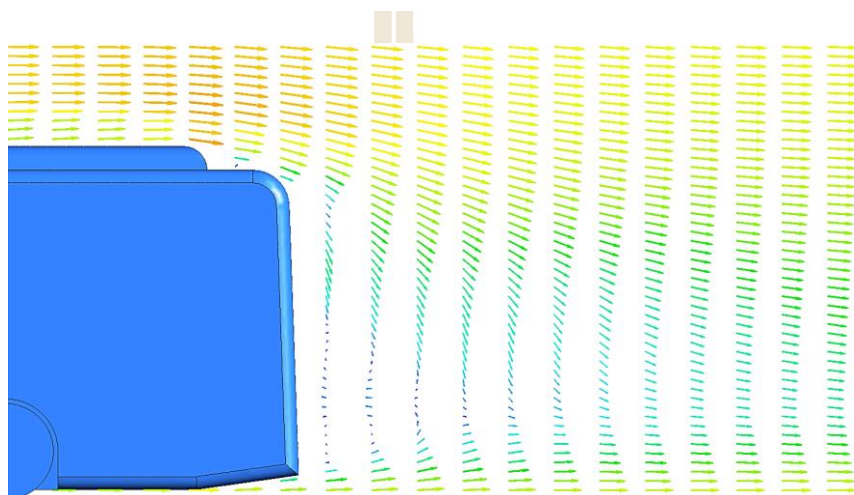
ผลการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยไม่พิจารณาลมขวางลำตัวรถ แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศขณะที่รถเคลื่อนที่ผ่านอากาศหรืออากาศเคลื่อนที่ผ่านรถ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.5 เส้นการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ระนาบกึ่งกลางของโดเมนอากาศ จากมุมมองด้านข้าง (บน) และจากมุมมองด้านบน (ล่าง)

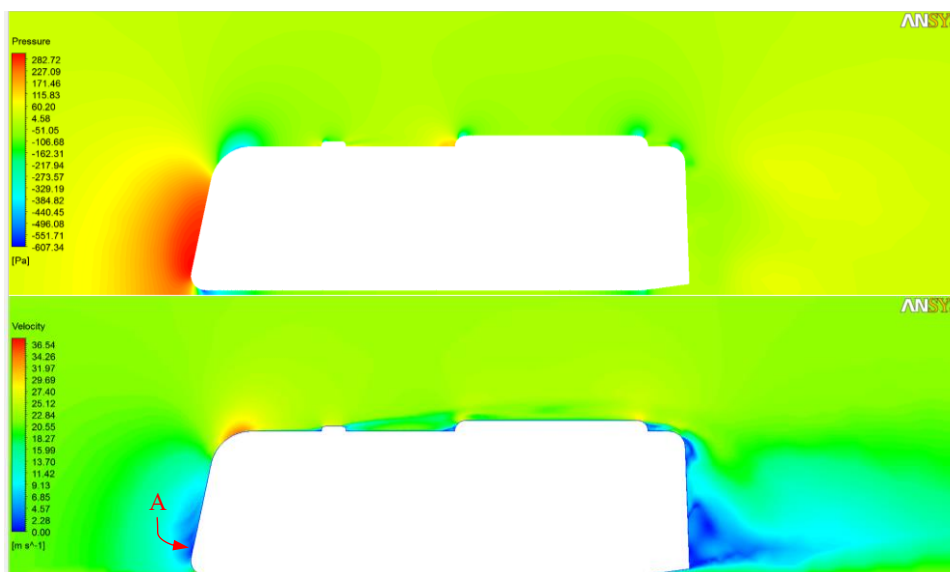
เส้นการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารในรูป 4.5 แสดงลักษณะการไหลของอากาศขณะไหลผ่านรถโดยสารที่มุมมองด้านข้างและด้านบน โดยกระแสอากาศอิสระไหลปะทะกับหน้ารถโดยสารแล้วเกิดการเบี่ยงทิศทางไหลไปตามรูปทรงของรถโดยสารทั้งด้านบน ด้านล่าง และผิวข้าง ซึ่งบริเวณผิวข้างรถโดยสาร อากาศไหลแนบไปกับผิวรถ เนื่องจากเป็นพื้นผิวเรียบไม่มีการเปลี่ยนระดับ ในขณะที่ผิวด้านบนของรถโดยสารมีการติดอุปกรณ์ลดแรงดันให้ห้องโดยสาร ระดับความสูงของพื้นผิวไม่เท่ากัน เมื่ออากาศไหลผ่านจึงเกิดการปะทะกับส่วนที่ยื่นขึ้นมาและเกิดการไหลแยกชั้น

ที่บริเวณดังกล่าว เมื่ออากาศไหลผ่านท้ายรถโดยสารซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของผิวรถ อากาศจะเกิดการไหลแยกชั้นอีกครั้ง เนื่องจากกระแสอากาศจากหลังคารถและจากใต้ท้องรถมีความเร็วกว่าอากาศที่อยู่ท้ายรถ จึงเกิดการผสมกันของอากาศที่มีความเร็วและความดันต่างกัน อากาศจึงไหลม้วนย้อนเข้ามาหาด้านหลังท้ายรถ เกิดเป็นบริเวณที่มีกระแสอากาศไหลวนวน ซึ่งเวกเตอร์ทิศทางความเร็วของอากาศแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เวกเตอร์ความเร็วของอากาศท้ายรถโดยสารที่ระนาบกึ่งกลางของโดเมนการไหล

จากรูปเวกเตอร์ความเร็วของอากาศบริเวณท้ายรถโดยสารแสดงให้เห็นขอบเขตของบริเวณที่อากาศมีการไหลวนอยู่ท้ายรถ ขนาดของบริเวณที่อากาศไหลวนส่งผลต่อแรงต้านอากาศของรถโดยสารเนื่องจากบริเวณที่อากาศไหลวน ความเร็วอากาศต่ำอากาศไหลไม่เป็นระเบียบ และมีทิศทางไหลย้อนเข้าหาท้ายรถ ส่งผลให้ความดันอากาศด้านหลังมีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศ (ความดันเป็นลบ) จึงเกิดเป็นแรงดูดรถโดยสารซึ่งด้านการเคลื่อนที่ไว้ดังนั้นหากอากาศไหลวนเป็นบริเวณกว้างบริเวณที่มีความดันติดลบก็จะเป็นบริเวณกว้าง แรงดูดรถก็จะมากขึ้น เมื่อประกอบกับความดันอากาศด้านหน้ารถซึ่งถูกอากาศไหลเข้าปะทะทำให้ความดันมีค่าสูง เพราะเมื่ออากาศปะทะกับหน้ารถทำให้ความเร็วอากาศลดลง ผลจากแรงดันอากาศด้านหน้ารถทำให้เกิดแรงผลักดันในทิศตรงข้ามการเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการไหลอากาศทั้งหน้ารถและหลังรถล้วนส่งผลต่อแรงต้านของรถโดยสาร ผลการกระจายแรงดันที่บริเวณต่าง ๆ ของรถโดยสารแสดงด้วยคอนทัวร์ความดันและความเร็วอากาศที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสาร และคอนทัวร์ความดันที่ผิวรถโดยสาร ในรูปที่ 4.7-4.9



รูปที่ 4.7 (บน) คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหลของรถโดยสาร และ (ล่าง) คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหลของรถโดยสาร

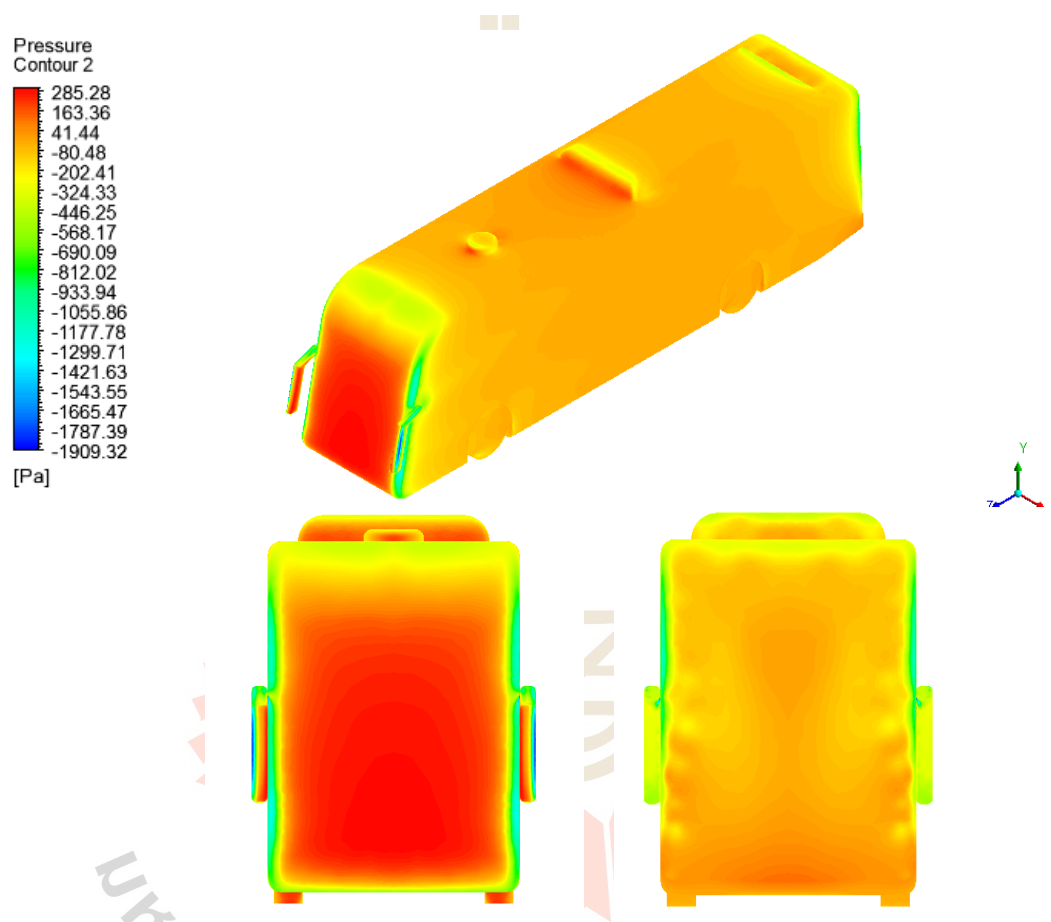
จากรูป 4.7 คอนทัวร์ของความเร็วและความดันอากาศที่ระนาบกึ่งกลางของโดเมนอากาศแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วอากาศซึ่งแปรผกผันกันอยู่ สามารถอธิบายได้จากสมการเบอร์นูลลี

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $p$  คือความดัน,  $\rho$  คือความหนาแน่นอากาศ และ  $v$  คือความเร็ว

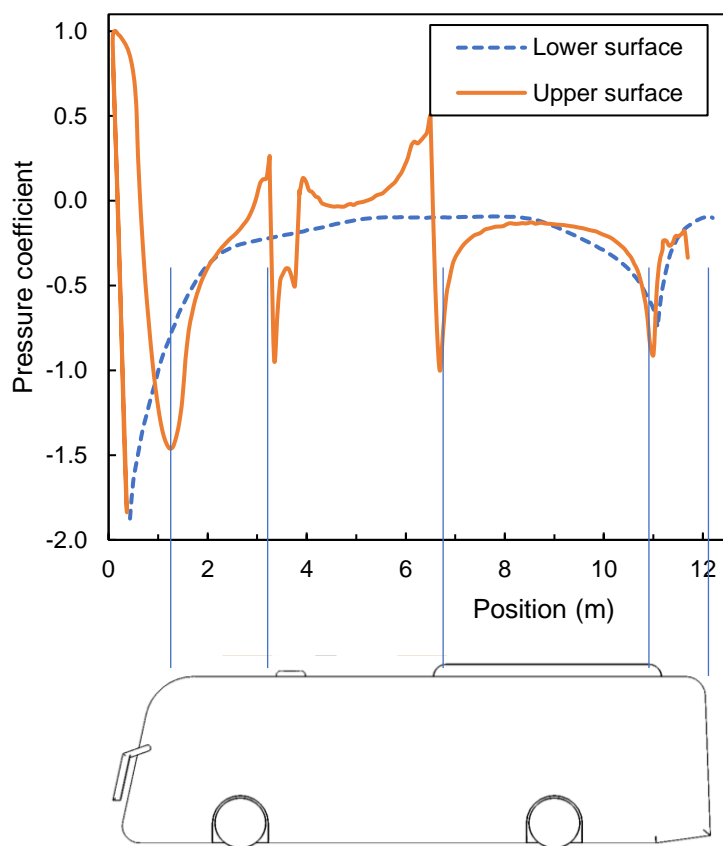
เมื่อความเร็วมากความดันจะมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อความเร็วลดลงความดันก็จะเพิ่มขึ้นซึ่งโดยทั่วไปเมื่อวัตถุอยู่ในของไหลใด ๆ จะมีความดันกระทำกับวัตถุในทิศทางพุ่งเข้าหาวัตถุ เช่นเดียวกันเมื่อรถโดยสารถูกล้อมรอบด้วยอากาศ จะมีแรงดันอากาศกดผิวรถโดยสารอยู่ เมื่อรถเคลื่อนที่ อากาศปะทะหน้ารถโดยสารจะเกิดตำแหน่งที่อากาศชะงักไหลแสดงที่จุด A ในรูป 4.7 (ล่าง) ณ จุดนั้นความดันอากาศจะมีค่ามากที่สุด จากนั้นอากาศจะไหลต่อไปตามรูปทรงของรถโดยสารด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ขอบโค้งของหลังคาและด้านล่างของรถที่ความเร็วมากกว่าบริเวณอื่น ทำให้ความดันอากาศมีค่าน้อยลง และเมื่ออากาศไหลพันท้ายรถโดยสารอากาศที่มีความเร็วสูงกว่าที่ไหลจากด้านบนและด้านข้างลำตัวรถจะไหลมาผสมกับอากาศนิ่งที่ท้ายรถทำให้

