



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อุปกรณ์เสริมภายนอกของรถกระบะเพื่อประหยัดน้ำมัน

โดย

ปรีชญา มุขดา และ คณะ

มีนาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ รวมทั้งการจัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพ็ชรทอง ที่ปรึกษาโครงการวิจัย นักศึกษาผู้ช่วยงานวิจัย สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ช่วยสร้างชุดทดลอง ทำการทดลอง และรวบรวมผลการทดลอง อย่างขะมักเขม้น ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

รายงานการวิจัยเรื่อง	อุปกรณ์เสริมภายนอกของรถกระบะเพื่อประหยัดน้ำมัน
หัวหน้าโครงการวิจัย	อาจารย์ปรัชญา มุขดา
ผู้ร่วมโครงการวิจัย	อาจารย์พีเชฐ นิลดวงดี รองศาสตราจารย์ อุทัย ผ่องศรีศรี อาจารย์ยุทธนา พลอยฉาย นายอนุชา สายสร้อย
ที่ปรึกษาโครงการวิจัย	รองศาสตราจารย์ อุทัย ผ่องศรีศรี ดร. ปาณิสรา แก้วสวัสดิ์

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
งบประมาณ เงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
ประกอบการของงบประมาณ พ.ศ. 2554
งบประมาณที่ได้รับ 70,000 บาท
คำสำคัญ : อากาศพลศาสตร์, รถบรรทุกเล็ก, วิธีจำลองเชิงตัวเลข

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ ที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกเล็กห้องผู้โดยสาร 2 ตอน ที่มีการติดอุปกรณ์เสริม เพื่อนำมาทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) โดยใช้อุโมงค์ลมความเร็วต่ำ และวิธีจำลองเชิงตัวเลข ใช้ซอฟต์แวร์ Fluent แบบ 3 มิติ โดยทดสอบแบบจำลองด้วยอุโมงค์ลมที่ความเร็วระหว่าง 10 – 25 เมตรต่อวินาที และเปรียบเทียบด้วยการจำลองเชิงตัวเลขโดยโปรแกรม Fluent หลังจากนั้นทดสอบรถขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลขที่ความเร็ว 36 – 126 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทดสอบรถ 7 กรณี คือกรณีรถกระบะปกติ, ติดกันชนท้าย, ติดกำแพงล้อ, ปิดท้ายกระบะ, เสริมหลังคาคนขับ, ติดอุปกรณ์กันแมลง, และติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา การศึกษานี้ เน้นศึกษาคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการหมุนวนของอากาศด้านท้ายกระบะของรถบรรทุกเล็กเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยกรณีปิดท้ายกระบะจะลดสัมประสิทธิ์แรงต้านจาก 0.475 – 0.435 (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันได้ 7.58 % กรณีติดอุปกรณ์วางของบนหลังคาเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านเป็น 0.523 เพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเป็น 10.53 % ส่วนกรณีอื่นๆนั้นเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านเล็กน้อย การศึกษานี้ยืนยันว่า การลดการปะทะและหมุนวนของอากาศที่เกิดจากรูปทรงของรถ ก็สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนได้วิธีหนึ่ง ส่วนอุปกรณ์ที่เพิ่มการหมุนวนของอากาศจะเพิ่มการสิ้นเปลืองพลังงานของรถบรรทุก

The Research Report Accessories Outside of the Pickup to Save Fuel

Head of Project Mr. Prachya Mukda

Co-researchers Mr. Pichet Ninduangdee

Assoc.Prof Uthai Phougrassamee

Mr. Yuttana Ploychai

Mr. Anucha Saysoy

Consulting projects Assoc.Prof Uthai Phougrassamee

Mechanical Engineering Industrial Technology Phetchaburi Rajabhat University

In Finance Year 70,000 Baht

Key words : Aerodynamics, Small Truck, Numerical Method

Abstract

This project was an aerodynamics study in a double cabin small truck by adding accessories for Drag Coefficients testing by wind tunnel and numerical method by using Fluent three dimension software . The simulation testing in wind tunnel on the velocity between 36 and 90 km/hr and compare with numerical method by Fluent. After that test with real size double cabin small truck by numerical method on velocity between 36 and 126 km/hr in 7 cases are the following : Normal car, Rear Bumper, Fender, Covered pick-up box, Adjust on driver roof, Bug deflector, and Roof rack. This project was a study of aerodynamics for Reduce drag coefficients. From testing, Covered pick-up box case reduce drag coefficients from 0.475 – 0.435 and reduce fuel consumption 7.58 percents. Roof rack case increase drag coefficients is 0.523 and increase fuel consumption 10.53 percents.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ	4
2.1.1 แรงยกและแรงต้าน	4
2.1.2 แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน	6
2.1.3 แรงต้านจากความเสียดทานของขอบชั้น (Friction Drag of Boundary Layer)	7
2.1.4 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์	8
2.1.5 Reynolds number	14
2.1.6 การแยกตัว (Separation)	15
2.1.6 ความคล้ายคลึงกัน	19
2.2 สมการมูลฐานของการไหล	21
2.2.1 สมการอนุพันธ์มวล	21
2.2.2 สมการอนุพันธ์โมเมนตัม	23
2.2.3 สมการอนุพันธ์พลังงาน	24
2.2.4 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)	25
2.3 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ ด้วยอุโมงค์ลม โดยการลดสัมประสิทธิ์ แรงต้านของรถยนต์	26

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)	29
2.4.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method)	29
2.4.2 ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา	30
2.4.3 ระเบียบวิธีคำนวณ	32
2.4.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลของบริเวณใกล้เคียง	32
2.4.5 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล	33
2.5 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	37
บทที่ 3 วิธีการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD	40
3.1 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม	40
3.2 การทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม	42
3.3 การยืนยันผลของ CFD	42
3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	43
3.3.2 การยืนยันผลการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน	43
3.3.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของการเพิ่มจำนวนกริด	44
3.4 การทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กโดย CFD	46
3.5 การเปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองโดยอุโมงค์ลมกับ CFD	48
บทที่ 4 การหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง โดย CFD	50
4.1 ผลที่ได้จากการทดสอบ	51
4.2 การกระจายตัวของความเร็วและความดัน	55
4.3 วิเคราะห์ผล	63
บทที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	65
5.1 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	65
5.1.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน	65
5.1.2 การคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)	66
5.1.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	68
5.1.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย	69
5.2 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอากาศยาน	70
บทที่ 6 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	72
6.1 สรุปผลจากการวิจัย	72
6.2 ข้อเสนอแนะ	74

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	79
ก. ตีพิมพ์เผยแพร่วารสาร	80
ข. ประวัติคณะนักวิจัย	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กจากอุโมงค์ลม	42
3.2 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/hr	45
3.3 ผลการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กจาก CFD	47
4.1 เงื่อนไขการจำลอง CFD	50
4.2 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ	51
4.3 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s	52
4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s	52
4.5 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s	53
4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s	53
4.7 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s	53
4.8 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 35 m/s	54
4.9 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน	54
5.1 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีติดอุปกรณ์เสริม	66
5.2 คุณสมบัติของเครื่องยนต์	67
5.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบ	68
5.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย	69
6.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD	73
6.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย (เครื่องหมาย ลบ คือ ลดการใช้น้ำมัน)	74

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การทดสอบบรรทัดเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC	4
2.2 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ a) แรงเนื่องจากความดัน b) แรงเนื่องจากความหนืด c) แรงต้านและแรงยก	5
2.3 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวของวัตถุ	6
2.4 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ	8
2.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์	9
2.6 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์	10
2.7 ลักษณะรูปทรงที่ต่าง ๆ ของรถยนต์นั่ง	10
2.8 การเกิดเวกที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน	11
2.9 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวก	12
2.10 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน	12
2.11 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน	13
2.12 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน	14
2.13 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน และสำหรับของไหลสมมุติ	16
2.14 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก	16
2.15 จุดแยกตัวจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ (b) ทรงกลมผิวขรุขระ	17
2.16 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล	17
2.17 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน	18
2.18 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อนได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง	19
2.19 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต	20
2.20 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์	20
2.21 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต	21
2.22 ฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุกรมวล	22
2.23 รูปแบบแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก	23

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.24 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy	24
2.25 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่	27
2.26 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน	28
2.27 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Segregated solver	31
2.28 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Coupled solver	32
2.29 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	33
2.30 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH	39
3.1 ชุดทดสอบอุโมงค์ลม	40
3.2 เส้นทางการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ทดสอบในอุโมงค์ลม ที่ความเร็ว 10 m/s	42
3.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน จากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ	44
3.4 ลักษณะการกำหนดกริด	45
3.5 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริดทดสอบใน CFD ที่ความเร็ว 10 m/s	46
3.5 เส้นของความเร็วที่กระทำต่อแบบจำลองรถบรรทุกเล็กทดสอบใน CFD ที่ความเร็ว 10 m/s	47
3.6 เส้นของความดันที่กระทำต่อแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก	48
3.7 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลอง	48
4.1 รถกระบะติดอุปกรณ์เสริมต่างๆ	52
4.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ	55
4.3 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 รถกระบะปกติ	56
4.4 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 รถกระบะปกติ	56
4.5 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 2 รถกระบะติดกันชนท้าย	57
4.6 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 2 รถกระบะติดกันชนท้าย	57
4.7 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 3 รถกระบะติดก้านบังล้อ	58
4.8 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 3 รถกระบะติดก้านบังล้อ	58
4.9 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 4 รถกระบะปิดท้ายกระบะ	59
4.10 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 4 รถกระบะปิดท้ายกระบะ	59
4.11 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 5 รถกระบะเสริมหลังคาคนขับ	60
4.12 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 5 รถกระบะเสริมหลังคาคนขับ	60
4.13 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 6 รถกระบะติดอุปกรณ์กันแมลง	61

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 6 รถกระบะติดอุปกรณ์กันแมลง	61
4.15 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 7 รถกระบะติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา	62
4.16 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 7 รถกระบะติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา	62
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับกำลังและแรงบิด	67
5.2 อุปกรณ์ปิดท้ายกระบะ	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำมันเชื้อเพลิง เป็นทรัพยากรธรรมชาติของโลกที่กำลังจะขาดแคลนในปัจจุบัน เนื่องจากปัจจุบันมีอุตสาหกรรมจำนวนมากซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตเป็นส่วนใหญ่ ยิ่งโลกมีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจมากเท่าใด ปริมาณการใช้ทรัพยากรน้ำมันของโลกก็มากขึ้นตามไปด้วย และผลกระทบที่ตามมาคือ การขาดแคลนน้ำมัน โดยประเทศมหาอำนาจหลายๆประเทศจึงร่วมกันรณรงค์เรื่องการประหยัดน้ำมัน และรวมถึงประเทศไทย ที่เล็งเห็นความสำคัญในจุดนี้ด้วย

ประเทศไทยมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการคมนาคมและการขนส่งเป็นจำนวนมาก โดยคนส่วนใหญ่มีการใช้รถโดยสารส่วนบุคคลในการคมนาคม โดยเฉพาะรถบรรทุกเล็กหรือรถปิกอัพ โดยที่รถบรรทุกเล็กส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงนี้ประเทศไทยได้นำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่

เมื่อรถมีการเคลื่อนที่จะเกิดการสูญเสียเชื้อเพลิง โดยมีการสูญเสียจากการถ่ายเทกำลังผ่านชุดเกียร์และเฟืองท้ายออกมาที่ล้อจะมีการสูญเสียกำลังไปประมาณ 15% แรงต้านจากการหมุนของล้อจากการบิดงอไปมาของเนื้อยางและความเสียดจากลูกปืนล้อและเบรก (Rolling resistance) อีก 25% การสูญเสียดังกล่าวนี้จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่การสูญเสียที่สำคัญคือการสูญเสียจากแรงต้านของอากาศโดยจะแปรผันตามความเร็วของรถยกกำลังสอง ซึ่งเมื่อรถวิ่งด้วยความเร็วที่สูง ก็จะทำให้แรงต้านจากอากาศมาก ทำให้รถนั้นต้องออกแรงที่จะเอาชนะแรงต้านมากตามไปด้วย มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่มากด้วย แรงต้านของอากาศนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่แล้วยังขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศด้วย ถ้ารถมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมากจะทำให้เกิดแรงต้านมากขึ้น แต่ถ้าเราสามารถที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศนี้ได้ก็จะทำให้รถมีการประหยัดเชื้อเพลิงและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่มีการคิดอุปกรณ์เสริมเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิง และเป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์เสริมอื่นๆให้ถูกหลักอากาศพลศาสตร์ต่อไป

ในการทดสอบด้านอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อรถบรรทุกเล็ก ใช้การทดสอบโดยการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม CFD เนื่องจากลดต้นทุนและเวลาในการทดสอบ นอกจากนี้ยังมีความละเอียดมากและสามารถที่จะแสดงผลการทดสอบให้เห็นการไหลของอากาศที่ไหลผ่านรถบรรทุกเล็กได้อย่างชัดเจน จึงได้นำโปรแกรม CFD นี้ไปใช้ในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อลดแรงต้านของอากาศที่กระทำต่อรถบรรทุกเล็กโดยการติดอุปกรณ์เสริม
- 1.2.2 เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็ก โดยการปรับปรุงรูปร่าง และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีต่าง ๆ โดยใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลขพร้อมกับการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ดังนั้นจึงได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ใช้ CFD code (FLUENT) 3 มิติ ในการออกแบบ และการคำนวณเชิงตัวเลข โดยใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม

1.3.2 ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก ทดสอบในช่วงความเร็ว 36 km/hr - 124 km/hr หรือประมาณ (10 m/s - 35 m/s)

1.3.3 ใช้รถบรรทุกขนาด 1 ตัน แบบตอนเดียวหรือมีห้องโดยสารเสริม โดยใช้โตโยต้า ไฮลักซ์วิโก้ พรินเนอร์เป็นต้นแบบ

1.3.4 ทดสอบรถบรรทุกเล็กมีการติดอุปกรณ์เสริม 7 กรณี คือ กรณีต้นแบบ, ติดกันชนท้าย, ติดกำบังล้อล้อ, ปิดท้ายกระบะ, เสริมหลังคาคนขับ, ติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา, และติดอุปกรณ์กันแมลงบริเวณบนฝากระโปรงรถ

1.3.5 สภาพบรรยากาศเป็น บรรยากาศปกติ เฉลี่ยของประเทศไทย

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือ วารสาร และบทความประชุมวิชาการต่างๆ

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีของแรงต้าน รวมถึงแรงที่ของไหลกระทำกับวัตถุ

1.4.3 ใช้ CFD ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุกขนาดเล็ก

1.4.4 ใช้อุโมงค์ลมทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก

1.4.5 เปรียบเทียบผล CFD กับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม เพื่อผลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ

1.4.6 ใช้ CFD หาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกขนาดเล็กแบบจำลองขนาดจริง กรณีต่าง ๆ ได้แก่

- (1) กรณีต้นแบบ
- (2) กรณีติดกันชนท้าย
- (3) กรณีติดกำบังล้อล้อ
- (4) กรณีปิดท้ายกระบะ
- (5) กรณีเสริมหลังคาคนขับ
- (6) กรณีติดอุปกรณ์กันแมลงบริเวณบนฝากระบะโปรงรถ
- (7) กรณีติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา

1.4.7 จำนวนอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

1.4.8 จำนวนอัตราการลงทุนการปรับปรุงรูปร่างรถกับการประหยัดเชื้อเพลิง

1.4.9 วิเคราะห์ และสรุปผล

1.4.10 เขียนรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถหาแนวทางในการปรับปรุงส่วนอื่น ของรถบรรทุกขนาดเล็กให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงอีกได้ โดยการวิเคราะห์จากการจำลองเชิงตัวเลข

1.5.2 ได้องค์ความรู้ในการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดอื่น โดยใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลข

1.5.3 ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ต่อการใช้งานรถบรรทุกขนาดเล็กให้เหมาะสมในแง่อากาศพลศาสตร์

1.5.4 เสนอแนวทางในการประหยัดพลังงานของการใช้รถบรรทุกขนาดเล็ก

1.5.5 ได้เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลการอ้างอิงทางวิชาการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ

หลักการของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ในกรณีการเคลื่อนที่ของยานยนต์ต่าง ๆ ต้องพิจารณาถึงแรงที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของยานยนต์ คือ แรงยกและแรงต้าน (Lift and Drag) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ซึ่งผลการศึกษาส่วนใหญ่จะได้อะมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบหุ่นจำลอง เช่นการใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ในการทดสอบบางทีก็อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบต้นแบบของยานยนต์จริงแทนที่จะใช้หุ่นจำลอง เช่นการทดสอบรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลมในห้องปฏิบัติการด้านอากาศพลศาสตร์ของ NRC (National Research Council of Canada) ดังภาพที่ 2.1

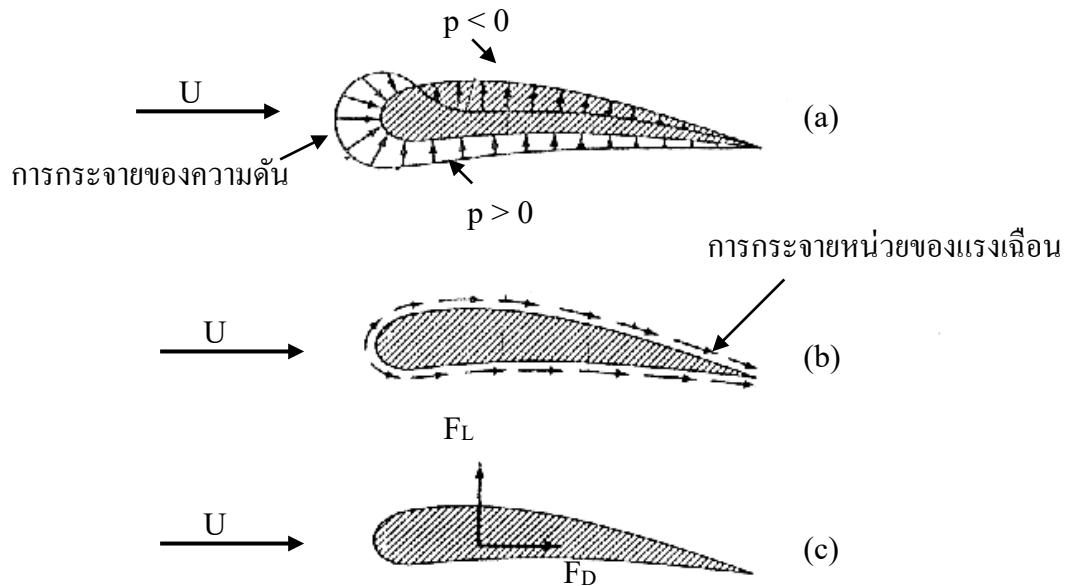


ภาพที่ 2.1 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC

2.1.1 แรงยกและแรงต้าน

เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลจะมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน เกิดจากการที่ผนังผิวหน้าสัมผัสกันระหว่างของไหลกับวัตถุ แรงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของวัตถุ (Wall shear stress, τ_w) ซึ่งเกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล และความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุเนื่องจากความดัน (p) ตัวอย่างการแพร่กระจายของความดันและหน่วยแรงเฉือนตลอดทั่วผิวของวัตถุ สามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งแสดงทั้งขนาดและทิศทางของความดันและหน่วยแรงเฉือน

แรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางของการไหลเรียกว่า แรงหน่วง (Drag, F_D) และแรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า แรงยก (Lift, F_L) ดังแสดงดังภาพที่ 2.2 และสำหรับวัตถุสามมิติบางชนิดอาจจะมีแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งตั้งฉากกับระนาบที่เกิดแรงหน่วงและแรงยกได้



ภาพที่ 2.2 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ a) แรงเนื่องจากความดัน b) แรงเนื่องจากความหนืด c) แรงต้านและแรงยก (Munson, 2002)

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือนและความดันที่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของวัตถุสามารถหาได้จากการอินทิเกรตแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน x และ y ของแรงรวมที่กระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ (dA) ดังนี้

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (2.1)$$

และ

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (2.2)$$

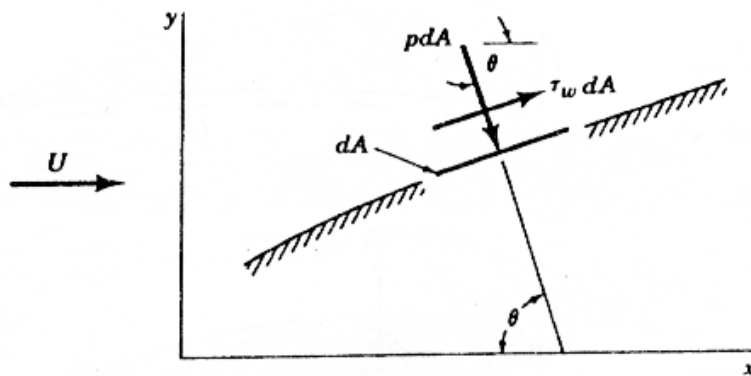
ดังนั้น จึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน x และ y ที่กระทำต่อวัตถุได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (2.3)$$

และ

$$F_L = -\int dF_y = \int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (2.4)$$

ในการอินทิเกรตเพื่อหาค่าแรงต้านและแรงยก จำเป็นต้องรู้ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่ศึกษา (ทั้งนี้ θ จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งบนพื้นผิวของวัตถุ) และการกระจายตัวของ τ_w และ p ตลอดพื้นที่ผิวของวัตถุ ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวเป็นสิ่งที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างยาก ไม่ว่าจะด้วยวิธีการทดลอง หรืออาศัยหลักการทางทฤษฎีก็ตาม การกระจายตัวตลอดพื้นที่ผิว (ของวัตถุ) ของ τ_w เป็นสิ่งที่วัดได้ยาก แต่การกระจายตัวของ p อาจได้มาจากการทดลองโดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันสถิตไว้ทั่วพื้นที่ผิวของวัตถุ



ภาพที่ 2.3 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวของวัตถุ

2.1.2 แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

แรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ภายใต้ของไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 อย่าง คือ แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure drag, F_p) และแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน (Friction drag, F_f) แรงต้านเนื่องจากความดันมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่เกิดจากความดันในทิศทางการเคลื่อนที่ที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ ซึ่งอาจเขียนได้ในรูปของแรงประกอบเนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation pressure) ที่กระทำต่อพื้นที่ทาบของวัตถุบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล คูณด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure – drag coefficient, C_p) ซึ่งสัมประสิทธิ์ C_p ขึ้นอยู่กับรูปทรงเลขาคณิตของวัตถุ และค่าได้จากห้องทดลอง โดยที่ V คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุ A คือพื้นที่ทาบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จึงสามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความดันคือ

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (2.5)$$

แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานมีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ตลอดพื้นผิวของวัตถุในทิศทางของการเคลื่อนที่ โดยทั่ว ๆ ไปจะเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานในรูปของสมการ (2.6) โดยที่ C_f คือสัมประสิทธิ์แรงหน่วยเนื่องจากความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด L คือความยาวของพื้นผิวในแนวขนานกับทิศทางการไหล B คือความกว้างของพื้นผิว โดยทั่ว ๆ ไปจะหาค่าได้โดยการหารพื้นผิวทั้งหมดด้วย L

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (2.6)$$

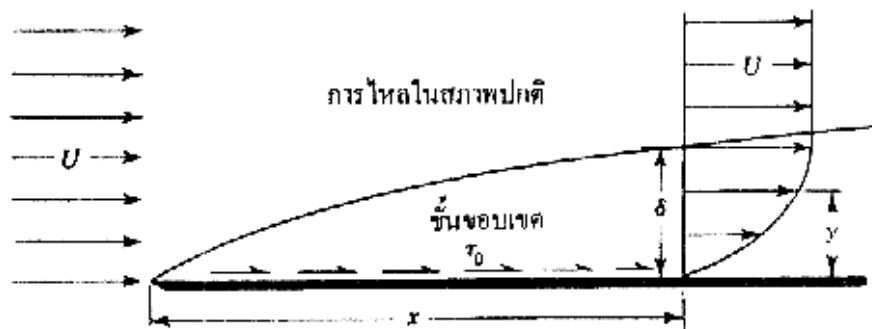
แรงต้านทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุใด ๆ คือผลรวมของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านเนื่องจากความดันคือ $F_D = F_f + F_p$ ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบิน และเรือดำน้ำ ค่าของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานจะเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นแรงต้านรวมจึงเท่ากับแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่สำหรับวัตถุรูปทรงอื่นที่มีคลื่นวนเกิดขึ้นทางด้านท้าย เช่น แผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ก็จะมีเฉพาะแรงต้านเนื่องจากความดันเท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปค่าของแรงต้านรวม สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7) โดยที่ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม และ A คือพื้นที่ที่ทาบของวัตถุบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A \quad (2.7)$$

2.1.3 แรงต้านจากความเสียดทานของขอบชั้น (Friction Drag of Boundary Layer)

ชั้นขอบเขตในการไหลคือชั้นบาง ๆ ของของไหลจริง (Real fluid) ที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุ วัตถุในบริเวณดังกล่าวนี้จะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ทำให้เกิดการกระจายความเร็วในลักษณะที่ความเร็วที่ผิวคงรูป จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่หน่วยแรงเฉือนและความลาดของความเร็ว (Velocity gradient) มีค่าสูงมาก ในขณะที่ของไหลจริงนอกชั้นของขอบเขตนี้สามารถถือว่าเป็นของไหลสมมุติ (Frictionless or ideal fluid)

ชั้นขอบเขตมี 3 ประเภท คือชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ (Laminar boundary layer) ชั้นขอบเขตแบบเปลี่ยนแปลง (Transition boundary layer) และชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) ซึ่งชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนนี้จะมีชั้นราบเรียบย่อย (Laminar sub-layer) อยู่ในส่วนล่างติดกับผิววัตถุ ความหนาของชั้นขอบเขตดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางจากจุดปลายของวัตถุ (Leading edge) ดังแสดงในภาพที่ 2.4

