



รายงานโครงการวิจัย

การพัฒนาอุปกรณ์เสริมเพื่อการลดแรงต้านของรถกระบะ
Accessories Development for Drag Reduction of Pickup

ปรีชญา มุขตา และคณะ

เมษายน 2560

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. อุทัย ผ่องศรีมี ที่ปรึกษาโครงการวิจัย ที่ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ให้การช่วยเหลือและให้กำลังใจที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มศึกษาจนกระทั่งเสร็จสิ้นโครงการวิจัย จนกระทั่งรายงานฉบับสมบูรณ์ ขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ผลักดัน อำนวยความร่วมมือในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในโครงการวิจัย ตลอดจนบุคลากร นักศึกษาทุกคน ขอขอบคุณ บริษัท ฟอร์ด ป รุ่งโรจน์เพชรบุรี ที่ช่วยให้ความร่วมมือในการสนับสนุนรถกระบะ ใช้ทดสอบหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จนทำให้การทดสอบสำเร็จลงไปได้ด้วยดี และโครงการนี้จะเกิดขึ้นมาได้ต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่อุดหนุนงบประมาณกับโครงการวิจัย ตามมติคณะรัฐมนตรี ปีงบประมาณ 2559

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัยที่ได้ให้กำเนิด อบรมและเลี้ยงดูรวมถึงพระคุณคุณครูบาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตั้งแต่ระดับชั้นประถมศึกษา มัธยมศึกษา จนถึงระดับมหาวิทยาลัยทุกๆ ท่านมา ณ ที่นี้

ปรัชญา มุขดา และคณะ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายและสัญลักษณ์ย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.6 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของการศึกษา	6
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์	8
2.2 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ด้วยอุโมงค์ลม	15
2.3 หลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)	18
2.4 การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ด้วย CFD	19
2.5 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	28
2.6 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ	30
2.7 สมการมูลฐานของการไหล	42
2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การทดสอบแรงต้านระหว่างการทำทดลองในอุโมงค์ลมและการจำลองด้วย CFD เพื่อยืนยันผล	56
3.2 การทดสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดจริงของกรณีติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้วย CFD	63

สารบัญ (ต่อ)

3.3	การทดสอบสมรรถนะของรถกระบะ (Dynamometer test)	70
3.4	การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	76
บทที่ 4 ผลการทดลอง		
4.1	ผลการทดสอบแรงต้านแบบจำลองรถกระบะระหว่างการทดลอง ในอุโมงค์ลมกับ CFD	79
4.2	ผลการทดสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดจริงกับกรณีติดตั้ง อุปกรณ์เสริมด้วย CFD	80
4.3	ผลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน	92
4.4	วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	100
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการทดลอง	103
5.2	ข้อเสนอแนะ	104
เอกสารอ้างอิง		106
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก บทความเผยแพร่ของโครงการวิจัย		111
ภาคผนวก ข ประวัติหัวหน้าของโครงการวิจัย		119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ยอดขายการผลิตรถยนต์ประเภทต่างๆ	1
1.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (เปรียบเทียบกับกรณีปกติ)	4
2.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD	25
3.1 จำนวนกริดของแต่ละกรณี	68
3.2 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไข	69
3.3 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ	69
3.4 เงื่อนไขขอบเขตโปรแกรม Fluent	70
3.5 ข้อมูลทางเทคนิคของ LPS 3000	72
3.6 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค	73
4.1 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s	81
4.2 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s	81
4.3 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s	82
4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s	82
4.5 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s	82
4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 35 m/s	83
4.7 ค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (ΔC_D : + เพิ่ม, - ลด)	93
4.8 ค่าตัวแปรต่างๆ จากการทดสอบด้วย Dynamometer tests	97
4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจาก CFD	97
4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันด้วยสมการที่ 4.3 คำนวณ	98
4.11 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (μ) การคำนวณ (CFD) และทดสอบจริง (Experiment)	99
4.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (จริง) และระยะสะสมของในแต่ละกรณี	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ตกแต่งรถกระบะที่มีขายในท้องตลาด(แครีบอย,/2557)	2
1.2 แบบจำลองรถกระบะที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้วย CFD (โครงการวิจัย ปี 2554)	3
1.3 สภาวะการไหลของอากาศที่แตกต่างกันจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริม 4 แบบ (โครงการวิจัย ปี 2554)	7
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์	8
2.2 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์	9
2.3 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆ ของรถยนต์นั่ง	10
2.4 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน	10
2.5 การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์แบบนั่งที่มีชื่อว่า Boat-tailing	11
2.6 อุปกรณ์ปิดช่องลมด้านหน้ารถ (Grille block)	12
2.7 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค	13
2.8 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน	13
2.9 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน	14
2.10 สัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมเจาะรู และไม่เจาะรู	15
2.11 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่	16
2.12 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน	18
2.13 การไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ	19
2.14 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองของรถติดสปอยเลอร์	21
2.15 การกระจายความดันระนาบตามขวางที่บริเวณผิวของรถที่ไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์	21
2.16 ลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านรถที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์บนระนาบสมมาตร	22
2.17 มุม α , β , γ	23
2.18 การเกิดเวคส่วนท้ายกระบะของรถบรรทุกเล็ก โดย CFD Cooper	24
2.19 การเปลี่ยนแปลงของความดัน และความเร็วที่เกิดขึ้นกับรถคันหน้า (Lead car) และคันหลัง (Trail car) ตรงกลางของรถ ตามแนวแกน x	26
2.20 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X10	27
2.21 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X12.5	29
2.22 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH	29
2.23 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.24 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ (a) แรงเนื่องจากความดัน (b) แรงเนื่องจากความหนืด (c) แรงต้านและแรงยก	31
2.25 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็กๆ บนผิวของวัตถุ	32
2.26 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ	34
2.27 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน	35
2.28 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน สำหรับของไหลสมมุติ	36
2.29 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก	37
2.30 ตำแหน่งของจุดแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ (b) ทรงกลมผิวขรุขระ	37
2.31 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล	38
2.32 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน	39
2.33 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อน ได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง	39
2.34 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต	40
2.35 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์	41
2.36 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต	41
2.37 พลั๊กซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการ การสร้างสมการเชิงอนุพันธ์มวล	42
2.38 รูปแบบแสดงแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก	43
2.39 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy	45
2.40 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Segregated solver	48
2.41 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Coupled solver	49
2.42 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน	51
3.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลต่างๆ	57
3.2 การกำหนดจำนวนกริด	58
3.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริด	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.4 ลักษณะกริด (Grid) แบบ Tri/Tet ของแบบจำลองเมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	59
3.5 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม	61
3.6 แบบจำลองรถกระบะที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม	62
3.7 อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบ	63
3.8 รูปร่างและเงื่อนไขในการทดสอบทั้ง 7 กรณี	65
3.9 เงื่อนไขขอบเขตการจำลอง	67
3.10 เงื่อนไขขอบเขตการจำลอง	68
3.11 ระบบการทำงานของไดนาโมมิเตอร์	71
3.12 การทดสอบสมรรถนะของรถกระบะ	72
3.13 การแสดงผลการทดสอบของไดนาโมมิเตอร์	75
3.14 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถกระบะเพื่อการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ของกรณีต่างๆ	76
4.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบจำลองระหว่าง CFD และอุโมงค์ลม ($R^2 = 5\%$)	80
4.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วต่างๆ ทั้ง 7 กรณี	84
4.3 เส้นแสดงการกระจายตัวของความดัน และความเร็ว	87
4.4 ระดับความดัน (ซ้าย) และระดับความเร็ว (ขวา)	89
4.5 อัตราการกินน้ำมันกับความเร็วกำหนด	94
4.6 อัตราการกินน้ำมันแต่ละระดับความเร็ว	95
4.7 ผลการทดสอบกำลังตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น (Dynamometer Test)	96
4.8 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเฉลี่ยที่เกิดจากการขับขึ้นจริง (μ)	98
4.9 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการคำนวณ CFD และการทดสอบจริง ทั้ง 7 กรณี	100

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
C_M	สัมประสิทธิ์โมเมนต์ปีกงย	-
C_Y	สัมประสิทธิ์แรงต้านข้าง	-
C_R	สัมประสิทธิ์โมเมนต์จากการโคลง	-
C_N	สัมประสิทธิ์ โมเมนต์จากการส่าย	-
F_D	แรงต้านรวม	N (นิวตัน)
Re	Reynolds number	-
m/s	ความเร็ว	เมตรต่อวินาที
km/hr	ความเร็ว	กิโลเมตรต่อชั่วโมง
m	ความยาว	เมตร
cm	ความยาว	เซนติเมตร
mm	ความยาว	มิลลิเมตร
m^2	พื้นที่	ตารางเมตร
hp	แรงม้า	kW (กิโลวัตต์)
V	แรงดัน	Volt (โวลต์)
ν	ความหนืดจลน์	m^2/s (ตารางเมตรต่อวินาที)
n	ความเร็วรอบต่อเวลา	rpm (รอบต่อนาที)
α	ค่ามุมเอียง	องศา
θ	ค่ามุม	องศา
%	เปอร์เซ็นต์	-
dF	แรงรวมที่กระทำในแนวแกน	N (นิวตัน)
P	ความดัน	pascal (ปาสคาล)
C_p	สัมประสิทธิ์ความดัน	-
D_p	แรงต้านจากความดัน	N (นิวตัน)
D_f	แรงต้านเนื่องจากแรงเสียดทาน	N (นิวตัน)
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3 (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
μ	ความหนืดสัมบูรณ์	$N.s/m^3$ (นิวตันวินาทีต่อลูกบาศก์เมตร)
τ	หน่วยแรงเฉือน	N/m^2 (นิวตันต่อตารางเมตร)
γ	น้ำหนักจำเพาะ	N/m^3 (นิวตันต่อลูกบาศก์เมตร)
Z	ระดับความสูง	m (เมตร)
u, v, w	ความเร็ว	m/s (เมตรต่อวินาที)
t	เวลา	s (วินาที)
U'	การไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	-
a	ความเร่ง	m/s^2 (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
m	มวล	kg (กิโลกรัม)
D	มิติ	-
Δ	เฉลี่ย	-
K	ค่าคงที่การนำความร้อนของของไหล	N/s K
$k - \epsilon$	แบบจำลองความปั่นป่วน k - epsilon	-
Re_1	เลขเรย์โนลด์นัมเบอร์	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ในประเทศไทย ปัจจุบันถือเป็นศูนย์การผลิตแห่งเอเชีย (Detroit of Asian) และประเทศไทยยังมีการใช้รถยนต์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจากยอดการผลิตรถยนต์ในปี พ.ศ. 2536 จนถึงปัจจุบัน ยอดขายเพิ่มขึ้นกว่า 500% ซึ่งข้อมูลจากการผลิตรถยนต์ในปี พ.ศ. 2555 และ 2556 มีจำนวนหลายล้านคันต่อปี (ตารางที่ 1) ทำให้ความต้องการใช้เชื้อเพลิงในประเทศเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมรวมทั้งภาครัฐ จึงพยายามคิดค้นวิธีต่างๆ ที่จะสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ เนื่องจากประเทศผลิตเชื้อเพลิงได้อย่างจำกัด อาทิเช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น, การใช้เชื้อเพลิงอื่นมาทดแทนน้ำมัน, หรือการใช้พลังงานอื่นมาร่วมกับน้ำมันเป็นต้น ก็เป็นหนทางที่ทำให้น้ำมันปิโตรเลียมที่มีอย่างจำกัดนั้นใช้ได้ยาวนานเท่าที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รถกระบะหรือที่เรียกว่ารถปิกอัพ (pickup) ซึ่งมียอดขายในประเทศไทยเป็นอันดับ 1 เมื่อเทียบกับรถยนต์ประเภทอื่น

ตารางที่ 1 ยอดขายการผลิตรถยนต์ประเภทต่างๆ

ประเภท	ยอดผลิตรถยนต์ (คัน)		เปลี่ยนแปลง (%)
	ปี 2556	ปี 2555	
รถยนต์นั่ง	1,071,076	957,623	+11.8
รถปิกอัพ	1,220,096	1,291,641	-5.4
รถพีวีวี	112,817	160,611	-29.7
รถบรรทุก	52,341	43,260	+20.9
รวม	2,457,086	2,453,717	+0.14

ที่มา: กรุงเทพมหานคร 17 มกราคม 2557

การเกษตรและการท่องเที่ยว ถือเป็นรายได้หลักของประเทศ รวมทั้งการคมนาคมขนส่งในประเทศยังไม่มีประสิทธิภาพและความพอเพียงต่อความพอเพียงต่อความต้องการขนส่ง เป็นปัจจัยที่ทำให้ความต้องการใช้รถกระบะขนาด 1 ตันมีจำนวนมากที่สุด เพื่อใช้ในการขนส่งผลิตผลทางการเกษตร การเดินทาง บรรทุกสัมภาระต่างๆ เพราะมีความเหมาะสมกับสภาพถนน และภูมิประเทศในการเดินทาง ทำให้อุตสาหกรรมผลิตรถกระบะแต่ละรุ่น ผลิตออกมาแตกต่างกันในด้านรูปลักษณ์และ

คุณลักษณะในการใช้งาน ซึ่งผู้ผลิตมักออกแบบตามความต้องการของลูกค้าเป็นหลัก ถึงแม้ว่า ลูกค้า จะต้องการใช้ยี่ห้อและรุ่นเดียวกัน แต่ลูกค้าก็ยังต้องการที่แตกต่างกันในรายละเอียด เช่น มีการติดตั้ง อุปกรณ์เสริมกับรถกระบะ เพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน, ความปลอดภัย หรือเพื่อความ สวยงาม ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตและขายอุปกรณ์เสริม อุปกรณ์ตกแต่งรถกระบะเกิดขึ้นมากมาย อาทิ อุปกรณ์บังล้อหน้าหลัง อุปกรณ์ปิดท้ายกระบะ อุปกรณ์กันชนด้านหน้าและด้านหลัง อุปกรณ์เสริม หลังคาของรถกระบะ ฯลฯ ดังภาพที่ 1.1 ซึ่งอุปกรณ์เสริมที่กล่าวมา จะมีการติดตั้งภายนอกของตัวรถ กระบะ ซึ่งเท่ากับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างภายนอกของรถกระบะ หากมองในด้านอากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) การติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอกของตัวรถมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient) ของรถมีการเปลี่ยนแปลงและจะมีผลโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการ สิ้นเปลืองน้ำมัน



กันแมลง



กันสาด



กาบข้าง



คิ้วล้อ (หน้า)



คิ้วล้อ (หลัง)



บันไดข้าง

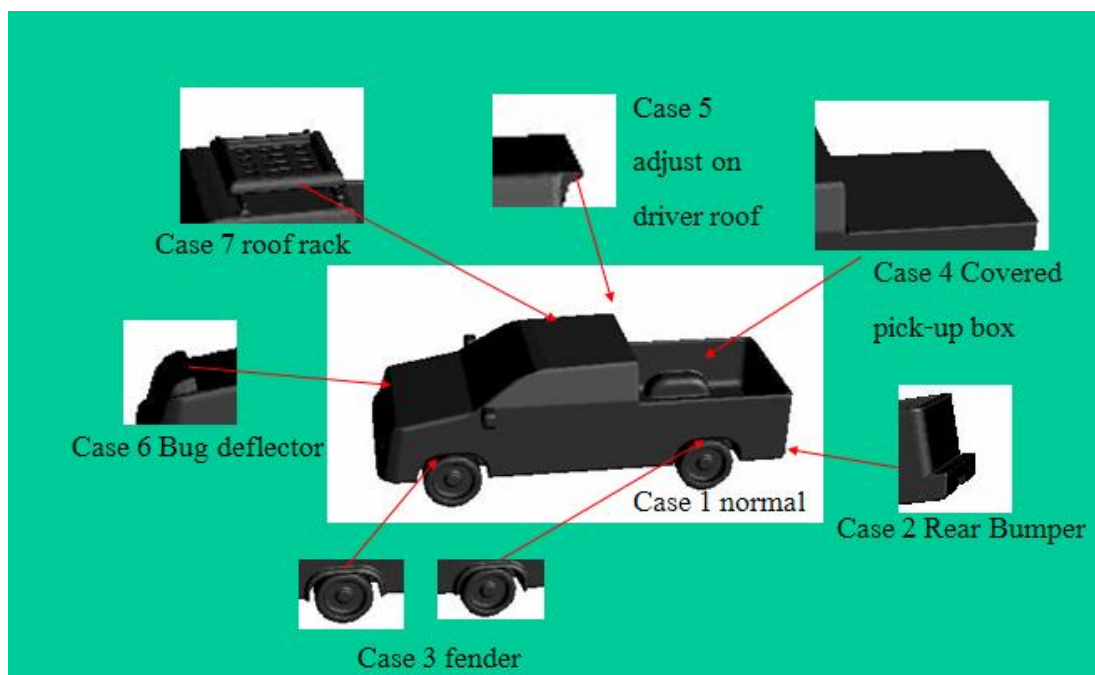


หลังคาครอบกระบะ



ฝาครอบกระบะ

ภาพที่ 1.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ตกแต่งรถกระบะที่มีขายในท้องตลาด(แครีบอย,/2557)



ภาพที่ 1.2 แบบจำลองรถกระบะที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้วย CFD (โครงการวิจัย ปี 2554)

จากโครงการวิจัยที่ได้ดำเนินการแล้ว ปี 2554 ได้มีการทดสอบแรงต้านของรถกระบะที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆ ด้วยการสร้างและทดสอบ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า CDF (Computational Fluid Dynamics) ตามภาพที่ 1.2 เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองเพื่อทดสอบแรงต้าน และสามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลผ่านของอากาศได้อย่างชัดเจนและจากโครงการดังกล่าว ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์เสริมเหล่านี้มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยตรง เช่นกรณีการติดตั้งหลังคาบรทุกของนั้น ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น หรือกินน้ำมันเพิ่มขึ้นถึง 10.53 เปอร์เซ็นต์ (เปรียบเทียบกับกรณีปกติ) และกรณีอื่นๆอีก ตามตารางที่ 1.2

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1.2 ทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดจากติดตั้งอุปกรณ์เสริม โดยที่ไม่ได้คำนึงหลักการของอากาศพลศาสตร์ หรือการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงต้าน ก็จะทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยเปล่าประโยชน์ และสามารถแบ่งตำแหน่งของอุปกรณ์เสริมที่มีผลกับแรงต้านของรถกระบะได้ 5 ส่วน คือ 1.ส่วนนํ้ารถ 2.ส่วนบนห้องผู้โดยสาร 3.ส่วนกระบะ 4.ส่วนท้ายกระบะ 5. ส่วนด้านข้างรอบตัวรถ

ตารางที่ 1.2 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (เปรียบเทียบกับกรณีปกติ)

กรณี	ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)	อัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิง(%)
1.กรณีปกติ	-	-
2.ติดกันชนท้าย	+0.0488	+2.92%
3.ติดกำบังล้อ	+0.0488	+2.92%
4.ปิดท้ายกระบะ	-0.1296	-7.58%
5.เสริมหลังคาคนขับ	+0.0792	+4.63%
6.ติดอุปกรณ์กันแมลง	+0.0368	+2.15%
7.ติดอุปกรณ์วางของบนท้องผู้โดยสาร	+0.1800	+10.53%

หมายเหตุ: (เครื่องหมาย - คือลดการใช้น้ำมัน + คือการกินน้ำมันเพิ่มขึ้น) ของโครงการวิจัย ปี 2554

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ เป็นการวิจัยต่อยอดจากโครงการวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ของรถกระบะ โดยใช้โปรแกรม CFD และอุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือในการทดสอบ จะเน้นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอกรอบตัวรถกระบะ แล้วนำมาคำนวณเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ว่าแต่ละอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับตัวรถนั้นทำให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ลดลงหรือเพิ่มขึ้นได้อย่างไร

หลังจากนั้น ติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถกระบะจริง และทดลองวิ่งจริง เพื่อตรวจสอบความสอดคล้องอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันกับผลจากการคำนวณ (CFD) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ อุปกรณ์เสริมที่มีขายในท้องตลาด นำไปสู่การออกแบบ และผลิตอุปกรณ์เสริมรถกระบะที่ประหยัดเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อได้หลักการที่ถูกต้องในการลดแรงต้านตามหลักอากาศพลศาสตร์ของรถกระบะ

1.2.2 เพื่อได้แนวทางในการออกแบบ และเลือกใช้อุปกรณ์เสริมรถกระบะที่สามารถประหยัดน้ำมัน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่ รูปทรงปกติ และรูปทรงที่ติดอุปกรณ์เสริมในประเทศไทย ในช่วงความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

1.3.2 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Gambit สร้างแบบจำลอง และคำนวณสภาวะการไหลของอากาศโดยโปรแกรม Fluent ของแต่ละกรณี ก่อนสร้างเพื่อติดตั้งและทดสอบจริง

1.3.3 ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ความเร็วอากาศ ความดันอากาศ โดยที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม 5 ส่วนหลักของรถกระบะคือ

3.3.1.ส่วนหน้ารถกระบะ

3.3.2.ส่วนบนห้องผู้โดยสารรถกระบะ

3.3.3.ส่วนกระบะ

3.3.4.ส่วนท้ายกระบะ

3.3.5.ส่วนด้านข้างรอบตัวรถ

1.3.4 ใช้อุโมงค์ลมทดสอบแรงต้านของโมเดลรถกระบะ เพื่อยืนยันผลกับการจำลองด้วย CFD

1.3.5 ใช้รถกระบะ 4 ประตู ยี่ห้อ Ford Ranger เครื่องยนต์ 2.5 ลิตร ในการทดสอบจริง

1.3.6 ใช้ Dynamometer ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังของเครื่องยนต์รถกระบะ

1.3.7 ติดตั้งอุปกรณ์เสริมตามท้องตลาดของแต่ละส่วนมาติดตั้งกับรถกระบะจริง

1.3.8 การทดสอบจริง พฤติกรรมการขับที่ ความเร็วที่ใช้เหมือนการใช้งานปกติ

1.3.9 ใช้ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4 (ถนนเพชรเกษม) เพชรบุรี – ชุมพร เป็นเส้นทาง การทดสอบ

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือ วารสาร และบทความประชุมวิชาการ ต่างๆ

1.4.2 ศึกษาทฤษฎีของแรงต้าน รวมถึงแรงที่ของไหลกระทำกับวัตถุ

1.4.3 ใช้ CFD ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองรถกระบะ

1.4.4 ใช้อุโมงค์ลมทดสอบแบบจำลองรถกระบะ

1.4.5 เปรียบเทียบผล CFD กับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม เพื่อผลที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ

1.4.6 CFD หาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกระบะแบบจำลองขนาดจริงทั้งหมด 7 กรณี คือ

(a) Normal

(b) Wildtrak

(c) SUV

(d) Arrow dynamics

(e) Covered Pick-up box

(f) Front grill

(g) Sedan

1.4.7 คำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

1.4.8 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังของเครื่องยนต์รถกระบะ ด้วย

Dynamometer

1.4.9 ติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถกระบะและทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบกับผล CFD

1.4.10 คำนวณอัตราการลงทุนการปรับปรุงรูปร่างรถกับการประหยัดน้ำมัน

1.4.11 วิเคราะห์ และสรุปผล

1.4.10 เขียนรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถหาแนวทางในการปรับปรุงส่วนอื่น ของรถกระบะให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงอีกได้ โดยการวิเคราะห์จากการจำลองเชิงตัวเลข

1.5.2 ได้องค์ความรู้ในการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดอื่น โดยใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลข

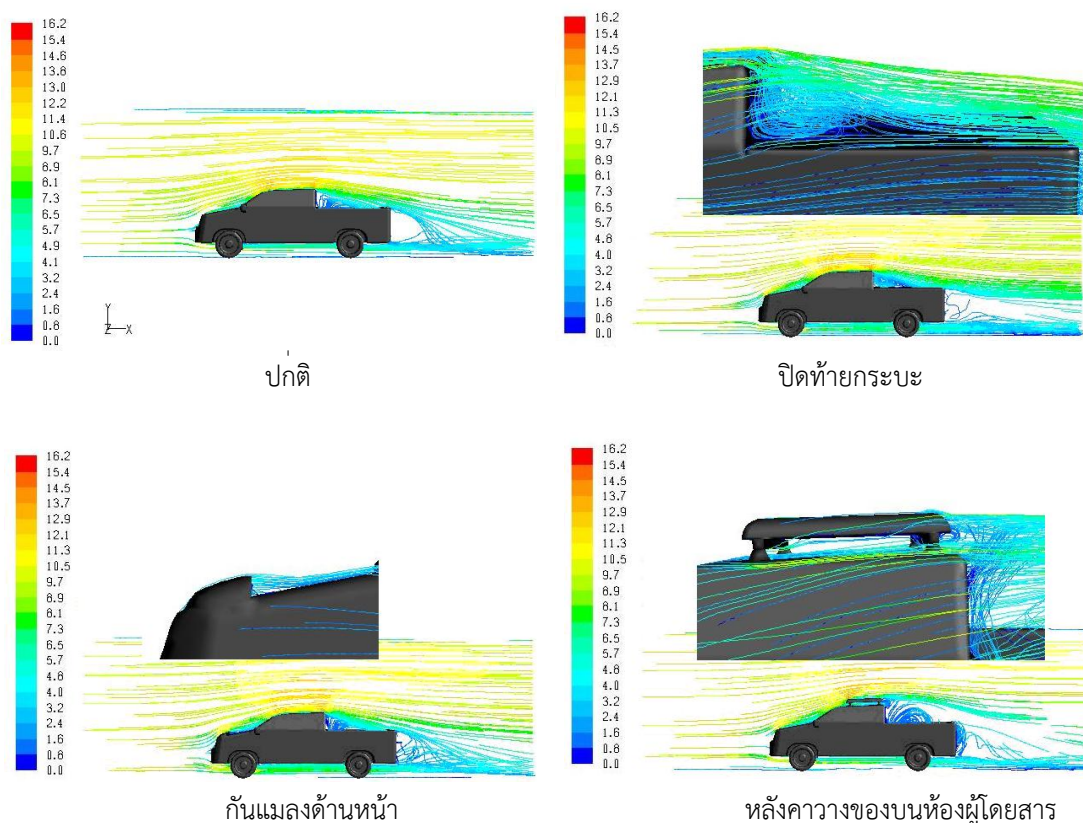
1.5.3 ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ต่อการใช้งานรถกระบะให้เหมาะสมในแง่อากาศพลศาสตร์

1.5.4 เสนอแนวทางในการประหยัดพลังงานของการใช้รถกระบะ

1.5.5 ได้เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลการอ้างอิงทางวิชาการ

1.6 ทฤษฎี สมมุติฐาน (ถ้ามี) และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

การใช้งานรถกระบะในประเทศไทย ส่วนใหญ่ในการติดตั้งอุปกรณ์เสริมนั้น มักไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งโดยทั่วไป มักจะเห็นการติดตั้งอุปกรณ์เสริมโดยเน้นความสวยงามเป็นหลัก ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่ผิดหลักด้านอากาศพลศาสตร์ ก็จะทำให้เกิดแรงต้านอากาศที่สูงขึ้น ทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยไม่จำเป็น แต่หากมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมอย่างถูกต้องแล้ว ก็จะทำให้ลดแรงต้านหรือลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นจากรูปที่ 4 (เป็นโครงการวิจัย ปี 2554) เป็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการไหลของอากาศ 4 กรณี นำมาเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบความแตกต่างของสภาวะการไหลของอากาศ เพื่อนำมาวิเคราะห์เบื้องต้นของค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงต้าน ว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้อย่างไร



ภาพที่ 1.3 สถานะการไหลของอากาศที่ต่างกันจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริม 4 แบบ
(โครงการวิจัย ปี 2554)

จากภาพที่ 1.3 สามารถสังเกตได้ว่า อุปกรณ์เสริมมีผลกระทบกับการไหลของอากาศ ทำให้เกิดลักษณะการหมุนวนอากาศที่ต่างกัน และทำให้ค่าแรงต้านที่ได้จากการทดสอบมีความแตกต่างกันด้วย (ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว จากผลในตารางที่ 1.2) ดังนั้นหลักสำคัญของการออกแบบอุปกรณ์เสริม คือ รูปลักษณ์ และตำแหน่งของการติดตั้ง ที่ทำให้อากาศที่ไหลผ่านตัวรถมีการไหลราบเรียบมากขึ้น เช่น กรณีปิดท้ายกระบะ อาจเป็นไปได้ว่าเป็นอุปกรณ์เสริมของกรณีนี้ ออกแบบและติดตั้งได้ถูกต้องตามหลักอากาศพลศาสตร์ เพราะทำให้การไหลของอากาศมีความราบเรียบขึ้น ส่งผลให้แรงต้านของอากาศลดลงแตกต่างจากกรณีอื่นๆ จากภาพที่ 1.3 ซึ่งตามที่กล่าวมาอาจจะจะเป็นคำตอบที่เหมาะสม จริงหรือไม่ ควรจะมีการศึกษาโดยละเอียดต่อไป เพราะฉะนั้น หากมีการศึกษาปรากฏการณ์นี้โดยละเอียด ก็จะทำให้ทราบสภาพการไหล ปัญหา ข้อมูล ความจริง นำมาออกแบบสร้าง ติดตั้งทดสอบจริง และเสนอแนวทางการแก้ไขที่เหมาะสมได้ ก็จะสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันได้ในระดับหนึ่ง

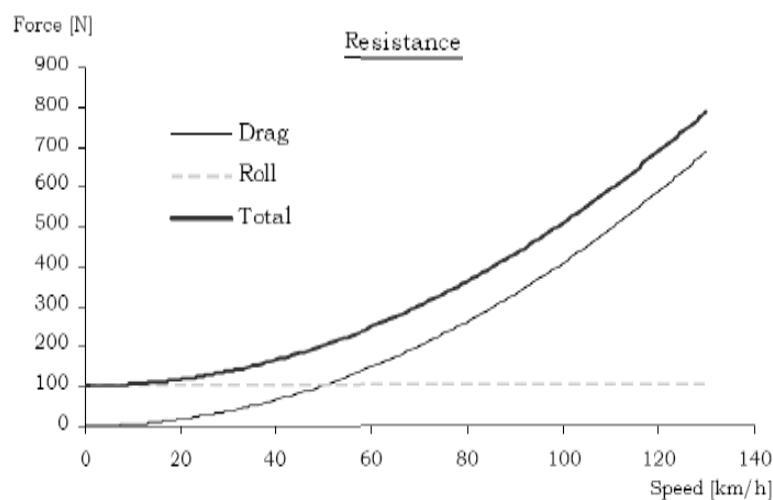
บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านอากาศยานศาสตร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดลองด้วยอุโมงค์ลม และการจำลองด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข (CFD) ที่นักวิจัยท่านอื่นได้ศึกษาหรือทำการวิจัยมาก่อน ถือเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญ ก่อนดำเนินวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ส่วนต่าง ๆ ต่อไป ดังนั้น สำหรับบทนี้ จะได้นำเสนอการศึกษาของงานวิจัยท่านอื่นที่ผ่านมา ซึ่งประกอบด้วยวิธีการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ทฤษฎีและหลักการที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหา อุปสรรคหรือผลกระทบที่เกิดขึ้น ผลสรุป และข้อดีของงานวิจัย เพื่อได้นำมาเป็นหลักการในนำองค์ความรู้มาพัฒนาในการปรับปรุงรูปทรงหรือวิธีที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กในงานวิจัยนี้

2.1 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์

วินัย ศรีอำพร [2] การไหลของอากาศรอบ ๆ รถยนต์ โดยอากาศครอบคลุมอยู่ผิวนอกของรถยนต์ เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลภายนอก (External flow) ซึ่งการศึกษาการไหลภายนอกมีส่วนสำคัญมากต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ จึงจำเป็นที่ต้องอาศัยหลักการของอากาศยานศาสตร์มาวิเคราะห์ ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ต่าง ๆ จะต้องพิจารณาที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของรถยนต์ คือแรงยกและแรงหน่วง (Lift and Drag) ทั้งสองแรงมีความสำคัญมากต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และความเหมาะสมเพื่อให้คุณสมบัติทางอากาศยานศาสตร์ที่ดี

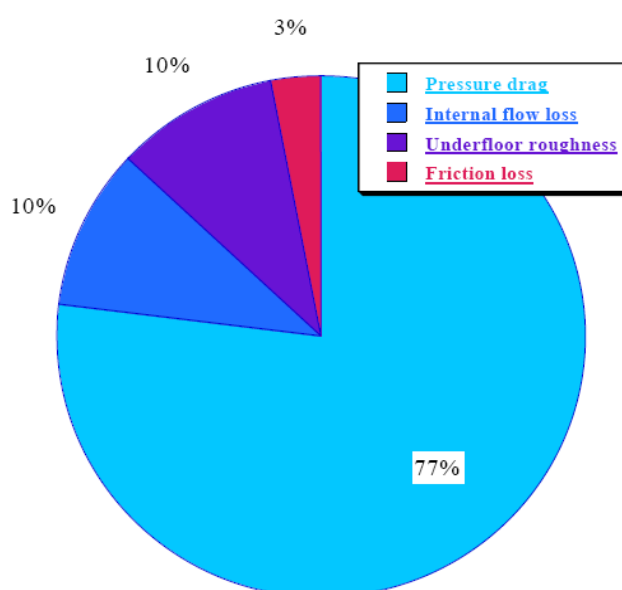


ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ Alexander [3]

ซึ่งรถยนต์ที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน จากแรงที่กระทำทั้งแรงยกและแรงหน่วง หากจะพิจารณาโดยรวมกันคือแรงต้านอากาศ Alexander [3] กล่าวว่า รถยนต์ทุกชนิดที่วิ่งบนถนนนั้น จะมีแรงต้านที่มีทิศทางสวนทางกับทิศทางการวิ่ง คือแรงเสียดทานที่เกิดจากยางสัมผัสกับถนนในขณะที่ล้อหมุนเพื่อวิ่งไปข้างหน้า และอีกอย่างหนึ่งคือแรงต้านอากาศ ซึ่งถ้ารถวิ่งแหวกอากาศออกไปที่มีความเร็วต่ำ แรงต้านอากาศจะน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแรงต้านการหมุน ถ้ารถวิ่งด้วยความเร็วสูงแรงต้านอากาศจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง ซึ่งแรงต้านอากาศจะเพิ่มขึ้นถึง 80 % ของแรงต้านทั้งหมด

จากภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อ จะคงที่ตลอดความเร็วที่รถยนต์วิ่ง และแรงต้านอากาศมีผลกระทบกับการเคลื่อนที่ มากกว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งแรงต้านอากาศจะมีค่ามากหรือน้อย ย่อมขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของรถยนต์

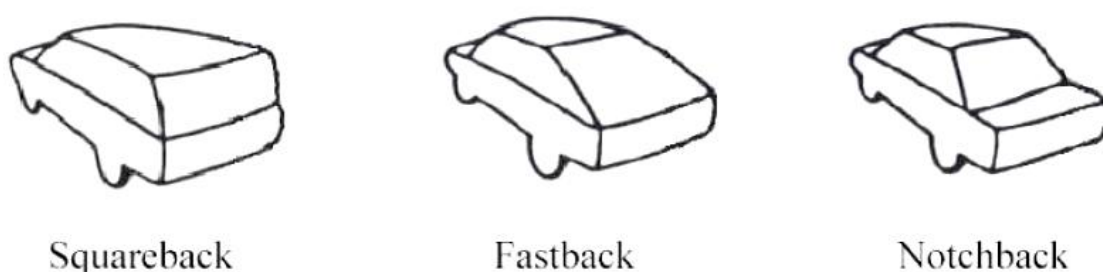
ดังนั้นในการศึกษา จึงมุ่งเน้นเฉพาะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์ ซึ่งลักษณะของแรงต้านที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่ง Hocho [4] พบว่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือแรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag), แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss), แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นรถยนต์กับพื้นถนน (Underfloor roughness), และแรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศกับผิวภายนอกรถยนต์ (Friction loss) โดยแต่ละลักษณะแรงต้านที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาก็จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน จะมีค่ามากหรือน้อย ก็จะขึ้นว่าส่วนใดของรูปทรงเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดลักษณะของแรงต้านนั้น ๆ มากหรือน้อย ภาพที่ 2.2 เป็นสัดส่วนของแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์แบบนั่ง ที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่ในช่วง 0.25 – 0.40



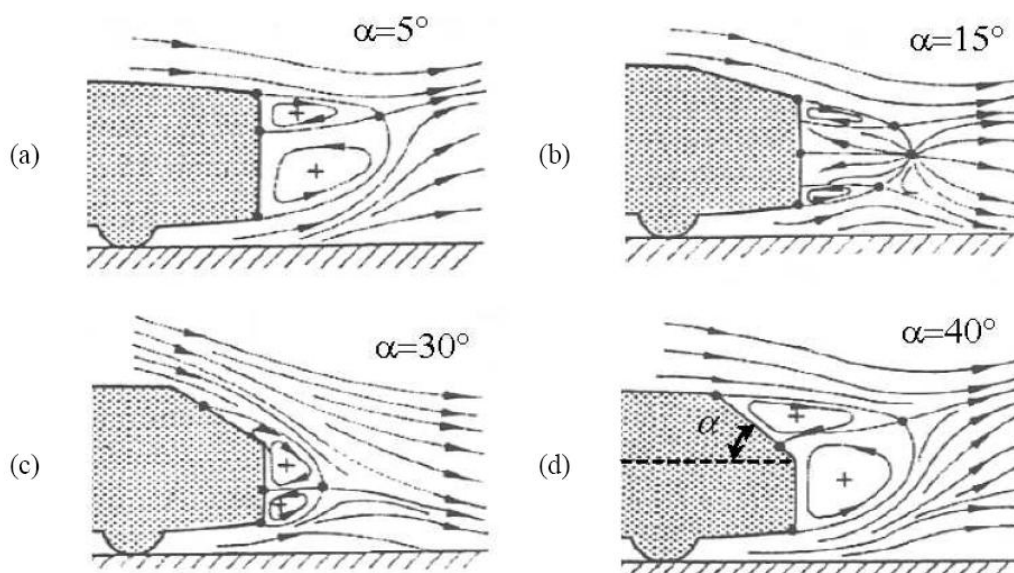
ภาพที่ 2.2 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ Hocho [4]

2.1.1 แรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag)

เป็นแรงต้านอากาศที่มีค่ามากที่สุด เกิดจากการที่อากาศปะทะพื้นที่ของรถยนต์ ที่มีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะส่งผลทำให้เกิดการปั่นป่วนของอากาศเมื่อไหลผ่านรถยนต์ ทำให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถยนต์ ซึ่งค่าแรงต้านอากาศจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถยนต์ โดยเฉพาะส่วนท้ายของรถยนต์ จะเกิดการหมุนวนของอากาศมาก โดย Ahmed and Baumert [5] ได้แบ่งลักษณะของรูปทรงท้ายของรถยนต์นี้ เป็น 3 ลักษณะ คือ ทรงท้ายสี่เหลี่ยม (Squareback), ทรงท้ายเฉียง (Fastback), และทรงท้ายบาก (Notchback) ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆ ของรถยนต์นี้ Ahmed and Baumert [5]