เกิดอากาศไหลวนซึ่งส่งผลต่อแรงต้านอากาศตั้งที่อธิบายด้านบน จะสังเกตว่าเมื่ออากาศไหลจากบริเวณที่มีความดันสูงไปสู่บริเวณที่มีความดันต่ำกว่า ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดแรงกระทำกับรถโดยสารในทิศทางเดียวกับการไหล หรือทิศทางด้านการเคลื่อนที่ของรถ และอากาศจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าอากาศไหลจากบริเวณที่มีความดันต่ำไปสู่บริเวณที่มีความดันสูงกว่า ความเร็วอากาศก็จะลดลง



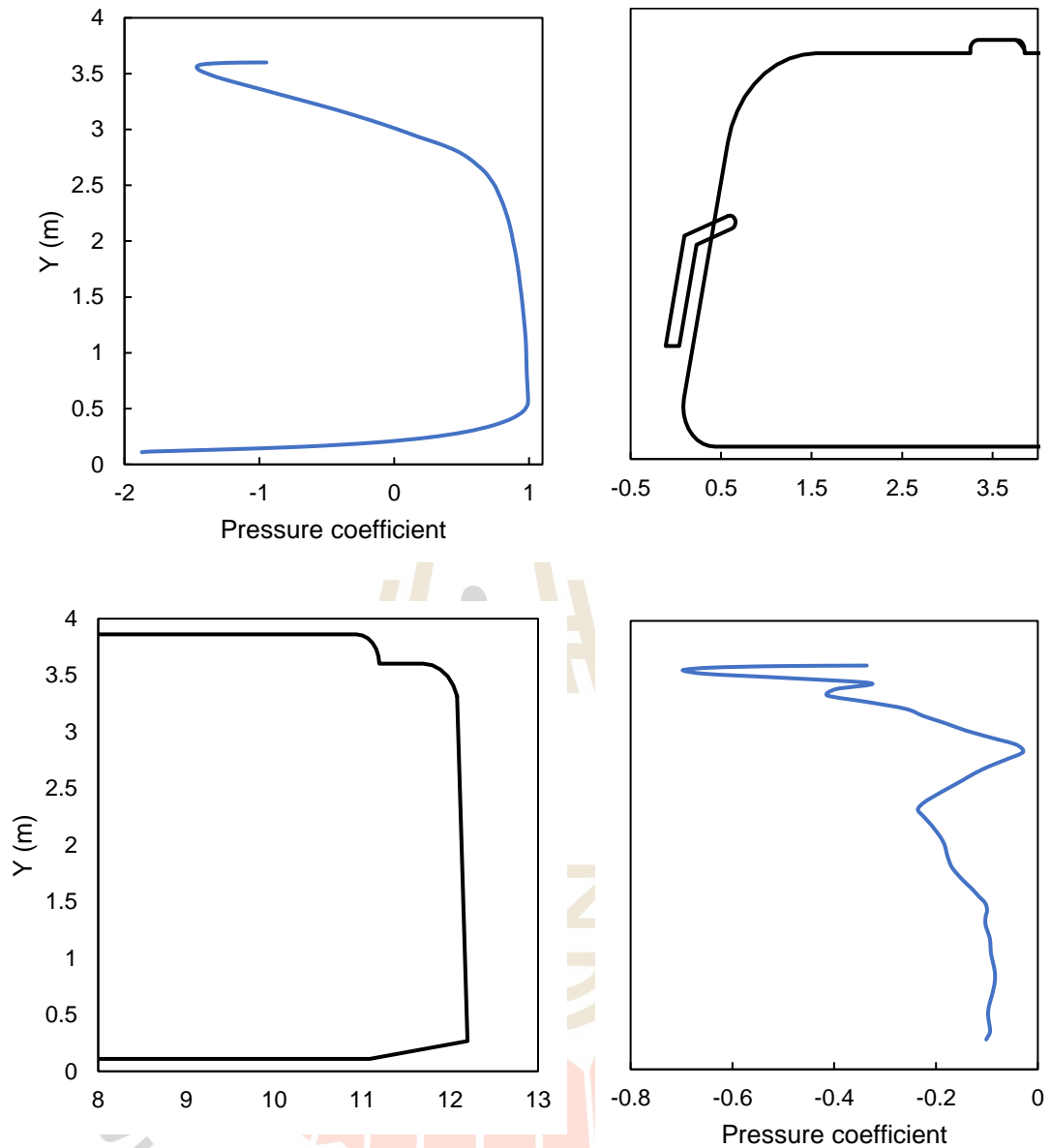
รูปที่ 4.8 คอนทัวร์ความดันบนผิวรถโดยสาร (ซ้าย) ด้านหน้าและ (ขวา) ด้านหลังสำหรับการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง

จากรูปที่ 4.8 คอนทัวร์ของความดันบนผิวรถโดยสารซึ่งสอดคล้องกับคอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนการไหลจากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าผิวหน้ารถโดยสารจะมีความดันสูงกว่าด้านท้ายรถซึ่งมีความดันเป็นลบ ซึ่งการกระจายความดันที่ผิวรถโดยสารสามารถอธิบายได้จากกราฟการกระจายความดันในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การกระจายความดันบริเวณหลังคาและใต้ท้องรถที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสาร

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าผิวด้านบนของรถโดยสารตั้งแต่ด้านหน้าไปจนถึงท้ายรถ จุดที่เกิดความดันมากที่สุดคือด้านหน้ารถ จากนั้นความดันจะค่อยๆ ลดลง เมื่ออากาศไหลปะทะส่วนที่ยื่นออกมาจากหลังการรถ ความดันจะพุ่งสูงขึ้นเนื่องจากตำแหน่งปะทะจะเกิดการชะงักไหล และความดันใต้ท้องรถโดยสารมีค่าเป็นลบและมีค่าเท่าเดิมเกือบตลอดความยาวรถ ทำให้เกิดแรงจูงรถให้ยึดเกาะกับถนนขณะเคลื่อนที่นั่นเองเนื่องจากพื้นผิวใต้ท้องรถเป็นผิวเรียบอยู่ในระดับเดียวกัน ต่างจากผิวบนหลังการรถที่มีอุปกรณ์ต่าง ๆ ติดอยู่



รูปที่ 4.10 การกระจายความดัน (บน) ที่ผิวหน้า และ (ล่าง) ด้านหลัง ของรถโดยสารระหว่างเมือง

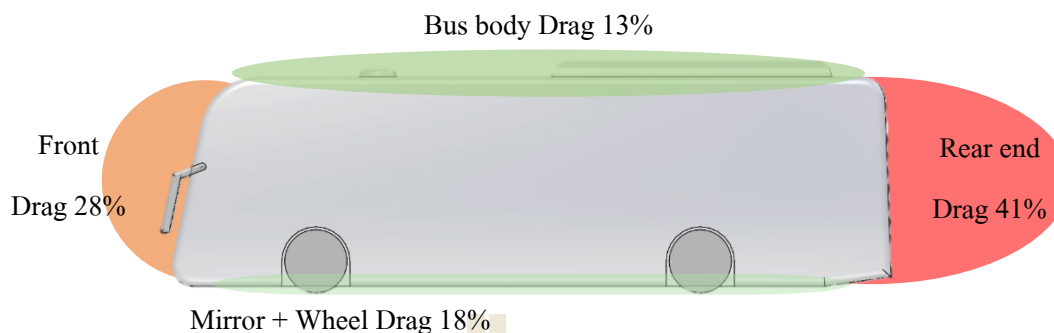
จากรูปที่ 4.10 แสดงการกระจายความดันบนระนาบสมมาตรของผิวน้ำรถโดยสาร จุดที่สัมประสิทธิ์ความดันมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1 ณ จุดชะงักไหลซึ่งก็คือส่วนที่ยื่นที่สุดของหน้ารถโดยสาร จะเห็นได้ว่าด้านหน้ารถโดยสารสัมประสิทธิ์แรงดันมีค่าเป็นบวกก่อให้เกิดแรงผลักที่ผิวน้ำรถ ส่วนผิวด้านหลังรถโดยสารสัมประสิทธิ์แรงดันมีค่าเป็นลบจึงเกิดเป็นแรงดูดรวมของแรงผลักที่ผิวด้านหน้าและแรงดูดที่ผิวด้านหลังกลายเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถโดยสาร

ผลจากพฤติกรรมการไหลของอากาศดังอธิบายไว้ข้างต้นส่งผลให้เกิดแรงต้านอากาศกระทำกับส่วนต่าง ๆ ของรถโดยสาร คิดเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.387 โดยมีสัดส่วนของแรงต้านอากาศที่ส่วนต่าง ๆ ของรถโดยสารดังนี้

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนแรงต้านอากาศที่ส่วนต่าง ๆ ของรถโดยสาร

Zone	Forces (N)			Coefficients			%drag
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total	
Front	309.912	10.668	320.580	0.105	0.004	0.109	28.177
Rear	461.836	1.580	463.416	0.157	0.001	0.157	40.690
Side	0.000	49.098	49.098	0.000	0.017	0.017	4.311
Top	83.532	20.148	103.678	0.028	0.007	0.035	9.103
Mirror	83.068	0.624	83.692	0.028	0.000	0.028	7.356
Underbody	72.142	22.334	94.476	0.025	0.008	0.032	8.304
Wheel	22.674	0.758	23.432	0.008	0.000	0.008	2.060
<b>Total</b>	1033.164	105.208	1138.372	0.351	0.036	0.387	100.000

จากตาราง 4.2 สัดส่วนแรงต้านอากาศที่ส่วนต่าง ๆ ของรถโดยสารระหว่างเมืองพบว่าแรงต้านส่วนใหญ่มาจากแรงด้านความดันถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ส่วนแรงเสียดทานผิวมีสัดส่วนเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นตำแหน่งที่ส่งผลต่อแรงต้านอากาศมากที่สุดคือหน้ารถและหลังรถ โดยบริเวณที่ก่อให้เกิดแรงต้านความดันเยอะที่สุดได้แก่ด้านหลังรถซึ่งมีแรงกระทำ 461.836 นิวตัน ในขณะที่หน้ารถมีแรงกระทำรองลงมาจากท้ายรถขนาด 309.912 นิวตัน และสัดส่วนแรงต้านที่บริเวณต่าง ๆ ของรถแสดงสรุปในรูปแบบที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัดส่วนของแรงต้านความดันที่กระทำบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง

จากสัดส่วนแรงต้านในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าแรงต้านอากาศที่กระทำกับลำตัวรถโดยสารมากที่สุดเกิดขึ้นบริเวณท้ายรถโดยสาร หากเปรียบเทียบกับผลคอนทิวรัลความดันของอากาศที่ผิวรถในรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่าความดันอากาศมากที่สุดอยู่ที่บริเวณหน้ารถ ณ จุดชะงักไหล แต่เมื่ออินทิเกรตความดันรวมของแต่ละผิวแล้วพบว่าผิวที่เกิดแรงในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของรถหรือแรงต้านมากที่สุดคือผิวท้ายรถ ซึ่งมีสัดส่วนแรงต้านที่กระทำ 41 เปอร์เซ็นต์ จากแรงต้านอากาศรวม ซึ่งมากกว่าแรงต้านกระทำกับด้านหน้ารถซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศปะทะกับผิวหน้ารถจนเกิดการชะงักไหล มีสัดส่วนเพียง 28 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการลดแรงต้านอากาศจึงมุ่งเน้นไปที่การลดแรงต้านอากาศจากท้ายรถโดยสาร โดยหลักการลดแรงต้านที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการหลีกเลี่ยงการเกิดการแยกไหลของอากาศ หรือการลดขนาดเวลาด้านหลังรถ ซึ่งจะส่งผลให้ความดันบริเวณท้ายรถมีค่าเพิ่มขึ้น ผลต่างความดันระหว่างหน้ารถและหลังรถมีค่าลดลง แรงต้านอากาศมีค่าน้อยลง