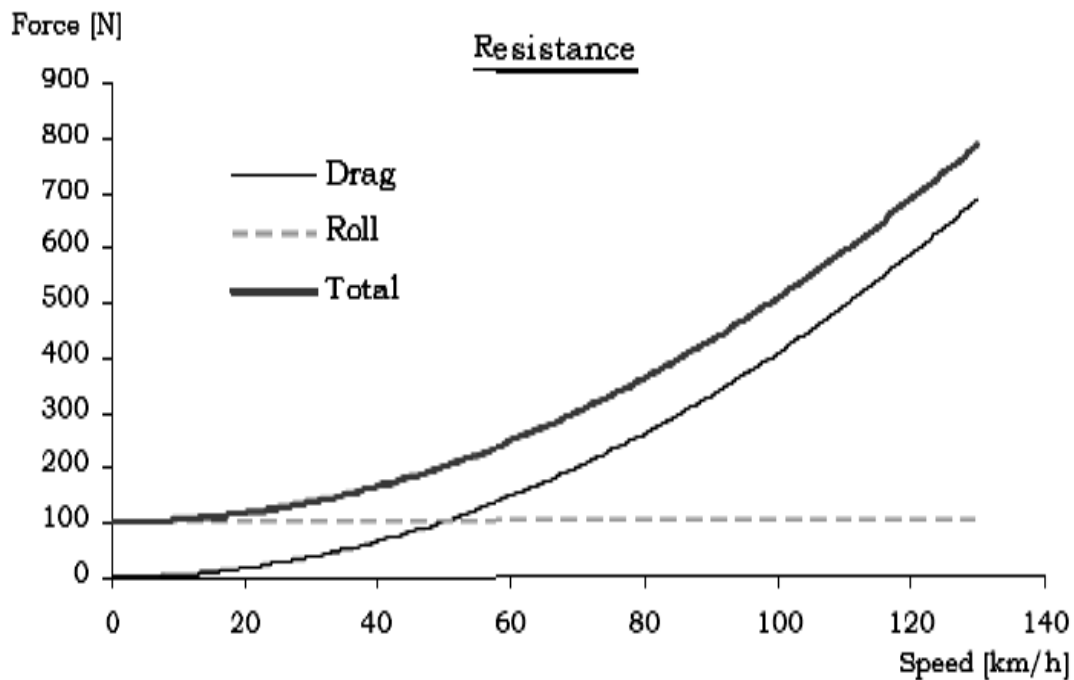


ภาพที่ 2.4 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ (Daugherty, 1989)

2.1.4 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์

วินัย ศรีอำพร (2541) การไหลของอากาศรอบ ๆ รถยนต์ โดยอากาศครอบคลุมอยู่ผิวนอกของรถยนต์ เรียกรวมกันว่า การไหลภายนอก (External flow) ซึ่งการศึกษาการไหลภายนอกมีส่วนสำคัญมากต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการของอากาศพลศาสตร์มาวิเคราะห์ ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ต่าง ๆ จะต้องพิจารณาที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของรถยนต์ คือแรงยกและแรงหน่วง (Lift and Drag) ทั้งสองแรงมีความสำคัญมากต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และความเหมาะสมเพื่อให้มีคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ที่ดี

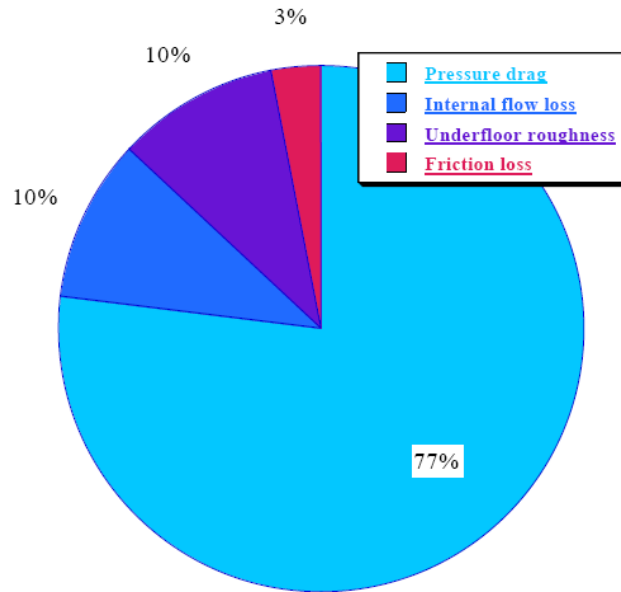
ซึ่งรถยนต์ที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน จากแรงที่กระทำทั้งแรงยกและแรงหน่วง หากจะพิจารณาโดยรวมกันคือแรงต้านอากาศ Alexander (2002) กล่าวว่า รถยนต์ทุกชนิดที่วิ่งบนถนนนั้นจะมีแรงต้านที่มีทิศทางสวนทางกับทิศทางการวิ่ง คือแรงเสียดทานที่เกิดจากยางสัมผัสกับถนนในขณะที่ล้อหมุนเพื่อวิ่งไปข้างหน้า และอีกอย่างหนึ่งคือแรงต้านอากาศ ซึ่งถ้ารถวิ่งแหวกอากาศออกไปที่มีความเร็วต่ำ แรงต้านอากาศจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงต้านการหมุน ถ้ารถวิ่งด้วยความเร็วสูงแรงต้านอากาศจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง ซึ่งแรงต้านอากาศจะเพิ่มขึ้นถึง 80 % ของแรงต้านทั้งหมด ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ (Alexander, 2002)

จากภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อ จะคงที่ตลอดความเร็วที่รถยนต์วิ่ง และแรงต้านอากาศมีผลกระทบกับการเคลื่อนที่ มากกว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งแรงต้านอากาศจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของรถยนต์

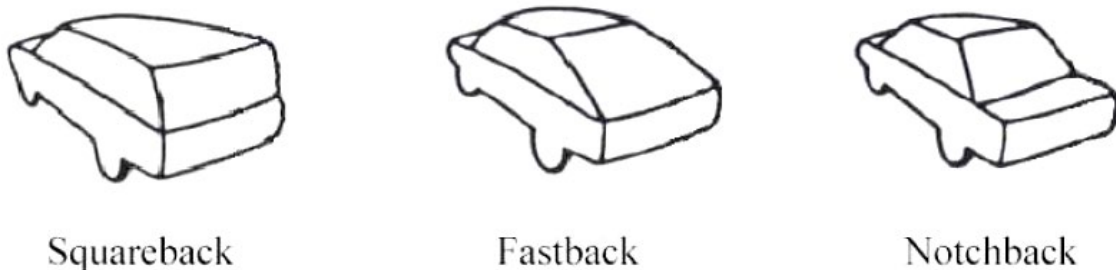
ดังนั้นในการศึกษา จึงมุ่งเน้นเฉพาะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์ ซึ่งลักษณะของแรงต้านที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่ง Hocho (2006) พบว่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือแรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag), แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss), แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นรถยนต์กับพื้นถนน (Underfloor roughness), และแรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศกับผิวภายนอกรถยนต์ (Friction loss) โดยแต่ละลักษณะแรงต้านที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาก็จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน จะมีค่ามากหรือน้อย ก็จะขึ้นว่าสัณฐานของรูปทรงเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดลักษณะของแรงต้านนั้น ๆ มากหรือน้อย ภาพที่ 2.6 เป็นสัดส่วนของแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์แบบนั่ง ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่ในช่วง 0.25 – 0.40



ภาพที่ 2.6 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ (Hocho, 2006)

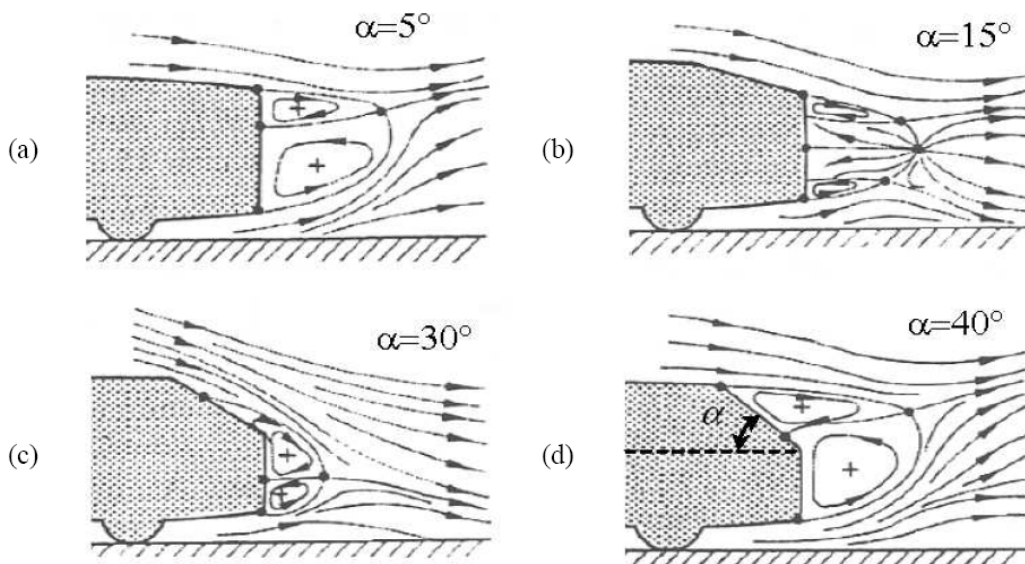
(1) แรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag)

เป็นแรงต้านอากาศที่มีค่ามากที่สุด เกิดจากการที่อากาศปะทะพื้นที่ของรถยนต์ ที่มีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะส่งผลทำให้เกิดการปั่นป่วนของอากาศเมื่อไหลผ่านรถยนต์ ทำให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถยนต์ ซึ่งค่าแรงต้านอากาศจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถยนต์ โดยเฉพาะส่วนท้ายของรถยนต์ จะเกิดการหมุนวนของอากาศมาก โดย Ahmed and Baumert (1979) ได้แบ่งลักษณะของรูปทรงท้ายของรถยนต์นั้น เป็น 3 ลักษณะคือ ทรงท้ายสี่เหลี่ยม (Squareback), ทรงท้ายเฉียง (Fastback) และทรงท้ายบาก (Notchback) ดังภาพที่ 2.7



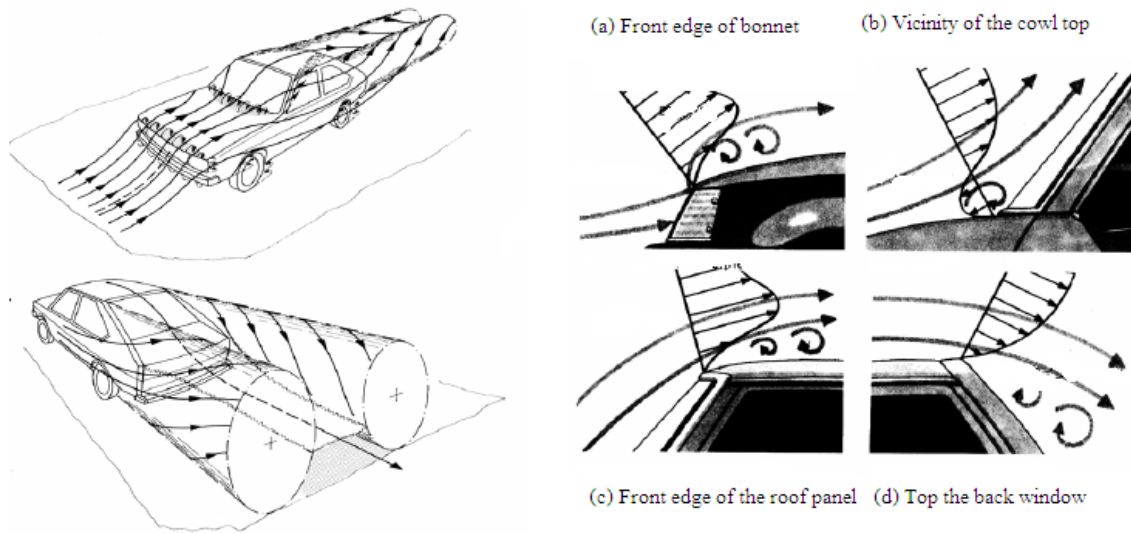
ภาพที่ 2.7 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆ ของรถยนต์นั่ง (Ahmed and Baumert, 1979)

ซึ่งรูปทรงท้ายแต่ละรูปทรงก็จะส่งผลทำให้เกิดลักษณะการหมุนวนของอากาศที่แตกต่างกัน โดย Ahmed (1983) ได้ศึกษาความแตกต่างของการหมุนวนของอากาศของรูปทรงท้ายของรถยนต์ โดยค่ามุมเอียงของรูปทรงท้าย มีค่าแตกต่างกันคือ $\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ และ $\alpha = 40^\circ$ พบว่าค่ามุมรูปทรงท้ายที่ $\alpha = 30^\circ$ จะทำให้เกิดการหมุนวนเป็นวงหรือเวค (Wake) ที่มีขนาดเล็กมากที่สุด ซึ่งมีลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ที่ดี ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน (Ahmed, 1979)

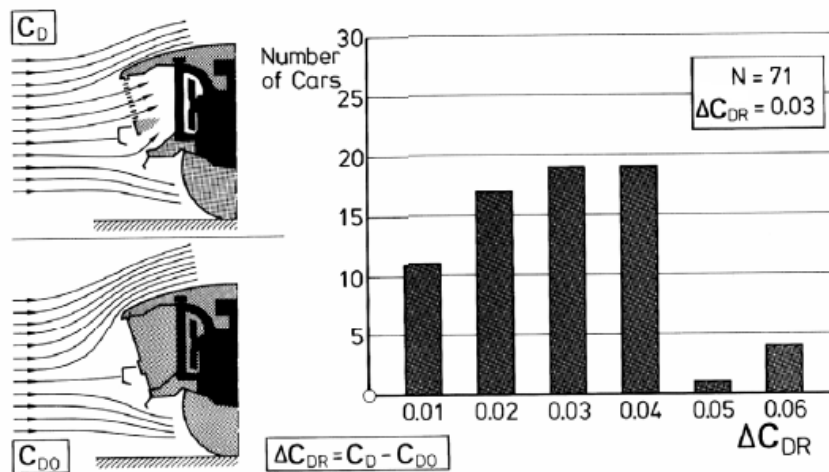
ไม่เฉพาะส่วนท้ายของรถเท่านั้นที่ทำให้เกิดเวค แต่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับมุมที่มาก ๆ ก็จะทำให้เกิดเวคเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศอย่างฉับพลัน ซึ่ง Scibor (1984) พบว่าการเกิดการหมุนวนของอากาศที่ทำให้เกิดเวค นอกจากส่วนท้ายรถแล้วยังมีส่วนหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดเวค คือ บริเวณส่วนหน้าของฝาครอบเครื่องยนต์ (Front edge of bonnet), ส่วนบนของตัวถังรถใต้กระจกหน้า (Vicinity of the cowl top), ด้านหน้าส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Front edge of the roof panel) และด้านหลังส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Top the back window) ซึ่งการเกิดเวคจากส่วนต่าง ๆ นี้ จะเกิดการรวมตัวกันและทำให้เวคขนาดใหญ่บริเวณด้านหลังรถ และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะห่างออกไปในขณะที่รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค (Scibor, 1984)

(2) แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss)

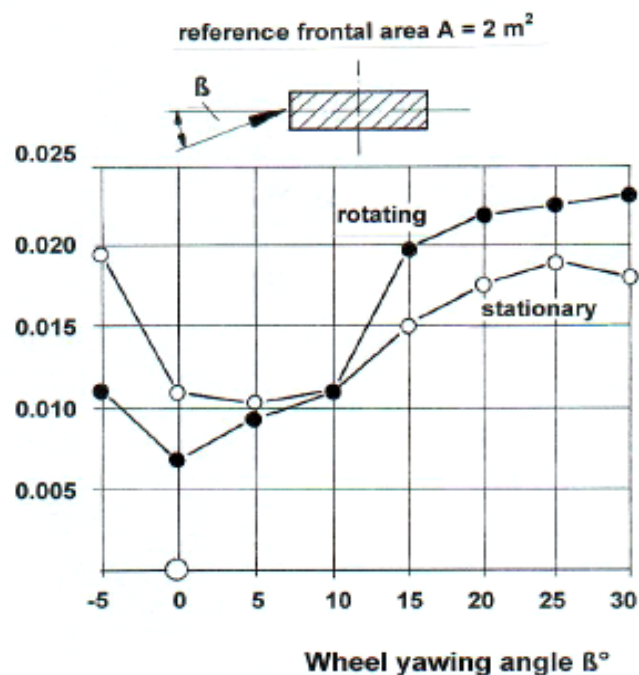
เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านเข้าภายในตัวรถเพื่อระบายความร้อนให้กับระบบทำความเย็นในระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ เช่นระบบหม้อน้ำ ระบบเบรก เทโบริกเจอร์ ระบบไอดี เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนภายในทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่ง Hucho (2006) ได้พบว่ารถยนต์โดยส่วนใหญ่ที่มีระบบให้อากาศไหลเข้าไปภายในรถยนต์เพื่อระบายความร้อน เพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ (C_D) จากเดิมประมาณ 0.03



ภาพที่ 2.10 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน (Hucho, 2006)

(3) แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นรถยนต์กับถนน (Underfloor roughness)

ซึ่งพลังงานจลน์จากย่านภายนอก (Outer region) Boundary layer ส่อง่ายเข้าสู่ย่านภายใน (Inner region) ทำให้เกิด โมเมนตัมบริเวณระหว่างพื้นรถกับพื้นถนน เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียและความดันท้ายรถต่ำลง อีกอย่างหนึ่งก็คือ มีการหมุนวนของอากาศจากล้อที่หมุน โดย Hucho (2006) พบว่า การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถ ระหว่างให้ล้อรถหมุน กับไม่หมุน ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีความแตกต่างกัน และการเอียงของล้อที่ไม่ขนานกับถนนก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.11 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Hucho, 2006)

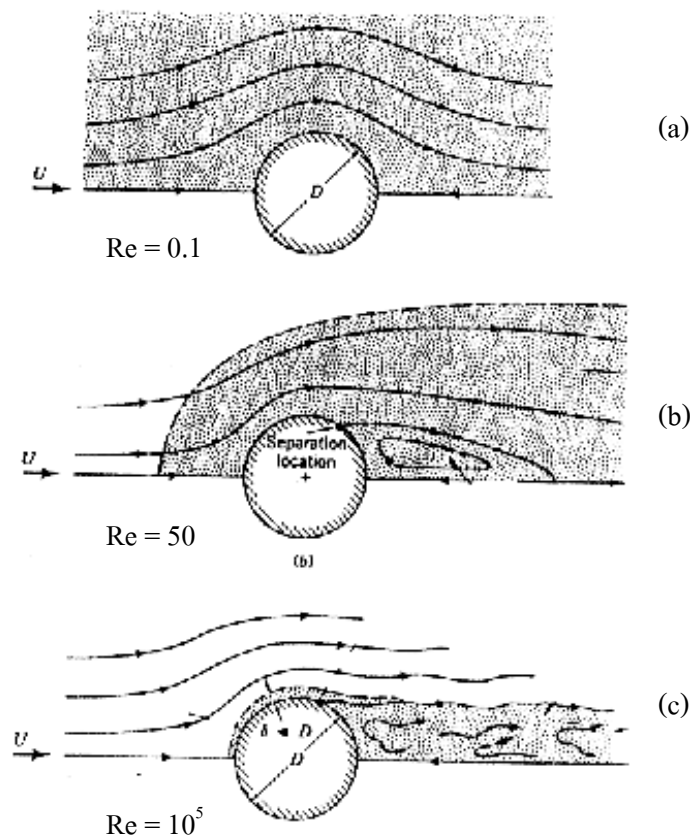
(4) แรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศ (Friction loss)

แรงต้านดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของรถ (Wall shear stress) เกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล ซึ่งแรงนี้จะมีทิศทางขนานกับผิวรถยนต์ ซึ่งจากภาพที่ 2.6 จะเห็นว่า ลักษณะของแรงนี้จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากอากาศมีค่าความหนืดต่ำ และอิทธิพลแรงต้านจากค่าความหนืดนี้จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้น

2.1.5 Reynolds number

การทดสอบแบบจำลองในสภาวะการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (None compressible flow) ลักษณะการไหลจะขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number เนื่องจาก คือสัดส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า $Re = \rho l / \mu$ โดยที่ l คือความยาวของวัตถุที่มีผลต่อสภาพการไหล ซึ่งโดยทั่วไปการไหลภายนอกส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับวัตถุที่มีขนาดอยู่ในช่วงพิสัย $0.01 \text{ m} < l < 10 \text{ m}$ ภายใต้ความเร็วอยู่ในช่วง $0.01 \text{ m/s} < v < 100 \text{ m/s}$ ส่วนใหญ่คือน้ำและอากาศ จึงทำให้ค่า Reynolds number อยู่ในช่วงประมาณ $10 < Re < 10^9$ ซึ่งจากสภาพความเป็นจริงคือ ในกรณีที่ค่า $Re > 100$ สภาพการไหลจะมีผลโดยตรงมาจากความเฉื่อยเป็นหลัก แต่ถ้า $Re < 1$ สภาพการไหลจะมีผลโดยตรงมาจากความหนืด ดังนั้นสรุปได้ว่าการไหลภายนอกที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ จะมีผลมาจากความเฉื่อย

กรณีที่การไหลผ่านวัตถุที่มีความหนา เช่นทรงกระบอกที่ขวางทิศทางการไหลที่มีค่า Reynolds number ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.12

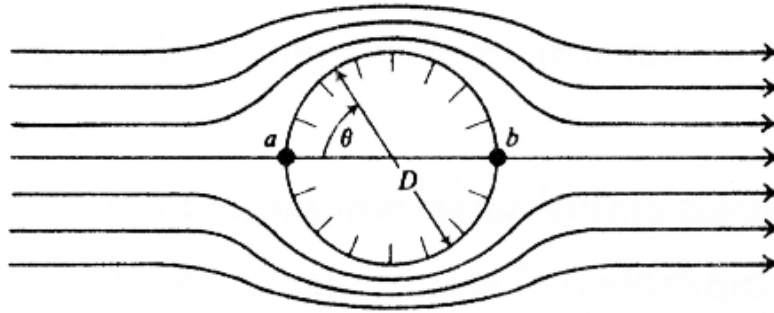


ภาพที่ 2.12 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่ขวางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน (Munson, 2002)

หากค่า Re ต่ำจะมีผลของความหนืดสูงโดยมีความหนาของชั้นขอบเขตมาก ดังแสดงดังภาพที่ 2.12 (a) ซึ่งจะมีค่า $R < 0.1$ เส้นการไหลจะมีความสมมาตรระหว่างทางด้านหน้ากับด้านหลังและทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอก เมื่อค่า Re สูงขึ้นจะมีความหนาของชั้นขอบเขตแคบลง และผลของความหนืดจะเกิดขึ้นในบริเวณทางด้านหน้าของทรงกระบอก เป็นระยะทางสั้น ๆ โดยยังคงความสมมาตรระหว่างชั้นขอบเขตทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอกไว้เช่นเดิม ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (b) คุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะเกิดการแยกตัว (Separation) ขึ้นทางด้านหลังของทรงกระบอก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีค่า Re เพิ่มขึ้น สภาพการไหลจะได้รับอิทธิพลจากความเฉื่อยเพิ่มขึ้น และผลของความเฉื่อยจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวของวัตถุซึ่งจะเป็นจุดแยกตัว เนื่องจากของไหลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามผิวโค้งทางด้านหลังของวัตถุ ผลของฟองอากาศที่เกิดจากการแยกตัว (Separation bubble) ทางด้านท้ายของวัตถุซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางด้านเหนือของไหล จึงมีความต้านทานต่อการไหล เมื่อค่า Reynolds number สูงมากขึ้นไปอีก เช่น มีค่าเท่ากับ 10^5 ดังแสดงในภาพที่ 2.12 (c) บริเวณที่ได้รับความหนืดจะค่อนข้างแคบทางด้านหลังของวัตถุ และมีความหนาของชั้นขอบเขตที่ค่อนข้างบาง (เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก) เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุ ในขณะที่ทางด้านหลังจะเกิดการแยกตัวและจะมีผลของบริเวณที่เกิดคลื่นวนต่อสภาพการไหลทางด้านท้ายของวัตถุ ซึ่งจะทำให้การแยกตัวนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

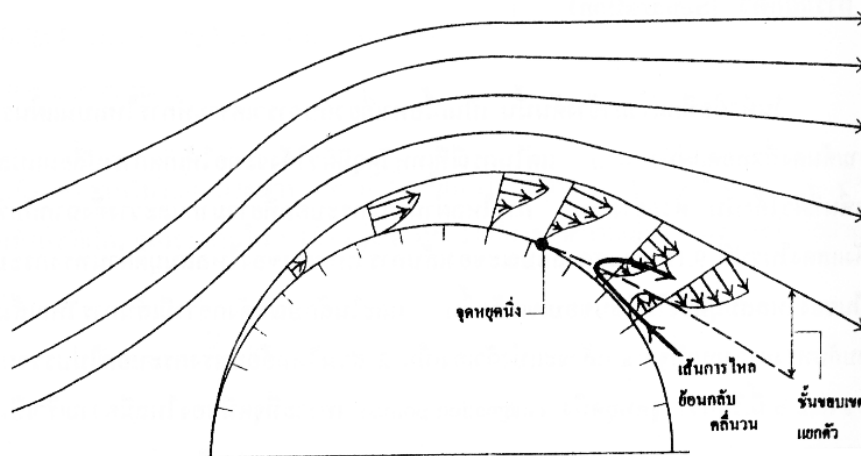
2.1.6 การแยกตัว (Separation)

ในกรณีที่วัตถุผิวโค้งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดผิวโค้งนั้น ดังการไหลผ่านทรงกระบอกที่ยาวมากและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลแสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งแสดงลักษณะของการไหลของของไหลสมมุติผ่านทรงกระบอก เนื่องจากเป็นของไหลสมมุติจึงไม่มีของเขตเกิดขึ้น และในลักษณะดังกล่าวมีเส้นการไหลเส้นหนึ่งๆ ที่เข้ากระทบทรงกระบอกที่จุด a แล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วนไหลอ้อมทรงกระบอกไปบรรจบกันที่จุด b ซึ่งเรียกจุด a และ b นี้เรียกว่า จุดหยุดนิ่ง (Stagnation points) เพราะที่จุดนี้ของไหลมีความเร็วเป็นศูนย์ พบว่าการกระจายความดันทางด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกัน โดยที่ความดันมีค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าแล้วค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมุม $\theta = 90^\circ$ หลังจากนั้นก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหลังของทรงกระบอก



ภาพที่ 2.13 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน และสำหรับของไหลสมมุติ

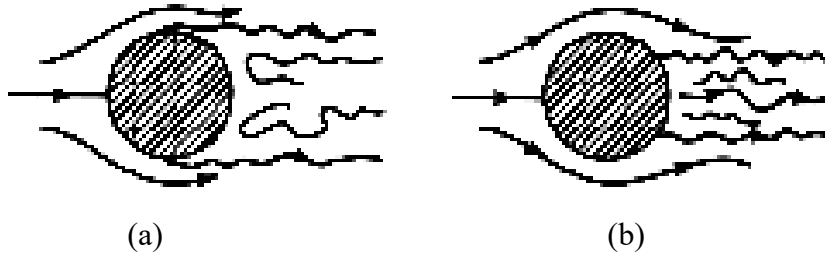
ภาพที่ 2.14 จะเกิดขึ้นขอบเขต ซึ่งแสดงลักษณะของเส้นการไหลผ่านทรงกระบอกเฉพาะครึ่งบนเท่านั้น ส่วนครึ่งล่างก็มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อพิจารณาเส้นการไหลในส่วนด้านหน้าของทรงกระบอก จะพบว่าชั้นขอบเขตเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าและมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางของผิวทรงกระบอก เนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่งมีค่าสูงสุดจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงในทิศทางของการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดันเช่นนี้เมื่อนำสมการของเบอร์นูลลีมาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าการไหลภายนอกชั้นขอบเขตมีความเร็วกว่าการไหลภายในชั้นขอบเขต ทั้งนี้เพราะของไหลที่อยู่ภายในชั้นขอบเขตได้รับอิทธิพลมาจากความหนืด เกิดแรงเสียดทานการไหลจึงไหลช้ากว่าเดิม ชั้นขอบเขตในช่วงครึ่งด้านหน้าของทรงกระบอกเป็นเพียงบาง ๆ และเส้นการไหลไม่แตกต่างจากในกรณีของไหลสมมุติมากนัก