ภาพที่ 2.4 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่ต่างกัน Ahmed [6]

ซึ่งรูปทรงท้ายแต่ละรูปทรงก็จะส่งผลทำให้เกิดลักษณะการหมุนวนของอากาศที่ต่างกั น โดย Ahmed [6] 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 2.4

Scibor [7] ได้ทำการโมดิฟายรถ Pontiac Firefly ปี 1989 ซึ่งเป็นรถของเขาเอง โดยการประดิษฐ์ Boat-tail ขึ้นมาเอง ซึ่งมีโครงสร้างหลักเป็นอะลูมิเนียมและไม้อัด มีพื้นผิวเป็นกระดาษแข็ง น้ำหนักรวมประมาณ 5.5 กิโลกรัม อีกทั้งยังได้ติดตั้งเสกิร์ตปิดล้อหลังอีกด้วยดังภาพที่ 2.5 จากนั้นได้ทำการทดสอบเพื่อหาความแตกต่างระหว่างก่อนและหลังการโมดิฟาย ผลปรากฏว่าสามารถลดค่า C_d จาก 0.34 เหลือเพียง 0.23 เท่านั้น นั่นเท่ากับว่าลดลงถึง 30% ซึ่งส่งผลให้ประหยัดน้ำมันเพิ่มขึ้นอีก 15% Darin Cosgrove เติ้นี้เป็นเพียงเวอร์ชันต้นแบบเท่านั้น ถึงแม้จะเป็นเพียงเวอร์ชันต้นแบบแต่ผลการทดสอบที่ออกมาถือว่าน่าพอใจเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.5 การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์แบบหนึ่งที่มีชื่อว่า Boat-tailing

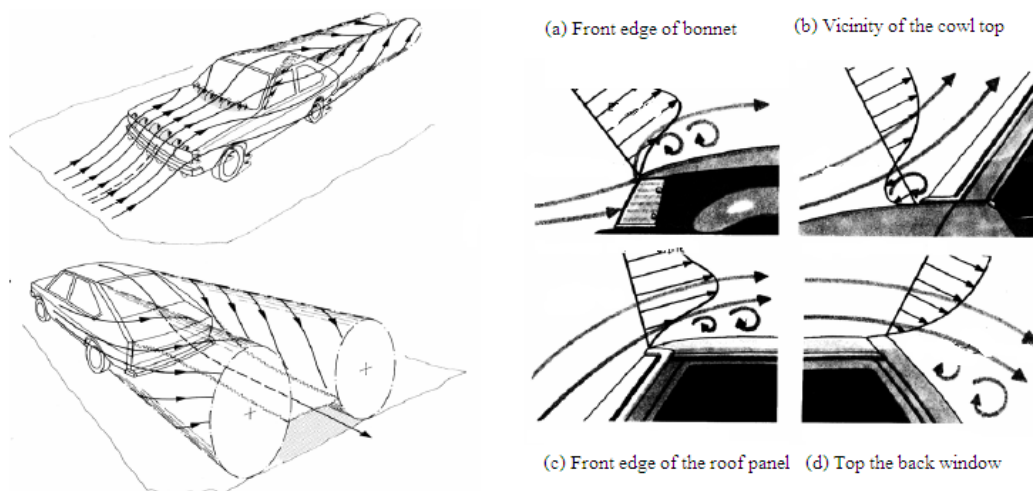
การปิดช่องลมด้านหน้ารถ (Grille block) นอกจากจะช่วยลดแรงต้านอากาศแล้ว ขณะที่สตาร์ทเครื่องยนต์ในอุณหภูมิต่ำมากๆ การปิดช่องลมยังทำให้เครื่องยนต์ร้อนขึ้น จนถึง “อุณหภูมิทำงาน” (Operating temperature) ได้เร็วกว่าปกติ ที่อุณหภูมินี้จะเป็นอุณหภูมิที่เครื่องยนต์สามารถใช้เชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และการที่เครื่องยนต์สามารถทำงานที่อุณหภูมิ

ทำงานได้เร็วขึ้น นั้นหมายความว่า อายุการใช้งานของเครื่องยนต์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เพราะว่าขณะที่เครื่องยนต์ทำงานที่อุณหภูมิต่ำจะมีอัตราการสึกหรอมากกว่านั่นเอง สรุปได้ว่า การปิดกระจังหน้ามีข้อดีอยู่ 2 อย่าง อย่างแรกก็คือ ลดแรงต้านอากาศโดยการกันไม่ให้อากาศไหลเข้าไปในห้องเครื่องยนต์มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น อย่างที่สองก็คือ ทำให้เครื่องยนต์ร้อนเร็วขึ้นหรือใช้เวลาในการวอร์มเครื่องยนต์น้อยลงนั่นเอง



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ปิดช่องลมด้านหน้ารถ (Grille block)

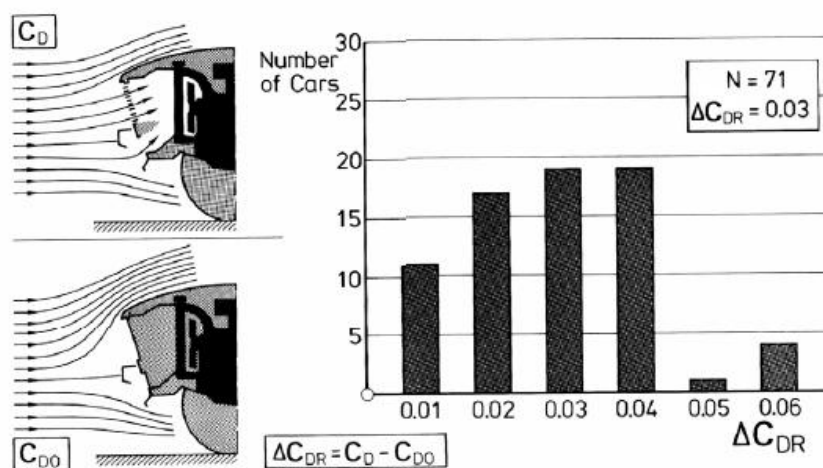
ไม่เฉพาะส่วนท้ายของรถและการปิดช่องลมด้านหน้ารถเท่านั้นที่ทำให้เกิดเวค แต่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับมุมที่มาก ๆ ก็จะทำให้เกิดเวคเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศอย่างฉับพลัน ซึ่ง Scibor [7] พบว่าการเกิดการหมุนวนของอากาศที่ทำให้เกิดเวค นอกจากส่วนท้ายรถแล้วยังมีส่วนหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดเวค คือ บริเวณส่วนหน้าของฝาครอบเครื่องยนต์ (Front edge of bonnet), ส่วนบนของตัวถังรถใต้กระจังหน้า (Vicinity of the cowl top), ด้านหน้าส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Front edge of the roof panel) และด้านหลังส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Top the back window) ซึ่งการเกิดเวคจากส่วนต่าง ๆ นี้ จะเกิดการรวมตัวกันและทำให้เวคขนาดใหญ่บริเวณด้านหลังรถ และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะห่างออกไปในขณะที่รถยนต์วิ่งด้วยความเร็วสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค Scior [7]

2.1.2 แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss)

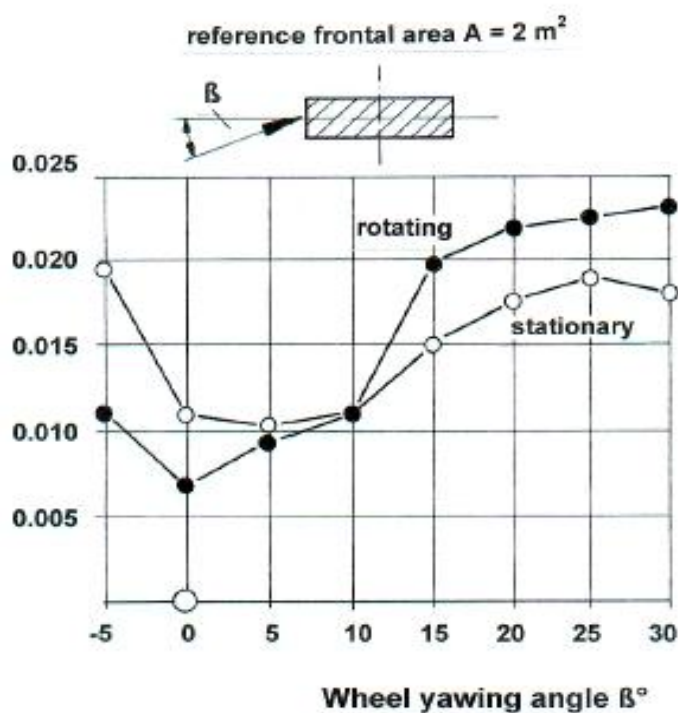
เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านเข้าภายในตัวรถเพื่อระบายความร้อนให้กับระบบทำความเย็นในระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ เช่นระบบหม้อน้ำ ระบบเบรก ระบบไอดี เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนภายในทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่ง Hucho [8] ได้พบว่า รถยนต์โดยส่วนใหญ่ที่มีระบบให้อากาศไหลเข้าไปภายในรถยนต์เพื่อระบายความร้อน เพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ (C_D) จากเดิมประมาณ 0.03



ภาพที่ 2.8 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน Hucho [8]

2.1.3 แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นรถยนต์กับถนน (Underfloor roughness)

ซึ่งพลังงานจลน์จากย่านภายนอก (Outer region) Boundary layer ส่งถ่ายเข้าสู่ย่านภายใน (Inner region) ทำให้เกิดโมเมนต์บริเวณระหว่างพื้นรถกับพื้นถนน เป็นเหตุให้เกิดการสูญเสียและความดันท้ายรถต่ำลง อีกอย่างหนึ่งก็คือ มีการหมุนวนของอากาศจากล้อที่หมุน โดย Hucho [8] พบว่า การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถ ระหว่างให้ล้อรถหมุน กับไม่หมุน ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีความแตกต่างกัน และการเอียงของล้อที่ไม่ขนานกับถนนก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.9 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน Hucho [8]

2.1.4 แรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศ (Friction loss)

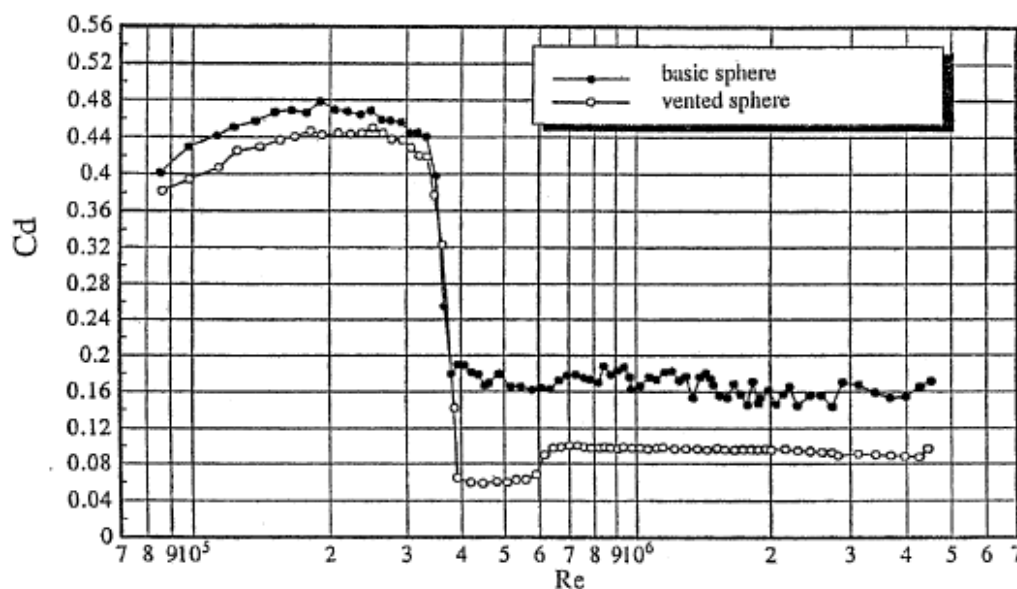
แรงต้านดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของรถ (Wall shear stress) เกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล ซึ่งแรงนี้จะมีทิศทางขนานกับผิวรถยนต์ ซึ่งจากภาพที่ 2.2 จะเห็นว่า ลักษณะของแรงนี้จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากอากาศมีค่าความหนืดต่ำ และอิทธิพลแรงต้านจากค่าความหนืดนี้จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้น

2.2 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ ด้วยอุโมงค์ลม

ในการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ อุโมงค์ลม (Wind tunnel) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงต่าง ๆ ใช้ในวิเคราะห์สนามการไหล และใช้สังเกตการเกิดการแยกตัวของอากาศ (Separation) ซึ่งจะเกิดการแยกตัวสูงเมื่อวัตถุมีรูปร่างลักษณะไม่เพรียวลม (Buff body) โดยรูปร่างลักษณะนี้ เมื่ออากาศไหลผ่านวัตถุที่มี Reynolds number สูงขึ้น จะทำให้ความแตกต่างของความดันที่จุดแยกตัวมีค่าสูง จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าที่สูงตามไปด้วย จึงมีนักวิจัยที่พยายามหาแนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยพยายามลดการแยกตัวดังต่อไปนี้

2.2.1 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของรูปทรงต่าง ๆ

Groshe and meier [9] ได้พยายามที่จะลดการเกิดการแยกตัวของวัตถุทรงกลม ใช้วิธีการทดสอบโดยให้อากาศไหลผ่านทรงกลมเจาะรูตรงกลาง ทดสอบด้วยอุโมงค์ลมความดันสูง (High-pressure wind tunnel) ทำให้อากาศที่ผ่านทรงกลมที่เจาะรูเกิดการแยกตัววิกฤตหรือ Supercritical Reynolds number (Supercritical Reynolds number คือการเกิดลักษณะของจุดที่เกิดการแยกตัว เคลื่อนตำแหน่งไปทางด้านท้ายวัตถุ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงอย่างรวดเร็ว) ซึ่งทรงกลมเจาะรูตรงกลางจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงมากกว่าทรงกลมธรรมดา ที่ Reynolds number เดียวกัน ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 สัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมเจาะรู และไม่เจาะรู Groshe and meier [9]

Prasad and Williamson [10] ได้ทำการศึกษาเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงกระบอกร ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดตัวแปรคือ g ความยาวของทรงกระบอกร, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกร, และ P คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่เจาะทะลุตามแนวแกนทรงกระบอกร โดยใช้ Reynolds number ในการทดสอบระหว่าง $1,000 < \text{Reynolds} < 100,000$ และจากการทดสอบผลแสดงว่า รูปร่างที่ให้ผลการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ดีที่สุดเมื่ออัตรา $P/D = 0.34$ และ $g/D = 1.5$ ซึ่งสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 62%

2.2.2 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์

Van Dam [11], Kwon [12] และ Storms [13] ได้นำเอาหลักการของการลดการแยกตัวของอากาศของวัตถุ มาใช้เพื่อปรับปรุงรูปทรงของรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ใช้รถแบบจำลองในการทดสอบ แต่มักจะเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่วัดได้จากการทดสอบไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จริง เนื่องจากรายละเอียดรูปลักษณะรถแบบจำลองไม่สามารถสร้างเหมือนจริงทุกรายละเอียด ต่อมาได้พัฒนามาใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ที่สามารถทดสอบรถยนต์จริงได้ โดยสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถูกต้อง และวิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน Leuschen and Cooper [14] ก็ได้นำรถบรรทุกขนาดใหญ่ขนาดจริง ทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ศึกษาและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงต้นแบบเดิมดังภาพที่ 2.11

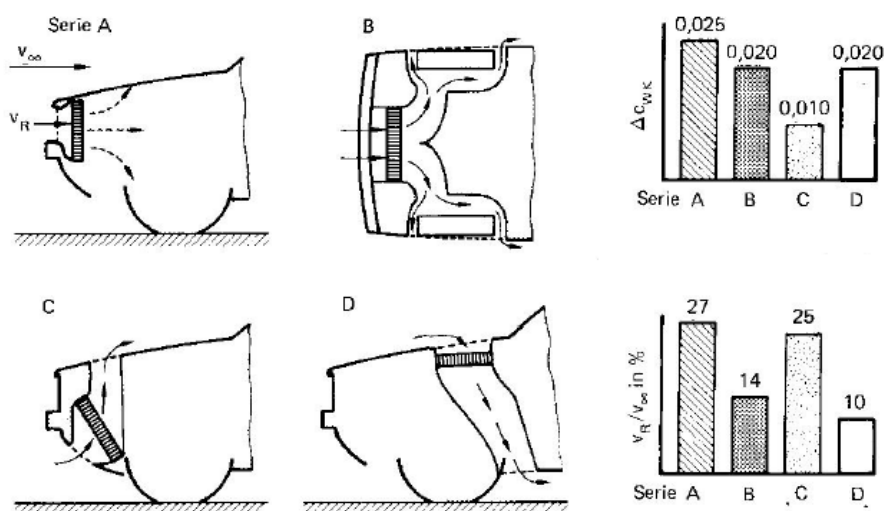


ภาพที่ 2.11 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่

Leuschen and Cooper [14] พบว่า ไม่ใช่แค่รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่อุปกรณ์ตกแต่ง หรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ และยื่นออกจากตัวรถ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะดูดซับพลังงานส่วนเฮดความดัน (Pressure head) และเฮดความเร็ว (Velocity head) ของอากาศเมื่อปะทะกับรถ เช่น กันชนรถยนต์, อุปกรณ์บังแสงแดดด้านข้างกระจก, อุปกรณ์สำหรับวางของบนหลังคา เป็นต้น ซึ่งเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 4 % ถึง 6 % แต่ก็มีอุปกรณ์เสริมที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในลดการหมุนวนของอากาศ (Vortex or recirculation) เช่น ที่บังล้อ เป็นต้น ซึ่งลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) 5 % ถึง 7 % เป็นการลดอัตราการสูญเสียโดยการลดการหมุนวนของอากาศ ที่เกิดขึ้นภายนอกตัวรถยนต์ (External flow loss) แต่อุปกรณ์บางชิ้น เช่น สปอยเลอร์ Kieffer, *et al.* [15] ได้ศึกษาอุปกรณ์เสริมที่มีส่วนทำให้แรงต้านสูงขึ้นนั้น ก็ยังมีข้อดีสำหรับเพิ่มแรงกดเพื่อยึดติดถนนสำหรับรถยนต์นั่ง แต่ก็ควรไม่ให้มีค่าสูงมากเกินไปโดย Tomiyama *et al.* [16] ได้ศึกษาแรงยกเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของแรงยกกับรูปร่างรถ ใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือทดสอบเปรียบเทียบกับปริมาณทางทฤษฎีของแรงยก ซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ แรงยกด้านหน้า และแรงยกด้านหลัง และได้ศึกษาพฤติกรรมของเวคซึ่งมีลักษณะไม่คงตัว (Unsteady) โดยในการศึกษาได้ใช้รถยนต์นั่งติดสปอยเลอร์ พบว่ารูปร่างด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด เรียกอุปกรณ์นี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical afterbody geometry) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อาทิตย ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว [17] และ Fukuda, *et al.* [18] ได้ปรับปรุงอากาศพลศาสตร์โดยการควบคุมอากาศที่กระทบกับรถยนต์แบบนั่ง ซึ่งจะเน้นอุปกรณ์การควบคุมการไหลผ่านด้านหลังรถซึ่งเป็นที่รู้จักกันคือ สปอยเลอร์ ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของ สปอยเลอร์ ปรับเปลี่ยนมุมมองฯ ขนาด และตำแหน่งของการติดตั้ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะเพิ่มแรงกด และลดแรงต้าน ในการวิเคราะห์พบว่า เมื่อรูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดรูปแบบการไหลในเวคอย่างฉับพลัน และมีเวคขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงต้านสูง และระยะระหว่างพื้นรถและพื้นถนนก็ยังมีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยเช่นกัน

แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (Internal flow loss) โดยอากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (Gap) ทำให้เกิดการหมุนวนภายใน โดยเฉพาะอากาศที่ไหลเข้าภายในเพื่อระบายความร้อน โดย Hucho [8] ได้เปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างการออกแบบช่องระบายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ใช้รถยนต์แบบนั่งทดสอบ ผลปรากฏ

ว่า การออกแบบที่ให้อากาศไหลเข้าด้านล่างเพื่อระบายความร้อนของเครื่องยนต์ จะเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.12



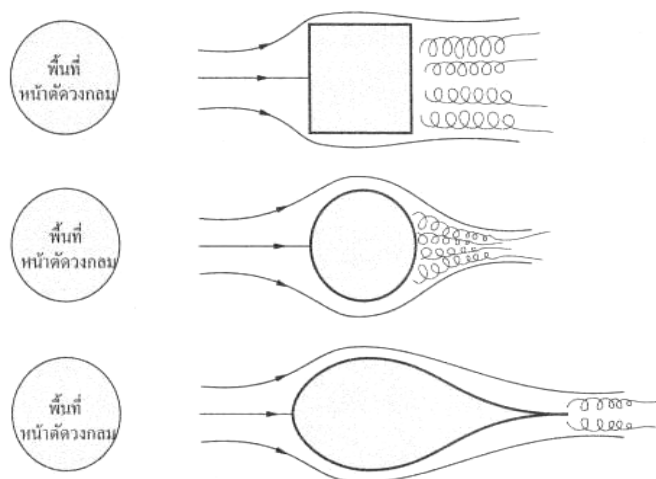
ภาพที่ 2.12 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน Hucho [8]

เช่นเดียวกันกับ ช่องว่างระหว่างห้องผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระเบของรถบรรทุก ซึ่งจะเกิดเวคขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดช่องว่าง หรืออุปกรณ์เพื่อช่วยลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมีข้อจำกัดของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความละเอียด เช่นการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการการปรับมุมของสปอยเลอร์ของรถยนต์แบบนั้น ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากค่าไม่มีความละเอียดพอ และยังมีข้อจำกัดของสถานะของการทดสอบ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสถานะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สามารถกำหนดสถานะ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ

2.3 หลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)

ในปัจจุบันการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ได้กลายเป็นส่วนสำคัญใช้ในการออกแบบรถยนต์ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาการวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์สนใจเพียงการลดแรงต้าน เนื่องจากรถยนต์ในปัจจุบันมีความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม ซึ่งจะส่งผลต่อเสถียรภาพในการขับขี่ ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงการประสิทธิภาพในการยึดเกาะถนน และเสถียรภาพในการขับขี่บนถนนของรถยนต์ให้

มากขึ้นการลดแรงยก จึงได้เข้ามามีบทบาทเพิ่มขึ้นในการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ รูปลักษณะของรถยนต์ มีผลโดยตรงต่อการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ เนื่องจากรูปลักษณะของรถยนต์เป็นแหล่งกำเนิดของการไหลซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อยานพาหนะ



ภาพที่ 2.13 การไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปแบบต่างๆ

2.4 การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ด้วย CFD

การคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics: CFD) หรือที่เรียกว่า วิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่สำคัญในกระบวนการออกแบบรถยนต์ ซึ่งนิยมใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT สำหรับการจำลองการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ โดยวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) โดยส่วนใหญ่เป็นการใช้กับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ โดยมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาและวิจัยในรูปแบบวิธีการคำนวณต่าง ๆ เพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลผ่านวัตถุ ซึ่งรวมทั้งยานพาหนะต่าง ๆ ด้วย

2.4.1 การศึกษาการไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ด้วย CFD

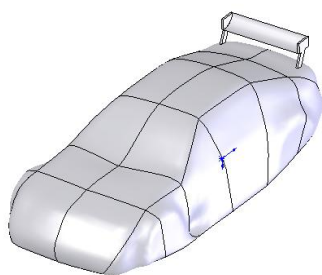
เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ก້อง และคณะ [19] ศึกษาวิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ในสองมิติโดยใช้หลักการของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ วิธีปริมาตรจำกัดถูกนำมาใช้เพื่อทำการไม่ต่อเนื่องสมการควบคุมที่เกี่ยวข้อง และใช้ระเบียบวิธี Simpler เพื่อทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณจากระบบสมการควบคุมทั้งหมดเป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์มวล วิธีกันค่าถูกนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตของสิ่งกีดขวาง โดยกรณีทดสอบคือ การไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงขั้นบันได กลับหลังที่ Reynolds nuber 100 , 389, และ 1,000 จาก

การเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจสอบพบการแยกไหลบริเวณด้านหลังของชิ้นบันได โดยของไหลบริเวณด้านหลังบันไดมีทิศการไหลกลับทิศทาง Spalart [20] ได้ทำการศึกษาความปั่นป่วนของของไหลที่ผ่านวัตถุ โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลข ทดสอบวัตถุทรงกลม ซึ่งสมการความปั่นป่วนแต่ละชนิดให้ผลที่มีความแตกต่างกัน ประกอบกับการสร้างกริดที่จำนวนต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน มาประยุกต์กับการทดสอบเครื่องบิน เครื่องอัดอากาศ หรือรถยนต์ โดยรถยนต์จะใช้สมการความปั่นป่วนที่ให้ผลดี 2 แบบคือ k- ω และ k- ϵ Wang [21] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลที่เกิดจากของไหลในค่า Reynold number ที่สูงไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก เปรียบเทียบกับการจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติ แบบ Large-Eddy Simulation โดยทดลองที่ค่า Reynolds number ระหว่าง $5.0 \times 10^5 - 3.6 \times 10^6$ ซึ่งเป็นการทดลองในช่วงที่เรียกว่า Supercritical Reynolds number จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นและลดลงไปในแนวทางเดียวกัน แต่ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบนั้นแตกต่างกัน โดยตามทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะเพิ่มขึ้นแต่ในการจำลองที่กล่าวมานั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะคงที่ซึ่งเป็นผลที่ขัดแย้งกันในทางทฤษฎี

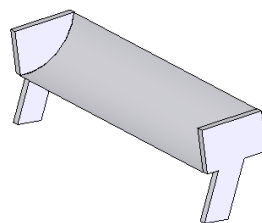
Perzo and Davidson [22] จากการจำลองที่กล่าวมานั้น ผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มการเกิดการแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนหลังของแบบจำลอง ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่ Reynolds number ต่ำ แต่เมื่อค่า Reynolds number ที่ใช้ในการจำลองมีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจากการทดสอบในอุโมงค์ลมมีลักษณะการไหลเป็น 3 มิติ จึงได้มีการพัฒนาการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ

การสร้างแบบจำลองและการจำลองลักษณะการไหล

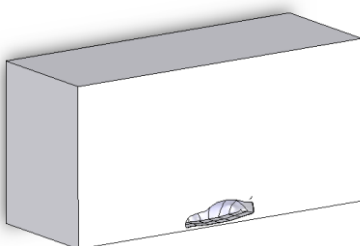
วีรชัย ชัยวรพฤษ [23] กล่าวว่างานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศผ่านรถยนต์ส่วนบุคคล 4 ล้อที่มีการดัดแปลงเพื่อใช้ในการแข่งขันความเร็ว โดยศึกษาในกรณีที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์และไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์ที่บริเวณด้านท้ายของตัวรถ ภาพที่ 2.14 (a) และภาพที่ 2.14 (b) แสดงรูปทรงของรถยนต์ส่วนบุคคล 4 ล้อที่มีการดัดแปลงและรูปทรงของสปอยเลอร์ที่นำมาติดตั้งตามลำดับ อากาศที่ไหลผ่านรถแข่งจะถูกจำลองเฉพาะบริเวณส่วนที่อยู่โดยรอบรถแข่งโดยใช้โปรแกรม Solid works ซึ่ง mesh ที่ใช้จะเป็นแบบ tetrahedral การไหลของอากาศจะเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible) แบบจำลองความปั่นป่วนที่เลือกใช้คือแบบจำลองมาตรฐาน k- ϵ โดยมีการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบให้กับแบบจำลอง คือ ที่บริเวณทางเข้าจะถูกกำหนดให้มีความเร็ว 200 km/h ซึ่งเป็นความเร็วเฉลี่ยและความเร็วสูงสุดของรถแข่งคันนี้ ในขณะที่บริเวณทางออกความดันจะถูกกำหนดให้มีความเท่ากับ 0 ส่วนบริเวณที่ติดกับผิวของรถแข่งจะถูกกำหนดให้เป็น Wall ดังแสดงในภาพที่ 2.14 (c) นอกจากนี้ที่บริเวณผิวที่ถูกตัดครึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นผิวสมมาตรดังแสดงในภาพที่ 2.14 (d)



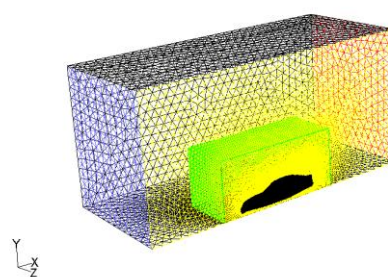
(a) รถที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์



(b) ลักษณะของสปอยเลอร์

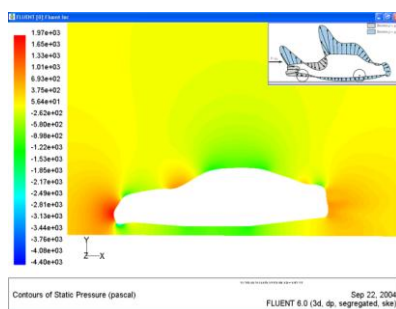


(c) ที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์

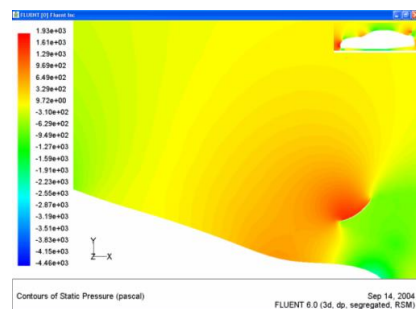


(d) ลักษณะเมชและขอบเขตเพื่อการจำลอง

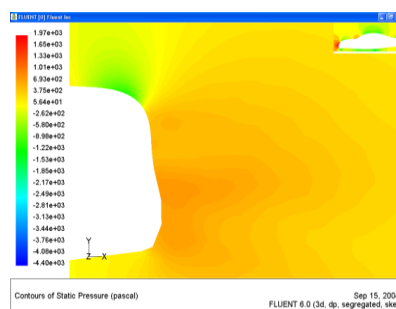
ภาพที่ 2.14 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองของรถติดสปอยเลอร์



(a) รถที่ไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์



(b) บริเวณด้านหลังของรถที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์

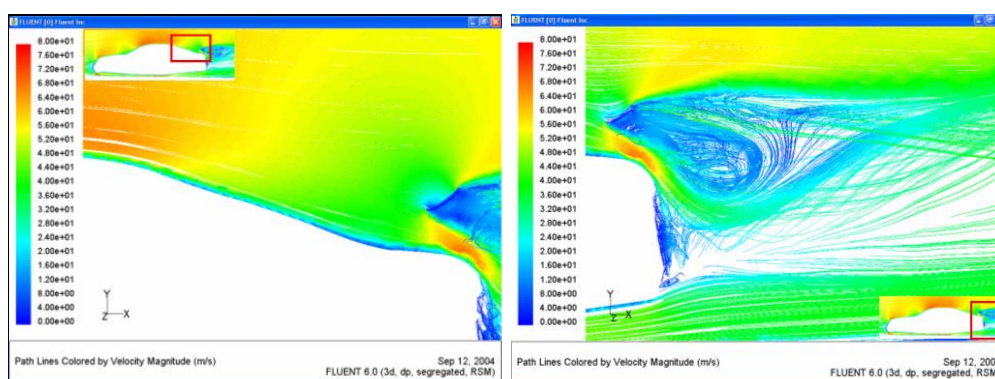


(c) บริเวณด้านท้ายของรถที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์

ภาพที่ 2.15 การกระจายความดันระนาบตามขวางที่บริเวณผิวของรถที่ไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์

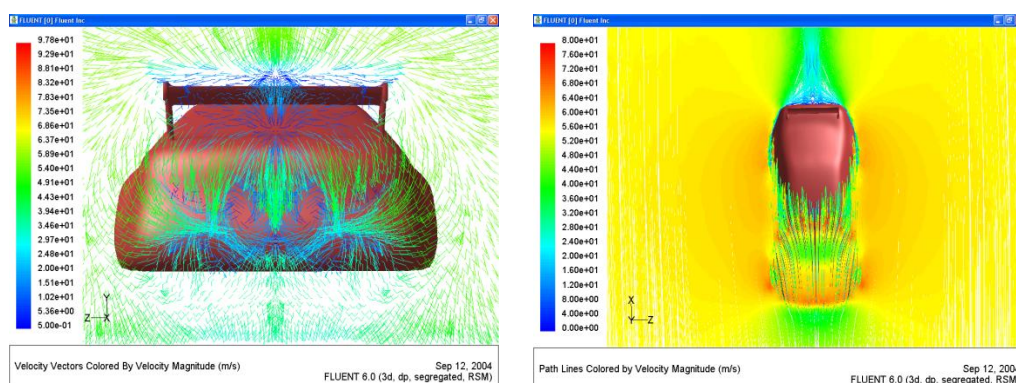
จากการศึกษาลักษณะการกระจายความดันที่ตำแหน่งต่างๆรอบตัวรถแข่ง จากภาพที่ 2.15 พบว่าการกระจายความดันที่บริเวณผิวสมมาตรของรถแข่งที่ไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์มีลักษณะสอดคล้องกับผลการกระจายความดัน โดยลักษณะการกระจายความดันที่บริเวณผิวสมมาตรของรถแข่งที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์ เมื่อเปรียบเทียบการกระจายความดันของอากาศที่บริเวณผิวสมมาตรของรถแข่งแบบที่ไม่ติดตั้งสปอยเลอร์พบว่าเกิดบริเวณจุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) และการกระจายความดันไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นที่บริเวณด้านหลังรถแข่งจะมีการกระจายความดันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

จากการเปรียบเทียบรูปที่ 2.16 (a) และภาพที่ 2.16 (b) พบว่า สปอยเลอร์สามารถสร้างแรงกดที่บริเวณท้ายรถแข่งส่งผลให้รถแข่งที่ติดตั้งสปอยเลอร์จะเกาะติดถนนได้ดีกว่าแบบที่ไม่มีการติดตั้งสปอยเลอร์เมื่อวิ่งด้วยความเร็วสูง แต่ในขณะเดียวกันสปอยเลอร์ก็สร้างแรงต้านอากาศเนื่องจากผลต่างของความดันที่บริเวณด้านหน้ารถและด้านหลังรถด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.16 (c) และ (d)



(a) การกระจายตัวของอากาศบริเวณด้านหลังรถ

(b) อากาศไหลผ่านบริเวณท้ายรถ



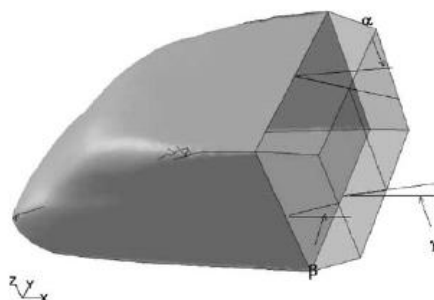
(c) ภาพตัดขวางด้านท้ายรถ

(d) ภาพตัดขวางมุมบนของรถ

ภาพที่ 2.16 ลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านรถที่มีการติดตั้งสปอยเลอร์บนระนาบสมมาตร

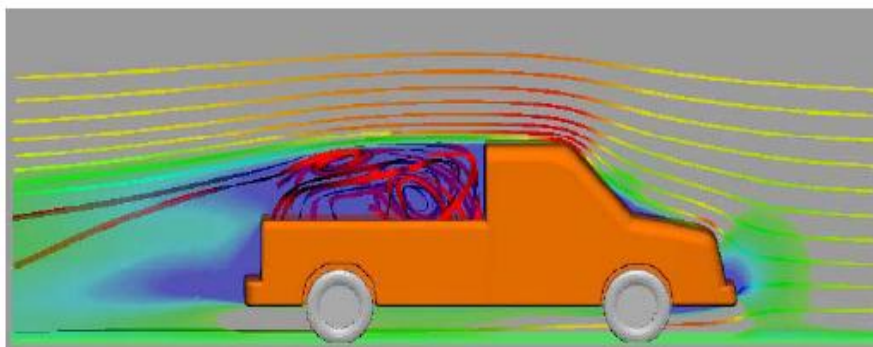
2.4.2 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์ ด้วย CFD

Van Dam [11] ได้ศึกษากระบวนการหาแรงต้านของวัตถุ โดยได้รวบรวมวิธีต่าง ๆ ในการหาค่าของแรงต้านตั้งแต่ยุคต้น ๆ จนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนามาใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข CFD มาทำนายหาค่าแรงต้าน โดยใช้สมการ Euler และ Reynolds-averaged Navier-Stokes เป็นหลักการในการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านวัตถุมาทำนายสัมประสิทธิ์แรงต้าน และนำมาประยุกต์ มีการเปรียบเทียบกระบวนการในทาง CFD และการทดสอบในอุโมงค์ลม มีการปรับปรุงลักษณะของกระบวนการมาเรื่อย ๆ จนกระทั่งประยุกต์มาใช้ในการทำนายแรงต้านของยานพาหนะ เช่น เครื่องบิน ฮอริคอปเตอร์ รถยนต์ ซึ่งเป็นพื้นฐานการประยุกต์ใช้ในการลดแรงต้านของยานพาหนะ Horinouchi [24], Muyl, *et al.* [25] และ Ozwa, *et al.* [26] ได้นำหลักการมาจำลองเพื่อการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ โดยมีการใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดใต้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ โดยแรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอกสัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่มีผลจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจากการไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดย Muyl, *et al.* [25] ทำการศึกษาหาความเหมาะสมรูปร่างท้ายรถยนต์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ และใช้สมการแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล k-epsilon โดยแบ่งรถออกเป็นสามส่วน คือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง โดยส่วนหลังจะมี Back-light angle, Boat-tail angle และ Ramp angle ตามภาพที่ 2.17 จากการปรับ back-light angle จะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่ด้านท้ายรถต่างกัน ซึ่งการปรับค่ามุม (α, β, γ) ที่ต่ำจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านสูง แต่เมื่อปรับมุมให้มีค่าที่สูงขึ้นเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง



ภาพที่ 2.17 มุม α, β, γ [25]