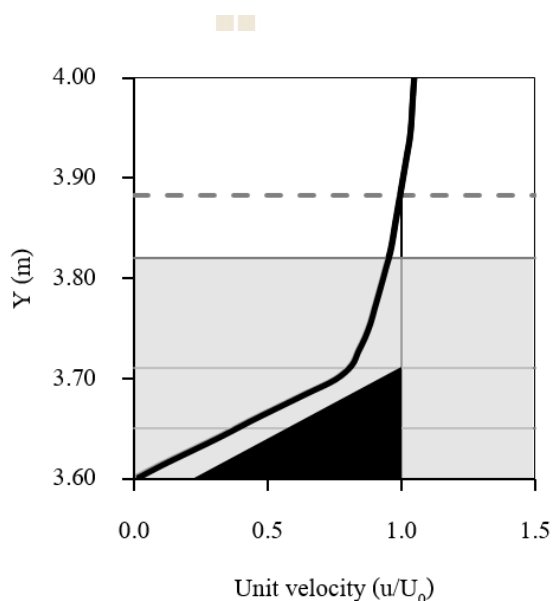
#### 4.3 ผลจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศ

ผลจากการออกแบบ VG เพื่อลดแรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมืองด้วยการกำหนดความสูงเริ่มต้นเท่ากับ 110 มิลลิเมตร จากนั้นออกแบบระยะห่างระหว่าง VG และความยาวของ VG และนำสัดส่วนที่ได้ไปใช้ในการปรับความสูงของ VG ที่มีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้สูงสุด แสดงดังนี้



#### 4.3.1 ผลการออกแบบความสูงเริ่มต้นของ VG

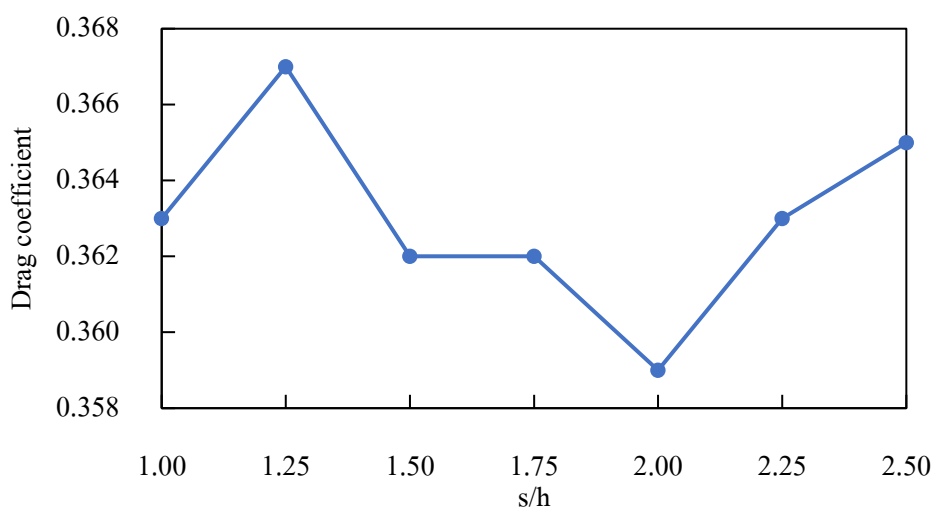
ความสูงเริ่มต้นของ VG อยู่ภายในความหนาชั้นซิดผิวของอากาศซึ่งสูงเท่ากับ 280 มิลลิเมตร และไม่เกินข้อกำหนดของกรมขนส่งทางบกคือความสูงรวมของรถโดยสารไม่เกิน 3.8 เมตร ทำให้ได้ความสูงออกแบบเริ่มต้นเท่ากับ 110 มิลลิเมตร คิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชั้นซิดผิว แสดงดังรูป 4.12



รูปที่ 4.12 ความสูงออกแบบเริ่มต้นของ VG

#### 4.3.2 ผลการออกแบบระยะห่างของ VG

จากการออกแบบขนาด VG เริ่มต้นโดยกำหนดให้มีความสูงเท่ากับ 110 มิลลิเมตร ความยาว 220 มิลลิเมตร และความหนาเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ติดตั้งที่ตำแหน่งหลังคาต้านท้ายรถโดยสารและทำการออกแบบระยะห่างที่เหมาะสมของ VG ที่มีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้สูงสุดโดยมีการปรับระยะห่างตั้งแต่ 1-2.5 เท่าของความสูง (110-275 มิลลิเมตร) ผลจำลองการไหลของการออกแบบระยะห่างมีดังนี้



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อปรับระยะห่าง (s) ของการติดตั้ง VG

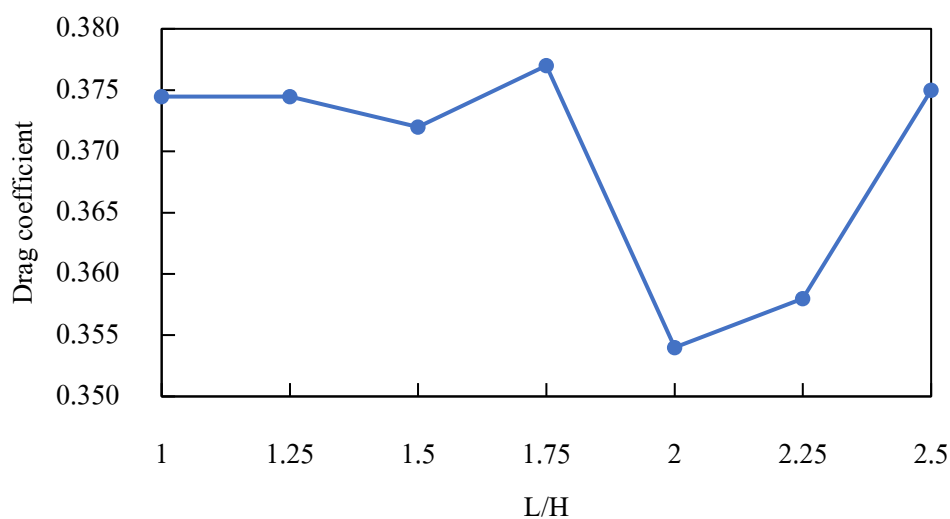
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของรถโดยสารเมื่อติดตั้ง VG ที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน พบว่าที่ระยะ s เท่ากับ 2 เท่าของความสูง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารต่ำกว่าระยะห่างอื่น ๆ มีค่าเท่ากับ 0.359 ลดลง 7.24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับรถโดยสารที่ไม่มีการติดตั้ง VG รายละเอียดแรงต้านและการลดแรงต้านจากการปรับระยะห่างของ VG แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อมีการปรับระยะห่างการติดตั้ง VG

s/h	s	$C_D$	$\Delta C_D$	%reduction
1.00	110.0	0.363	0.024	6.20
1.25	137.5	0.367	0.020	5.17
1.50	165.0	0.362	0.025	6.46
1.75	192.5	0.362	0.025	6.46
2.00	220.0	0.359	0.028	7.24
2.25	247.5	0.363	0.024	6.20
2.50	275.0	0.365	0.022	5.69

### 4.3.3 ผลการออกแบบความยาวของ VG

หลังจากการออกแบบความสูง และระยะห่างระหว่าง VG ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการปรับความยาวของ VG เป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยปรับความยาวเป็นจำนวนเท่าของความสูง เช่นเดียวกับการปรับระยะห่างระหว่าง VG เริ่มจากความยาว 1 ถึง 2.5 เท่าของความสูง และติดตั้งบนรถโดยสารระหว่างเมืองโดยให้ trailing edge ของ VG อยู่ตำแหน่งเดียวกันคือที่ขอบของหลังคา ผลการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ติด VG ที่มีความยาวต่าง ๆ กัน แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อปรับความยาว (L) ของ VG

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นผลของการปรับความยาวของ VG โดยความยาวตั้งแต่ 1 ถึง 1.75 เท่า และ 2.5 เท่าของความสูง สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้มีความใกล้เคียงกัน แต่ที่ความยาว 2 และ 2.25 เท่าของความสูง สัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าน้อยกว่าที่ความยาวค่าอื่น โดย VG ที่มีความยาวเป็น 2 เท่าของความสูงหรือยาว 220 มิลลิเมตรทำให้รถโดยสารมีสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยที่สุดเท่ากับ 0.354 ลดลง 8.53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับรถโดยสารแบบเดิมที่ไม่ได้ติดตั้ง VG ส่วนรายละเอียดแรงต้านของการติด VG ที่ความยาวอื่น ๆ แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองเมื่อมีการปรับความยาวของ VG

$l/h$	$l$	$C_D$	$\Delta C_D$	%reduction
1.000	110.000	0.374	0.013	3.23
1.250	137.500	0.374	0.013	3.23
1.500	165.000	0.372	0.015	3.88
1.750	192.500	0.377	0.010	2.58
2.000	220.000	0.354	0.033	8.53
2.250	247.500	0.358	0.029	7.49
2.500	275.000	0.375	0.012	3.10

#### 4.3.4 ผลการออกแบบความสูงของ VG

ผลจากการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติด VG บริเวณขอบหลังคา ด้านท้ายรถด้วย VG ที่มีความสูง 110 มิลลิเมตรแล้ว พบว่าสัดส่วนระยะห่างระหว่าง VG และความยาวของ VG ที่มีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศมากที่สุดนั้นคือ 2 เท่าของความสูง (220 มิลลิเมตร) เมื่อนำสัดส่วนดังกล่าวมาใช้ในการปรับความสูงของ VG เพื่อขนาดความสูงที่ช่วยให้สามารถลดแรงต้านได้มากที่สุดด้วยการปรับลดความสูงลงมาครึ่งหนึ่ง (55 มิลลิเมตร) คิดเป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชั้นซิดฟิว และเพิ่มความสูงอีกเท่าหนึ่ง (220 มิลลิเมตร) เป็น 80 เปอร์เซ็นต์ของความหนาชั้นซิดฟิว พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองของ VG ที่มีความสูง 110 มิลลิเมตร มีความสามารถในการลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด ส่วนรายละเอียดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของ VG ความสูงต่าง ๆ เป็นดังนี้ (ดูรูป 3.12 ประกอบ)

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของ VG ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน

ขนาด VG	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	ลดแรงต้าน (เปอร์เซ็นต์)
ความสูง 55 มิลลิเมตร ความยาว 110 มิลลิเมตร ระยะห่าง 110 มิลลิเมตร	0.375	3.10
ความสูง 110 มิลลิเมตร ความยาว 220 มิลลิเมตร ระยะห่าง 220 มิลลิเมตร	0.354	8.53

ตารางที่ 4.5 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของ VG ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน (ต่อ)

ขนาด VG	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ	ลดแรงต้าน (เปอร์เซ็นต์)
ความสูง 220 มิลลิเมตร ความยาว 440 มิลลิเมตร ระยะห่าง 440 มิลลิเมตร	0.371	4.13

#### 4.3.5 ผลการออกแบบตำแหน่งติดตั้ง VG

ภายหลังจากการออกแบบขนาดของ VG ที่ติดตั้งบริเวณหลังคาท้ายรถโดยสารจนได้ขนาดของ VG ที่สามารถลดแรงต้านอากาศของรถโดยสารได้มากที่สุดแล้ว จึงทำการปรับตำแหน่งติดตั้ง VG ต่าง ๆ กัน โดยมีผลดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลแรงต้านจากการจำลองการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติดตั้ง VG ตำแหน่งต่าง ๆ

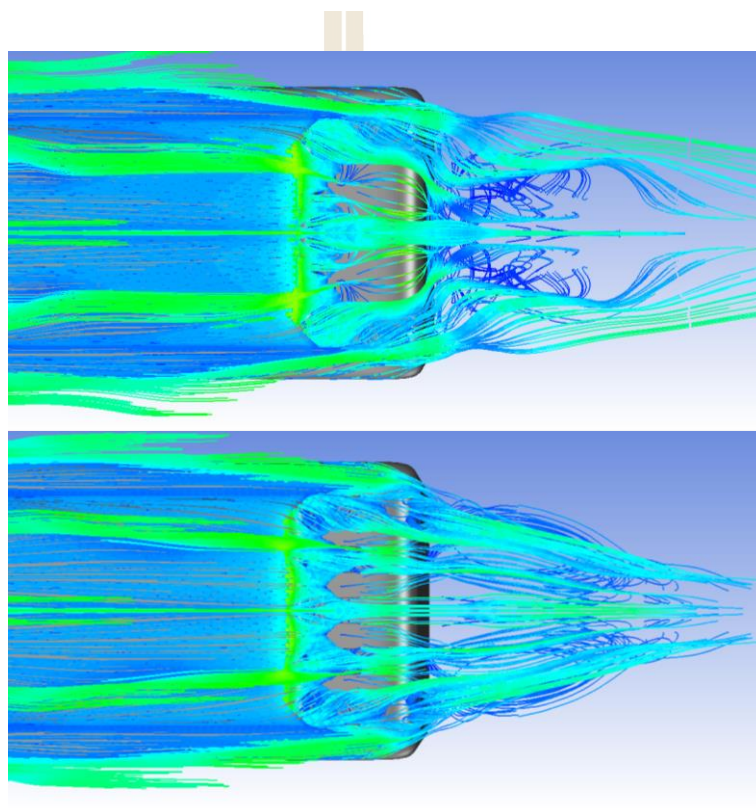
แบบจำลอง	คำอธิบาย	$C_D$	$\Delta C_D$	ลดลง (%)
ก่อนปรับปรุง	ไม่ติด VG	0.387	-	-
กรณี 1	ติด VG บนขอบหลังคาด้านหลัง	0.354	-0.033	8.527
กรณี 2	ติด VG บนขอบหลังคาด้านหน้า	0.372	-0.015	3.876
กรณี 3	ติด VG ด้านข้างลำตัวรถ	0.396	+0.009	+2.326
กรณี 4	ติด VG บนขอบหลังคาด้านหลังและด้านข้าง	0.372	-0.015	3.876