ภาพที่ 2.14 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก

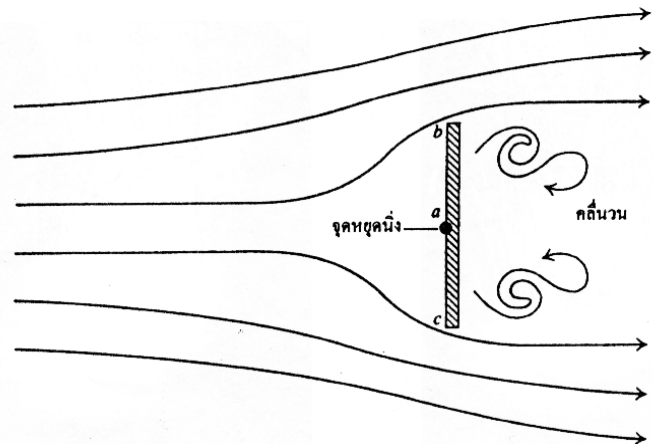
การแยกตัวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ประเภทของชั้นขอบเขตว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เนื่องจากชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนมีโมเมนตัมมากกว่าจึงสามารถต้าน

ความดันได้ต่ำกว่า ดังนั้นจึงทำให้จุดแยกตัวเกิดในตำแหน่งที่ค่อนข้างไปทางด้านท้ายมากกว่ากรณีที่เกิดในชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 2.15



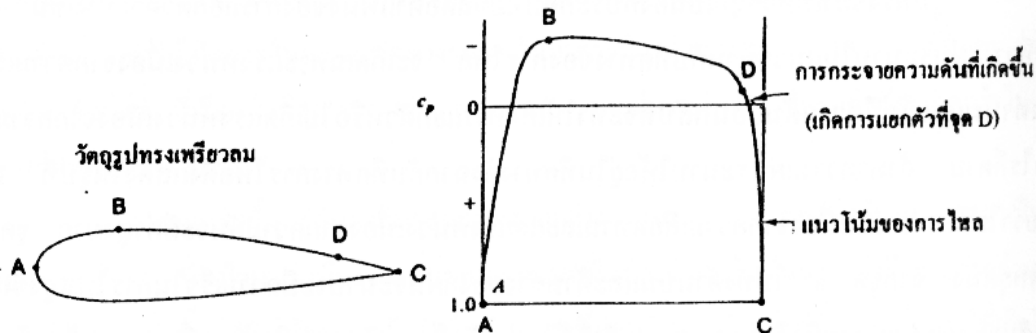
ภาพที่ 2.15 จุดแยกตัวจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ (b) ทรงกลมผิวขรุขระ องค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อการแยกตัวคือความขรุขระของผิววัตถุ เนื่องจากของไหลไหลผ่านวัตถุที่มีผิวขรุขระจะก่อให้เกิดชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนได้มากกว่าวัตถุผิวเรียบ ดังนั้นวัตถุที่มีผิวที่ขรุขระกว่าจะทำให้ตำแหน่งของการแยกตัวอยู่ค่อนข้างไปทางด้านท้ายมากกว่าวัตถุที่มีผิวเรียบ

รูปทรงของวัตถุเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อตำแหน่งการแยกตัว ตัวอย่างเช่น ในกรณีวางแผ่นระนาบในแนวขนานกับทิศทางการไหล จะเกิดเฉพาะแรงหน่วงเนื่องจากความเสียดทานเท่านั้น และไม่มีความดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการแยกตัวหรือไม่เกิดแรงต้านเนื่องจากความดัน อย่างไรก็ตาม ถ้าหากวางแผ่นระนาบให้อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังแสดงในภาพที่ 2.16 จะพบว่าไม่มีแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่แรงหน่วงเนื่องจากความดันจะมีค่าสูงมาก จุด a คือจุดหยุดนิ่ง จากจุด a ไปทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นระนาบจะมีความเร็วในการไหลสูงขึ้นแต่ความดันจะลดลง จนกระทั่งถึงจุด b และ c ทำให้มีความดันย้อนกลับและเกิดเขตทางด้านหลังของแผ่นระนาบ



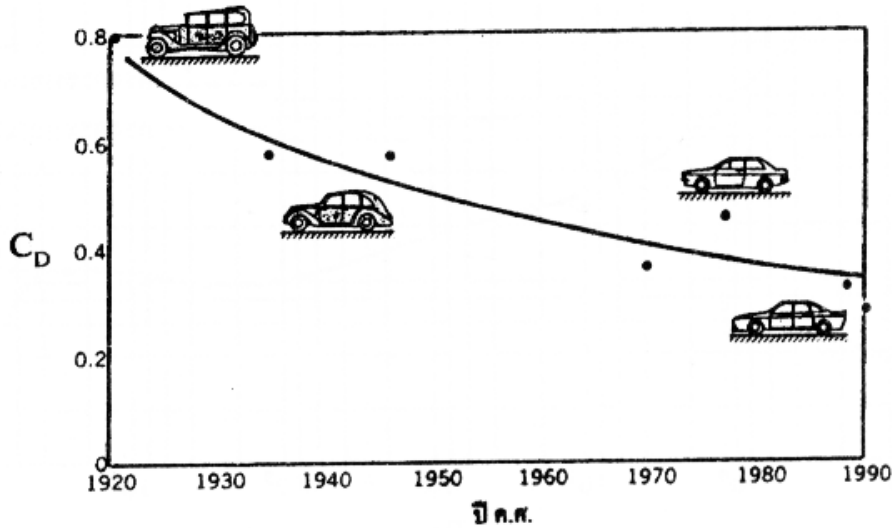
ภาพที่ 2.16 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ในทางปฏิบัติสามารถทำให้แรงหน่วงเนื่องจากความดันลดลงได้โดยทำให้จุดแยกตัวไปเกิดที่ส่วนท้ายของวัตถุให้มากที่สุด ด้วยการทำให้วัตถุมีรูปทรงเพรีวอลม เช่น ปีกเครื่องบิน (Airfoil) ดังแสดงในภาพที่ 2.17 โดยมีแผนภาพการกระจายของความดัน จุดหยุดนิ่งคือจุด A กับจุด C และความดันจะมีค่าต่ำสุดที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนามากที่สุด จากนั้นความหนาของวัตถุจะค่อย ๆ ลดลงจาก B มาจนถึงปลายสุดที่จุด C จึงไม่มีความดันย้อนกลับ ดังนั้นจุดแยกตัวจะไปเกิดที่ปลายสุดทำให้เกิดแรงต้านเนื่องจากความดันน้อย



ภาพที่ 2.17 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน

ดังนั้นการพยายามที่จะลดขนาดของแรงต้านที่กระทำต่อรถยนต์ได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่อง โดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงรูปทรงของรถให้มีลักษณะเพรีวอลม ดังตัวอย่างแสดงภาพที่ 2.18 ซึ่งจากรูปจะพบว่ารูปทรงของรถได้รับการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ ตลอดจนลักษณะของหน้าต่าง หรือแม้แต่กระจกมองด้านข้าง นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ในแนวทาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ผลจากการลดแรงหน่วงจะช่วยให้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง



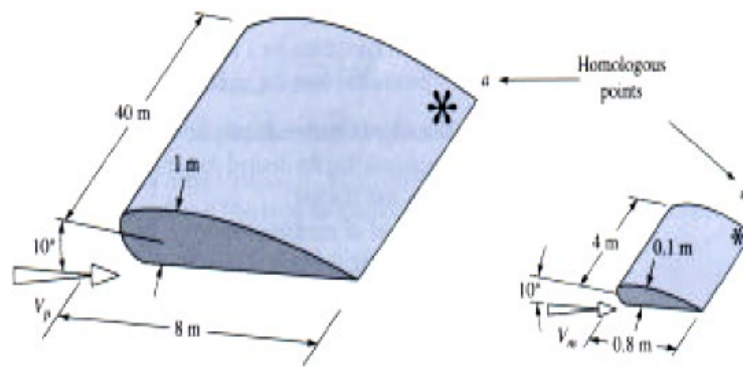
ภาพที่ 2.18 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อนได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง (Munson, 2002)

2.1.6 ความคล้ายคลึงกัน

ในการศึกษาและทดสอบหุ่นจำลอง (Physical model) เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้กับต้นแบบ (Prototype) หรือของจริงภายหลัง จำเป็นต้องสร้างหุ่นจำลองให้มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับต้นแบบมากที่สุด จึงจะให้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ กฎของความคล้ายคลึงกันมี 2 ประการ ประการแรกคือ ความสะดวกในการเลือกใช้ของไหลกับแบบจำลอง ประการที่สองช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ เพราะสามารถย่อขนาดจากของจริงลงมาเป็นหุ่นจำลองซึ่งมีขนาดเล็กลง ความคล้ายคลึงกันของหุ่นจำลองกับต้นแบบ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

(1) ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

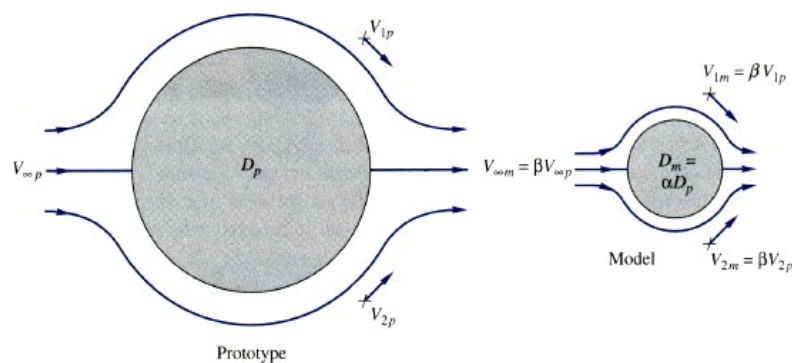
ในการศึกษาหุ่นจำลองสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ หุ่นจำลองจะต้องมีรูปร่างเหมือนกับต้นแบบ จะแตกต่างกันเฉพาะขนาดเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้รูปแบบของการไหล (Flow patterns) ในหุ่นจำลองและต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ 2.19 ถ้าให้ L_p และ L_m เป็นความยาวของด้านใด ๆ ที่ต้องพิจารณาของต้นแบบและหุ่นจำลองตามลำดับ และ L_r เป็นสัดส่วนความยาว (Length ratio) โดยที่ $L_r = L_p / L_m$ (สัดส่วนความยาวของต้นแบบกับหุ่นจำลอง) พื้นที่จะแปรผันตาม L_r^2 และปริมาตรจะแปรผันตาม L_r^3



ภาพที่ 2.19 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต

(2) ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์ (Kinematic similarity)

ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์จะเกิดขึ้นเมื่อสัดส่วนของความเร็วที่จุดเดียวกันในหุ่นจำลองและต้นแบบจะต้องมีค่าเท่ากันตลอดสนามการไหล ถ้าให้ p แทนต้นแบบและ m แทนหุ่นจำลอง จะพบว่าสัดส่วนความเร็ว v_r คือ v_p / v_m



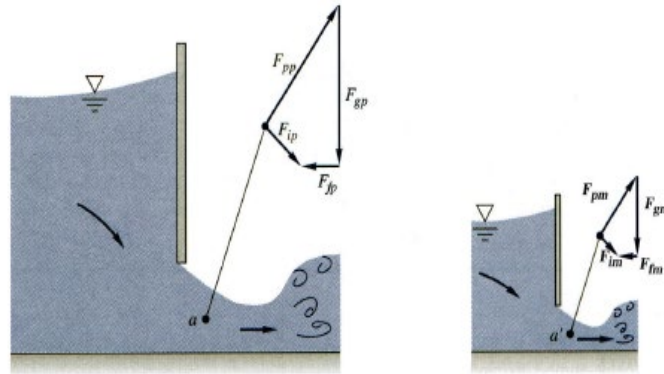
ภาพที่ 2.20 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์

(3) ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

หุ่นจำลองจะต้องมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัตกับต้นแบบก็ต่อเมื่อสัดส่วนของแรงต่าง ๆ ที่กระทำนั้นเท่ากัน ซึ่งแรงที่กระทำเหล่านี้ประกอบด้วยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (F_G) แรงเนื่องจากความดัน (F_p) แรงเนื่องจากความหนืด (F_v) แรงเนื่องจากความยืดหยุ่น (F_T) ถ้าผลลัพธ์ของแรงต่าง ๆ ข้างต้นไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าวัตถุจะต้องมีความเร่งตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ทำให้วัตถุไม่อยู่ในสภาวะสมดุล แต่แรงลัพธ์นี้สามารถที่จะแปลงเป็นแรงที่กระทำกับ

วัตถุสมมูลได้ โดยเพิ่มแรงเฉื่อย (F_I) เข้าไปในระบบ โดยที่แรงเนื่องจากความเฉื่อยนี้มีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์แต่ทิศตรงกันข้าม นั่นคือ

$$F_G + F_p + F_v + F_T + F_I = 0 \quad (2.8)$$



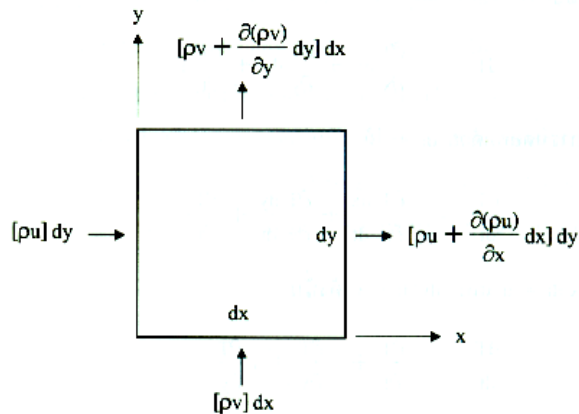
ภาพที่ 2.21 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต

2.2 สมการมูลฐานของการไหล

สมการมูลฐานของการไหล (Fundamental equations of fluid motion) ประกอบด้วยสมการหลักที่สำคัญ 3 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการสภาพต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการโมเมนตัม (Momentum equation) และสมการพลังงาน (Energy equation) ทั้ง 3 สมการนี้สามารถอธิบายด้านอากาศพลศาสตร์ รวมไปถึงการประยุกต์ การปรับปรุง การออกแบบวัตถุที่นำไปสู่การลดแรงต้าน

2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

พิจารณาเมื่อของไหลเดินทางผ่านกรอบเล็ก ๆ ขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.22 จากหลักความจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นปริมาณมวลที่ไหลเข้าและออกบริเวณควบคุมนี้จะเท่ากัน นั่นคือ



ภาพที่ 2.22 ฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์มวล

ในทิศแกน x;
$$\left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy - [\rho u] dy = \frac{\partial(\rho u)}{\partial(x)} dx dy \quad (2.9)$$

ในทิศแกน y;
$$\left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx - [\rho v] dx = \frac{\partial(\rho v)}{\partial(y)} dx dy \quad (2.10)$$

โดย u และ v เป็นความเร็วย่อยในแนวแกน x และ y ตามลำดับ ซึ่งความเร็วย่อยนี้มีค่าขึ้นอยู่กับพิกัด x, y นั่นคือ $u = u(x, y, t)$ และ $v = v(x, y, t)$ และเนื่องจากปริมาณมวลในกรอบเล็ก ๆ เป็น $\rho dx dy$ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ลดลงไป คือ $-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy$ หมายความว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลจะเท่ากับปริมาณที่ลดลงภายในกรอบเล็ก ๆ จะได้สมการ (2.12) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์มวล ซึ่งเป็นสมการอธิบายการไหลสมการแรก

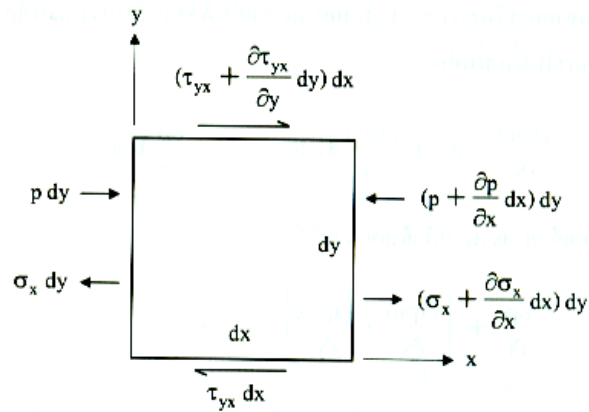
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (2.11)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.12)$$

2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็ก ๆ ขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 รูปแบบแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ เมื่อพิจารณาแรงรวมในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \left[-\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dx dy + \rho f_x dx dy \quad (2.13)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ $m = \rho(dx dy)$ และความเร่งตามแนวแกน x คือ

$a_x = \frac{Du}{Dt}$ แทนค่า m , a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการ (2.13) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (2.14a)$$

ในทำนองเดียวกันตามแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (2.14b)$$

จากสมการ (2.14a และ 2.14b) เป็นสมการอนุพันธ์สัมบูรณ์ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้ เช่นสมการ (2.12) จะได้

ในทิศแกน x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[u \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \quad (2.15a)$$

ในทิศแกน y

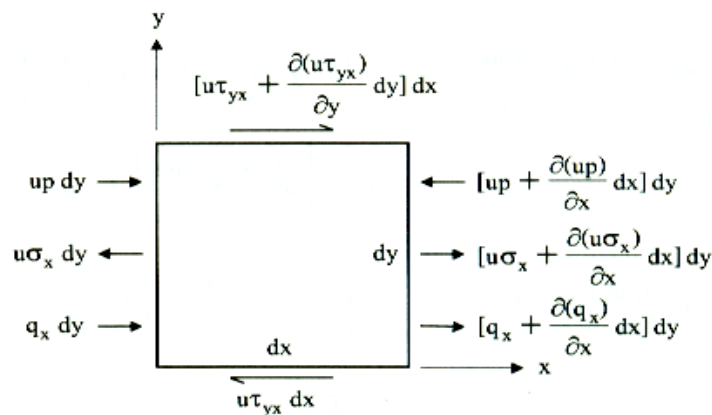
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[u \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \quad (2.15b)$$

สมการ (2.15a – 2.15b) นี้แสดงถึงสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนต์ของมวลของไหล

2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.24 จากหลักการการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิก จะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้เป็น

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (2.16)$$



ภาพที่ 2.24 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy

จากสมการ (2.16) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาเป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] + \text{div} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\ + \frac{\partial (u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (2.17)$$

เราเรียกกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (2.12, 2.15 และ 2.17) ว่าระบบสมการ navier-stokes equations เป็นระบบสมการตัวแทนการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจริง จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ การแก้สมการ Navier-stokes ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นเรื่องยาก แต่เราสามารถนำเอาวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) ช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ ซึ่งเป็นที่มาของ Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับปรากฏการณ์การไหลแบบต่าง ๆ ใน CFD โปรแกรม FLUENT (FLUENT User's Guide, 2001)

2.2.4 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานในการไหลแบบคงตัวของของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ สมการพลังงานมีพื้นฐานมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า สำหรับการไหลแบบคงตัว งานที่ได้รับจากระบบรวมกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือออกจากระบบ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบนั้น นั่นคือ

$$Work + Heat = \Delta Energy \quad (2.18)$$

โดยที่งาน (Work) ความร้อน (Heat) และพลังงาน (Energy) จะต้องอยู่ในหน่วยเดียวกัน จึงจะสามารถถ่ายเทระหว่างกันได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม

ซึ่งสมการพลังงานและสมการสภาพต่อเนื่องเป็นสมการที่มีความสำคัญมากในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ โดยเฉพาะด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งสมการเบอร์นูลลีที่สร้างขึ้นโดย Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1738 ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับของไหลที่ก่อดัดได้ ดังสมการ (2.19)

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (2.19)$$

โดยที่ h_L หมายถึงการสูญเสียเฮด (Head loss) แทนการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล ในบางกรณีที่มีการสูญเสีย h_L มีค่าเพียงเล็กน้อยก็อาจไม่ต้องนำมาพิจารณาได้ ซึ่งสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.20)$$

แต่ละเทอมในสมการมีมิติ (Dimension) เป็นความยาว ซึ่ง p/γ เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure head) แสดงถึงพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่มีอยู่ในของไหลเนื่องจากความดัน z เรียกว่า เฮดระดับ (Elevation head) คือพลังงานศักย์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล และ $v^2/2g$ เรียกว่า เฮดความเร็ว (Velocity head) คือพลังงานจลน์ต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล ผลรวมของทั้งสามเทอมเรียกว่าเฮดรวม

โดยได้นำหลักการของสมการเบอร์นูลลี มาใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ในการวัดความดัน และความเร็วของอากาศ โดยเฉพาะในการวัดค่าความดัน และความเร็วที่จะทำการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ เช่น บารอมิเตอร์ (Barometers) หลอดปีโตท (Pitot tube) เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดกับเครื่องมือนี้ในบทต่อไป

2.3 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ ด้วยอุโมงค์ลม โดยการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์

Van Dam (1999), Kwon (2001) และ Storms (2004) ได้นำเอาหลักการของการลดการแยกตัวของอากาศของวัตถุ มาใช้เพื่อปรับปรุงรูปทรงของรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ใช้รูปแบบจำลองในการทดสอบ แต่มักจะเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่วัดได้จากการทดสอบไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จริง เนื่องจากรายละเอียดรูปลักษณะจำลองไม่สามารถสร้างเหมือนจริงทุกรายละเอียด ต่อมาได้พัฒนามาใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ที่สามารถทดสอบรถยนต์จริงได้ โดยสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถูกต้อง และวิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน Leuschen and Cooper (2006) ก็ได้นำรถบรรทุกขนาดใหญ่ขนาดจริง ทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ศึกษาและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงต้นแบบเดิม ดังภาพที่ 2.25

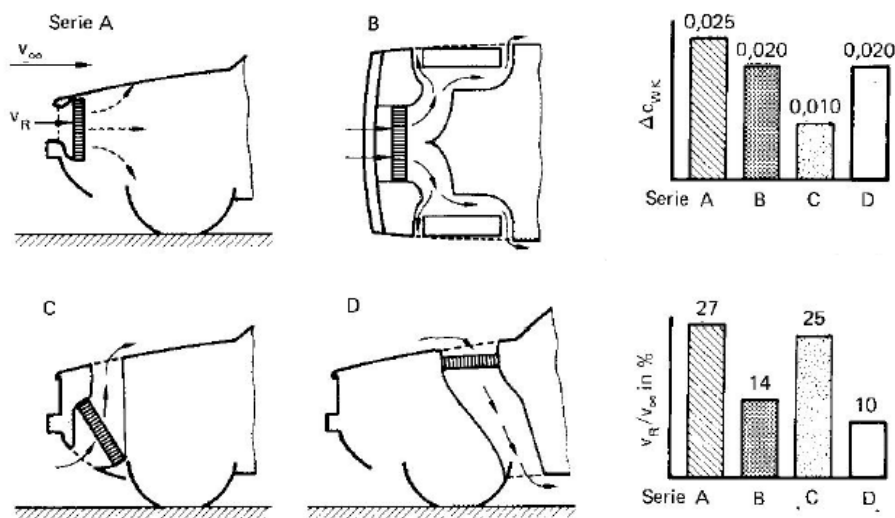


ภาพที่ 2.25 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ (Leuschen and Cooper, 2006)

พบว่า ไม่ใช่แค่รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่อุปกรณ์ตกแต่ง หรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ และยื่นออกจากตัวรถ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะดูดซับพลังงานส่วนเสดความดัน (Pressure head) และเสดความเร็ว (Velocity head) ของอากาศเมื่อปะทะกับรถ เช่น กันชนรถยนต์, อุปกรณ์บังแสงแดดด้านข้างกระจก, อุปกรณ์สำหรับวางของบนหลังคา เป็นต้น ซึ่งเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 4% ถึง 6% แต่ก็มีอุปกรณ์เสริมที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการลดการหมุนวนของอากาศ (Vortex or recirculation) เช่น ที่บังล้อ เป็นต้น ซึ่งลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) 5% ถึง 7% เป็นการลดอัตราการสูญเสียโดยการลดการหมุนวนของอากาศ ที่เกิดขึ้นภายนอกตัวรถยนต์ (External flow loss) แต่อุปกรณ์บางชิ้น เช่น สปอยเลอร์ เป็นอุปกรณ์เสริมที่มีส่วนทำให้แรงต้านสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อดีสำหรับเพิ่มแรงกดเพื่อยึดติดถนนสำหรับรถยนต์นั่ง แต่ก็ควรไม่ให้มีค่าสูงมากจนเกินไป โดย Tomiyama et al. (2002) ได้ศึกษาแรงยกเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของแรงยกกับรูปร่างรถ ใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือทดสอบ เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีของแรงยก ซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ แรงยกด้านหน้า และแรงยกด้านหลัง Nouzawa (2008) และได้ศึกษาพฤติกรรมของวอคซึ่งมีลักษณะไม่คงตัว (Unsteady) โดยในการศึกษาได้ใช้รถยนต์นั่งติดสปอยเลอร์ พบว่ารูปร่างด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด เรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical afterbody geometry) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อาทิตย์ ฤทธิเลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว (2546) และ Fukuda, et al. (1995) ได้ปรับปรุงอากาศพลศาสตร์โดยการควบคุมอากาศที่กระทบกับรถยนต์แบบนี้ ซึ่งจะเน้น

อุปกรณ์การควบคุมการไหลผ่านด้านหลังรถซึ่งเป็นที่รู้จักกันคือ สปอยเลอร์ ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของ สปอยเลอร์ ปรับเปลี่ยนมุมมอง ขนาด และตำแหน่งของการติดตั้ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะเพิ่มแรงกด และลดแรงต้าน ในการวิเคราะห์พบว่า เมื่อรูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดรูปแบบการไหลในเวทอย่างฉับพลัน และมีเวทขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงต้านสูง และระยะระหว่างพื้นรถและพื้นถนนก็ยังมีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยเช่นกัน

แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (Internal flow loss) โดยอากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (Gab) ทำให้เกิดการหมุนวนภายใน โดยเฉพาะอากาศที่ไหลเข้าภายในเพื่อระบายความร้อน โดย Hucho (2006) ได้เปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างการออกแบบช่องระบายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ใช้รถยนต์แบบนั่งทดสอบ ผลปรากฏว่า การออกแบบที่ให้อากาศไหลเข้าด้านล่างเพื่อระบายความร้อนของเครื่องยนต์ จะเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน (Hucho, 2006)