Singh [27] ไม่เฉพาะมุมส่วนท้ายรถเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน แต่ช่องว่างระหว่างส่วนต่าง ๆ ของรถก็มีผลด้วยเช่นกัน จึงใช้ CFD มาปรับแก้เงื่อนไขในการคำนวณ เพื่อทำการศึกษาระงัดต้านของยานพาหนะ เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน Turbulent model ต่าง ๆ กับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยใช้รถบรรทุกใหญ่ในการจำลอง ซึ่งผลที่ได้ แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล k-epsilon และกริดที่มีความละเอียดพอ จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบในอุโมงค์ลมมากที่สุด และได้้นำเงื่อนไขดังกล่าวมาศึกษาการเกิดการหมุนวนของอากาศระหว่างหัวรถกับตัวบรรทุกของรถบรรทุกใหญ่ ซึ่ง Simon and Gioacchino [28] พบว่า เกิดการไหลวนที่แตกต่างกัน และระยะห่างของหัวรถกับตัวบรรทุกต่างกัน ส่งผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถบรรทุก โดยระยะห่างที่น้อยลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และเนื่องจากโดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กจะสูง เนื่องจากรูปร่างท้ายกระเบ้นั้นทำให้อากาศแยกตัว เกิดการหมุนวนของอากาศที่ใหญ่ เนื่องจากความต่างของความดัน ระหว่างด้านหน้าและท้ายกระเบ และอากาศที่หมุนวนจะปะทะกับท้ายกระเบ ดังภาพที่ 2.18 จะทำให้เกิดแรงต้าน และเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ใช้พลังงานสิ้นเปลืองมากขึ้น



ภาพที่ 2.18 การเกิดเวคส่วนท้ายกระเบของรถบรรทุกเล็ก โดย CFD Cooper [29]

นอกจากการใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงรูปร่างหรือรูปลักษณ์โดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านแล้ว CFD ยังสามารถจำลองเพื่อเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นกับด้านท้ายของรถคันหน้า โดยใช้ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาวิเคราะห์ สามารถเห็นประโยชน์ที่รถคันหลังได้รับอย่างชัดเจน เพราะแรงต้านของอากาศของรถคันหลังจะลดลง โดยกระแสอากาศที่ไหลผ่านใต้ท้องรถคันหลังจะลดลง ประการสำคัญแรงดูดของกระแสลมด้านท้ายของรถคันหน้าจะทำให้รถคันตามมีความเร็วเพิ่มขึ้น โดย Browand [30] และ Yamamoto, *et al.* [31] พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถคันหลังลดลงกว่าคันหน้า และในการทดสอบรถแข่งจากการจำลอง CFD

จากการศึกษางานวิจัยดังที่กล่าวมานั้น การออกแบบรูปร่างรถยนต์ให้เหมาะสม เป็นการทำให้รถยนต์วิ่งผ่านอากาศด้วยแรงต้านลดลง การประกอบชิ้นส่วนก็มีส่วนสำคัญ เช่น การประกอบ

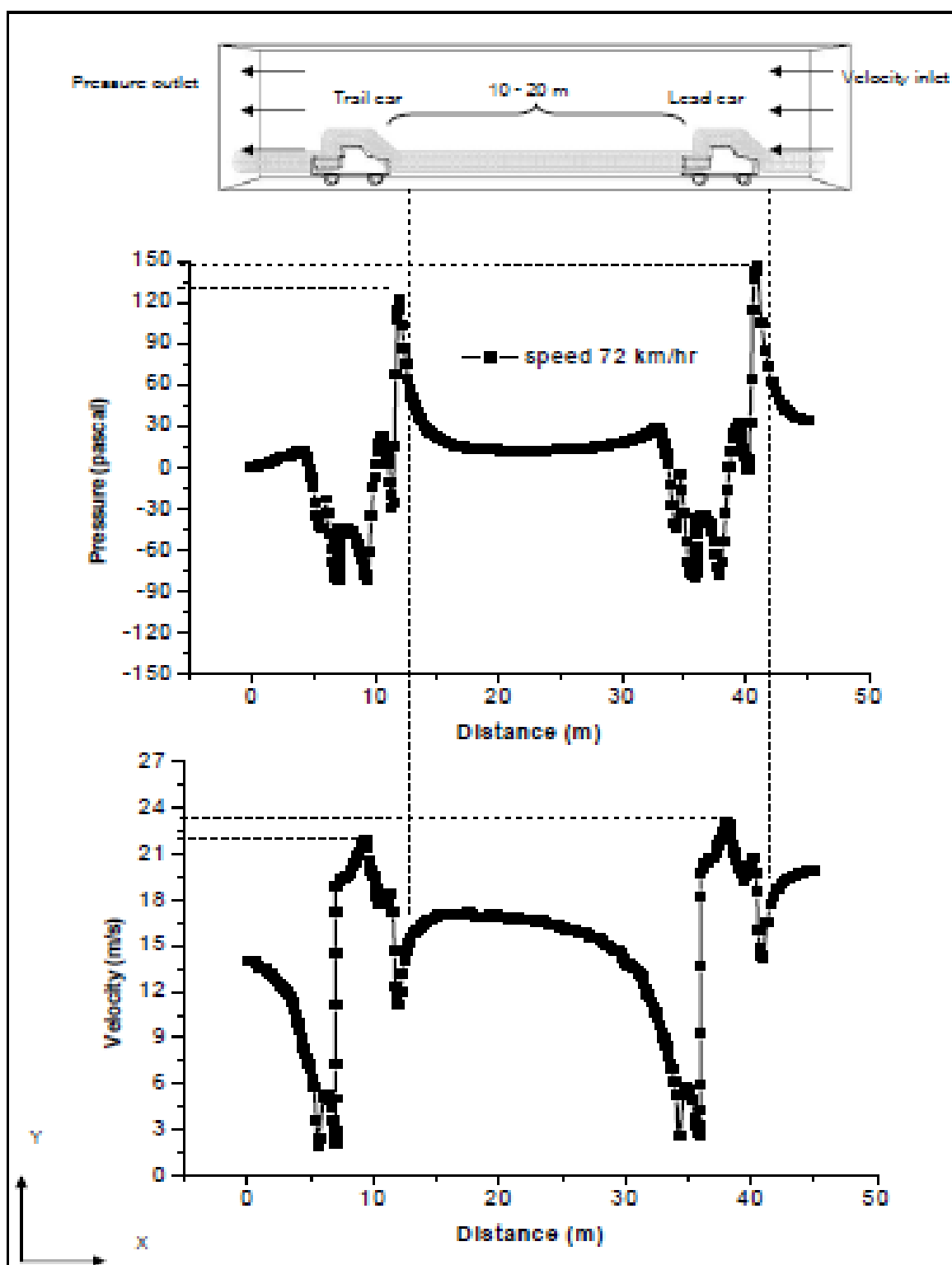
หน้าต่างและขอบที่แนบสนิทพอดี รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถ เช่น สปอยเลอร์ทางด้านหลังล้อหน้าและล้อหลัง แผ่นกันใต้ท้องรถที่ทำให้ส่วนประกอบของโครงสร้างไม่ขวางการไหลของอากาศ แม้แต่ สปอยเลอร์หลังเพื่อลดความปั่นป่วนเมื่ออากาศวิ่งผ่าน อุปกรณ์เหล่านี้สามารถลดแรงต้านอากาศ โดยใช้องค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ หรือ Aerodynamics ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการออกแบบรถยนต์ ในการทดสอบ คันคว่ำ และการวิจัย จะต้องมีการนำโมเดลทั้งแบบจำลองและแบบขนาด Full scale เข้าไปทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อตรวจสอบหาค่าต่างๆ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทุน อุปกรณ์ และเวลาในการทดสอบ ปัจจุบันได้มีวิธีจำลองเชิงตัวเลข หรือ (Computation Fluid Dynamics : CFD) เป็นเครื่องมือที่สามารถแสดงผลได้แบบ 3 มิติ ช่วยให้เห็นภาพการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศ และผลที่เกิดกับรถยนต์ได้ชัดเจน

2.4.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กขนาดจริงกรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันตามแนวยาว แกน x (CFD)

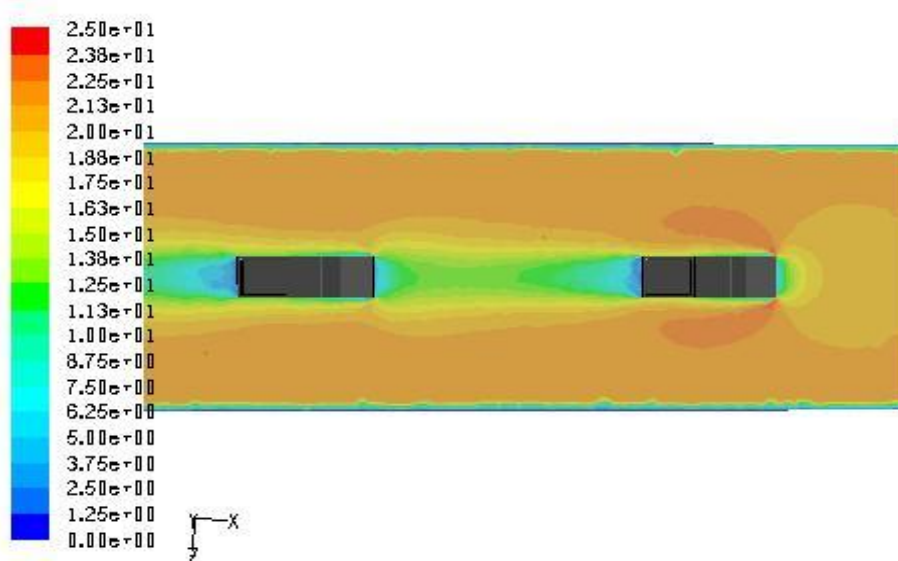
ปรัชญา มุขดา และคณะ [32] เจื่อนไขในการคำนวณไปใช้จำลองรถขนาดจริง แสดงในตารางที่ 1 โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยรถทั้งสองคันอยู่ห่างกันตามแนวยาว (แกน X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 m ดังแสดงในรูปที่ 2.30 และทดสอบที่ความเร็ว 36, 54, 72, 90, 108, และ 126 km/hr หรือ (Reynolds number $2 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$) โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน โดยได้ขยายขนาดความกว้าง และความสูงของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 2.1 เจื่อนไขการคำนวณ CFD

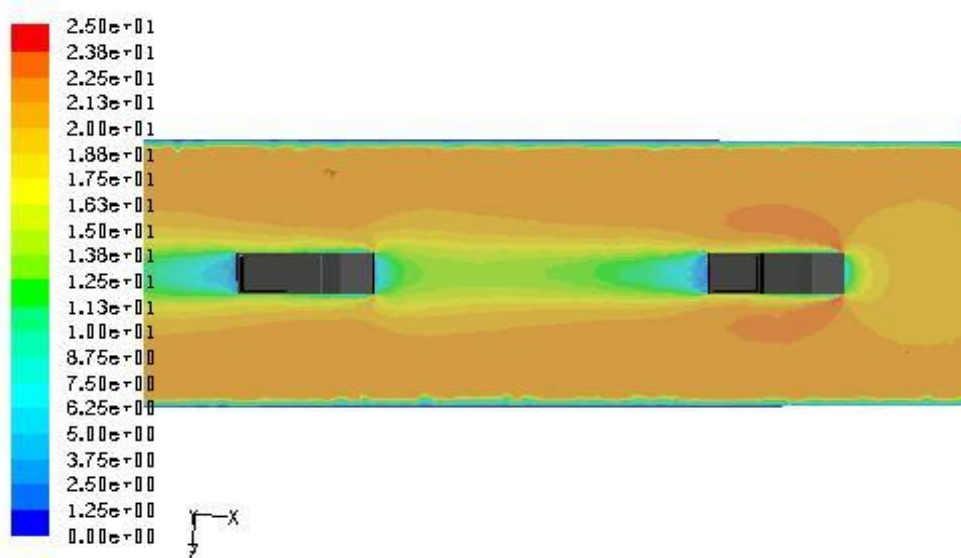
โปรแกรม GAMBIT	
ขอบเขตทางด้านเข้า (inlet boundary condition)	Velocity inlet
ขอบเขตทางด้านออก (outlet boundary condition)	Pressure outlet
จำนวนกริด	700,000 - 1,000,000 cell
โปรแกรม FLUENT	
ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)	Segregated Solver
ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)	Implicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน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



ภาพที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงของความดัน และความเร็วที่เกิดขึ้นกับรถคันหน้า (Lead car) และคันหลัง (Trail car) ตรงกลางของรถ ตามแนวแกน x [32]



ภาพที่ 2.20 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X10



ภาพที่ 2.21 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X12.5 [32]

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดัน และความเร็วของอากาศที่กระทำกับรถคันหน้ามีค่าสูงกว่าที่กระทำกับรถคันหลัง เพราะอากาศปะทะกับด้านหน้าของรถคันหน้าความเร็วจะลดลง เพราะเข้าใกล้จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) ซึ่งจะมีความดันมากกว่าความดันก่อนที่จะเริ่มเข้าปะทะกับด้านหน้ารถ หรือความดันในระบบ (Total pressure) และจะลดต่ำลงบริเวณท้ายกระบะเนื่องจากความเร็วลดลง ซึ่งทำให้ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics pressure) ลดลงด้วย ดังนั้น

พลังงานจะมีค่าลดลงเพราะ รถคันหน้าจะดูดซับพลังงานที่เรียกว่า เฮดความดัน(Pressure head) และเฮดความเร็ว (Velocity head)

2.5 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

อัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ เป็นสิ่งที่ทุกคนสนใจในปัจจุบัน เนื่องจาก ราคาที่สูงขึ้น และสถานะที่ไม่แน่นอนของน้ำมันเชื้อเพลิง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองให้แม่นยำ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ดังนั้น จึงมีนักวิจัยที่พยายามหาวิธีที่วัดเพื่อที่จะได้ทราบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และสามารถตัดสินใจในการปรับปรุงรูปทรงหรือตัดสินใจขับซักรถเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง

โดยนักวิจัยได้มีวิธีการวัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานวิจัยนั้น ว่าศึกษาเรื่องใดของรถยนต์ เช่น จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล [33] ได้ศึกษาการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันของรถยนต์ขนาดต่าง ๆ คือรถยนต์นั่งขนาด 1800 cc, 2300 cc และรถบรรทุกเล็ก 300 cc วิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 – 120 km/hr การวัดน้ำมันทำโดยการออกแบบถังเชื้อเพลิงพิเศษ และทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนและหลังจากที่ได้ทำการวิ่ง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้คือ น้ำมันออกเทน 91, 95 และ ดีเซล ผลการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ทุกชนิดกินน้ำมันต่ำสุดที่ 60 km/hr การสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นเมื่อวิ่งที่ความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถบรรทุกเล็ก เนื่องจากการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ที่ไม่ดี โดยอัตราสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นมากที่ความเร็ว 100 และ 120 km/hr แต่ในกรณีดังกล่าว เป็นวิธีการวัดและเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง แต่ในลักษณะของการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ หรือการปรับปรุงรูปลักษณ์ของรถยนต์ ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำหลักการนี้มาวัด แต่มีนักวิจัยชื่อ Leuschen and Cooper [14] ได้หาค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกใหญ่ ในกรณีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์บังล้อด้านหน้า และหลัง, อุปกรณ์กำเนิดการหมุนวนของอากาศ ตรงตำแหน่งต่าง ๆ (Vortex generator), อุปกรณ์กันแมลง (Bug deflector) เป็นต้น โดยการหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วที่ต้องการทราบ ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม มาแทนค่าจากความสัมพันธ์ของ

$$\Delta\mu(V_t) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_t^2 \Delta \overline{C_D}(V_t) A}{0.85} \quad (2.1)$$

$\Delta\mu(V_t)$ คือการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (L/100 km)

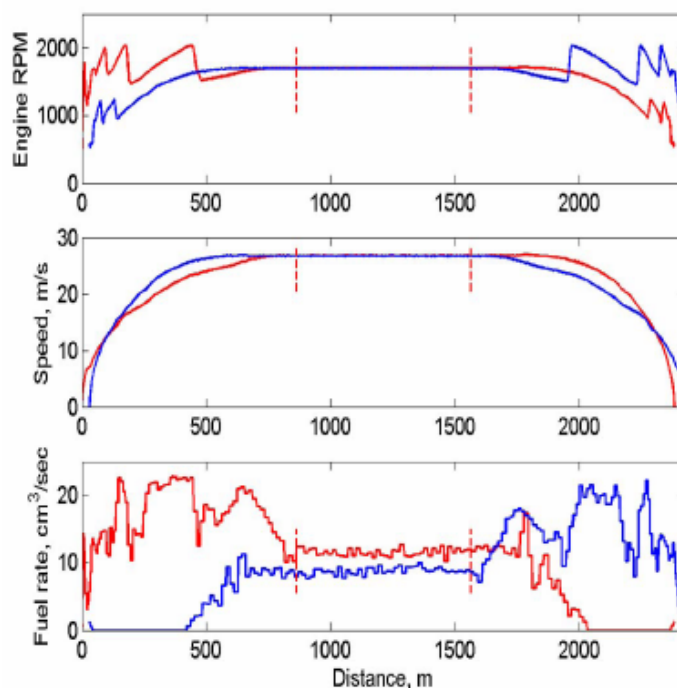
ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m³

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.68576 (m²)

- 0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย
SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (liters/kW-h)

แต่ในความเป็นจริง ค่าที่แทนในสมการ (2.1) ย่อมไม่คงที่ เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการวิ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามระยะทางในการวิ่ง รวมถึงสถานะต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยที่ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของเครื่องยนต์ โดย Browand [30] ได้ทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิง ในกรณีรถบรรทุกใหญ่วิ่งตามกัน ซึ่งกำหนดเส้นทางตรงเป็นระยะทาง 3.5 km ระยะห่างระหว่างรถทั้ง 2 คัน 3 m– 10 m โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ชื่อว่า APTH ที่ติดอยู่ที่ตัวเครื่องยนต์ของรถทั้งสองคัน สามารถวัดค่าทความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine RPM) ความเร็วของรถที่ใช้ในการวิ่ง (Speed) และอัตราการกินน้ำมัน (Fuel rate) ตามระยะทางในการวิ่ง และคำนวณออกมาเป็นระดับที่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทั้ง 2 คัน โดยค่าของรถคันหลังจะมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงจากรถคันหน้า ดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH [30]



ภาพที่ 2.22 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTD [30] (ต่อ)

2.6 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ

หลักการของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ในกรณีการเคลื่อนที่ของยานยนต์ต่าง ๆ ต้องพิจารณาถึงแรงที่อากาศกระทำต่อผิวหน้าของยานยนต์ คือ แรงยกและแรงต้าน (Lift and Drag) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ซึ่งผลการศึกษาส่วนใหญ่จะได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบหุ่นจำลอง เช่น การใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ในการทดสอบ บางทีก็อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบต้นแบบของยานยนต์จริงแทนที่จะใช้หุ่นจำลอง เช่น การทดสอบรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลมในห้องปฏิบัติการด้านอากาศพลศาสตร์ของ NRC (National Research Council of Canada) ดังภาพที่ 2.23

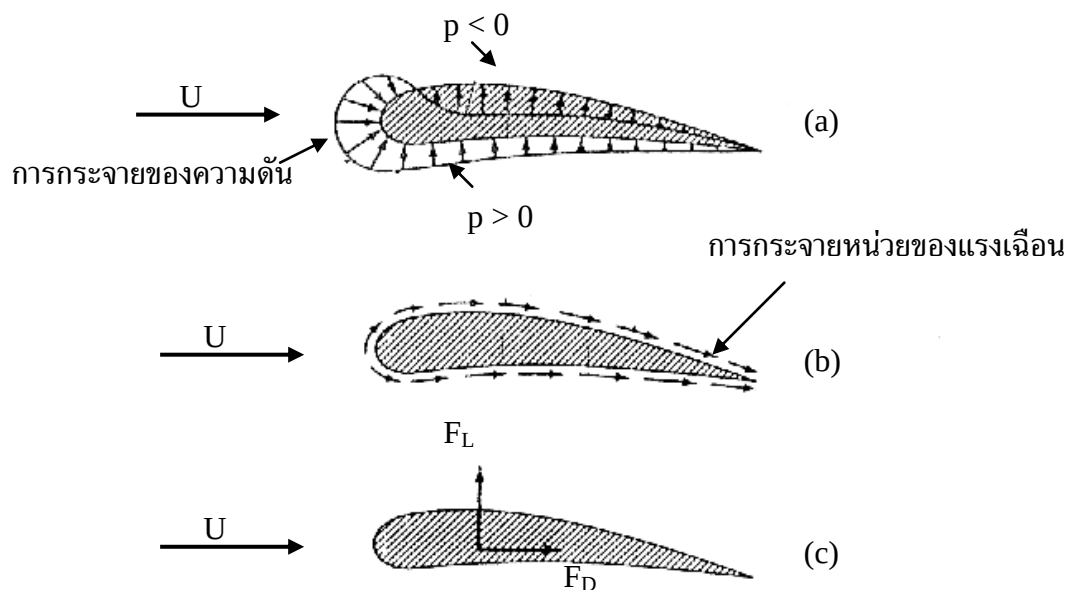


ภาพที่ 2.23 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC

2.6.1 แรงยกและแรงต้าน

เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลจะมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน เกิดจากการผนังผิวหน้าสัมผัสกันระหว่างของไหลกับวัตถุ แรงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวดของเทวัตถุ (Wall shear stress, τ_w) ซึ่งเกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล และความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุ เนื่องจากความดัน (p) ตัวอย่างการแพร่กระจายของความดันและหน่วยแรงเฉือนตลอดทั่วผิวของเทวัตถุ สามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งแสดงทั้งขนาดและทิศทางของความดันและหน่วยแรงเฉือน

แรงรวมที่กระทำต่อเทวัตถุในทิศทางของการไหลเรียกว่า แรงหน่วง (Drag, F_D) และแรงรวมที่กระทำต่อเทวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า แรงยก (Lift, F_L) ดังแสดงดังภาพที่ 2.14 และสำหรับเทวัตถุสามมิติบางชนิดอาจจะมีแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งตั้งฉากกับระนาบที่เกิดแรงหน่วงและแรงยกได้



ภาพที่ 2.24 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ (a) แรงเนื่องจากความดัน (b) แรงเนื่องจากความหนืด (c) แรงต้านและแรงยก

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือนและความดันที่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเทวัตถุสามารถหาได้จากการอินทิเกรตแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของเทวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน x และ y ของแรงรวมที่กระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ dA ดังนี้

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

และ

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (2.3)$$

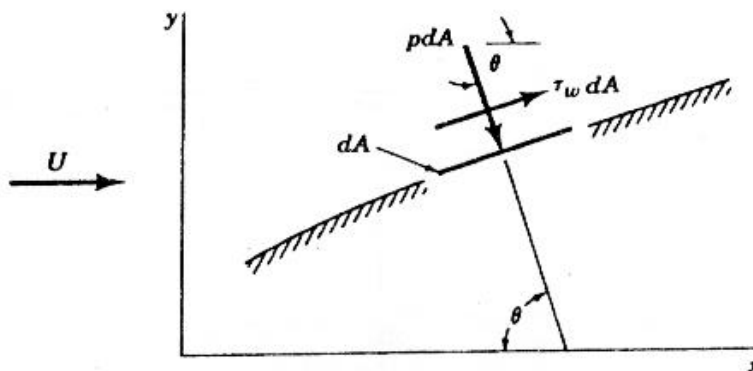
ดังนั้น จึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน x และ y ที่กระทำต่อเทหวัตถุได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (2.4)$$

และ

$$F_L = -\int dF_y = \int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (2.5)$$

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



ภาพที่ 2.25 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็กๆ บนผิวของวัตถุ

2.6.2 แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

แรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ภายใต้ของไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 อย่างคือ แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure drag, F_p) และแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน (Friction drag, F_f) แรงต้านเนื่องจากความดันมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่เกิดจากความดันในทิศทางการเคลื่อนที่ที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ ซึ่งอาจเขียนได้ในรูปของแรงประกอบเนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่ง

(Stagnation pressure) ที่กระทำต่อพื้นที่ทาบของวัตถุบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลคูณด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure – drag coefficient, C_p) ซึ่งสัมประสิทธิ์ C_p ขึ้นอยู่กับรูปทรงเลขาคณิตของวัตถุ และค่าได้จากห้องทดลอง โดยที่ V คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุ A คือพื้นที่ทาบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จึงสามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความดันคือ

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (2.6)$$

แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานมีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ตลอดพื้นผิวของวัตถุในทิศทางของการเคลื่อนที่ โดยทั่ว ๆ ไปจะเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานในรูปของสมการที่ (2.7) โดยที่ C_f คือสัมประสิทธิ์แรงหน่วยเนื่องจากความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด L คือความยาวของพื้นผิวในแนวขนานกับทิศทางการไหล B คือความกว้างของพื้นผิว โดยทั่ว ๆ ไปจะหาค่าได้โดยการหารพื้นผิวทั้งหมดด้วย L

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (2.7)$$

แรงต้านทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุใด ๆ คือผลรวมของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านเนื่องจากความดันคือ $F_D = F_f + F_p$ ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบินและเรือดำน้ำ ค่าของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานจะเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นแรงต้านรวมจึงเท่ากับแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่สำหรับวัตถุรูปทรงอื่นที่มีคลื่นวนเกิดขึ้นทางด้านท้าย เช่น แผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ก็จะมีเฉพาะแรงต้านเนื่องจากความดันเท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปค่าของแรงต้านรวม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) โดยที่ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม และ A คือพื้นที่ทาบของวัตถุบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

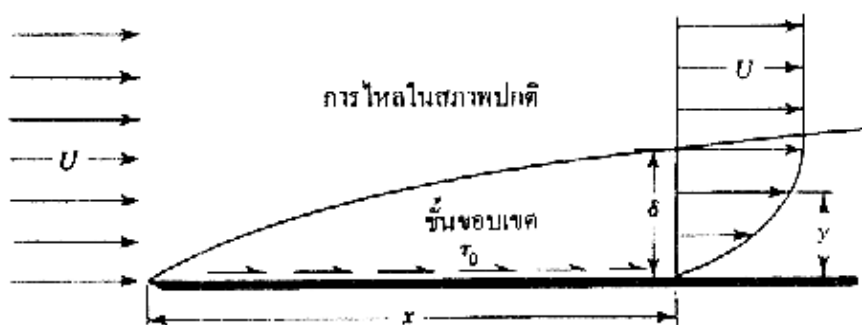
$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A \quad (2.8)$$

2.6.3 แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานของขอบชั้น (Friction Drag of Boundary Layer)

ชั้นขอบเขตในการไหลคือชั้นบาง ๆ ของของไหลจริง (Real fluid) ที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุ วัตถุในบริเวณดังกล่าวนี้จะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ทำให้เกิดการกระจายความเร็ว

ในลักษณะที่ความเร็วที่ผิวคงรูป จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่หน่วยแรงเฉือนและความลาดของความเร็ว (Velocity gradient) มีค่าสูงมาก ในขณะที่ของไหลจริงนอกชั้นขอบเขตนี้สามารถถือว่าเป็นของไหลสมมุติ (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 2.26

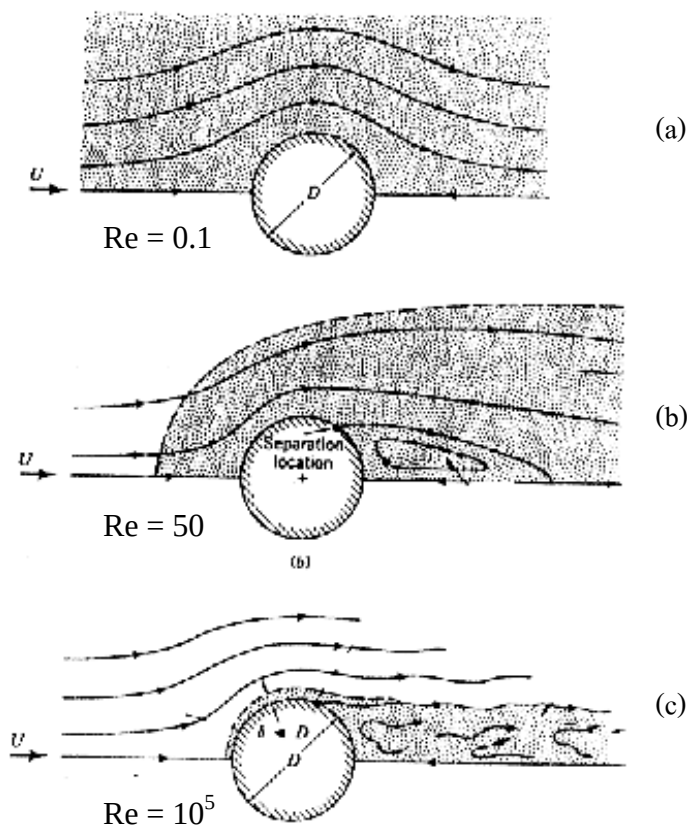


ภาพที่ 2.26 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ

2.6.4 Reynolds number

การทดสอบแบบจำลองในสภาวะการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (None compressible flow) ลักษณะการไหลจะขึ้นอยู่กับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (None compressible flow) 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

กรณีที่มีการไหลผ่านวัตถุที่มีความหนา เช่นทรงกระบอกที่ขวางทิศทางการไหลที่มีค่า Reynolds Number ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.27



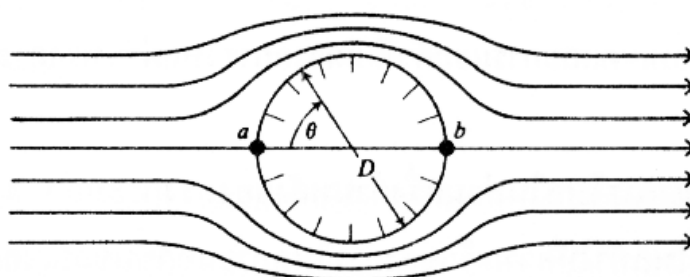
ภาพที่ 2.27 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน

หากค่า Re ต่ำจะมีผลของความหนืดสูงโดยมีความหนาของชั้นขอบเขตมาก ดังภาพที่ 2.27 (a) จะมีค่า $Re < 0.1$ เส้นการไหลจะมีความสมมาตรระหว่างทางด้านหน้ากับด้านหลัง และทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอก เมื่อค่า Re สูงขึ้นจะมีความหนาของชั้นขอบเขตแคบลง และผลของความหนืดจะเกิดขึ้นในบริเวณทางด้านหน้าของทรงกระบอก เป็นระยะทางสั้น ๆ โดยยังคงความสมมาตรระหว่างชั้นขอบเขตทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอกไว้เช่นเดิม ดังรูปที่ 2.27 (b) คุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะเกิดการแยกตัว (Separation) ขึ้นทางด้านหลังของทรงกระบอก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีค่า Re เพิ่มขึ้น สภาพการไหลจะได้รับอิทธิพลจากความเฉื่อยเพิ่มขึ้น และผลของความเฉื่อยจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวของวัตถุซึ่งจะเป็นจุดแยกตัวเนื่องจากของไหลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามผิวโค้งทางด้านหลังของวัตถุ ผลของฟองอากาศที่เกิดจากการแยกตัว (Separation bubble) ทางด้านท้ายของวัตถุซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางด้านเหนือของไหล จึงมีความต้านทานต่อการไหล เมื่อค่า Reynolds number สูงมากขึ้นไปอีก เช่น มีค่าเท่ากับ 10^5 ดังรูปที่ 2.27 (c) บริเวณที่ได้รับความหนืดจะค่อนไปทางด้านหลังของวัตถุ และมีความหนาของ

ชั้นขอบเขตที่ค่อนข้างบาง (เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก) เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุ ในขณะที่ทางด้านหลังจะเกิดการแยกตัวและจะมีผลของบริเวณที่เกิดคลื่นวนต่อสภาพการไหลทางด้านท้ายของวัตถุ ซึ่งจะเกิดการแยกตัวนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

2.6.5 การแยกตัว (Separation)

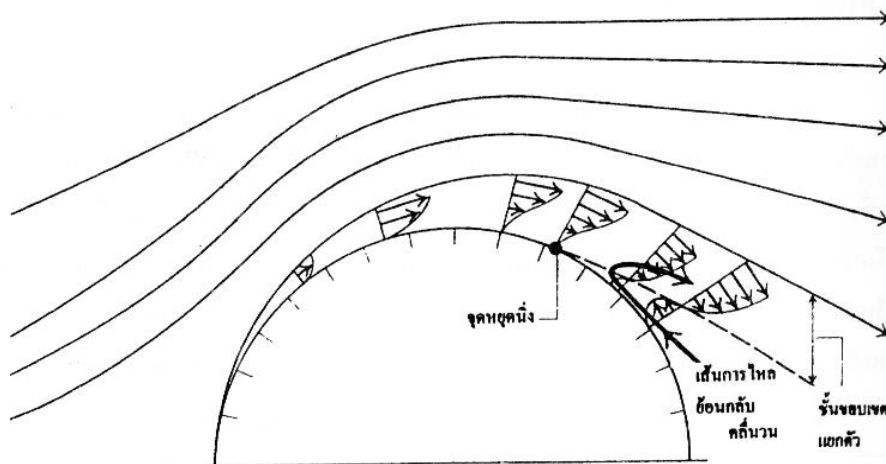
ในกรณีที่วัตถุผิวโค้งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดผิวโค้งนั้น ดังการไหลผ่านทรงกระบอกที่ยาวมากและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลแสดงดังรูปที่ 2.28 ซึ่งแสดงลักษณะของการไหลของของไหลสมมุติผ่านทรงกระบอก เนื่องจากเป็นของไหลสมมุติจึงไม่มีของเขตเกิดขึ้น และในลักษณะดังกล่าวมีเส้นการไหลเส้นหนึ่ง que เข้ากระทบทรงกระบอกที่จุด a แล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ไหลอ้อมทรงกระบอกไปบรรจบกันที่จุด b ซึ่งเรียกจุด a และ b นี้เรียกว่า จุดหยุดนิ่ง (Stagnation points) เพราะที่จุดนี้ของไหลมีความเร็วเป็นศูนย์ พบว่าการกระจายความดันทางด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกัน โดยที่ความดันมีค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าแล้วค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมุม $\theta = 90^\circ$ หลังจากนั้นก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหลังของทรงกระบอก



ภาพที่ 2.28 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน สำหรับของไหลสมมุติ

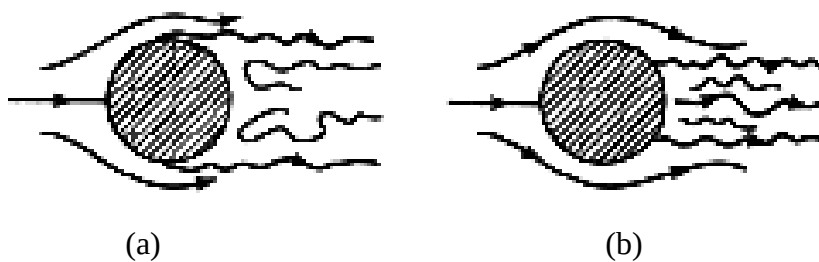
ภาพที่ 2.29 นั้นจะเกิดขึ้นขอบเขต ซึ่งแสดงลักษณะของเส้นการไหลผ่านทรงกระบอกเฉพาะครึ่งบนเท่านั้น ส่วนครึ่งล่างก็มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อพิจารณาเส้นการไหลในส่วนด้านหน้าของทรงกระบอก จะพบว่าชั้นขอบเขตเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าและมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางของผิวทรงกระบอก เนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่งมีค่าสูงสุดจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงในทิศทางการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดันเช่นนี้เมื่อนำสมการของเบอร์นูลลีมาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าการไหลภายนอกชั้นขอบเขตมีความเร็วกว่าการไหลภายในชั้นขอบเขต ทั้งนี้เพราะของไหลที่อยู่ภายในชั้นขอบเขตได้รับอิทธิพลมาจากความหนืด เกิดแรงเฉือนต้านการไหลจึงไหลช้า

กว่าเดิม ชั้นขอบเขตในช่วงครึ่งด้านหน้าของทรงกระบอกเป็นเพียงบาง ๆ และเส้นการไหลไม่แตกต่างจากในกรณีของไหลสมมุติมากนัก



ภาพที่ 2.29 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก

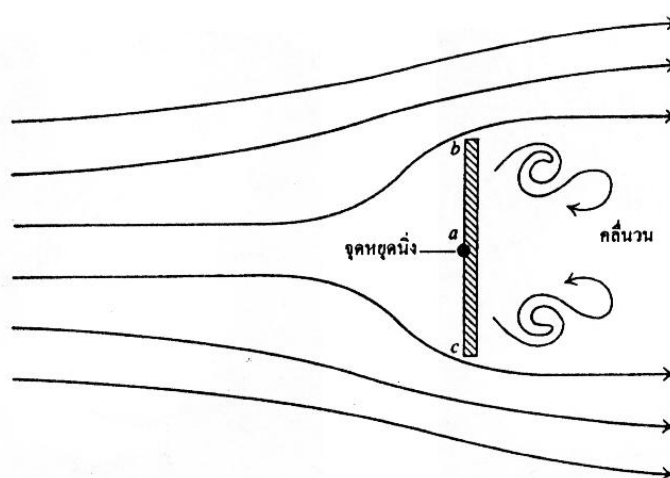
การแยกตัวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ประเภของชั้นขอบเขตว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เนื่องจากชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนมีโมเมนตัมมากกว่าจึงสามารถต้านความดันได้ดีกว่า ดังนั้นจึงทำให้จุดแยกตัวเกิดในตำแหน่งที่ค่อนข้างไปทางด้านท้ายมากกว่ากรณีที่เกิดในชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 ตำแหน่งของจุดแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ
(b) ทรงกลมผิวขรุขระ

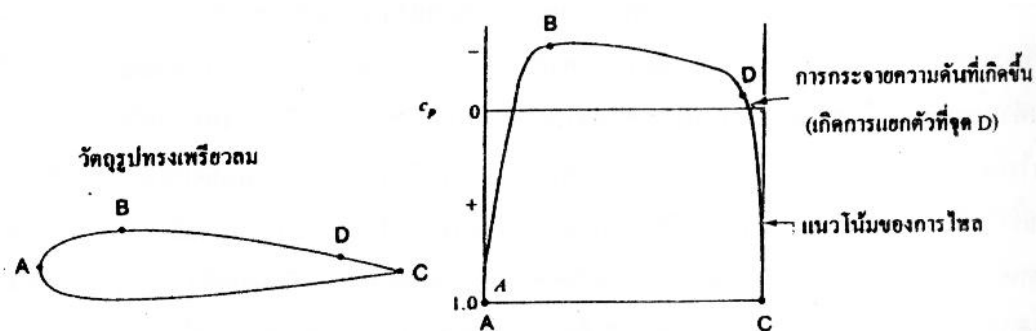
องค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อการแยกตัวคือความขรุขระของผิววัตถุ เนื่องจากของไหลไหลผ่านวัตถุที่มีผิวขรุขระจะก่อให้เกิดชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนได้มากกว่าวัตถุผิวเรียบ ดังนั้นวัตถุที่มีผิวที่ขรุขระกว่าจะทำให้ตำแหน่งของการแยกตัวอยู่ค่อนข้างไปทางด้านท้าย มากกว่าวัตถุที่มีผิวเรียบ

รูปทรงของวัตถุเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อตำแหน่งการแยกตัว ตัวอย่างเช่น ในกรณีวางแผ่นระนาบในแนวขนานกับทิศทางการไหล จะเกิดเฉพาะแรงหน่วงเนื่องจากความเสียดทานเท่านั้น และไม่มี ความดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการแยกตัวหรือไม่เกิดแรงต้านเนื่องจากความดัน อย่างไรก็ตาม ถ้าหากวางแผ่นระนาบให้อยู่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังแสดงภาพที่ 2.31 จะพบว่าไม่มีแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่แรงหน่วงเนื่องจากความดันจะมีค่าสูงมาก จุด a คือจุดหยุดนิ่ง จากจุด a ไปทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นระนาบจะมีความเร็วในการไหลสูงขึ้นแต่ความดันจะลดลง จนกระทั่งถึงจุด b และ c ทำให้มีความดันย้อนกลับและเกิดเวกทางด้านหลังของแผ่นระนาบ



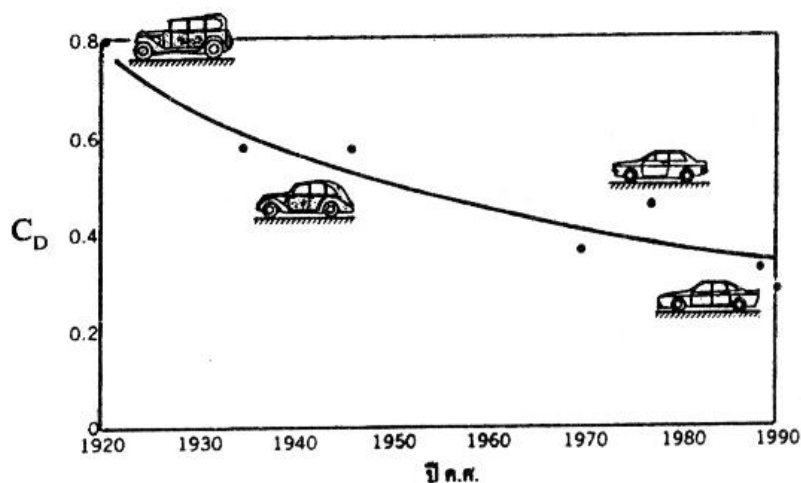
ภาพที่ 2.31 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ในทางปฏิบัติสามารถทำให้แรงหน่วงเนื่องจากความดันลดลงได้โดยทำให้จุดแยกตัวไปเกิดที่ส่วนท้ายของวัตถุให้มากที่สุด ด้วยการทำให้วัตถุมีรูปทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบิน (Airfoil) ดังแสดงในภาพที่ 2.32 โดยมีแผนภาพการกระจายของความดัน จุดหยุดนิ่งคือจุด A กับจุด C และความดันจะมีค่าต่ำสุดที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาแน่นมากที่สุด จากนั้นความหนาของวัตถุจะค่อย ๆ ลดลงจาก B มาจนถึงปลายสุดที่จุด C จึงไม่มีความดันย้อนกลับ ดังนั้นจุดแยกตัวจะไปเกิดที่ปลายสุด ทำให้เกิดแรงต้านเนื่องจากความดันน้อย



ภาพที่ 2.32 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน

ดังนั้นการพยายามที่จะลดขนาดของแรงต้านที่กระทำต่อรถยนต์ได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องโดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงรูปทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม ดังตัวอย่างแสดงภาพที่ 2.33 ซึ่งจากรูปจะพบว่ารูปทรงของรถได้รับการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ ตลอดจนลักษณะของหน้าต่าง หรือแม้แต่กระจกมองด้านข้าง นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ทาบบนแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ผลจากการลดแรงหน่วงจะช่วยให้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง



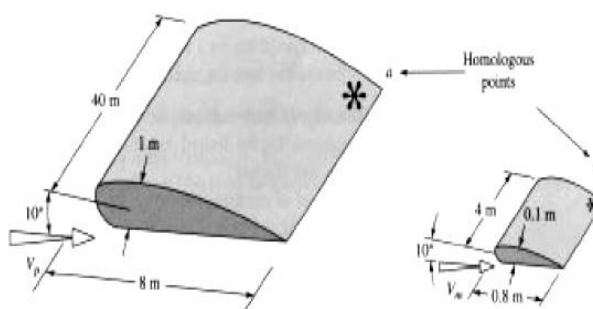
ภาพที่ 2.33 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อนได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

2.5.6 ความคล้ายคลึงกัน

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

2.6.6.1 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

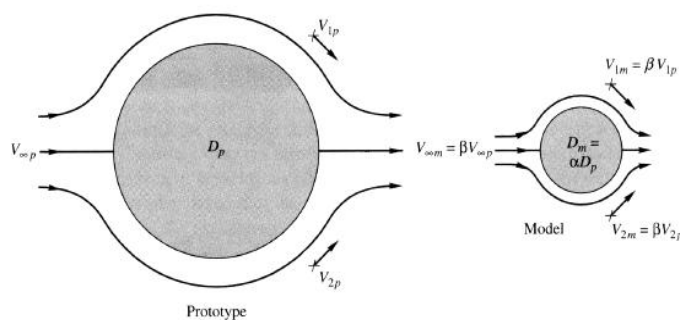
ในการศึกษาหุ่นจำลองสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ หุ่นจำลองจะต้องมีรูปร่างเหมือนกับต้นแบบ จะแตกต่างกันเฉพาะขนาดเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้รูปแบบของการไหล (Flow patterns) ในหุ่นจำลองและต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ 2.34 ถ้าให้ L_p และ L_m เป็นความยาวของด้านใด ๆ ที่ต้องพิจารณาของต้นแบบและหุ่นจำลองตามลำดับ และ L_r เป็นสัดส่วนความยาว (Length ratio) โดยที่ $L_r = L_p / L_m$ (สัดส่วนความยาวของต้นแบบกับหุ่นจำลอง) พื้นที่จะแปรผันตาม L_r^2 และปริมาตรจะแปรผันตาม L_r^3



ภาพที่ 2.34 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต

2.6.6.2 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์ (Kinematic similarity)

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

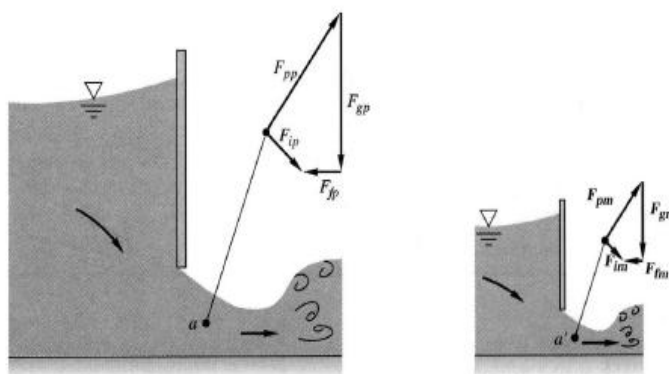


ภาพที่ 2.35 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์

2.6.6.3 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

หุ่นจำลองจะต้องมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัตกับต้นแบบก็ต่อเมื่อสัดส่วนของแรงต่างๆ ที่กระทำนั้นเท่ากัน ซึ่งแรงที่กระทำเหล่านี้ประกอบด้วยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (F_G) แรงเนื่องจากความดัน (F_p) แรงเนื่องจากความหนืด (F_v) แรงเนื่องจากความยืดหยุ่น (F_T) ถ้าผลลัพธ์ของแรงต่าง ๆ ข้างต้นไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าวัตถุจะต้องมีความเร่งตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ทำให้วัตถุไม่อยู่ในสภาวะสมดุล แต่แรงลัพธ์นี้สามารถที่จะแปลงเป็นแรงที่กระทำกับวัตถุสมดุลได้ โดยเพิ่มแรงเฉื่อย (F_I) เข้าไปในระบบ โดยที่แรงเนื่องจากความเฉื่อยนี้มีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์แต่ทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ

$$F_G + F_p + F_v + F_T + F_I = 0 \quad (2.9)$$



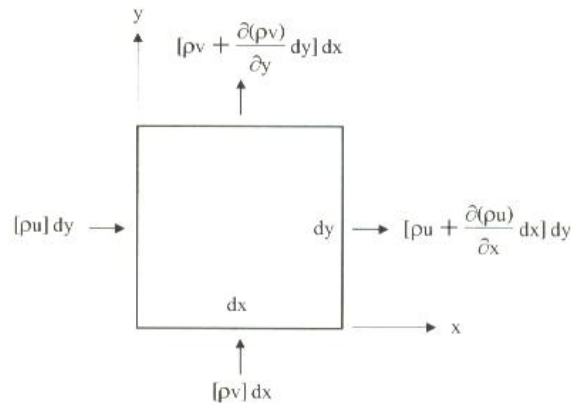
ภาพที่ 2.36 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต

2.7 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

2.7.1 สมการอนุรักษ์มวล

พิจารณาเมื่อของไหลเดินทางผ่านกรอกเล็ก ๆ ขนาด dx และ dy ดังรูปที่ 2.37 จากหลักความจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นปริมาณมวลที่ไหลเข้าและออกบริเวณควบคุมนี้จะเท่ากัน นั่นคือ



ภาพที่ 2.37 ฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตั้งอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์มวล

ในทิศแกน x ;

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

(2.10)

ในทิศแกน y ;

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

(2.11)

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 $-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy$ หมายความว่า ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลจะเท่ากับปริมาณที่ลดลงภายในกรอบเล็ก ๆ จะได้สมการที่ (2.13) ซึ่งเป็น สมการเชิงอนุพันธ์มวล ซึ่งเป็นสมการอธิบายการไหลสมการแรก

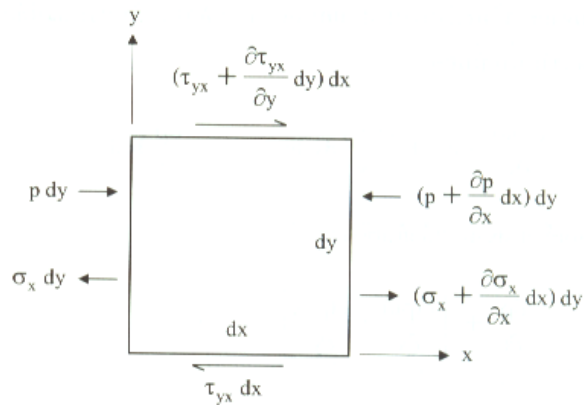
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (2.12)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{V}) = 0 \quad (2.13)$$

2.7.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็ก ๆ ขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.38



รูปที่ 2.38 รูปแบบแสดงแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน $F = ma$ เมื่อพิจารณาแรงรวมในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \left[-\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dx dy + \rho f_x dx dy \quad (2.14)$$

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

$a_x = \frac{Du}{Dt}$ แทนค่า m , a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการที่ (2.14) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (2.15a)$$

ในทำนองเดียวกันตามแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (2.15b)$$

จากสมการที่ (2.15a และ 2.15b) เป็นสมการอนุพันธ์สัมบูรณ์ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดา ดังเช่นสมการที่ (2.13) จะได้

ในทิศแกน x

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[u \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \quad (2.16a)$$

ในทิศแกน y

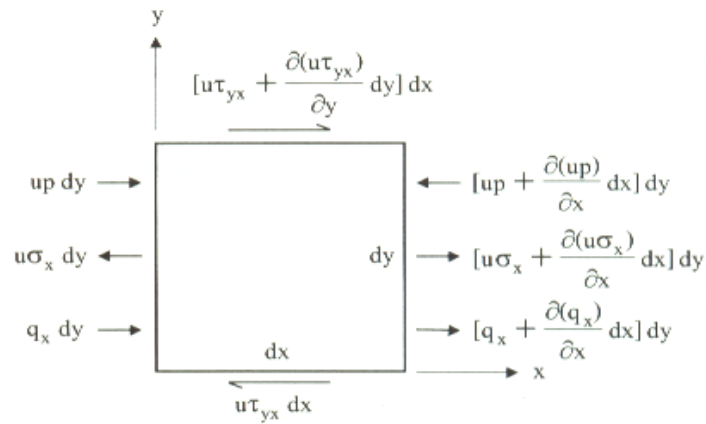
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[u \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \quad (2.16b)$$

สมการที่ (2.16a – 2.16b) นี้แสดงถึงสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมของมวลของไหล

2.7.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.39 จากหลักการการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ได้เป็น

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



ภาพที่ 2.39 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy

จากสมการที่ (2.17) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] + \text{div} \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} \\ + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (2.18)$$

เราเรียกกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (2.13, 2.14 และ 2.15) ว่าระบบสมการ navier-stokes equations เป็นระบบสมการตัวแทนการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจริง จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ การแก้สมการ Navier-stokes ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นเรื่องยาก แต่เราสามารถนำเอาวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) ช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ ซึ่งเป็นที่มาของ Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับปรากฏการณ์การไหลแบบต่างๆ ใน CFD โปรแกรม FLUENT (FLUENT User's Guide, 2001)

2.7.4 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานในการไหลแบบคงตัวของของไหลที่กดอัดไม่ได้ สมการพลังงานมีพื้นฐานมาจากกฎข้อหนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า สำหรับการไหลแบบคงตัว งานที่

ได้รับจากระบบรวมกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือออกจากระบบ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบนั้น นั่นคือ

$$Work + Heat = \Delta Energy \quad (2.19)$$

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

ซึ่งสมการพลังงานและสมการสภาพต่อเนื่องเป็นสมการที่มีความสำคัญมากในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ โดยเฉพาะด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งสมการเบอร์นูลลี ที่สร้างขึ้นโดย Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1738 ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับของไหลที่ก่อดัด ดังสมการที่ (2.20)

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (2.20)$$

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

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \text{ค่าคงที่} \quad (2.21)$$

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

โดยได้นำหลักการของสมการเบอร์นูลลี มาใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือ เพื่อใช้ในการวัดความดัน และความเร็วของอากาศ โดยเฉพาะในการวัดค่าความดัน และความเร็วที่จะทำการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ เช่น มนรอมิเตอร์ (Barometers) หลอดปีโตท (Pitot tube) เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดกับเครื่องมือนี้ในบทต่อไป

2.8 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD (Computational Fluid Dynamics) หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาผลเฉลยเชิง

ตัวเลข และจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในปัญหาที่สนใจ ซึ่ง CFD มีระเบียบขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างลักษณะและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา รวมทั้งการแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ

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

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

การวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้น จะเกี่ยวข้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากสมการ อนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งได้กล่าวของรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา การคำนวณหรือแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้มีหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume) กับโปรแกรม FLUENT 6.3 แก้ปัญหาและการวิเคราะห์กับอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก

2.8.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method)

เทคนิคการคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่แล้วมักใช้ระเบียบวิธีสืบเนื่อง สร้างโปรแกรมคำนวณแก้ปัญหามา เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมของการไหลในของไหลโดยเฉพาะ ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะทำอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่กำหนด

2.8.2 ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญห

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ประกอบด้วยการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสามสมการและสมการอื่น เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) และสมการสเกลาร์อื่น ๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่างมีผลต่อการเข้าสู่ของคำตอบและค่าผลเฉลย โดยทั่วไประเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้นการแก้ปัญหามีสองอย่างตามแต่ลักษณะของปัญหา (FLUENT User' Guide, 2001) ดังนี้

2.7.2.1 ระเบียบขั้น Segregated solver เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาคู่สมการจะกระทำแบบรอบและแก้ซ้ำ เนื่องจากสมการอนุรักษ์จะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหามาตามระเบียบขั้น Segregated solver แสดงดังรูป 2.51 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

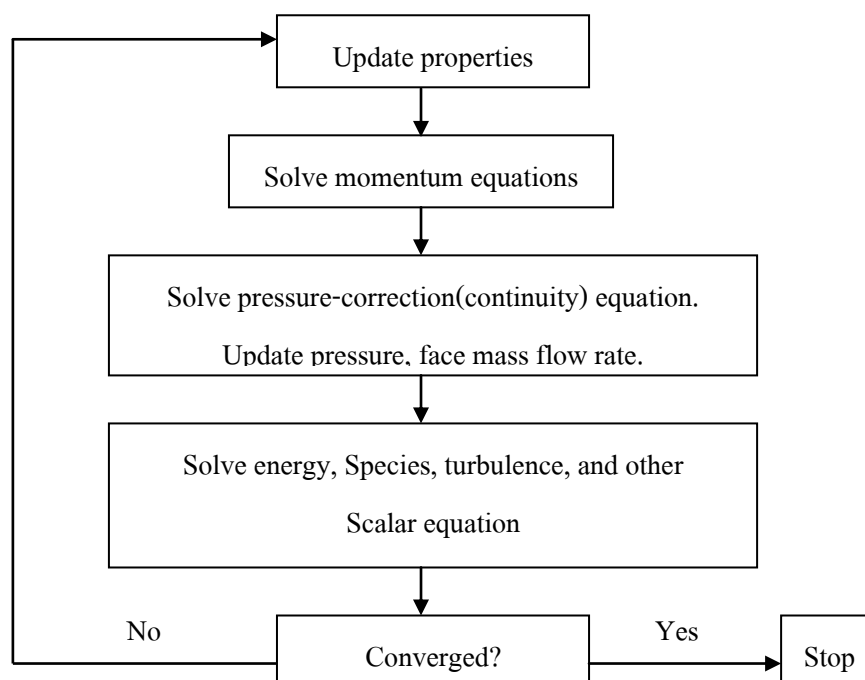
1) สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

2) คำนวณสมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้งสามสมการ เพื่อคำนวณค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล

3) เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุรักษ์มวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure-correction equation) ประดิษฐ์จากสมการอนุรักษ์มวลกับโมเมนตัม โดยค่าความดันอัตราการไหลและความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น

4) ขั้นตอนนี้เป็นการแก้สมการอื่นที่เพิ่มเติมเข้ามา สำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่น โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 3

5) การยอมรับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะถูกกำหนดขึ้น จากผลต่างของเศษเหลือในแต่ละรอบของการคำนวณ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องทำการคำนวณซ้ำ (กลับไปขั้นตอนที่ 1) จนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 2.40 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นตอนแบบ Segregated solver

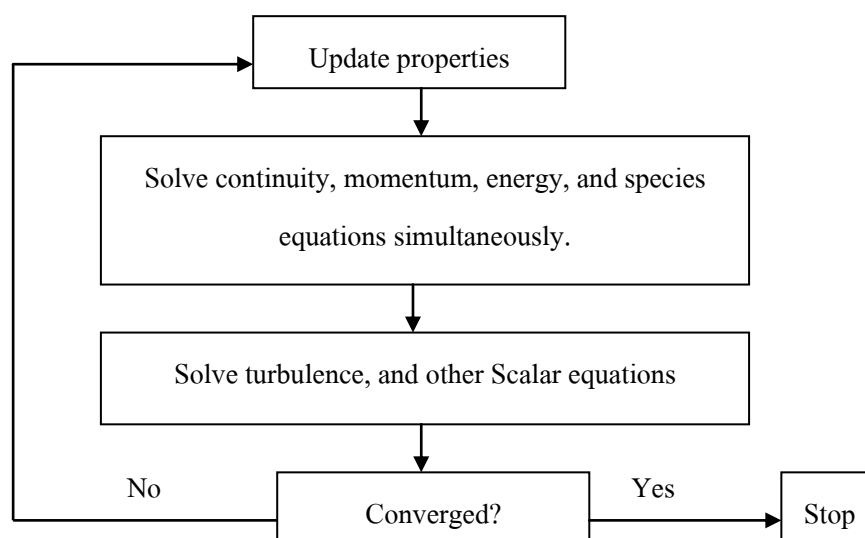
2.8.2.2 ระเบียบชั้น Coupled solver เป็นระเบียบชั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่เอาสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (เมื่อกรณีของไหลมีหลายชนิด) แก้มการพร้อมกันก่อนจะแก้สมการสเกลาร์อื่น ๆ การคำนวณสมการเหล่านี้ยังต้องทำเป็นรอบ เช่นเดียวกับระเบียบชั้นตอนแรก ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.41

1) ระเบียบชั้นตอนแรก สมบัติของสารถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

2) ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด)

3) คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วน และ สมการสเกลาร์อื่น ๆ โดยค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

4) ประเมินผลต่างเศษเหลือของรอบว่ายอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณกลับไปขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2.41 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Coupled solver

2.8.3 ระเบียบวิธีคำนวณ

การคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นมี 2 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method) และระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ความแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองคือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่าง

โนดหรือ อิลิเมนต์ เพื่อทดแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ กล่าวคือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง ตัวรู้ค่าถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณแบบ Segregated solver เพราะการคำนวณแบบ Segregated solver จะคำนวณหาค่าตัวแปรเดียวของทุกอิลิเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณตัวแปรอื่น ๆ ที่ละตัวแปร ทั้งนี้ระเบียบวิธี Coupled solver สามารถเลือกใช้ทั้งสองระเบียบวิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

2.8.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหาการไหลของบริเวณใกล้ผนัง

พฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับผนังเป็นปัญหาและอุปสรรคสำคัญกับการจำลองการไหลเชิงตัวเลข ที่ผนังความเร็วของของไหลจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ เนื่องจากการหน่วงของความหนืดบริเวณนี้ มีผลกับการไหลมาก นอกจากนี้แล้วความเสียดทานที่ผนังยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนของของไหล ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำเป็นต้องมีวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหานี้

ในโปรแกรม FLUENT มีระเบียบวิธี 2 อย่างที่ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นของการไหลบริเวณผนัง อันได้แก่ Near wall function และ Near-wall model ทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่วิธีการคำนวณปัญหา โดย Near-wall model เป็นเทอมของฟังก์ชันในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อการแก้ปัญหาบริเวณผนัง โดยทำอิลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เล็กและคำนวณแต่ละอิลิเมนต์ไปเรื่อย ๆ จนติดผนัง ขณะที่ Near wall function ทำการสร้างฟังก์ชันแยกจากแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติการไหลต่างๆ ที่อิลิเมนต์ติดกับผนัง ฟังก์ชันที่ว่านี้ในโปรแกรม FLUENT มี 2 อย่าง ได้แก่ Standard near wall function และ Non-equilibrium near wall function ซึ่งข้อจำกัดของฟังก์ชันทั้งสอง คือ การคำนวณการไหลที่ค่า Re ต่ำได้ไม่ดีนัก และมีข้อสมมุติฐานที่ไม่ครอบคลุมทุกปัญหา ด้วยเหตุนี้ จึงมีการประดิษฐ์แบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับปัญหาความปั่นป่วนในบริเวณค่า Re ต่ำซึ่งแบบจำลองที่ว่านี้ คือ Enhanced near-wall model โดยใช้หลักการของการสร้างฟังก์ชันนำไปปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งทำให้การแก้ปัญหาการไหลที่เกิดใกล้ผนังมีประสิทธิภาพ และยังสามารถใช้งานได้ครอบคลุมปัญหามากขึ้น

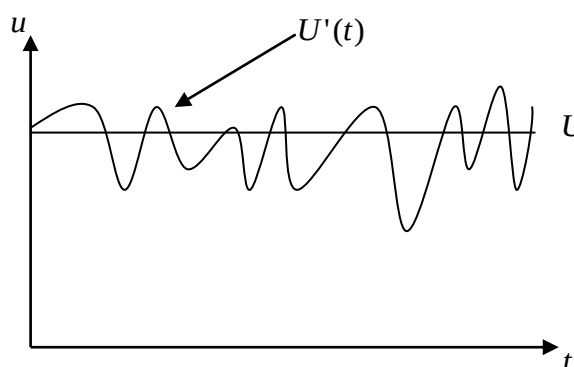
2.8.5 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่า Reynolds's number สูง สภาพการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและใช้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองเหล่านั้น จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหล

ของของไหลและสมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds ก่อนอธิบายแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Fox, McDonald and Pritchard, 2003)

2.8.5.1 สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

ความเร็วและคุณสมบัติต่าง ๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังภาพที่ 2.42 โดย $u(x, y, z, t)$ เป็นคุณสมบัติของของไหล เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง และเวลา



ภาพที่ 2.42 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

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

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u dt \quad (2.21)$$

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

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (2.22)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\frac{\partial(\rho\bar{U})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}\bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu\text{grad}\bar{u}) + \left[-\frac{\partial(\rho\bar{u}'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\bar{u}'\bar{v}')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\bar{u}'\bar{w}')}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (2.23a)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{v}\bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu\text{grad}\bar{v}) + \left[-\frac{\partial(\rho\bar{u}'\bar{v}')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho\bar{v}'^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho\bar{v}'\bar{w}')}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (2.23b)$$

สมการข้างต้นนี้เราเรียกว่า สมการของ Reynolds หรือ Reynolds-Average Navier-Stokes equation (RANS) จะเห็นว่ารูปสมการนี้คล้ายกับสมการนาเวียร์-สโตกส์เดิมแต่มีเทอมความเค้น (ในวงเล็บทางขวามือ) เพิ่มเข้ามา โดยสมการใน 3 มิติ จะมีทั้งหมดหกเทอมด้วยกัน เราเรียกความเค้นเหล่านี้ว่า Reynolds stresses

จากการทดลองและศึกษาของ Boussineq ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเทอมความเค้นนี้ ที่มีกับความเร็วเฉลี่ยของการไหลกับอัตราการเปลี่ยนรูปอิลิเมนต์ของไหล (Versteeg and Malalasekera, 1995) ไว้ดังนี้

Reynolds stresses

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (2.24)$$

โดย μ_t คือ Turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้ คือ แบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

2.8.5.2 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 (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon\bar{U}) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\text{grad}.\varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.26)$$

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.27)$$

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

2.8.5.3 แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ RNG $k - \varepsilon$

RNG $k - \varepsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ประดิษฐ์จากสมการนาเวียสโตกส์ ที่ใช้ระเบียบวิธีที่เรียกว่า Renormalization Group (RNG) แบบจำลองนี้จะมีค่าคงที่ที่แตกต่างจากแบบจำลอง Standard $k - \varepsilon$ และเพิ่มบางเทอมในสมการได้เป็น

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k\bar{U}) = \text{div}[\alpha_k \mu_{eff} \text{grad}.k] + G_k + G_b + \rho_\varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varepsilon\bar{U}) = \text{div}[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad}.\varepsilon] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2.29)$$

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

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} \quad (2.30)$$

โดย

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

สมการที่ (2.30) จะใช้ได้ดีเมื่อการไหลนั้นมีค่า Reynolds number ต่ำ แต่ถ้าการไหลนั้นมีค่า Reynolds number สูงจะต้องใช้สมการที่ (2.28) แทนโดยกำหนดให้ค่า $C\mu = 0.0845$ การคำนวณเพื่อหาค่า α_k และ α_ε นั้นใช้สมการ

$$\alpha_k \left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha - 2.3929}{\alpha_0 - 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (2.31)$$

ถ้าหากเป็นกรณีค่า Reynolds number สูง α_k และ $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ค่า R_ε ในสมการที่ (2.19) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$Re = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \bullet \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.32)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (2.28) และ (2.29) จะมีค่าเป็น $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำหรือแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) หรือสมการการอนุรักษ์การไหลของของไหล ที่สามารถอธิบายสภาวะของของไหลของการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและเวลา 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

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อการตรวจสอบอุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ ที่สามารถประหยัดน้ำมัน ดังนั้นจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจสอบ ซึ่งปัจจุบันมีโปรแกรมที่ใช้เป็นเครื่องมือที่เรียกว่า การจำลองด้วยแบบจำลองการไหลพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics: CFD) โดยนิยมนำมาใช้ในการจำลองการไหลของอากาศผ่านวัตถุ เนื่องจากประหยัดเวลางบประมาณ และสามารถแสดงผลทั้งในเชิงตัวเลข และกราฟฟิก สามารถสังเกตพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านวัตถุได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถนำมาปรับปรุง แก้ไข ข้อเสียของอุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ อย่างอย่างถูกต้อง และก่อนที่จะนำมาสร้าง ติดตั้งทดสอบ ก่อนที่จะนำมาใช้งานจริง โปรแกรมที่เลือกใช้ในการตรวจสอบในโครงการวิจัยนี้คือ โปรแกรม Gambit ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง กริด กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของแบบจำลอง จากนั้นนำเข้าสู่โปรแกรม Fluent สำหรับกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณ แสดงผลในเชิงตัวเลขและกราฟฟิก

ก่อนที่จะนำ CFD มาใช้ในการตรวจสอบ จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องเพื่อความน่าเชื่อถือของเงื่อนไขของแบบจำลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อน (Validation) กับการทดลองในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel) ด้วยการเปรียบเทียบผลของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient: C_D) ของรถกระบะจำลองขนาดเล็ก เมื่อได้เงื่อนไขของแบบจำลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่าใกล้เคียงกันและเป็นค่ายอมรับแล้ว

จากนั้น จึงเป็นกระบวนการในการนำ CFD มาช่วยในการตรวจสอบด้วยการจำลอง การปรับเปลี่ยนรูปลักษณะของอุปกรณ์เสริม อาทิ การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง รัศมีโค้ง ขนาด ฯลฯ เพื่อหารูปลักษณะของอุปกรณ์เสริมที่เหมาะสมหรือให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่น้อยที่สุด นำไปสู่กระบวนการสร้าง ติดตั้ง และทดสอบเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ผล เสนอแนวทางการใช้งานสรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์ โดยลำดับขั้นตอนหลักของการดำเนินงานในบทนี้คือ

1. ตรวจสอบความถูกต้องเพื่อความน่าเชื่อถือของเงื่อนไขของแบบจำลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อน (Validation) กับการทดลองในอุโมงค์ลม (Wind Tunnel)
2. กระบวนการในการนำ CFD มาช่วยในการตรวจสอบอุปกรณ์เสริม
3. การติดตั้งอุปกรณ์เสริม และทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันกับรถกระบะจริง
4. วิเคราะห์ผล เสนอแนวทางการใช้งานและสรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

3.1 การทดสอบแรงต้านระหว่างรถทดลองในอุโมงค์ลมและการจำลองด้วย CFD เพื่อยืนยันผล

ขั้นตอนแรก การตรวจสอบความถูกต้องเพื่อความน่าเชื่อถือของเงื่อนไขของแบบจำลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อน กับการทดลองในอุโมงค์ลมนั้น เกิดจากเหตุผลที่ว่า ในการทดสอบในอุโมงค์ลมนั้น มีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ ขนาดของแบบจำลอง โดยในอุโมงค์ลมไม่สามารถทดสอบแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ได้ และความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งมีค่าที่ต่ำ ผิดกับความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด สิ้นเปลืองเวลาในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ และปรับเปลี่ยนแบบจำลองในการทดสอบ

ดังนั้น ขั้นตอนในการทดสอบแรงต้านของแบบจำลองรถกระบะ ซึ่งการทดสอบ จะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 การทดลองแบบจำลองโดยใช้วิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) วิธีที่ 2 การทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) เริ่มต้นจากการทดสอบแบบจำลองที่ความเร็ว 10 m/s ถึง 35 m/s เพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลองทั้ง 2 วิธี ดังนี้คือ

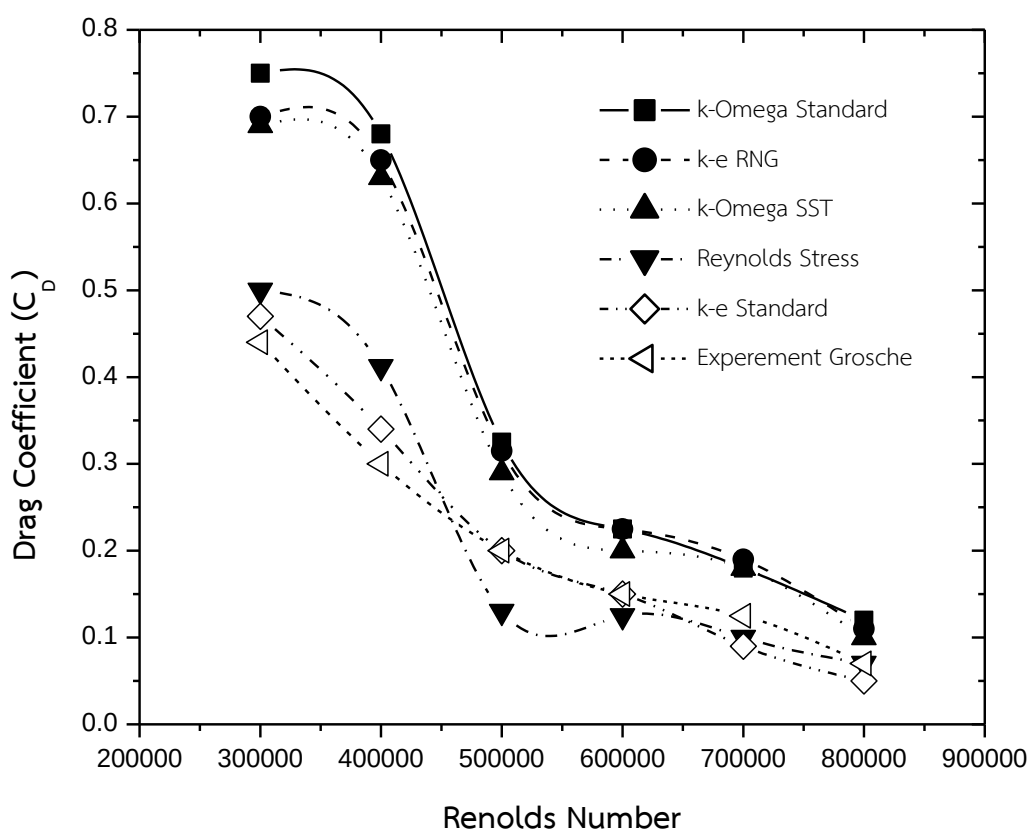
3.1.1 จำลองด้วยแบบจำลองการไหลพลศาสตร์

แต่ก่อนที่จะทำการทดลองโดย CFD ของแบบจำลองขนาดเท่ากับต้นแบบ จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กันกับการทดลองกับอุโมงค์ลม เพื่อให้แน่ใจว่าเงื่อนไขในคำนวณ มีความถูกต้อง แม่นยำ และยอมรับได้ โดยการยืนยันผลได้มีการทำหลายส่วน เช่นการยืนยันผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล (Turbulent model) จำนวนกริด (Grid independent) เป็นต้น

3.1.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากทฤษฎีของ CFD ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 และงานวิจัยท่านอื่นดังที่กล่าวมานั้น ทำให้ทราบข้อมูลของแบบจำลอง CFD ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทางด้านอากาศพลศาสตร์ ในการทดสอบแรงต้านของรถบรรทุกเล็ก โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีปริมาตรสับแบ่ง (Finite volume method) ระเบียบขั้นการแก้ปัญหาใช้ Segregated solver, ระเบียบวิธีคำนวณใช้ Implicit method, ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคำนวณการไหลของบริเวณใกล้ผนังใช้ Standard wall function, เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าเป็น Velocity inlet, เงื่อนไขขอบเขตทางออกเป็น Pressure outlet ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศโดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ, โดยไม่มีส่วนของสมการพลังงานมาเกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม FLUENT 6.3

3.1.1.2 การยืนยันผลการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา แต่การจำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์เป็นการไหลที่มีค่า Reynolds number สูง ซึ่งสภาวะในการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ แบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อมาช่วยในการแก้ปัญหาคำนวณ

คำนวณ ซึ่งในโปรแกรม FLUENT 6.3 มีให้เลือกหลายแบบจำลอง เพราะฉะนั้น จึงได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ โดยการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) แบบต่าง ๆ ซึ่งจากภาพที่ 3.1 เป็นการเปรียบเทียบและเพื่อยืนยันผลของสมการการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model) ให้มีความถูกต้องกับลักษณะการคำนวณ โดยกำหนดจำนวนกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ กริดที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับการศึกษาของ Groshe and meier (2001: 1201-1218) ซึ่งเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับวัตถุทรงกลม เจาะรูตรงกลาง โดยใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือในการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Groshe มากที่สุด ซึ่งจากข้อมูล และทฤษฎีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ แบบจำลองนี้เหมาะสมกับการจำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการคำนวณ CFD ของรถบรรทุกเล็กต่อไป

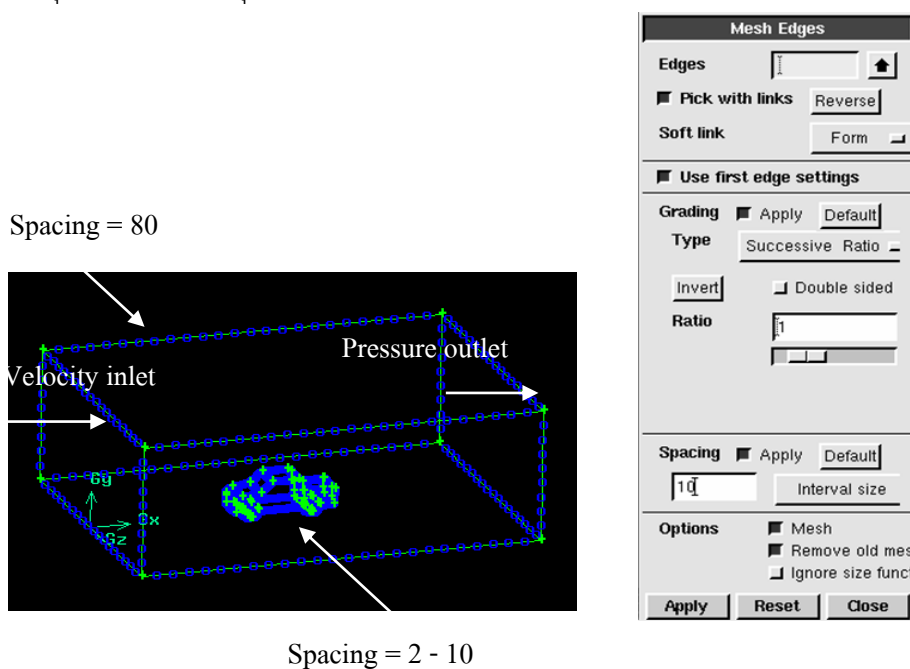


ภาพที่ 3.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลต่างๆ

3.1.1.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของการเพิ่มจำนวนกริด จากระเบียบขั้นตอนการทำงานของ CFD มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นการ