จากตาราง 4.6 พบว่าตำแหน่งการติดตั้ง VG ที่ส่งผลต่อแรงต้านอากาศมากที่สุดคือขอบหลังคาด้านหลังรถ ซึ่งสามารถลดแรงต้านลงได้ 8.527 เปอร์เซ็นต์ จึงเลือกตำแหน่งติดตั้งที่ขอบด้านหลังของหลังการรถ โดยให้ปลายของ VG ชิดกับขอบโค้งหลังคาด้านหลังตลอดแม้มีการปรับระยะห่างหรือความสูง

#### 4.4 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการติด VG

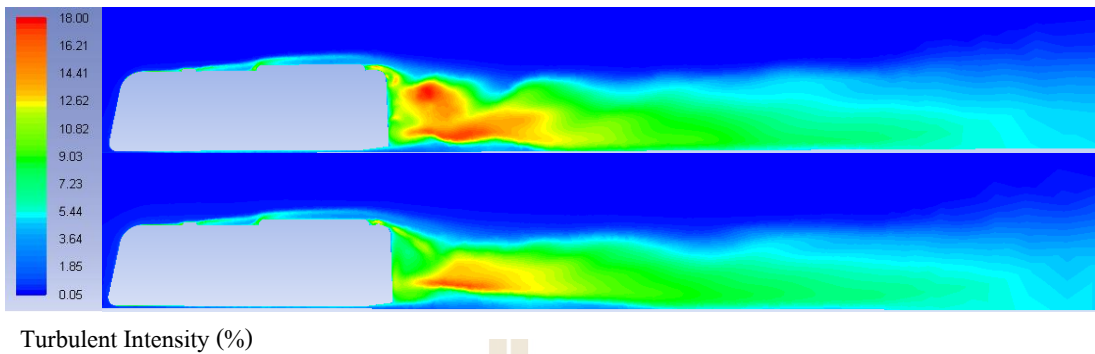
เส้นการไหลของอากาศผ่านหลังการรถโดยสารระหว่างเมืองแบบไม่ติด VG (บน) และแบบติด VG (ล่าง) จากมุมมองด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าก่อนติด VG เมื่ออากาศไหลผ่าน

ท้ายรถโดยสาร อากาศที่ไหลอยู่ขอบบนอกรถโดยสารจะไหลม้วนเข้ามาผสมกับอากาศที่อยู่ด้านใน เกิดเป็นความปั่นป่วนทันทีที่อากาศไหลพ้นท้ายรถ แต่ภายหลังติดตั้ง VG ที่ท้ายรถโดยสารแล้ว อากาศจะถูกบีบให้ไหลอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นผ่านช่องว่างระหว่าง VG และไหลพุ่งออกจากท้ายรถทำให้บริเวณที่ไหลปั่นป่วนอยู่ใกล้ท้ายรถออกไปและความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วนลดน้อยลงดังแสดงในรูป 4.16



รูปที่ 4.15 เส้นการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG

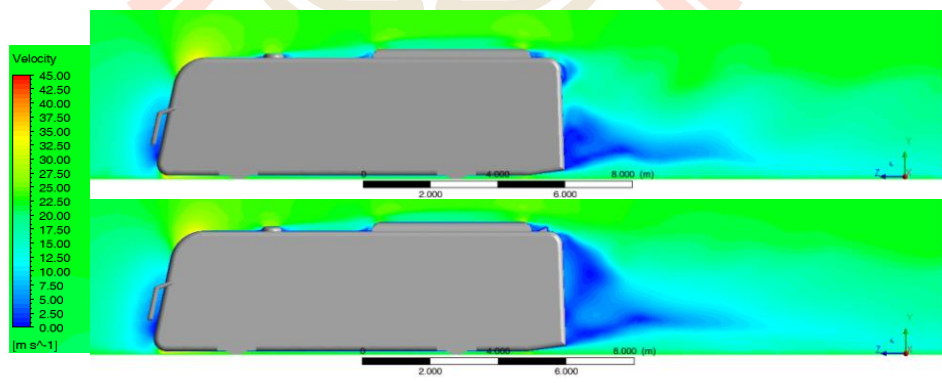
คอนทัวร์ความเข้มข้นการปั่นป่วนด้านหลังรถโดยสารในรูป 4.16 แสดงให้เห็นว่ารถโดยสารระหว่างเมืองแบบไม่ติด VG มีความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วนด้านท้ายรถมากกว่ารถโดยสารระหว่างเมืองแบบติด VG ซึ่งเกิดการไหลปั่นป่วนที่ตำแหน่งห่างจากท้ายรถมากกว่า โดยบริเวณที่เกิดการไหลปั่นป่วนนี้จะมีค่าความดันต่ำกว่าบริเวณอื่นเป็นสาเหตุให้เกิดผลต่างระหว่างความดันหน้ารถและหลังรถกลายเป็นแรงต้านความดัน หากบริเวณของการไหลไหลปั่นป่วนมีบริเวณกว้าง แรงต้านก็จะมีค่ามากตามไปด้วยดังนั้นการลดขนาดของบริเวณไหลปั่นป่วนด้านหลังรถจึงส่งผลต่อการลดแรงต้านอากาศด้วย



Turbulent Intensity (%)

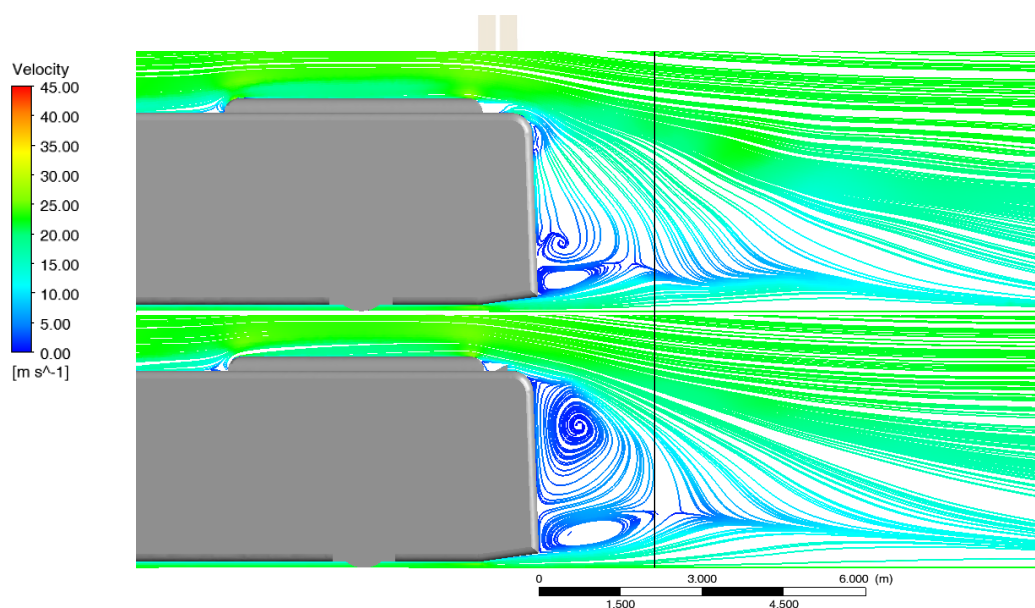
รูปที่ 4.16 คอนทัวร์ความเข้มข้นการปั่นป่วนที่ระนาบกึ่งกลางโดเมนอากาศของการไหลผ่านรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG

รูปที่ 4.17 แสดงคอนทัวร์ความเร็วการไหลของอากาศบนระนาบกึ่งกลาง แสดงให้เห็นบริเวณที่อากาศชะงักไหลด้านหลังรถโดยสารและตำแหน่งเครื่องปรับอากาศของรถโดยสารที่อากาศไหลปะทะด้วย และพบว่าช่วงที่กระแสอากาศบริเวณด้านหลังรถโดยสารระหว่างเมืองทั้งแบบติดและไม่ติด VG มีความเร็วต่ำ มีบริเวณห่างจากท้ายรถประมาณ 4 เมตรเท่ากัน สำหรับรถโดยสารระหว่างเมืองแบบไม่ติด VG บริเวณที่อากาศมีความเร็วต่ำที่สุดจะอยู่ด้านล่าง ในขณะที่รถโดยสารที่ติด VG บริเวณอากาศความเร็วต่ำจะเริ่มตั้งแต่อากาศไหลพ้นขอบหลังคาและใต้ท้องรถ โดยลักษณะการไหลจะแสดงเพิ่มเติมในรูป 4.18



รูปที่ 4.17 คอนทัวร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG

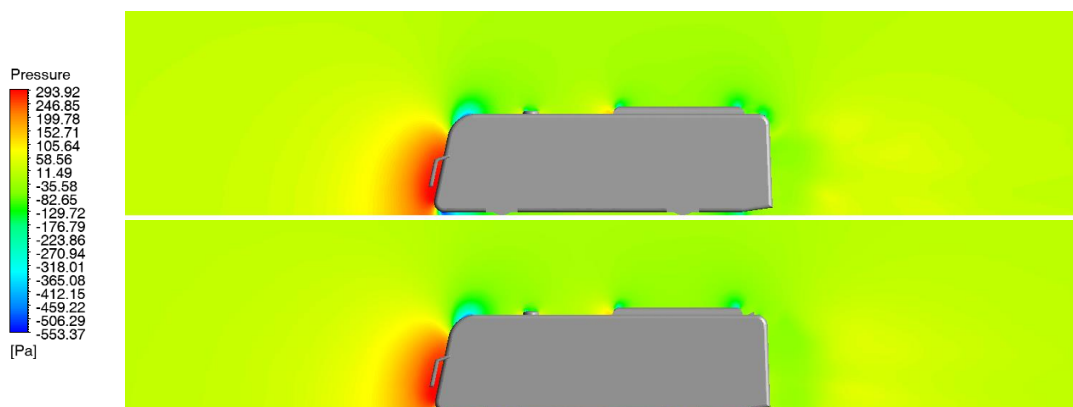
เส้นการไหลของอากาศดังแสดงในรูป 4.18 แสดงให้เห็นว่ามีการไหลวน 2 วง เกิดขึ้นในช่วงเวกด้านหลังรถ มีระยะห่างจากท้ายรถประมาณ 2 เมตรเท่ากัน แต่การไหลวนขนาดใหญ่ด้านบนของรถโดยสารที่ติด VG มีขนาดใหญ่กว่ารถโดยสารระหว่างเมืองที่ไม่ติด เนื่องจาก VG ช่วยเพิ่มพลังงานให้อากาศในชั้นขีดผิว ทำให้อากาศยังคงพยายามรักษารูปแบบการไหลแบบขีดผิวต่อภายหลังจากไหลพ้นหลังคาของรถโดยสารแล้ว



รูปที่ 4.18 เส้นการไหลของอากาศที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG

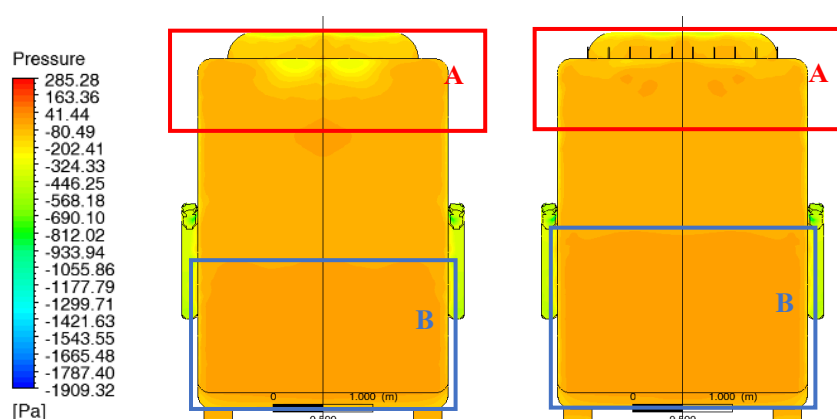
คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมืองในรูป 4.19 แสดงให้เห็นความดันบริเวณรอบ ๆ รถโดยสาร พบว่ารถโดยสารทั้งแบบติดและไม่ติด VG มีผลความดันคล้ายกันคือด้านหน้ารถความดันสูงที่สุดเนื่องจากการชะงักไหล ส่วนบริเวณขอบโค้งด้านหลังมีความดันต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นบริเวณที่อากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นหลังจากกระแสอากาศถูกตัวไหลไปตามรูปทรงของรถ ส่วนท้ายรถเป็นบริเวณที่อากาศความดันต่ำ ซึ่งจากรูปไม่สามารถแสดงความดันด้านหลังรถที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนของรถโดยสารทั้งสองแบบได้ จึงแสดงคอนทัวร์ความดันที่ผิวด้านหลังรถเพื่อความชัดเจนในรูปที่ 4.20 แทน