เช่นเดียวกันกับ ช่วงห่างระหว่างห้องผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระเบของรถบรรทุก ซึ่งจะเกิดเวทขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดช่องว่าง หรืออุปกรณ์เพื่อช่วยลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมีข้อจำกัดของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความละเอียด เช่นการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการปรับมุมของสปอยเลอร์ของรถยนต์แบบนั่ง ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากค่าไม่มีความละเอียด

พอ และยังมีข้อจำกัดของสภาวะของการทดสอบ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สามารถกำหนดสภาวะ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ

2.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD (Computational Fluid Dynamics) หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาผลเฉลยเชิงตัวเลข และจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในปัญหาที่สนใจ ซึ่ง CFD มีระเบียบขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

1) ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างลักษณะและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา รวมทั้งการแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ

2) ขั้นตอนการคำนวณ ทำการแก้ปัญหากจากขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา ทั้งนี้ระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีได้แก่ 1) วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) 2) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) 3) วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3) ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processor) เป็นขั้นตอนแสดงผลเฉลยหรือแสดงการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของปัญหา อาจอยู่ในรูปของ ระดับแถบสี (Contour) กราฟ ตัวเลข หรือแสดงในลักษณะของเวกเตอร์

การวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้น จะเกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากสมการ อนุกรมมวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งได้กล่าวของรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา การคำนวณหรือแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้มีหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume) กับ โปรแกรม FLUENT 6.3 แก้ปัญหาและการวิเคราะห์กับอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก

2.4.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method)

เทคนิคการคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่แล้วมักใช้ระเบียบวิธีสืบเนื่อง สร้างโปรแกรมคำนวณแก้ปัญหาก เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมการไหลในของไหลโดยเฉพาะ ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะทำอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่กำหนด

2.4.2 ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ประกอบด้วยการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสามสมการและสมการอื่น เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) และสมการสเกลาร์อื่น ๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่าง มีผลต่อการเข้าสู่ของคำตอบและค่าผลเฉลย โดยทั่วไประเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหายู่ 2 อย่างตามแต่ลักษณะของปัญหา ดังนี้

(1) ระเบียบขั้น Segregated solver เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุพันธ์โมเมนตัมก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาคสมการจะกระทำเป็นรอบและแก้ซ้ำ เนื่องจากสมการอนุพันธ์จะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหามาตามระเบียบขั้น Segregated solver แสดงดังภาพ 2.27 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

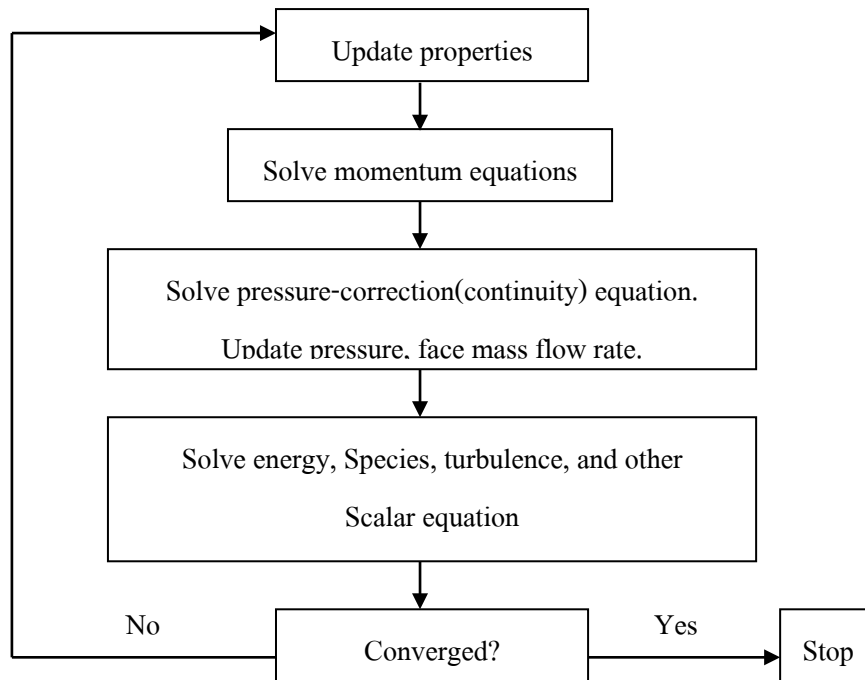
(1.1) สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

(1.2) คำนวณสมการอนุพันธ์โมเมนตัมทั้งสามสมการ เพื่อคำนวณค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล

(1.3) เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุพันธ์มวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure-correction equation) ประดิษฐ์จากสมการอนุพันธ์มวลกับโมเมนตัม โดยค่าความดัน อัตราการไหล และความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น

(1.4) ขั้นตอนนี้เป็นการแก้สมการอื่นที่เพิ่มเติมเข้ามา สำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่น โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 3

(1.5) การยอมรับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะถูกกำหนดขึ้น จากผลต่างของเศษเหลือในแต่ละรอบของการคำนวณ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องทำการคำนวณซ้ำ (กลับไปขั้นตอนที่ 1) จนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2.27 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Segregated solver

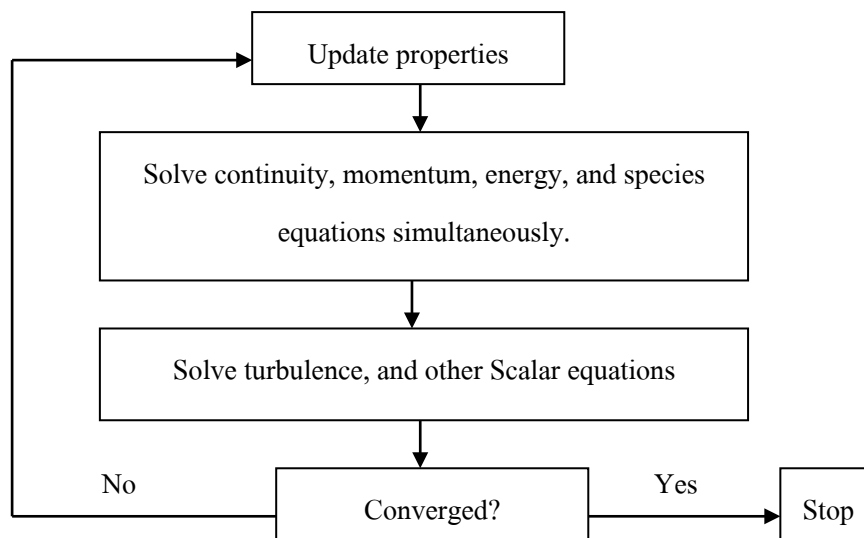
(2) ระเบียบขั้น **Coupled solver** เป็นระเบียบขั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่เอาสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (เมื่อกรณีของไหลมีหลายชนิด) แก้สมการพร้อมกันก่อนจะแก้สมการสเกลาร์อื่น ๆ การคำนวณสมการเหล่านี้ยังต้องทำเป็นรอบ เช่นเดียวกับระเบียบขั้นตอนแรก ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 2.28

(2.1) ระเบียบขั้นตอนแรก สมบัติของสารถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

(2.2) ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด)

(2.3) คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วน และ สมการสเกลาร์อื่น ๆ โดยค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

(2.4) ประเมินผลต่างเศษเหลือของรอบว่ายอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณกลับไปที่ยังขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2.28 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Coupled solver

2.4.3 ระเบียบวิธีคำนวณ

การคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นมี 2 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method) และระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ความแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองคือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างโนดหรืออิเลเมนต์ เพื่อทดแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ กล่าวคือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง ตัวรู้ค่าถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณแบบ Segregated solver เพราะการคำนวณแบบ Segregated solver จะคำนวณค่าตัวแปรเดียวของทุกอิเลเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณตัวแปรอื่น ๆ ทีละตัวแปร ทั้งนี้ ระเบียบขั้น Coupled solver สามารถเลือกใช้ทั้งสองระเบียบวิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

2.4.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคารไหลของบริเวณใกล้ผนัง

พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับผนังเป็นปัญหาและอุปสรรคสำคัญกับการจำลองการไหลเชิงตัวเลข เนื่องจาก ที่ผนังความเร็วของของไหลจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์เนื่องจากการหน่วงของความหนืดบริเวณนี้ มีผลกับการไหลมาก นอกจากนี้แล้วความเสียดทานที่ผนังยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนของของไหล ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำเป็นต้องมีวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหานี้

ในโปรแกรม FLUENT มีระเบียบวิธี 2 อย่างที่ใช้แก้ปัญหที่เกิดขึ้นของการไหลบริเวณผนัง อันได้แก่ Near wall function และ Near-wall model ทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่วิธีการคำนวณปัญหา โดย Near-wall model เป็นเทอมของฟังก์ชันในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อการแก้ปัญหบริเวณผนัง โดยทำอิเลเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เล็กและคำนวณแต่ละอิเลเมนต์ไปเรื่อย ๆ

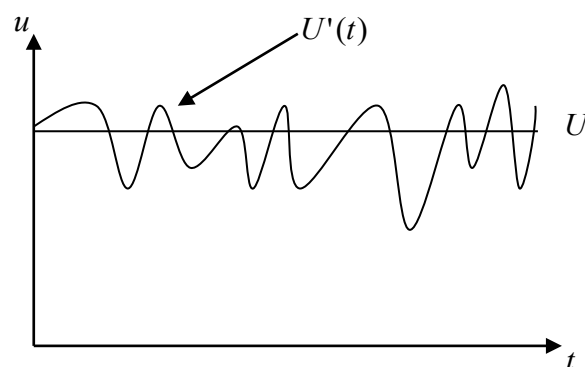
จนตีคผนัง ขณะที่ Near wall function ทำการสร้างฟังก์ชันแยกจากแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติการไหลต่าง ๆ ที่อิทธิพลติดกับผนัง ฟังก์ชันที่ว่ามีในโปรแกรม FLUENT มี 2 อย่าง ได้แก่ Standard near wall function และ Non-equilibrium near wall function ซึ่งข้อจำกัดของฟังก์ชันทั้งสอง คือ ค่าพารามิเตอร์การไหลที่ค่า Re ต่ำได้ไม่ดีนัก และมีข้อสมมุติฐานที่ไม่ครอบคลุมทุกปัญหา ด้วยเหตุนี้ จึงมีการประดิษฐ์แบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับปัญหาความปั่นป่วนในบริเวณค่า Re ต่ำ ซึ่งแบบจำลองที่ว่ามีคือ Enhanced near-wall model โดยใช้หลักการของการสร้างฟังก์ชันนำไปปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งทำให้การแก้ปัญหาการไหลที่เกิดใกล้ผนังมีประสิทธิภาพ และยังสามารถใช้งานได้ครอบคลุมปัญหามากขึ้น

2.4.5 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่า Reynolds's number สูง สภาวะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและให้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองเหล่านั้น จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหลและสมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds ก่อนอธิบายแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

(1) สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

ความเร็วและคุณสมบัติต่าง ๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 2.29 โดย $u(x, y, z, t)$ เป็นคุณสมบัติของของไหล เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง และเวลา



ภาพที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

เพื่อให้ง่ายขึ้นในการแก้ปัญหาระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ Osborne Reynolds กำหนดค่าเฉลี่ย \bar{u} จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} = \int_0^{\Delta t} u dt \quad (2.20)$$

ทั้งนี้ Δt เป็นช่วงเวลาเฉลี่ย ยังมีช่วงกว้างยิ่งได้ค่าที่ถูกต้อง โดยมากจะกำหนดให้ $\Delta t \rightarrow \infty$ โดยกำหนดคุณสมบัติของการไหลเป็น $u_i = \bar{u}_i = u_i$ ในรูปของเวกเตอร์เป็น $U = \bar{U} + U'$ และเมื่อนำสมการนี้ไปแทนในระบบสมการเวียร์สโตกส์จะได้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.21)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{u}) + \left[-\frac{\partial(\rho \bar{u}'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{u}'v')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}'w')}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (2.22a)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho \bar{u}'v')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}'^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{v}'w')}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (2.22b)$$

สมการข้างต้นนี้เราเรียกว่า สมการของ Reynolds หรือ Reynolds-Average Navier-Stokes equation (RANS) จะเห็นว่ารูปสมการนี้คล้ายกับสมการนาเวียร์สโตกส์เดิมแต่มีเทอมความเค้น (ในวงเล็บทางขวามือ) เพิ่มเข้ามา โดยสมการใน 3 มิติ จะมีทั้งหมดหกเทอมด้วยกันเราเรียกความเค้นเหล่านี้ว่า Reynolds stresses

จากการทดลองและศึกษาของ Boussineq ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเทอมความเค้นนี้ ที่มีกับความเร็วเฉลี่ยของการไหลกับอัตราการเปลี่ยนรูปอติเมตต์ของไหล ไว้ดังนี้

$$\text{Reynolds stresses, } -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial z_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.23)$$

โดย μ_t คือ Turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้ คือ แบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

(2) แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่ Turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy, k) และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ (Dissipation of turbulence kinetic energy, ε) โดยมีการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ k และ ε อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}.k \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad}.\varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.25)$$

โดยที่ G_k คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย, G_b คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว (buoyancy), Y_M คือค่าการกอดัดได้ ซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนในการไหล $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่, σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl number ของ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า turbulent viscosity, μ_t คือ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.26)$$

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

(3) แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ RNG $k - \varepsilon$

RNG $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประดิษฐ์จากสมการนาเวียส-โตกส์ที่ใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่า Renormalization Group (RNG) แบบจำลองนี้จะมีค่าคงที่แตกต่างจากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ และเพิ่มบางเทอมในสมการได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div}[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad}.k] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div}[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad}.\varepsilon] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.28)$$

ค่า G_k , G_b , Y_M มีความหมายเช่นเดียวกับสมการส่งถ่ายของแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ ขณะที่ σ_k และ σ_ε คือ Inverse effective Prandtl numbers สำหรับของ k และ ε ตามลำดับ แบบจำลองของค่า Turbulent viscosity ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับแบบจำลอง RNG $k - \varepsilon$ คือ

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} \quad (2.29)$$

โดย

$$\hat{v} = \mu_{eff} / \mu \text{ และ } C_v \approx 100$$

สมการ (2.29) จะใช้ได้ดีเมื่อการไหลนั้นมีค่า Reynolds number ต่ำ แต่ถ้าการไหลนั้นมีค่า Reynolds number สูงจะต้องใช้สมการ (2.27) แทนโดยกำหนดให้ค่า $C_\mu = 0.0845$ การคำนวณเพื่อหาค่า α_k และ α_ε นั้นใช้สมการ

$$\alpha_k \frac{|\alpha - 1.3929|^{0.6321}}{|\alpha_0 - 1.3929|} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \frac{|\alpha - 2.3929|^{0.3679}}{|\alpha_0 - 2.3929|} \quad (2.30)$$

ถ้าหากเป็นกรณีค่า Reynolds number สูง α_k และ $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ค่า R_ε ในสมการ (2.18) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\text{Re} = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.31)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการ (2.27) และ (2.28) เป็น $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$ และจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำหรือแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) หรือสมการการอนุรักษ์การไหลของของไหล ที่สามารถอธิบายสถานะของของไหลของการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและเวลา เป็นพื้นฐานในการคำนวณของไหลพลศาสตร์ CFD บวกแนวคิดของนักวิจัยอื่น ๆ ดังที่กล่าวมานั้น ผู้เขียนจะเน้นองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์

(Aerodynamics) เป็นหลัก เพื่อที่จะใช้ในการออกแบบเครื่องมือในการวิจัย เช่น อุโมงค์ลม (Wind tunnel) การปรับปรุงชิ้นส่วนต่าง ๆ และการใช้เครื่องมือในการวัด รวมไปถึงการใช้งานของโปรแกรมในการคำนวณของไหลพลศาสตร์ เพื่อจะใช้ในการศึกษา วิเคราะห์ กับสิ่งที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็ก เพื่อเป็นแนวคิดในการปรับปรุงรูปทรง ลักษณะการใช้งาน วิธีการใช้งานของรถบรรทุกเล็ก เพื่อลดแรงต้าน โดยขั้นตอนการวิจัยนั้น จะกล่าวในบทต่อไป

2.5 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

อัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันของรถยนต์ เป็นสิ่งที่ทุกคนสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากราคาที่สูงขึ้น และสถานะที่ไม่แน่นอนของน้ำมันเชื้อเพลิง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองให้แม่นยำ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ดังนั้น จึงมีนักวิจัยที่พยายามหาวิธีที่วัดเพื่อที่จะได้ทราบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน และสามารถตัดสินใจในการปรับปรุงรูปทรงหรือตัดสินใจขับที่รถเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง โดยนักวิจัยได้มีวิธีการวัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานวิจัยนั้น ว่าศึกษาเรื่องใดของรถยนต์ เช่น จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล (2548) ได้ศึกษาการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันของรถยนต์ขนาดต่าง ๆ คือรถยนต์นั่งขนาด 1800 cc, 2300 cc และรถบรรทุกเล็ก 300 cc วิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 – 120 km/hr การวัดน้ำมันทำโดยการออกแบบถังน้ำมันพิเศษ และทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนและหลังจากที่ได้ทำการวิ่ง น้ำมันที่ใช้คือ น้ำมัน ออกเทน 91, 95 และ ดีเซล ผลการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ทุกชนิดกินน้ำมันต่ำสุดที่ 60 km/hr การสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นเมื่อวิ่งที่ความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถบรรทุกเล็ก เนื่องจากการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ที่ไม่ดี โดยอัตราสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นมากที่ความเร็ว 100 และ 120 km/hr แต่ในกรณีดังกล่าว เป็นวิธีการวัด และเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง แต่ในลักษณะของการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ หรือการปรับปรุงรูปลักษณะของรถยนต์ ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงการสิ้นเปลืองน้ำมันค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำหลักการนี้มาวัด แต่มีนักวิจัยชื่อ Leuschen and Cooper (2006) ได้หาค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกใหญ่ ในกรณีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์บังล้อด้านหน้า และหลัง, อุปกรณ์กำเนิดการหมุนวนของอากาศ ตรงตำแหน่งต่าง ๆ (Vortex generator), อุปกรณ์กั้นแมลง (Bug deflector) เป็นต้น โดยการหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วที่ต้องการทราบ ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม มาแทนค่าจากความสัมพันธ์ของ

$$\Delta\mu(V_i) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_i^2 \overline{\Delta C_D}(V_i) A}{0.85} \quad (2.32)$$

$\Delta\mu(V_i)$ คือการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วหนึ่ง (liters/100 km)

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

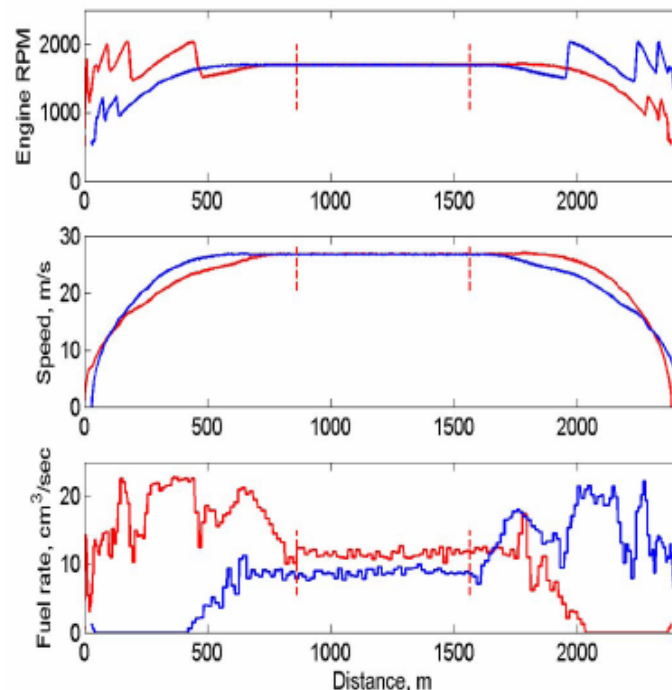
UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

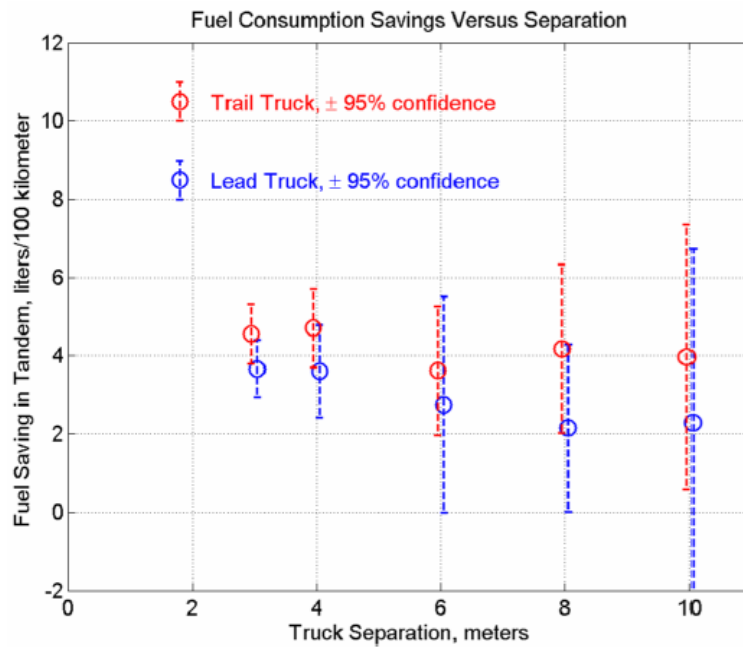
A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.68576 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h)

แต่ในความเป็นจริง ค่าที่แทนในสมการที่ (2.32) ย่อมไม่คงที่ เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการวิ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามระยะทางในการวิ่ง รวมถึงสภาวะต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยที่ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเครื่องยนต์ โดย Browand (2005) ได้ทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมัน ในกรณีรถบรรทุกใหญ่วิ่งตามกัน ซึ่งกำหนดเส้นทางตรงเป็นระยะทาง 3.5 km ระยะห่างระหว่างรถทั้ง 2 คัน 3 – 10 m โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า APTH คิดที่ตัวเครื่องยนต์ของรถทั้งสองคัน สามารถวัดค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine RPM) ความเร็วของรถที่ใช้ในการวิ่ง (Speed) และอัตราการกินน้ำมัน (Fuel rate) ตามระยะทางในการวิ่ง และคำนวณออกมาเป็นระดับที่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงทั้ง 2 คัน โดยค่าของรถคันหลังจะมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงจากรถคันหน้า ดังภาพที่ 2.30





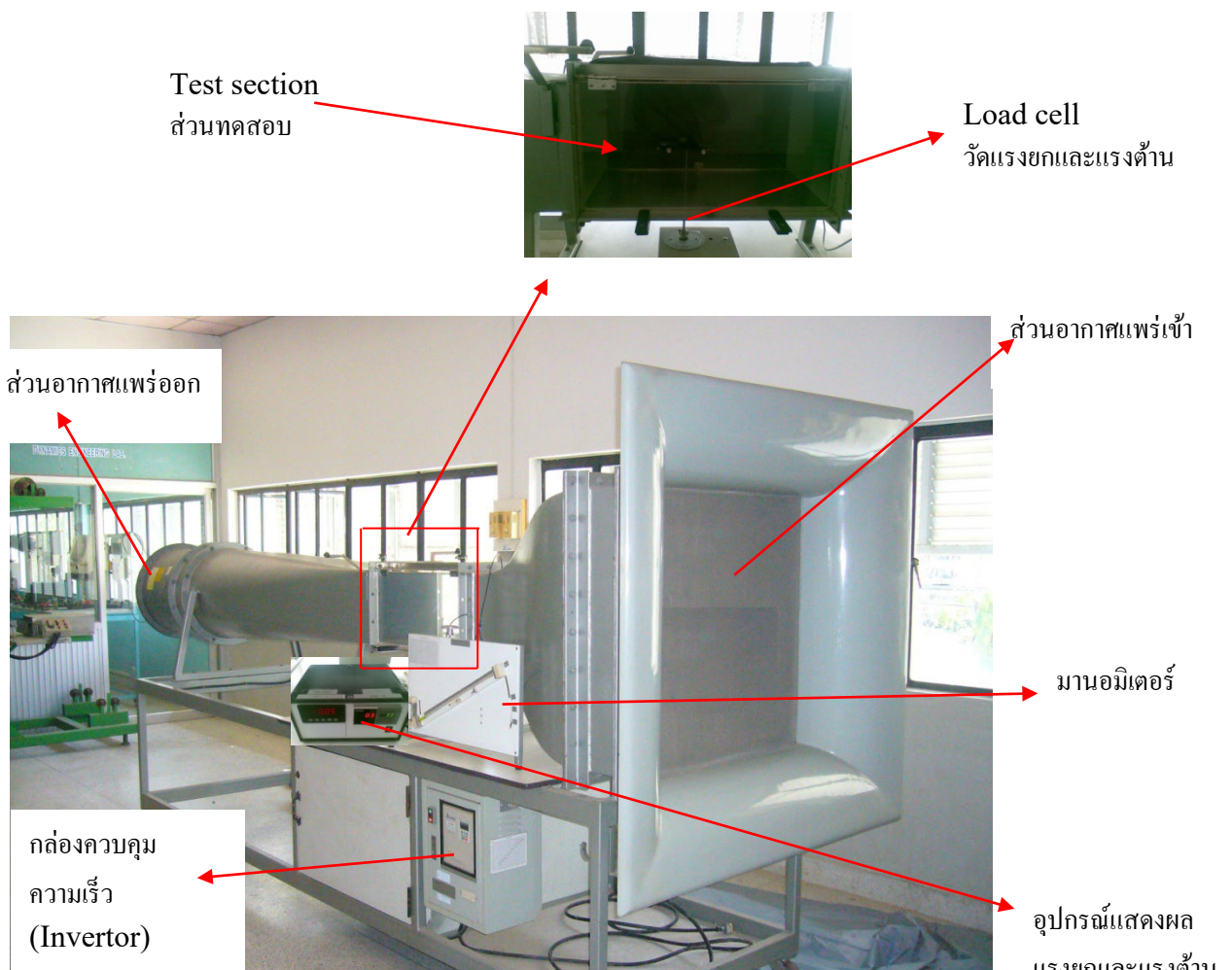
ภาพที่ 2.30 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH (Browand, 2005)

บทที่ 3

วิธีการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD

ในบทนี้ จะอธิบายขั้นตอนในการทดสอบแรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ในกรณีต่างๆ ซึ่งการทดสอบ จะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 การทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) เริ่มต้นจากการทดสอบแบบจำลองที่ความเร็ว 10 m/s ถึง 25 m/s วิธีที่ 2 การทดลองแบบจำลองโดยใช้วิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) เพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลองทั้ง 2 วิธี ของแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก

3.1 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม



ภาพที่ 3.1 ชุดทดสอบอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบเป็นอุโมงค์ลมแบบเปิดที่มีพัดลมอยู่ทางด้านใต้ลม ใช้สำหรับศึกษาทางด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ของวัตถุที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง

อากาศไหลเข้าอุโมงค์ลมโดยไหลผ่านทางเข้าปากแตรที่มีชุดบังคับทิศทางของลมให้ไหลเป็นเส้นตรงผ่านตะแกรงลวดผ่านพื้นที่ช่วงตีบเล็กลง สำหรับตัวอุโมงค์ลมช่วงที่ใช้สำหรับทดสอบนั้นทำด้วยวัสดุโปร่งแสงถัดจากช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้น ก็เป็นตัวลดความเร็ว

(Low angle diffuser) ซึ่งจะสิ้นสุดลงที่พัดลมของตัวอุโมงค์ ผิดด้านในของตัวอุโมงค์ลมช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้จะเรียบมาก ใบของพัดลมที่มีจำนวนใบถึง 7 ใบนี้จะทำด้วยอะลูมิเนียมหล่อที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ได้รับการออกแบบตามหลักการของ Aerofoil เพื่อให้พัดลมมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดและมีการไหลแบบเทอร์บีเวนที่ต่ำสุด ความเร็วของพัดลมนี้สามารถปรับได้จากอินเวอร์เตอร์

รูวัดความดันสถิตจำนวนสี่รูถูกจัดให้มีระยะห่างเท่าๆกันจะต่อรวมเข้ากันด้วยท่อร่วมเพื่อให้มีผลกระทบต่อหุ่นจำลองที่นำมาทดสอบน้อยที่สุด ความเร็วลมจะอ่านค่าออกมาเป็นเสดของความเร็วจากมาโนมิเตอร์หลอดแก้วเอียงที่เรียกว่า Inclined manometer หุ่นจำลองจะถูกนำมาติดตั้งไว้บนขารองรับของโพลีคาร์บอเนตที่วัดได้ 2 ทิศทาง พร้อมตัวแสดงผลเพื่อวัดแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงยกของหุ่นจำลอง ขาที่ใช้สำหรับการติดตั้งหรือจับยึดหุ่นจำลองนี้สามารถหมุนได้โดยรอบเพื่อให้สามารถเปลี่ยนมุมปะทะ (Angle of incidence) ของหุ่นจำลองได้อย่างรวดเร็ว มุมดังกล่าวนี้อ่านได้จากสเกลที่ฐานของขาที่ใช้สำหรับติดตั้งหุ่นจำลองนั้น อุโมงค์ลมนี้จะยึดติดอยู่บนโต๊ะที่มีล้อสำหรับการเคลื่อนย้าย

ข้อมูลทางเทคนิค

- พัดลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 มม.
- มอเตอร์ขนาด 3.7 kW , 380 V , 3 Phase , 50 Hz.
- อินเวอร์เตอร์ขนาด 5 kVA
- ความเร็วลมสูงสุดมากกว่า 25 m/s

3.2 การทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม

การทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) เริ่มต้นจากการทดสอบแบบจำลองที่ความเร็ว 10 m/s ถึง 25 m/s



ภาพที่ 3.2 เส้นทางการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก
ทดสอบในอุโมงค์ลม ที่ความเร็ว 10 m/s

จากการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ในอุโมงค์ลม ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กจากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	แรงต้านที่วัด ได้ (N)	แรงต้านจากขายึด โมเดล (N)	แรงต้านที่กระทำกับ โมเดล F_d (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน ของโมเดล C_d
10.0	0.15	0.100	0.050	0.392
12.5	0.25	0.165	0.085	0.427
15.0	0.35	0.230	0.120	0.419
17.5	0.50	0.324	0.176	0.451
20.0	0.65	0.424	0.226	0.443
22.5	0.80	0.535	0.265	0.411
25.0	1.00	0.662	0.338	0.424

3.3 การยืนยันผลของ CFD

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งในด้านอากาศพลศาสตร์ ประการที่ต้องการวิเคราะห์
เป็นลำดับแรกก็คือ แรงต้าน ซึ่งในการทดลองในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดด้านขนาดของแบบจำลอง
ความเร็วของอากาศที่ผ่านแบบจำลองซึ่งมีค่าที่ต่ำ ความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด สิ้นเปลืองทุน
และเวลาในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ ดังนั้น CFD จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการลด

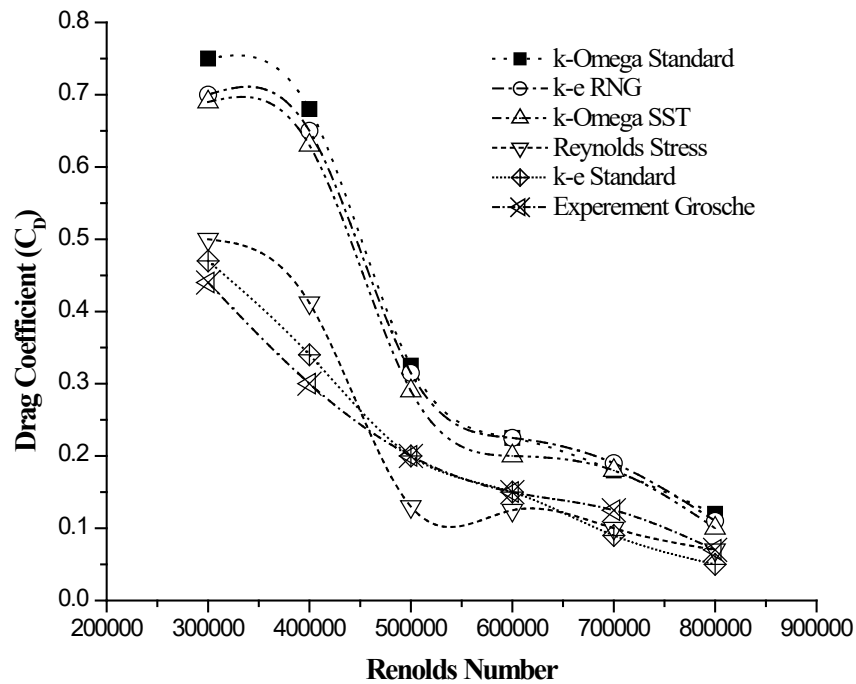
ปัญหาดังที่กล่าวมา แต่ก่อนที่จะทำการทดลองโดย CFD ของแบบจำลองขนาดเท่ากับต้นแบบ จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กันกับการทดลองกับอุโมงค์ลม เพื่อให้แน่ใจว่าเงื่อนไขในคำนวณ มีความถูกต้อง แม่นยำ และยอมรับได้ โดยการยืนยันผลได้มีการ ทำหลายส่วน เช่นการยืนยันผลของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) จำนวนกริด (grid) โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD รวมทั้งผลการศึกษานักวิจัย ท่านอื่น ดังนั้นการยืนยันผลก่อนการจำลองเพื่อหาค่าแรงต้านของรถบรรทุกเล็กในกรณีศึกษาต่าง ๆ จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญของงานวิจัยนี้ เพื่อให้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด

3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากทฤษฎีของ CFD ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และงานวิจัยท่านอื่นดังที่กล่าวมานั้น ทำให้ทราบข้อมูลของแบบจำลอง CFD ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทางด้านอากาศพลศาสตร์ ในการทดสอบแรงต้านของรถบรรทุกเล็ก โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีปริมาตร สืบเนื่อง (Finite volume method) ระเบียบขั้นการแก้ปัญหาใช้ Segregated solver, ระเบียบวิธี คำนวณใช้ Implicit method, ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลของบริเวณใกล้ผนังใช้ Standard wall function, เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าเป็น Velocity inlet, เงื่อนไขขอบเขตทางออกเป็น Pressure outlet ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศโดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ, โดยไม่มีส่วนของสมการ พลังงานมาเกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม FLUENT 6.3

3.3.2 การยืนยันผลการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา แต่ การจำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์ เป็นการไหลที่มีค่า Reynolds number สูง ซึ่งสภาวะในการ คำนวณจะเป็นแบบปั่นป่วน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ แบบจำลองความ ปั่นป่วนเพื่อมาช่วยในการแก้ปัญหาคำนวณ ซึ่งในโปรแกรม FLUENT 6.3 มีให้เลือกหลาย แบบจำลอง เพราะฉะนั้น จึงได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ โดยการ ทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) แบบต่าง ๆ ซึ่งจากภาพที่ 3.3 เป็นการ เปรียบเทียบและเพื่อยืนยันผลของสมการการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model) ให้มีความ ถูกต้องกับลักษณะการคำนวณ โดยกำหนดจำนวนกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ กริดที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับการศึกษาของ Groshe and Meier (2001) ซึ่งเป็นการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านกับวัตถุทรงกลม เจาะรูตรงกลาง โดยใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือทดสอบ



ภาพที่ 3.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน จากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ

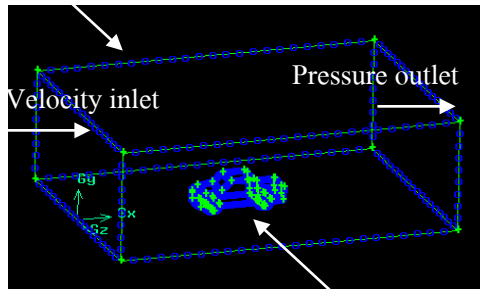
จากภาพที่ 3.3 จะเห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Grosche มากที่สุด ซึ่งจากข้อมูล และทฤษฎีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ แบบจำลองนี้เหมาะสมกับการ จำลองการไหลด้านอากาศยานพลศาสตร์มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการคำนวณ CFD ของรถบรรทุกเล็กต่อไป

3.3.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของการเพิ่มจำนวนกริด

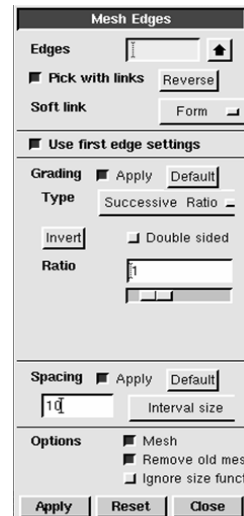
จากระเบียบขั้นตอนการทำงานของ CFD มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนที่เราต้องแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ ซึ่งเราใช้ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลบริเวณใกล้ผนัง เป็นแบบ Near-wall model โดยเป็นเทอมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon standard ดังนั้นต้องกำหนดจำนวนความละเอียดของกริด และกำหนดอิลิเมนต์บริเวณ ใกล้ผนังให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการเพิ่มจำนวน และความละเอียดของกริด ของฝักรถบรรทุกเล็ก และผนังเพื่อหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เพราะถ้าหากเรากำหนดให้มีความละเอียดมากเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณ

จากขั้นตอนการประมวลผล ได้กำหนดระยะห่างของจุดเพื่อที่จะเป็นจุดเชื่อมกันของกริด โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งระยะห่างของฝักรถบรรทุกเล็กต้องมีความละเอียดกว่าฝัของผนังล้อมรอบรถ จากภาพที่ 3.4 เป็นการแสดงการกำหนดความละเอียดของกริด โดยการเพิ่มระยะห่างของจุด บนฝักรถบรรทุกเล็ก

Spacing = 80



Spacing = 2 - 10

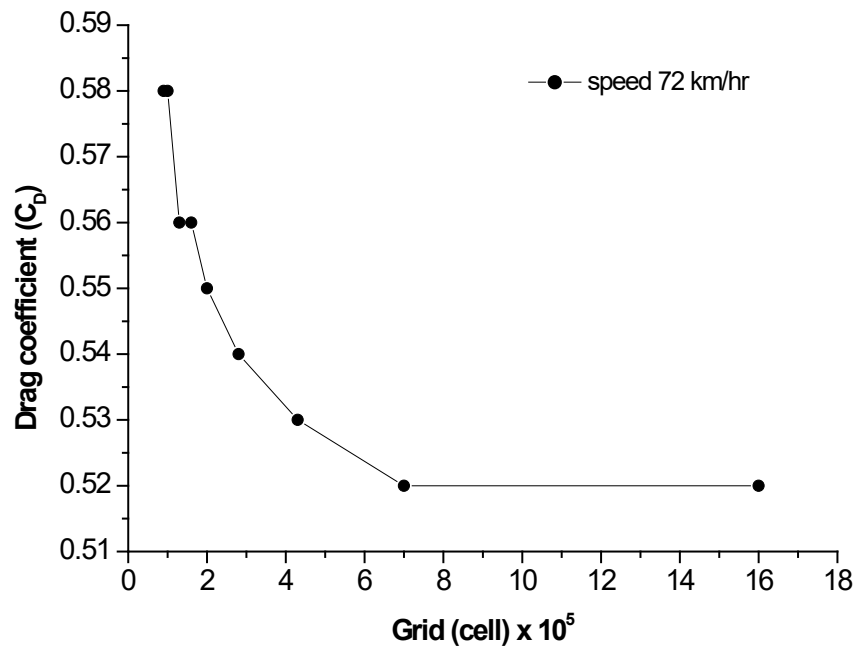


ภาพที่ 3.4 ลักษณะการกำหนดกริด (ปรัชญา, 2551)

จากภาพนั้นเป็นการกำหนดระยะระหว่างจุด (Spacing) ของกริดบนทุกเล็กที่ 2 – 10 หน่วย และบริเวณผนังที่ระยะ 80 หน่วย กับกริดบนทุกเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ 2.68576 m^2 ทดสอบที่ความเร็ว 72 km/hr และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากที่กล่าวมาข้างต้น นำมาใช้เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงต้าน (Drag force) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/hr (ปรัชญา, 2551)

Spacing	Grid (cell)	Drag force (N)	(C_D)
10	89,612	386.62	0.58
9	99,754	385.03	0.58
8	134,597	370.09	0.56
7	155,277	372.01	0.56
6	197,964	366.90	0.55
5	280,714	358.73	0.54
4	431,545	348.49	0.53
3	728,644	342.69	0.52
2	1,580,886	342.42	0.52



ภาพที่ 3.5 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริด (ปรัชญา, 2551)

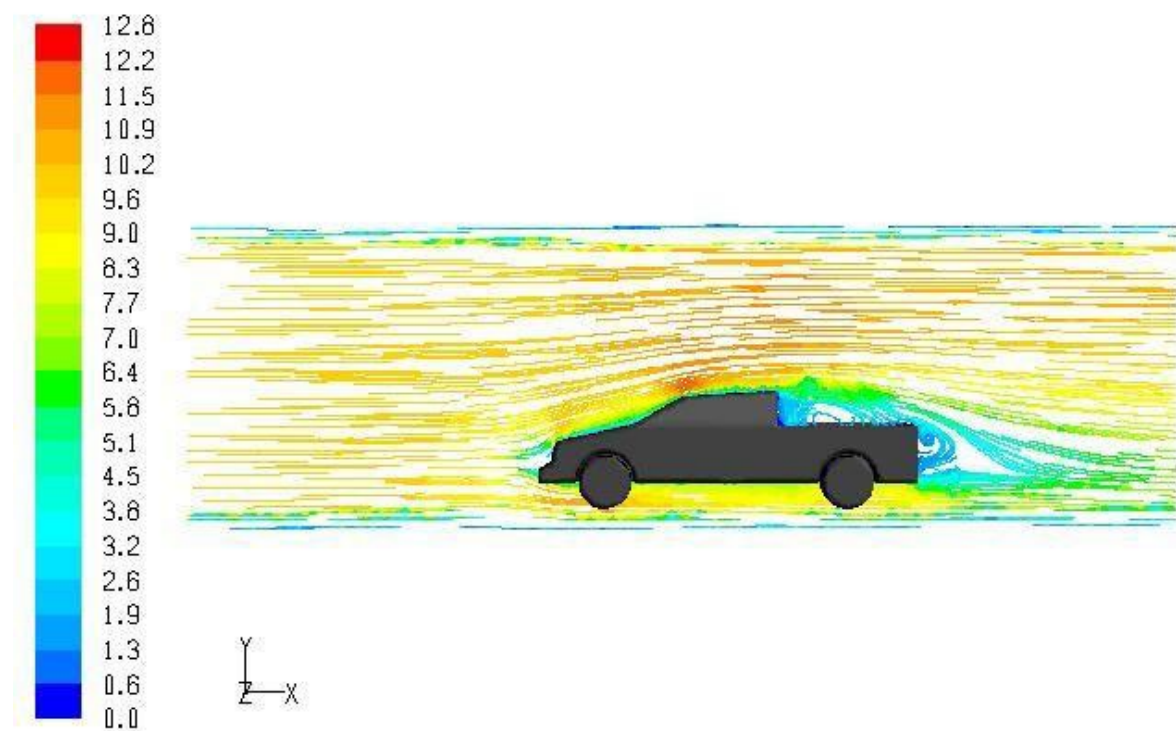
จากตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งจากผล เมื่อมีการเพิ่มจำนวนกริดมากขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง ที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านคงที่ ซึ่งหากมีการเพิ่มขึ้นของกริดอีก ก็ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน นั่นคือ กำหนดระยะระหว่างจุดบนผิวรถที่ 3 หน่วย และที่บริเวณผนัง 80 หน่วย จำนวนกริดประมาณ 728,644 cell ซึ่งจะได้นำข้อกำหนดนี้ไปใช้ในการคำนวณ

3.4 การทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กโดย CFD

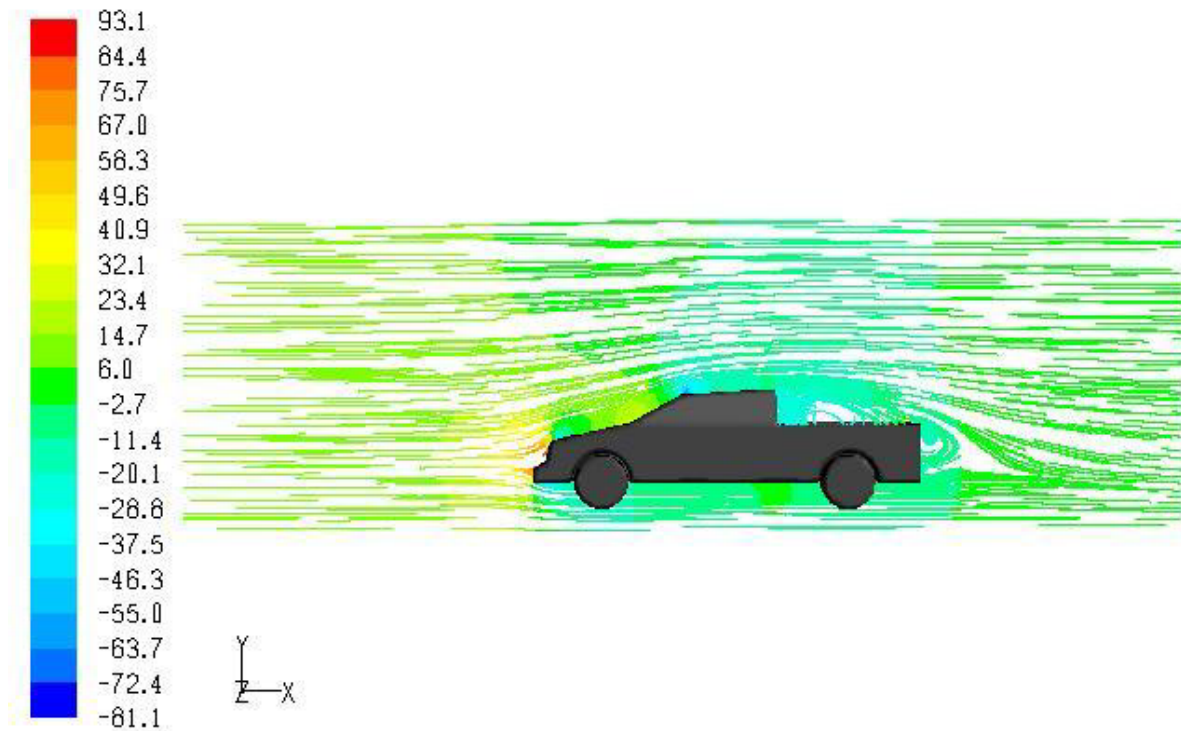
โดยจะทำการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กใน โปรแกรม FLUEN 6.3 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume method) ระเบียบขั้นการแก้ปัญหาใช้ Segregated solver, ระเบียบวิธีคำนวณ ใช้ Implicit method, ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลของบริเวณใกล้ผนังใช้ Standard wall function, เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าเป็น Velocity inlet, เงื่อนไขขอบเขตทางออกเป็น Pressure outlet ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศโดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ, โดยไม่มีส่วนของสมการพลังงานมาเกี่ยวข้อง ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon Standard ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถกำหนดได้ใน โปรแกรม FLUENT 6.3 โดยทำการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s – 25 m/s ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กจาก CFD

ความเร็ว (m/s)	แรงต้านอากาศ F_d (N)	พื้นที่หน้าตัด A (m ²)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน C_d
10.0	0.059	0.00207031	0.463
12.5	0.090	0.00207031	0.453
15.0	0.127	0.00207031	0.447
17.5	0.171	0.00207031	0.441
20.0	0.222	0.00207031	0.437
22.5	0.279	0.00207031	0.434
25.0	0.341	0.00207031	0.430

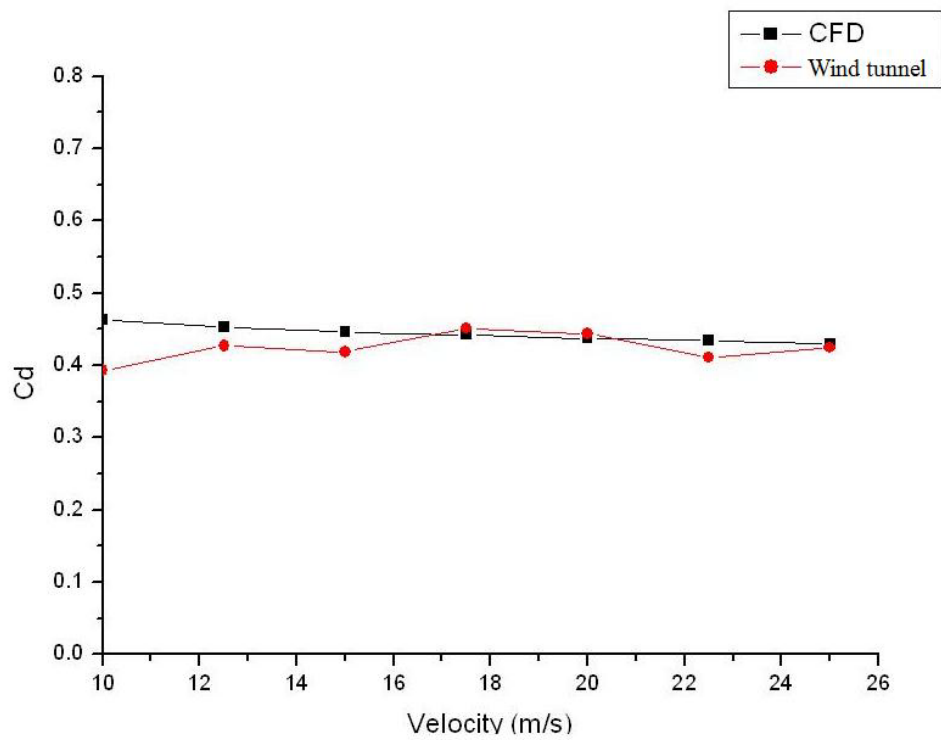


ภาพที่ 3.6 เส้นของความเร็วที่กระทำต่อแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก
ทดสอบใน CFD ที่ความเร็ว 10 m/s



ภาพที่ 3.7 เส้นของความดันที่กระทำต่อแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก
ทดสอบใน CFD ที่ความเร็ว 10 m/s

3.5 การเปรียบเทียบการทดสอบแบบจำลองโดยอุโมงค์ลมกับ CFD



ภาพที่ 3.8 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลอง

จากการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กโดยอุโมงค์ลมกับ CFD จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้งสองวิธีมีความใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3.8 โดยที่ค่าจากการทดสอบจาก CFD มีค่ามากกว่าการทดสอบจากอุโมงค์ลม (wind tunnel) เนื่องจากการทดสอบโดย CFD จะให้ความละเอียดและถูกต้องมากกว่าการทดสอบโดยอุโมงค์ลม ในการทดลองในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดด้านขนาดของแบบจำลอง ความเร็วของอากาศที่ผ่านแบบจำลองซึ่งมีค่าที่ต่ำ ความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด สิ้นเปลืองทุน และเวลาในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ ดังนั้น CFD จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการทดสอบในงานวิจัยนี้

บทที่ 4

การหาลัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง โดย CFD

จากบทที่ผ่านมา เป็นการทดสอบลัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองขนาดย่อ ของรถบรรทุกขนาดเล็ก และได้มีการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลม กับ CFD แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบมีความเร็วต่ำ แบบจำลองที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กซึ่งทำให้วัดค่าและการสังเกตเพื่อวิเคราะห์การไหลทำได้ยาก ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการทดสอบลัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กแบบจำลองขนาดจริงโดยใช้ CFD ซึ่งใช้เงื่อนไขและหลักการเดียวกันกับการจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดย่อที่ผ่านมา

จากทฤษฎีของ CFD ผลการทดลอง และเปรียบเทียบเงื่อนไขในการคำนวณจากบทที่แล้ว สามารถสรุปเงื่อนไขการคำนวณที่ใช้ในการจำลองรถบรรทุกเล็ก ได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการจำลอง CFD

โปรแกรม GAMBIT	
ขอบเขตทางด้านเข้า (inlet boundary condition)	Velocity inlet
ขอบเขตทางด้านออก (outlet boundary condition)	Pressure outlet
จำนวนกริด	700,000 - 1,000,000 cell
โปรแกรม FLUENT	
ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)	Segregated Solver
ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)	Implicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)	Standard k-epsilon (2eqn)
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาการไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

ของไหลที่ใช้ในการคำนวณด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กคือ อากาศ ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลในสภาวะที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible flow) มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งการกำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ

คุณสมบัติของอากาศ	ค่า
ความหนืด (Viscosity), μ (kg/m-s)	1.7894×10^{-5}
ความหนาแน่น (Density), ρ (kg/m ³)	1.225
ความดันเริ่มต้น (operating pressure) , P (pascal)	101,325
อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ(Ratio of specific heat)	1.4
อุณหภูมิ(Temperature)	288.16 K

ดังนั้นในบทนี้ เป็นการนำเอาเงื่อนไขการคำนวณของไหลพลศาสตร์ มาใช้ในด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก เพื่อหาแนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีต่าง ๆ โดยอาศัยองค์ความรู้จาก ทฤษฎี และหลักการของผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยมาก่อน มาประยุกต์ใช้

4.1 ผลที่ได้จากการทดสอบ

ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบรถบรรทุกเล็กขนาดจริง โดยจะใช้รถกระบะโตโยต้า ไฮลัก วีโก้ เป็นต้นแบบ และจะทำการเปรียบเทียบรถต้นแบบกับรถที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆ ซึ่งการทดสอบจะทดสอบที่ความเร็วตั้งแต่ 36 km/hr – 126 km/hr และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วต่างๆ โดยทำการทดสอบด้วย CFD การทดสอบมีทั้งหมด 7 กรณี คือ