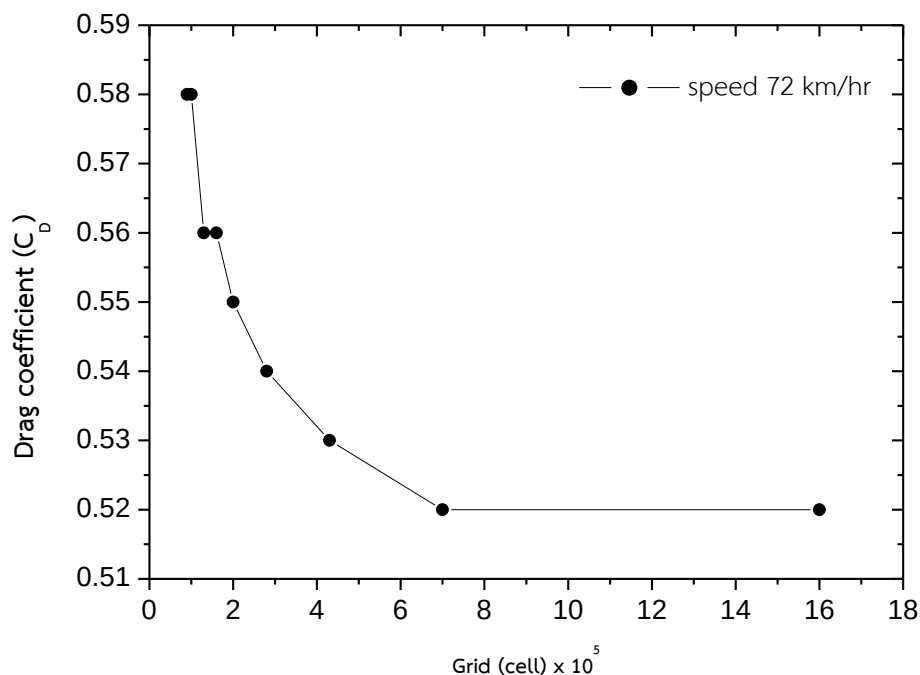
ประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนที่เราต้องแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็กๆ ซึ่งเราใช้ระเบียบวิธีแก้ปัญหาคาร์ไหลบริเวณใกล้ผนัง เป็นแบบ Near-wall model โดยเป็นเทอมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon standard ดังนั้นต้องกำหนดจำนวนความละเอียดของกริด และกำหนดอิลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการเพิ่มจำนวน และความละเอียดของกริด ของผิวรถบรรทุกเล็ก และผนัง เพื่อหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เพราะถ้าหากเรากำหนดให้มีความละเอียดมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณ

จากขั้นตอนการประมวลผล ได้กำหนดระยะห่างของจุดเพื่อที่จะเป็นจุดเชื่อมกันของกริด โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งระยะห่างของผิวรถบรรทุกเล็กต้องมีความละเอียดกว่าผิวของผนังล้อมรอบรถ จากภาพที่ 3.2 เป็นการแสดงการกำหนดความละเอียดของกริด โดยการเพิ่มระยะห่างของจุด บนผิวรถบรรทุกเล็ก



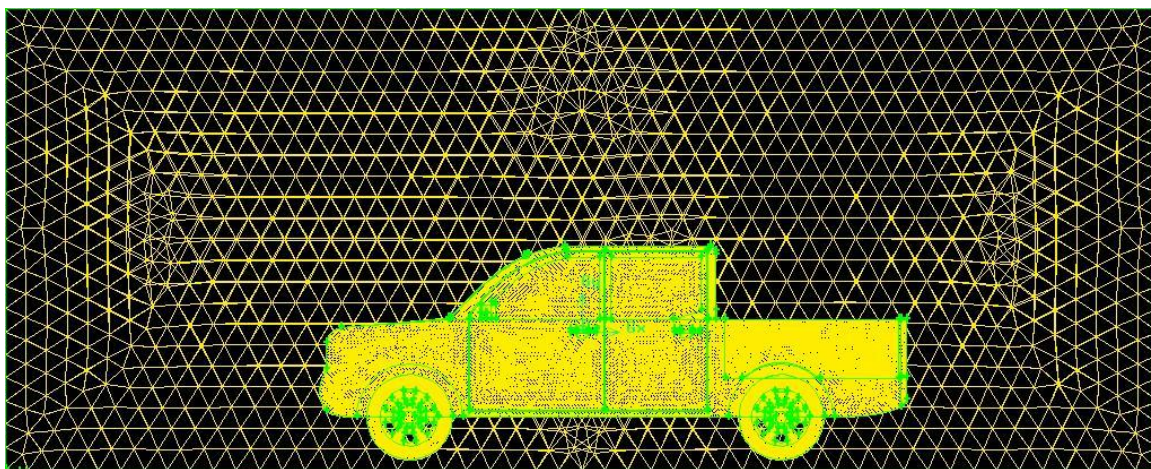
ภาพที่ 3.2 การกำหนดจำนวนกริด

จากภาพนั้นเป็นการกำหนดระยะระหว่างจุด (Spacing) ของรถบรรทุกเล็กที่ 2-10 หน่วย และบริเวณผนังที่ระยะ 80 หน่วย กับรถบรรทุกเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ 2.68576 m^2 ทดสอบที่ความเร็ว 72 km/h และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากที่กล่าวมาข้างต้นใช้ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงต้าน (Drag force) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ดังภาพที่ 3.3 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/h



ภาพที่ 3.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริด

จากภาพที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งจากผล เมื่อมีการเพิ่มจำนวนกริดมากขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าหนึ่ง ที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านคงที่ ซึ่งหากมีการเพิ่มขึ้นของกริดอีกก็ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน นั่นคือ กำหนดระยะระหว่างจุดบนผิวรถที่ 3 หน่วย และที่บริเวณผนัง 80 หน่วย จำนวนกริดประมาณ 728,644 cell ซึ่งจะได้นำข้อกำหนดนี้ไปใช้ในการคำนวณ



ภาพที่ 3.4 ลักษณะกริด (Grid) แบบ Tri/Tet ของแบบจำลองเมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

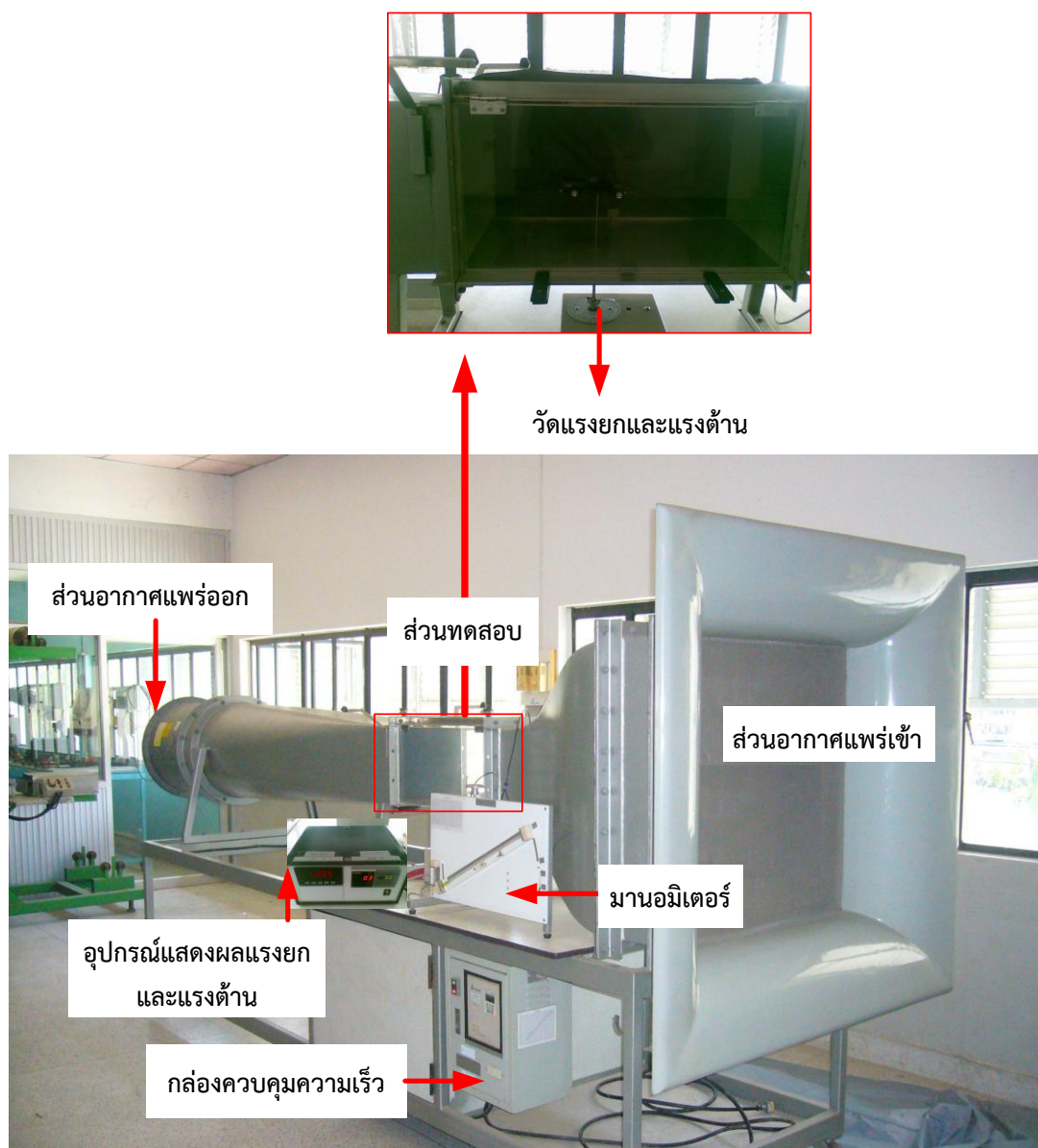
3.1.2 การทดสอบแรงต้านของรถกระบะในอุโมงค์ลม

3.1.2.1 รายละเอียดของอุโมงค์ลม อุโมงค์ลมนี้เป็นอุโมงค์ลมแบบเปิดที่มีพัดลมอยู่ทางด้านใต้ลมใช้สำหรับศึกษาทางด้านอากาศพลศาสตร์ของวัตถุที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง ตามภาพที่ 3.5

อากาศไหลผ่านอุโมงค์ลมโดยการไหลผ่านทางส่วนอากาศแพร่เข้า (Inlet) ที่มีชุดบังคับทิศทางลมให้ไหลเป็นเส้นตรงผ่านผ่านตะแกรงลดเพื่อลดการปั่นป่วนของอากาศ ผ่านพื้นที่ช่วงที่ตีบเล็กลง สำหรับทดสอบนั้น (Test section) ทำด้วยวัตถุโปร่งแสงถัดจากช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้นก็เป็นตัวลดความเร็ว (Low angle diffuser) ซึ่งจะสิ้นสุดที่พัดลมของตัวอุโมงค์ ซึ่งคือส่วนอากาศแพร่ออก (Outlet) ผิวด้านในของตัวลดความเร็วและอุโมงค์ลมช่วงที่ใช้สำหรับทดสอบนี้จะเรียบมาก ใบของพัดลมที่มีจำนวนใบถึง 7 ใบนี้จะทำด้วยอะลูมิเนียมหล่อที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ได้รับการตรวจสอบตามหลักการของ Aerofoil เพื่อให้พัดลมมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดและมีการไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์ต่ำสุด ความเร็วของพัดลมนี้สามารถปรับได้จากอินเวอร์เตอร์

ภาพวัดความดันสถิติจำนวนสี่รูที่ถูกจัดให้มีระยะห่างเท่าๆ กันจะต่อรวมเข้าด้วยกันด้วยท่อร่วมเพื่อให้มีผลกระทบต่อหุ่นจำลองที่มาทดสอบน้อยที่สุด ความเร็วลมจะอ่านค่าออกมาเป็นเฮตของความเร็วจากมาโนมิเตอร์หลอดแก้วเอียงที่เรียกว่า Inclined manometer หุ่นจำลองจะถูกนำมาติดตั้งไว้บนขารองรับของโหลดเซลล์ที่วัดแรงได้ 2 ทิศทาง (Two component cell) พร้อมตัวแสดงผลเพื่อวัดแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag) และสามารถเปลี่ยนมุมปะทะ (Angle of incidence) ของหุ่นจำลองได้อย่างรวดเร็ว มุมดังกล่าวที่อ่านได้จากสเกลพื้นฐานของขาที่ใช้สำหรับติดตั้งหุ่นจำลองนั้น อุโมงค์ลมนี้จะติดอยู่บนโต๊ะที่มีล้อสำหรับการเคลื่อนย้าย ซึ่งมีข้อมูลทางด้านเทคนิคดังนี้คือ

- พัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 480 mm
- มอเตอร์ขนาด 3.7 kW, 380 V, 3 Phase, 50 Hz
- อินเวอร์เตอร์ขนาด 5 kVA
- อัตราส่วนของการลดขนาดพื้นที่หน้าตัด 7:1
- ความเร็วสูงสุดของลม 25 m/s



ภาพที่ 3.5 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

3.1.2.2 การทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม

การเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผล (Validation) นั้น ใช้แบบจำลองของรถกระบะเสมือนจริงทำจากเหล็ก รถกระบะแบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ 0.0067144 m^2 ดังภาพที่ 3.6 โดยใช้ทดสอบที่ความเร็ว 10 - 25 m/s (36 - 90 km/h)

การทดสอบนั้น อุปกรณ์วัดแรงต้านในอุโมงค์ลม จะสามารถวัดผลได้ 3 ค่า คือ แรงต้าน (Drag force) แรงยก (Lift force) และความเร็วเฉลี่ยของอากาศ โดยวัดค่าแรงต้านและแรงยกนั้นจะติดเสาเพื่อวางแบบจำลอง ซึ่งด้านล่างจะมี sensor ที่วัดแรงกดในแนวนอนซึ่งแสดงผลเป็นแรงต้านและ sensor วัดแรงกดในแนวตั้งเพื่อแสดงผลเป็นแรงยก ส่วนการวัดความเร็ว ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า manometer ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดแรงดันอากาศ โดยจะสามารถแปลงค่าแรงดันออกมาเป็นความเร็วของอากาศได้



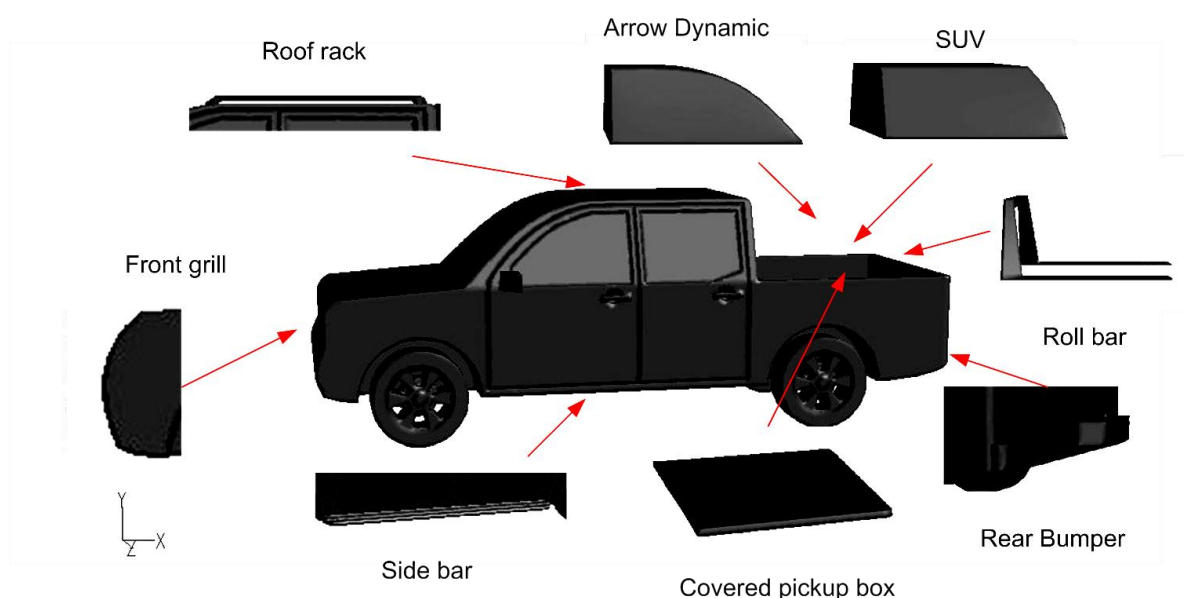
ภาพที่ 3.6 แบบจำลองรถกระบะที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม

3.2 การทดสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดจริงของกรณีติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้วย CFD

หัวข้อที่ผ่านมา เป็นการตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการคำนวณของไหลพลศาสตร์ CFD โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองรถกระบะกับการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม แล้วนั้น ก่อนที่จะนำ มาช่วยในการตรวจสอบอุปกรณ์เสริมก่อนที่จะสร้างจริง เพื่อความสะดวกประหยัดงบประมาณ เวลา และสามารถอธิบายและวิเคราะห์ผลได้ จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการแสดงผล ในเชิงกราฟฟิก และเชิงตัวเลข

3.2.1 กรณีศึกษาของรถกระบะกับอุปกรณ์เสริม

โดยจะใช้รถกระบะ Ford Ranger 2016 เป็นรถกระบะต้นแบบเพื่อนำมาทดสอบและเปรียบเทียบเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆ โดยเป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ที่ความเร็วในช่วง 10 – 35 m/s (36 – 126 km/h) เป็นการทดสอบด้วยวิธีการจำลองการไหลพลศาสตร์ (CFD) ทดสอบทั้งหมด 7 กรณี ดังในภาพที่ 3.7 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ที่ใช้ในการทดสอบ

กรณีที่ (a) กรณีรถกระบะปกติ (Normal) เป็นกรณีที่ไม่มีติดตั้งอุปกรณ์เสริมใด ใช้เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของกรณีอื่น (กรณีที่ 2-7) ดังภาพที่ 3.8 (a)

กรณีที่ (b) กรณีติดตั้งแต่งของ Ford Ranger (Wildtrak) เป็นกรณีที่ได้รับความนิยมเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เสริมจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งเรียกว่ารุ่น Wildtrak เพื่อให้รูปลักษณ์มีความสวยงาม

และทันสมัย ประกอบกับความจำเป็นในด้านการใช้งาน โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอกหลักอยู่ 4 อุปกรณ์ ได้แก่ Roof rack, Side bar, Rear Bumper และ Roll bar ดังภาพที่ 3.8 (b)

กรณี (c) กรณีติดครอบกระบะทรงสี่เหลี่ยม (SUV) เป็นอุปกรณ์เสริมที่มีลักษณะเป็น ฝาครอบกระบะที่มีไว้เพื่อประโยชน์ในการใช้งาน โดยจะมีทรงเหลี่ยมต่อจากส่วนของบนห้องผู้โดยสาร จนถึงท้ายกระบะ เช่นเดียวกัน ก่อนที่จะตัดสินใจสร้าง และติดตั้ง เพื่อทดสอบจริง จึงต้องมีการ ตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม ซึ่งอุปกรณ์เสริมนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความสวยงาม ทันสมัย และให้ถูกต้องตามหลักอากาศพลศาสตร์ ดังนั้น จึงต้องมีการปรับส่วนท้ายให้มีรูปลักษณะโค้งมน ดังนั้น จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมโค้ง เพื่อตรวจสอบค่ามุมโค้งที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านรวมต่ำที่สุด คือ 10° , 20° , 30° , 40° และ 50° ดังภาพที่ 3.8 (c)

กรณี (d) กรณีติดครอบกระบะทรงรี (Arrow Dynamic) เป็นอุปกรณ์เสริมที่นิยมในปัจจุบัน ที่ถูกดัดแปลงมาจากครอบกระบะทรงสี่เหลี่ยม เพื่อข้อได้เปรียบทางอากาศพลศาสตร์ และความปราดเปรียวมากขึ้น และตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม ดังนั้น จึงมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม โค้งจากส่วนบนจนถึงด้านล่างของที่ครอบกระบะ เพื่อตรวจสอบค่ามุมโค้งที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านรวมต่ำที่สุด คือ 40° , 50° , 60° , 70° และ 80° ดังภาพที่ 3.8 (d)

กรณี (e) กรณีปิดกระบะท้าย (Covered pick-up box) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้ เช่นเดียวกัน เพื่อครอบกระบะชิดมุมบนขอบทั้งสี่มุมของกระบะ ทำให้รูปทรงท้ายกระบะมีลักษณะ เป็นกล่องสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 3.8 (e)

กรณี (f) กรณีติดกระจังหน้ารถ (Front grill) เป็นอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถ เพื่อ ป้องกันแมลงเข้าสู่อุปกรณ์ระบายความร้อนตรงด้านหน้า ซึ่งจำเป็นจะต้องมีลักษณะโค้งมน เพื่อให้ได้ รูปลักษณะที่ปราดเปรียว สวยงาม และเหมาะสมกับตัวรถ ดังนั้น ก่อนที่จะตัดสินใจสร้าง และติดตั้ง เพื่อทดสอบจริง จึงต้องมีการตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม ด้วยการเปลี่ยนแปลงรัศมีโค้งของ กระจังหน้า เพื่อให้ได้ค่ารัศมีโค้งที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำที่สุด ที่รัศมีโค้งระหว่าง 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 m ดังภาพที่ 3.8 (f)

กรณี (g) กรณีติดกระจังหน้ารถและครอบกระบะทรงรี (Sedan) เป็นกรณีที่เลือกมา ติดตั้ง 2 (Front grill) และครอบกระบะทรงรี (aero dynamic) อุปกรณ์พร้อมกัน คือกระจังหน้ารถ เนื่องจากอุปกรณ์เสริมทั้งสอง ทำให้รูปลักษณะโดยรวมของรถนั้น มีลักษณะได้เปรียบทางด้านอากาศ พลศาสตร์เพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการนำมาตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ดังภาพที่ 3.8 (g)



(a)



(b)



(c)



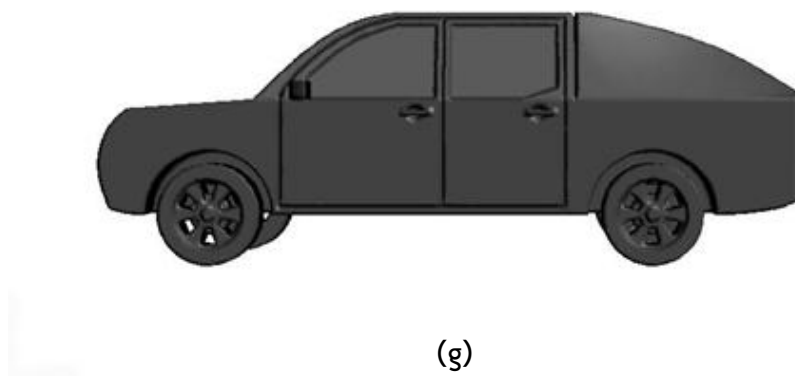
(d)



(e)



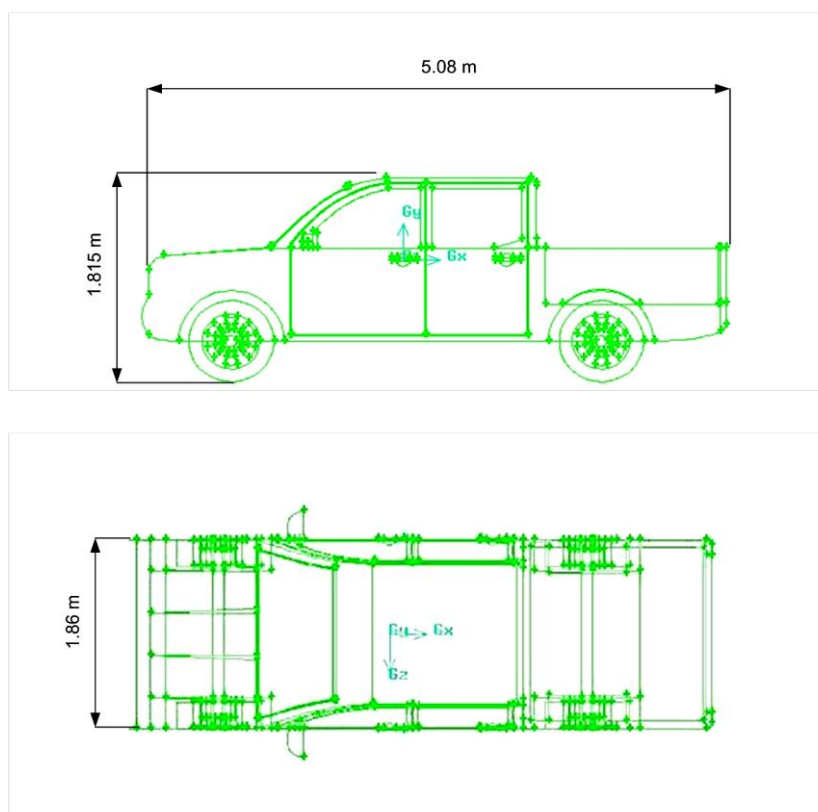
(f)



(g)

ภาพที่ 3.8 รูปร่างและเงื่อนไขในการทดสอบทั้ง 7 กรณี

3.2.2 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลอง CFD



ภาพที่ 3.9 เงื่อนไขขอบเขตการจำลอง

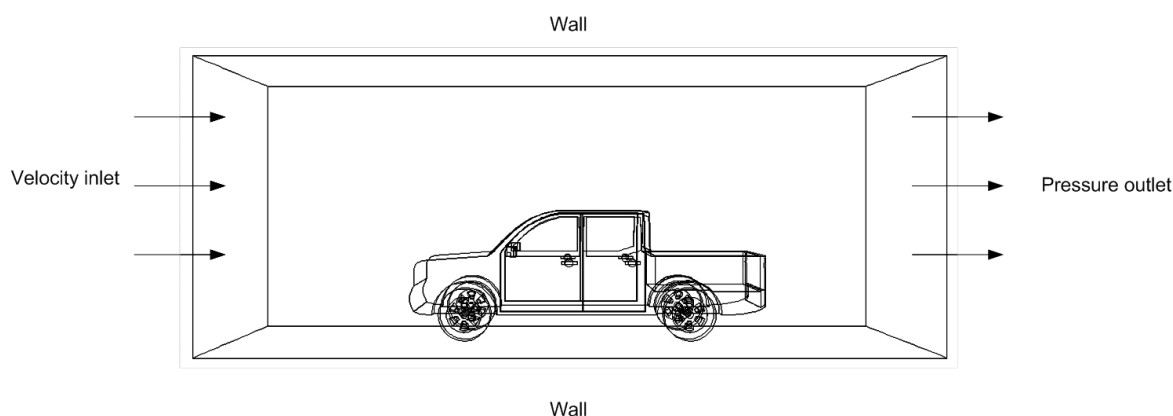
3.2.2.1 Gambit จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการกำหนดเงื่อนไขเพื่อที่จะนำมาจำลองของ CFD ซึ่งในหัวข้อนี้ จะต้องเป็นการตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกระบะขนาดจริง ทั้งขนาด

รายละเอียด รูปลักษณ์ ให้เหมือนและใกล้เคียงกับรถต้นแบบให้มากที่สุด ดังภาพ 3.12 เป็นแบบจำลองที่สร้างจาก Gambit การกำหนด mesh แบบ Tri/Ter (กริดรูปพีระมิด) ซึ่งแต่ละกรณีอยู่ที่จำนวนประมาณ 700,000 cell ตามตารางที่ 3.1 โดยได้จากการตรวจสอบ mesh independent จากหัวข้อที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำนวนกริดของแต่ละกรณี

กรณีศึกษา	จำนวนกริด (cell)
กรณีที่ 1 Normal	691,083
กรณีที่ 2 Wildtrak	718,347
กรณีที่ 3 SUV	683,129
กรณีที่ 4 Arrow Dynamic	667,077
กรณีที่ 5 Covered pickup box	659,090
กรณีที่ 6 Front grill	695,757
กรณีที่ 7 Sedan	664,437

ต่อมา โปรแกรม Gambit ใช้กำหนดขอบเขตและเงื่อนไขในการทดสอบ ตามภาพที่ 3.10 โดยกำหนดส่วนห้องทดสอบเป็นผนัง (Wall) ด้านหน้ารถเป็นอากาศขาเข้า (Velocity inlet) อากาศทางออกเป็น (Pressure outlet) และส่วนตัวรถเป็นผนัง (Wall) ซึ่งการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไข หมายถึงการเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เบื้องต้น ซึ่งได้สรุปในตารางที่ 3.2 เพื่อใช้ในการคำนวณในโปรแกรม Fluent ต่อไป



ภาพที่ 3.10 เงื่อนไขขอบเขตการจำลอง

ตารางที่ 3.2 การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไข

เงื่อนไขและขอบเขต	ประเภท
ขอบเขตทางด้านเข้า	Velocity inlet
ขอบเขตทางด้านออก	Pressure outlet
แบบจำลองรถกระบะ	Wall
ส่วนห้องทดสอบ	Wall
กริด	Tri/Ter (กริดรูปพีระมิด)

3.2.2.2 Fluent เป็นโปรแกรมย่อยของโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics) โดยส่วนของโปรแกรมนี้นี้เป็นขั้นตอนการแก้ปัญหาใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา ซึ่งของไหลที่ใช้ในการคำนวณด้านอากาศพลศาสตร์ของรถกระบะคือ อากาศ ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลในสภาวะที่กักอัดไม่ได้ (Incompressible flow) มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งการกำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ ตามตารางที่ 3.3

นอกจากคุณสมบัติของอากาศแล้ว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนอื่นก็มีความสำคัญสำหรับการคำนวณ โดยเฉพาะความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือ ซึ่งได้ตรวจสอบและยืนยันไปแล้วในหัวข้อ 3.1 ซึ่งสรุปได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหา ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 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

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขขอบเขตโปรแกรม Fluent

โปรแกรม Fluent	
ระเบียบการแก้ปัญห (Solver)	Segregated Solver
ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)	Implicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)	Standard k-epsilon (2eqn)
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหการไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

3.3 การทดสอบสมรรถนะของรถกระบะ (Dynamometer test)

Dynamometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังงาน แรงม้า แรงบิด และอื่นๆ ของเครื่องยนต์ ได้รับการเรียกขานกันโดยทั่วไปว่า ไดโน (Dyno) ซึ่ง Dyno test ที่ใช้ในการทดสอบนี้เรียกว่าแบบ Roller dynamometer ตามภาพที่ 3.11 เป็น Dyno ที่วัดกำลังงานของเครื่องยนต์ที่มีการถ่ายทอดกำลังงานผ่านเกียร์และเพลาขับหรือเฟืองท้ายมาแล้วเช่นเดียวกับ Chassis Dynamometer แต่ต่างกันตรงที่วิธีในการทดสอบ โดย Roller Dynamometer จะมีความสะดวกมากกว่า เพราะไม่ต้องถอดล้อ สามารถนำรถขึ้น Dyno เพื่อทดสอบได้เลย เพราะ Dyno แบบนี้จะมีลูกกลิ้งทำหน้าที่รองรับการหมุนของล้อ จำลองโหลด และบันทึกค่าต่างๆ Dyno ประเภทนี้ได้รับความนิยมแพร่หลายที่สุด เนื่องจากความสะดวกตามที่บอกไป และยังสามารถทดสอบค่าต่างๆ ได้ใกล้เคียงกับการขับบนถนนจริง ทั้งนี้ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับการทดสอบบนถนนจริงมากน้อยแค่ไหน ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้หรือเลือกทดสอบบน Dyno ที่มีประสิทธิภาพด้วย

3.3.1 Dynamometer

ที่ใช้เป็นรุ่น LPS 3000 จะให้มีเลือกหลายเวอร์ชันเพื่อให้เหมาะสมกับการทดสอบสมรรถนะของรถยนต์แบบต่างๆ โดยที่ระบบมีกำลังล้อตั้งแต่ 260 kW ถึง 520 kW และรองรับการทดสอบได้สูงสุดที่ความเร็ว 250 กม./ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับเวอร์ชันที่ใช้งาน การจำลองโหลดจะทำโดยเบรกแบบกระแสหมุนวน (eddy-current brake) LPS 3000 ช่วยให้สามารถในการวัดกำลังเครื่องยนต์ได้ทั้งเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล นอกจากนั้น ยังสามารถใช้ LPS 3000 ในการทดสอบรถยนต์แบบขับเคลื่อนสี่ล้อได้หากมีชุดลูกกลิ้งและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมที่เหมาะสม นอกจากนั้น ยังมีอุปกรณ์เสริมที่สามารถเลือกใช้คือ:

พัดลมระบายอากาศ ซึ่งต่อเข้ากับชุดโต๊ะควบคุมและควบคุมการใช้งานผ่านรีโมทคอนโทรลแบบสัญญาณวิทยุ

กล่องอินเตอร์เฟส ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับโมดูลดังต่อไปนี้:

- โมดูลความเร็วรอบ (RPM Module) ใช้ในการอ่านความเร็วรอบผ่านทาง Trigger tongs (เครื่องเบนซิน) เซ็นเซอร์แคลมป์ Piezo (เครื่องยนต์ดีเซล) เซ็นเซอร์วัดจุดศูนย์ถ่วงบน ปลีกทดสอบหาความผิดพลาด หัววัดอุณหภูมิน้ำมันเครื่อง สามารถวัดได้สูงสุด 180°C และอื่นๆ อีกมากมาย

- โมดูลสภาพแวดล้อม (Environmental module) ใช้ในการวัดอุณหภูมิ แวดล้อม อุณหภูมิไอดี ความดันอากาศและความชื้น อุณหภูมิเชื้อเพลิง

- โมดูลอะนาล็อก (Analog module) ใช้ในการอ่านสัญญาณอะนาล็อกต่างๆ

- โมดูล OBD (OBD Module) ใช้ในการอ่านข้อมูลจากระบบวินิจฉัยแบบ OBD

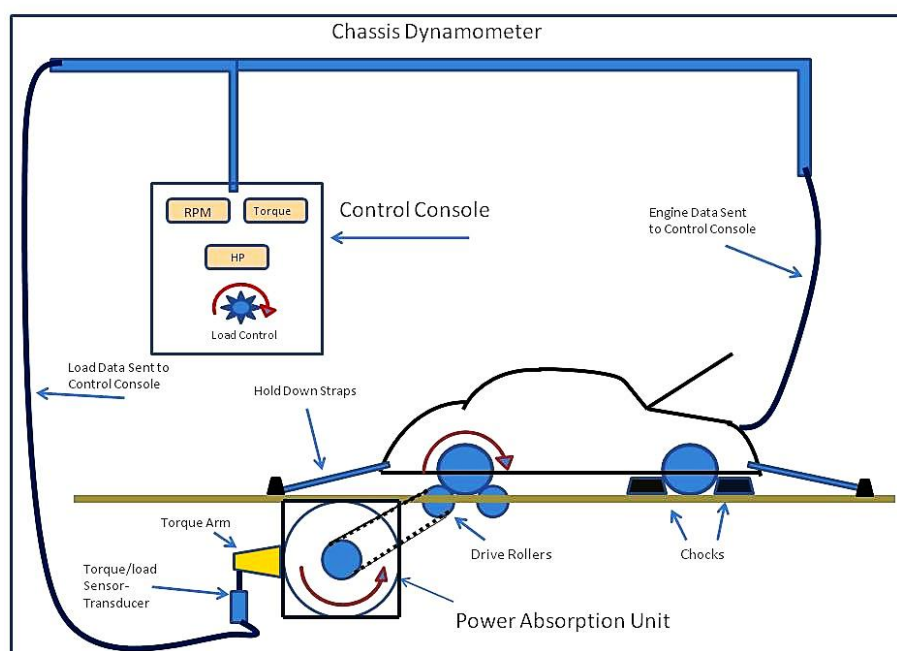
- โมดูลแรงดัน/อุณหภูมิ (Pressure/Temperature module) ใช้ในการบันทึก อุณหภูมิแลแรงดันอย่างละสองค่า

บาร์มิเตอร์และเซ็นเซอร์วัดความชื้น หากต้องการคำนวณข้อมูลสมรรถนะตาม DIN 70020, EWG 80/1269, ISO 1585, SAE J1349 หรือ JIS D1001 ซึ่งจะต้องทำการติดตั้งเข้าไปใน กล่องอินเตอร์เฟส

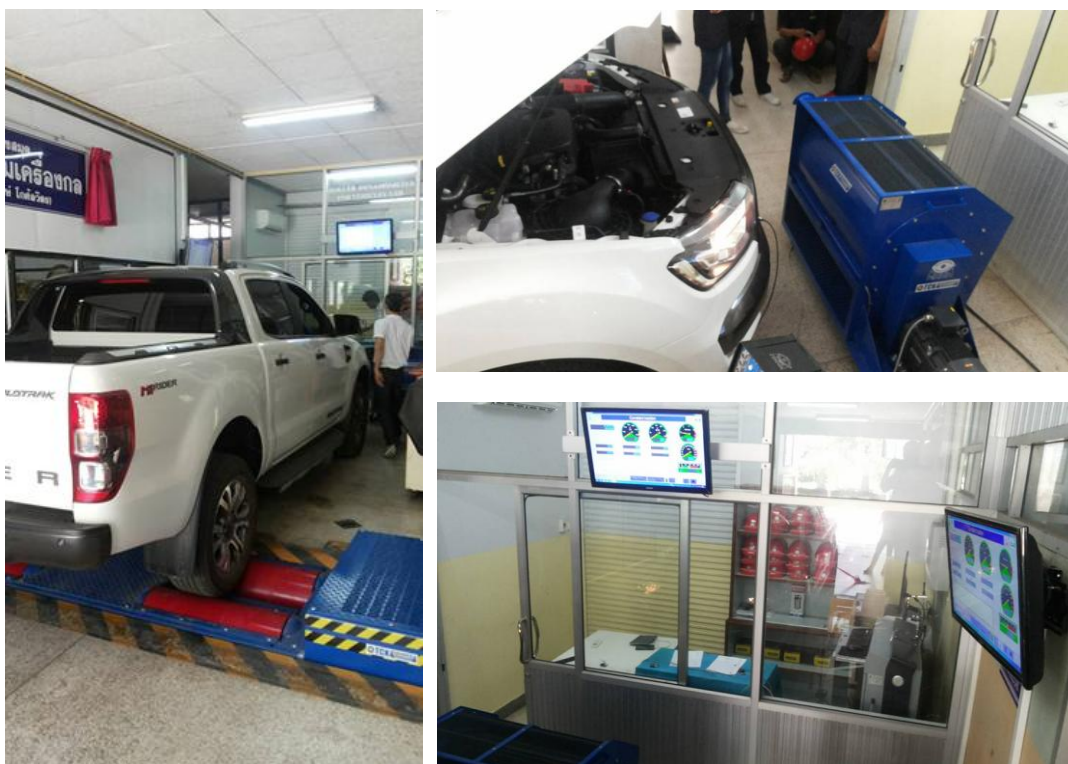
อุปกรณ์ทดสอบควันทิช สำหรับเครื่องเบนซิน (MGT5) เครื่องดีเซล (MDO2 และ MDO2 LON) ซึ่งสามารถต่อเข้ากับไดโนได้

เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ตสี DIN ขนาด A4

อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง สำหรับเครื่องยนต์เบนซินและดีเซล (Krupp/AIC)



ภาพที่ 3.11 ระบบการทำงานของไดนาโมมิเตอร์



ภาพที่ 3.12 การทดสอบสมรรถนะของรถกระบะ

3.3.2 ข้อมูลจำเพาะ Dynamometer

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลทางเทคนิคของ LPS 3000

จอสี	ขนาดจอ 19 นิ้ว (วัดทแยงมุม)
ขนาดของโต๊ะควบคุม (กว้าง x สูง x ลึก)	600 x 1850 x 800 มม.
ขนาดบรรจุ (กว้าง x สูง x ลึก)	2360 x 960 x 870 มม.
น้ำหนักรวมบรรจุภัณฑ์	ประมาณ 250 กก.
เคลือบสี	น้ำเงิน , RAL 5010
การใช้ไฟ	230 v, 50 Hz
ชุดลูกกลิ้ง	R100/1
โหลตของเพลลา	2.5 t
ความยาว x ความกว้าง x ความสูง	3345 x 1100 x 625 มม.
น้ำหนัก	ประมาณ 1200 กก.
ความยาวของลูกกลิ้ง	750 มม.