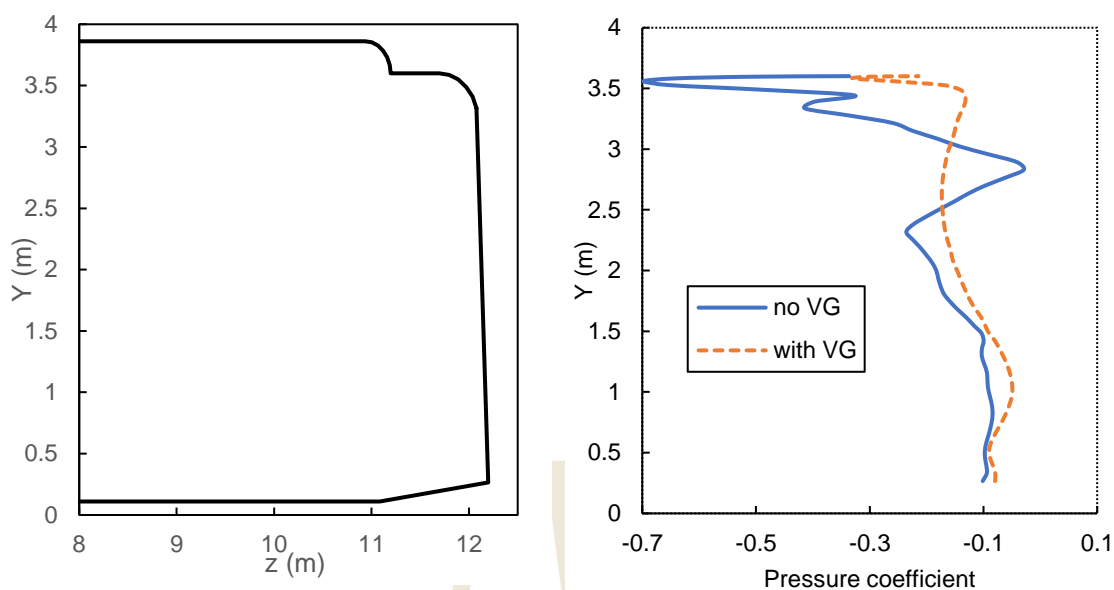
รูปที่ 4.19 คอนทัวร์ความดันที่ระนาบกึ่งกลางของรถโดยสารระหว่างเมือง (บน) แบบไม่ติด VG และ (ล่าง) แบบติด VG

รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบความดันที่ผิวรถโดยสารทั้งรถโดยสารที่ติดและไม่ติด VG ในรูปแบบของคอนทัวร์ พบว่าหลังจากติด VG แล้วความดันที่ผิวด้านหลังรถโดยสารมีค่าเพิ่มขึ้น และบริเวณที่มีความดันเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดคือบริเวณขอบระหว่างหลังคา กับผิวด้านหลังรถ ดังแสดงในรูปสี่เหลี่ยม A ส่วนบริเวณด้านล่างของผิวหลังรถก็มีบริเวณที่ความดันเพิ่มขึ้นดังแสดงที่จุดสี่เหลี่ยม B ผลจากความดันที่เพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีค่าติดลบมากส่งผลให้เกิดแรงดูดที่ผิวด้านหลังรถ ลดลง แรงต้านอากาศของรถโดยสารที่ติด VG จึงลดลงด้วย ความดันสถิตรวมของผิวหลังรถโดยสารแบบไม่ติด VG มีค่าเท่ากับ -632.82 ปาสคาล คิดเป็นสัมประสิทธิ์ความดันเท่ากับ -2.09 ส่วนรถโดยสารแบบติด VG มีผลรวมความดันสถิตบนผิวหลังรถเท่ากับ -525.82 ปาสคาล คิดเป็นสัมประสิทธิ์ความดันเท่ากับ -1.74 ซึ่งความดันที่ผิวหลังรถโดยสารภายหลังติด VG มีค่าเพิ่มขึ้น 107 ปาสคาล



รูปที่ 4.20 คอนทัวร์ความดันของรถโดยสารระหว่างเมืองจากมุมมองด้านหลังรถ  
(ซ้าย) แบบไม่ติด VG และ (ขวา) แบบติด VG

จากรูป 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของรถโดยสาร (Y) บริเวณผิวรถด้านหลังที่ระนาบสมมาตร กับสัมประสิทธิ์ความดันบนผิวดังกล่าว พบว่าความดันด้านหลังรถมีค่าเป็นลบทั้ง 2 กรณี โดยปกติแล้วเมื่อวัตถุวางอยู่ในของไหลใด ๆ จะเกิดแรงจากของไหลกระทำตั้งฉากกับผิวด้านหน้าของวัตถุ (ค่าบวก) เมื่อความดันมีค่าเป็นลบแสดงว่าแรงกระทำกับผิวด้านหน้าของวัตถุในทิศทางออกจากวัตถุ ด้วยเหตุนี้เมื่อแรงกระทำกับผิวด้านหลังรถในทิศทางออกจากผิวส่งผลให้เกิดแรงคล้ายแรงดูดที่ท้ายรถ เป็นสาเหตุของแรงต้านที่กระทำกับรถโดยสาร นอกจากนี้กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าภายหลังการติด VG ที่ท้ายรถแล้ว ความดันอากาศที่ท้ายรถยังคงมีค่าติดลบอยู่แต่มีค่าลดลง แรงดูดจากผิวท้ายรถจึงลดลง ส่งผลโดยตรงต่อแรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมือง จากผลการเปลี่ยนแปลงการกระจายความดันที่ผิวด้านหลังรถโดยสารนี้ เมื่อคิดรวมเป็นแรงต้านอากาศจะพบว่าบริเวณที่มีแรงต้านลดลงคือผิวด้านหลังรถ ส่วนบริเวณอื่น ๆ แรงที่กระทำกับผิวรถยังคงมีค่าประมาณเท่าเดิม รายละเอียดของแรงที่กระทำกับแต่ละส่วนของรถโดยสารแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.21 การกระจายความดันที่ผิวด้านหลังรถโดยสารระหว่างเมือง

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบแรงต้านแต่ละส่วนของรถโดยสารระหว่างเมือง ทั้งแบบไม่ติด VG และแบบติด VG

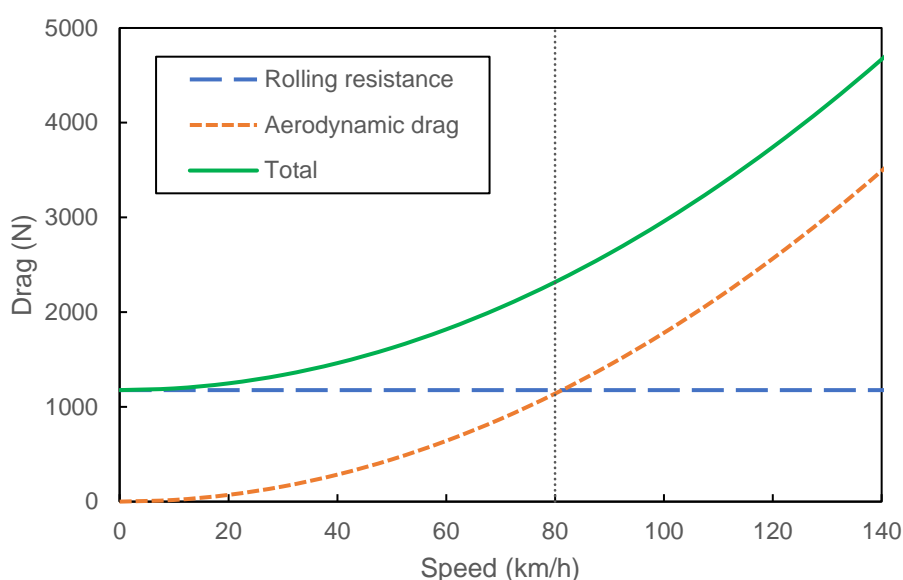
Zone	Drag force (N)	
	Bus with VG	Bus with VG
Front	320.580	319.652
Rear	463.416	376.612
Side	49.098	49.484
Top	103.678	92.584
Mirror	83.692	83.692
Underbody	94.476	96.322
Wheel	23.432	19.748
Total	1138.372	1030.506

\*หมายเหตุ ข้อมูลแรงต้านของรถโดยสารติด VG ขนาดความสูง 110 มิลลิเมตร ยาว 220 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่าง VG 220 มิลลิเมตร

ข้อมูลจากตาราง 4.7 แสดงให้เห็นว่าภายหลังการติดตั้ง VG บนหลังการถโดยสารระหว่างเมืองแล้วส่งผลให้แรงที่กระทำกับหลังคาและผิวด้านหลังรถโดยสารมีค่าลดลงส่วนแรงที่กระทำกับบริเวณอื่น ๆ มาค่าประมาณเท่าเดิม เนื่องจากการติดตั้ง VG ไว้บนหลังคาด้านหลังรถช่วยปรับพฤติกรรมกรไหลของอากาศจากด้านหลังรถเท่านั้น

#### 4.5 เปรียบเทียบการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง

จากผลการจำลองการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารระหว่างเมืองพบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารเท่ากับ 0.387 เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงต้านที่กระทำกับรถโดยสารทั้งแรงต้านอากาศและแรงต้านการหมุนของล้อ ทำให้ได้แนวโน้มของแรงต้านที่ความเร็วช่วงต่าง ๆ เป็นดังนี้



รูปที่ 4.22 แรงต้านของรถโดยสารระหว่างเมืองที่ความเร็วต่าง ๆ

การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง หาได้จากความสัมพันธ์ที่กล่าวไว้ในสมการที่ 2.31 สามารถคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงที่ลดลงเมื่อแรงต้านอากาศหรือสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถโดยสารลดลง เมื่อรถโดยสารระหว่างเมืองมีมวล 20,000 กิโลกรัม และตัวแปรอื่น ๆ มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ตัวแปรต่าง ๆ สำหรับคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสาร

$m$ (kg)	$f$	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$A$ (m <sup>2</sup> )	$v$ (m/s)	$C_{D1}$	$C_{D2}$	$\alpha$
20,000	0.006	9.81	1.225	9.74	22.22	0.387	0.354	0

เมื่อ  $f$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อของรถโดยสาร

$C_{D1}$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมืองที่ไม่ติด VG

$C_{D2}$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสารระหว่างเมืองที่ติด VG

สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาการโดยสารระหว่างเมืองที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนพื้นระดับ ดังนั้นสามารถตัดสมการพจน์ที่เกี่ยวข้องกับแรงต้านทางชันและความเฉื่อยออกได้ เหลือเพียงแรงต้านอากาศและแรงต้านการหมุนของล้อเท่านั้นและจากรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศของรถโดยสารมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแรงต้านการหมุนของล้อนี้อาจเท่ากับ 1,177.20 นิวตัน และแรงต้านอากาศมีค่าเท่ากับ 1,139.89 นิวตัน ภายหลังจากติด VG แรงต้านอากาศลดลง 97.2 นิวตัน หรือคิดเป็น 8.53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงพบว่าอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง 4.19 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 2.74 ลิตรต่อ 100 กิโลเมตรเมื่อเทียบกับข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเฉลี่ยของรถโดยสารจากข้อมูลของศูนย์ข้อมูลเชื้อเพลิงทดแทน กระทรวงพลังงาน สหรัฐอเมริกา (AFDC, 2014) ว่ามีค่าเท่ากับ 3.6 ไมล์ต่อแกลลอน (1.53 กิโลเมตรต่อลิตรหรือ 65.36 ลิตรต่อ 100 กิโลเมตร)

ยกตัวอย่างเช่นรถโดยสารระหว่างเมืองของบริษัท นครชัย 21 เส้นทาง กรุงเทพฯ-โคราช และโคราช-กรุงเทพฯ ระยะทาง 250 กิโลเมตร จำนวน 44 เที่ยวต่อวัน เมื่อคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้สมมติฐานว่าอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันของรถโดยสารระหว่างเมืองเท่ากับ 1.53 กิโลเมตรต่อลิตร จะสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเที่ยวละ 163.40 ลิตร หากสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 4.19 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้จะลดลง 6.85 ลิตรต่อเที่ยว หรือ 301.24 ลิตรต่อวัน หรือ 109,953.30 ลิตรต่อปี คิดเป็นเงินจำนวน 2,879,676 บาทต่อปี (อ้างอิงราคาน้ำมันดีเซล ณ วันที่ 9 ตุลาคม 2560 ลิตรละ 26.19 บาท)