กรณีที่ 1 กรณีรถบรรทุกปกติ (Case 1 normal)

กรณีที่ 2 กรณีติดกันชนด้านหลัง (Case 2 rear bumper)

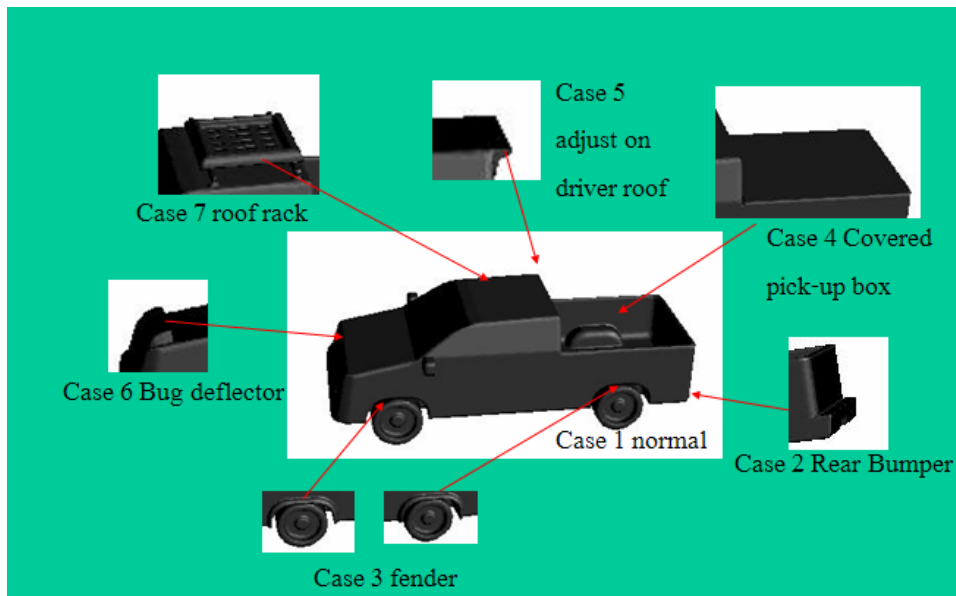
กรณีที่ 3 กรณีติดที่บังล้อ (Case 3 fender)

กรณีที่ 4 กรณีปิดกระบะท้าย (Case 4 covered pick-up box)

กรณีที่ 5 กรณีเสริมบริเวณบนหลังคาคนขับ (Case 5 adjust on driver roof)

กรณีที่ 6 กรณีติดอุปกรณ์กันแมลงบนฝากระโปรงรถ (Case 6 bug deflector)

กรณีที่ 7 กรณีติดที่วางของบนหลังคาคนขับ (Case 7 roof rack)



ภาพที่ 4.1 รถกระบะติดอุปกรณ์เสริมต่างๆ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s

Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	87.51	0.491
2	2.908128	89.82	0.504
3	2.968611	91.43	0.503
4	2.908611	80.37	0.451
5	2.912413	91.09	0.511
6	2.907872	88.95	0.499
7	3.125034	102.72	0.537

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s

Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	194.78	0.486
2	2.908128	197.88	0.494
3	2.968611	201.56	0.493
4	2.908611	176.58	0.441
5	2.912413	201.31	0.502
6	2.907872	195.70	0.488
7	3.125034	227.30	0.528

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s

Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	337.10	0.473
2	2.908128	347.48	0.488
3	2.968611	354.25	0.487
4	2.908611	309.78	0.435
5	2.912413	354.10	0.496
6	2.907872	344.68	0.484
7	3.125034	400.03	0.522

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s

Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	521.88	0.469
2	2.908128	538.47	0.484
3	2.968611	549.33	0.483
4	2.908611	479.42	0.431
5	2.912413	549.20	0.493
6	2.907872	534.43	0.480
7	3.125034	620.42	0.519

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s

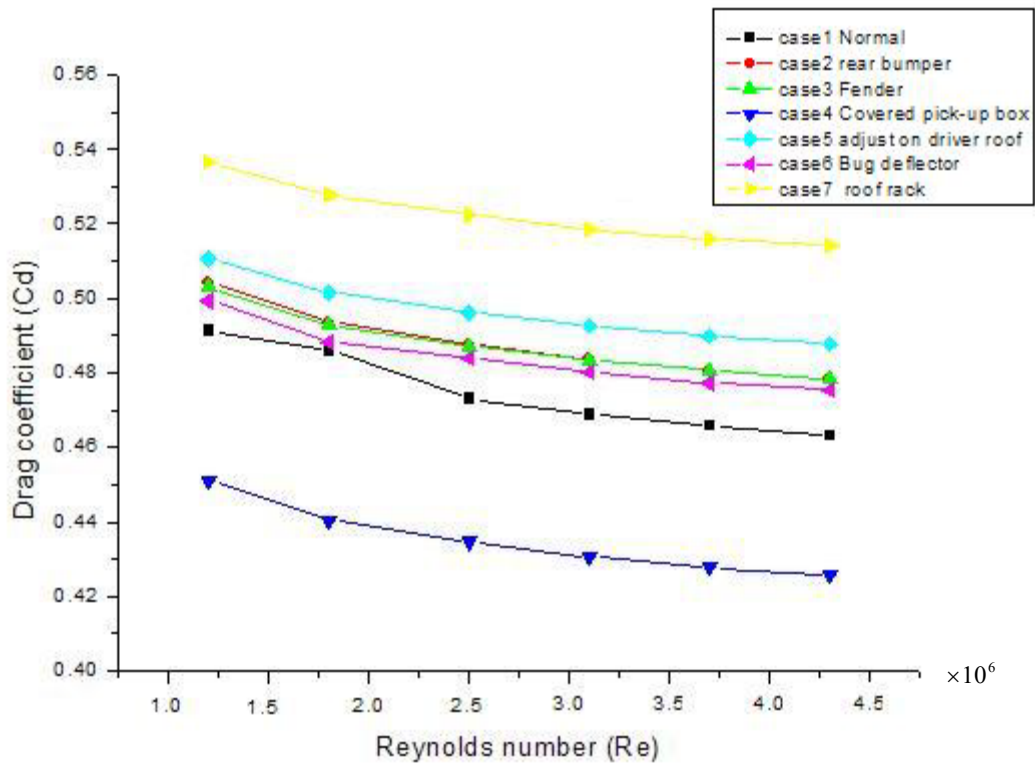
Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	746.66	0.466
2	2.908128	770.69	0.481
3	2.968611	786.64	0.481
4	2.908611	685.94	0.428
5	2.912413	786.53	0.490
6	2.907872	765.15	0.477
7	3.125034	888.93	0.516

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 35 m/s

Case	พื้นที่ (m ²)	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2.908128	1010.72	0.463
2	2.908128	1043.83	0.478
3	2.968611	1065.17	0.478
4	2.908611	928.98	0.426
5	2.912413	1065.94	0.488
6	2.907872	1036.93	0.476
7	3.125034	1205.81	0.514

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน

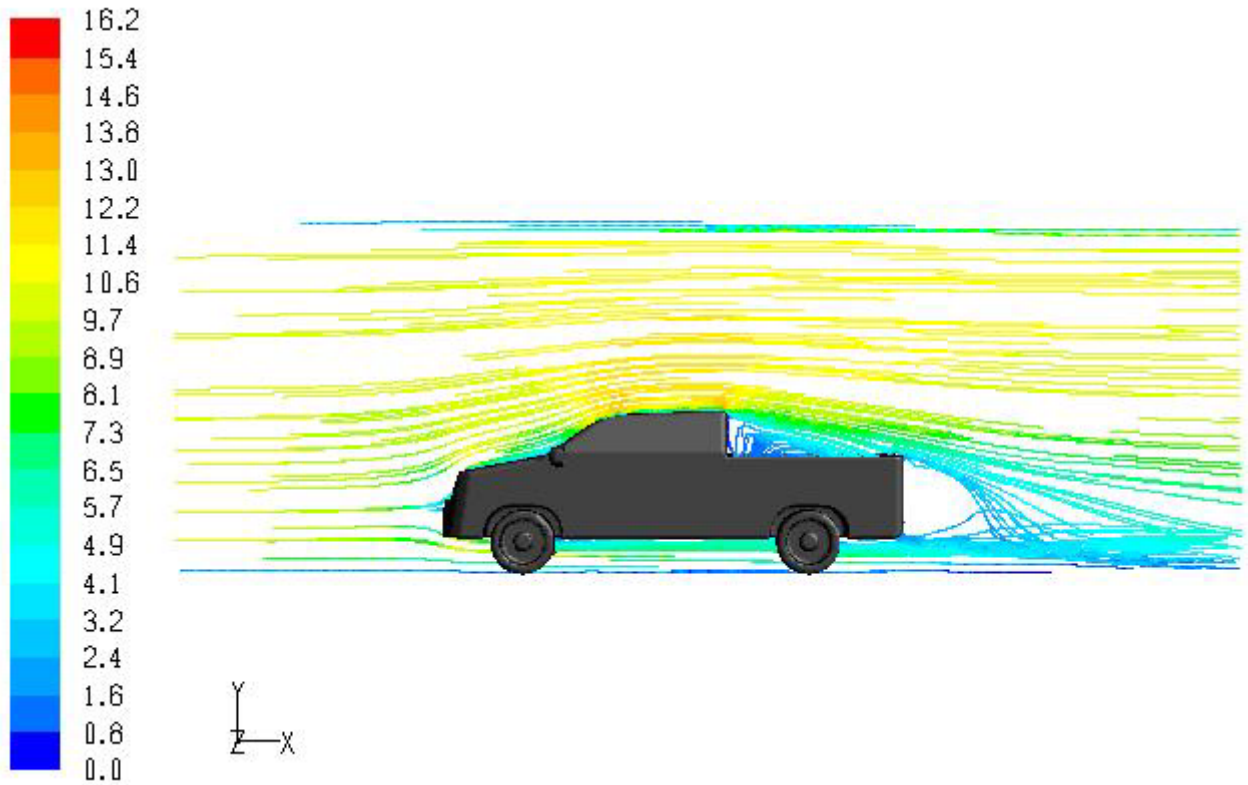
Re.	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7
120000	0.491	0.504	0.503	0.451	0.511	0.499	0.537
180000	0.486	0.494	0.493	0.441	0.502	0.488	0.528
250000	0.473	0.488	0.487	0.435	0.496	0.484	0.522
310000	0.469	0.484	0.483	0.431	0.493	0.480	0.519
370000	0.466	0.481	0.481	0.428	0.490	0.477	0.516
430000	0.463	0.478	0.478	0.426	0.488	0.475	0.514
เฉลี่ย	0.475	0.488	0.487	0.435	0.497	0.484	0.523



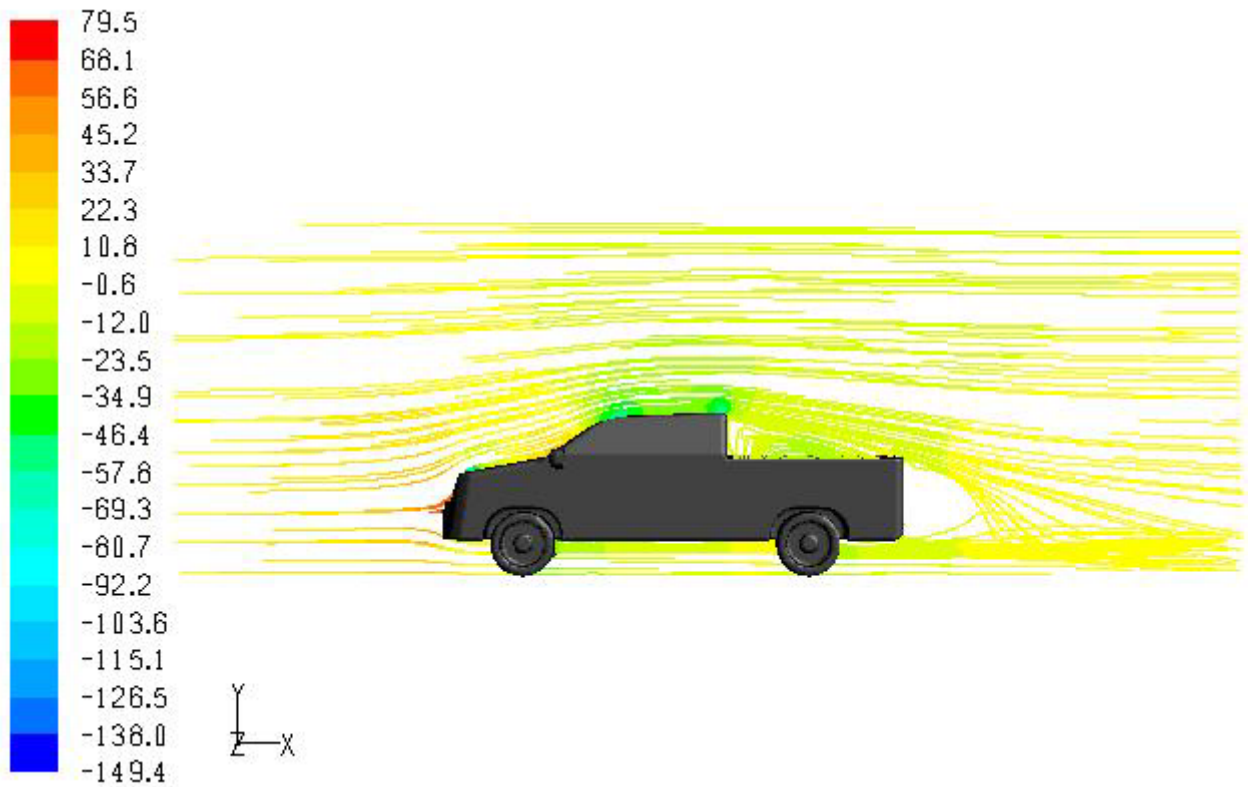
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

4.2 การกระจายตัวของความเร็วและความดัน

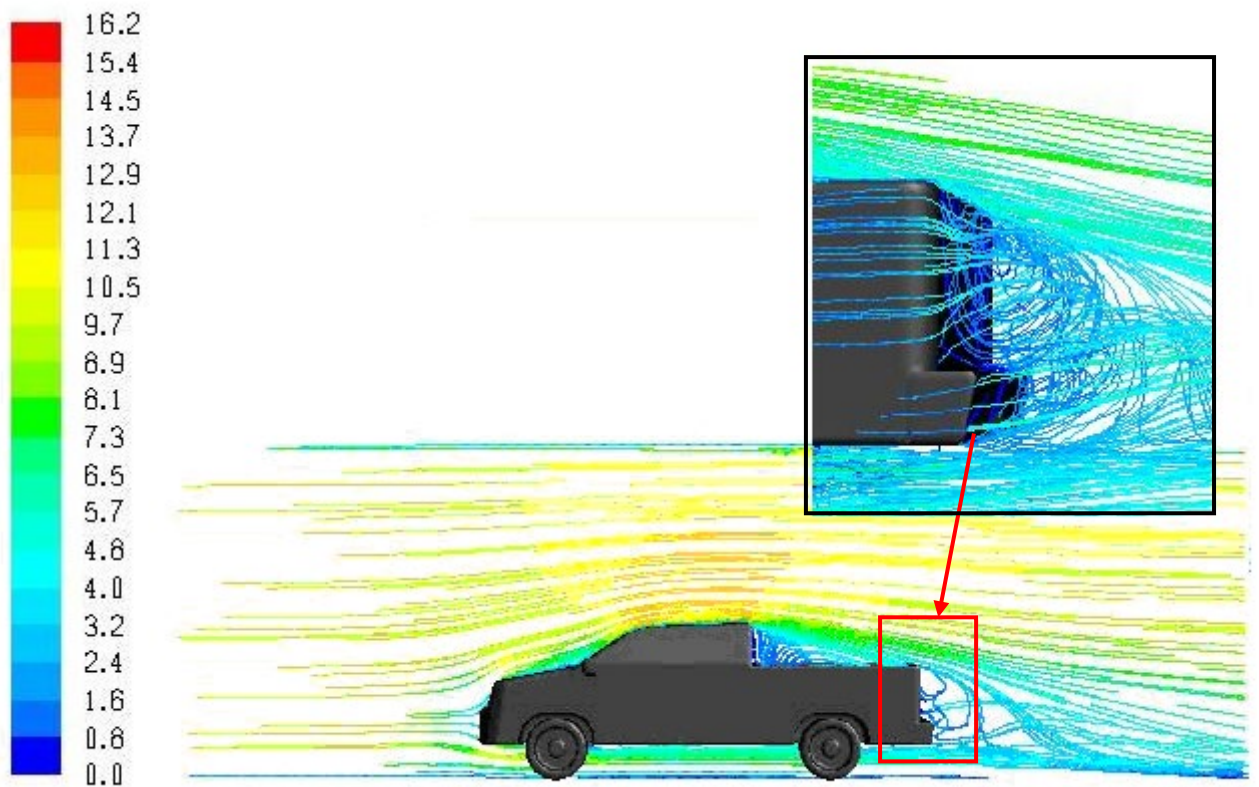
สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้า และด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการปรับปรุงกระบะของรถโดยที่ทำให้การไหลราบเรียบมากขึ้น จะช่วยให้แรงต้านลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความเร็ว และความดัน



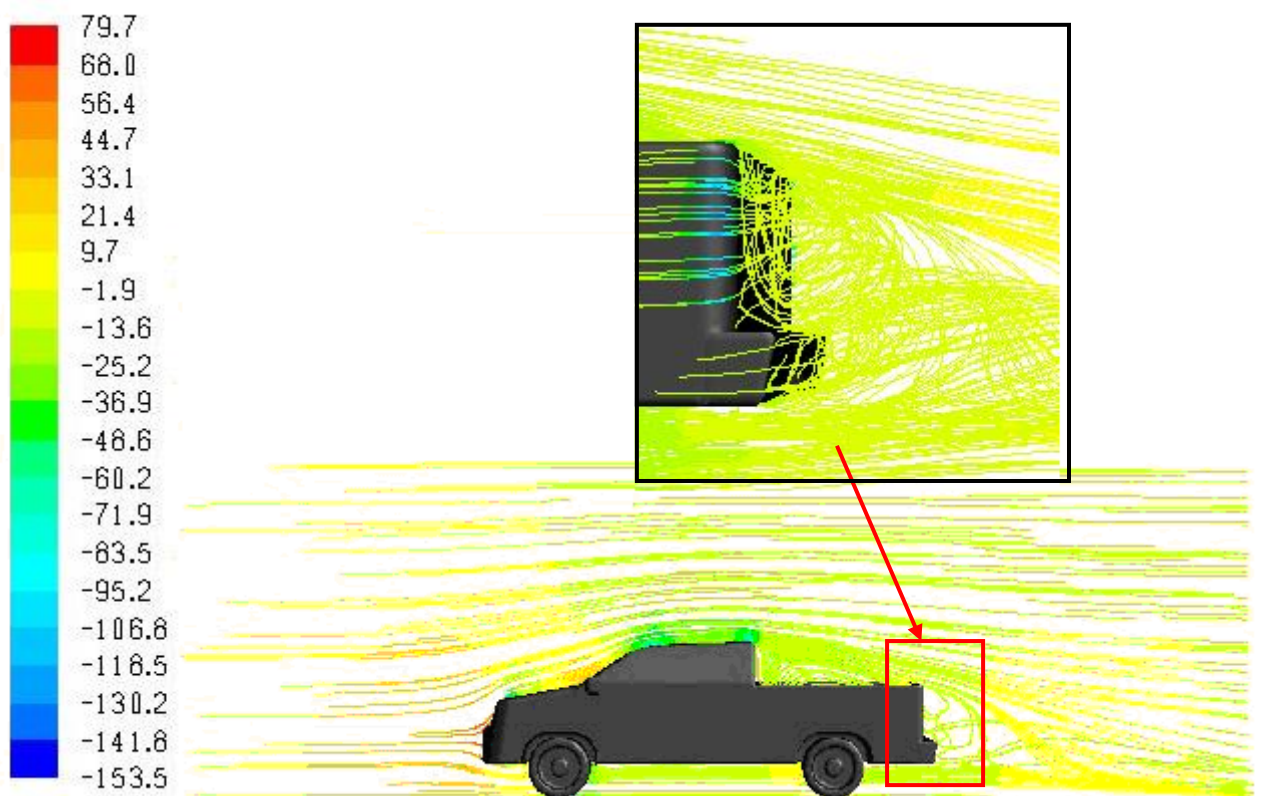
ภาพที่ 4.3 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 รถกระบะปกติ



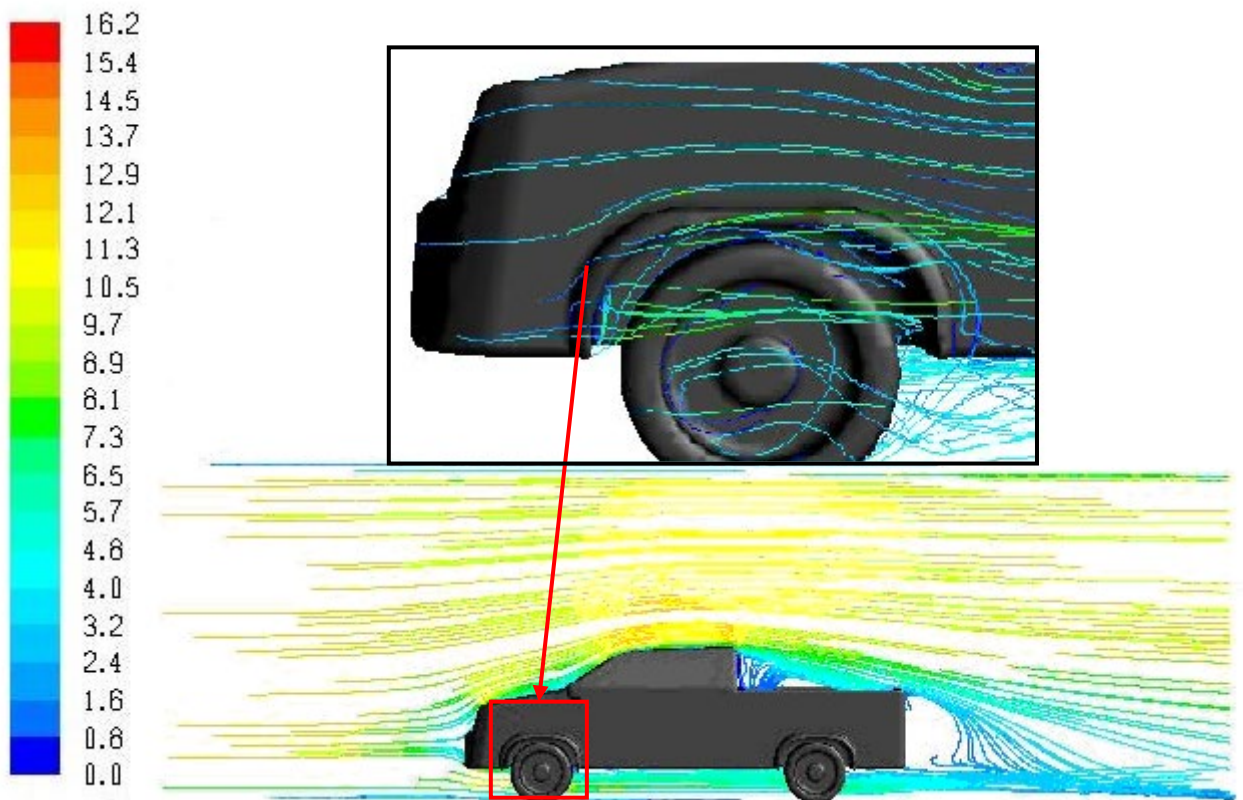
ภาพที่ 4.4 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 รถกระบะปกติ



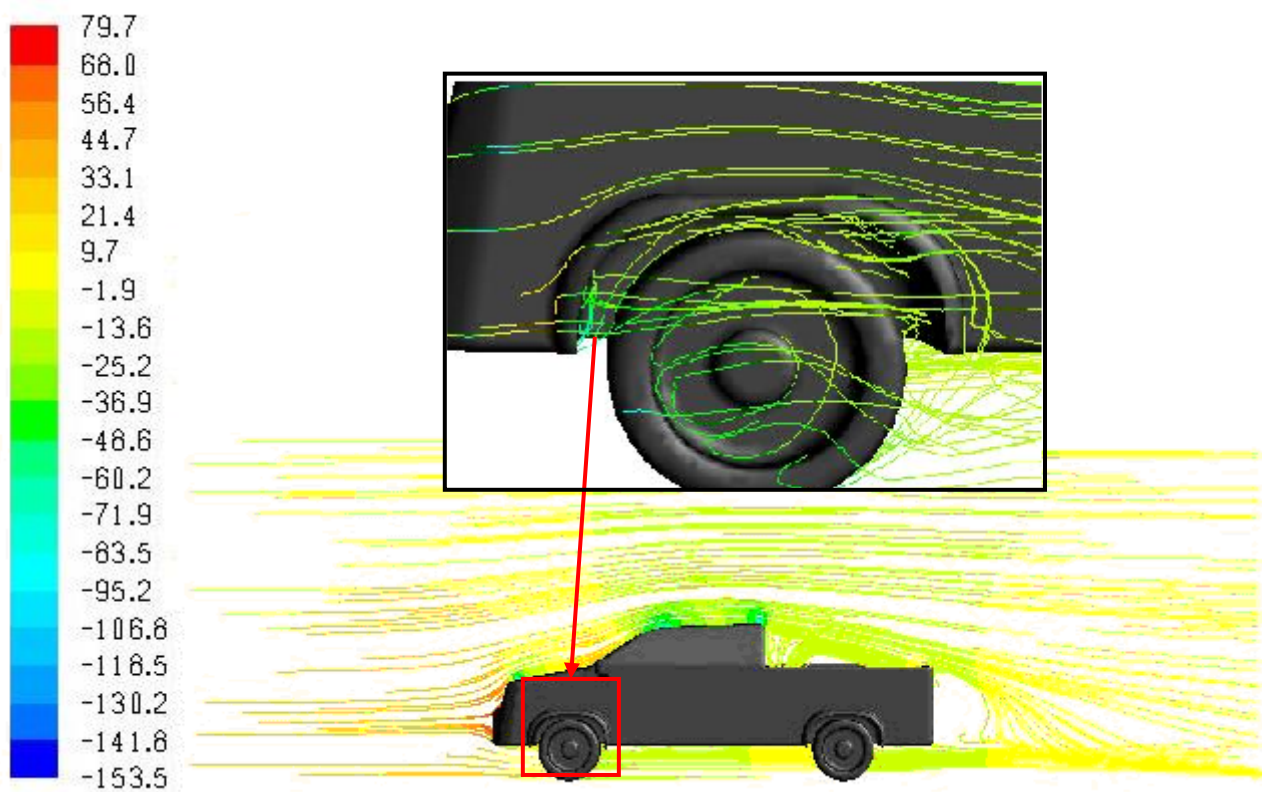
ภาพที่ 4.5 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 2 รถกระบะติดกันชนท้าย