ความกว้างช่วงล้อต่ำสุด	800 มม.
ความกว้างช่วงล้อสูงสุด	2300 มม.
เส้นผ่าศูนย์กลางล้อเล็กที่สุดที่สามารถทดสอบได้	12"
เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกกลิ้ง	318 มม.
ระยะห่างเพลาลูกกลิ้ง	540 มม.
Running roller protrusion	45 มม.
ลิฟต์ยกพร้อมที่ล็อกลูกกลิ้ง	
ระบบนิวแมติก	สูงสุด 8 บาร์
ข้อมูลด้านไฟฟ้า	
ข้อมูลกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current)	260 กิโลวัตต์
Power supply	230 โวลต์ / 50 เฮิร์ตซ์
ฟิวส์	16 แอมป์ slow
ช่วงการแสดงผล	
ความเร็วในการทดสอบ	สูงสุด 250 กิโลเมตร/ชั่วโมง
กำลังล้อ	สูงสุด 260 กิโลวัตต์
แรงฉุดลาก	สูงสุด 6 กิโลนิวตัน
ความเร็วรอบ (RPM)	0 – 10,000 รอบ/วินาที
ความแม่นยำในการวัด	± 2% ของค่าที่วัดได้

3.3.3 ข้อมูลจำเพาะรถที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลเฉพาะทางเทคนิค

รุ่นรถ	ดับเบิลแค็บ ไฮโดรเตอร์			
	2.2L XLT 4x2 H 6MT	2.2L XLT 4x2 H 6AT	2.2L Wildtrak 4x2 H 6MT	2.2L Wildtrak 4x2 H 6AT
มิติภายนอก				
ความกว้าง x ความยาว x ความสูง (มม.)	1860 x 5362 x 1815			
ความยาวช่วงล้อ (มม.)	3220			
ความยาวช่วงล้อหน้า/หลัง (มม.)	1590			
ระยะต่ำสุดจากพื้น (มม.)	230			
มิติกระบะ: กว้าง x ยาว x สูง (มม.)	1560 x 1549 x 511			
แชสซีส์				

ระบบกันสะเทือนหน้า	แบบอิสระปีกนกคู่ พร้อมคอยล์สปริง			
ระบบกันสะเทือนหลัง	แหนบซ้อน			
ระบบเบรกหน้า	ดิสก์เบรก พร้อมครีบบระบายความร้อน			
ระบบเบรกหลัง	ครีบบ레이크			
ระบบบังคับเลี้ยว	แรคแอนด์พีนีเยม พร้อมพาวเวอร์แบบช่วยผ่อนแรงด้วยไฟฟ้า (EPAS)			
เฟืองท้ายแบบลิมิเต็ดสลิป	-			
เฟืองท้ายแบบ Locking Rear Differential	-	●		
ล้อ	อัลลอย 17”		อัลลอย 18”	
ยาง	265/65 R17		265/60 R18	
เครื่องยนต์				
แบบเครื่องยนต์	4 สูบแถวเรียง 16 วาล์ว VG เทอร์โบอินเตอร์คูลเลอร์			
ความจุกระบอกสูบ (ซีซี)	2198			
ความกว้างกระบอกสูบ x ระยะชัก (มม.)	86x94.6			
อัตราส่วนการอัด (มม.)	15.6 : 1			
กำลังสูงสุด – กิโลวัตต์(แรงม้า)/รอบต่อนาที	118(160)/3200			
แรงบิดสูงสุด – นิวตัน – เมตร/รอบต่อนาที	385/1600-2600			
ระบบจ่ายเชื้อเพลิง	หัวฉีดไอดีอิเล็กทรอนิกส์ คอมมอนเรล			
ความจุถังน้ำมัน	80			
ระบบเกียร์	ธรรมดา6สปีด	อัตโนมัติ6สปีด	ธรรมดา6สปีด	อัตโนมัติ 6สปีด

3.3.4 เงื่อนไขและการแสดงผลการทดสอบ

ไดนาโมมิเตอร์ LPS 3000 เป็นอุปกรณ์ซึ่งช่วยให้สามารถจำลองสภาพการขับขี่ได้อย่างเหมือนจริง เครื่องนี้จะช่วยให้สามารถทำการวัดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและการวิเคราะห์ไอเสีย รวมทั้งสังเกตการทำงานของรถยนต์ได้ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบในจอภาพที่ 3.13 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การจำลองโหลด การทดสอบสามารถเลือกเงื่อนไขโหลดต่างๆ ซึ่งช่วยให้สามารถใช้งานไหลด้อย่าง เช่น การวินิจฉัยเครื่องยนต์เฉพาะรุ่น หรือกำลังในการไต่ระดับของรถ และเงื่อนไขของโหลดในรูปแบบต่างๆ สามารถกำหนดได้ตามความต้องการใช้งาน เช่น ค่าแรงฉุดลาก ความเร็ว ความเร็วรอบ หรือการจำลองการขับเคลื่อน

วัดกำลังเครื่องยนต์ ใช้ในการหากำลังของเครื่องยนต์ในแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

การแสดงผลกราฟกำลังเครื่องยนต์ ใช้ในการแสดงผลกราฟกำลังของเครื่องยนต์ตามมาตรฐาน DIN 70020, EWG 80/1269, ISO 1585, JISD 1001, SAE J 1349

การทดสอบแรงบิดของเครื่องยนต์ คือการจำลองการขับเคลื่อนและหาแรงบิด

การทดสอบมาตรวัดความเร็ว คือการตรวจสอบมาตรวัดความเร็วของรถที่ทดสอบ



ภาพที่ 3.13 การแสดงผลการทดสอบของไดนาโมมิเตอร์

3.4 การทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

เป็นการทดสอบจริง โดยให้ตัวแทนจำหน่ายรถ ford เพชรบุรีทดสอบรถ Test drive และเก็บผลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน โดยการทดสอบ การเก็บผล และผลของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจะกล่าวไว้ในบทต่อไป



(a) Normal



(b) Wildtrak



(c) SUV



(d) Covered pick-up box



(e) Arrow Dynamics



(f) Front grill

ภาพที่ 3.14 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถกระบะเพื่อการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน
ของกรณีต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบแรงต้านแบบจำลองรถกระบะระหว่างการทดลองในอุโมงค์ลมกับ CFD

จากบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงเหตุผลในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้งสองวิธี คือ CFD และ ใช้อุโมงค์ลมทดสอบแบบจำลองรถกระบะนั้นั้น ดังนั้น การยืนยันผลค่าที่ยอมรับได้ทั้งสองการทดสอบควรมีค่าที่ไม่แตกต่างกันเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ (ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้)

4.1.1 ผลการทดสอบ

1) ผลการทดสอบในอุโมงค์ลม สามารถเก็บข้อมูลได้จากหน้าจอซึ่งพ่วงสัญญาณจาก load cell ที่จับยึดแบบจำลองรถกระบะ ซึ่งค่าที่วัดได้จะแสดงผลเป็นค่าของแรงต้าน (หน่วยเป็นนิวตัน)

2) ผลการทดสอบใน CFD สามารถตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมได้โดยไม่ต้องมีการคำนวณ ซึ่งสามารถกำหนดค่าที่ต้องการแสดงผลทั้งแนวแกน x, y z หรือรวมทั้งหมดทุกแนวแกน ซึ่งทั้งสองวิธีสามารถนำมาคำนวณเป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากสมการ (4.1)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (4.1)$$

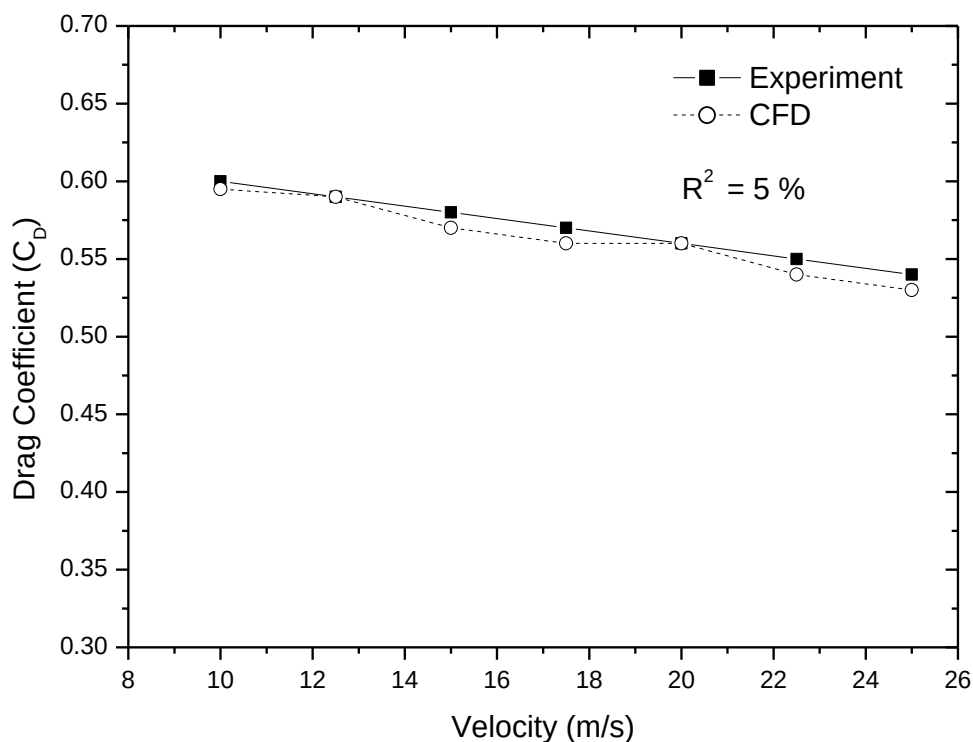
เมื่อ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม, F_D คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อรถบรรทุก (N), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3), v คือความเร็วของอากาศ (m/s) และ A คือพื้นที่หน้าตัดรถกระบะที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (m^2)

4.1.2 การอภิปรายผล

จากผลของการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบจำลองระหว่าง CFD และอุโมงค์ลมตามภาพที่ 4.1 นั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้ง 2 การทดสอบมีค่าแนวโน้มลดลง ในขณะที่ความเร็วของอากาศในห้องทดสอบสูงขึ้น (Reynolds number มีค่าสูงขึ้น) จึงทำให้อิทธิพลของความหนืดที่เกิดขึ้นผิวนรถกระบะจำลองกับอากาศลดลง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงตามลำดับ

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การทดสอบทั้ง 2 วิธีนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์การถดถอย (ค่า R^2 square) ผลแตกต่างกันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในทางทฤษฎีทางด้านการตรวจสอบการทดลอง (Experimental design) ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และสามารถยืนยันผลความ

ถูกต้อง ความแม่นยำของวิธีคำนวณการไหลพลศาสตร์ (CFD) สำหรับใช้ในการตรวจสอบอุปกรณ์เสริมรถกระบะขนาดจริงได้ในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 4.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านแบบจำลองระหว่าง CFD และอุโมงค์ลม ($R^2 = 5\%$)

4.2 ผลการทดสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดจริงกับการติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้วย CFD

จากการตรวจสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของ CFD ก่อนหน้านี้ เพื่อนำมาเป็นเครื่องมือช่วยในการตรวจสอบ ในหัวข้อนี้ เพื่อการอธิบายผลการทดสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดจริง ที่ใช้วิธีทดสอบด้วย CFD เปรียบเทียบกับกรณีต่างๆ โดยติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่แตกต่างกันรวมกับกรณีต้นแบบเพื่อให้เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน รวม 7 กรณี ซึ่งทุกกรณีใช้พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศเดียวกันคือ 2.862 m^2

ตาราง 4.1 – 4.6 จะเป็นผลต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกระบะกรณีปกติ กับรถกระบะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆซึ่งจะทำการทดสอบความเร็วระหว่าง $10 \text{ m/s} - 25 \text{ m/s}$ ได้ดังต่อไปนี้ ในตารางนั้น คอลัมน์แรกเป็นกรณีศึกษา ซึ่งเริ่มต้นจากกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีต้นแบบ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ กับกรณีที่ 2-7 ซึ่งใน CFD นั้นจะสามารถแสดงผลเชิงตัวเลขของแรงต้าน (F_D) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ดังนั้น จะนำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้ของแต่ละกรณีทดสอบมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 ทุกกรณีของแต่ละความเร็ว ได้ค่าออกมาที่แสดงในคอลัมน์ที่ 5 ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ ซึ่งค่าบวกหมายความว่า กรณีนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สูงกว่ากับ

กรณีที่ 1 ที่ความเร็วในการทดสอบเดียวกัน ส่วนค่าลบหมายความว่า กรณีนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำกว่ากรณีที่ 1 ที่ความเร็วในการทดสอบเดียวกัน เหตุผลก็เพราะว่า ค่าผลต่างที่ได้นี้ จะถูกใช้เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s

กรณี	แรงต้าน (F_D)	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D)	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	101.111	2.862	<u>0.6155</u>	-
b	100.145	2.865	0.6096	- 0.0059
c	112.815	2.863	0.6867	+ 0.0712
d	79.822	2.862	0.4859	- 0.1296
e	93.643	2.862	0.5342	- 0.0813
f	88.787	2.862	0.5405	- 0.0750
g	61.143	2.862	0.3721	- 0.2434

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s

กรณี	แรงต้าน	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	220.737	2.862	0.59721	-
b	218.780	2.865	0.59191	- 0.00530
c	247.111	2.863	0.66856	+ 0.07135
d	172.224	2.862	0.46596	- 0.13125
e	210.639	2.862	0.51123	- 0.08598
f	193.147	2.862	0.52256	- 0.07465
g	133.840	2.862	0.36197	- 0.23524

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s

กรณี	แรงต้าน	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	385.611	2.862	0.58684	-
b	382.01	2.865	0.58137	- 0.00547
c	432.16	2.863	0.65768	+ 0.07084
d	298.667	2.862	0.45453	- 0.13231
e	354.107	2.862	0.50501	- 0.08183
f	336.711	2.862	0.51242	- 0.07442
g	234.915	2.862	0.35737	- 0.22947

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s

กรณี	แรงต้าน	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	594.534	2.862	0.58004	-
b	591.294	2.865	0.57591	- 0.00413
c	667.929	2.863	0.65055	+ 0.07051
d	459.685	2.862	0.44773	- 0.13231
e	538.174	2.862	0.49121	- 0.08883
f	519.046	2.862	0.50554	- 0.07450
g	358.208	2.862	0.34876	- 0.23128

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s

กรณี	แรงต้าน	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	850.378	2.862	0.57518	-
b	844.226	2.865	0.57102	- 0.00416
c	954.622	2.863	0.64569	+ 0.07051
d	654.215	2.862	0.44250	- 0.13268

e	743.417	2.862	0.47121	- 0.10397
f	740.908	2.862	0.50113	- 0.07405
g	509.882	2.862	0.34474	- 0.23044

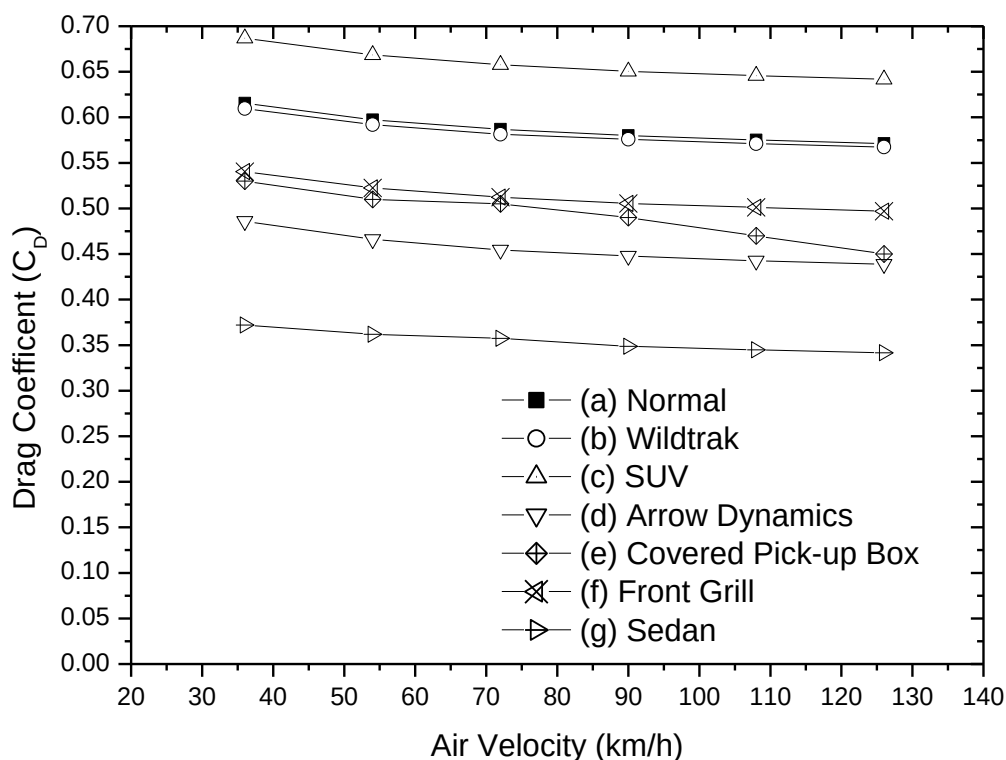
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 35 m/s

กรณี	แรงต้าน	พื้นที่ (m^2)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	(ΔC_D) เทียบกับกรณีที่ 1 (+ เพิ่ม, - ลด)
a	1149.451	2.862	0.57120	-
b	1141.689	2.865	0.56734	- 0.00386
c	1291.237	2.863	0.64166	+ 0.07046
d	882.953	2.862	0.43877	- 0.13243
e	973.220	2.862	0.45321	- 0.11799
f	999.899	2.862	0.49688	- 0.07432
g	687.544	2.862	0.34148	- 0.22972

ภาพที่ 4.2 นั้น เป็นการแสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทุกกรณี กับการเพิ่มความเร็วของอากาศในการทดสอบตั้งแต่ 10-35 m/s (36-126 km) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วจะแปรผันตรงกันกับ Reynold number เพราะวัตถุที่อยู่ในสภาวะอากาศที่มี Reynold ที่สูง จะทำให้อิทธิพลของความหนืดของอากาศกับผิวของวัตถุนั้นลดน้อยลง

สัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีค่าที่แตกต่างกันทั้ง 7 กรณี เนื่องจากอุปกรณ์เสริมของรถมีความแตกต่างกัน จึงส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีความแตกต่างกันด้วย จากภาพที่ 4.2 ในกรณี (1) (เส้นสีแดง) ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับกรณีอื่น โดยกรณีที่ (2), (4), (6) และ (7) จะสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง ซึ่งในกรณีที่ (2) Wildtrak จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีที่ (1) มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ (7) Sedan เป็นกรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีที่ (a) มากที่สุด

อย่างไรก็ตาม ในกรณี (3) SUV และกรณีที่ (5) Covered pick-up box เป็นกรณีที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากกรณี (1)



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วต่างๆ ทั้ง 7 กรณี

4.2.1 ผลจากการกระจายตัวของความดันและความเร็ว

จากภาพที่ 4.2 เป็นเพียงการแสดงผลเชิงตัวเลขของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้านในกรณีต่างกันทั้ง 7 กรณี ที่มากกว่านั้น CFD ยังสามารถแสดงผลเชิงกราฟฟิก เพื่อเป็นการแสดงผลที่สามารถอธิบายเหตุผลของการเพิ่มหรือลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วย ดังนั้น ภาพที่ 4.3 เป็นเส้นแสดงการกระจายตัวของความดันและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตัวรถกระบะของกรณีต่างๆ ซึ่งเส้นความดันและความเร็วมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอิทธิพลของอุปกรณ์เสริมแต่ละกรณีจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านตัวรถ สังเกตได้จาก ขนาดของอากาศที่หมุนวนด้านท้ายของรถกระบะ ที่มีขนาดต่างกัน เพราะความแตกต่างของความดันอากาศที่ไหลผ่านตัวรถนั้น มีความแตกต่างกันแต่ละกรณี ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันของความดันด้านหน้าและด้านหลังของรถกระบะ โดยปัจจัยหลักของการตรวจสอบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันด้านท้ายของของรถ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ (4.2)

$$\Delta \overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{\text{baseline}} - \overline{C_D}(V_t)_{\text{modifile}} \quad (4.2)$$

1) กรณี (a) รถกระบะปกติ (Normal)

เป็นกรณีต้นแบบของรถกระบะ โดยไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมแต่อย่างใด เพื่อใช้เป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ขนาดของแรงต้านจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ผลต่างของการกระจายตัวของความดันรอบๆบริเวณตัวรถและความแปรปรวนของอากาศที่ผ่านตัวรถ หากพิจารณาจากภาพที่ 4.3 (a) กระแสความดัน สามารถแบ่งความแตกต่างของความดันออกเป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณห้องโดยสาร บริเวณกระบะบรรทุก และบริเวณท้ายรถ ซึ่งทั้ง 3 บริเวณมีแตกต่างของความดันอย่างชัดเจน โดยที่บริเวณหน้าห้องโดยสารจะมีความดันสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนบริเวณกระบะบรรทุกและบริเวณท้ายรถจะมีความดันลดลง ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ หรือการหมุนวนของอากาศ ซึ่งเกิดการหมุนวนของอากาศ เส้นกระจายความดันจะมีระดับสีที่ต่ำ (น้ำเงิน – เขียว) เช่นเดียวกันกับความเร็วดังภาพที่ 4.3 (a) กระแสของความเร็วอากาศเมื่อเกิดการปะทะกับพื้นที่หน้าตัดของรถกระบะ (Frontal area) ทำให้พลังงานจลน์ของอากาศมีค่าลดลงของส่วนท้ายของรถกระบะ ค่าความเร็วที่ต่ำแห่งของบริเวณกระบะบรรทุก และท้ายรถจะมีค่าลดลงตามลำดับ

2) กรณี (b) ติดชุดแต่งของ Ford Ranger (Wildtrak)

ในกรณีนี้ เป็นกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์เป็นชุดแต่งจากบริษัทผู้ผลิต เรียกว่าอุปกรณ์ชุด Wildtrak ซึ่งเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอกหลักอยู่ 4 อุปกรณ์ ได้แก่ Roof rack, Side bar, Rear Bumper และ Roll bar จากผลเชิงตัวเลขได้แสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่ 1 เนื่องจากค่ากระแสความดัน และกระแสความเร็วของภาพที่ 4.3 (b) มีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีแรก เนื่องจากอุปกรณ์เสริมประเภทนี้ เป็นเพียงอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อเพิ่มรูปลักษณะของรถกระบะให้มีความสวยงาม ไม่ส่งผลกับความแตกต่างของความดันมาก สังเกตได้จากขนาดของการหมุนวนของอากาศที่ใกล้เคียงกันกับกรณีที่ 1

3) กรณี (c) ติดชุดหลังคาทรงเหลี่ยม (SUV)

กรณีนี้ เป็นอุปกรณ์เสริมรูปทรงคล้ายสี่เหลี่ยมครอบท้ายกระบะ ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์เสริมในกรณีนี้ มักจะพบเห็นโดยทั่วไป จากภาพที่ 4.3 (c) กระแสความดันและความเร็วของอากาศเกิดความแปรปรวนบริเวณท้ายรถสูงขึ้นจากกรณีปกติ และเกิดการหมุนวนของอากาศที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของพลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านตัวรถ จะสังเกตเห็นความแตกต่างของระดับความดันและความเร็วระหว่างด้านหน้าและด้านท้ายได้อย่างชัดเจน ซึ่งสาเหตุเกิดจากอุปกรณ์เสริมลักษณะนี้จะทำให้รูปทรงของรถโดยรวม ดูดซับพลังงานจลน์ของอากาศ กลายเป็นแรงต้าน

4) กรณี (d) ดิตชุดครอบหลังคาทรงเอียง (Arrow Dynamic)

เป็นกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่ท้ายกระบะโดยเป็นหลังคาทรงเอียงทำมุม Slope จนถึงท้ายกระบะ ตามภาพที่ 4.3 (d) ซึ่งมีการไหลอากาศหมุนวนและความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถกระบะน้อย จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีปกติ การทดสอบในกรณีนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากกรณีที่ 3 (SUV) เนื่องจากต้องการจะลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของตัวรถในขณะใช้งานจริง พิจารณาภาพที่ 4.3 (d) กระแสความดันและความเร็ว ซึ่งลักษณะความแปรปรวนของอากาศและความแตกต่างของความดันบริเวณท้ายรถมีค่าลดลงมากทำให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีที่ 1, 2 และ 3 หากนำผลจากการทดสอบจากกรณีนี้ไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 พิจารณาความแปรปรวนของอากาศและผลต่างของความดันบริเวณท้ายรถจะเห็นลักษณะการไหล เป็นกรณีที่ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น จากรูปร่างท้ายกระบะเป็นลักษณะเปรี๊ยะลม จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและต่ำกว่าทุกกรณีข้างต้น

5) กรณี (e) ปิดกระบะท้าย (Covered Pick-up Box)

อุปกรณ์นี้ทำให้รูปทรงส่วนท้ายกระบะของรถมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ด้วยการปิดท้ายกระบะรถ เป็นลักษณะกล่องสี่เหลี่ยม เพื่อทำให้เกิดการลดลงของการหมุนวนของอากาศ เนื่องจากไม่มีการปะทะของฝาท้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระบะ จนมาถึงบริเวณท้ายกระบะ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณี a, b และ d

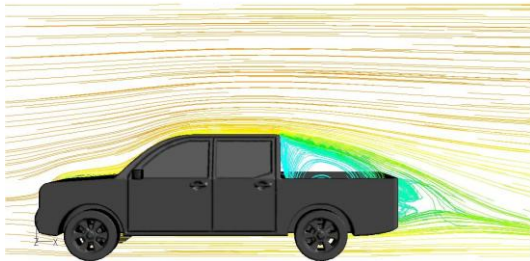
6) กรณี (f) ดิตกระจังหน้ารถ (Front Grill)

กระจังติดหน้ารถ เป็นอุปกรณ์ที่มีรูปทรงโค้งมัล ทำให้ลดค่าความดันที่เกิดจากการปะทะด้านหน้าของรถในแนวตั้งฉาก จากภาพที่ 4.3 (f) กระแสความดันและความเร็วของอากาศ จะเกิดการแยกตัวของอากาศลดลง ซึ่งส่งผลโดยตรงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง

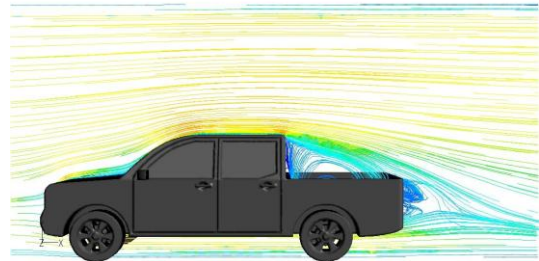
7) กรณี (g) ดิตกระจังหน้ารถและชุดหลังคาทรง (Sedan)

กรณีนี้เป็นการรวมกันระหว่างกรณี d (Arrow Dynamic) กับกรณี f (Front grill) ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้างต้นนั้น ทั้งสองกรณีดังกล่าวสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากภาพที่ 4.3 (g) แรงต้านที่เกิดจากการปะทะด้านหน้ารถลดลง และผลต่างของความดันและความเร็วของอากาศระหว่างด้านหน้าและด้านหลังมีค่าลดลง สังเกตจากกระแสความดันของอากาศไหลแบบราบเรียบกว่ากรณีอื่น เกิดจากรูปทรงที่โค้งเรียบของส่วนหลัง นอกจากนี้การแยกและการไหลอากาศหมุนวนของรถกระบะนอกจากนี้ยังมีน้อยที่สุดเนื่องจากความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถกระบะเกิดความสมดุล กระแสความดันและความเร็ว ทำให้ความแปรปรวนของอากาศมีลักษณะการไหลที่

ราบเรียบจึงช่วยลดแรงฉุดบริเวณท้ายรถลดลงตามไปด้วยและการแยกตัวของอากาศก็มีความน้อยลง
สัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากการทดสอบในกรณีนี้จึงมีค่าต่ำสุด



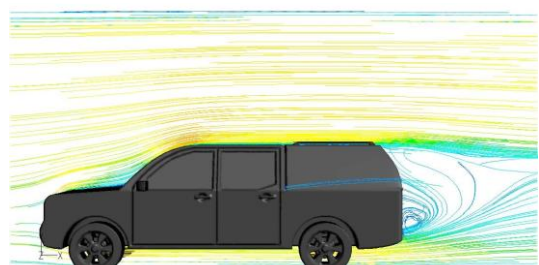
(a) Normal



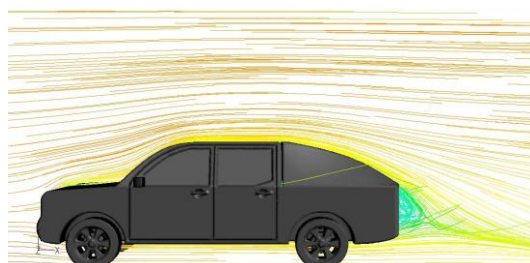
(b) Wildtrak



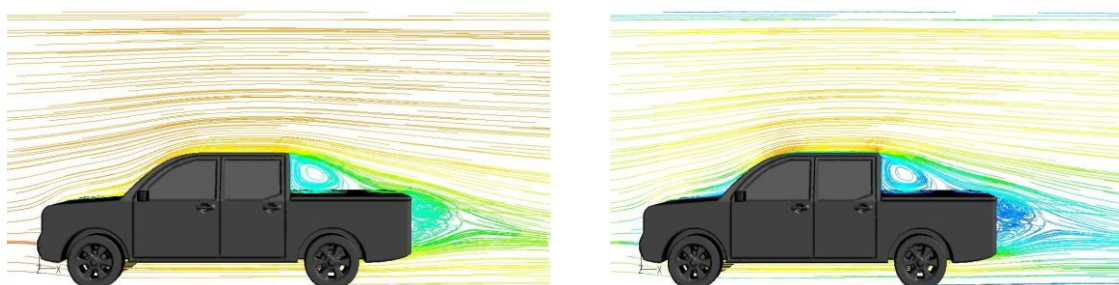
(c) SUV



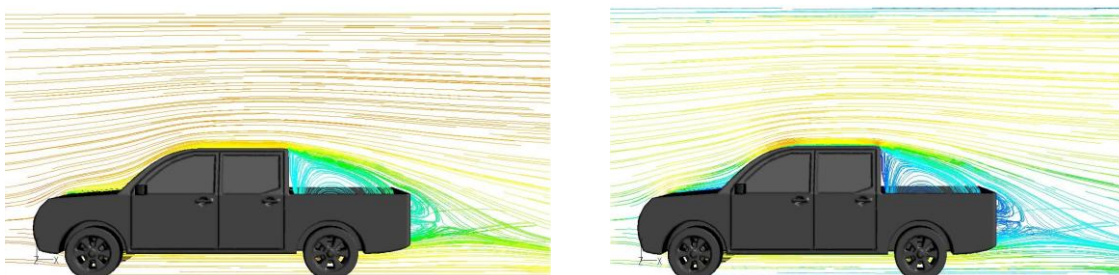
(d) Arrow Dynamic



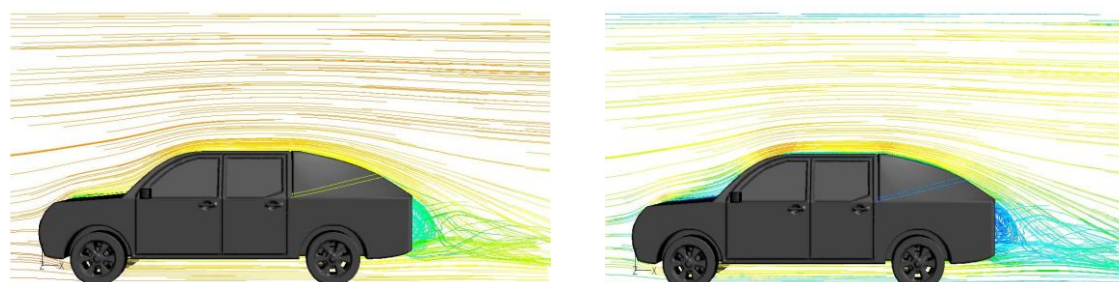
ภาพที่ 4.3 เส้นแสดงการกระจายตัวของความดัน และความเร็ว



(e) Covered pick-up box



(f) Front grill



(g) Sedan

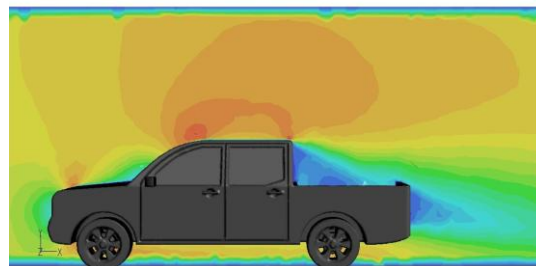
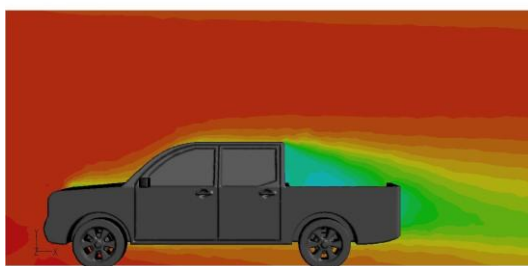
ภาพที่ 4.3 เส้นแสดงการกระจายตัวของความดัน และความเร็ว (ต่อ)

4.2.2 ระดับความดันและความเร็ว

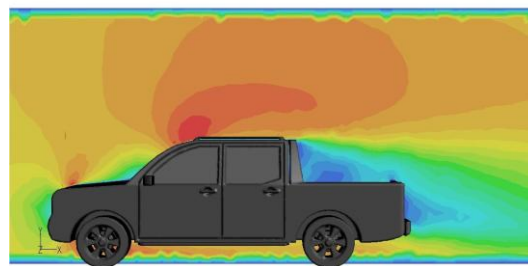
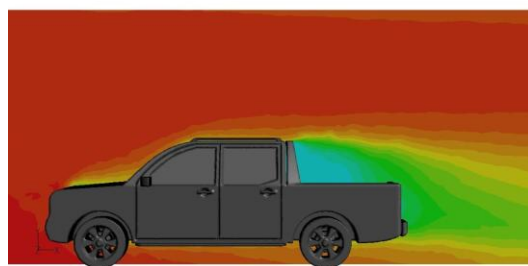
เพื่อความชัดเจนในการอธิบายผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น จึงมีการวิเคราะห์ระดับพลังงานของอากาศที่เกิดขึ้น ตามภาพที่ 4.4 ระดับความดัน (Pressure Contour) และระดับความเร็ว (Velocity Contour) ของอากาศ ซึ่งระดับความดันนี้จะมีค่าที่แตกต่างกัน ของแต่ละตำแหน่ง เนื่องจากอุปกรณ์เสริมของแต่ละกรณีจะทำให้เกิดระดับความดันต่างกัน (Pressure Drag) ตามทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ซึ่งเป็นตัวการสำคัญที่มีอิทธิพลกับการเกิดแรงต้านรวมของตัวรถกระบะสูงที่สุด

โดยหลักการนั้น สามารถวิเคราะห์ได้ในเชิง กลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) ซึ่งกำหนดได้ว่าอากาศคือของไหลที่ไหลในท่อ (Test Section) โดยการไหลของอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานในเฮดของความดัน (Pressure Head) และเฮดความเร็ว (Velocity Head)

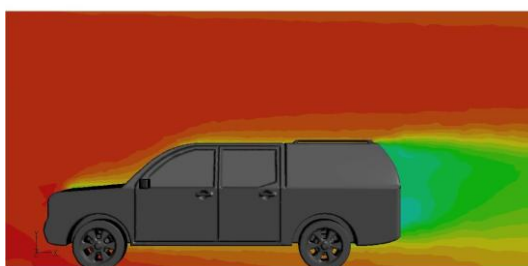
ส่วนรถยนต์คือวัตถุที่ขวางทางการไหลของของไหล หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งคือการนำหลักการของสมการเบอร์นูลลี มาช่วยในการวิเคราะห์ (Bernoulli Equation) ดังนั้นอุปกรณ์เสริมแต่ละกรณีจะทำให้ค่าเฮดความดัน และเฮดความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะลำดับการวิเคราะห์แต่ละกรณีดังต่อไปนี้คือ



(a) Normal



(b) Wildtrak

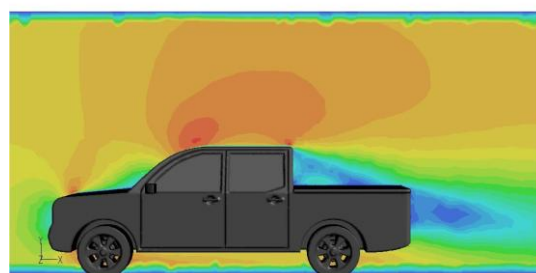
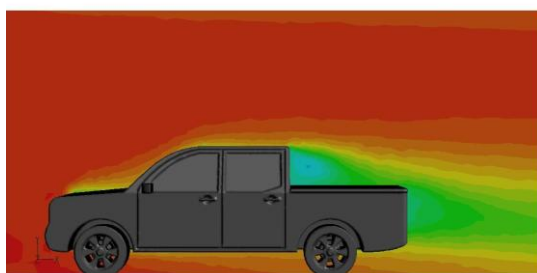