## บทที่ 5

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

การดำเนินงานในวิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมือง มีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศที่กระทำกับรถโดยสาร และเพื่อออกแบบอุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศที่สามารถนำไปติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารได้โดยไม่ต้องดัดแปลงรูปทรงของรถ อาศัยเทคนิคด้านซีเอฟดี โดยระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ร่วมกับแบบจำลองการไหลปั่นป่วน  $SST k - \omega$  ด้วยซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 จากการศึกษาพบว่าแรงต้านที่กระทำกับรถโดยสารระหว่างเมืองส่วนใหญ่คือแรงต้านความดัน และบริเวณที่เกิดแรงต้านกระทำมากที่สุดคือผิวด้านหลังรถโดยสาร ดังนั้นการลดแรงต้านจึงมุ่งเน้นไปที่บริเวณท้ายรถ และพบว่าการใช้ Vortex generators สามารถลดแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถโดยสารระหว่างเมืองได้ ผลจากการศึกษาวิจัยนี้จะช่วยให้ประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงของรถโดยสารระหว่างเมือง และช่วยลดมลภาวะทางอากาศได้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 รถโดยสารระหว่างเมืองที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ลดแรงต้าน มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.387

5.1.2 เมื่ออากาศไหลผ่านรถโดยสาร อากาศจะปะทะกับผิวหน้าและกระจกด้านหน้ารถโดยสารก่อนเป็นอันดับแรก ทำให้เกิดบริเวณชะงักไหลของอากาศเกิดขึ้น ส่งผลให้ความดันอากาศ ณ จุดชะงักไหลมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น ๆ ของรถโดยสาร จากนั้นกระแสอากาศจะ निकตัวออกไปตามพื้นผิวด้านบน ด้านล่าง และด้านข้างของลำตัวรถด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่ออากาศปะทะกับชิ้นส่วนของรถที่ยื่นออกมาจากลำตัวรถ เช่น กระจกมองข้าง หรืออุปกรณ์ลดความดันของห้องโดยสารซึ่งติดอยู่บนหลังคา หรือบริเวณใด ๆ ที่มีการเปลี่ยนระดับของพื้นผิว ความดันบริเวณดังกล่าวก็จะเพิ่มขึ้น ขณะที่บริเวณหลังรถโดยสารซึ่งแต่เดิมไม่มีอากาศไหลบริเวณนั้น เมื่ออากาศที่ไหลด้วยความเร็วจากผิวด้านบน ด้านล่าง และด้านข้างรถโดยสารไหลพ้นจากผิวท้ายรถโดยสารแล้ว อากาศที่เคยเคลื่อนที่ชิดผิวรถโดยสารจะไม่มีผิวให้สัมผัส อากาศจึงไหลม้วนเข้ามาทางท้ายรถทำให้เกิดการผสมกันระหว่างโมเลกุลของอากาศความเร็วสูงกับอากาศนิ่งหลังรถ เกิดเป็นช่วงการไหลหมุนวนขนาดใหญ่บริเวณนั้น อากาศมีความเร็วต่ำและมีทิศทางการไหลไม่แน่นอน บริเวณ

ดังกล่าวจึงมีความดันเป็นลบ (ความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศ) ทำให้เสมือนมีแรงดูดท้ายรถโดยสารอยู่ จึงเป็นที่มาของแรงต้านของรถโดยสารเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความดันด้านหน้าและด้านหลังรถโดยสาร ซึ่งหากคิดสัดส่วนของแรงต้านที่กระทำกับผิวต่าง ๆ ของรถโดยสารแล้วพบว่า พื้นผิวที่มีแรงต้านกระทำเป็นสัดส่วนมากที่สุดคือผิวหลังรถ คิดเป็น 40.67 เปอร์เซ็นต์ ของแรงต้านอากาศที่กระทำกับลำตัวรถโดยสาร ส่วนผิวอื่น ๆ มีสัดส่วนแรงต้านที่กระทำกับผิวเป็นดังนี้ ด้านหน้ารถ 28.24 เปอร์เซ็นต์ หลังคาและผิวข้างรถ 13.47 เปอร์เซ็นต์ กระบอก 7.25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนล้อและช่วงล่าง 10.36 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 อุปกรณ์ลดแรงต้านอากาศที่นำมาติดตั้งกับรถโดยสารระหว่างเมืองเพื่อลดแรงต้านอากาศคือ VG รูปทรงสามเหลี่ยม วางตัวในแนวขนานการไหลของอากาศ (zero yaw angle) ติดตั้งก่อนบริเวณที่อากาศเกิดการไหลแยกชั้น ตำแหน่งและขนาดที่ให้ประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุดคือบริเวณบนหลังคาด้านท้ายรถโดยสาร ผลจากการจำลองการไหลพบว่าสามารถลดแรงต้านลงได้ตั้งแต่ 2-8.6 เปอร์เซ็นต์ เมื่อติดตั้ง VG ที่มีขนาดความสูง (h) เท่ากับ 110 มิลลิเมตรซึ่งเท่ากับความสูงของชั้นซิดผิวของอากาศ ติดตั้งด้วยระยะห่างต่าง ๆ กันเป็นจำนวนเท่าของความสูงตั้งแต่ 1 เท่าถึง 2.5 เท่า โดยเพิ่มระยะห่างครั้งละ 0.25 เท่า และปรับความยาวของอุปกรณ์ตั้งแต่ 1 เท่าไปจนถึง 2.5 เท่า โดยเพิ่มครั้งละ 0.25 เท่าเช่นกัน แต่การติดตั้งอุปกรณ์ด้วยระยะห่างสองเท่าของความสูง ( $s = 2h$ ) คือ 220 มิลลิเมตร และขนาดความยาว (l) ของ VG เป็น 2 เท่าของความสูง (220 มิลลิเมตร) ให้ประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด โดยสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรถโดยสารจาก 0.387 ลงเหลือ 0.354 ซึ่งลดลง 8.53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับก่อนติดตั้งอุปกรณ์ ซึ่งแรงต้านที่ลดลงทำให้ลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงได้ลงได้ 4.19 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็น 2.74 ลิตรต่อ 100 กิโลเมตร เมื่อเทียบข้อมูลจากสถิติการใช้น้ำมันของรถโดยสารจากข้อมูลของ Federal Highway Administration ของรัฐบาลกลางสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ. 2014 ซึ่งระบุว่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเฉลี่ยของรถโดยสารมีค่าเท่ากับ 3.6 ไมล์ต่อแกลลอนหรือ 1.53 กิโลเมตรต่อลิตร หรือคิดเป็น 65.36 ลิตรต่อ 100 กิโลเมตร หากพิจารณาโดยหาระหว่างเมืองของบริษัทนครชัยทวีร์ เส้นทางกรุงเทพฯ-โคราช และโคราช-กรุงเทพฯ ระยะทาง 250 กิโลเมตรต่อเที่ยว ซึ่งมีจำนวน 44 เที่ยวต่อวัน จะสามารถประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 301.24 ลิตรต่อวันหรือ 109,953.30 ลิตรต่อปี คิดเป็นเงิน 2,879,676 บาทต่อปี (ราคาน้ำมันดีเซลลิตรละ 26.19 บาท ณ วันที่ 9 ตุลาคม 2560)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อุปกรณ์ลดแรงต้านที่ออกแบบนี้เหมาะสำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมืองสำหรับรถประเภทอื่นที่จะนำไปติดตั้งควรศึกษาและติดตั้งอย่างเหมาะสม

5.2.2 ในงานวิจัยนี้ทำการติดตั้ง VG ที่มุม 0 องศาเข้ากับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถเท่านั้น ส่งผลให้สามารถลดแรงต้านได้ในระดับหนึ่ง การปรับมุมของ VG อาจส่งผลให้ความสามารถในการลดแรงต้านอากาศเปลี่ยนไปได้

5.2.3 การติด VG หลายตำแหน่งอาจช่วยลดแรงต้านอากาศได้มากขึ้น อาจทำการศึกษาการติดตั้ง VG ที่หลายตำแหน่งร่วมกัน

5.2.4 รูปทรงสามเหลี่ยมของ VG ที่ทำการติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารเป็นเพียงรูปทรงพื้นฐานเท่านั้น สามารถปรับรูปทรงของ VG ให้มีความซับซ้อนหรือเป็นสามมิติมากขึ้นเพื่อให้ส่งผลต่อพฤติกรรมกระแสไหลของอากาศเมื่อไหลผ่าน VG เพิ่มประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศได้ดียิ่งขึ้น

5.2.5 ควรคำนึงถึงเสียงรบกวนในการออกแบบระยะห่างของ VG

5.2.6 การออกแบบ VG สำหรับติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารระหว่างเมืองที่เหมาะสมสามารถทำได้ด้วยการจำลองการไหลผ่าน VG แบบยังไม่ต้องติดตั้งบนลำตัวรถโดยสารก่อนเพื่อความรวดเร็วของการจำลองการไหล เมื่อได้ขนาดที่เหมาะสมแล้วจึงค่อยจำลองการไหลผ่านรถโดยสารที่ติด VG ต่อไป



## รายการอ้างอิง

- กรมการขนส่งทางบก. กองแผนงาน กลุ่มสถิติการขนส่ง. (2557). **สถิติการขนส่งประจำปีไตรมาสที่ 2 ปีงบประมาณ 2557 (มกราคม-มีนาคม 2557)**. (ม.ป.ท.).
- ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. (2559). **วิศวกรรมยานยนต์**. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.
- บุญรักษา กาญจนวราวิชย์. (มปป.) **สารานุกรม : วิทยาศาสตร์ในผลิตภัณฑ์ : ยางประหยัดน้ำมัน**. [ออนไลน์]. ที่มา: <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/80->
- ปราโมทย์ เฉชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์. (2555). **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พีระพงศ์ ทีฆสกุล, (2548). **ทฤษฎีการไหลชั้นขอบเขต** [ออนไลน์]. ที่มา: <http://www.me.psu.ac.th/~tekasakul/216342/Chapter%205.pdf>
- ยุทธศักดิ์ คณาสวัสดิ์. (2552). **บีโอไอ:โครงการรถเมล์ 4,000 คัน กับความท้าทายของอุตสาหกรรมผลิตรถบัสของไทย** [ออนไลน์]. ที่มา: <https://www.manager.co.th/Daily/ViewNews.aspx?NewsID=9520000066988>
- Ahmed, S. R., Ramm, G., and Faltin, G. (1984). Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. **Automobile Aerodynamics: Wakes, wind effect, vehicle development** (pp 1-31). Society of Automotive Engineering.
- Ahmed, S. R., et al. (1998). **Aerodynamic of Road Vehicle**: from fluid mechanics to vehicle engineering.
- Barnard, R. H. (1996). **Road Vehicle Aerodynamic Design**. England: Longman.
- Beaudoin, J. F., and Aider, J. L. (2008). **Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps**. Experiments in Fluids. 44:491–501
- Bhave, A., and Taherian, H. (2014). Aerodynamics of Intercity Bus and its Impact on CO2 Reductions. In **Proceedings of the 14th Annual Early Career Technical Conference** (pp 165-172). Birmingham, USA: The University of Alabama.
- Bosch. (2011). **Automotive Handbook**. Wiley
- Guilmineau, E. (2007). Computational Study of Flow around a Simplified Car Body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. 96 (6-7): 1207-1217.

- Hilliard, J. C. and Springer, G. S. (1984). **Fuel Economy: In Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines**. US: Springer.
- Hoffmann, F. et al. (2015). **Drag reduction using Base Flaps Combined with Vortex Generators and Fluidic Oscillators on a Bluff Body**. United States: SAE International.
- Hucho, W. H. (1993). **Aerodynamic of Road Vehicle**. Vol.25: 485-537.
- Huminic, A., and Huminic, G. (2009). CFD Investigation of an Open-Wheel Race Car. In Proceedings of the **4th European Automotive Simulation Conference 2009**. Munich, Germany: ANSYS.
- Katz, J. and Morey, F. (2008). Aerodynamics of Large-Scale Vortex Generator in Ground Effect. **Journal of Fluids Engineering**. 130
- Khalingi, B., et al. (2001). **Experimental and Computational Study of Unsteady Wake Flow Behind a Bluff Body with Drag Reduction Device**. SAE Technical Paper.
- Koike, M., Nagayoshi, T., and Namamoto, N. (2004). Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generators. **Mitsubishi Motors Technical Review**. 41(16): 11-16.
- Lancer, W. R., Ross, J., and Kaufman, A. E. (1991). **Aerodynamic Performance of a Drag Reduction Device on a Full -Scale Tractor/Trailer**. Aerospace Technology Conference and Exposition. SAE Technical Paper.
- Lanfrit, M. (2005). **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT**. Germany. (Unpublished manuscript).
- Lav, C., (2013). **Three Dimensional CFD Analysis on Aerodynamic Drag Reduction of a Bluff Tractor Trailer Body using Vortex Generators**. United States: SAE International.
- Lienhart, H., Stoots, C., and Becker, S. (2000). Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed model). **New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III**. 77: 323-330.
- Lucas, G. G. (1986). **Road Vehicle Performance: Methods of Measurement and Calculation**. Gordon and Breach Science Publisher
- Muthuvel, A., et al. (2013). Aerodynamic Exterior Body Design of Bus. **International Journal of Scientific & Engineering Research** 4(7): 2453-2457.
- Mohamed, E. A., Radhwi, M. N., and AbdelGawad, A. F. (2015). **Aerodynamic Characteristics and Drag Reduction of Buses**. M.S. thesis, Umm Al-Qura University, Saudi Arabia.