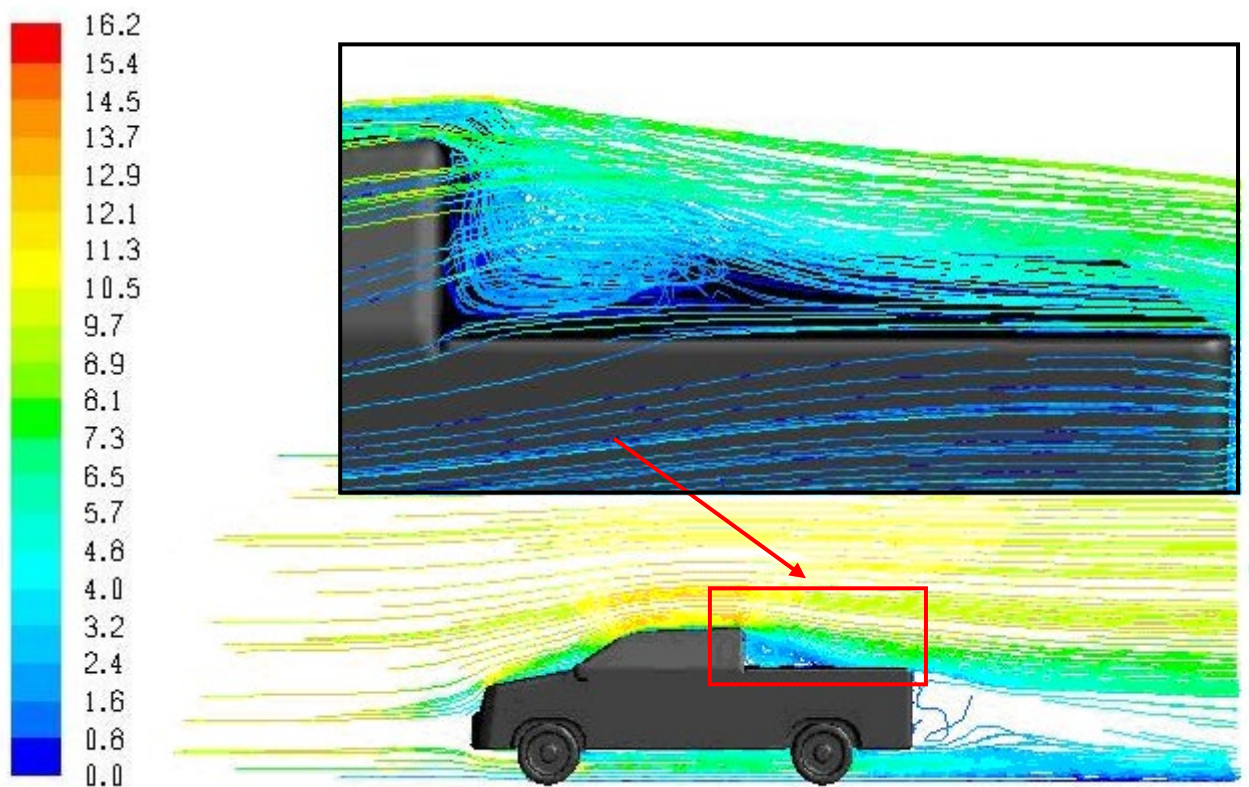
ภาพที่ 4.6 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 2 รถกระบะติดกันชนท้าย



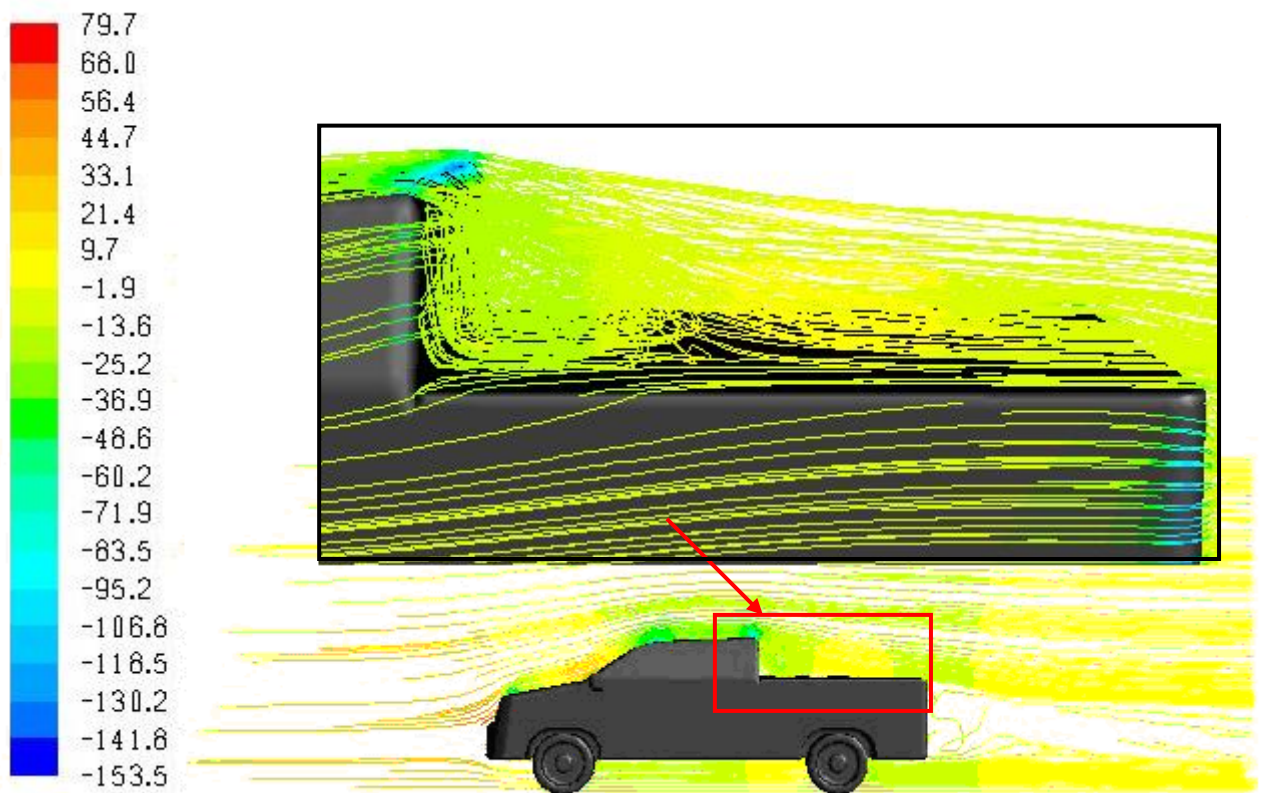
ภาพที่ 4.7 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 3 รถกระบะติดกำบังล้อ



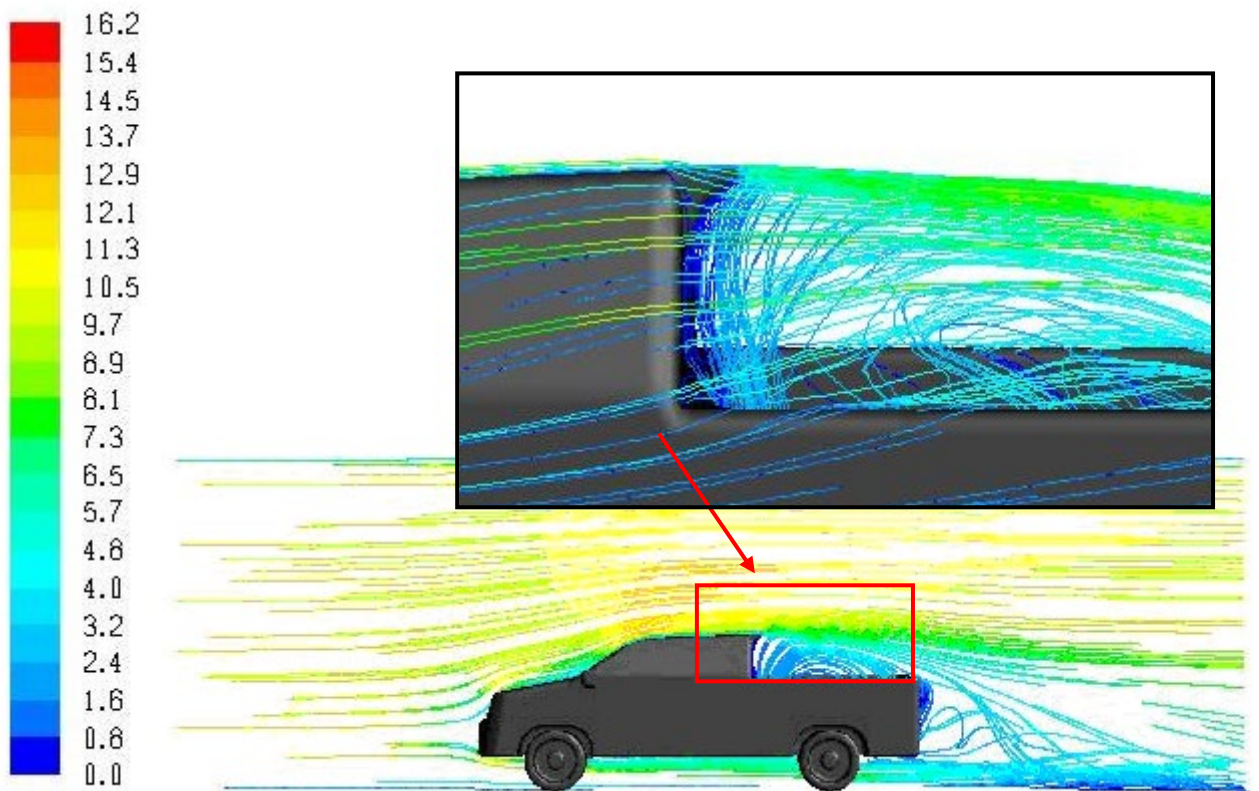
ภาพที่ 4.8 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 3 รถกระบะติดกำบังล้อ



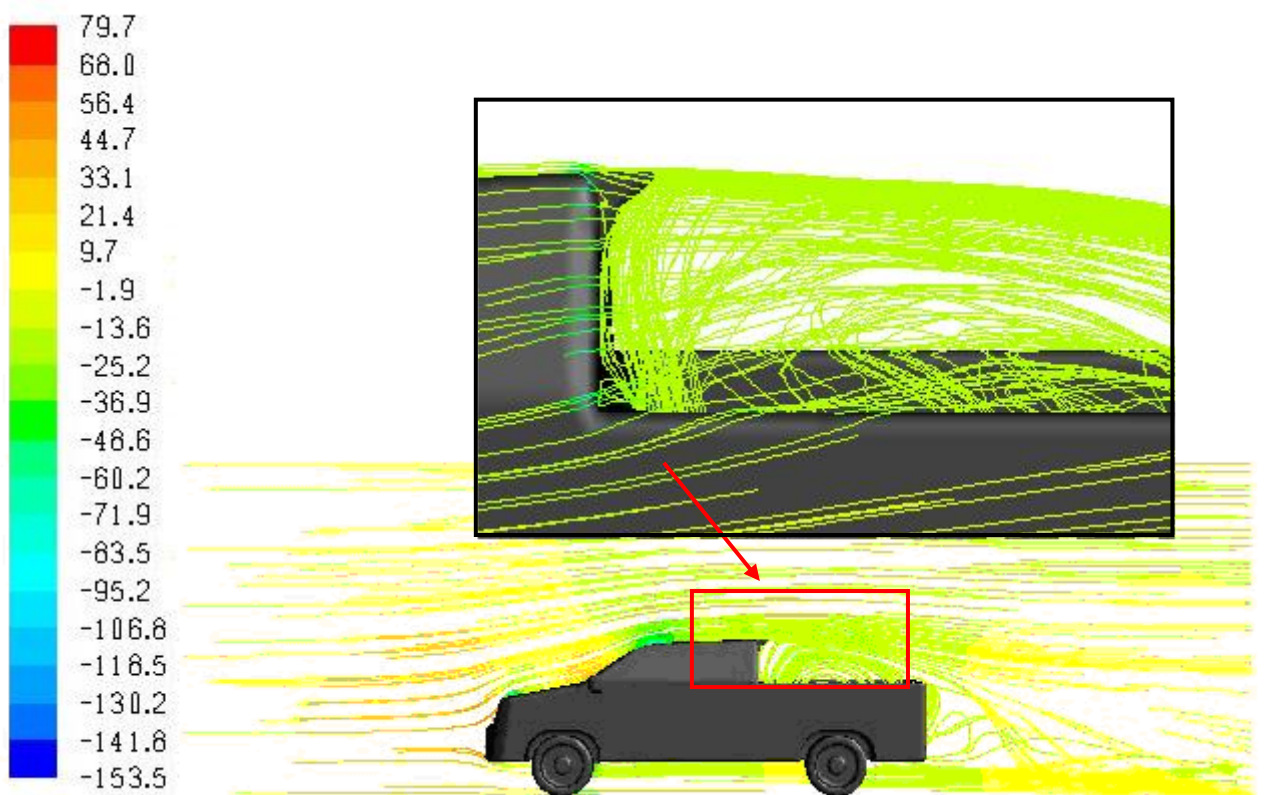
ภาพที่ 4.9 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 4 รถกระบะปิดท้ายกระบะ



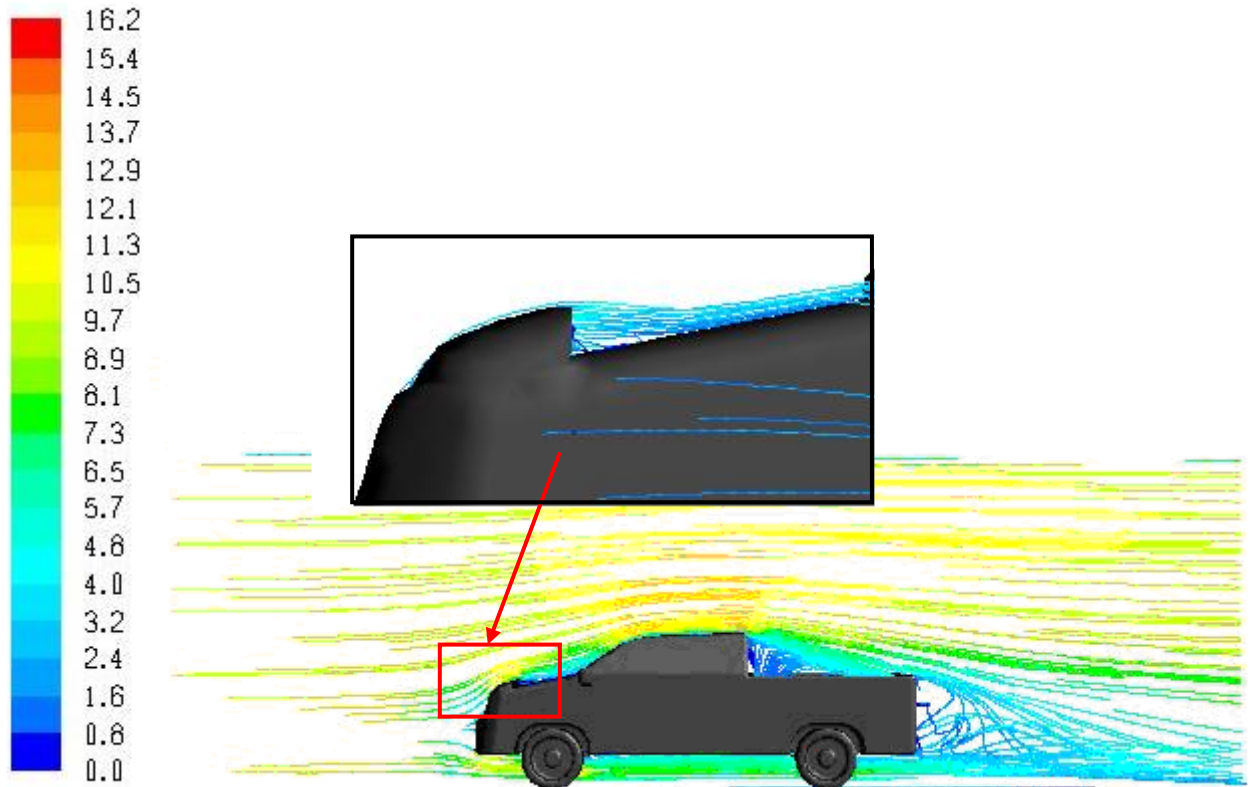
ภาพที่ 4.10 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 4 รถกระบะปิดท้ายกระบะ



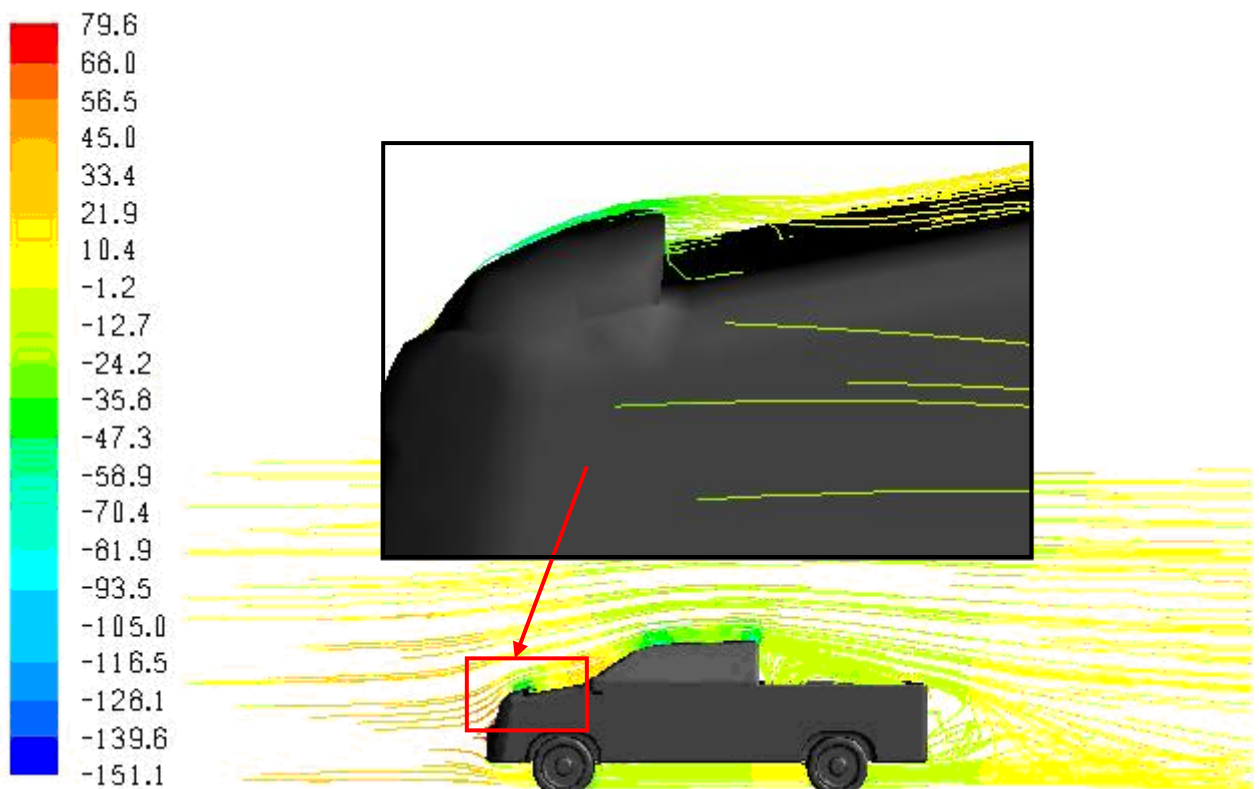
ภาพที่ 4.11 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 5 รถกระบะเสริมหลังคาคนขับ



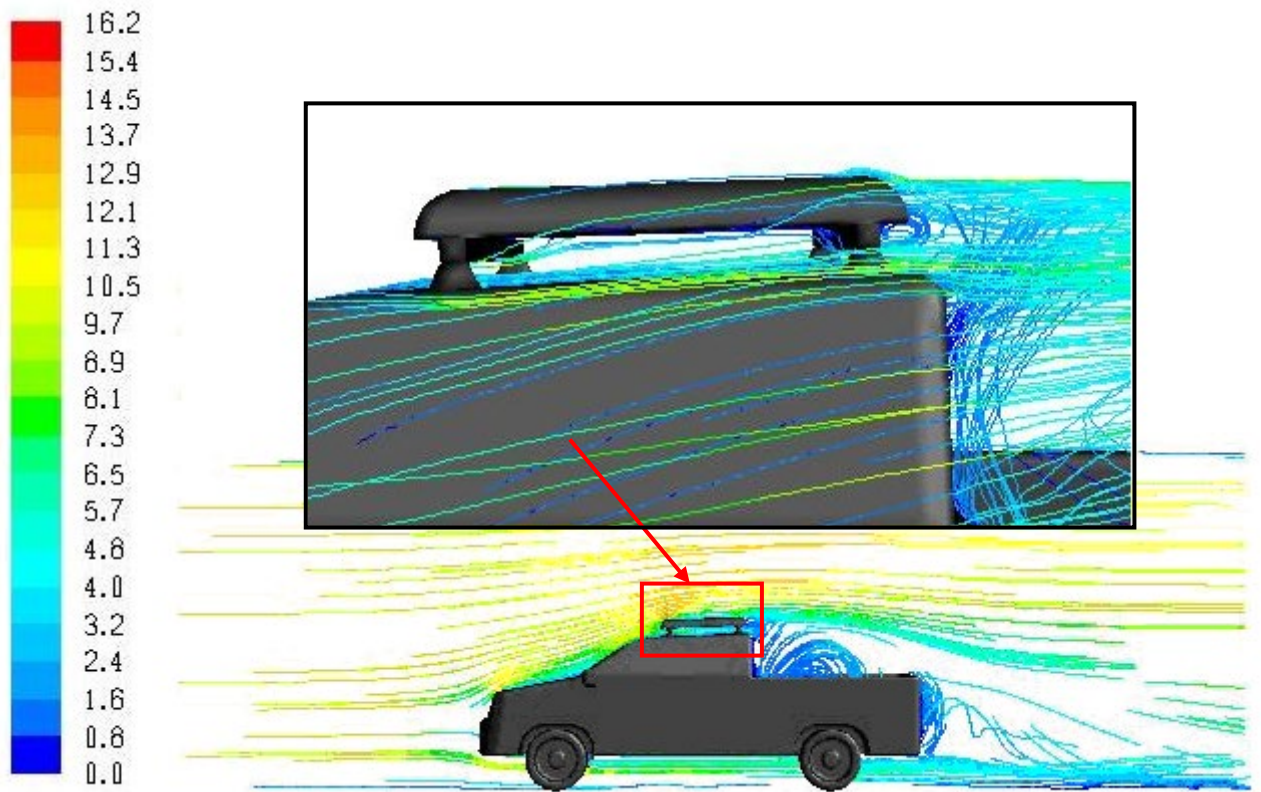
ภาพที่ 4.12 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 5 รถกระบะเสริมหลังคาคนขับ



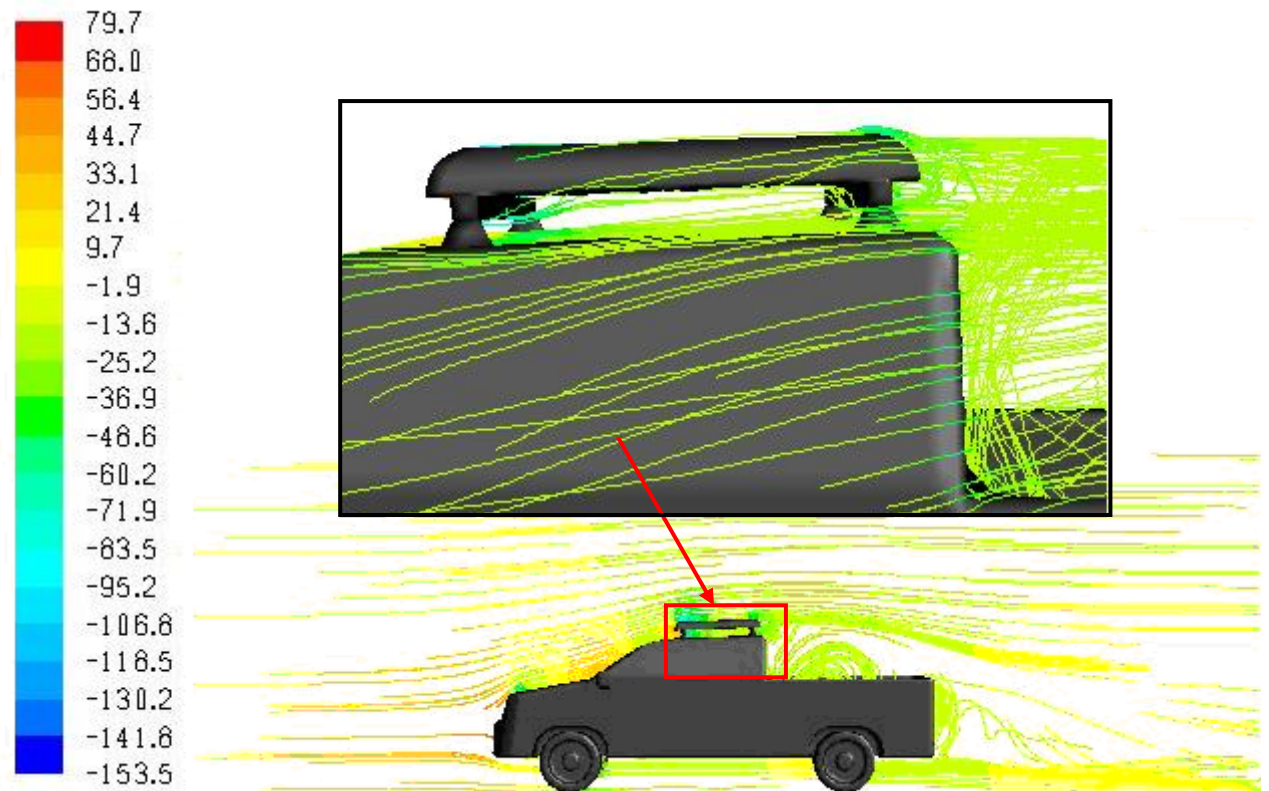
ภาพที่ 4.13 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 6 รถกระบะติดอุปกรณ์กันแมลง



ภาพที่ 4.14 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 6 รถกระบะติดอุปกรณ์กันแมลง



ภาพที่ 4.15 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีที่ 7 รถกระบะติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา



ภาพที่ 4.16 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีที่ 7 รถกระบะติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา

4.3 วิเคราะห์ผล

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันในด้านท้ายของรถ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$F_D = \int_{front} p \cos \theta dA - \int_{back} p \cos \theta dA \quad (4.1)$$