(c) SUV

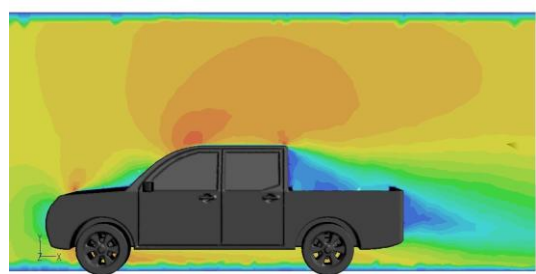
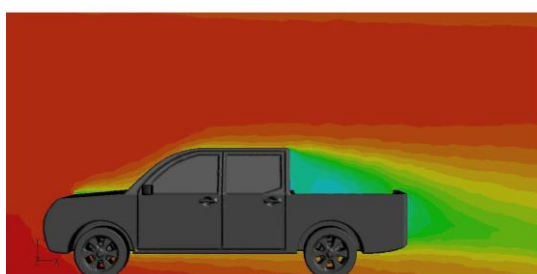


(d) Arrow Dynamic

ภาพที่ 4.4 ระดับความดัน (ซ้าย) และระดับความเร็ว (ขวา)



(e) Covered pick-up box



(f) Front grill



(g) Sedan

ภาพที่ 4.4 ระดับความดัน (ซ้าย) และระดับความเร็ว (ขวา) (ต่อ)

1) กรณี (a) รถกระบะปกติ (Normal)

จากภาพที่ 4.4 (a) จะสามารถสังเกตเห็นระดับความดัน และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านรถได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะความแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านท้ายกระบะ ซึ่งเป็นคุณลักษณะจำเพาะของรูปทรงของรถกระบะ ซึ่งถือว่าเป็นผลดีในทางอากาศพลศาสตร์ เนื่องจากรูปทรงโดยรวม ทำให้ดูดซับพลังงานการไหลของอากาศไว้มาก ทั้งในส่วนของเฮดความดัน และเฮดความเร็ว จึงทำให้ค่าพลังงานทั้ง 2 รูป ลดลงอย่างฉับพลัน แรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถโดยรวมจึงมีค่าที่สูง

2) กรณี (b) ดัดชุดแต่งของ Ford Ranger (Wildtrak)

จากภาพที่ 4.4 (b) ระดับความแตกต่างของความดัน และความเร็วที่เกิดขึ้นโดยรวมมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอุปกรณ์เสริมในกรณีนี้ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความ และความเร็ว

ของอากาศน้อยมาก เนื่องจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งนั้น ไม่ได้มีทิศทางตั้งฉากกับการไหลของอากาศ แต่เป็นเพียงการติดตั้งปลั๊กย่อยที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับกรณีปกติที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

3) กรณี (c) ติดชุดหลังคาทรงเหลี่ยม (SUV)

จากภาพที่ 4.4 (c) สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของความดันและความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นจากกรณีปกติอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงส่วนบน และด้านท้ายของกระบะ ทำให้ค่าความดันและความเร็วที่ไหลผ่าน มีระดับที่แตกต่างกันมาก และลดลงอย่างรวดเร็ว นั่นหมายความว่า พลังงานจลน์ของอากาศที่ไหลผ่านตัวรถที่ติดอุปกรณ์เสริมนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านของตัวรถกระบะมีค่าที่สูง

4) กรณี (d) ติดชุดครอบหลังคาทรงเอียง (Arrow Dynamic)

จากภาพที่ 4.4 (d) ความดันและความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างจากกรณีที่ผ่านมาอย่างเห็นได้ชัด คือระดับพลังงานจลน์ของการไหลค่อย ๆ ลดระดับลงตาม รูปทรงของอุปกรณ์เสริมด้านท้ายกระบะ ซึ่งถือว่าเป็นรูปทรงที่ดีในทางอากาศพลศาสตร์ จึงทำให้ค่าแรงต้านของตัวรถในกรณีนี้มีค่าที่ลดลงจากกรณีปกติ

5) กรณี (e) ปิดกระบะท้าย (Covered Pick-up Box)

จากภาพที่ 4.5 (e) ระดับความดันและความเร็วด้านท้ายกระบะมีค่าลดต่ำลงจากกรณีก่อนหน้านี้ เนื่องจากอุปกรณ์เสริมครอบเฉพาะส่วนกระบะ ทำให้ความดันตก ลดลงมาของส่วนหลังห้องผู้โดยสาร และต่ำลงอีกที่ส่วนท้าย ทำให้พลังงานจลน์ที่เกิดจากการไหลของอากาศลดลงมาจากกรณีปกติในระดับหนึ่ง

6) กรณี (f) ติดกระจังหน้ารถ (Front Grill)

จากภาพที่ 4.4 (f) สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับความเร็วของอากาศตรงส่วนหน้าที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริม ซึ่งอุปกรณ์นี้ทำให้ระดับความเร็วของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า ซึ่งหมายความว่าพลังงานจลน์ของอากาศที่เกิดจากอากาศปะทะด้านหน้ามีค่าลดน้อยลงกว่ากรณีปกติ ทำให้แรงต้าน และสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ ลดลงจากกรณีปกติ

7) กรณี (g) ติดกระจังหน้ารถและชุดหลังคาทรง (Sedan)

ภาพที่ 4.4 (g) อุปกรณ์ทั้งสองนี้ ทำให้ความแตกต่างของระดับความดัน และความเร็วลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก อุปกรณ์ด้านหน้า (Front grill) ช่วยทำให้พลังงานจลน์ของอากาศเมื่อปะทะด้านหน้ารถแล้วเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า และชุดครอบกระบะแบบเอียง จะทำให้ลดค่าความแตกต่างของความดันระหว่างหน้าห้องผู้โดยสารกับด้านท้ายกระบะ ดังนั้น อุปกรณ์เสริมทั้ง 2 นี้ ทำให้แรงต้านรวมของรถกระบะมีค่าลดลงมากที่สุด

4.3 ผลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

4.3.1 ผลอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการคำนวณ

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันให้ถูกต้องและแม่นยำโดยทั่วไปแล้วทำได้ค่อนข้างยาก เว้นแต่รถยนต์ทันสมัยราคาสูง ที่จะมีการแสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันติดตั้งที่บริเวณคอนโซล ซึ่งทำให้ได้ทราบถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน เพื่อจะสามารถตัดสินใจขับซิ่งเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีตัวแปรเนื่องจากสิ่งแวดล้อมมากมาย จึงมีผู้วิจัยที่คิดค้นวิธีที่จะคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถกระบะ โดย Leuschen and Cooper (2006) ได้สร้างสูตรการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน จากการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถกระบะ โดยเปรียบเทียบกับดั้งเดิมที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งจะได้นำหลักการนี้มาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบในกรณีต่าง ๆ จากหัวข้อที่ 4.1 มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) เพื่อที่จะได้ทราบค่าที่จริงของการลดหรือเพิ่มขึ้นของเชื้อเพลิง จากการติดอุปกรณ์เสริม

โดยค่าที่ได้จากคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีต่าง ๆ ที่คำนวณจากตารางที่ 4.7 นำไปหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการสิ้นเปลืองน้ำมันจากสมการ (4.3) คือ

$$\Delta\mu(V_t) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_t^2 \overline{\Delta C_D}(V_t) A}{0.85} \quad (4.3)$$

$\Delta\mu(V_t)$ การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วทดสอบ (L/100 km)

ρ ความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m³

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

V_t^2 คือความเร็วที่ทดสอบ

$\overline{\Delta C_D}(V_t)$ การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วทดสอบ

A พื้นที่หน้าตัดของรถ 2.862 m²

0.85 ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (L/kW-h) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.4 ซึ่งเป็นค่าที่ต้องมีการคำนวณย่อยอีกครั้ง ดังนี้คือ

$$SFC = \frac{\rho \times Flowrate}{Horespower} \quad (4.4)$$

ρ ความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.84 kg/L

Flow rate อัตราการกินน้ำมัน (L/h)

Horsepower กำลังม้า (kW)

1) ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน $\Delta \overline{C_D}(V_t)$

ผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) จากทฤษฎีของลูสเซน โดยยึดกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบอกปกติ นำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากสมการ (4.5)

$$\Delta \overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{baseline} - \overline{C_D}(V_t)_{modifile} \quad (4.5)$$

$\Delta \overline{C_D}(V_t)$ การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วกำหนด

$\overline{C_D}(V_t)_{baseline}$ สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกรณีปกติ ที่ความเร็วที่ต้องการหา

$\overline{C_D}(V_t)_{modifile}$ สัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณีที่มีความเร็วต่างๆ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน เพื่อต้องการผลต่างจากกรณีปกติ หรือกรณี a จึงจะสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในหัวข้อต่อไป ดังนั้น ตารางที่ 4.7 จะเป็นค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณี และแต่ละความเร็ว โดยจะกำหนดให้มีค่าบวกและค่าลบ ซึ่งค่าบวก (+) คือกรณีและเงื่อนไขที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นกว่ากรณีปกติ และค่าลบ (-) คือกรณีและเงื่อนไขที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีปกติ ซึ่งจากตารางสามารถสังเกตได้ว่า ทุกเก็บบทุกกรณีจะมีทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง (ติดลบ) ยกเว้นกรณี c (SUV) ซึ่งเป็นกรณีเดียวที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น (ค่าบวก)

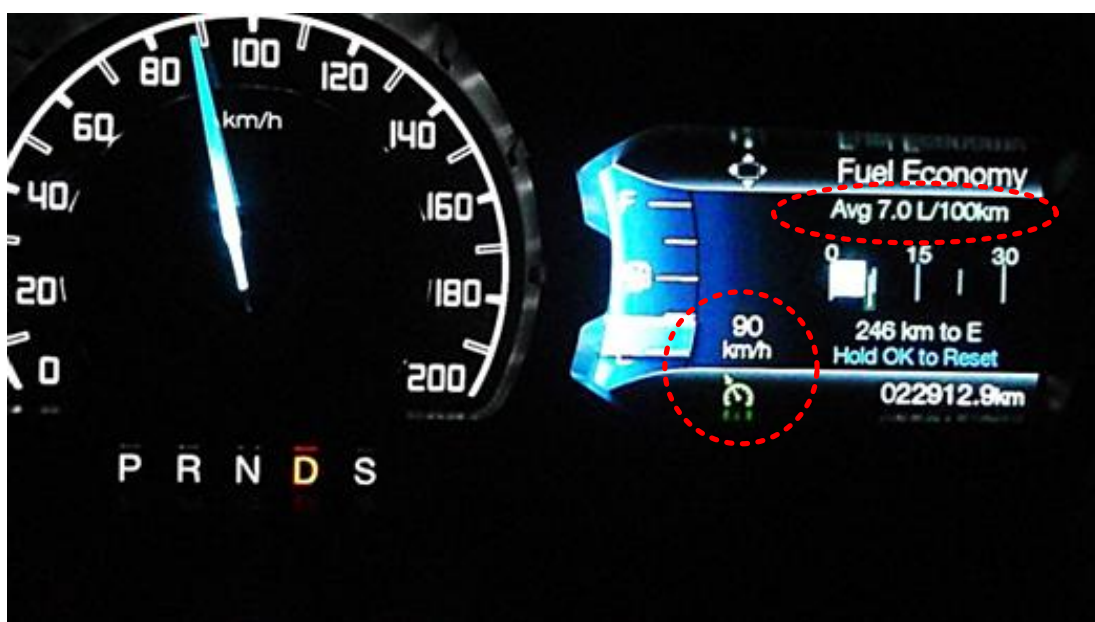
ตารางที่ 4.7 ค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (ΔC_D : + เพิ่ม, - ลด)

ความเร็ว (km/h)	กรณีทดสอบ $\Delta \overline{C_D}(V_t)$					
	กรณี b	กรณี c	กรณี d	กรณี e	กรณี f	กรณี g
36	- 0.0059	+ 0.0712	- 0.1296	- 0.0813	- 0.0750	- 0.2434
54	- 0.0053	+ 0.0713	- 0.1312	- 0.0859	- 0.0746	- 0.2352
72	- 0.0054	+ 0.0708	- 0.1323	- 0.0818	- 0.0744	- 0.2294
90	- 0.0041	+ 0.0705	- 0.1323	- 0.0888	- 0.0745	- 0.2312
108	- 0.0041	+ 0.0705	- 0.1326	- 0.1039	- 0.0740	- 0.2304
126	- 0.0038	+ 0.0704	- 0.1324	- 0.1179	- 0.0743	- 0.2297

2) ความเร็วในการทดสอบ (Speed)

ความเร็วในการทดสอบวิ่งนั้น ระบบสามารถกำหนดและควบคุมความเร็ว (Set speed) ได้ตามความเร็วที่ต้องการ โดยไม่ต้องเหยียบคันเร่ง ตามภาพ 4.5 ดังนั้นจึงสามารถตรวจสอบอัตราการกินน้ำมันตามความเร็วที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจากภาพตัวอย่างเป็นการเก็บผลของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็ว 90 km/h (เส้นปะวงกลม) ซึ่งจะมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน 7.0 L/100 km (เส้นปะวงรี)

จากนั้นสามารถแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากหน่วย L/100 km เป็น L/h ได้ แต่ระดับความเร็วที่กำหนด เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ในสมการที่ 4.4 ต่อไป



ภาพที่ 4.5 อัตราการกินน้ำมันกับความเร็วกำหนด

นอกจากนี้ ยังสามารถแสดงผลการรวบรวมข้อมูลจำแนกจากความเร็วแต่ละช่วงได้ ซึ่งจากภาพ 4.6 (a) เป็นการแสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเฉลี่ยตลอดระยะทางในการเก็บข้อมูลทั้งหมด คือ 7.2 L/100 km และจำแนกออกมาแต่ละช่วงความเร็ว ซึ่งมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่แตกต่างกัน ตามภาพที่ 4.6 (b) ทำให้สามารถวิเคราะห์การขับขี่ให้มีความเร็วที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันต่ำสุด เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจในการขับขี่เพื่อประหยัดน้ำมัน รวมทั้งแสดงระยะทางที่สามารถวิ่งได้ตามน้ำมันที่เหลือ ตามภาพที่ 4.6 (c) และระยะทางรวมที่ทำการเก็บผลคือ 17,986.1 km (เส้นปะวงรี)



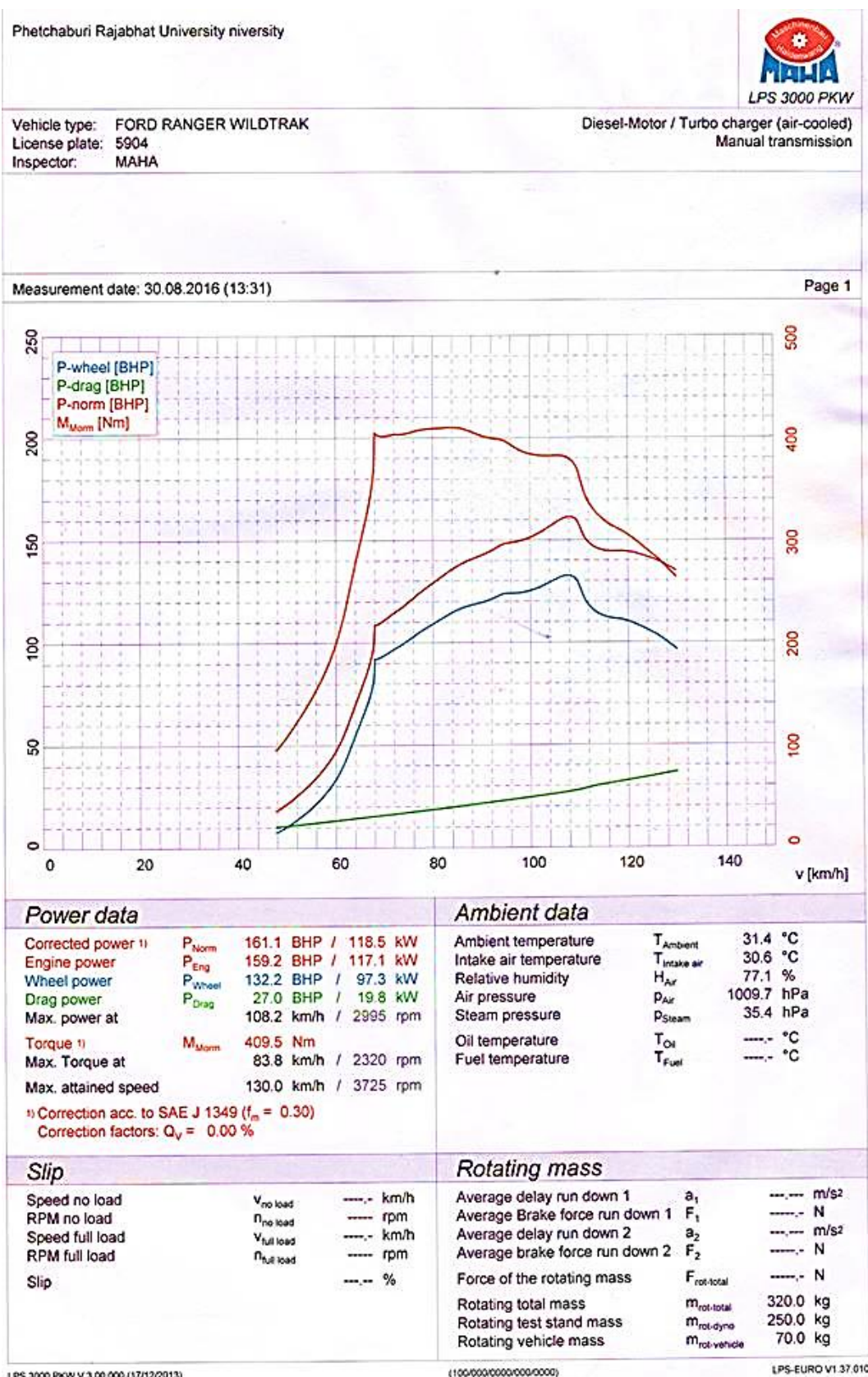
ภาพที่ 4.6 อัตราการกินน้ำมันแต่ละระดับความเร็ว

3) ผลการทดสอบความเร็วกับกำลังของเครื่องยนต์

จากสมการที่ (4.4) ซึ่งเป็นการคำนวณค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ เป็นค่าที่จำเป็นต้องมีการทดสอบจริงจากเครื่องมือวัดสมรรถนะรถ (Dynamometer test) โดยเป็นการทดสอบเสมือนการวิ่งด้วยอัตราความเร็วจริง ซึ่งได้อธิบายก่อนหน้านี้ในบทที่ 3 โดยผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.7 นั้น ได้แสดงกำลังเครื่องยนต์ (Power engine: แกนตั้งซ้าย) และแรงบิด (Torque: แกนตั้งขวา) ตามการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่เพิ่มขึ้นของรถ ซึ่งกำลังของเครื่องยนต์รวม (เส้นสีแดง) นั้น จะประกอบไปด้วย กำลังที่ล้อ (เส้นสีเขียว) รวมกับกำลังของแรงต้าน (เส้นสีฟ้า) ซึ่งจากภาพ กำลังของเครื่องยนต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่สูงขึ้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ 159.2 Hp ที่ความเร็ว 108.2 km/h (2995 rpm) หลังจากนั้น กำลังของเครื่องยนต์ลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

ส่วนแรงบิดของเครื่องยนต์ (เส้นสีส้ม) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่ 405.9 Nm ที่ความเร็ว 83.8 km/h (2995 rpm) หลังจากนั้นค่าแรงบิดจะลดลงตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นจากผลการทดสอบ ทั้งอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่างๆ จากการวิ่งทดสอบจริง และกำลังของเครื่องยนต์จากการทดสอบด้วย dynamometer จึงได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.8 เพื่อใช้ในการคำนวณ เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลต่อไป



ภาพที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น (Dynamometer Test)

จากผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็ว อัตราการกินน้ำมัน และกำลังของเครื่องยนต์ กับการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อน้ำมันตามสมการที่ 4.3 จึงสามารถสรุปค่าตามในตารางที่ 4.8 ดังนี้

4) ผลการทดสอบอัตราการกินน้ำมัน (Flow rate: L/h)

อัตราการไหลของน้ำมัน เป็นปริมาณปริมาตรของน้ำมันต่อเวลาในการไหล ซึ่งมีหน่วยเป็นลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ Ford Ranger 2.2 เราสามารถได้รับข้อมูลมาจากบริษัทผู้ผลิตตามตาราง 4.8 เป็นอัตราการไหลของแต่ละความเร็วในการทดสอบ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วรถ หรือความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรต่างๆ จากการทดสอบด้วย Dynamometer tests

Speed (km/h)	$\Delta\mu(V_i)$ (L/100 km)	Flow rate (L/h)	Horsepower (kW)	SFC (L/kW-h)	Torque (N.m)
36	11.3	3.35	10	0.3349	70
54	10.3	5.23	30	0.1743	110
72	12.5	6.52	115	0.0566	402
90	7.0	7.03	142	0.0495	400
108	7.4	7.22	160	0.0451	390
126	11.4	7.51	140	0.0536	290

ตารางที่ 4.9 ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจาก CFD

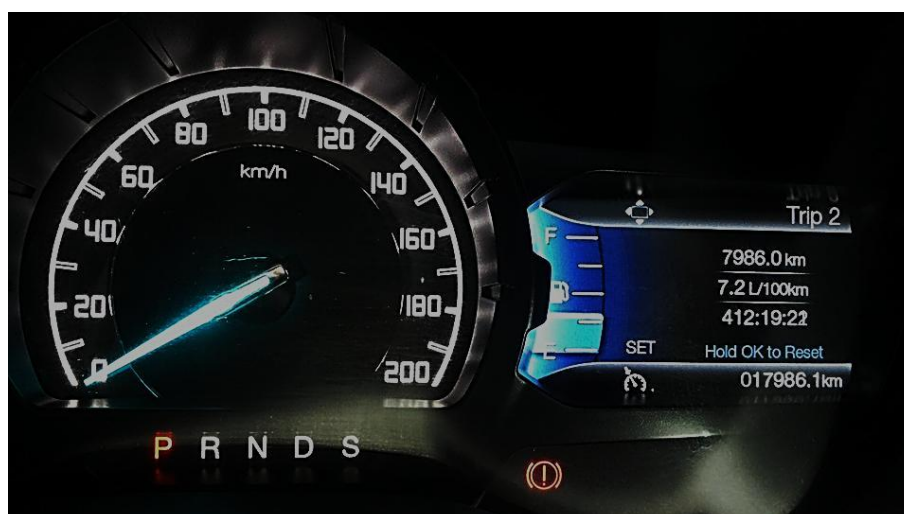
ความเร็ว (km/h)	กรณีทดสอบ $\Delta\mu(V_i)$ (L/100 km)					
	กรณี b	กรณี c	กรณี d	กรณี e	กรณี f	กรณี g
36	-0.0113	0.1366	-0.2487	-0.1560	-0.1439	-0.4671
54	-0.0118	0.1594	-0.2933	-0.1920	-0.1708	-0.5258
72	-0.0070	0.0918	-0.1716	-0.1061	-0.0965	-0.2976
90	-0.0072	0.1249	-0.2345	-0.1574	-0.1320	-0.4098
108	-0.0095	0.1639	-0.3084	-0.2416	-0.1721	-0.5359
126	-0.0142	0.2648	-0.4981	-0.4436	-0.2795	-0.8642
เฉลี่ย	-0.102	+0.1569	-0.2924	-0.2161	-0.1658	-0.5167

ตารางที่ 4.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันด้วยสมการที่ 4.3 คำนวณ

ความเร็ว (km/h)	กรณีทดสอบ $\Delta\mu(V_i)$ (L/100 km)					
	กรณี b	กรณี c	กรณี d	กรณี e	กรณี f	กรณี g
36	-0.0113	0.1366	-0.2487	-0.1560	-0.1439	-0.4671
54	-0.0118	0.1594	-0.2933	-0.1920	-0.1708	-0.5258
72	-0.0070	0.0918	-0.1716	-0.1061	-0.0965	-0.2976
90	-0.0072	0.1249	-0.2345	-0.1574	-0.1320	-0.4098
108	-0.0095	0.1639	-0.3084	-0.2416	-0.1721	-0.5359
126	-0.0142	0.2648	-0.4981	-0.4436	-0.2795	-0.8642
เฉลี่ย	-0.0102	+0.1569	-0.2924	-0.2161	-0.1658	-0.5167

4.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจริง

รถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ (Ford Ranger 2016) สามารถตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันได้จากฟังก์ชันที่หน้าคอนโซลของรถ ซึ่งแสดงผลเป็นค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่เกิดจากการวิ่งจริง (ที่ความเร็วเฉลี่ย) สามารถกำหนดค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันตามระยะทาง หรือเวลาที่ต้องการวัดผล มีหน่วยวัดเป็นลิตรต่อ 100 กิโลเมตร (L/100km) ซึ่งจากภาพที่ 4.8 คือการกำหนดระยะทางในการทดสอบคือ 7,986 km โดยระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบคือ 412 ชั่วโมง 19 นาที และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการวิ่งในรอบการทดสอบนี้ โดยเฉลี่ยคือ 7.2 ลิตรต่อหนึ่งร้อยกิโลเมตร ของกรณีปกติ (กรณี a) ตามภาพ 4.8



ภาพที่ 4.8 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเฉลี่ยที่เกิดจากการขับจริง (μ)

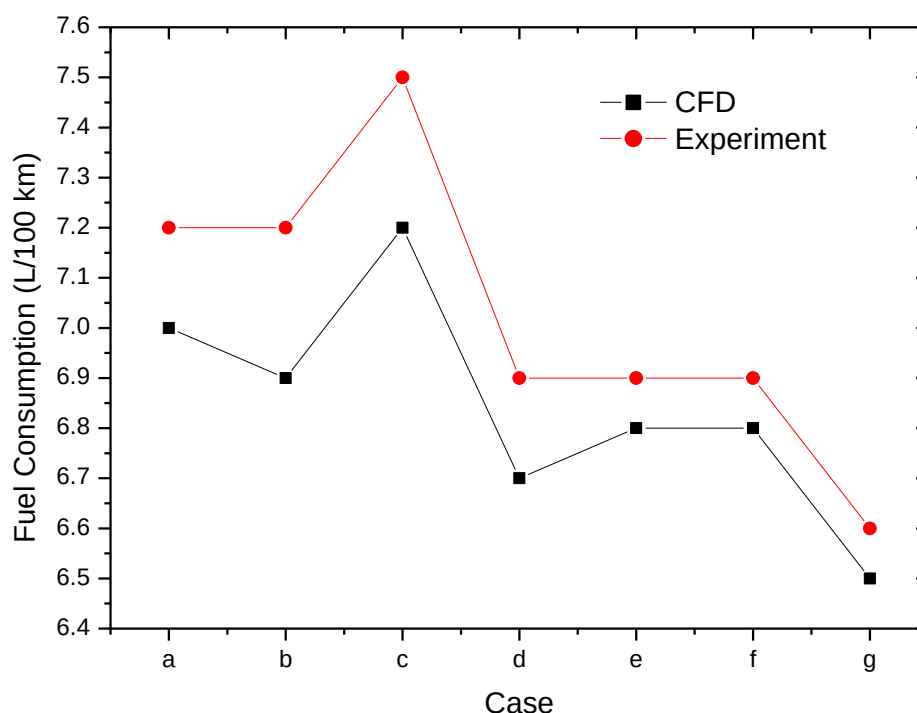
ดังนั้นตารางที่ 4.11 คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ได้จากการทดสอบวิ่งรถจริง วัดด้วยเก็บผลที่ระยะทางที่ทำการทดสอบทั้งหมด ประมาณ 5,000 กิโลเมตร (ที่ความเร็วเฉลี่ย) โดยจะเป็นการทดสอบด้วยการขับที่ปกติทั่วไป รถที่ใช้จะเป็นรถ (Ford Ranger 2016 2.2 L) ซึ่งเป็นคันเดียวกัน และคนขับคือบุคคลเดียวกัน ระยะเวลาที่ใช้ในการขับของแต่ละกรณี ทั้ง 7 กรณีทดสอบคือ 1 เดือน ซึ่งเจ้าหน้าที่ของบริษัท ฟอर्ड ป.รุ่งโรจน์ เพชรบุรี เป็นผู้ดำเนินการในการเก็บข้อมูลนี้

ซึ่งข้อมูลในตารางที่ 4.11 เป็นค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทั้ง 7 กรณีที่ทดสอบจริง และค่าคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการคำนวณด้วยสมการที่ 4.3 จากผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ได้จาก CFD

ตารางที่ 4.11 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (μ) การคำนวณ (CFD) และทดสอบจริง (Experiment)

Case	(μ) CFD (L/100 km)	(μ) Experiment (L/100 km)
(a) normal	7.0	7.2
(b) Wildtrak	6.9	7.2
(c) SUV	7.2	7.4
(d) Arrow Dynamic	6.7	6.9
(e) Covered Pick-up Box	6.8	6.9
(f) Front Grill	6.8	6.9
(g) Sedan	6.5	6.6

ดังนั้น จากข้อมูลจากตารางที่ 4.11 สามารถแสดงการเปรียบเทียบ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันระหว่างการคำนวณจากผลของ CFD กับ การทดสอบจริง Experiment ดังภาพที่ 4.9 ซึ่งภาพรวมของผลทั้งสองวิธี ให้ค่าที่มีความใกล้เคียง และสอดคล้องกัน อาทิ กรณีที่ a ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้เปรียบเทียบผลต่างกับกรณีอื่น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นในกรณีที่ b มีแนวโน้มลดลงในการคำนวณ CFD ส่วนการทดสอบจริงคงที่ เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ในกรณี (b) Wildtrak จะมีผลต่อแรงต้านน้อยมาก ดังนั้นผลในการทดสอบจริงจึงคงที่ ต่อมากรณี (c) SUV มีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งสองวิธี โดยเฉพาะในการทดสอบจริงในกรณีนี้ให้ค่าสูงที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์เสริมในกรณีนี้ ส่งผลให้ผลต่างของแรงดันอากาศเพิ่มสูง ซึ่งการทดสอบจริงจะมีผลกับอิทธิพลของแรงหนีอากาศมากกว่า CFD นอกจากนั้น กรณี d, e, f และ g มีแนวโน้มที่ลดลงกว่ากรณีปกติ และสอดคล้องกันกับผลทั้งคู่อย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.9 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการคำนวณ CFD และการทดสอบจริง ทั้ง 7 กรณี

ดังนั้น จากข้อมูลการทดสอบทั้งหมด ทั้ง CFD กับ การทดสอบจริง นั้นสามารถยืนยันได้ว่าการจำลองด้วย CFD มีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำข้อมูลทั้งเชิงตัวเลข และกราฟฟิค มาช่วยในการตรวจสอบอุปกรณ์เสริมด้านอากาศยานพลศาสตร์ ซึ่งในกรณีศึกษาเราได้ตรวจสอบอุปกรณ์เสริมเพื่อจำลองและทดสอบจริง ทั้ง 7 กรณี เกือบทุกกรณีจะสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันได้ ซึ่งสอดคล้องกันทั้งสองวิธี ยกเว้นกรณี (c) SUV ที่เพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากกรณีปกติ (a) Normal โดยเฉพาะในกรณีที่ (g) Sedan เป็นกรณีที่ช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากที่สุด

4.4 วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน สามารถทราบถึงอัตราการเพิ่มหรือลดเงินทุนที่จะต้องจ่ายกับน้ำมันที่เราต้องใช้กับรถบรรทุกว่ามากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับสถานะด้านการตลาดของซื้อขายน้ำมัน ซึ่งในปัจจุบันก็ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เชื้อเพลิงที่ใช้กับรถบรรทุกที่เราใช้อยู่ เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งกำลังจะหมดไป และยิ่งนับวันก็มีราคาที่สูงขึ้นหากกรณีที่ให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงก็ย่อมเป็นผลดีต่อผู้ที่นำไปปฏิบัติ แต่ต้องคำนึงก่อนว่า ก่อนที่จะมีการปรับปรุงด้านอากาศยานพลศาสตร์นั้นจำเป็นต้อง

มีการเสียเงินลงทุนกับการซื้ออุปกรณ์เพื่อมาปรับแต่งรูปทรงของรถบรรทุก ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้น แต่ละยี่ห้อก็มีราคาที่แตกต่างกัน แล้วแต่ละบุคคลที่จะนำมาใช้ โดยบางครั้งราคาที่เรซื้ออุปกรณ์เสริม หรืออุปกรณ์แต่งรถบรรทุกนั้นมา ซึ่งเชื่อว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้จริง แต่ในบางครั้งอายุของรถก็อาจจะหมดก่อนเวลาที่จะคุ้มทุน ดังนั้นจากข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ทราบแล้วจากหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องมาคำนวณหาราคาที่ต้องจ่ายกับค่าน้ำมัน ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการคำนวณราคาน้ำมันที่ลดหรือเพิ่มจากราคาเดิมที่ต้องจ่ายจากกรณีรถบรรทุกปกติ ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับราคาอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ มาคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุน โดย การใช้งานของรถกระบะที่ใช้ในทดสอบเฉลี่ยจะอยู่ที่ 5,000 km/เดือน และน้ำมันดีเซล ราคาเฉลี่ย 25.00 บาท (29 ธันวาคม 2560) บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ราคาอุปกรณ์เสริมที่ต้องจ่ายคิดที่ราคาท้องตลาด และเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก โดยผลต่างของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ลดลงของแต่ละกรณีจะสามารถนำมาคำนวณเป็นจำนวนเงินที่ลดลงจากการจ่ายค่าน้ำมันของแต่ละเดือน มาเปรียบเทียบกับราคาอุปกรณ์เสริมที่ต้องจ่ายในการติดตั้งดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันนั้น จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจริงเป็นหลักในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้นำกรณีทดสอบ (g) Sedan มาเป็นกรณีตัวอย่างในการคำนวณดังนี้คือ

ตัวอย่างการคำนวณระยะคุ้มทุน

จากการทดสอบการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถกระบะ (g) Sedan ซึ่งเป็นกรณีส่งผลให้เกิดการประหยัดน้ำมันมากที่สุด ราคาต้นทุนในการผลิตอุปกรณ์เสริมรถกระบะในกรณีนี้คือ 22,000 บาท ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถหาระยะเวลาคู่ทุนได้ดังนี้

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ประหยัด} = 0.4 \text{ L/100 km}$$

$$\text{ซึ่งจากข้อมูลการใช้รถของบริษัทที่ทำการทดสอบ} = 5,000 \text{ km/เดือน}$$

$$\text{ดังนั้นในเวลา 1 เดือนจะต้องใช้น้ำมัน} = \frac{0.4 \times 5,000}{100}$$

$$= 20 \text{ L/เดือน}$$

$$\text{ราคาน้ำมันดีเซลปัจจุบันอยู่ที่} 25.00 \text{ บาท/ลิตร} \times 20 \text{ L/เดือน}$$

$$\text{ราคาน้ำมันที่ลดลงต่อเดือน} = 500.00 \text{ บาท/เดือน}$$

$$\text{ดังนั้น ระยะเวลาคู่ทุน คือ} \frac{22,000}{500} = 44.00 \text{ เดือน}$$

ตารางที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (จริง) และระยะคุ้มทุนของแต่ละกรณี

กรณี	อุปกรณ์เสริม	ราคา (บาท)	$\Delta\mu$ ทดสอบจริง (L/100 km)	ระยะคุ้มทุน (เดือน)
(b)	Wildtrak	20,000	0	-
(c)	SUV	20,000	+0.4	-
(d)	Arrow Dynamic	10,00	-0.3	27
(e)	Covered Pick-up Box	5,000	-0.3	13
(f)	Front Grill	2,000	-0.3	5
(g)	Sedan	22,000	-0.4	44

ตารางที่ 4.12 เป็นการแสดงระยะคุ้มทุน จะเห็นได้ว่า ระยะคุ้มทุน จะมีระยะเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้ขึ้นกับปริมาณการลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเพียงอย่างเดียว แต่ต้องคำนึงถึงราคาที่ลงทุนด้วย และมีเพียงสองกรณีที่ไม่ได้คำนวณระยะคุ้มทุนคือ กรณี (b) และ (c) เนื่องจากทั้งสองกรณีมิได้ลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดังข้อมูลในตาราง ดังนั้น เกณฑ์ในการตัดสินใจ นอกจากเลือกใช้อุปกรณ์เสริม ควรต้องคำนึงถึงหลายๆ ด้านคือ ความจำเป็น ด้านอากาศพลศาสตร์ และจุดคุ้มทุน จะเป็นการเลือกใช้อุปกรณ์เสริมที่ฉลาด และเกิดความคุ้มค่าสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการลู่ทางตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้คือ เพื่อตรวจสอบและติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถกระบะและทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงกับผลของ CFD (Validation) และเพื่อหาความสัมพันธ์ด้านเศรษฐศาสตร์ และระยะเวลาคุ้มทุนของกรณีอุปกรณ์เสริมที่ประหยัดน้ำมัน

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 1) การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านเพื่อการยืนยันผลทั้ง 2 วิธีนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์การถดถอย (ค่า R2 square) ผลแตกต่างกันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในทางทฤษฎีทางด้านการตรวจสอบการทดลอง (Experimental design) ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และสามารถยืนยันผลความถูกต้อง ความแม่นยำของวิธีคำนวณการไหลพลศาสตร์ (CFD) สำหรับใช้ในการตรวจสอบอุปกรณ์เสริมรถกระบะขนาดจริงได้ในหัวข้อต่อไป
- 2) การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข CFD ด้วยเงื่อนไขคือ การติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถกระบะ 7 ผลปรากฏว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเกือบทุกกรณีลดลง เป็นผลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงเช่นเดียวกัน ยกเว้นในกรณีที่ (c) SUV ซึ่งทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านและอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเพิ่มขึ้นจากกรณีปกติ
- 3) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจาก CFD และการทดสอบจริง มีแนวโน้มสอดคล้องกันที่ลดลงตามลำดับ จึงสามารถยืนยันผล และเงื่อนไข ผลจากการจำลอง CFD ที่สามารถนำมาทำนายผลของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการออกแบบ และสร้างอุปกรณ์เสริมได้
- 4) อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากที่ได้จาก CFD กับการทดสอบจริง โดยใช้กรณี (a) เป็นกรณีที่ใช้เปรียบเทียบผลต่างกับกรณีอื่น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในกรณี (b) มีค่าลดลงในการคำนวณ CFD ส่วนการทดสอบจริงคง ต่อมา กรณี (c) SUV มีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งสองวิธี โดยเฉพาะในการทดสอบจริง ในกรณีนี้ให้ค่าสูงที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์เสริมในกรณีนี้ จะทำให้ผลต่างของแรงดันอากาศเพิ่มสูง ซึ่งการทดสอบจริงจะมีผลกับอิทธิพลของแรงหนีอากาศมากกว่า CFD และกรณี d, e, f และ g มีแนวโน้มที่ลดลงกว่ากรณีปกติ

และสอดคล้องกันกับผลทั้งคู่อย่างเห็นได้ชัดมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ลดลงได้จริงคือ -0.3, -0.3, -0.3 และ -0.4 ตามลำดับ

5) ระยะเวลาจะมีระยะเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้ขึ้นกับปริมาณการลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเพียงอย่างเดียว แต่ต้องคำนึงถึงราคาต้นทุนด้วย และมีเพียงสองกรณีที่ไม่ได้คำนวณระยะต้นทุน คือ กรณี (b) และ (c) เนื่องจากทั้งสองกรณีมิได้ลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันดังข้อมูลในตาราง ดังนั้นเกณฑ์ในการตัดสินใจ นอกจากเลือกใช้อุปกรณ์เสริม ควรต้องคำนึงถึงหลายๆ ด้านคือ ความจำเป็น ด้านอากาศพลศาสตร์ และจุดคุ้มทุน จะเป็นการเลือกใช้อุปกรณ์เสริมที่ฉลาด และเกิดความคุ้มค่าสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากโครงการวิจัยนี้ มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ผลการจำลอง CFD และการทดสอบจริงนั้น มีผลเชิงตัวเลขที่ต่างกัน เนื่องจากสภาวะในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกระบะนั้น ไม่สามารถกำหนดให้เหมือนสภาวะจริงได้ทุกเงื่อนไข ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ จึงสามารถนำข้อมูลมาทำนายผลของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ในระดับหนึ่งกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้อุปกรณ์เสริม เพื่อนำไปสู่เชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต และนำปัญหาไปปรับปรุง ใช้กับโครงการวิจัยใหม่ที่ต่อยอดงานโครงการนี้ต่อไป ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับโครงการวิจัย มีดังต่อไปนี้

1) ความละเอียดของรูปร่างแบบจำลอง เป็นสิ่งที่ต้องคำนึง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองนั้น รูปร่างย่อมไม่มีความเหมือนจริงได้ 100% ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้ มีความคลาดเคลื่อนน้อย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสม ความละเอียดของแบบจำลองที่ถูกต้องให้ได้มากที่สุด

2) ปัญหาของคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของโปรแกรม Solid Work เนื่องจากการจำลองของโปรแกรมนี้นี้ ต้องการความละเอียดสูงในการประมวลผลและหน่วยความจำขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้เกิดปัญหาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการจำลองค่อนข้างสูง อาจส่งผลให้คอมพิวเตอร์เกิดการ Error ดังนั้นในการแก้ปัญหาคือควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำที่สูง ระบบปฏิบัติการที่ล้ำสมัย ซึ่งสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้

3) รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โครงการวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง เพราะมีขนาดแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ ไม่สนใจในเรื่องของการส่งถ่ายความร้อน และการอัดตัวของอากาศ ดังนั้นกระบวนการและขั้นตอนในการจำลองนั้น ยังไม่ได้มีการยืนยันหาความเหมาะสม

ระหว่าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และลักษณะ จำนวนของกริด ซึ่งอาจส่งผลของความแตกต่างของค่า การทดสอบของ CFD และการทดสอบจริง

4) รูปทรงของรถกระบะ รถกระบะแต่ละยี่ห้อ มีรูปทรงขนาดที่แตกต่างกัน ปัจจัยหลักในการ ออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับรถกระบะจะต้องวัดขนาดรถกระบะจริงแต่ละยี่ห้อ เพราะถ้าวัดขนาดรถ กระบะผิดพลาดจะส่งผลให้การออกแบบอุปกรณ์เสริมสำหรับรถกระบะผิดพลาดเช่นกัน ดังนั้นในการ แก้ปัญหาควรที่จะวัดขนาดรถกระบะให้ละเอียดและแม่นยำที่สุด

5) ปัญหาสภาพแวดล้อมขณะทำทดสอบ เนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบที่สภาพแวดล้อม จริง และทดสอบเก็บผล บนท้องถนนจริงเพื่อให้ผลที่ได้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่ เนื่องจากตัวแปรทางสภาพแวดล้อมในการทดสอบไม่คงที่เช่น สภาพบรรยากาศเปลี่ยนแปลง อัตราเร่งที่ไม่ คงที่ และสภาพพื้นผิวถนนที่ขรุขระ ดังนั้นในการแก้ปัญหาควรที่จะทำการทดสอบเก็บผลให้ได้มากที่สุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยในการคำนวณที่ทำให้ค่าทดสอบมีแม่นยำที่สุด

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปรัชญา มุขดา “อิทธิพลของอุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม – มิถุนายน 2558
- [2] วินัย ศรีอำพร. กลศาสตร์ของไหล : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2541.
- [3] Alexander, D. “Reducing drag in future vehicles,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 88: 120-144, 2000.
- [4] Hucho, W.H. “Aerodynamics of road vehicles,” Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 94: 334-361, 2006.
- [5] Ahmed, S.R. and Baumert, W. “The structure of wake flow behind road vehicles,” ASME Journal of Fluids Engineering. 101: 201-220, 1979
- [6] Ahmed, S.R. “Influence of base slant on wake structure and drag of road vehicles,” ASME Journal of Fluids Engineering. 105: 429-434, 1983.
- [7] Scibor, A.J. “Road vehicle aerodynamics,” Edition Pentech Press Limited. 12-34, 1984.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Prasad, A. and Williamson, C.H.K. “A method for the reduction of bluff body drag,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 69: 155-167, 1997.
- [11] Van Dam, C. P. “Recent experience with different methods of drag prediction,” Progress in Aerospace Sciences. 35: 751-798, 1999.
- [12] Kwon, H. Park, Y. Lee, D. and Kim, M. “Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 89: 1179-1195, 2001.
- [13] Storms, B.L. “A study of Reynolds number effects and drag reduction concepts on a generic tractor trailer,” JSAE Review. 25: 88-101, 2004.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] Leuschen, J. and Cooper, K.R. “Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers,” ASME Journal of Fluids Engineering. 128: 1202-1244, 2006.
- [15] Kieffer, W. Moujaes, S. and Armbya, N. “CFD study of section characteristics of Formula Mazda race car wings,” Mathematical and Computer Modelling. 43: 1275-1287, 2006.
- [16] Tomiyama, M. Maeda, K. and Nakamura, F. “The development of a method to obtain the optimum lift coefficient using the vehicle dynamic analysis,” JSAE Review. 23: 69-74, 2002.
- [17] อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และอุดมเกียรติ นนท์แก้ว. “การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 13(2) : 34-40 ; เมษายน-มิถุนายน, 2546.
- [18] Fukuda, H. and Nakagawa, K. “Improvement of vehicle aerodynamics by wake control,” JSAE Review. 16: 151-155, 1995.
- [19] ก้อง อุทัยภาส และวราภรณ์ จันทสาโร. “การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง,” วิศวกรรมสาร มก. 10(4) : 23-30 ; เมษายน-มิถุนายน, 2546.
- [20] Spalart, P.R. “Strategies for turbulence modeling and simulation,” International Journal of Heat and Fluid Flow. 21: 252-263, 2000.
- [21] Wang, M. catalano, P and Lacarino, G. “Prediction of high Reynolds number flow over a circular cylinder using LES with wall modeling,” Center for Turbulence Research Annual Research Briefs. 34: 112-127, 2001.
- [22] Perzo, S. and Davidson, L. “On CFD and transient flow in vehicle aerodynamic,” Mathematical and Computer Modeling. 37: 230-255, 2000.
- [23] วีรชัย ชัยวรพฤษ์ และ ชวลิต กิตติชัยกา : “การศึกษาทำนายค่าแรงต้านและแรงกดของอากาศผ่านรถแข่ง”สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [24] Horinouchi, N. “Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System,” Mathematical and Computer Modeling. 22: 453-477, 1995.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Muyl, F. Dumsa, L. and Herbert, V. “Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry,” Computers & Fluids. 33: 849-858, 2004.
- [26] Ozawa, H. Nishikawa, S. and Higashida, D. “Development of aerodynamics for a solar race car,” JSAE Review. 19: 343-349, 1998.
- [27] Singh, S. N. Rai, L. and Bhatnagar, A. “Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles,” JSAE Review. 23: 89-113, 2002.
- [28] Simon, W. and Gioacchino, V. “The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 90: 89 -99, 1999.
- [29] Cooper, K.R. “Pickup truck aerodynamics,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 92: 342-356, 2004
- [30] Brownd, F. “Reducing aerodynamics drag and fuel consumption,” JSAE Review. 26: 89-104, 2005.
- [31] Yamamoto, S. Yanagimoto, K. and Nakagawa, K. “Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles,” JSAE Review. 18: 39-44, 1997.
- [32] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหนาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กกรณีวิ่งตามกัน,” วารสาร ม. อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 : มกราคม-เมษายน, 2552.
- [33] จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล. “อัตราการเดินทางเปลี่ยนเชื้อเพลิงของรถยนต์ขนาดต่าง ๆ ที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. น.108-124. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2548.
- [34] ปรัชญา มุขดา, พิเชฐ นิลดวงดี, ช่างชัย ชูปวา, อุทัย ผ่องรัศมี, วิระพันธ์ สีหนาม และกุลเชษฐ์ เพียรทอง: “อุปกรณ์เสริมท้ายรถบรรทุกเพื่อประหยัดเชื้อเพลิง” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 . 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความเผยแพร่ของโครงการวิจัย



International Institute of Engineers

www.iieng.org

Sept. 24, 2016

ACCEPTANCE/INVITATION LETTER

Prachya Mukda,
Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, Thailand.

To Whom It May Concern,

6th International Conference on Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM'2016) that will take place on Dec. 21-22, 2016 at Kuala Lumpur aims to bring together researchers, scientists, engineers, and scholar students to exchange and share their experiences, new ideas, and research results about all aspects of science, engineering and technology, and discuss the practical challenges encountered and the solutions adopted.

Herewith, the International Institute of Engineers' Scientific and Technical Committee is pleased to inform you that the peer-reviewed & refereed conference paper id: E1216022, titled as "*Effect from Accessories on Pickup Aerodynamics by Computational Fluid Dynamics*" and authored by Prachya Mukda, has been accepted for Oral Presentation at the conference and publication in Proceedings of the Kuala Lumpur conference Dec. 2016.

We would like to kindly invite Prachya Mukda, to present the research paper at the conference site in Kuala Lumpur (Malaysia). We would greatly appreciate if you could facilitate granting the conference delegate the necessary visa.

Sincerely Yours,



Conference Secretariat
International Institute of Engineers 2016 Kuala Lumpur

www.iieng.org

Email: info@iieng.org

Conference Venue:

Grand Seasons Hotel, Kuala Lumpur

NO. 72 JALAN PAHANG, 53000 KUALA LUMPUR, MALAYSIA

TEL: 603 2697 8888 Ext : 8507

Email: mogan@grandseasons.com

(Charges of Accommodation are NOT included in above mentioned Fee)

International Institute of Engineers, Dec. 21-22, 2016, Kuala Lumpur (Malaysia)



www.iie.org

E1216022

Int'l Conference

Certificate of Participation

This Certificate is awarded to

Prachya Mukda

**Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial
Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Thailand**

for Paper Titled

***Effect from Accessories on Pickup Aerodynamics by
Computational Fluid Dynamics***

in technical presentation, recognition and appreciation of research contributions

to

***6th International Conference on Advances in Engineering Sciences and
Applied Mathematics (ICAESAM'2016)***



IIE Chair

Dec. 21-22, 2016
Kuala Lumpur (Malaysia)

Effect from Accessories on Pickup Aerodynamics by Computational Fluid Dynamics

Prachya Mukda

Abstract— This study aims to investigate the aerodynamic characteristic of the pickup truck. The pickup box and around body of the car has been modified and tested for drag coefficient by using low speed wind tunnel and using 3 dimensional computational fluid dynamics (CFD) technique (FLUENT). Models are tested at speed between 36 – 90 km/hr in the wind tunnel and CFD, before full dimension testing at speed between 36 – 126 km/hr in CFD. Six car models, which are (a) Normal, (b) Wildtrak, (c) Covered pickup box, (d) SUV, (e) Front grill and (f) Sedan and all models have the same frontal area. In this study, the main focus is to investigate the aerodynamic characteristics to reduce the coefficient of drag (C_D) due to the wake at the rear body of the pickup car. The result shows that, almost case studies decrease drag coefficient from normal case between 5 % – 33.3 % (in all average speed), except SUV case increases the drag coefficient about 10 %. This study confirms that reduction of internal flow in to the cab or reduce wake by the geometry at the rear body of the pickup can significantly affect the C_D , hence the energy economizes.

Keywords— aerodynamics, pickup, drag coefficient, computational fluid dynamics.

I. INTRODUCTION

In Thailand, the automotive industry is targeted to be “Detroit of Asian”. Now, it is the world’s largest market and manufacturer of the pickup truck. In manufacturing, the truck shape is generally designed by using fundamental of aerodynamics to provide low coefficient of drag, because this can improve energy efficiency of the trucks. However, many users modified their pick-up truck with accessories such as cover the rear box or bed. This changes the pick-up truck’s aerodynamic and coefficient of drag which was designed by manufacturer. Therefore, it may cause an exaggerate energy consumption. Consequently, the study of aerodynamics characteristics over the truck is beneficial to the users for improving fuel efficiency.

In the investigation of aerodynamics characteristics, wind tunnel is the most popular research tool using to figure out the aerodynamic of objects. It is also used to observe the air flow phenomena around object such as separation which is directly relate to the coefficient of drag.

Mr. Prachya Mukda,
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Phetchaburi Rajabhat University, Thailand. (corresponding author’s phone:
+668 7959 7828; e-mail: mukdaen@hotmail.com).

In 2001, Grosche, F.R. *et al.* presented that object shape like buff body slightly created the separation of airflow; hence, the coefficient of drag was low because of lower differential pressure across the object. This fundamental was sometimes applied to specify the pickup geometry before such model was tested in the wind tunnel. For many times, however, because of the dissimilarity between prototypes and model in the detail, the errors in testing and experimental results are found. Therefore, in 1999, Van Dam, C.P.[2] used the larger wind tunnel, where the full size car can be tested, for aerodynamics and quantifying the coefficient of drag. Aerodynamic drag is mainly affected not only by the truck body, but also the accessories, especially which stick out from the body and is perpendicular to air flow direction. Those accessories cause the loss of energy and the reduction of air momentum along the accessories in airflow path. Although in 2006 Leuschen, J. *et al.* [3] presented that some of accessories can reduce car fuel consumption, around 5 – 7 %, by reduction of coefficient of drag from vortices phenomena, they did not consider the air flow inside the car which also relates to drag coefficient. Moreover, it is difficult to investigate the effect of airflow on inside the car on aerodynamic drag by using of similarity.

Recently, numerical method such as Computational Fluid Dynamics (CFD) has been employed to investigate the air flow characteristics around object and then to predict the coefficient of drag of car. At the beginning, domains of 2D geometry were simulated with low Reynolds number to capture the separation of airflow at the rear of object. Such model was comparable to similarly model tested in wind tunnel. However, in the full dimension test, it is different between the results from simulation and experiment, because, the effect of the third dimension of the geometry is not considered. Thus, Horinouchi, N. [4] and Muiyl, F. *et al.*[5] improved CFD model of car by using Navier Stoke equation of laminar flow of air and applying the domain to 3D geometry to investigate the airflow characteristics over car accessories. Moreover, they found that drag force of car shape is significantly decreased with high slop of object front. Further study, Prasad, A. *et al* [6], confirmed that drag force can be reduced by installation of front skirt, and they mentioned that 40 % of coefficient of drag was accounted by the outside force which was mostly generated by turbulent flow in the rear of the car.

Muiyl, F. *et al.*[5] successfully carried out the simulation of characteristics of airflow around the car by using the numerical model with car geometry divided into parts of front, middle, and

rear. The part of rear was modified in major angle of car shape, being back-light angle, boat-tail angle and ramp angle. He found that boat-tail angle significantly more induces wake flow generation, corresponding to the drag coefficient. Moreover, many results from the above previous studies indicates that drag coefficient of pickup truck shape is higher than which of another car without bed, because of wake flow more rapidly occurring over the tray as shown in Fig 1 [7].

Drag forces of pickup can be divided as four parts in Fig 2. Which pressure drag occur highest to 77 percentage, internal flow loss 10 percentage, under floor roughness 10 percentage and friction loss occurs around body car about 3 percentage [8].

This study carries out an investigation of airflow characteristics over the pickup truck focused on the pickup box or bed for improving the body aerodynamics. The pickup truck models are tested at low speed in the wind tunnel, before the full dimensions are tested at high speed in CFD simulation. Six car models, which are (a) Normal, (b) Wildtrak, (c) Covered pickup box, (d) SUV, (e) Front grill and (f) Sedan are investigated. Moreover, the aerodynamic characteristics corresponding to the coefficient of drag (C_D) due to the wake flow at the rear part is discussed.

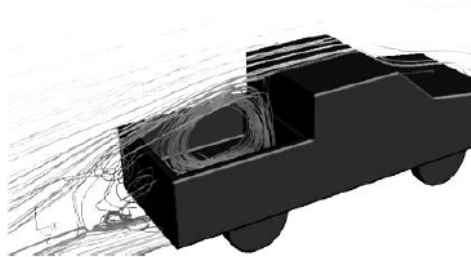


Fig. 1 Wake flow over the bed of pick-up track [7]

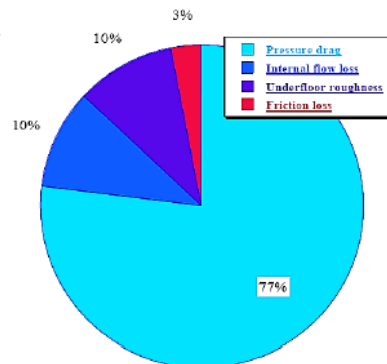


Fig. 2 Proportion of drag on the car [8]

II. METHODOLOGY

A. Evaluation of Turbulent Model

In this study, the commercial CFD code (FLUENT) is used as the tool to simulate the aerodynamic characteristics of objects. In the simulation, the domain is assumed to be 3D geometry with 728,000 triangle grid or tetrahedron mesh element. At the beginning, various turbulent models for specifying the turbulent flow were evaluated by comparison with previous experimental. It shows that simulation of coefficient of drag of validation by using k-e model gives fairly close results to experimental results [9]. Therefore, this turbulent model is employed in this paper.

B. Testing Model in the Wind Tunnel

Low speed wind tunnel used in this study is shown in Fig. 4. Air from inlet section is induced through the test section by the fan with the motor sized of 5.5 hp. The rotational speed of fan can be regulated by the inventor to obtain air velocity of around 10-25 m/s (36 – 90 km/hr). Velocity and pressure of airflow in the test section is measured by the pitot tube and the barometer. Fig. 4, on right hand side, shows the measurement of drag force of the sphere with 0.1 m in diameter by using load cell and manometer. Thus, the drag coefficient of the shape can be found from Equation (1) as

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

where F_D is the total drag force acting on an object, ρ is the density of air and A is the frontal area of the pickup.

C. Comparison between Experiment and Simulation (CFD)

Pick-up truck model

Principle of similarity was used to specify dimensions of the pickup truck models, which would be tested in the wind tunnel and calculated by the CFD method. The ratio of the model to the actual size of pick-up truck is 1:20. The model was made of metal which the frontal area (and shape) was fixed at 0.0067144 m². Air velocities ranged between 36 – 90 km/hr were used in both the simulation and the experiment.

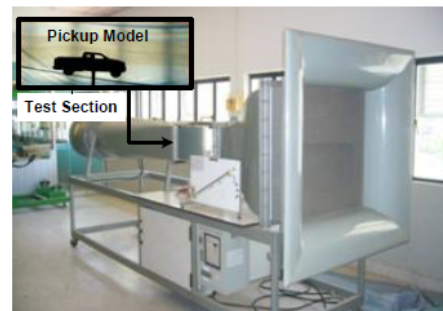


Fig. 3 Wind tunnel for the model car testing [3]

D. Prediction for Coefficient of Drag of Pickup Truck with Full Scale Test

For full scale test, the 6 cases of pickup trucks detailed above section are calculated by CFD method to estimate the coefficient of drag, where the frontal area of the pickup truck was fixed on 2.68576 m^2 . Moreover, influence of airflow inside the driver room or cab on the coefficient of drag is also investigated. Air speed ranged $36 - 126 \text{ km/hr}$, corresponding to Reynolds number between $2.6 \times 10^4 - 2.5 \times 10^5$, is used with the same CFD setup as in the previous simulations. There are 728,000 triangle or tetrahedron mesh elements with inlet and outlet boundary condition defined as velocity inlet and atmospheric pressure outlet respectively. Which the condition and domain are shown in Table 1 and Fig. 4, respectively.

TABLE I BOUNDARY CONDITION OF CFD	
GAMBIT 3D	
inlet boundary condition	velocity inlet
outlet boundary condition	pressure outlet
grid triangle	728,000 cell
FLUENT 3D	
solve	segregated Solver
linearization	implicit method
turbulent model	standard k-epsilon
near-wall treatment method	standard wall function
velocity testing	$36 - 126 \text{ km/hr}$

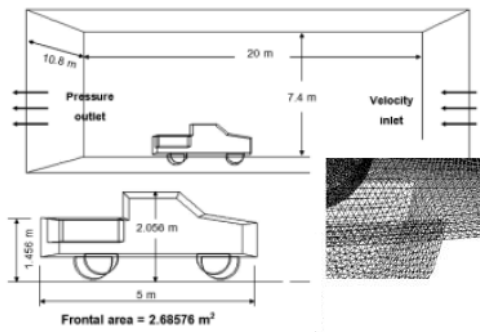


Fig. 4 Domain of the simulation setup with the real dimension pickup truck

III. RESULT AND DISCUSSION

A. Validation Result

In the simulation, according to the validation in the previous section, the $k-\epsilon$ turbulent model is used. Value of coefficient of drag of the spherical from the simulation, the experiment, and the theoretical results are compared at different Reynolds number ranged from $2.2 \times 10^4 - 3.0 \times 10^5$, as shown in Fig. 5. It is found that the coefficients of drag from those methods are quite similar. The coefficient from the experiment is higher than that from the simulation by 7 % averagely. The drag coefficient decreases when the Reynolds number increases, because the viscous friction force acting on spherical surface decreases.

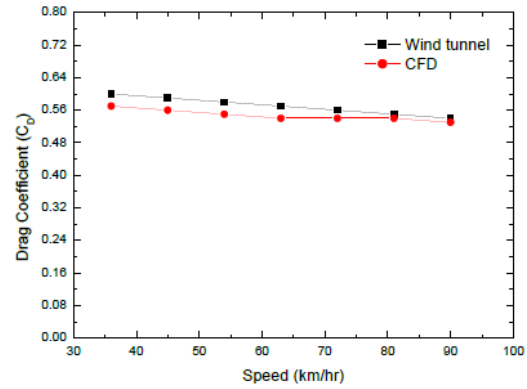


Fig. 5 Coefficients of drag from validation of normal case model

B. Comparison and discussion of the pickup 6 cases

The pickup trucks whose geometry provides the low drag force. Therefore, in automotive design, the designer generally strives to achieve the low coefficient of drag by reducing of pressure in frontal part of truck and increasing of pressure in the rear part. In this study, the concept of pressure or force difference over the truck body can be applied to describe the aerodynamics drag of all cases of pickup trucks by using Equation (2). The coefficients of drag and path line of air flow from CFD simulation are shown in Fig. 6 and Fig. 7 respectively. We found that the SUV case performs with the highest coefficient of drag, and the Sedan case performs with the lowest coefficient of drag.

$$F_D = \int_{front} p \cos \theta dA - \int_{back} p \cos \theta dA \quad (2)$$

where F_D is total drag force acting on the pickup (N), p is air pressure (pascal) and A is frontal area of pickup (m^2)

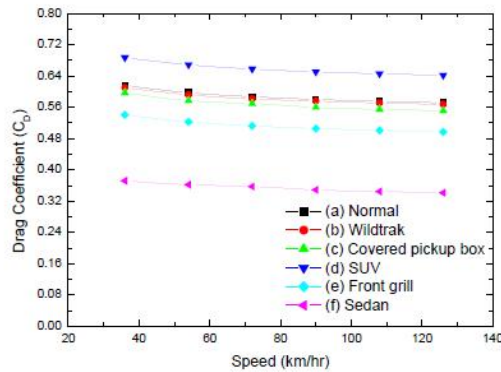


Fig. 6 Drag coefficient on increasing speed of pickup

C. Pressure pathline of airflow over the pickup

Case (a): Normal

Normal case is used to compare to other study cases which is the commercial pickup accessories. From the results, the pressure pathline of airflow can be investigated to discuss for drag coefficient. In Fig. 7 (a) is observed that, when the air pressure flow impact to the front area, causes separation and recirculation air on pickup box, it's called "wake", which in this case have large size because high different of pressure between front to rear of pickup, which can be discussed from Equation (2). When the wake impacts to the inside of the box causing the total drag force of pickup is high. Therefore, the generally normal case has high drag coefficient value.

Case (b): Wildtrak

In this case study, the commercial accessories is stuck at top and rear of the pickup cabin. The result shows that, this case have nearby drag coefficient to normal case, due to the wake flow at the rear box change lightly.

Case (c): Covered pickup box

In the covered pickup box case, the phenomena different from two first cases is the wake size at rear box less than, because the covered pickup box can reduce difference of pressure between the front and rear of pickup. Which accord with the total drag coefficient as in the Fig. 6.

Case (d): SUV

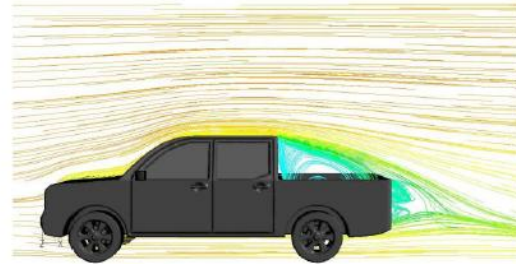
This case obtains highest total drag force due to the SUV case is square shape accessories causing highest difference pressure. It can observe from the wake is largest more than every cases. Therefore, this case increases of the highest drag coefficient more than every case as in Fig. 6.

Case (e): Front grill

This case strict grill at the front of pickup, which decrease drag coefficient due to a certain angle of the slant, a vortex breakdown phenomenon appears causing the sudden pressure drop acting on the front pickup. Therefore the pressure drag coefficient is less than normal case.

Case (f): Sedan

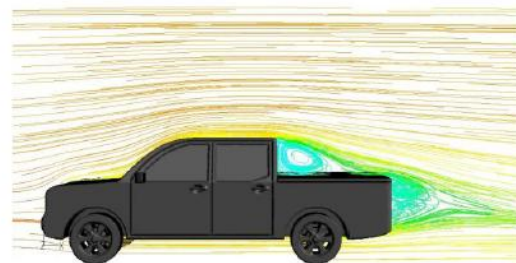
In this case, pressure pathline of airflow seems smooth than others, resulting from smoother shapes of rear part. In addition, separation and wake circulation of pickup is also minimally due to the pressure between front and rear of pickup is balance; so that, this case gives the lowest coefficient of drag.



(a) Normal



(b) Wildtrak



(c) Covered pickup box

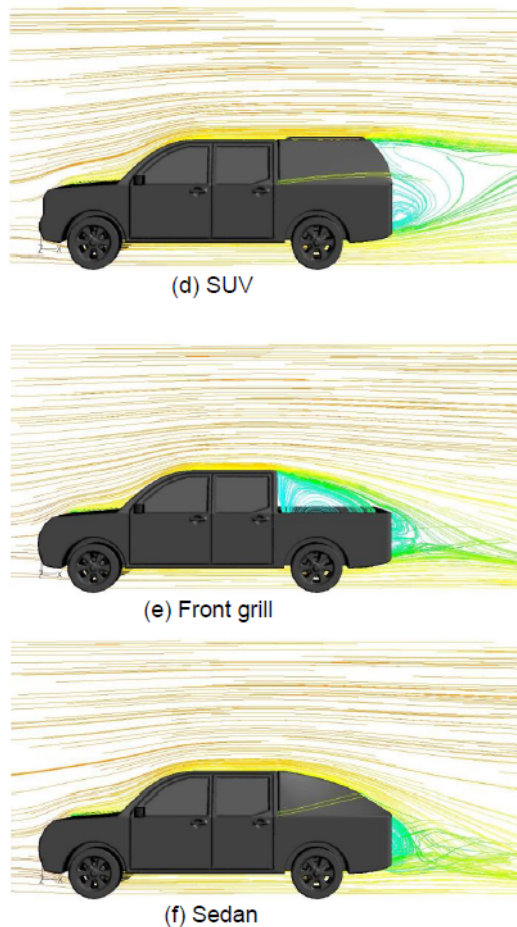


Fig. 7 Pressure pathline of 6 study cases

CONCLUDING REMARKS

This study carries out an investigation of airflow characteristics over the pickup. The pickup models are validated in wind tunnel and CFD simulation to investigate the accuracy, before using CFD modeling test the full dimension 6 cases at high speed on CFD simulation.

The validation is difference results less than 7 %. The drag coefficient value of sedan case decrease from normal case lowest about 0.3, opposite the SUV case increase about 0.07.

The results show that, the drag coefficient values (C_D) are depended by the different between of the front pressure to rear pressure of pickup which correspond to Equation (2). Therefore, the general idea of how the drag coefficient reduction can save the fuel consumption.

ACKNOWLEDGMENT

This research is financially supported by the National Research Council of Thailand (NRCT) through Phetchaburi Rajabhat University, Thailand, 2015.

REFERENCE

- [1] F.R. Grosche, G.E.A and Meier, "Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, 2001, pp. 1201-1218.
- [2] C.P. Van Dam, "Recent experience with different methods of drag prediction", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 35, 1999, pp. 751-798.
- [3] J. Leuschen and K.R. Cooper, "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers", *SAE International*, 2006.
- [4] N. Horinouchi, "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System", *SAE 950628*, 1995.
- [5] F. Muiyl, L. Dumsa, and V. Herbert, "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry", *Computers & Fluids*, vol. 33, 2004, pp. 849-858.
- [6] A. Prasad and C.H.K. Williamson, "A method for the reduction of bluff bodydrag", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 69-71, 1997, pp. 155-167.
- [7] P. Mukda and P. Sooksanan, "Aerodynamics Analysis of Truck Front Accessories by Computational Fluid Dynamics", *Journal of Science and Technology, Maha Sarakham University*, vol. 34 (3), 2015 pp. 42-51.
- [8] W.H. Hucho, "Aerodynamics of road vehicles," *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 94, 2006, pp. 334-361.
- [9] P. Mukda A. Saysoy, "Fuel Consumption on Aerodynamics Characteristics of Pickup Accessories", *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, vol. 13(4), 2011, pp. 255-262.

ภาคผนวก ข
ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) นาย ปรัชญา มุกดา
(English) Mr. Prachya Mukda

2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 5-3621-00007-57-1

3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เลขที่ 38 หมู่ 8 ต.นาวัน อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000
สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โทรศัพท์ 032-414455
แฟกซ์ 032-414455 มือถือ 087-9597828 E-mail: mukdaen@hotmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ปีการศึกษาที่จบ	ระดับปริญญา (ตรี โท เอก) และชื่อเต็ม	อักษรย่อปริญญา/วิชา	สาขา	ชื่อสถาบันการศึกษา	ประเทศ
2547	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	วศ.บ.(เครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ไทย
2551	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	วศ.ม.(เครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ไทย
2559	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	ปร.ด.(เครื่องกล)	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี	ไทย

5. ประวัติการทำงาน

- ปี พ.ศ. 2546 : ฝึกงานที่ บริษัท กุลธรเคอร์บี จำกัด แผนกออกแบบชิ้นส่วนคอมเพรสเซอร์ ระยะเวลา 45 วัน

- ปี พ.ศ. 2548-2551 ผู้ช่วยนักวิจัย และวิศวกรในโครงการศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สังกัดกระทรวงพลังงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการวิจัยการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
2. ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการวิจัยการพัฒนาประสิทธิภาพของเตาเผาครกแบบอุโมงค์ โดยใช้ CFD เทคนิค
3. วิศวกรโครงการส่งเสริมการผลิตและการใช้งานไบโอดีเซล กระทรวงพลังงาน

- ปี พ.ศ. 2551- ปัจจุบัน อาจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

- ปี พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน ประธานสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

- ปี พ.ศ. 2558 – ปัจจุบัน ผู้ช่วยคณะบดี (ฝ่ายวิจัย) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

6. สาขาที่มีความชำนาญพิเศษ

1. Computational Fluid Dynamics (CFD)
2. Aerodynamics
3. พลังงานทดแทน (น้ำ, แสงแดด, ลม และชีวมวล)
4. High speed liquid jet

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย

ชื่อโครงการ: การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน

สถานภาพ: ผู้ร่วมโครงการวิจัย

แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผ่านมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ปีงบประมาณ: 2551

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: การศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงาน

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ปีงบประมาณ: 2552

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามมติคณะรัฐมนตรี

ปีงบประมาณ: 2555

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: อุปกรณ์เสริมภายนอกของรถกระบะเพื่อประหยัดน้ำมัน

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ปีงบประมาณ: 2554

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: เครื่องสูบน้ำด้วยกำลังน้ำ

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: งบประมาณอุดหนุนทุนวิจัยเงินรายได้มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ปีงบประมาณ: 2557

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: อุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถบรรทุกเพื่อลดแรงต้าน

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามมติคณะรัฐมนตรี

ปีงบประมาณ: 2558

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: การพัฒนาอุปกรณ์เสริมเพื่อการลดแรงต้านของรถกระบะ

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามมติคณะรัฐมนตรี

ปีงบประมาณ: 2559

การดำเนินงาน: เสร็จสิ้นแล้ว

ชื่อโครงการ: เครื่องสูบน้ำด้วยกำลังน้ำแบบลูกสูบ

สถานภาพ: หัวหน้าโครงการ

แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ตามมติคณะรัฐมนตรี

ปีงบประมาณ: 2560

การดำเนินงาน: กำลังดำเนินการ

8. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์วารสาร และนำเสนอประชุมวิชาการ

บทความที่นำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ

[1] ปรัชญา มุขดา และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกเล็กโดยการจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. น.129-137. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค, 2550.

[2] ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัด

พลังงานสำหรับรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. น.231-237. โรงเรียนนายเรืออากาศ, 2550.

[3] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 1. น.87-95. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.

[4] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเพื่อการประหยัดพลังงานโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. น.543-553. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.

[5] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. น.225-237. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

[6] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน,” ใน งานการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 (Thailand Research Expo 2009) 26-30 สิงหาคม 2552.

[7] **ปรัชญา มุขดา**, อนุชา สายสร้อย กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. . “การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของท้ายกระบะรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการคณิตเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ตุลาคม 2552.

[8] **ปรัชญา มุขดา**, อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระฉากข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 4-7 พฤษภาคม 2552.

[9] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถกระบะจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริมโดย CFD,” ใน งานการนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 (Thailand Research Expo 2010) 26-30 สิงหาคม 2553.

[10] **ปรัชญา มุขดา**, อนุชา สายสร้อย อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันในการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 20-22 ตุลาคม 2553.

[11] **ปรัชญา มุขดา**, พิเชฐ นิลดวงดี, อาทิตย์ ทับทิมหอม, อุทัย ผ่องรัศมี และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “อุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2-4 พฤษภาคม 2555.

- [12] **ปรัชญา มุขดา**, พิเชฐ นิลดวงดี, ชวงชัย ชูปาวา, อุทัย ผ่องรัศมี, วิระพันธ์ สีหานาม และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “อุปกรณ์เสริมท้ายรถบรรทุกเพื่อประหยัดเชื้อเพลิง,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, มหาวิทยาลัยขอนแก่น 15-17 ตุลาคม 2557.
- [13] **ปรัชญา มุขดา** “อิทธิพลของอุปกรณ์เสริมด้านท้ายรถบรรทุกที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข” การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ “ราชภัฏวิจัย ครั้งที่ 3” ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช 20-22 พฤษภาคม 2558.
- [14] **ปรัชญา มุขดา** “เครื่องสูบน้ำด้วยกำลังน้ำ” มหกรรมงานวิจัยแห่งชาติ Thailand Research Expo 2015, 20 สิงหาคม 2558
- [15] **ปรัชญา มุขดา** “ปรากฏการณ์ลำพุงคู่จากอุปกรณ์ฉีด IDM เข้าสู่เนื้อเยื่อจำลอง” The 6th Phetchaburi Rajabhat National Research Conferences 2016, 9 กรกฎาคม 2559.

บทความที่นำเสนอประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- [16] **P. Mukda**, W. Seehanam and K. Pianthong. “Feasibility Study on Applying the Principle of Gas Gun for Needle Free Jet Injection” The 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Dusit Thani Hotel Pattaya, Chonburi, THAILAND 16 – 18 October 2013.
- [17] **P. Mukda**, W. Seehanam and K. Pianthong. “NEEDLE-FREE INJECTOR BY USING IDM METHOD” The 25th International Symposium on Transport Phenomena, Krabi, THAILAND 5 – 7 November 2014.
- [18] **P. Mukda**, W. Seehanam and K. Pianthong. “Transient Phenomena of Double Pulsed High Speed Liquid Jet in Polyacrylamide Gels” The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Regent Cha-Am, Phetchaburi, THAILAND 16 – 18 December 2015.
- [19] **P. Mukda**, W. Seehanam and K. Pianthong. “Optimization of Injection from IDM Injector into Tissue Simulant by Respond Surface Method” The 7th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Duangtawan Hotel, Chiang Mai, THAILAND 13 – 16 December 2016.
- [20] **P. Mukda** “Effect from Accessories on Pickup Aerodynamics by Computational Fluid Dynamics” 6th International Conference on Advance Engineering Sciences and Applied Mathematics (ICAESAM’ 2016), Kuala Lumpur, Malaysia 21-22 December 2016.

บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ระดับชาติ

- [1] **ปรัชญา มุขดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2551.

- [2] **ปรัชญา मुखดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กกรณีวิ่งตามกัน,” วารสาร ม. อบ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1 : มกราคม-เมษายน, 2552.
- [3] **ปรัชญา मुखดา**, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และวิระพันธ์ สีหานาม. “การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก,” วารสารราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 : มกราคม-มิถุนายน 2552.
- [4] **ปรัชญา मुखดา** และอนุชา สายสร้อย. “อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันกับลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรถกระบะ ที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ปีที่ 13 ฉบับที่ 4 ตุลาคม – ธันวาคม 2554
- [5] **ปรัชญา मुखดา** “อิทธิพลของอุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์กับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 พฤษภาคม – มิถุนายน 2558
- [6] **ปรัชญา मुखดา** และพงศ์ศักดิ์ สุขสนาน “การวิเคราะห์ด้านอากาศพลศาสตร์ของอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถบรรทุกด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม-ธันวาคม 2558

บทความที่ตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

- [1] **Mukda, P.**, Seehanam, W. and Pianthong, K. “A new concept of needle-free jet injector by the impact driven method”, **ASME Journal of Medical Devices**. 11(1); 2017.