- Pamoti, R. M. and Chetan, R. (2012). **External Aerodynamics of Truck with Roof Fairing to Reduce Drag Force**. India: HTC Technical paper.
- Patten, J., McAuliffe B., Mayda, W., and Tanguay, B. (2012). **Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses**. Ottawa, Canada: National Research Council Canada.
- Raveendran, A., Rakesh, D. and Sridhara, S. N. (2009). Exterior Styling of an Intercity Transport Bus for Improved Aerodynamic Performance. **SASTECH**. 8(2): 9-16.
- U.S. Department of Energy. Alternative Fuels Data Center. (2014). **Average Annual Fuel Use of Major Vehicle Categories** [Online]. Available from: <https://www.afdc.energy.gov/data/10310>
- Vinodhini, P. J., Samuvel, T. J. and Raj, G. S. (2016). Numerical Analysis of Drag Reduction Method Using Vortex Generator on Symmetric Aerofoil. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**. 35: 33-36.





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

กนกวรรณ วงศ์สาดี, กิรติ สุตักษณ์ (2557). การทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศ  
สำหรับรถยนต์โดยสาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย  
ครั้งที่ 28 (ME-NETT) 15-17 ตุลาคม 2557 จ.ขอนแก่น



CST-36

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28  
15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

## การทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศสำหรับรถยนต์โดยสาร Prediction of Airflow Behavior and Drag Force on the Bus Bodies

กนกวรรณ วงศ์สาลี และ กิรติ สุลักษณ์ \*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000  
\* อีเมล: keerati@sut.ac.th, โทรศัพท์: 044-224410, โทรสาร: 044-224613

### บทคัดย่อ

พฤติกรรมการไหลและแรงต้านถือเป็นปัจจัยสำคัญมากทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้ในการออกแบบยานยนต์ในปัจจุบัน โดยหลักทางวิศวกรรมจึงมุ่งเน้นการออกแบบที่ก่อให้เกิดแรงต้านน้อยที่สุด เพื่อช่วยประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงขณะขับขี่ แรงต้านจึงเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเหมาะสมด้านรูปทรงของยานยนต์ที่ออกแบบ โดยทั่วไปการวิเคราะห์แรงต้านมักใช้กับการออกแบบรถยนต์นั่งส่วนบุคคล จนกระทั่งรถยนต์ที่ใช้ในการแข่งขันด้านความเร็ว อย่างไรก็ตาม เท่าที่ทราบยังไม่พบการนำมาปรับใช้กับการออกแบบรถยนต์โดยสารอย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านรถโดยสารปรับอากาศ รุ่น Intercity Bus ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง (ความเร็วจำกัดตาม พรบ.จราจรทางบก พ.ศ. 2522) โดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ผลการจำลองช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการไหลของอากาศและแรงต้านที่กระทำกับรถ โดยพบว่าแรงเฉือนพื้นผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณขอบด้านหน้าของรถ แรงต้านรวมที่กระทำกับรถมีขนาด 882.628 นิวตัน คิดเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.613 นอกจากนี้ยังพบการเกิดกระแสหมุนวนของอากาศที่ด้านหลังรถ ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้กับการออกแบบรูปทรงรถโดยสารให้มีความเหมาะสมขึ้น เพื่อช่วยลดแรงต้านนำไปสู่การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากขึ้น

**คำหลัก:** รถยนต์โดยสาร, การจำลองการไหล, แรงต้าน, การไหล

### Abstract

Flow behavior and drag force are important in aerodynamic and used in automotive design. In engineering we focus on design for minimum drag to help saving fuel when drive. Then drag force is exactly related to automotive design optimization. Drag force analysis usually use to design private car as well as racing car, however as I know no one use this analysis with bus. This research study about external flow through Intercity Bus at 80 km/hr. (limit from TRAFFIC ACT, B.E. 2522 (1979)) use ANSYS Fluent 14.0 based on laminar and turbulence flow. Results help understand flow behavior and drag force acts on bus body, maximum shear force is on front edge of bus body, total drag is 882.628 N, drag coefficient ( $C_d$ ) is 0.613 In addition found circulation flow at rear. These results can improve bus body design to decrease drag force lead to save fuel.

**Keyword:** Bus, Flow simulation, Drag force, Flowing

## CST-36

### 1. บทนำ

การขนส่งทางบกในปัจจุบัน เป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ที่ต้องการเดินทาง โดยมีทั้งการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล หรือการใช้บริการของรถโดยสารสาธารณะ ซึ่งการเดินทางโดยใช้รถโดยสารสาธารณะเป็นวิธีที่นิยมมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นทางเลือกที่สะดวก รวดเร็ว ปลอดภัย และประหยัดค่าใช้จ่าย ดังจะเห็นได้จากเมื่อเปรียบเทียบสถิติการใช้สถานีขนส่งผู้โดยสารที่กรมการขนส่งทางบกกับดูแล ทั่วประเทศ ในไตรมาสที่ 2 (มกราคม - มีนาคม) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 พบว่า สถิติการใช้สถานีขนส่งผู้โดยสารเพิ่มขึ้นทั้งจำนวนเที่ยว, จำนวนผู้โดยสารและจำนวนเงินค่าบริการ โดยจำนวนเที่ยว เพิ่มขึ้น ร้อยละ 4.65 จำนวนผู้โดยสาร เพิ่มขึ้น ร้อยละ 0.52 และจำนวนเงินค่าบริการ เพิ่มขึ้น ร้อยละ 3.19 สาเหตุอาจเนื่องมาจากในปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 มีสถานีขนส่งผู้โดยสารเปิดให้บริการเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลโดยตรงให้จำนวนเที่ยว ผู้โดยสารและเงินค่าบริการเพิ่มขึ้นด้วย

ส่วนการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคลก็เป็นวิธีที่นิยมไม่แพ้กัน ดูได้จากสถิติการจดทะเบียนรถยนต์(สะสม) ณ วันที่ 31 มีนาคม 2556 และ 2557 พบว่าในปี 2556 มีรถยนต์นั่งส่วนบุคคลจดทะเบียนสะสม 6,575,208 คัน และในปี 2557 มี 7,338,703 คัน ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.6 (จากรายงานสถิติการขนส่งประจำไตรมาสที่ 2 ปีงบประมาณ 2557 (มกราคม – มีนาคม 2557) กรมการขนส่งทางบก)

ดังนั้นในการออกแบบยานยนต์จะต้อง

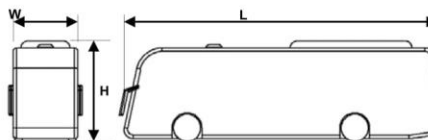
คำนึงถึงความปลอดภัย ความสะดวกสบายของผู้โดยสาร หรือแม้กระทั่งความคุ้มค่าในการใช้งาน การประหยัดเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังต้องออกแบบให้เกิดแรงต้านที่กระทำกับยานยนต์น้อยที่สุด ดังนั้นการออกแบบรถยนต์โดยสารจึงหันมาให้ความสำคัญของอากาศพลศาสตร์เพื่อให้เกิดแรงต้านที่กระทำกับตัวรถน้อยที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดเชื้อเพลิงยิ่งขึ้น ซึ่งการออกแบบนี้สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการสร้าง

แบบจำลอง หรือแม้กระทั่งการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ แต่เนื่องจาก การสร้างแบบจำลองเป็นวิธีที่ใช้งบประมาณสูง ดังนั้นวิธีที่นิยมใช้ในการออกแบบ คือ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ แต่เนื่องจากในปัจจุบัน เท่าที่ทราบยังไม่พบการนำความรู้เรื่องอากาศพลศาสตร์มาใช้ในการออกแบบรถยนต์โดยสาร ดังนั้นงานวิจัยเรื่องนี้จึงนำหลักการด้านอากาศพลศาสตร์มาใช้นำมาพุดติกรรม การไหลของอากาศผ่านรถโดยสารปรับอากาศ รุ่น Intercity Bus ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยผลการวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้กับการออกแบบรูปทรงรถโดยสารให้มีความเหมาะสมขึ้น เพื่อช่วยลดแรงต้านนำไปสู่การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงได้มากขึ้น

### 2. วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 2.1 การเขียนแบบรถยนต์โดยสาร

รถโดยสารปรับอากาศรุ่น Intercity Bus เป็นรถโดยสารปรับอากาศแบบชั้นครึ่ง นิยมใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร รองรับผู้โดยสารได้ 38-44 ที่นั่ง มีขนาดความกว้าง (W) 2.5 เมตร สูง(H) 3.8 เมตร และความยาวลำตัว (L) 12 เมตร



รูปที่ 1 cad file ของรถยนต์โดยสาร

#### 2.2 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

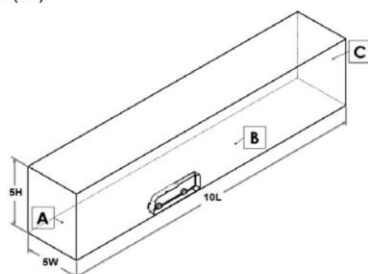
การทำนายพฤติกรรมกรรมการไหลผ่านรถยนต์ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขบนพื้นฐานระเบียบวิธี Finite Volume โดยการโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Fluent 14.0 วิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องด้วยผลจากการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบจะถูกใช้อ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากการวิเคราะห์

### CST-36

การไหลแบบภายนอกนี้ กริดบริเวณชั้นขีดผิวจะต้องมีขนาดที่เหมาะสม ถ้ากริดชั้นขีดผิวมีขนาดใหญ่เกินไป โปรแกรมอาจจะปรับไปวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบแทนการไหลแบบปั่นป่วนได้

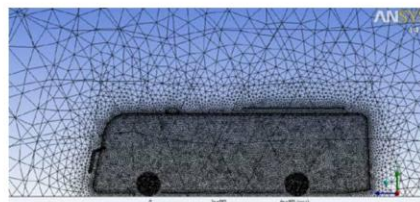
เนื่องจากรถยนต์โดยสารมีรูปทรงสมมาตร ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์เพียงครึ่งเดียวตามแนวยาว (L) เท่านั้น โดยเงื่อนไขในการวิเคราะห์สามารถจำลองได้สองแบบ คือ การไหลโดยให้รถยนต์โดยสารวิ่งด้วยความเร็ว 22.2222 เมตรต่อวินาที ส่วนถนนและอากาศหยุดนิ่ง หรืออีกวิธีหนึ่งคือ การไหลแบบรถยนต์โดยสารหยุดนิ่ง ส่วนถนนและอากาศวิ่งด้วยความเร็ว 22.2222 เมตรต่อวินาที ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้รถยนต์โดยสารหยุดนิ่ง ส่วนถนนและอากาศวิ่ง โดยกำหนดให้ความเร็วลมที่ไหลเข้ามาปะทะรถยนต์โดยสารมีค่า 22.2222 เมตรต่อวินาที, รถยนต์โดยสารหยุดนิ่ง, ล้อรถหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม 42.4 เรเดียนต่อวินาที, ถนนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 22.2222 เมตรต่อวินาที ที่ทิศทางเดียวกับอากาศที่ปะทะรถยนต์โดยสาร

โดเมนในการจำลองการไหล กำหนดให้ความกว้างของโดเมนมีขนาด 5 เท่าของความกว้างรถ (5W), ความสูงของโดเมนมีขนาด 5 เท่าของความสูงของรถ (5H) ความยาวโดเมนรวมมีขนาด 10 เท่าของความยาวรถ โดยแบ่งเป็นความยาวโดเมนด้านหน้ามีขนาด 3 เท่าของความยาวของรถ (3L) และความยาวโดเมนด้านหลังมีขนาด 7 เท่าของความยาวรถ (7L)



รูปที่ 2 ขนาดโดเมนและเงื่อนไขการจำลองการไหล  
โดย A: Inlet, B: Road, C: Outlet

กริดที่ใช้กับโมเดลในการจำลองการไหลจะมีความละเอียดเป็นพิเศษที่บริเวณผิวและชั้นขีดผิวของรถ เนื่องจากเป็นบริเวณที่สนใจ ต้องการทำนายพฤติกรรมกริดและหาค่าแรงต่างๆที่กระทำกับผิวรถ ซึ่งในการสร้างเมชจะทำการสร้างแบบจำลองที่มีความละเอียดและจำนวนอิลิเมนต์ต่างกัน 4 แบบด้วยกัน ได้แก่แบบจำลองที่มีจำนวนอิลิเมนต์ 334631, 532431, 720564, 907183 และ 1,800,000 อิลิเมนต์ตามลำดับ จากการทดสอบความเป็นอิสระของกริด โดยจำลองการไหลผ่านรถยนต์โดยสารในแต่ละกรณีที่มีจำนวนอิลิเมนต์ต่างกัน จากนั้นเลือกกระบอกตัดขวางที่บริเวณผิวบนของรถยนต์โดยสารแล้วทำการพล็อตกราฟระหว่างพิกัดของพื้นผิวกับแรงดันที่เกิดขึ้น แล้วทำการเปรียบเทียบกัน ผลปรากฏว่ากราฟของแบบจำลองที่มีจำนวน 907183 และ 532431 อิลิเมนต์มีค่าเท่ากัน จึงได้ข้อสรุปว่ากริดชุด 907183 และ 532431 ให้ผลเฉลยใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้กริดชุด 532431 ในการจำลองการไหล