กรณีที่ 1 รถกระบะปกติ ขนาดของแรงต้านจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระบะ และ 3 บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกันของความดัน ส่วนบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจากโมเมนตัมของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระบะ ซึ่งหากพิจารณาจากภาพที่ 4.3 และ 4.4 (กรณี 1 รถกระบะปกติ) ที่ตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารกับบริเวณกระบะ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (Separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (Wake) ซึ่งก็คือการเกิดการสูญเสีย (Loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระบะท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เกิดจากการไหลของอากาศชั้นนอกมีความเร็วมากกว่าการไหลของชั้นใน เพราะอากาศที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (Viscosity, μ) เกิดแรงเหนือน้านการไหลทำให้ความเร็วลดลงและความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นใน มีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูงได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระบะลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอกส่งถ่ายเข้าสู่ยานภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและด้านหลังมีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของอากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระบะ ดังนั้นแรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้านที่สูงขึ้น ดังสมการ (4.1)

กรณีที่ 2 มีการติดกันชนด้านท้ายรถ กรณีนี้มีลักษณะการไหลของอากาศคล้ายกับกรณีแรก แต่กรณีที่ 2 นี้ในส่วนของบริเวณด้านท้ายจะเกิดการแยกตัวตรงบริเวณกันชนด้านท้ายเนื่องจากความแตกต่างของความดัน ทำให้อากาศเกิดความปั่นป่วนมากขึ้น ดังภาพที่ 4.5 และ 4.6 ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

กรณีที่ 3 ติดกำบังล้อทั้ง 4 ล้อ ทำให้ลดการหมุนวนของอากาศบริเวณล้อรถ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้เกิดแรงต้านขึ้นบริเวณกำบังล้อเอง ทำให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย

กรณีที่ 4 มีการปิดท้ายกระบระบ มีผลทำให้การหมุนวนของอากาศลดลง เนื่องจากไม่มีการปะทะของฟ้าย้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระบะ จนมาถึงบริเวณท้ายกระบะ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1,2 และ 3

กรณีที่ 5 เป็นกรณีที่มีการเสริมหลังคาคนขับ อากาศที่ไหลปะทะกับส่วนคนขับจะไหลผ่านอุปกรณ์เสริมบริเวณหลังคา ทำให้อากาศไหลข้ามกระบะท้ายไป ในขณะที่เดียวกันจะทำให้เกิดความดันต่ำลง ทำให้อากาศข้างนอกไหลเข้าบริเวณกระบะท้ายมากขึ้น และเกิดการหมุนวนและปะทะกับท้ายกระบะ สัมประสิทธิ์แรงต้านในกรณีนี้จึงมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีปกติ

กรณีที่ 6 มีการติดตั้งอุปกรณ์กันแมลงบนกระโปรงรถ อากาศจะไหลปะทะกับอุปกรณ์กันแมลงบริเวณด้านหน้ากระโปรงรถ ทำให้ความเร็วลดลงและความดันสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดแรงต้านเนื่องจากความดันมากขึ้นและเมื่ออากาศไหลผ่านจะเกิดการแยกตัวของอากาศ เนื่องจากความแตกต่างของความดัน(ภาพที่ 4.14) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ 1 เล็กน้อยแต่น้อยกว่ากรณีที่ 2 , 3 , และ 5

กรณีที่ 7 มีการติดตั้งอุปกรณ์วางของบนหลังคา มีผลทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดแรงต้านของอากาศบริเวณอุปกรณ์วางของ และทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ โดยอากาศที่จะไหลข้ามส่วนบนของรถ จะไปติดบริเวณนั้นทำให้เกิดแรงดันสูง ความเร็วต่ำลง และอากาศส่วนหนึ่งจะสามารถไหลออกจากช่องระหว่างอุปกรณ์วางของและส่วนบนของรถ สังเกตจากภาพที่ 4.15 และ 4.16 อากาศที่เข้าปะทะที่วางของแล้วไหลออก จะเป็นแถบระดับสีที่ความดันต่ำมาก เกิดการแยกตัวที่ตำแหน่งด้านหลัง และยังเกิดการปะทะกับท้ายกระบะ ดังนั้นความต่างของความดันจึงมีค่าที่สูง สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบในกรณีนี้จึงสูงที่สุด

บทที่ 5

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

5.1 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันให้ถูกต้องและแม่นยำโดยทั่วไปแล้วทำได้ค่อนข้างยาก เว้นแต่รถยนต์แพง ๆ ที่จะมีอุปกรณ์การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันติดตั้งที่บริเวณคอนโซล การที่ได้ทราบถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทำให้เราสามารถตัดสินใจขับจืดเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีตัวแปรเนื่องจากสิ่งแวดล้อมมากมาย จึงมีผู้วิจัยที่คิดค้นวิธีที่จะคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกเล็ก โดย Leuschen and Cooper (2006) ได้สร้างสูตรการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน จากการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกขนาดใหญ่ โดยเปรียบเทียบกับดั้งเดิมที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งจะได้นำหลักการนี้มาใช้งานวิจัยนี้

ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบในกรณีต่าง ๆ จากบทที่ผ่านมา มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) เพื่อที่จะได้ทราบค่าที่จริงของการลดหรือเพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิง จากการติดอุปกรณ์เสริม

5.1.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) จากทฤษฎีของลูสเซน โดยยึดกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบังปกติ นำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จาก

$$\Delta \overline{C}_D(V_t) = \overline{C}_D(V_t)_{baseline} - \overline{C}_D(V_t)_{mod ifile} \quad (5.1)$$

$\overline{C}_D(V_t)$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วที่ต้องการหา

$\overline{C}_D(V_t)_{baseline}$ คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกรณีปกติ ที่ความเร็วที่ต้องการหา

$\overline{C}_D(V_t)_{mod ifile}$ คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม ที่ความเร็วที่ต้องการหา

ตารางที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีติดอุปกรณ์เสริม

ความเร็ว (km/hr)	สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนแปลงจากกรณีเปิดกระบังปกติ						
	ปกติ	ติดกัน ชนท้าย	ติดกำบัง ล้อ	ปิดท้าย กระบัง	เสริม หลังคา คนขับ	ติด อุปกรณ์ กันแมลง	ติดอุปกรณ์ วางของ
36	-	-0.0129	-0.0115	0.040	-0.0193	-0.0081	-0.0453
54	-	-0.0077	-0.0066	0.0455	-0.0155	-0.0023	-0.0418
72	-	-0.0146	-0.0139	0.0384	-0.0231	-0.0107	-0.0493
90	-	-0.0149	-0.0146	0.0382	-0.0238	-0.0113	-0.0498
108	-	-0.0151	-0.0150	0.0378	-0.0242	-0.0117	-0.0504
126	-	-0.0152	-0.0150	0.0375	-0.0246	-0.0121	-0.0511

โดยค่าที่ได้จากคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีต่าง ๆ ที่คำนวณจากตารางที่ 5.1 นำไปหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการสิ้นเปลืองน้ำมันจากสมการ

$$\Delta\mu(V_t) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_t^2 \overline{\Delta C_D}(V_t) A}{0.85} \quad (5.2)$$

$\Delta\mu(V_t)$ คือการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วกำหนด (liters/100 km)

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m³

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.908128 m²

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาจากหัวข้อต่อไป

5.1.2 การคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากสมการที่ 5.2 ค่าที่นำไปแทนในสมการนั้นทุกค่าสามารถหาได้ ยกเว้นอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ สามารถหาได้จากสมการ

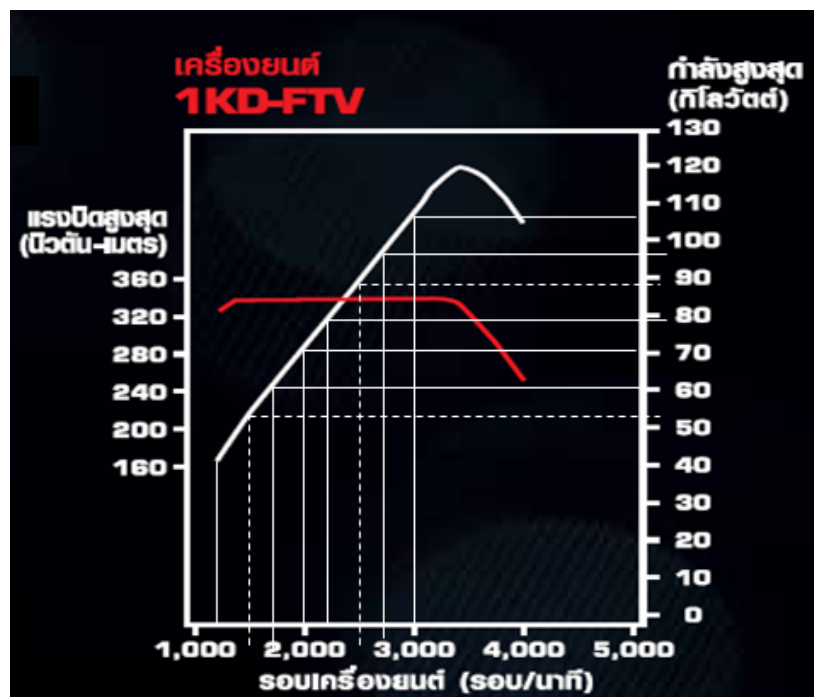
$$SFC = \frac{\rho \times \text{Flowlate}}{\text{Horespower}} \quad (5.3)$$

- SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (It/kW-hr)
 ρ คือความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.84 kg/It
 Flow late คืออัตราการกินน้ำมัน (It/hr)
 Horespower คือกำลังม้า (kW)

จากการทดสอบเป็นการทดสอบรถบรรทุกเล็กที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล คอมมอนเรล 3 liters ยี่ห้อ โตโยต้า วิโก้พีร์รันเนอร์ในการทดสอบจริงเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการวิ่งกับกำลังม้าเอาไปแทนในสมการที่ 5.3 โดยคุณสมบัติของรถบรรทุกเล็ก และเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของเครื่องยนต์ (ปรัชญา, 2551)

เครื่องยนต์	คอมมอนเรล ขนาด 3.0 liters DOHC 16 วาล์ว
แรงม้าสูงสุด	130 kW
รอบสูงสุด	3,400 rev/min
แรงบิดสูงสุด	343 N-m/1,400-3,200 rev/min
ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ	36 - 126 km/hr
ทดเกียร์	ตามรอบ และความเร็วที่เหมาะสม



ภาพที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับกำลังและแรงบิด (ปรัชญา, 2551)

จากภาพที่ 5.1 เป็นกราฟที่ได้จากการทดสอบหาค่ากำลังสูงสุดที่ความเร็วต่าง ๆ เพื่อนำค่ามาคำนวณหาค่า อัตราสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC) โดยที่หน้าปัดบนคอนโซลรถจะบอกเป็นรอบของเครื่องยนต์ และการทดสอบนั้นเป็นลักษณะการวิ่งถนนเรียบ ทดเกียร์ตามรอบปกติ

ตารางที่ 5.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบ (ปรัชญา, 2551)

Gear	Speeds km/hr	rev/min	Flow rate (liters/hr)	Hp (kW)	SFC (kg/kW-hr)	SFC (liters/kW-hr)
2	36	2000	7.89	72	0.0921	0.110
3	54	1600	7.48	55	0.114	0.136
4	72	1500	6.03	53	0.096	0.114
5	90	1800	6.52	65	0.084	0.100
5	108	2200	7.03	75	0.079	0.094
5	126	2600	7.22	90	0.067	0.079
5	144	2800	7.51	100	0.063	0.075

5.1.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

จากค่าที่ได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน และการทดสอบหา อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนั้น ต้องนำมาแทนค่าในสมการที่ 5.2 เพื่อที่จะหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ในที่นี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ดังนี้คือ

จากกรณีปิดท้ายกระบะ วิ่งที่ความเร็ว 90 km/hr การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันคือ

จากสมการ 5.2

$$\Delta\mu(V_i) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_i^2 \Delta C_D(V_i) A}{0.85}$$

จากสมการ 5.3

$$SFC = \frac{\rho \times \text{Flowrate}}{\text{Horespower}}$$

ดังนั้น

$$SFC = \frac{0.84 \times 6.52}{65} \frac{(\text{kg / liters}) \times (\text{liters / hr})}{\text{kW}}$$

$$SFC = 0.084 \frac{\text{kg}}{\text{kW} - \text{hr}}$$

แปลงหน่วย $SFC = 0.100 \frac{\text{lt}}{\text{kW} - \text{hr}}$

จาก

$$\overline{\Delta C_D}(V_{90km/hr}) = 0.0382$$

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.908611 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

แทนค่าสมการที่ 5.2

$$\Delta\mu(V_{90km/hr}) = \frac{1.225 \times 1.072 \times 0.1 \times 10^{-3} \times 90^2 \times 0.0382 \times 2.908611}{0.85} = 0.139 \text{ liters/100 km}$$

5.1.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย

ในการขับขี่รถบรรทุกเล็กส่วนมากแล้วจะขับขี่บนถนนทุก ๆ แบบ เนื่องจากการบรรทุกสิ่งของ หรือคนต้องการที่จะไปให้ถึงจุดหมายทุกที่ แม้แต่เส้นทางที่ยากลำบาก แต่จะศึกษาเฉพาะเส้นทางเรียบ และในการวิ่งในเส้นทางเรียบที่ใช้ระยะทางไกล ก็จะวิ่งด้วยความเร็วแตกต่างกัน โดยในหัวข้อนี้ จะเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วที่ทำการทดสอบ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนำมาเฉลี่ย และคำนวณหาค่าดังตาราง

ตารางที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย

กรณี	ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)	คิดเป็นร้อยละของการ ประหยัดเชื้อเพลิง
ติดกันชนท้าย	-0.0488	-2.92
ติดกำบังล้อ	-0.0488	-2.92
ปิดท้ายกระบะ	0.1296	7.58
เสริมหลังคาคนขับ	-0.0792	-4.63
ติดอุปกรณ์กันแมลง	-0.0368	-2.15
ติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา	-0.1800	-10.53

5.2 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน สามารถทราบถึงอัตราการเพิ่มหรือลดเงินทุนที่ต้องจ่ายกับน้ำมันที่เราต้องใช้กับรถบรรทุกเล็กกว่ามากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับสถานะด้านการตลาดของเชื้อขายน้ำมัน ซึ่งในปัจจุบันก็ทราบกันคืออยู่แล้วว่า เชื้อเพลิงที่ใช้กับรถบรรทุกเล็กที่เราใช้อยู่เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งกำลังจะหมดไป และยิ่งนับวันก็มีราคาที่สูงขึ้น หากกรณีที่ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงก็ย่อมเป็นผลดีต่อผู้ที่นำไปปฏิบัติ แต่ต้องคำนึงก่อนว่า ก่อนที่จะมีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการเสียเงินลงทุนกับการซื้ออุปกรณ์เพื่อมาปรับแต่งรูปทรงของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้น แต่ละยี่ห้อก็ย่อมมีราคาที่แตกต่างกัน แล้วแต่ละบุคคลที่จะนำมาใช้ โดยบางครั้งราคาที่เราซื้ออุปกรณ์เสริม หรืออุปกรณ์แต่งรถบรรทุกเล็กนั้นมาซึ่งเชื่อว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้จริง แต่ในบางครั้งอายุของรถก็อาจจะหมดก่อนเวลาที่จะคุ้มทุน ดังนั้นจากข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ทราบแล้วจากหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องมาคำนวณหาราคาที่ต้องจ่ายกับน้ำมัน

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ของการคำนวณราคาน้ำมันที่ลดหรือเพิ่มจากราคาเดิมที่ต้องจ่ายจากกรณีปกติ ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับราคาอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ มาคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุน โดยกำหนดที่ระยะเวลา 1 เดือน การใช้งานของรถบรรทุกเล็กในประเทศไทยโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 3,000 km และราคาของน้ำมันดีเซล ราคาลิตรละ 27.59 บาท (อ้างอิงจาก กุมภาพันธ์ 2553) ราคาอุปกรณ์เสริมที่ต้องจ่ายคิดที่ราคาท้องตลาด และเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก ดังภาพ 5.1 ความเร็วของรถที่ใช้งานคิดที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 5.5 มาใช้ในการคำนวณ โดยจากตารางที่ 5.5 นั้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงคือ อุปกรณ์ปิดกระบะท้าย โดยสามารถหาระยะเวลาคู่มทุนได้ดังนี้

ต้นทุน ราคาที่ปิดกระบะท้าย 2000 บาท

$$\text{ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถประหยัดน้ำมันได้ } 0.1296 \times \frac{3000}{100} = 3.888 \text{ ลิตร}$$

$$\text{คิดเป็นเงิน } 3.888 \times 27.59 = 107.27 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ระยะเวลาคุ้มทุน คือ $\frac{2000}{107.27} = 18.54$ เดือน หรือประมาณ 1 ปีครึ่ง



ภาพที่ 5.2 อุปกรณ์ปิดท้ายกระบะ

บทที่ 6

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อรถบรรทุกเล็กนั้นมีความสำคัญมาก เพราะถ้ามีการออกแบบให้ถูกต้องด้านอากาศพลศาสตร์แล้วจะช่วยลดการใช้พลังงานของรถและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของรถอีกด้วย นอกจากนี้การเลือกใช้อุปกรณ์เสริมต่างๆ ก็มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงด้วย โดยจากการวิจัยนี้

ในการศึกษานี้ ทำการศึกษาโดยใช้อุโมงค์ลมและมีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลข (CFD) โดยใช้โปรแกรม

ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์ที่มีการติดตั้งขวางการไหลของอากาศจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศมากขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านของอากาศมากขึ้น สัมประสิทธิ์แรงต้านก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย มีผลต่อการใช้เชื้อเพลิงมากขึ้น ซึ่งได้แก่ กันชนท้าย , กางบังล้อ , อุปกรณ์เสริมหลังคาคอนซ็อบ , อุปกรณ์กันแมลง , และอุปกรณ์วางของบนหลังคา ส่วนอุปกรณ์ที่ลดการหมุนวนของอากาศจะช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ ทำให้การใช้เชื้อเพลิงน้อยลง คือ อุปกรณ์ปิดท้ายกระบะ

6.1 สรุปผลจากการวิจัย

ในการทดสอบใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดกับมอเตอร์ ขนาด 3.7 kW มีเครื่องมือควบคุมมอเตอร์ (Inverter) เพื่อปรับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง มีความเร็วที่ 10 ถึง 25 m/s (36 - 90 km/hr) ใช้บาร์โรมิเตอร์ (Barometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็ว ใช้ทดสอบแบบจำลอง ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็แรงที่อากาศกระทำกับแบบจำลอง รถบรรทุกเล็ก นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการที่ 6.1

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (6.1)$$

โดยที่ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม, F_D คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) และ A คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (m^2) โดยนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ใช้สมการจำลองความปั่นป่วน k-epsilon จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจากการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จาก

การทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข จะให้ค่าสูงกว่าการทดสอบในอุโมงค์ลมเล็กน้อย (ซึ่งได้ใช้เงื่อนไขการคำนวณ CFD ดังนี้คือ

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD

โปรแกรม GAMBIT	
ขอบเขตทางด้านเข้า (Inlet boundary condition)	Velocity inlet
ขอบเขตทางด้านออก (Outlet boundary condition)	Pressure outlet
จำนวนกริด	700,000 – 1,000,000 cell
โปรแกรม FLUENT	
ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)	Segregated Solver
ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)	Implicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)	Standard k-epsilon (2eqn)
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาคาการไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

โดยได้ใช้เงื่อนไขการคำนวณ นำมาจำลองการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็กที่มีการติดอุปกรณ์เสริม 7 กรณี ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 กรณีรถบรรทุกปกติ (Case 1 normal)

กรณีที่ 2 กรณีติดกันชนด้านหลัง (Case 2 rear bumper)

กรณีที่ 3 กรณีติดที่บังล้อ (Case 3 fender)

กรณีที่ 4 กรณีปิดกระบะท้าย (Case 4 covered pick-up box)

กรณีที่ 5 กรณีเสริมบริเวณบนหลังคาคนขับ (Case 5 adjust on driver roof)

กรณีที่ 6 กรณีติดอุปกรณ์กันแมลงบนฝากระโปรงรถ (Case 6 bug deflector)

กรณีที่ 7 กรณีติดที่วางของบนหลังคาคนขับ (Case 7 roof rack)

เป็นการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดจริง ทดสอบที่ความเร็ว 36 - 126 km/hr (Reynolds number $1.2 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$) จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ดังสมการที่ 6.2

$$F_D = \int_{front} p \cos \theta dA - \int_{back} p \cos \theta dA \quad (6.2)$$

พบว่า ทัศนียภาพที่ขรุขระ ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น เนื่องจากลดการปะทะของอากาศบริเวณท้ายกระเบาะ ทำให้ลดการหมุนวนของอากาศ และจะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและต่ำกว่าทุกกรณีข้างต้น โดยทัศนียภาพที่ขรุขระจะลดสัมประสิทธิ์แรงต้านจาก 0.475–0.435 (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ 7.58 % ทัศนียภาพที่ขรุขระของบนหลังคา เพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านเป็น 0.523 เพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็น 10.53 % ส่วนกรณีอื่นๆนั้นเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเล็กน้อย ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย (เครื่องหมาย ลบ คือ ลดการใช้ น้ำมัน)

กรณี	ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)	เปอร์เซ็นต์ของการ ประหยัดน้ำมัน
ติดกันชนท้าย	0.0488	2.92
ติดกำบังล้อ	0.0488	2.92
ปิดท้ายกระเบาะ	-0.1296	-7.58
เสริมหลังคาคนขับ	0.0792	4.63
ติดอุปกรณ์กันแมลง	0.0368	2.15
ติดอุปกรณ์วางของบนหลังคา	0.1800	10.53

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ผลการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสถานะในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กนั้นไม่สามารถกำหนดให้เหมือนสถานะจริงได้ทุกเงื่อนไข ทั้งในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม หรือ CFD ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา เพื่อให้มีการพัฒนา หรือนำปัญหาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับด้านอากาศยานพลศาสตร์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

ปัญหาจากอุโมงค์ลม เนื่องจากอุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ความเร็วที่ใช้ทดสอบค่อนข้างต่ำ ซึ่งไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบ เพื่อยืนยันความถูกต้องกับผลที่ได้จาก CFD ที่ความเร็วสูงได้ ซึ่งอาจจะมีผลที่แตกต่างกัน เนื่องจากผนังของอุโมงค์ลม กับผนังจำลองของ CFD ไม่สามารถกำหนดให้แน่ชัดได้ว่ามีความคล้ายคลึงกันมากเท่าไร ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ต่างกัน ในสถานะที่

ความเร็วของอากาศสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างอุโมงค์ลม ขนาด ส่วนกำลังที่ใช้ดูดอากาศที่สูงขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องที่หลากหลาย ๆ สภาวะ

ปัญหาของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของ CFD ในกรณีการกำหนดขอบเขต และเงื่อนไขที่มีโดเมนขนาดใหญ่ และต้องการกริดที่มีความละเอียดสูง โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าหน่วยความจำที่ค่อนข้างสูง แต่ก็ยังเป็นปัญหาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่อนข้างสูง และเป็นข้อจำกัดของการกำหนดโดเมนที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการแก้ปัญหาควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้

การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขของ CFD ให้มีสถานะให้เหมือนจริง 100 % นั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของ ความดัน อุณหภูมิ ความเร็วของอากาศ หรือทิศทางของอากาศ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเพื่อใช้ในการจำลองหลายกรณีที่มีสภาวะต่างกัน เพื่อค่าที่ได้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องมากขึ้น

ความละเอียดของรูปร่างแบบจำลอง เป็นสิ่งที่ต้องคำนึง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองนั้น รูปร่างย่อมไม่มีความเหมือนจริงได้ 100 % ซึ่งจะทำได้ ค่าที่ได้ มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างแบบจำลองให้เหมือนจริงและถูกต้องให้มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล. “อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถยนต์ขนาดต่างๆที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19. น. 108-124. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กเพื่อการประหยัดพลังงานโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. น.543-553. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. น.231-237. โรงเรียนนายเรืออากาศ, 2550.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 1. น.87-95. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเพื่อการประหยัดพลังงานโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. น.543-553. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. น.225-237. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- ปรัชญา มุกดา และกุลเชษฐ เพียรทอง. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกเล็กโดยการจำลองเชิงตัวเลข,” ในการประชุมวิชาการวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. น.129-137. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค, 2550.
- ปรัชญา มุกดา, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน,” ในงานการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 (Thailand Research Expo 2009) 26-30 สิงหาคม 2552.
- ปรัชญา มุกดา, อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการใช้พลังงานน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 4-7 พฤษภาคม 2552.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- ปรัชญา มุขดา, อนุชา สายสร้อย กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. . “การปรับปรุง ด้านอากาศพลศาสตร์ของท้ายกระบะรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการคณิต เทคโนโลยีอุตสาหกรรม. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 2552.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กกรณีวิ่งตามกัน,” วารสาร ม. อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 : มกราคม-เมษายน, 2552.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 : มกราคม-มิถุนายน 2552.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปีที่1 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2551.
- ปราโมทย์ เศษอำไพ. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล.
กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- วินัย ศรีอำพร. กลศาสตร์ของไหล : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541.
- วีรชัย ชัยวรพฤษ และ ชวลิต กิตติชัยการ, การศึกษาทำนายค่าแรงต้านและแรงกดของอากาศผ่านรถแข่ง, 2546.
- อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. “การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เมษายน – มิ.ย. 2546.
- Ahmed, S.R. and Baumert, W. “The structure of wake flow behind road vehicles,” ASME Journal of Fluids Engineering. 101:201-220,1979.
- Ahmed, S.R. “Influence of base slant on wake structure and drag of road vehicles,” ASME Journal of Fluids Engineering. 105:429-434,1983.
- Alexander, D. “Reducing drag in future vehicles,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 88:120:144, 2000.
- Grosche, F.R. and Meier, G.E.A. “Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 89:1201:1218, 2001.
- Hucho, W.H. “Aerodynamics of road vehicles,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 94:334:361, 2006.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- Hucho, W.H. “Aerodynamics of road vehicles state of the art and tasks for the future,”
Automotive Dynamics Stability and Controls. 56:256-278, 2006.
- P.B. Hertz and P.R. Ukrainetz , “ Auto-aerodynamic Drag-force Analysis ” 1966.
- Leuschen, J. and Cooper, K.R.“Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and
Prototype,Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-
Trailers”. 2006 SAE International. 06CV-222. 2006.
- Munson B.R., Young D.F. and Okiishi T.H., “Fundamentals of fluid mechanics”, 4 th Edition. ,
Wiley , New York. 2002.
- Scibor,A.J. “Road vehicle aerodynamics,” Edition Pentech Press Limited. 12-34, 1984.
- Suwanpratip T. , “Automotive Engineering” 3rd Edition., Vitayaput, Bangkok. 2001.
- Van Dam, C.P. “Recent experience with different methods of drag prediction”. Progress in
Aerospace Sciences. 35: 751-798. 1999.

ภาคผนวก