รูปที่ 3 เมชที่ใช้กับโมเดลในการจำลองการไหล

### 3. ผลการจำลองและผลการวิเคราะห์

ผลการจำลองการไหล พบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากการไหลทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน เกิดจากผลรวมของแรงดัน 2 ชนิด คือ แรงดันเนื่องจากความดัน และแรงดันที่เกิดจากความหนืด (แรงดันเฉือน) โดยค่าของแรงดันประเภทต่างๆแสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

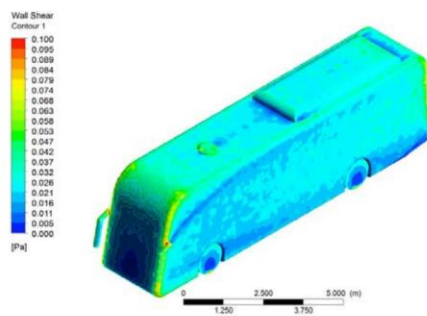


**CST-36**

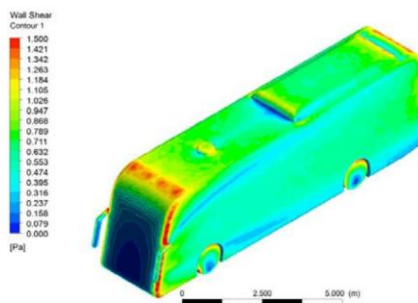
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบแรงต้านที่กระทำกับตัวรถ

Model	Drag Force (N)			C <sub>d</sub>
	Pressure	Viscous	Total	
Laminar	880.954	1.674	882.628	0.613
k-epsilon	788.517	53.891	842.409	0.585
SST	812.492	41.531	854.023	0.593

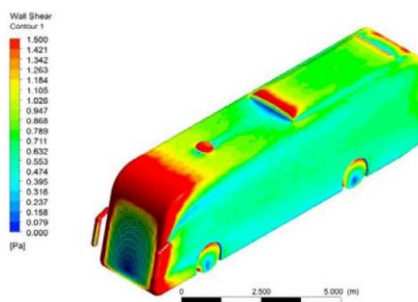
จากตารางที่ 1 พบว่าแรงต้านที่กระทำกับรถยนต์โดยสารบนพื้นฐานการวิเคราะห์การไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนมีค่าต่างกันโดยการวิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบจะเกิดแรงต้านที่กระทำกับผิวของรถยนต์โดยสารมากที่สุดคือ 882.628 นิวตัน คิดเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.613 ส่วนการวิเคราะห์บนพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วนทั้งแบบจำลอง SST และ k-ε เกิดแรงต้านขนาดใกล้เคียงกันคือ 842.409 และ 854.023 นิวตัน ตามลำดับ คิดเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.585 และ 0.593 ตามลำดับ



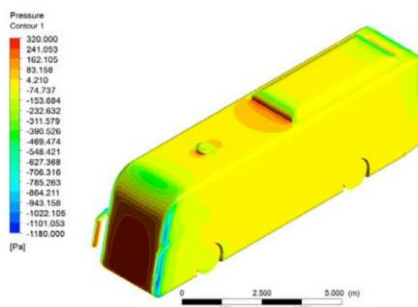
รูปที่ 4 คอนทัวร์ของแรงเฉือนที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ



รูปที่ 5 คอนทัวร์ของแรงเฉือนที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST

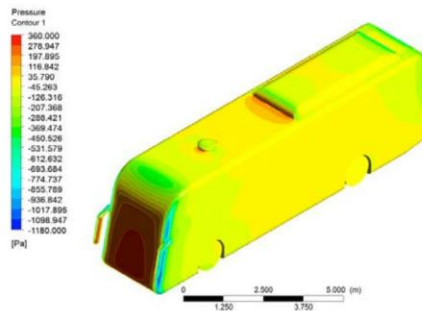


รูปที่ 6 คอนทัวร์ของแรงเฉือนที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε

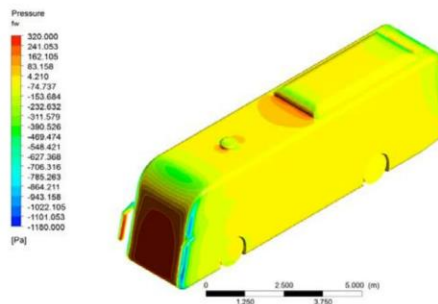


รูปที่ 7 คอนทัวร์ของความดันที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ

**CST-36**



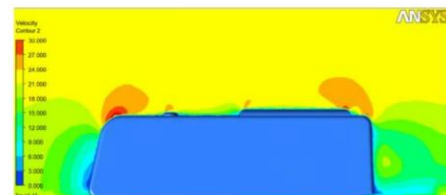
รูปที่ 8 คอนทัวร์ของความดันที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลปั่นป่วน SST



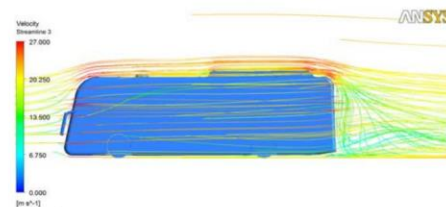
รูปที่ 9 คอนทัวร์ของความดันที่กระทำกับผิวรถ ในแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε

จากรูปที่ 4-6 แสดงแรงเฉือนที่กระทำกับผิวของรถยนต์โดยสาร โดยบริเวณคอนทัวร์สีแดงคือบริเวณที่เกิดแรงเฉือนสูงสุด ส่วนคอนทัวร์สีฟ้าคือบริเวณที่เกิดแรงเฉือนน้อยสุดตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่าผลการจำลองการไหลทั้ง 3 แบบ บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ได้ผลค่าตอบใกล้เคียงกัน คือบริเวณขอบด้านหน้าของตัวรถยนต์โดยสาร กระชก ช่องระบายอากาศ จะเกิดแรงเฉือนมากเนื่องจากได้รับการปะทะจากอากาศโดยตรงทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างอากาศกับผิวรถมาก ส่วนบริเวณขอบด้านหลังของรถก็เกิดแรงเฉือนมากเช่นกันเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดของการไหล ทำ

ให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน จึงเกิดแรงเฉือนมาก นอกจากนี้จะเห็นว่าคอนทัวร์ของแรงเฉือนจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε มีค่ามากกว่าแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก แรงต้านเฉือนจากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน k-ε มีค่ามากกว่าแรงต้านเฉือนของแบบจำลองอื่นนั่นเอง (ดังแสดงในตารางที่ 1) จากรูปที่ 7-9 แสดงคอนทัวร์ของความดันที่เกิดขึ้นที่ผิวของรถยนต์โดยสาร โดยบริเวณที่มีความดันมากที่สุดคือบริเวณด้านหน้าของรถ เนื่องจากเป็นจุดที่อากาศเข้ามาปะทะทำให้เกิดจุดหยุดนิ่ง (Stagnation Point) ขึ้น (แสดงในภาพที่ 10) ความดันบริเวณนี้จึงมีค่ามากที่สุด ส่วนกระชก และช่องระบายอากาศ มีความดันสูงรองลงมาจากด้านหน้ารถ เนื่องจากเป็นส่วนที่ปะทะกับอากาศที่ไหลเข้ามา ทำให้อากาศบริเวณนั้นมีความเร็วลดลง ทำให้ความดันมาก คอนทัวร์บริเวณนั้นจึงเป็นสีแดงหรือแดง ส่วนบริเวณด้านหลังรถจะมีความดันน้อย เนื่องจากด้านหลังรถยนต์เกิดการไหลแบบปั่นป่วน จึงทำให้ความดันน้อย คอนทัวร์จึงเป็นสีเขียวหรือใกล้เคียงสีฟ้า ด้วยเหตุนี้ทำให้ผลต่างความดันบริเวณหน้ารถและหลังรถมีค่ามาก จึงกลายเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถ

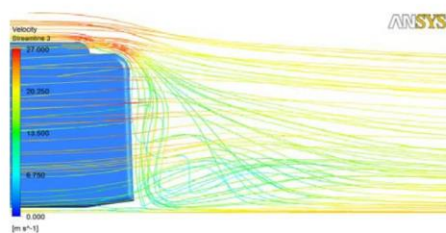


รูปที่ 10 คอนทัวร์ของความเร็วที่หน้าตัดกึ่งกลางของรถยนต์โดยสาร



รูปที่ 11 เส้นการไหลของอากาศผ่านรถยนต์โดยสาร

### CST-36



รูปที่ 12 เส้นการไหลของอากาศ บริเวณด้านหลัง  
รถยนต์โดยสาร

จากรูปที่ 11-12 แสดงเส้นการไหลของอากาศจากการจำลองการไหลผ่านรถยนต์โดยสาร พบว่าความเร็วของอากาศบริเวณรถยนต์โดยสาร มีค่ามากกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากบริเวณรถยนต์โดยสาร การไหลถูกบีบให้มีหน้าตัดการไหลน้อยลงเมื่อเทียบกับโดเมนของการจำลองการไหล ความเร็วจึงเพิ่มขึ้นและเมื่อถึงบริเวณหลังรถ หน้าตัดการไหลเทียบกับกรอบโดเมนเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วในการไหลลดลงส่งผลให้ความดันบริเวณด้านหลังรถยนต์โดยสารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณด้านหลังรถยนต์โดยสาร ทั้งสองสาเหตุนี้มีผลทำให้ความดันของอากาศบริเวณด้านหลังรถยนต์มีค่ามากกว่าบริเวณอื่น ซึ่งทำให้แรงดันของรถยนต์โดยสารมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

#### 4. สรุป

การจำลองการไหลของอากาศผ่านรถยนต์โดยสาร บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบและไหลแบบปั่นป่วนทั้งแบบจำลอง SST และ k-ε พบว่าผลการจำลองทั้ง 3 แบบ ความเร็วของอากาศที่ปะทะบริเวณขอบรถยนต์โดยสารด้านหน้า มีค่ามากกว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้บริเวณนั้นเกิดแรงเฉือนมากกว่า นอกจากนี้อากาศมียังการหมุนวนเกิดขึ้นที่บริเวณท้ายรถ สัมประสิทธิ์แรงดันของรถยนต์โดยสาร บนพื้นฐานการไหลแบบราบเรียบมีค่าเท่ากับ 0.613 และสัมประสิทธิ์แรงดันของรถยนต์โดยสารบนพื้นฐาน

การไหลแบบปั่นป่วนของแบบจำลอง SST มีค่าเท่ากับ 0.585 และแบบจำลอง k-ε มีค่าสัมประสิทธิ์แรงดันเท่ากับ 0.593 ซึ่งการไหลบนพื้นฐานการไหลแบบปั่นป่วนทั้ง 2 แบบจำลองนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันใกล้เคียงกัน

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Angle HUMINIC, Gabriela HUMINIC (2009). CFD Investigation of an Open-Wheel Race Car, paper presented in 4<sup>th</sup> European Automotive Simulation Conference, Munich, Germany.
- [2] ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT Tutorial Guide (2011). USA.
- [3] Tony Saad. Turbulence Modeling for Beginner, University of Tennessee, United States.
- [4] กองแผนงาน กลุ่มสถิติการขนส่ง, สถิติการขนส่งประจำไตรมาสที่ 2 ปีงบประมาณ 2557 (มกราคม-มีนาคม 2557), กรมการขนส่งทางบก, หน้า 1.
- [5] ขวลิศ กิตติชัยการ และวีรชัย ชัยวรพฤษ, การศึกษาทำนายค่าแรงดันและแรงกดของอากาศผ่านรถแข่ง, วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 53 ปีที่ 18, 18 สิงหาคม 2547.
- [6] รัฐศักดิ์ จันตะขัติ, สุนทรีย์ อิ่มสำราญ และกิริติ สุลักษณะ (2557). การวิเคราะห์การไหลผ่านรถไฟความเร็วสูงภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนอัดตัวได้, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวกนกวรรณ วงศ์สาตี เกิดเมื่อวันที่ 16 มีนาคม พุทธศักราช 2535 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนมารีย์รังษย์ จังหวัดนครราชสีมา ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนจุฬาราชวิทยาลัย ลพบุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอากาศยาน) (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพุทธศักราช 2556 จากนั้นได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพุทธศักราช 2557 โดยได้รับทุนเรียนดีจากมหาวิทยาลัย และในขณะที่ศึกษาได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาพื้นฐานวิศวกรรมเครื่องกล ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และเขียนแบบวิศวกรรม

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 ประจำปี พ.ศ. 2557 ในหัวข้อการทำนายพฤติกรรมการไหลและแรงต้านของอากาศสำหรับรถยนต์โดยสาร



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี