รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

อุปกรณ์เสริมด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่
เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง

โดย

พิเชฐ นิลดวงดี และ คณะ

มีนาคม 2556

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่

สารบัญภาพ

สารบัญภาพ (ต่อ)

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

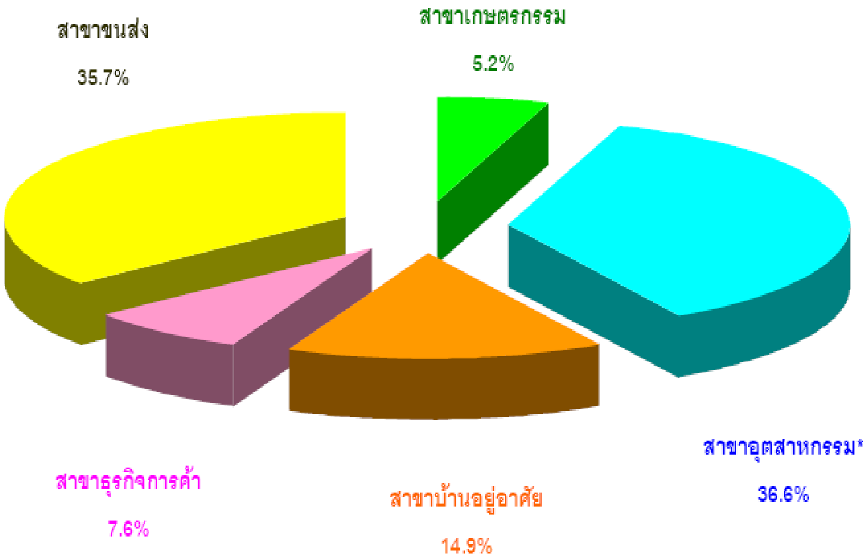
ภาพที่

สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจ เป็นตัวแปรที่มีผลทำให้เกิดวิกฤตด้านพลังงานของประเทศไทย เพราะพลังงานเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ระบบเศรษฐกิจสามารถขับเคลื่อน ซึ่งจากข้อมูลการใช้พลังงานจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจปี 2554 (ภาพที่ 1.1) แสดงให้เห็นว่า การขนส่งมีปริมาณการใช้พลังงานมากที่สุดเทียบเท่ากับการใช้พลังงานในอุตสาหกรรม



ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

ภาพที่ 1.1 การใช้พลังงานจำแนกตามสาขาเศรษฐกิจปี 2554

ตารางที่ 1.1 ปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการขนส่ง แยกตามประเภทการขนส่ง ปี 2554

ประเภทการขนส่ง	100%	หน่วย :(พันตัน) เทียบเท่าน้ำมันดิบ
รถบรรทุก	75.96 %	17,684
รถไฟ	0.45 %	104
เรือ	7.07 %	1,645
เครื่องบิน	16.52%	3,847

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน

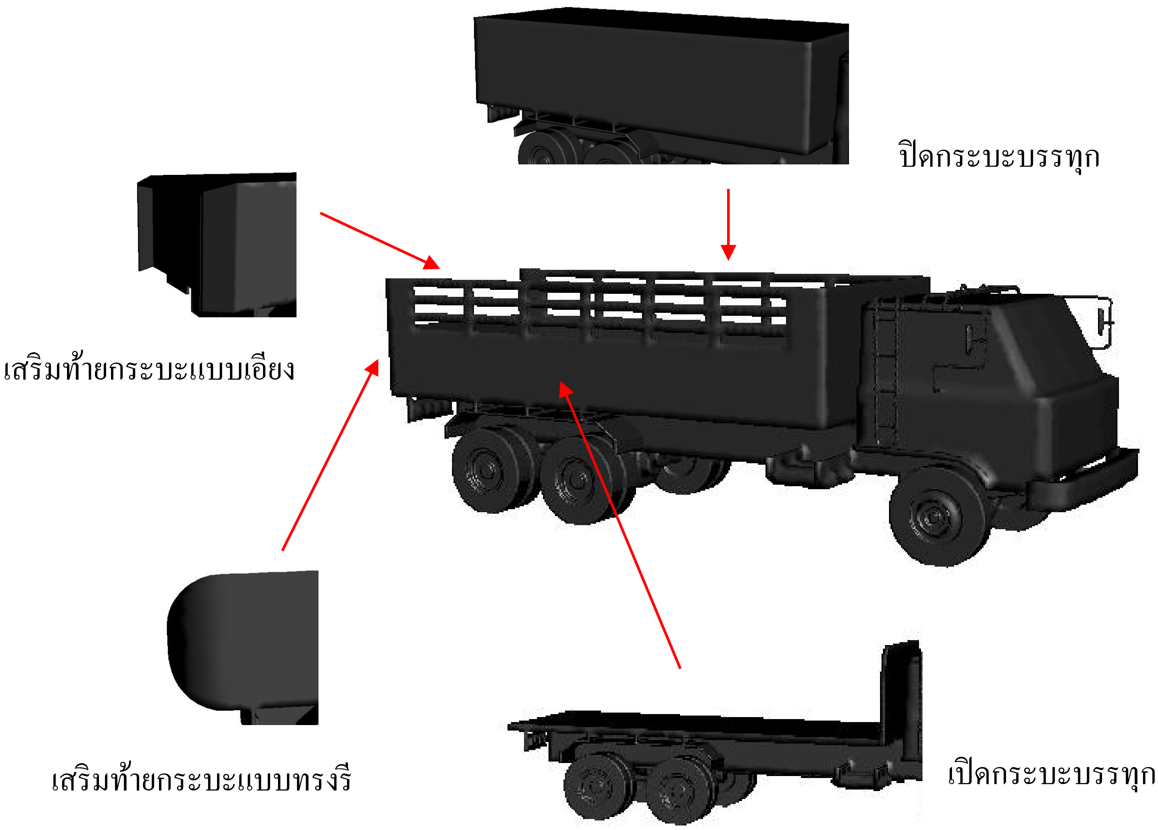
ซึ่งการขนส่งสินค้าและวัตถุดิบ จำเป็นต้องใช้ยานพาหนะที่มีขนาดใหญ่เพื่อความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เช่น รถไฟ เรือ หรือเครื่องบิน แต่เนื่องจากระบบการจัดการการส่งสินค้า (logistics) ภายในประเทศยังไม่มีการพัฒนาที่ดีพอกับการคมนาคมขนส่งของยานพาหนะดังกล่าว รถบรรทุกขนาดใหญ่ หรือรถบรรทุกที่มีขนาดมากกว่า 10 ตัน จึงเป็นยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งภายในประเทศมากที่สุด เพราะความเหมาะสมกับสภาพถนน สภาพภูมิประเทศ และต้นทุนในการขนส่ง ดังนั้นในภาครัฐจึงต้องมีมาตรการในการใช้พลังงานของรถบรรทุกให้ลดลงมากที่สุด

การส่งเสริมการใช้รถบรรทุกประหยัดพลังงาน ก็เป็นนโยบายหนึ่งของมาตรการ ซึ่งภาคอุตสาหกรรมการผลิตรถ และนักวิจัย จึงพยายามคิดค้นเทคโนโลยีใหม่ ที่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกให้มากที่สุด อาทิเช่น การปรับปรุงประสิทธิ์ภาพของเครื่องยนต์ให้สูงขึ้น การใช้พลังงานทดแทน การใช้เครื่องยนต์พลังงานแบบผสม (hybrid engine) ก็เป็นหนทางหนึ่ง ที่จะทำให้มาตรการนั้นประสบผลสำเร็จ แต่ที่มีสำคัญไม่น้อยกว่าเรื่องของเครื่องยนต์ก็คือ การลดแรงต้านอากาศ ซึ่งเรายังไม่มีการศึกษา ในเชิงออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อลดแรงต้าน หรือพัฒนามากนัก

การพัฒนาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) ของชิ้นส่วนต่าง ๆ หรือตัวถังของรถบรรทุกขนาดใหญ่ จึงเป็นสิ่งจำเป็น ซึ่งรูปทรงของรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ใช้กันในประเทศไทย ถึงแม้จะมีการออกแบบที่ดีอยู่แล้ว แต่ก็สามารถปรับปรุง หรือดัดแปลง ให้มีแรงต้านอากาศต่ำลงได้อีก และในการใช้งานจริง ผู้ใช้มักจะติดตั้งอุปกรณ์เสริม ทำให้การใช้งานผิดไปจากต้นแบบเสมอ ค่าแรงต้านอากาศของรถที่ถูกดัดแปลงจะไม่เท่าเดิม ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยไม่จำเป็น

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้ จะนำความรู้เรื่องอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่ ขนาด 10.8 ตัน มาศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงต้านอากาศ จะทำการศึกษาทั้งการทดลอง ด้านการจำลองโดยใช้โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics: CFD) จนนำไปสู่การออกแบบสร้างอุปกรณ์เสริม **ซึ่งได้ร่วมโครงการวิจัยกับ สหพันธ์การขนส่งทางบกแห่งประเทศไทย เพื่อติดตั้งและทดสอบจริงกับรถบรรทุกขนาดใหญ่** กับการติดตั้งอุปกรณ์เสริม 5 กรณีหลัก (ดังภาพที่ 1.2 และ 1.3) และสรุปข้อบกพร่องของการใช้งานปัจจุบัน พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไข วิธีการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงให้มากที่สุด

ภาพที่ 1.2 รถบรรทุกขนาด 10.8 ตัน ใช้เป็นกรณีศึกษา



ภาพที่ 1.3 รูปแบบที่ใช้เป็นกรณีศึกษาเบื้องต้น เพื่อที่ใช้ในการทดสอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกที่ใช้งานใช้งานในประเทศไทย ทั้งรูปร่างปกติ และติดอุปกรณ์เสริม

2. เสนอแนวทางแก้ไข การลดแรงต้านอากาศ ของรถบรรทุก ทั้งรูปร่างปกติ และติดอุปกรณ์เสริม

3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์เสริมที่ลดแรงต้าน เพื่อติดตั้งกับรถบรรทุกจริง

4. ลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง หรือประหยัดพลังงาน เนื่องจากการใช้รถบรรทุก ที่ไม่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุก รูปทรงปกติ และรูปทรงที่ติดอุปกรณ์เสริม ในประเทศไทย ในช่วงความเร็วไม่เกิน 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

2. ใช้รถขนาด 10.8 ตัน (รถสิบล้อ 3 เพลา + ยางคู่)

3. ทดลองศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงต้านในกรณีศึกษา 5 กรณีคือ

3.1 กรณีปกติ

3.2 กรณีปิดกระบะรถบรรทุก

3.3 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง

3.4 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบทรงรี

3.5 กรณีเปิดกระบะบรรทุก

4. สภาพบรรยากาศเป็น เป็นบรรยากาศปกติเฉลี่ยของประเทศไทย

5. ใช้ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 4 (ถนนเพชรเกษม) ในการทดสอบรถ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ผลงานตีพิมพ์ เผยแพร่ ในวารสารวิชาการ หรือสัมมนาวิชาการต่าง ๆ

2. ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของรถบรรทุกให้เหมาะสมในแง่ อากาศพลศาสตร์

3. ได้เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบรถที่หลายกหลายสภาวะ

4. ผู้ประกอบการขนส่งหรืออุตสาหกรรมยานยนต์สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้

5. ช่วยทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน หรือลดอัตราการสิ้นเปลืองได้ในระดับหนึ่ง

1.5 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

โครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่ 1 พ.ย. 2554 – 1 พ.ย. 2555 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	**ระยะเวลา**											
	พ.ย 54	ธ.ค 54	ม.ค 55	ก.พ 55	มี.ค 55	เม.ย 55	พ.ค 55	มิ.ย 55	ก.ค 55	ส.ค 55	ก.ย 55	ต.ค 55
1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี ปรับปรุงชุดทดลอง และอุปกรณ์วัด	↔											
2. สร้างโมเดลและทำการทดสอบที่สภาวะต่าง ๆ โดยใช้อุโมงค์ลม และการจำลอง (CFD) เพื่อเปรียบเทียบ		↔										
3. วิเคราะห์ผล และออกแบบอุปกรณ์เสริมขนาดจริง			↔									
4. สร้างอุปกรณ์เสริมจริง				↔	↔							
5. ปรับปรุงและติดตั้งอุปกรณ์เสริมกับรถบรรทุก						↔	↔					
6. ทดสอบเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจากการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรวม 5 กรณี								↔	↔			
7. วิเคราะห์ผล เสนอแนวทางการใช้งาน										↔	↔	
8. สรุปและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์												↔

1.6 ปัจจัยที่เอื้อต่อการวิจัย (อุปกรณ์การวิจัย, โครงสร้างพื้นฐาน ฯลฯ) ระบุเฉพาะปัจจัยที่ต้องการเพิ่มเติม

1.อุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

- อุโมงค์ลมความเร็วต่ำ และ ความเร็วรอบคงที่
- Computers ความเร็วปานกลาง
- เครื่องวัดอุณหภูมิแบบต่างๆ และเครื่องบันทึกข้อมูล
- เครื่องวัดความเร็วลม และ ความดัน
- เครื่องวัดคุณสมบัติอากาศ
- CFD softwares (Fluent)
- Motor speed controller (ตัวควบคุมความเร็วลม)
- Force sensor หรือ load cell ขนาดเล็ก
- Handheld pitot tube

- รถบรรทุกสำหรับการทดสอบของเกษตรกร และผู้ประกอบการรถบรรทุก จ.เพชรบุรี

2.อุปกรณ์ที่ต้องการเพิ่ม

- อุปกรณ์ สำหรับ flow visualization
- อุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์สำหรับการสร้างแบบจำลอง

1.7 งบประมาณของโครงการวิจัย

ตารางที่ 1.3 งบประมาณโครงการวิจัย

งบประมาณ	จำนวนเงิน (บาท)
1. หมวดค่าตอบแทน	**80,625**
2. หมวดค่าจ้างชั่วคราว	**130,000**
2.1 ค่าจ้างในการเก็บข้อมูล	20,000
2.2 ค่าจ้างในการจำลอง Simulation และสร้างโมเดล	
- การจำลองการออกแบบอุปกรณ์ (solid work simulation)	10,000
-การจำลองการไหลของอากาศ (computational fluid dynamics: CFD)	10,000
-ค่าจ้างในการสร้างโมเดล	10,000
2.3 ค่าจ้างในการสร้างอุปกรณ์เสริม	30,000
2.4 ค่าจ้างปรับปรุง และประกอบอุปกรณ์เสริม	20,000
2.5 ค่าจ้างในการจัดทำเอกสาร	
- แบบสอบถาม	5,000
- แผ่นพับเผยแพร่	5,000
- รูปเล่มรายงาน	10,000
- ถ่ายเอกสาร	5,000
- เอกสารประกอบการถ่ายทอดเทคโนโลยี	5,000
3. หมวดค่าใช้สอย	**175,000**
2.1 ค่ายานพาหนะเดินทาง	
- ค่าจ้างยานพาหนะขนส่ง	20,000
- ค่าน้ำมันรถบรรทุกขนาดใหญ่	40,000
- ค่าซ่อมบำรุงรถบรรทุก	30,000
2.2 ค่าอาหาร	20,000
2.3 ค่าเช่าที่พัก	25,000
2.4 ค่าเบี้ยเลี้ยง	20,000
2.5 ค่าใช้จ่ายในการถ่ายทอดเทคโนโลยี	20,000

4.หมวดค่าวัสดุ	**270,000**
4.1 วัสดุสำนักงาน	40,000
4.2 วัสดุเพิ่มประสิทธิภาพคอมพิวเตอร์ - ฮาร์ดดิสก์ (Hard Disk drive) - แรม (Ram) - ซีพียู (CPU)	 15,000 15,000 20,000
4.3 หนังสือ วารสารและตำรา	20,000
4.4 วัสดุในการสร้างอุปกรณ์เสริม - วัสดุในการทำอุปกรณ์เสริม - ค่าสี - วัสดุในการปรับแต่งรถ - ค่าวัสดุแม่พิมพ์ทำอุปกรณ์เสริม - วัสดุอื่น ๆ	 50,000 20,000 20,000 40,000 30,000
5.หมวดค่าครุภัณฑ์	**70,000**
5.1 เครื่องมือวัด (ความดัน ความเร็ว)	35,000
5.2 คอมพิวเตอร์แบบพกพา	25,000
5.3 กล้องถ่ายรูป	10,000
6.หมวดค่าธรรมเนียมการอุดหนุนสถาบัน	**80,625**
รวมทั้งหมด	**806,250**

1.8 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

- วิธีการการศึกษา และ อุปกรณ์ การทดลอง (เป็น P สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ได้อีกมากมาย)

- องค์ความรู้เกี่ยวกับ อากาศพลศาสตร์ ของรถบรรทุก ที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน ทั้งจากการทดลอง และ CFD simulation (เป็น I) รวมทั้งความไม่เหมาะสมที่เกิดขึ้น

- ข้อเสนอแนะ ในการใช้งาน รถยนต์บรรทุกขนาด อย่างเหมาะสม (เป็น G)

- ผลการประหยัดพลังงาน เนื่องจากการใช้งานที่เหมาะสม (เป็น G)

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ

ลักษณะการไหลผ่านวัตถุที่จมในของไหลและแรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุที่จมอยู่ในสนามการไหล (Immersed bodies) นั้น จะมีของไหลครอบคลุมอยู่โดยรอบผิวนอกของวัตถุ จึงเรียกการไหลแบบนี้ว่าการไหลภายนอก (External flow) การศึกษาเกี่ยวกับการไหลภายนอกมีความสำคัญมากต่อการเคลื่อนที่ของยานยนต์ต่าง ที่จะต้องอาศัยหลักการของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) มาพิจารณาถึงแรงที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของยานยนต์ คือ แรงยกและแรงต้าน (Lift and Drag) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ซึ่งผลการศึกษาส่วนใหญ่จะได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยการทดสอบหุ่นจำลอง เช่นการใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ในการทดสอบบางทีก็อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบต้นแบบของยานยนต์จริงแทนที่จะใช้หุ่นจำลอง เช่น การทดสอบรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลมในห้องปฏิบัติการด้านอากาศพลศาสตร์ของ NRC (National Research Council of Canada) ดังภาพที่ 2.1

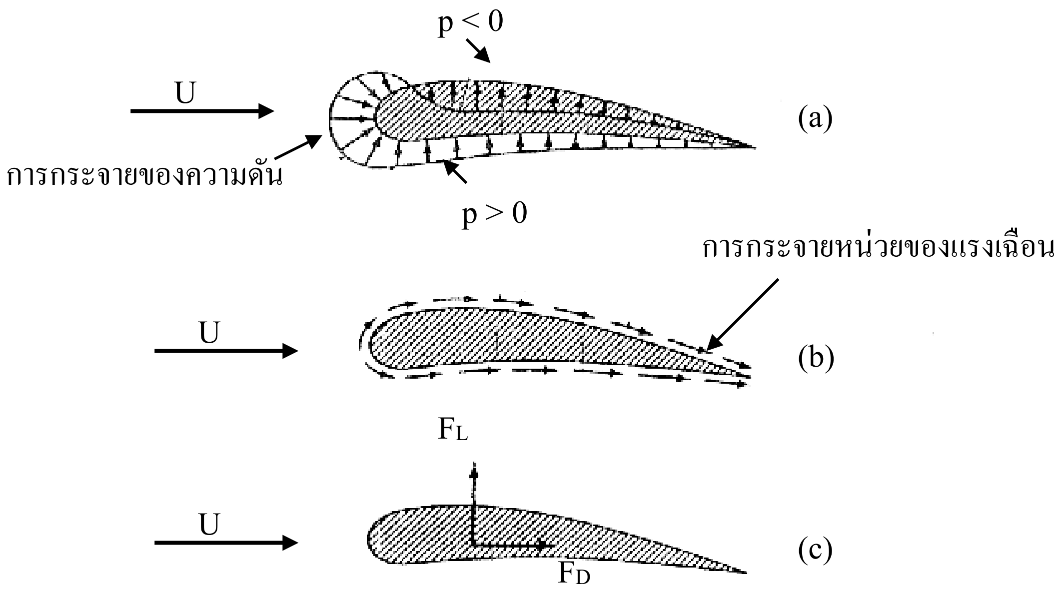
ภาพที่ 2.1 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC

2.1.1 แรงยกและแรงต้าน

เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลจะมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน เกิดจากการที่ผนังผิวหน้าสัมผัสกันระหว่างของไหลกับวัตถุ แรงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของวัตถุ (Wall shear stress, τ_w) ซึ่งเกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล และความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านหน้า

ของวัตถุเนื่องจากความดัน (p) ตัวอย่างการแพร่กระจายของความดันและหน่วยแรงเฉือนตลอดทั่วผิวของวัตถุ สามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งแสดงทั้งขนาดและทิศทางของความดันและหน่วยแรงเฉือน

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



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

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือนและความดันที่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของวัตถุสามารถหาได้จากการอินทิเกรตแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน x และ y ของแรงรวมที่กระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ (dA) ดังนี้

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \tag{2.1}$$

และ

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \tag{2.2}$$

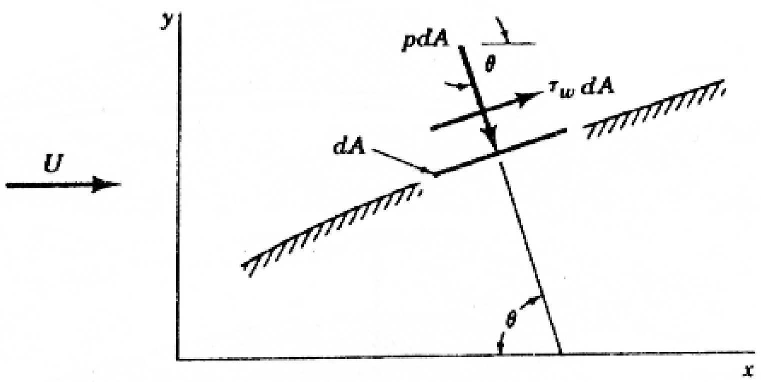
ดังนั้น จึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน x และ y ที่กระทำต่อวัตถุได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int p\cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \tag{2.3}$$

และ

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

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



ภาพที่ 2.3 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวของวัตถุ

2.1.2 แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

แรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ภายใต้ของไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 อย่าง คือ แรงต้านเนื่องจากจากความดัน (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

$$F_P = C_P \rho \frac{V^2}{2} A \tag{2.5}$$

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

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \tag{2.6}$$

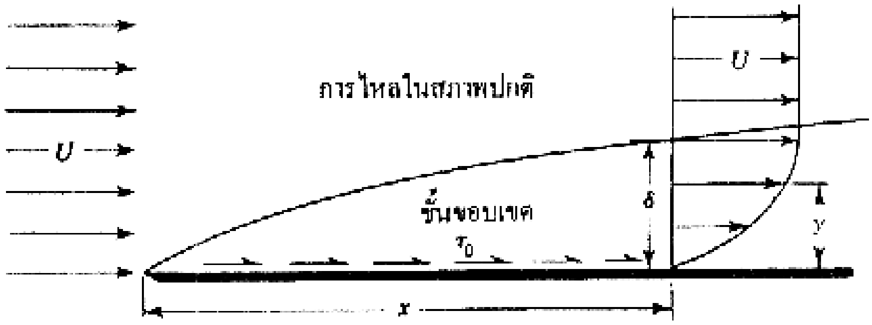
แรงต้านทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุใด ๆ คือผลรวมของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านเนื่องจากความดันคือ $F_D = F_f + F_P$ ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบิน และเรือดำน้ำ ค่าของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานจะเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นแรงต้านรวมจึงเท่ากับแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่สำหรับวัตถุรูปทรงอื่นที่มีคลื่นวนเกิดขึ้นทางด้านท้าย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

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A \tag{2.7}$$

2.1.3 แรงต้านจากความเสียดทานของขอบชั้น (Friction Drag of Boundary Layer)

ชั้นขอบเขตในการไหลคือชั้นบาง ๆของของไหลจริง (Real fluid) ที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุ วัตถุในบริเวณดังกล่าวนั้นจะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ทำให้เกิดการกระจายความเร็วในลักษณะที่ความเร็วที่ผิวคงรูป จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่หน่วยแรงเฉือนและความลาดของความเร็ว (Velocity gradient) มีค่าสูงมาก ในขณะที่ของไหลจริงนอกชั้นของขอบเขตนี้สามารถถือได้ว่าเป็นของไหลสมมุติ (Frictionless or ideal fluid)

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

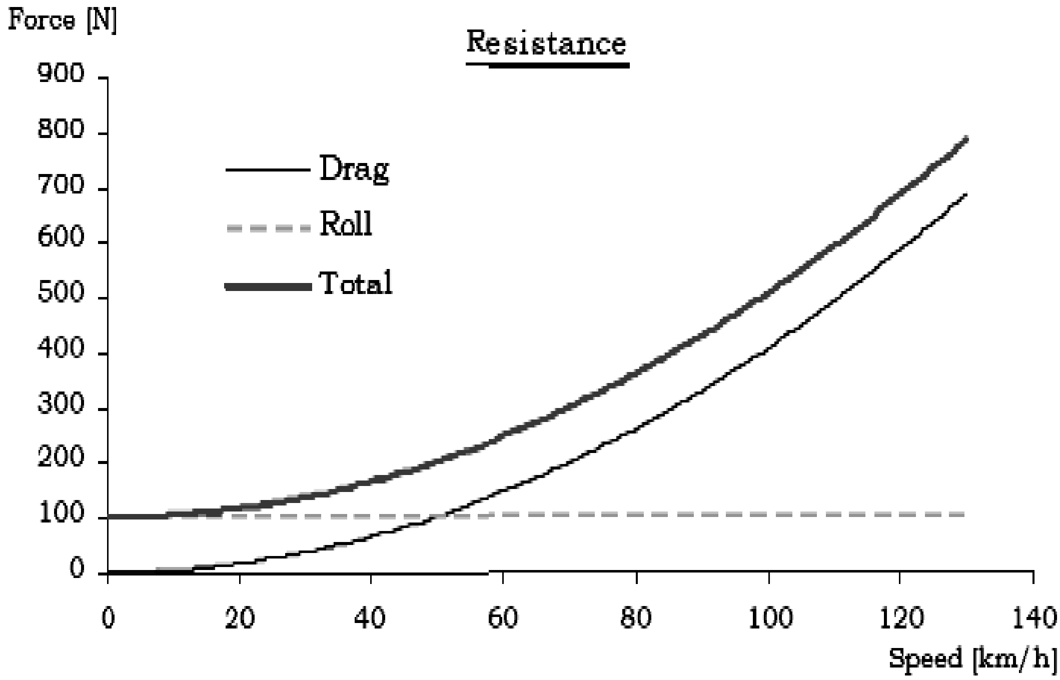


ภาพที่ 2.4 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ (Daugherty, 1989)

2.1.4 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์

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

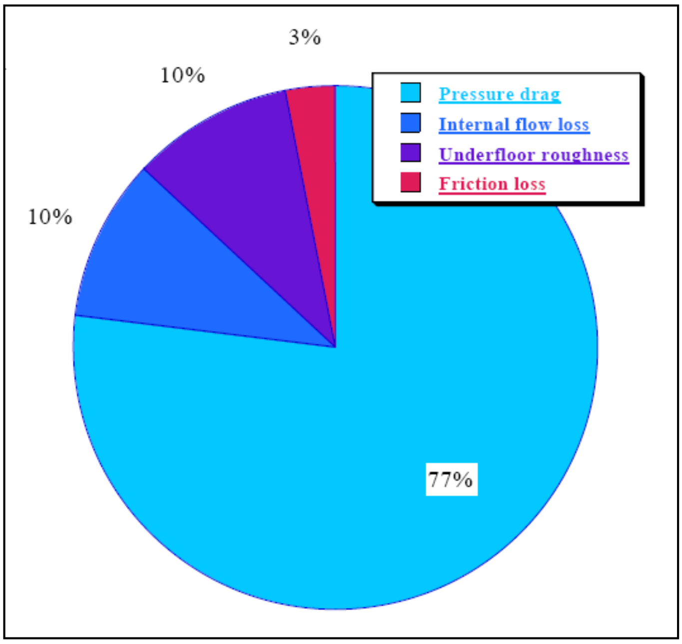
ซึ่งรถยนต์ที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน จากแรงที่กระทำทั้งแรงยกและแรงหน่วง หากจะพิจารณาโดยรวมกันคือแรงต้านอากาศ Alexander (2002) กล่าวว่า รถยนต์ทุกชนิดที่วิ่งบนถนนนั้นจะมีแรงต้านที่มีทิศทางสวนทางกับทิศทางการวิ่ง คือแรงเสียดทานที่เกิดจากยางสัมผัสกับถนนในขณะที่ล้อหมุนเพื่อวิ่งไปข้างหน้า และอีกอย่างหนึ่งคือแรงต้านอากาศ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



ภาพที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ (Alexander, 2002)

จากภาพที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อ จะคงที่ตลอดความเร็วที่รถยนต์วิ่ง และแรงต้านอากาศมีผลกระทบกับการเคลื่อนที่ มากกว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งแรงต้านอากาศจะมีค่ามากหรือน้อย ย่อมขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของรถยนต์

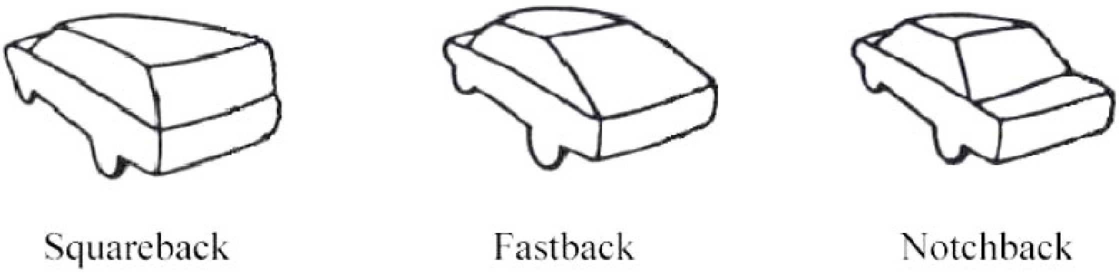
ดังนั้นในการศึกษา จึงมุ่นเน้นเฉพาะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์ ซึ่งลักษณะของแรงต้านที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่ง Hocho (2006) พบว่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นจะแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ คือแรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag), แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal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



ภาพที่ 2.6 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ (Hocho, 2006)

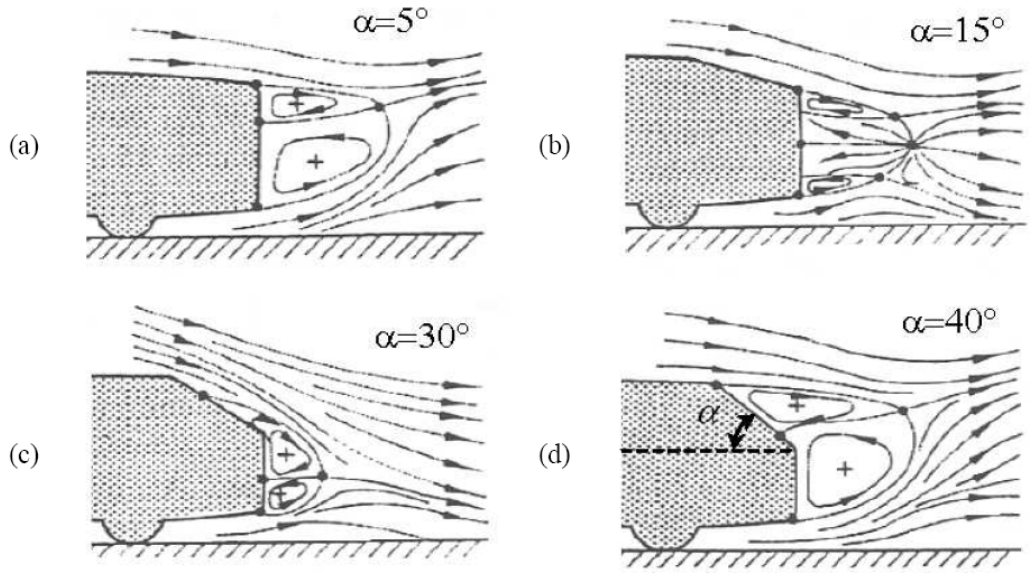
(1) แรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag)

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



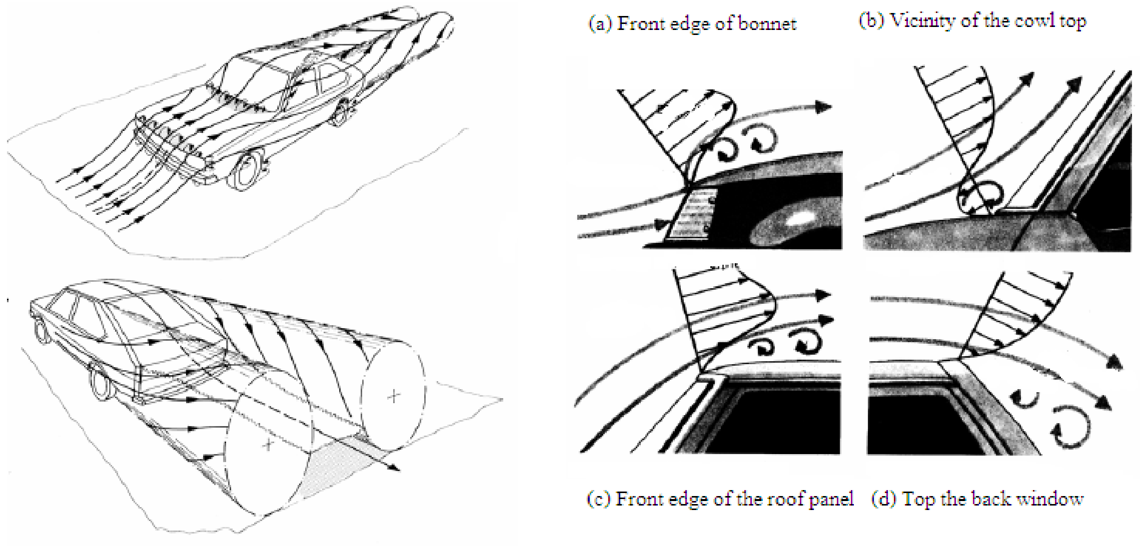
ภาพที่ 2.7 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆของรถยนต์นั่ง (Ahmed and Baumert, 1979)

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



ภาพที่ 2.8 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน (Ahmed, 1979)

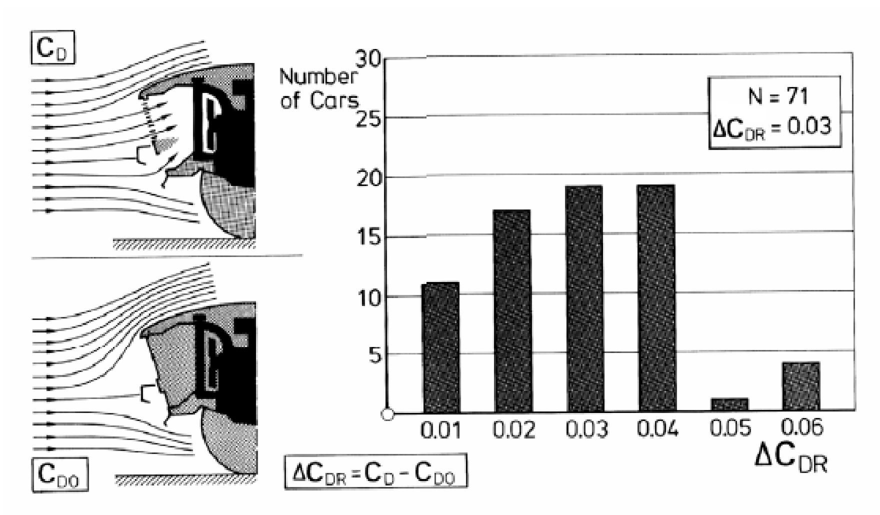
ไม่เฉพาะส่วนท้ายของรถเท่านั้นที่ทำให้เกิดเวค แต่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับมุมที่มาก ๆ ก็จะทำให้เกิดเวคเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศอย่างฉับพลัน ซึ่ง Scibor (1984) พบว่าการเกิดการหมุนวนของอากาศที่ทำให้เกิดเวค นอกจากส่วนท้ายรถแล้วยังมีส่วนหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดเวค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



ภาพที่ 2.9 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค (Scibor, 1984)

(2) แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss)

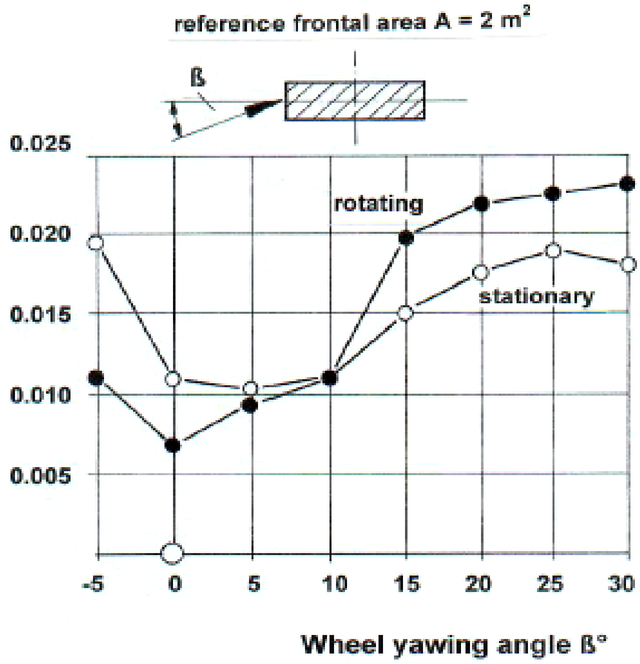
เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านเข้าภายในตัวรถเพื่อระบายความร้อนให้กับระบบทำความเย็นในระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ เช่นระบบหม้อน้ำ ระบบเบรก เทโบชาร์กเจอร์ ระบบไอดี เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนภายในทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่ง Hucho (2006) ได้พบว่ารถยนต์โดยส่วนใหญ่ที่มีระบบให้อากาศไหลเข้าไปภายในรถยนต์เพื่อระบายความร้อน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



ภาพที่ 2.10 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน (Hucho, 2006)

(3) แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นรถยนต์กับถนน (Underfloor roughness)

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



ภาพที่ 2.11 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Hucho, 2006)

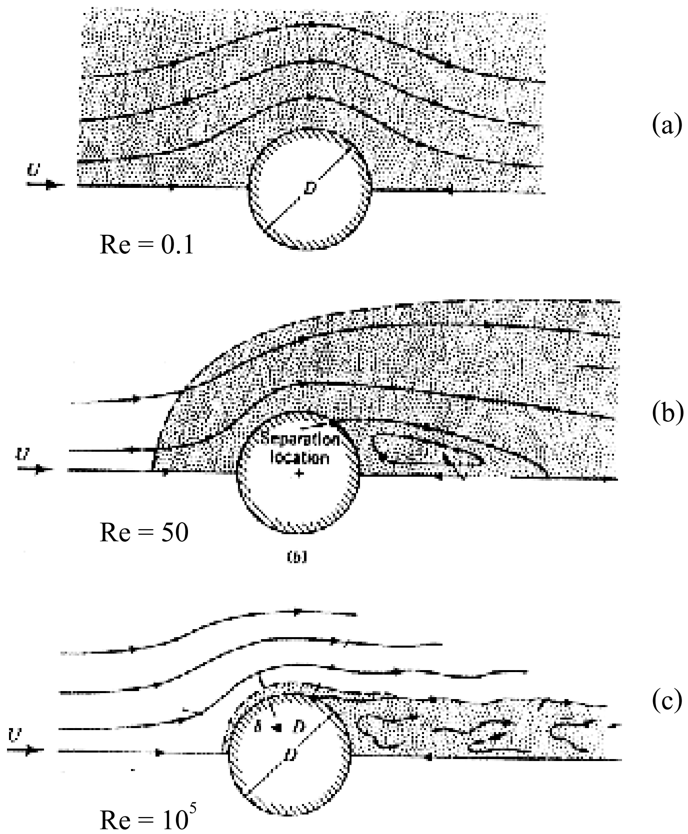
(4) แรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศ (Friction loss)

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

2.2 Reynolds number

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

กรณีที่การไหลผ่านวัตถุที่มีความหนา เช่นทรงกระบอกที่ขวางทิศทางการไหลที่มีค่า Reynolds number ต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.12

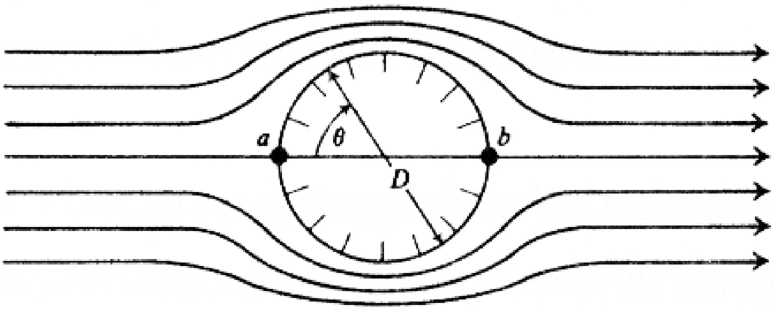


ภาพที่ 2.12 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหลโดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน (Munson, 2002)

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

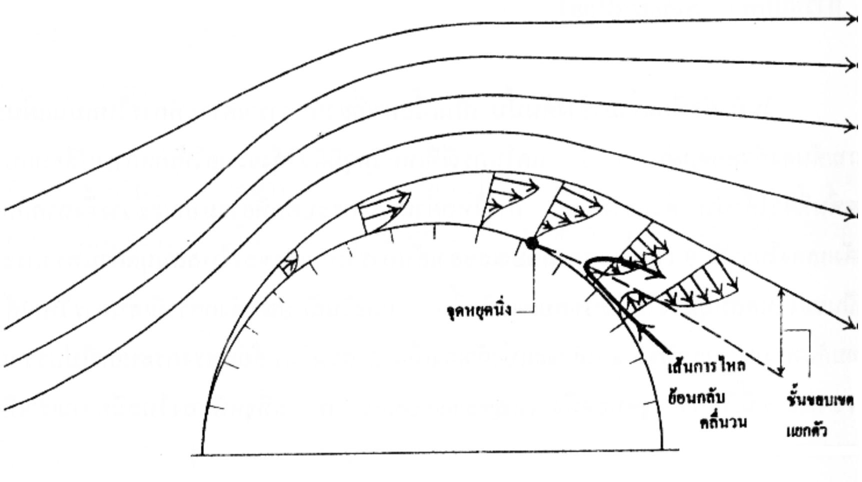
2.2.1 การแยกตัว (Separation)

ในกรณีที่วัตถุผิวโค้งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดผิวโค้งนั้น ดังการไหลผ่านทรงกระบอกที่ยาวมากและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลแสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งแสดงลักษณะของการไหลของของไหลสมมุติผ่านทรงกระบอก เนื่องจากเป็นของไหลสมมุติจึงไม่มีขอบเขตเกิดขึ้น และในลักษณะดังกล่าวมีเส้นการไหลเส้นหนึ่งที่เข้ากระทบทรงกระบอกที่จุด a แล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วนไหลอ้อมทรงกระบอกไปบรรจบกันที่จุด b ซึ่งเรียกจุด a และ b นี้เรียกว่า จุดหยุดนิ่ง (Stagnation points) เพราะที่จุดนี้ของไหลมีความเร็วเป็นศูนย์ พบว่าการกระจายความดันทางด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกัน โดยที่ความดันมีค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าแล้วค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมุม $\theta = 90^o$ หลังจากนั้นก็จะค่อย ๆเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหลังของทรงกระบอก



ภาพที่ 2.13 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน และสำหรับของไหลสมมุติ

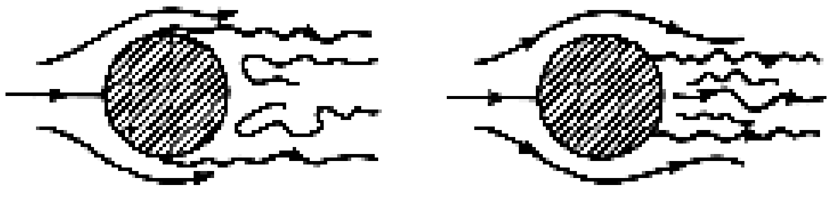
ภาพที่ 2.14 จะเกิดชั้นขอบเขต ซึ่งแสดงลักษณะของเส้นการไหลผ่านทรงกระบอกเฉพาะครึ่งบนเท่านั้น ส่วนครึ่งล่างก็มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อพิจารณาเส้นการไหลในส่วนด้านหน้าของทรงกระบอก จะพบว่าชั้นขอบเขตเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าและมีความหนามากขึ้นตามระยะทางของผิวทรงกระบอก เนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่งมีค่าสูงสุดจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงในทิศทางของการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดันเช่นนี้เมื่อนำสมการของเบอร์นูลลี่มาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าการไหลภายนอกชั้นขอบเขตมีความเร่งมากกว่าการไหลภายในชั้นขอบเขต ทั้งนี้เพราะของไหลที่อยู่ภายในชั้นขอบเขตได้รับอิทธิพลมาจากความหนืด เกิดแรงเฉือนต้านการไหลจึงไหลช้ากว่าเดิม ชั้นขอบเขตในช่วงครึ่งด้านหน้าของทรงกระบอกเป็นเพียงบาง ๆ และเส้นการไหลไม่แตกต่างจากในกรณีของไหลสมมุติมากนัก



ภาพที่ 2.14 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก

การแยกตัวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ประเภทของชั้นขอบเขตว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เนื่องจากชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนมีโมเมนตัมมากกว่าจึงสามารถต้าน

ความดันได้ดีกว่า ดังนั้นจึงทำให้จุดแยกตัวเกิดในตำแหน่งที่ค่อนไปทางด้านท้ายมากกว่ากรณีที่เกิดในชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 2.15



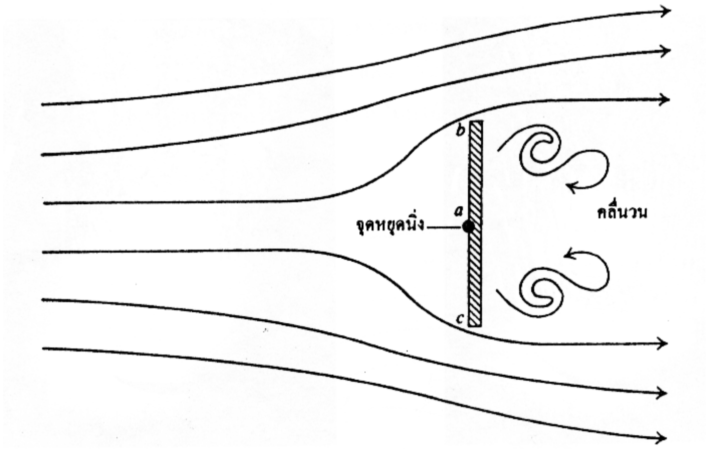
(a) (b)

ภาพที่ 2.15 จุดแยกตัวจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ (b) ทรงกลมผิวขรุขระ

องค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อการแยกตัวคือความขรุขระของผิววัตถุ เนื่องจากของไหลไหลผ่านวัตถุที่มีผิวขรุขระจะก่อให้เกิดชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนได้มากกว่าวัตถุผิวเรียบ

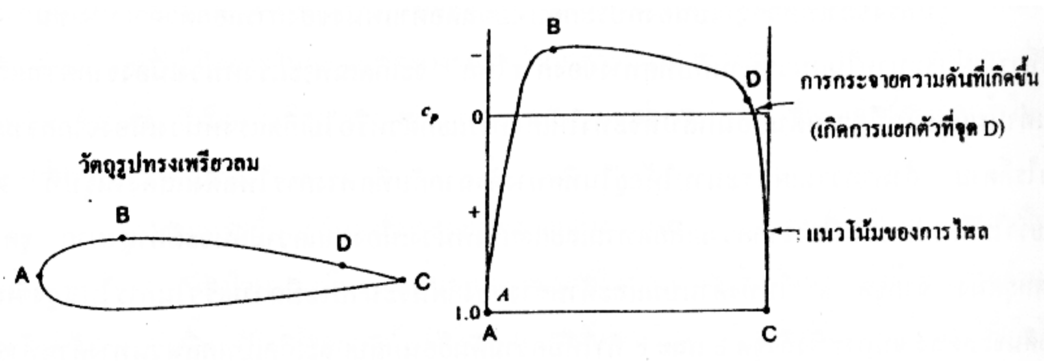
ดังนั้นวัตถุที่มีผิวที่ขรุขระกว่าจะทำให้ตำแหน่งของการแยกตัวอยู่ค่อนไปทางด้านท้ายมากกว่าวัตถุที่มีผิวเรียบ

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



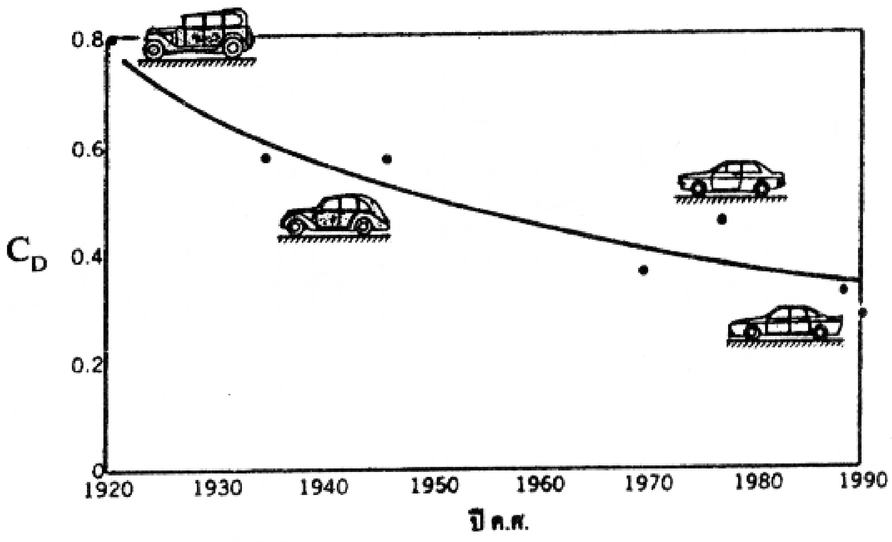
ภาพที่ 2.16 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล

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



ภาพที่ 2.17 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน

ดังนั้นการพยายามที่จะลดขนาดของแรงต้านที่กระทำต่อรถยนต์ได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องโดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงรูปทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม ดังตัวอย่างแสดงภาพที่ 2.18 ซึ่งจากรูปจะพบว่ารูปทรงของรถได้รับการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ ตลอดจนลักษณะของหน้าต่าง หรือแม้แต่กระจกมองด้านข้าง นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ในแนวทาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ผลจากการลดแรงหน่วงจะช่วยให้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง



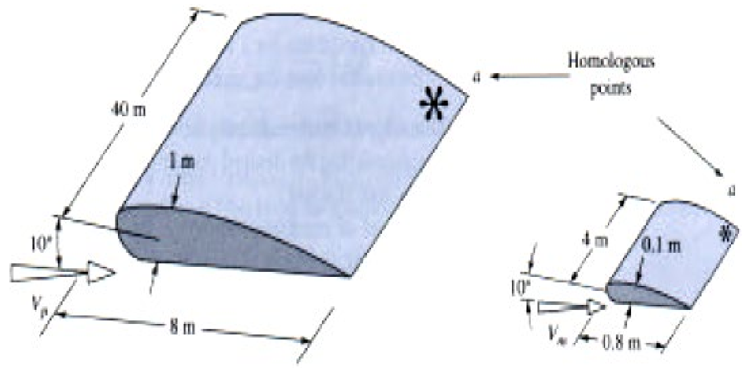
ภาพที่ 2.18 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อนได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง (Munson, 2002)

2.2.2 ความคล้ายคลึงกัน

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

(1) ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

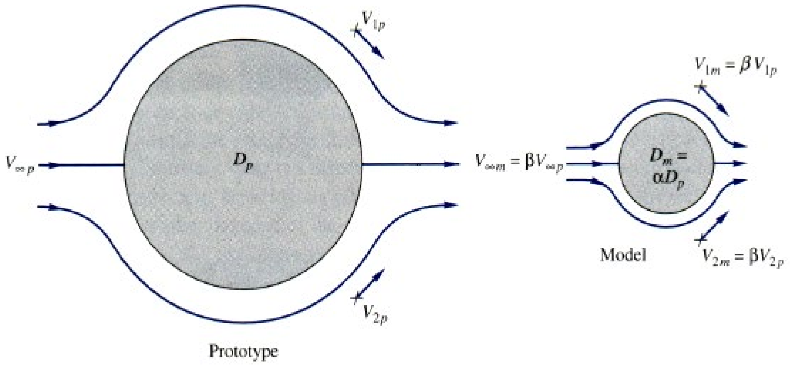
ในการศึกษาหุ่นจำลองสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ หุ่นจำลองจะต้องมีรูปร่างเหมือนกับต้นแบบ จะแตกต่างกันเฉพาะขนาดเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้รูปแบบของการไหล (Flow patterns) ในหุ่นจำลองและต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน ดังภาพที่ 2.19 ถ้าให้ L_p และ L_m เป็นความยาวของด้านใด ๆ ที่ต้องพิจารณาของต้นแบบและหุ่นจำลองตามลำดับ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



ภาพที่ 2.19 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต

(2) ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์ (Kinematic similarity)

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



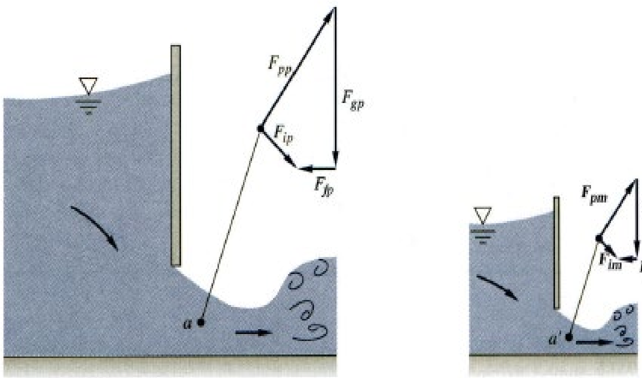
ภาพที่ 2.20 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์

(3) ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

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

วัตถุสมดุลได้ โดยเพิ่มแรงเฉื่อย (F_I) เข้าไปในระบบ โดยที่แรงเนื่องจากความเฉื่อยนี้มีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์แต่ทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ

$$F_G + F_p + F_v + F_T + F_I = 0 \tag{2.8}$$



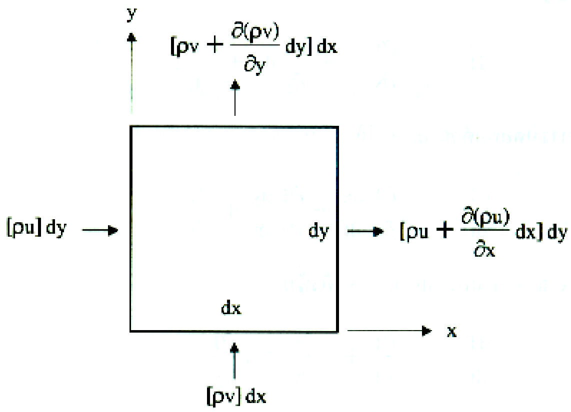
ภาพที่ 2.21 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต

2.3 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

2.3.1 สมการอนุรักษ์มวล

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



ภาพที่ 2.22 ฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุรักษ์มวล

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

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

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

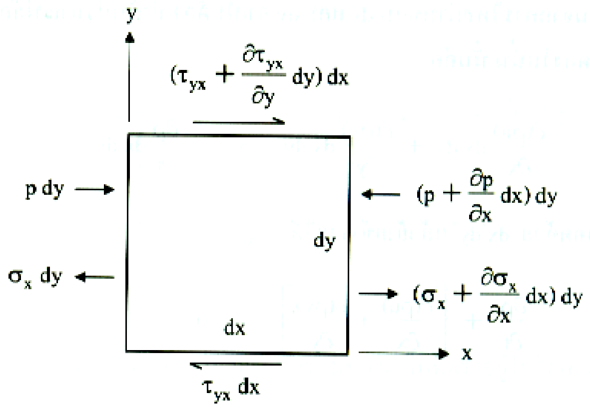
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y}\right] = 0 \tag{2.11}$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \overline{V}) = 0 \tag{2.12}$$

2.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็ก ๆ ขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 รูปแบบแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน F = ma เมื่อพิจารณาแรงร่วมในทิศแกน x จะได้

$$F_x = \left[\frac{-\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dxdy + \rho f_x dxdy \qquad (2.13)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ $m = \rho(dxdy)$ และความเร่งตามแนวแกน x คือ $a_x = \frac{Du}{Dt}$ แทนค่า m , a_x ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการ (2.13) จะได้

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

ในทำนองเดียวกันตามแนวแกน y จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \rho f_y \qquad (2.14b)$$

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

ในทิศแกน x

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

(2.15a)

ในทิศแกน y

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

(2.15b)

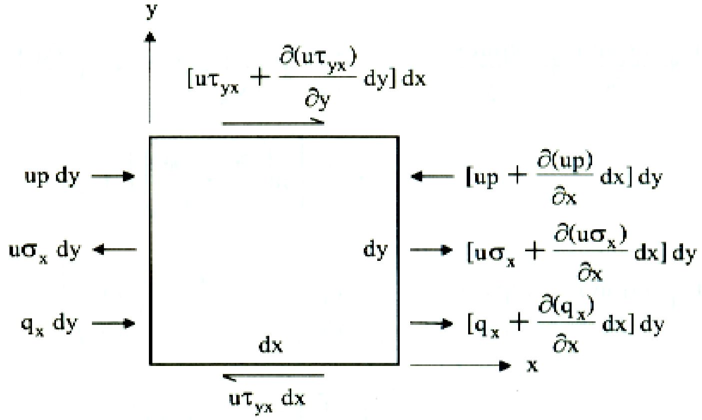
สมการ (2.15a – 2.15b) นี้แสดงถึงสมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัมของมวลของไหล

2.3.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy ดังภาพที่ 2.24 จากหลักการการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิก จะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่ก้อนมวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ได้เป็น

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

(2.16)



ภาพที่ 2.24 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด dx และ dy

จากสมการ (2.16) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาเป็น

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\vec{V}\right]+div\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\vec{V}\right]=\rho\overline{Q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}$$
$$+\frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial_y}+\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial_x}+\rho\vec{f}.\vec{V}$$

(2.17)

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

2.3.4 สมการเบอร์นูลลี่ (Bernoulli’s Equation)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานในการไหลแบบคงตัวของของไหลที่กดอัดไม่ได้ สมการพลังงานมีพื้นฐานมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า สำหรับการไหลแบบคงตัว งานที่ได้รับจากระบบรวมกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือออกจากระบบ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบนั้น นั่นคือ

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

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

สมการพลังงานและสมการสภาพต่อเนื่องเป็นสมการที่มีความสำคัญมากในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหลที่กดอัดไม่ได้ โดยเฉพาะด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งสมการเบอร์นูลลี่ ที่สร้างขึ้นโดย Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1738 ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับของไหลที่กดอัดได้ ดังสมการ (2.19)

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

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

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

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

โดยได้นำหลักการของสมการเบอร์นูลลี่ มาใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือเพื่อใช้ในการวัดความดัน และความเร็วของอากาศ โดยเฉพาะในการวัดค่าความดัน และความเร็วที่จะทำการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ เช่น บารอมิเตอร์ (Barometers) หลอดปิโตท (Pitot tube) เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดกับเครื่องมือนี้ในบทต่อไป

2.4 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ ด้วยอุโมงค์ลม โดยการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์

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

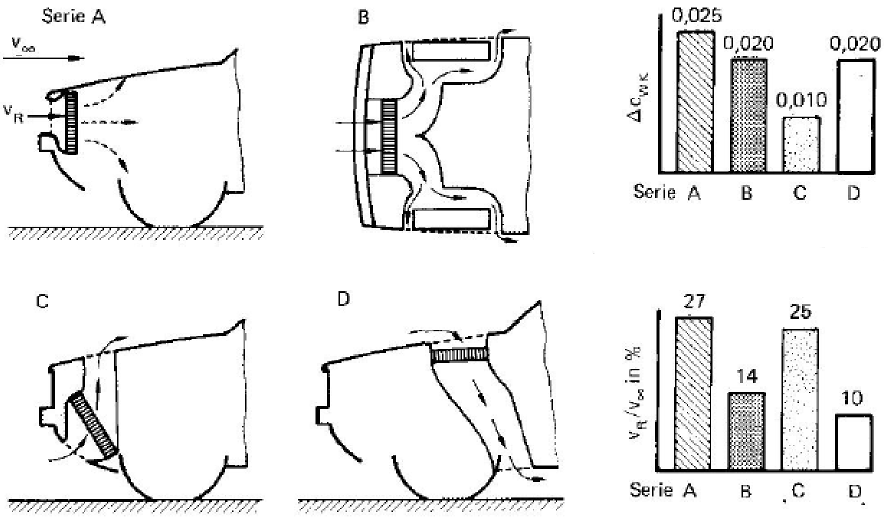
ภาพที่ 2.25 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ (Leuschen and Cooper, 2006)

พบว่า ไม่ใช่แต่รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่อุปกรณ์ตกแต่ง หรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศและยื่นออกจากตัวรถ 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 เป็นอุปกรณ์เสริมที่มีส่วนทำให้แรงต้านสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็มียังมีข้อดีสำหรับเพิ่มแรงกดเพื่อยึดติดถนนสำหรับรถยนต์นั่ง แต่ก็ควรไม่ให้มีค่าสูงมากจนเกินไป โดย Tomiyama et al. (2002) ได้ศึกษาแรงยกเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของแรงยกกับรูปร่างรถ ใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีของแรงยก ซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ แรงยกด้านหน้า และแรงยกด้านหลัง Nouzawa (2008) และได้ศึกษาพฤติกรรมของเวคซึ่งมีลักษณะไม่คงตัว (Unsteady) โดยในการศึกษาได้ใช้รถยนต์นั่งติดสปอร์ยเลอร์ พบว่ารูปร่างด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด เรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical afterbody geometry) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว (2546) และ

Fukuda, et al. (1995) ได้ปรับปรุงอากาศพลศาสตร์โดยการควบคุมอากาศที่กระทบกับรถยนต์แบบนั่ง ซึ่งจะเน้น

อุปกรณ์การควบคุมการไหลผ่านด้านหลังรถซึ่งเป็นที่รู้จักกันคือ สปอยเลอร์ ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของ สปอยเลอร์ ปรับเปลี่ยนมุมองศา ขนาด และตำแหน่งของการติดตั้ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะเพิ่มแรงกด และลดแรงต้าน ในการวิเคราะห์พบว่า เมื่อรูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดรูปแบบการไหลในเวคอย่างฉับพลัน และมีเวคขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงต้านสูง และระยะระหว่างพื้นรถและพื้นถนนก็ยังมีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยเช่นกัน

แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (Internal flow loss) โดยอากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (Gab) ทำให้เกิดการหมุนวนภายในโดยเฉพาะอากาศที่ไหลเข้าภายในเพื่อระบายความร้อน โดย Hucho (2006) ได้เปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างการออกแบบช่องระบายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ใช้รถยนต์แบบนั่งทดสอบ ผลปรากฏว่า การออกแบบที่ให้อากาศไหลเข้าด้านล่างเพื่อระบายความร้อนของเครื่องยนต์จะเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน (Hucho, 2006)

เช่นเดียวกันกับ ช่วงห่างระหว่างห้องผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระบะของรถบรรทุกซึ่งจะเกิดเวคขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดช่องว่าง หรืออุปกรณ์เพื่อช่วยลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมีข้อจำกัดของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความ

ละเอียด เช่นการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการการปรับมุมของสปอยเลอร์ของรถยนต์แบบนั่ง ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากค่าไม่มีความละเอียดพอ และยังมีข้อจำกัดของสภาวะของการทดสอบ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สามารถกำหนดสภาวะ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ

2.5 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ คือการวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณหาผลเฉลยเชิงตัวเลขและจำลองลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในปัญหาที่สนใจ ซึ่ง Computational Fluid Dynamics มีระเบียบขั้นตอนการทำงานอยู่ 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ

1) ขั้นตอนการประมวนผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างลักษณะและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา รวมทั้งการแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ

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

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

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

2.5.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite volume method)

เทคนิคการคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่แล้วมักใช้ระเบียบวิธีสืบเนื่อง สร้างโปรแกรมคำนวณแก้ปัญหา เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมการไหลในของไหลโดยเฉพาะ ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะทำอินติเกตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่กำหนด

2.5.2 ระเบียบขั้นการแก้ปัญหา

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ประกอบด้วยการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุรักษ์ทั้งสามสมการและสมการอื่น เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) และสมการสเกลาร์อื่น ๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่างมีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบและค่าผลเฉลย โดยทั่วไปประเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้นการแก้ปัญหาอยู่ 2 อย่างตามแต่ลักษณะของปัญหา ดังนี้

(1) ระเบียบขั้น Segregated solver เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุรักษ์โมเมนตัมก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาชุดสมการจะกระทำเป็นรอบและแก้ซ้ำ เนื่องจากสมการอนุรักษ์จะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหาตามระเบียบขั้น Segregated solver แสดงดังภาพ 2.27 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

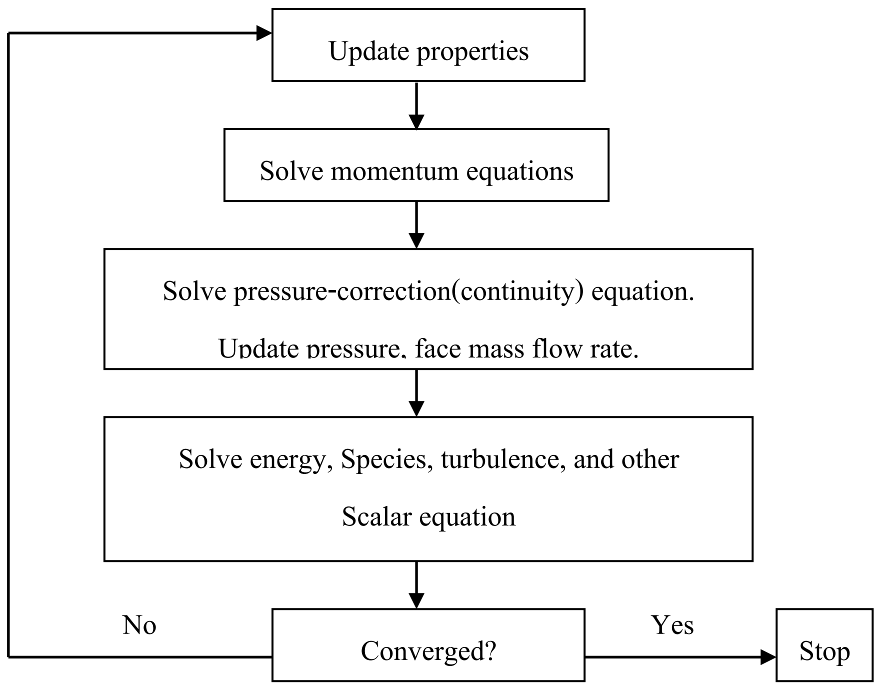
(1.1) สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

(1.2) คำนวณสมการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้งสามสมการ เพื่อคำนวณค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล

(1.3) เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุรักษ์มวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure-correction equation) ประดิษฐ์จากสมการอนุรักษ์มวลกับโมเมนตัม โดยค่าความดัน อัตราการไหลและความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น

(1.4) ขั้นตอนนี้เป็นการแก้สมการอื่นที่เพิ่มเติมเข้ามา สำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่น โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 3

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



ภาพที่ 2.27 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Segregated solver

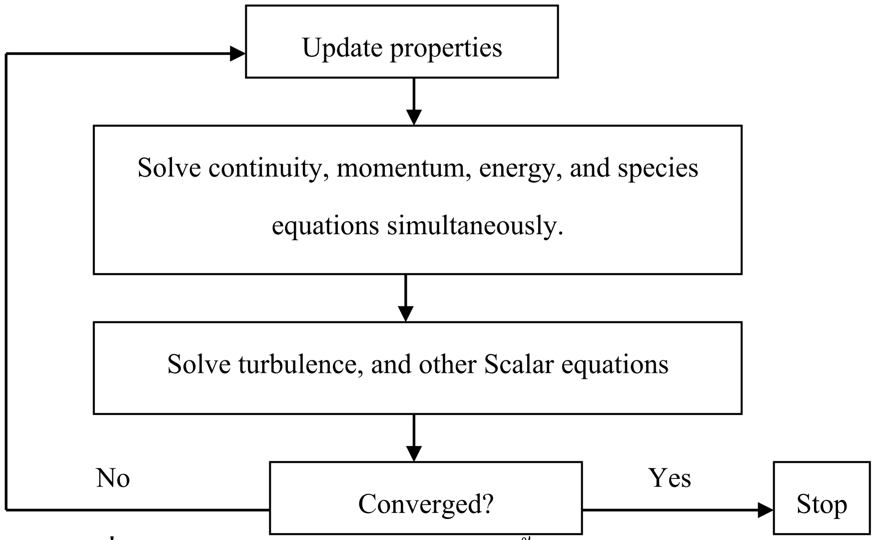
(2) ระเบียบขั้น Coupled solver เป็นระเบียบขั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่เอาสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (เมื่อกรณีของไหลมีหลายชนิด) แก้สมการพร้อมกันก่อนจะแก้สมการสเกลาร์อื่น ๆ การคำนวณสมการเหล่านี้ยังต้องทำเป็นรอบ เช่นเดียวกับระเบียบขั้นตอนแรก ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่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

(2.1) ระเบียบขั้นตอนแรก สมบัติของสารถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

(2.2) ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด)

(2.3) คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วน และ สมการสเกลาร์อื่น ๆ โดยค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

(2.4) ประเมินผลต่างเศษเหลือของรอบว่ายอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้จะต้องทำการคำนวณกลับไปที่ขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2.28 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นแบบ Coupled solver

2.5.3 ระเบียบวิธีคำนวณ

การคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นมี 2 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method) และระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ความแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองคือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างโนดหรืออิลิเมนต์ เพื่อทดแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ กล่าวคือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง ตัวรู้ค่าถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณแบบ Segregated solver เพราะการคำนวณแบบ Segregated solver จะคำนวณหาค่าตัวแปรเดียวของทุกอิลิเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณตัวแปรอื่น ๆ ทีละตัวแปร ทั้งนี้ระเบียบขั้น Coupled solver สามารถเลือกใช้ทั้งสองระเบียบวิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

2.5.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหาการไหลของบริเวณใกล้ผนัง

พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับผนังเป็นปัญหาและอุปสรรคสำคัญกับการจำลองการไหลเชิงตัวเลข เนื่องจาก ที่ผนังความเร็วของของไหลจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์เนื่องจากการหน่วงของความหนืดบริเวณนี้ มีผลกับการไหลมาก นอกจากนี้แล้วความเสียดทานที่ผนังยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนของของไหล ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำเป็นต้องมีวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหานี้

ในโปรแกรม FLUENT มีระเบียบวิธี 2 อย่างที่ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นของการไหลบริเวณผนัง อันได้แก่ Near wall function และ Near-wall model ทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่วิธีการคำนวณปัญหา โดย Near-wall model เป็นเทอมของฟังชันในแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อการแก้ปัญหาบริเวณผนัง โดยทำอิลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เล็กและคำนวณแต่ละอิลิเมนต์ไปเรื่อย ๆ

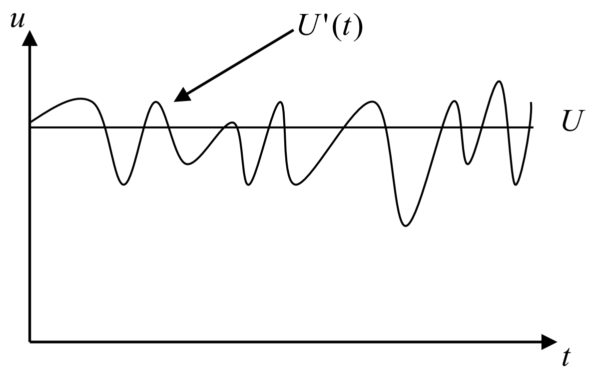
จนติดผนัง ขณะที่ Near wall function ทำการสร้างฟังก์ชันแยกจากแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติการไหลต่าง ๆ ที่อิลิเมนต์ติดกับผนัง ฟังก์ชันที่ว่านี้ในโปรแกรม FLUENT มี 2 อย่าง ได้แก่ Standard near wall function และ Non-equilibrium near wall function ซึ่งข้อจำกัดของฟังก์ชั่นทั้งสอง คือ คำนวณการไหลที่ค่า Re ต่ำได้ไม่ดีนัก และมีข้อสมมุติฐานที่ไม่ครอบคลุมทุกปัญหา ด้วยเหตุนี้ จึงมีการประดิษฐ์แบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับปัญหาความปั่นป่วนในบริเวณค่า Re ต่ำ ซึ่งแบบจำลองที่ว่านี้คือ Enhanced near-wall model โดยใช้หลักการของการสร้างฟังก์ชั่นนำไปปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งทำให้การแก้ปัญหาการไหลที่เกิดใกล้ผนังมีประสิทธิภาพ และยังสามารถใช้งานได้ครอบคลุมปัญหามากขึ้น

2.5.5 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

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

(1) สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

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



ภาพที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

เพื่อให้ง่ายขึ้นในการแก้ปัญหาของระบบสมการนาเวียร์สโตกส์ Osborne Reynolds กำหนดค่าเฉลี่ย $\bar{u}$ จาก

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} = \int_0^{\Delta t} u dt \tag{2.20}$$

ทั้งนี้ Δt เป็นช่วงเวลาเฉลี่ย ยิ่งมีช่วงกว้างยิ่งได้ค่าที่ถูกต้อง โดยมากจะกำหนดให้ $\Delta t \rightarrow \propto$ โดยกำหนดคุณสมบัติของการไหลเป็น $u_i = \overline{u_i} = u_i$ ในรูปของเวกเตอร์เป็น $U = \overline{U} + U'$ และเมื่อนำสมการนี้ไปแทนในระบบสมการเวียร์สโตกส์จะได้

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \overline{U}) = 0 \tag{2.21}$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

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

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

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

จากการทดลองและศึกษาของ Boussineq ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของเทอมความเค้นนี้ ที่มีกับความเร็วเฉลี่ยของการไหลกับอัตราการเปลี่ยนรูปอิลิเมนต์ของไหล ไว้ดังนี้

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

โดย μ_t คือ Turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้ คือ แบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

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

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

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

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

โดยที่ G_k คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย, G_b คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว (buoyancy), Y_M คือค่าการกดอัดได้ 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

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

ซึ่ง C_μ เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปค่าคงที่ในสมการถ่ายเทข้างต้นจะมีค่าเป็น $C_{1\varepsilon}$ = 1.44, $C_{2\varepsilon}$ = 1.92, C_μ = 0.09, σ_k = 1.0, σ_ε = 1.3

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

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+div(\rho k\overline{U})=div\left[\alpha_k\mu_{eff}\,grad.k\right]+G_k+G_b+\rho_\varepsilon-Y_M+S_k \qquad (2.27)$$

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

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

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

โดย

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

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

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

ถ้าหากเป็นกรณีค่า Reynolds number สูง α_k และ α_ε ≈ 1.393 ค่า R_ε ในสมการ (2.18) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

ค่าคงที่สำหรับสมการ (2.27) และ(2.28) เป็น $C_{1\varepsilon}$ = 1.42, $C_{2\varepsilon}$ = 1.68 และจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำหรือแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) หรือสมการการอนุรักษ์การไหลของของไหล 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

2.6 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

อัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันของรถยนต์ เป็นสิ่งที่ทุกคนสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากราคาที่สูงขึ้น และสภาวะที่ไม่แน่นอนของน้ำมันเชื้อเพลิง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองให้แม่นยำ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ดังนั้น จึงมีนักวิจัยที่พยายามหาวิธีที่วัดเพื่อที่จะได้ทราบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน และสามารถตัดสินใจในการปรับปรุงรูปทรงหรือตัดสินใจขับขี่รถเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง

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

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

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

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

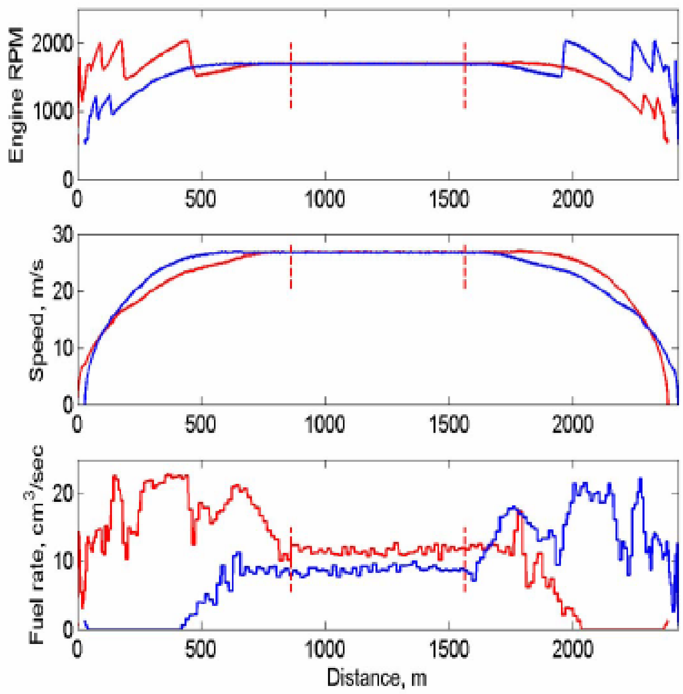
UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

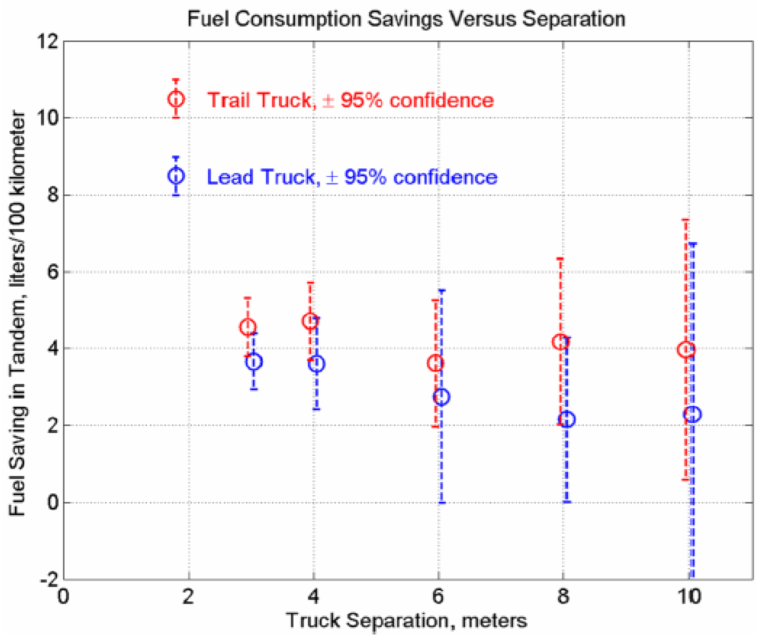
A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.68576 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h)

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





ภาพที่ 2.30 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH (Browand, 2005)

บทที่ 3
วิธีการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD

ในบทนี้ จะอธิบายขั้นตอนในการทดสอบแรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุก ในกรณีต่างๆ ซึ่งการทดสอบ จะแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 การทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) เริ่มต้นจากการทดสอบแบบจำลองที่ความเร็ว 10 m/s ถึง 25 m/s (36 km/hr – 90 km/hr) วิธีที่ 2 การทดลองแบบจำลองโดยใช้วิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) หรือวิธีจำลองเชิงตัวเลข เพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลองทั้ง 2 วิธี ของแบบจำลองรถบรรทุก

3.1 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

ภาพที่ 3.1 ชุดอุโมงค์ลมเพื่อทดสอบแรงต้าน

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบเป็นอุโมงค์ลมแบบเปิดที่มีพัดลมอยู่ทางด้านใต้ลม ใช้สำหรับศึกษาทางด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic) ของวัตถุที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง

อากาศไหลเข้าอุโมงค์ลมโดยไหลผ่านทางเข้าปากแตรที่มีชุดบังคับทิศทางของลมให้ไหลเป็นเส้นตรงผ่านตะแกรงลวดผ่านพื้นที่ช่วงตีบเล็กลง สำหรับตัวอุโมงค์ลมช่วงที่ใช้สำหรับทดสอบนั้นทำด้วยวัตถุโปร่งแสงถัดจากช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบนั้น ก็เป็นตัวลดความเร็ว

(Low angle diffuser) ซึ่งจะสิ้นสุดลงที่พัดลมของตัวอุโมงค์ ผิวด้านในของตัวอุโมงค์ลมช่วงที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้จะเรียบมาก ใบของพัดลมที่มีจำนวนใบถึง 7 ใบนี้จะทำด้วยอะลูมิเนียมหล่อที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ได้รับการออกแบบตามหลักการของ Aerofoil เพื่อให้พัดลมมีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์สูงสุดและมีการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์ต่ำสุด ความเร็วของพัดลมนี้สามารถปรับได้จากอินเวอร์เตอร์

รูวัดความดันสถิตจำนวนสี่รูถูกจัดให้มีระยะห่างเท่าๆกันจะต่อรวมเข้ากันด้วยท่อร่วมเพื่อให้มีผลกระทบต่อหุ่นจำลองที่นำมาทดสอบน้อยที่สุด ความเร็วลมจะอ่านค่าออกมาเป็นเฮดของความเร็วจาดมาโนมิเตอร์หลอดแก้วเอียงที่เรียกว่า Inclined manometer หุ่นจำลองจะถูกนำมาติดตั้งไว้บนขารองรับของโหลดเซลล์ที่วัดได้ 2 ทิศทาง พร้อมตัวแสดงผลเพื่อวัดแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงยกของหุ่นจำลอง ขาที่ใช้สำหรับการติดตั้งหรือจับยึดหุ่นจำลองนี้สามารถหมุนได้โดยรอบเพื่อให้สามารถเปลี่ยนมุมปะทะ (Angle of incidence) ของหุ่นจำลองได้อย่างรวดเร็ว มุมดังกล่าวนี้อ่านได้จากสเกลที่ฐานของขาที่ใช้สำหรับติดตั้งหุ่นจำลองนั้น อุโมงค์ลมนี้จะยึดติดอยู่บนโต๊ะที่มีล้อสำหรับการเคลื่อนย้าย

ข้อมูลทางเทคนิค

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

3.2 การยืนยันผลของ CFD

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งในด้านอากาศพลศาสตร์ ประการที่ต้องการวิเคราะห์เป็นลำดับแรกก็คือ แรงต้าน ซึ่งในการทดลองในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดด้านขนาดของแบบจำลอง ความเร็วของอากาศที่ผ่านแบบจำลองซึ่งมีค่าที่ต่ำ ความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด สิ้นเปลืองทุนและเวลาในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ ดังนั้น CFD จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการลดปัญหาดังที่กล่าวมา แต่ก่อนที่จะทำการทดลองโดย CFD ของแบบจำลองขนาดเท่ากับต้นแบบจำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กันกับการทดลองกับอุโมงค์ลมเพื่อให้แน่ใจว่าเงื่อนไขในคำนวณ มีความถูกต้อง แม่นยำ และยอมรับได้ โดยการยืนยันผลได้มีการทำหลายส่วน เช่นการยืนยันผลของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) จำนวนกริด (Grid) โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD รวมทั้งผลการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น ดังนั้นการยืนยันผลก่อนการจำลองเพื่อหาค่าแรงต้านของรถบรรทุกเล็กในกรณีศึกษาต่างๆ จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญของงานวิจัยนี้ เพื่อให้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด

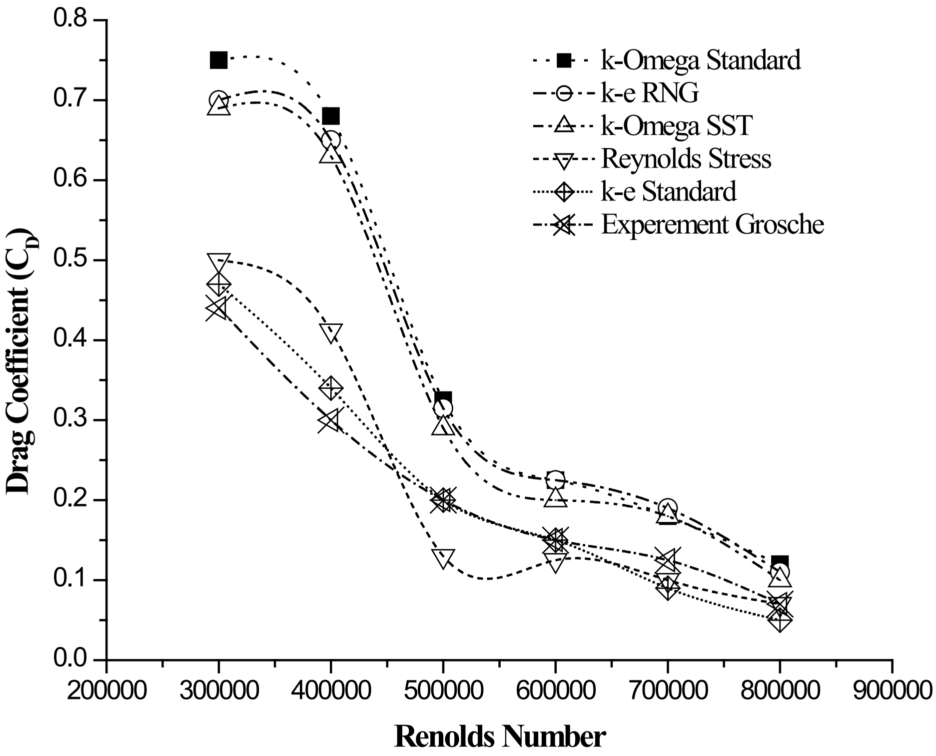
3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

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

3.2.2 การยืนยันผลการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา แต่การจำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์ เป็นการไหลที่มีค่า Reynolds number สูง ซึ่งสภาวะในการในจะเป็นแบบปั่นป่วน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ แบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อมาช่วยในการแก้ปัญหาการคำนวณ ซึ่งในโปรแกรม FLUENT 6.3 มีให้เลือกหลายแบบจำลอง เพราะฉะนั้น จึงได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ โดยการทดสอบแบบจำลองความแบบปั่นป่วน (Turbulent model) แบบต่าง ๆ ซึ่งจากภาพที่ 3.2 เป็นการเปรียบเทียบและเพื่อยืนยันผลของสมการการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model) ให้มีความถูกต้องกับลักษณะการคำนวณ โดยกำหนดจำนวนกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนท์ กริดที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับการศึกษาของ Groshe and meier (2001: 1201-1218) ซึ่งเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับวัตถุทรงกลม เจาะรูตรงกลาง โดยใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือในการทดสอบ

จากภาพที่ 3.2 จะเห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Groshe มากที่สุด ซึ่งจากข้อมูล และทฤษฎีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ แบบจำลองนี้เหมาะสมกับการ จำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการคำนวณ CFD ของรถบรรทุกเล็กต่อไป

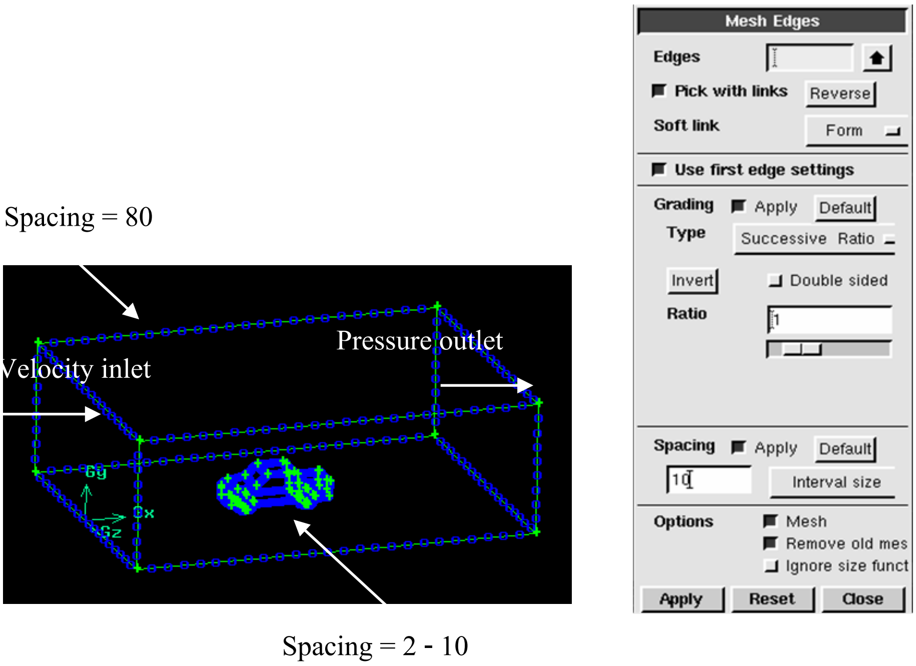


ภาพที่ 3.2 สัมประสิทธิ์แรงต้าน จากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ

3.2.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของการเพิ่มจำนวนกริด

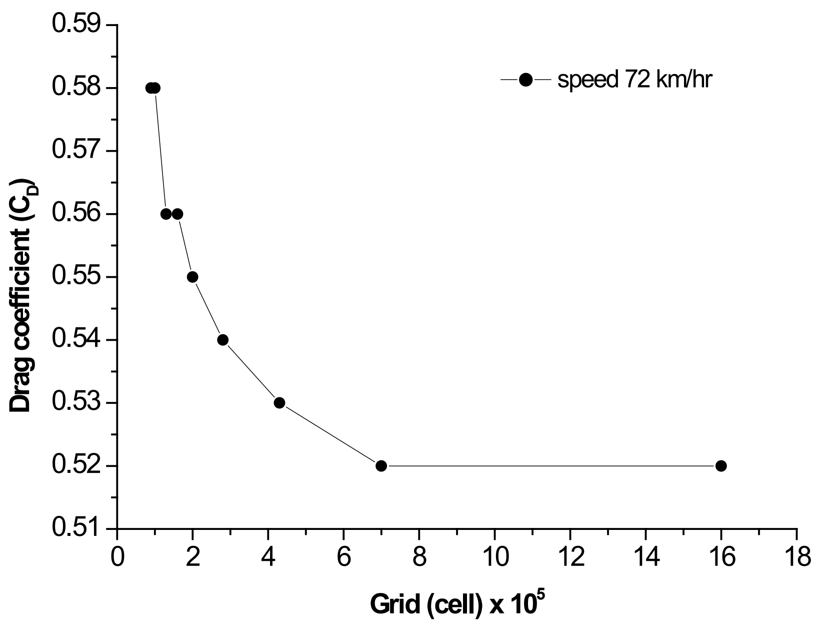
จากระเบียบขั้นตอนการทำงานของ CFD มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนที่เราต้องแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็กๆ ซึ่งเราใช้ระเบียบวิธีแก้ปัญหาการไหลบริเวณใกล้ผนัง เป็นแบบ Near-wall model โดยเป็นเทอมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon standard ดังนั้นต้องกำหนดจำนวนความละเอียดของกริด และกำหนดอิลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการเพิ่มจำนวน และความละเอียดของกริด ของผิวรถบรรทุกเล็ก และผนัง เพื่อหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เพราะถ้าหากเรากำหนดให้มีความละเอียดมากเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณ

จากขั้นตอนการประมวลผล ได้กำหนดระยะห่างของจุดเพื่อที่จะเป็นจุดเชื่อมกันของกริด โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งระยะห่างของผิวรถบรรทุกเล็กต้องมีความระเอียดกว่าผิวของผนังล้อมรอบรถ จากภาพที่ 3.3 เป็นการแสดงการกำหนดความละเอียดของกริด โดยการเพิ่มระยะห่างของจุด บนผิวรถบรรทุกเล็ก



ภาพที่ 3.3 ลักษณะการกำหนดกริด

จากภาพนั้นเป็นการกำหนดระยะระหว่างจุด (Spacing) ของรถบรรทุกเล็กที่ 2-10 หน่วย และบริเวณผนังที่ระยะ 80 หน่วย กับรถบรรทุกเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ 2.68576 m^2 ทดสอบที่ความเร็ว 72 km/hr และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากที่กล่าวมาข้างต้นใช้ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงต้าน (Drag force) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ดังภาพที่ 3.4 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/hr



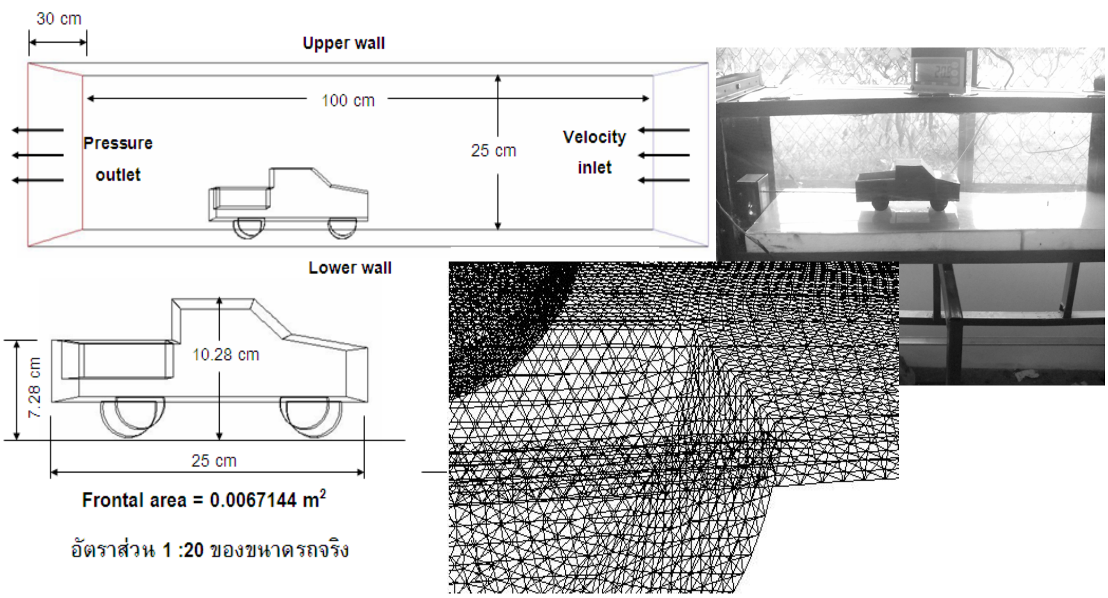
ภาพที่ 3.4 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริด

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

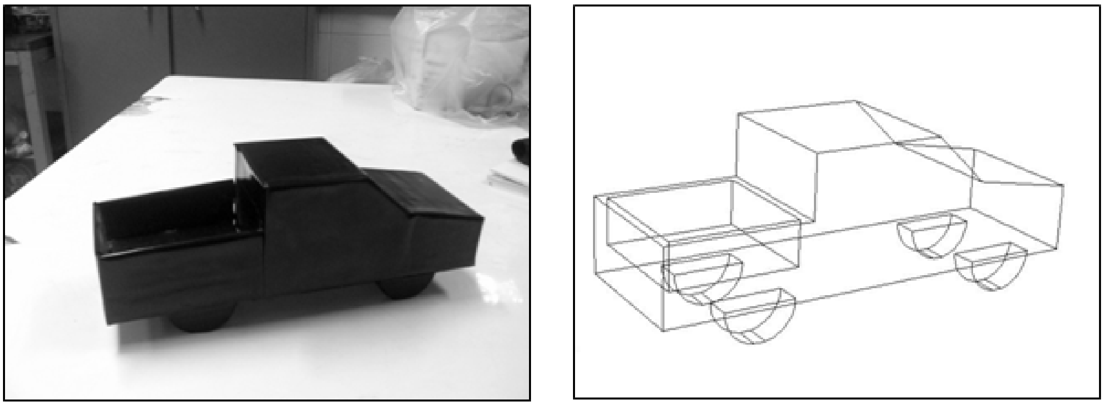
3.2.4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม และ CFD ของแบบจำลองรถบรรทุกเล็กแบบง่าย

การเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผล (Validation) มีความจำเป็นอย่างมาก ก่อนที่จะมีการใช้เงื่อนไขการจำลอง CFD ในการหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุก ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบง่ายใช้ในการทดสอบในอุโมงค์ลม

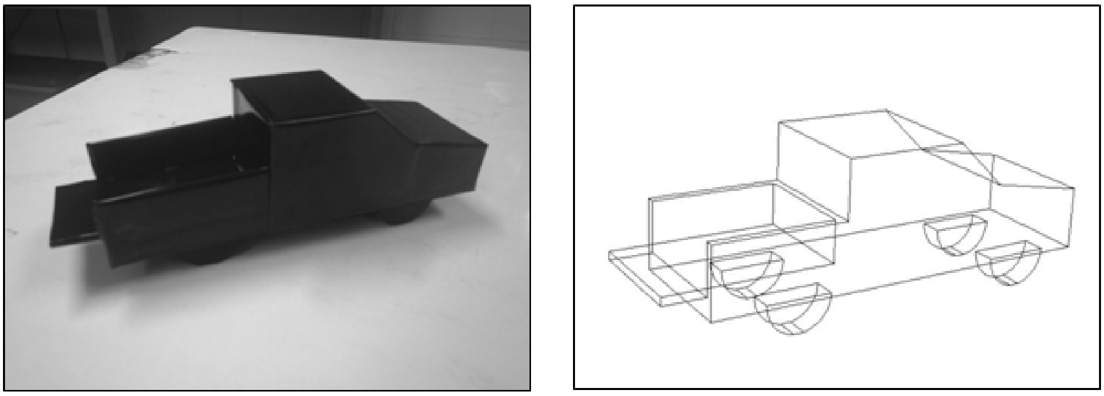
แบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดรถจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ 0.0067144 m^2 ดังภาพที่ 3.5 ทดสอบที่ความเร็ว 18 - 36 km/hr โดยทดสอบควบคู่กับวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ขนาดแบบจำลอง และ Test section เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนที่จะทดสอบขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณี คือ กรณีเปิดท้ายกระบะปกติ (Normal pick-up box) ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีต่างๆ คือ เปิดฝาท้ายกระบะ (Tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (Tailgate off), ปิดท้ายกระบะ (Covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (slope rear box), และครอบท้ายกระบะแบบตรง (Van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน รูปท้างด้านซ้ายเป็นแบบจำลองที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และด้านขวาเป็นแบบจำลองที่จำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข แสดงดังภาพที่ 3.6



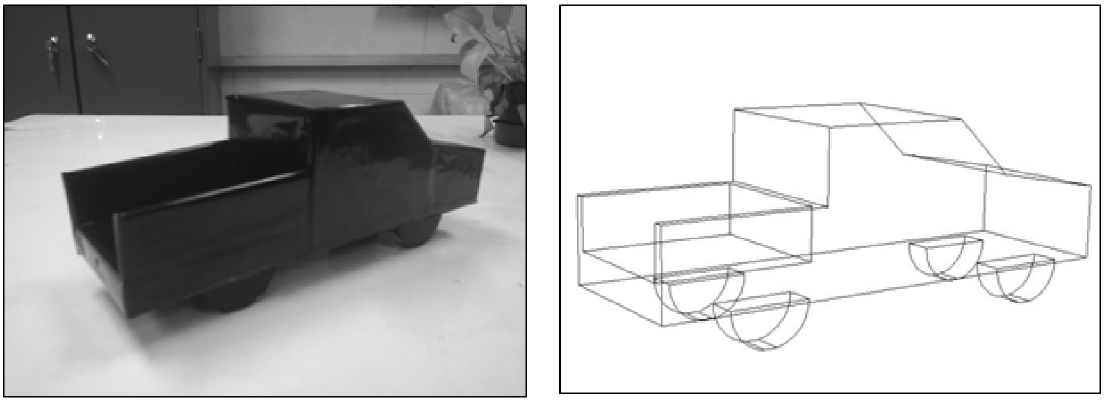
ภาพที่ 3.5 ขนาดของแบบจำลอง กริด และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD



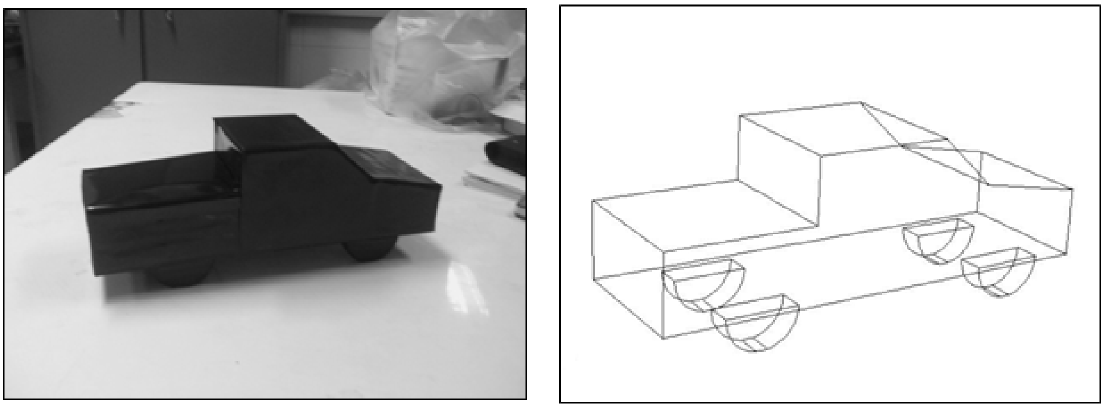
(a) กรณีที่ 1 เปิดกระบะปกติ



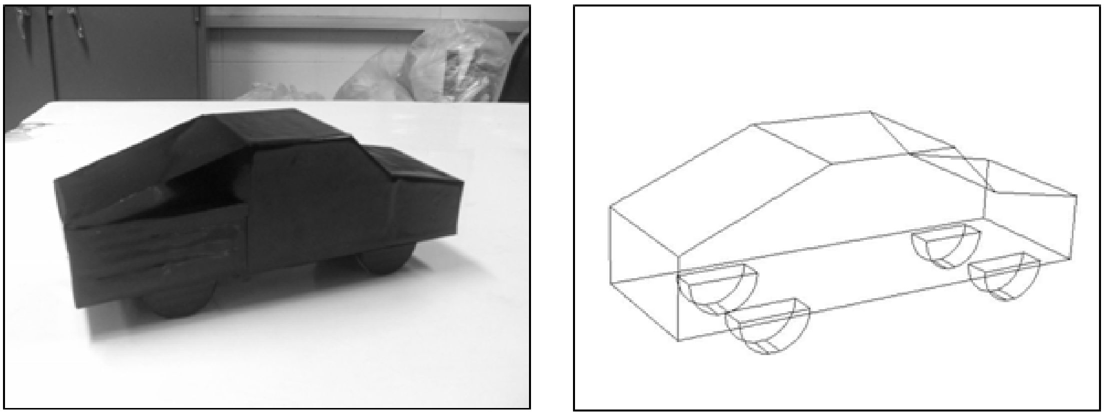
(b) กรณีที่ 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



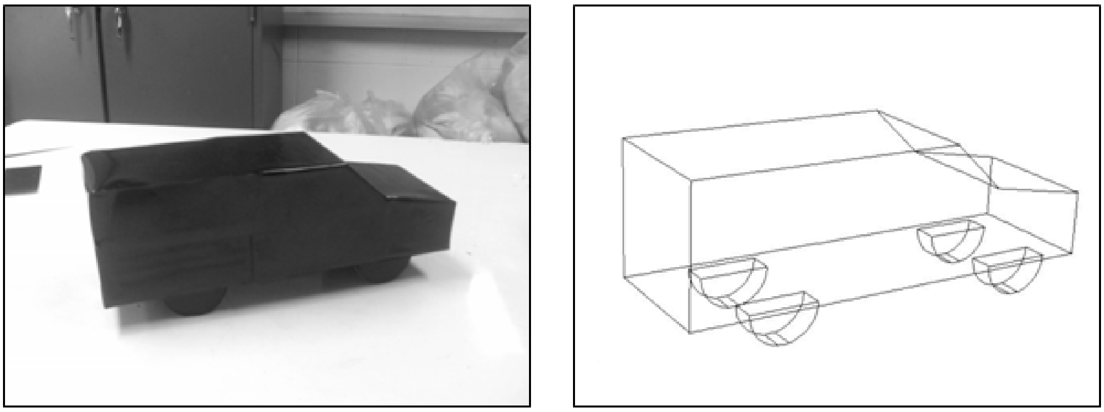
(c) กรณีที่ 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณีที่ 4 ปิดท้ายกระบะ

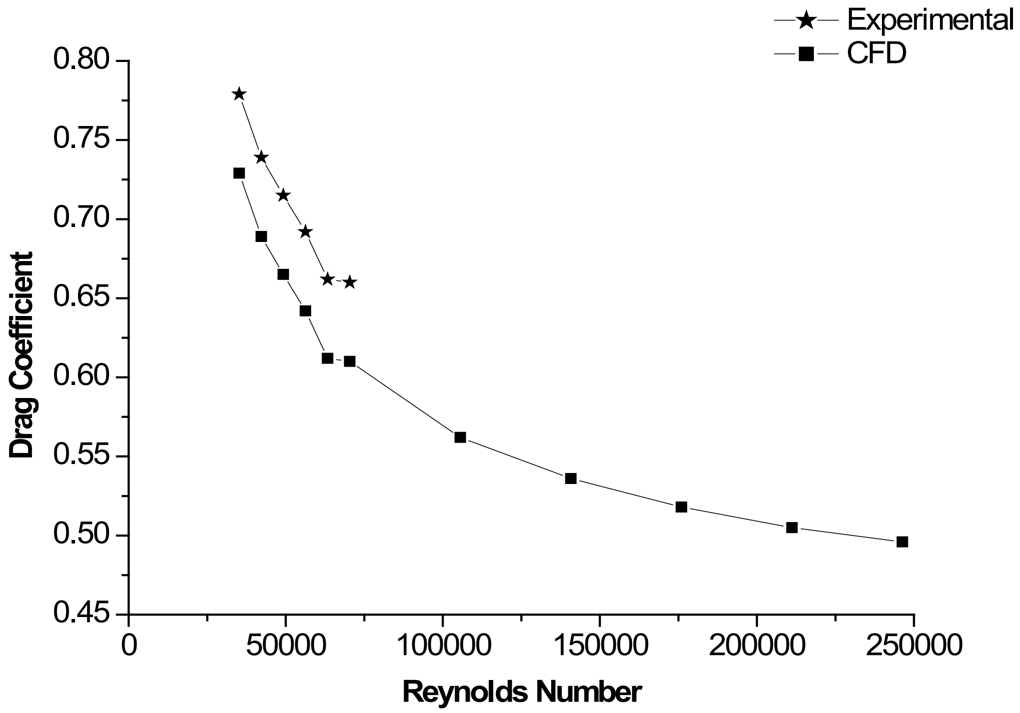


(e) กรณีที่ 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง

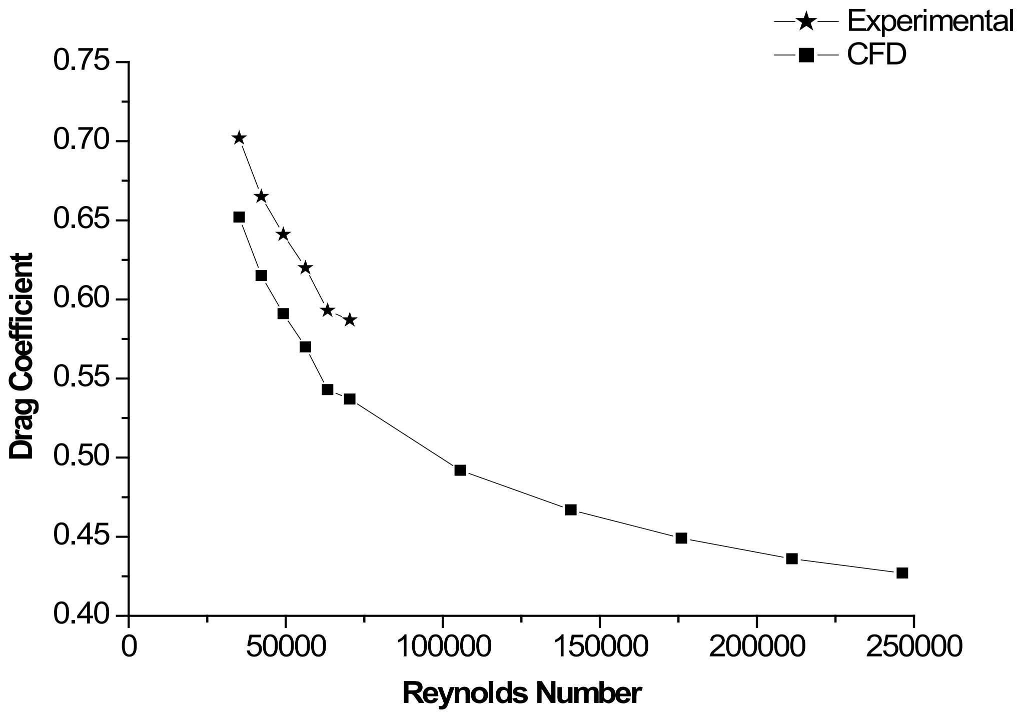


(f) กรณีที่ 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

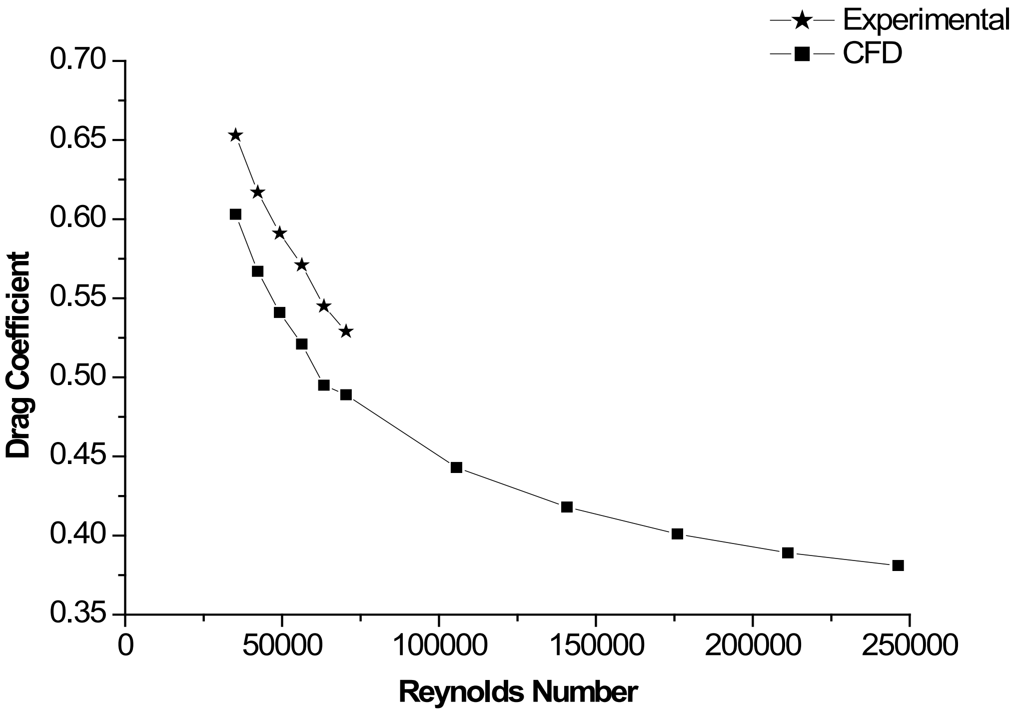
ภาพที่ 3.6 (a) – (f) แบบจำลองกรณีต่างๆ ที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD



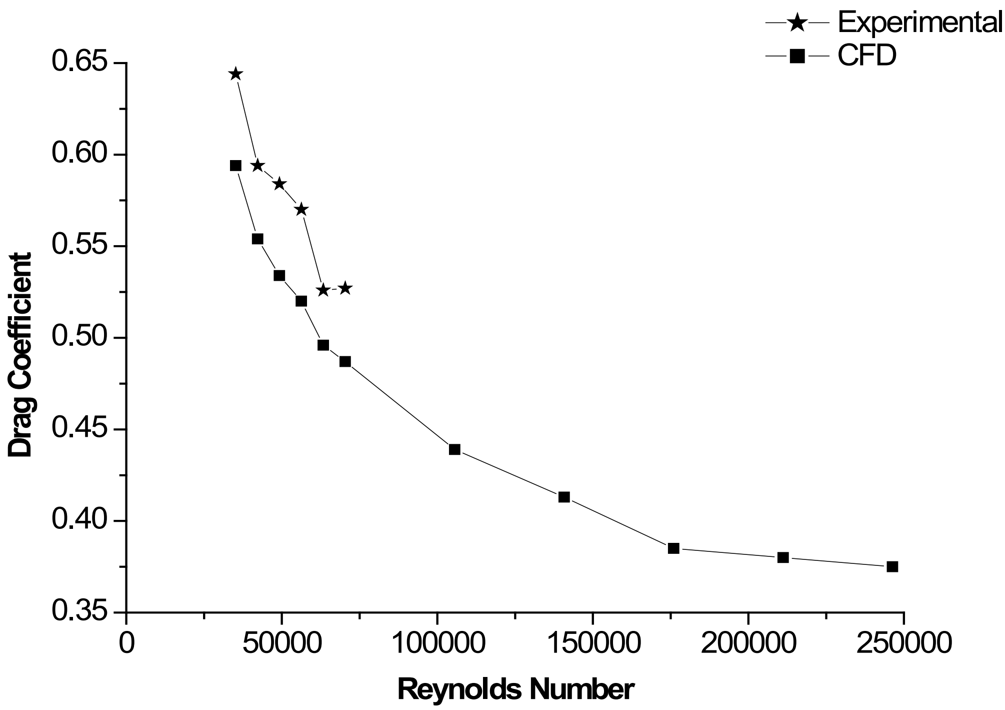
(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



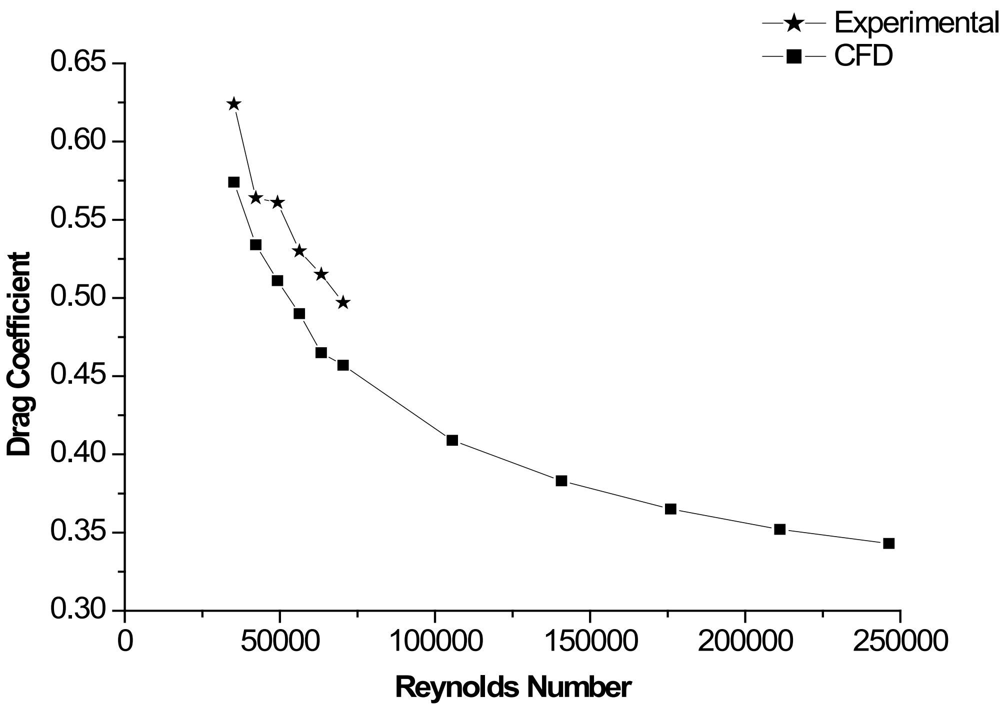
(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



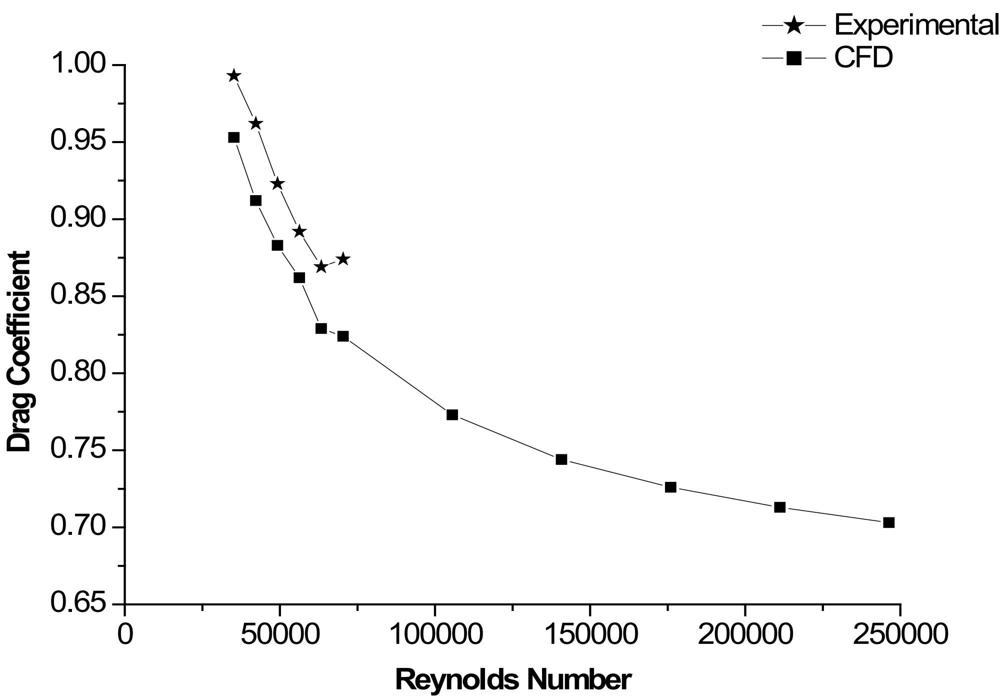
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



(e) กรณี 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง



(f) กรณี 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

ภาพที่ 3.7 (a) – (f) สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถขนาดจำลอง กรณีต่าง ๆ

จากภาพที่ 3.7 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างท้ายกระบะกรณีต่างๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ Reynolds number เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณีก็จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ว่ามีผลกับรูปทรงท้ายกระบะ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 % เนื่องจากความกว้างช่วงการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ทำให้สภาวะการไหลไม่คงที่ เช่นความเร็ว ความดัน ความหนืด โดยเมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแคบลง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมทดสอบสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งแสดงการไหลผ่านรถบรรทุกเล็กของกรณีต่าง ๆ ดังภาพที่ 3.8 เป็นการแสดงภาพที่ได้จากการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม ซึ่งได้ใช้ควันจากการเผาไหม้ไหลไปกับกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลอง เพื่อแสดงการไหลผ่าน โดยแต่ละรูปทรงของรถบรรทุกเล็กจะทำให้กระแสการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไป เกิดการหมุนวนของอากาศด้านท้ายของรถ แต่การแสดงการไหลนั้นให้ภาพเพื่อในการวิเคราะห์การไหลไม่ชัดเจนเท่าที่ควร จึงได้มีการจำลองการไหลโดย CFD เพื่อเปรียบเทียบและแสดงกระแสการไหล การเกิดการหมุนวนได้อย่างชัดเจน ดังภาพที่ 3.9 โดยใช้เงื่อนไขในการจำลองเหมือนกันกับการจำลองการไหลผ่านวัตถุทรงกลม จะเห็นว่ากระแสการไหลของการปรับเปลี่ยนรูปทรงท้ายกระบะมีความแตกต่างกัน เกิดการหมุนวนของอากาศ และเกิดการปะทะส่วนท้ายกระบะในกรณีของเปิดกระบะปกติ แต่ในกรณีปิดท้ายกระบะ และครอบกระบะแบบเฉียงการหมุนวนของอากาศด้านท้ายจะลดลงอย่างชัดเจน แต่ในการจำลองนี้ เป็นการจำลองของรถแบบจำลองขนาดย่อ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบจึงไม่สามารถยืนยันได้ว่ามีความถูกต้อง

ดังนั้นในบทต่อไปจะเป็นการจำลองการไหลของแบบจำลองรถบรรทุกขนาดจริง ในกรณีต่าง ๆ โดยเงื่อนไขจากการเปรียบเทียบการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดสอบในอุโมงค์ลม จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านใน CFD แต่ค่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งอาจสรุปได้ว่า เงื่อนไขการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณมีความถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกขนาดจริง ของกรณีต่าง ๆ ในบทต่อไป

(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ

(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ

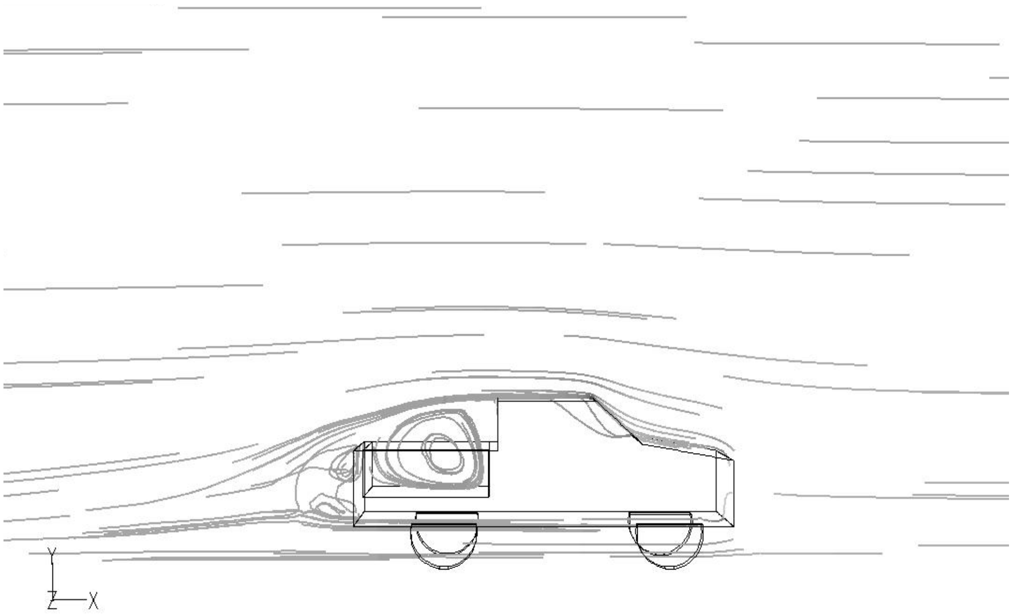
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ

(d) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ

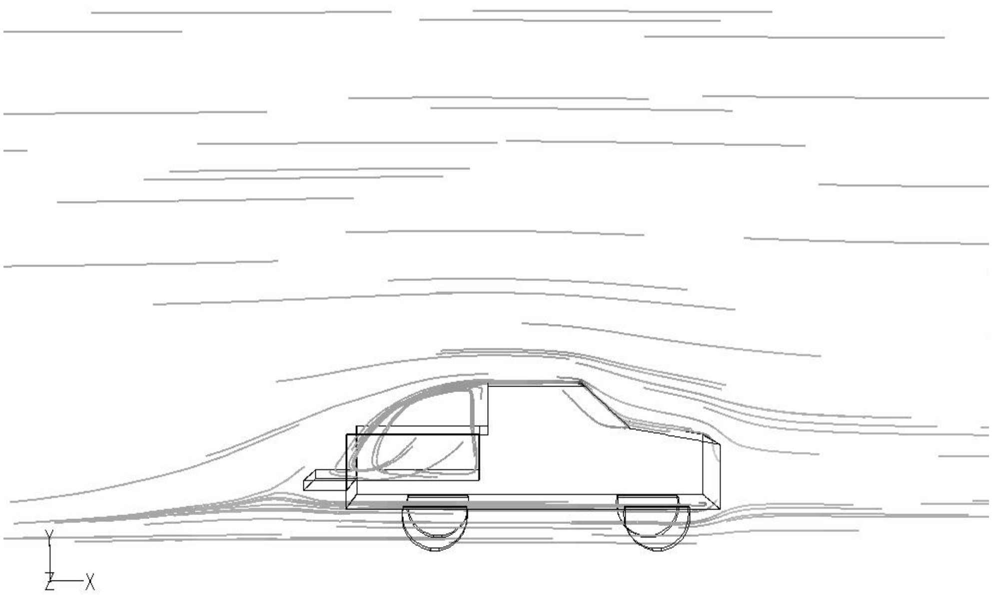
(e) กรณี 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง

(f) กรณี 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

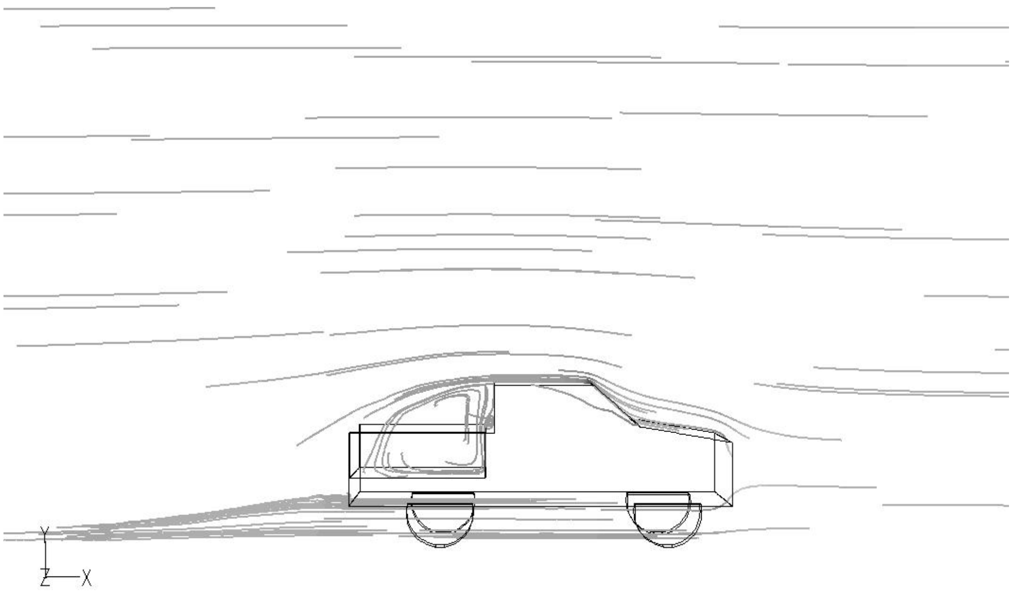
ภาพที่ 3.8 (a) – (f) เส้นการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม



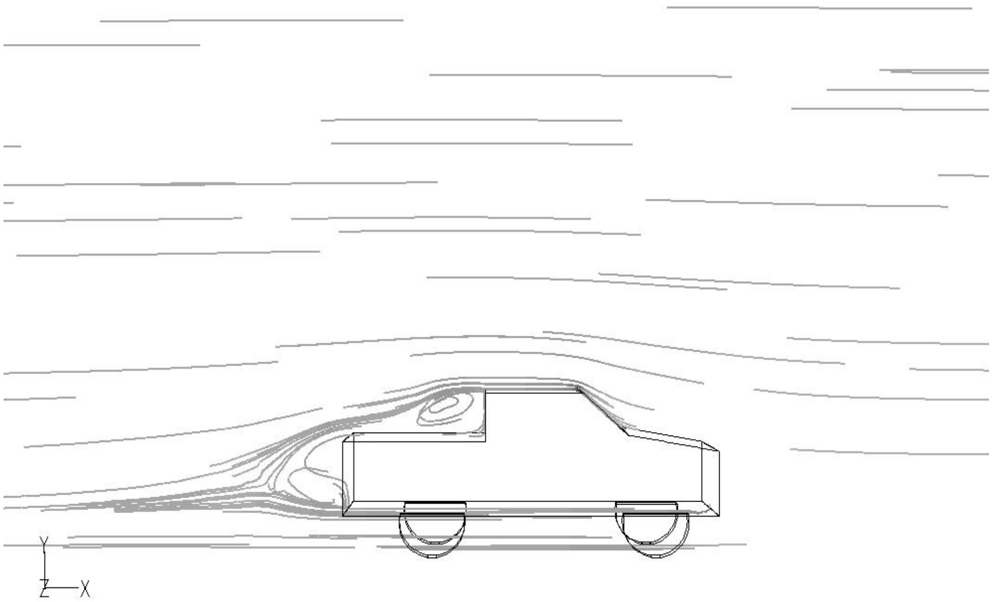
(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



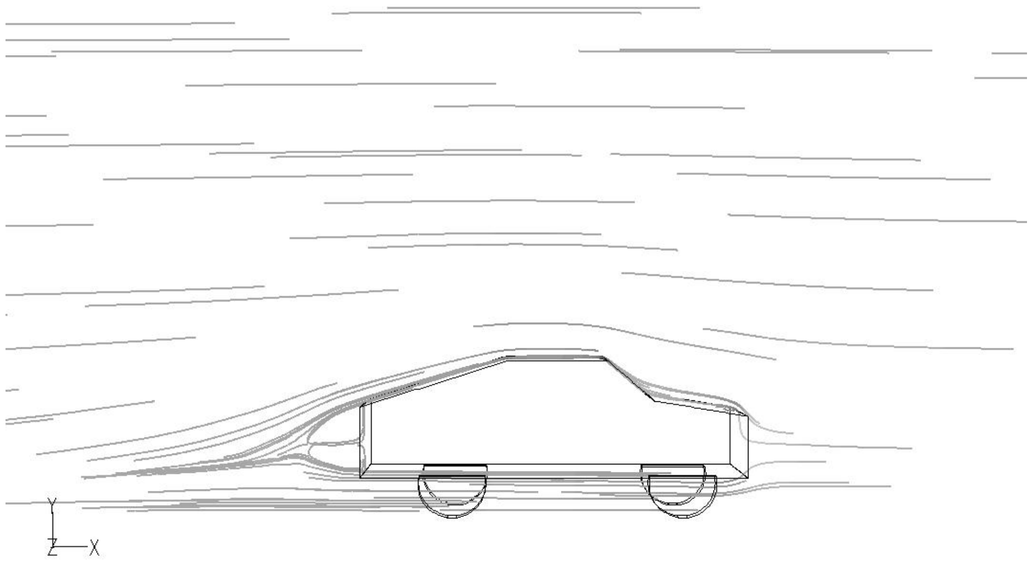
(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



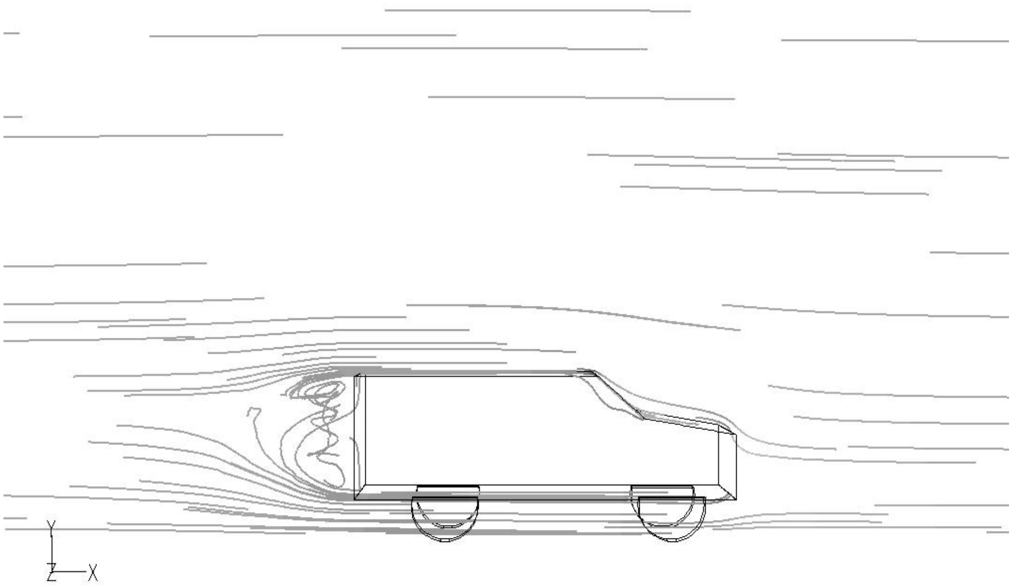
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



(e) กรณี 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง



(f) กรณี 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

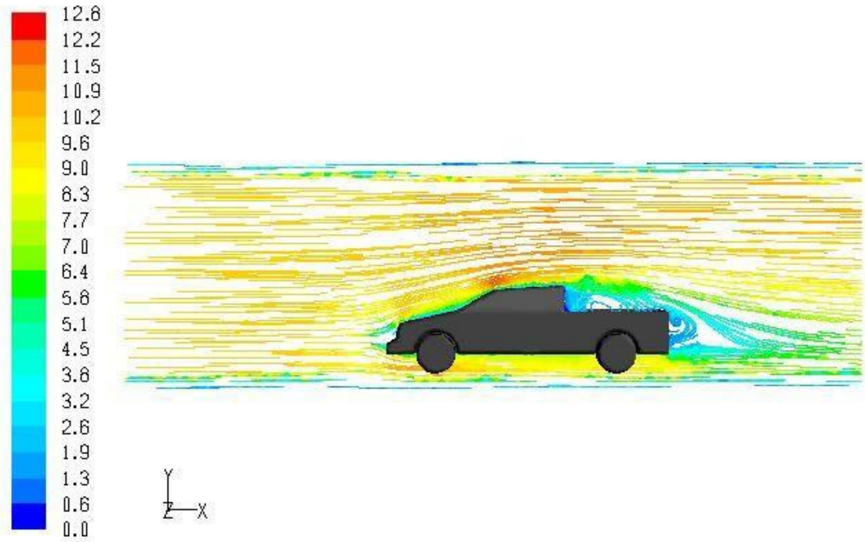
ภาพที่ 3.9 (a) – (f) เส้นการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็กใน CFD

3.2.5 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม และ CFD ของแบบจำลองรถบรรทุกเล็กเหมือนจริง

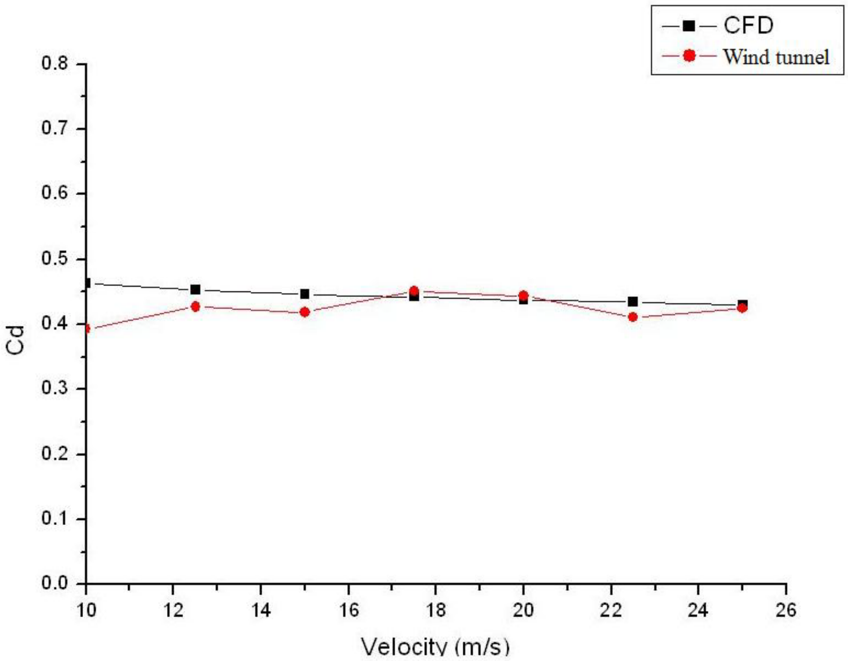
จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองของรถบรรทุกเล็กในกรณีต่าง ๆ กัน ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นแบบง่าย ทำให้ได้ผล และลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ที่แตกต่างกัน เป็นพื้นฐานในการพัฒนาคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ในความเป็นจริงรูปร่างของรถบรรทุกเล็ก จะมีลักษณะที่แตกต่างออกไป ซึ่งจะมีความรูปทรงที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง และมีความละเอียด ซับซ้อนกว่า

ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีรูปร่างเหมือนจริง เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.10

ภาพที่ 3.10 ลักษณะแบบจำลอง และการทดสอบรถบรรทุกเล็กเสมือนจริง



ภาพที่ 3.11 เส้นของความเร็วอากาศที่ไหลผ่านรถบรรทุกเล็กเหมือนจริงใน CFD



ภาพที่ 3.12 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านในการทดสอบรถบรรทุกเล็กเหมือนจริง

จากผลการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง เนื่องจากแบบจำลองเหมือนจริงนั้นจะมีรูปร่างที่ลู่ลมมากว่า (Buff body) และมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ทั้งการทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD

ดังนั้นในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกในหัวข้อต่อไป **จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของรถบรรทุกให้เหมือนจริงมากที่สุด** เพื่อความถูกและสามารถนำไปอ้างอิงกับการนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ได้ดีที่สุด

3.3 การสร้างแบบจำลองของรถบรรทุก

การทำความเข้าใจในการไหลของของไหลใดๆ จำเป็นต้องพึ่งพาการทดลอง ยกตัวอย่าง เช่น การออกแบบรูปร่างรถยนต์รูปร่างใดรูปร่างหนึ่ง ผู้ออกแบบจำเป็นต้องคำนึงถึงการลดแรงต้านลงในขณะที่รถวิ่ง แรงต้านมีน้อยเท่าใดก็ช่วยประหยัดน้ำมันมากขึ้นเท่านั้น วิธีการที่นิยมทำการมากคือ การสร้างแบบจำลองรูปร่างรถยนต์นั้นนำไปทดลองในอุโมงค์ลม ที่มีหมอกควันสีเทาวิ่งเป็นแนวเส้นผ่านตัวรถ เพื่อจะทราบถึงลักษณะการไหลและความแปรปรวนของอากาศผ่านตัวรถ หากลักษณะแนวเส้นของอากาศมีความแปรปรวนมาก เช่น เกิดการหมุนวนย้อนกลับในส่วนท้ายของตัวรถก็จะฉุดให้รถวิ่งช้าลง ทำให้สิ้นเปลืองน้ำมันมากขึ้น เนื่องจากการทดสอบในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบมีความเร็วต่ำ แบบจำลองที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กซึ่งทำให้วัดค่าและการสังเกตเพื่อวิเคราะห์การไหลทำได้ยาก

จากการศึกษาประเภทของแรงต้าน หรือปัจจัยที่ทำให้เกิดแรงต้านกับรถนั้น ในบทที่ 2 ที่ผ่านมา แรงต้านที่เกิดขึ้นมี 4 ประเภทคือ แรงต้านที่เกิดจากแรงดันกับพื้นที่หน้าตัด (pressure drag), แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในตัวรถ (Internal flow loss), แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นรถกับพื้นถนน (Underfloor roughness), และแรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศกับผิวภายนอกรถ (Friction loss)

ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกโดยใช้โปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์(computational fluid dynamics)โดยการจำลองการปรับปรุงรูปร่างในส่วนต่างๆของรถบรรทุก โดยแบ่งการทดสอบเป็นสองส่วนคือ 1. การทดสอบในลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 2. การทดสอบในลักษณะลดการไหลของอากาศเข้าสู่ตัวรถบรรทุก ซึ่งทั้งสองเป็นแรงต้านที่เกิดขึ้น เนื่องจากเป็นลักษณะจำเพาะของรถบรรทุก และสุดท้ายเป็นการทดสอบ โดยออกแบบอุปกรณ์ที่ได้จากการทดสอบโดย CFD นำมาสร้าง และติดตั้งทดสอบจริง เพื่อเปรียบเทียบ

3.3.1 ลักษณะจำเพาะของรถบรรทุกที่ใช้ในการทดสอบ

ดังนั้นในหัวข้อนี้ เป็นการสร้างแบบจำลองของรถบรรทุก ซึ่งเป็นรถบรรทุกที่มีลักษณะที่นิยม เหมาะสมกับสภาวะภูมิประเทศ ในการเดินทาง ใช้ขนส่งผลผลิตทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ โดยการปรับเปลี่ยนรูปร่างที่มีลักษณะจำเพาะ ของรถบรรทุกสิบล้อ เครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ HINO รุ่น EH700 ขนาด 10.8 ตัน 6 สูบ 6,443 ซีซี เป็นกรณีศึกษา ดังภาพที่ 3.13

ภาพที่ 3.13 รถบรรทุกจริงที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะและคุณสมบัติของเครื่องยนต์ EH700

ระบบเครื่องยนต์ EH700		**อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน**	5 กิโลเมตร/ลิตร
เครื่องยนต์	ดีเซล 4 จังหวะ	**ระบบส่งกำลัง**	
จำนวนสูบ	6 สูบ	คลัตช์	แห้งแผ่นเดียว
ระบายความร้อน	ด้วยน้ำ	อัตราทดเฟืองเกียร์	5 เกียร์
ปริมาตรกระบอกสูบ	6,443 ซีซี	อัตราทดเฟืองท้าย	5.571
กระบอกสูบ x ระยะชัก	110 x 113 มม.	ความเร็วสูงสุด	106 กม./ชม.
อัตราส่วนกำลังอัด	17.7 : 1	**ระบบช่วงล่างและบังคับเลี้ยว**	
ห้องเผาไหม้แบบ	ไดเรกอินเจคชั่น	ระบบกันสะเทือนหน้า	แหนบและโช๊คอัพ

แรงม้าสูงสุด	168 แรงม้า	ระบบกันสะเทือนหลัง	แหนบและโช๊คอับ
ความเร็วรอบสูงสุด	3,000 รอบ/นาที	แบบเพลาหน้า	คานแข็งตัว I
แรงบิดสูงสุด	45 ม.-กก./2,000 รอบ/นาที	แบบเพลาหลัง	เพลาแข็งตัว
อัตราการใช้เผ้าไหม้เชื้อเพลิง	300 มิลลิลิตร/กม.	กระปุกพวงมาลัย	ลูกปืน + ไฮดรอลิก
ขันฝาสูบ	18-19 ม.-กก.	รัศมีมุมเลี้ยวแคบ	8.4 ม.
ขันแบริ่งข้อเมน	14-18.5 ม.-กก.	แคมเบอร์	1 องศา
ขันแบริ่งข้อก้าน	16.5-18.5 ม.-กก.	มุมแกนหมุนล้อ	7 องศา
ขันน๊อตหัวหัวเพลา	55-70 ม.-กก.	แคสเตอร์	-1 องศา หรือ 1 องศา
ลิ้นไอดีเปิด	16 องศา	โท-อิน	1-4 มม.
ลิ้นไอดีปิด	13 องศา	กระทะล้อ	20 น๊อต ล้อ 8 ตัว
ตั้งลิ้นไอดี	เย็น 0.3 มม.	**ระบบเบรค**	
ตั้งลิ้นไอเสีย	เย็น 0.4 มม.	เบรคหน้าไฮดรอลิกมีลมดันช่วย	ดรัม 393.7 มม.
ความเร็วรอบเดินเบา	550-800 รอบ/นาที	จานเบรคหน้าใช้แล้วไม่บางกว่า	396.7 มม.
ระบบน้ำมันเชื้อเพลิง		ผ้าเบรคหน้าเหลือไม่บางกว่า	5.0 มม.
ความจุถังน้ำมัน	200 ลิตร	เบรคหลัง	ดรัม 393.7 มม.
ปั๊ม	เรียงแถว	จานเบรคหลังใช้แล้วไม่บางกว่า	396.7 มม.
นมหนูหัวฉีด	4 รู	ผ้าเบรคหลังเหลือไม่บางกว่า	5.0 มม.
ควาดันปั๊มดูดน้ำมัน	220 บาร์	**ระบบไฟฟ้า**	
ตั้งปั๊มฉีดน้ำมันหัวฉีด	17 องศา	แบตเตอรี่	12 V 120 AH 2 ลูก
ลำดับการจุดระเบิด	1-4-2-6-3-5	อัลเตอร์เนเตอร์	24 V 25 AH

(บริษัทชัยรัชติการ จำกัด)

3.3.2 การสร้างแบบจำลองของรถบรรทุกในลักษณะเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ

การศึกษาแบบจำลอง โดยการสร้างแบบจำลองของรถบรรทุกเล็กแบบต่าง ๆ ในหัวข้อ 3.2.4 นั้น ทำให้เราทราบว่าลักษณะของรูปทรงท้ายกระบะนั้น มีผลต่อแรงต้านพอสมควร เนื่องจากรูปทรงท้ายกระบะนั้นเป็นลักษณะจำเพาะของรถบรรทุก เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะที่แตกต่างกันออกไป

ซึ่งหลักการในการสร้างแบบจำลองนั้น จะสร้างลักษณะของแบบจำลองที่มีลักษณะที่เหมือนจริงมากที่สุด และมีขนาดที่เท่ากัน โดยจะเน้นการปรับเปลี่ยนรูปทรงของกระบะ ที่มีการใช้งานโดยทั่วไป เปรียบเทียบกับกรณีปกติ ซึ่งเป็นกรณีที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนรูปทรง เป็นลักษณะของการใช้งานโดยปกติ ซึ่งมีทั้งหมด 5 กรณี ตามภาพที่ 3.14

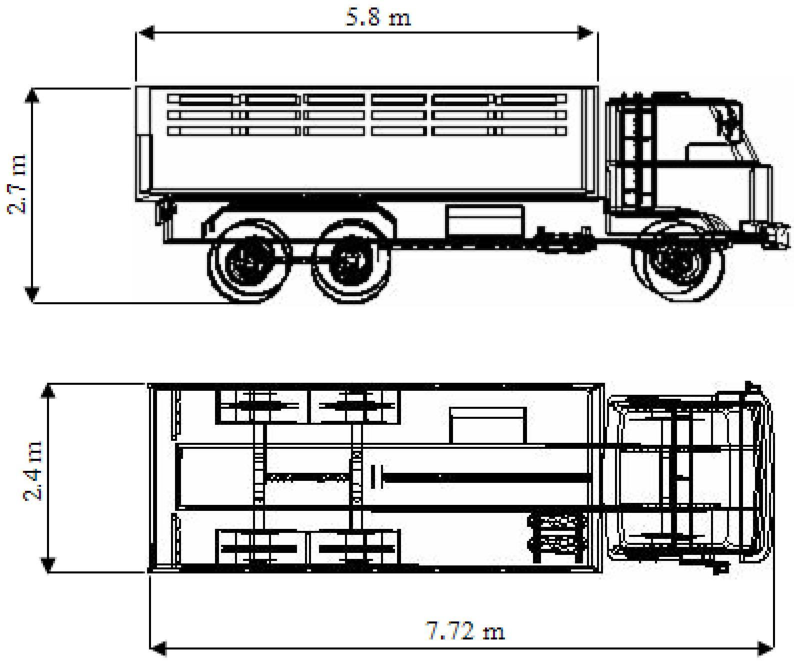
กรณีที่ 1 กรณีรถบรรทุกปกติ (Normal case)

กรณีที่ 2 กรณีปิดกระบะบรรทุก (Off - tray case)

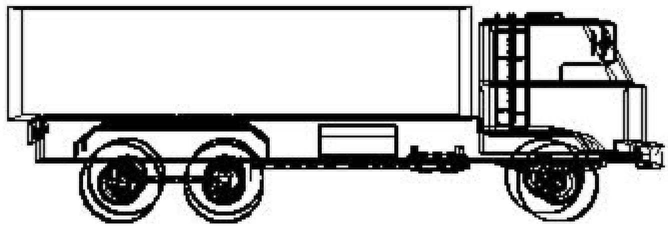
กรณีที่ 3 กรณีเปิดกระบะบรรทุกออก (Open - tray case)

กรณีที่ 4 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง (Trailer base case)

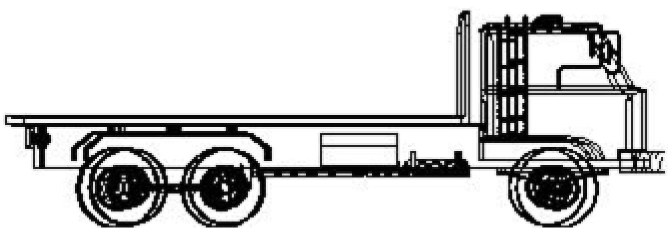
กรณีที่ 5 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบทรงรี (Modified - back tray shape case)



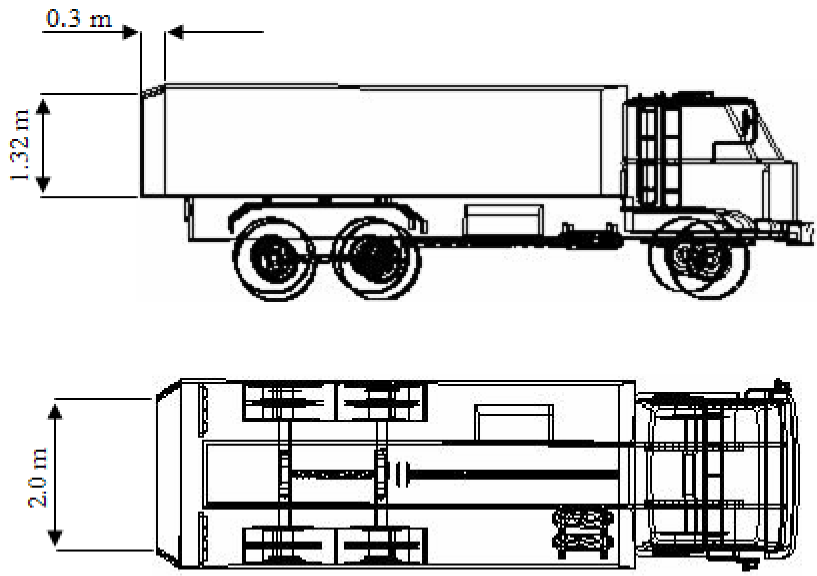
กรณีที่ 1 กรณีปกติ



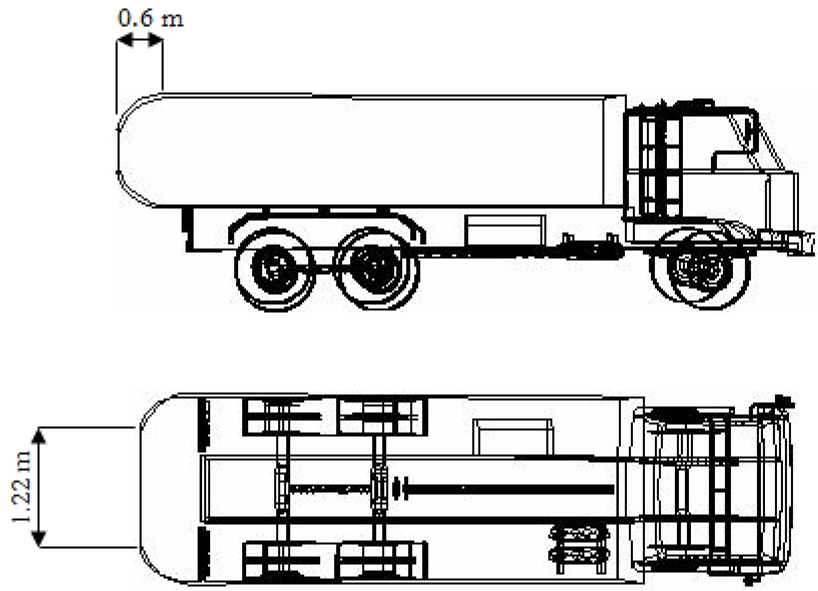
กรณีที่ 2 กรณีปิดกระบะบรรทุก



กรณีที่ 3 กรณีเปิดกระบะบรรทุก

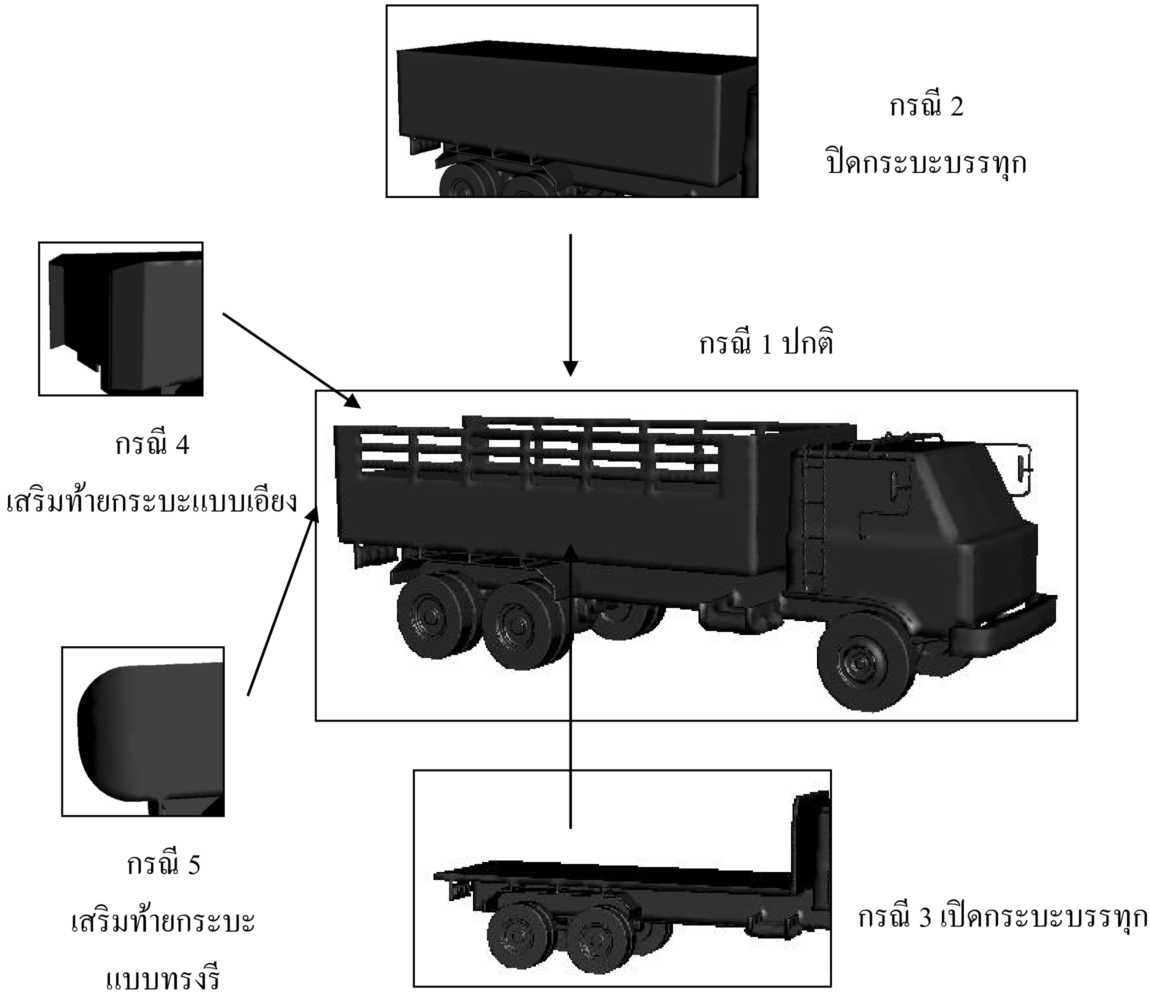


กรณีที่ 4 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง



กรณีที่ 5 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบทรงรี

ภาพที่ 3.14 ลักษณะกรณีศึกษาแบบจำลองของรถบรรทุกทั้ง 5 กรณี



ภาพที่ 3.15 กรณีศึกษารถบรรทุก ที่ปรับเปลี่ยนรูปทรงท้ายกระบะลักษณะต่าง ๆ

3.3.3 การสร้างแบบจำลองของรถบรรทุก ในลักษณะติดตั้งอุปกรณ์เสริม

แรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุก ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดแรงต้านไม่น้อยกว่าการสูญเสียที่เกิดจากการหมุนวนของอากาศที่ท้ายกระบะคือ การไหลเข้าสู่ภายในรูปร่างของรถบรรทุก ซึ่งจะเกิดขึ้นระกว่างชิ้นส่วน หรือส่วนประกอบของรถ เช่น ระหว่างส่วนของหัวรถ กับกระบะ เป็นต้น ดังนั้นการลดปัจจัยนี้ ก็จะสามารถเป็นอีกวิธีหนึ่งจะสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน

ซึ่งหัวข้อนี้จะเป็นการสร้างแบบจำลองของรถบรรทุก ในลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เสริมตามส่วนต่าง ๆ ของรถ ที่สามารถลดการไหลของอากาศเข้าสู่ตัวรถ และลดการหมุนวนของอากาศซึ่งมีการทดสอบ 5 กรณีดังนี้คือ

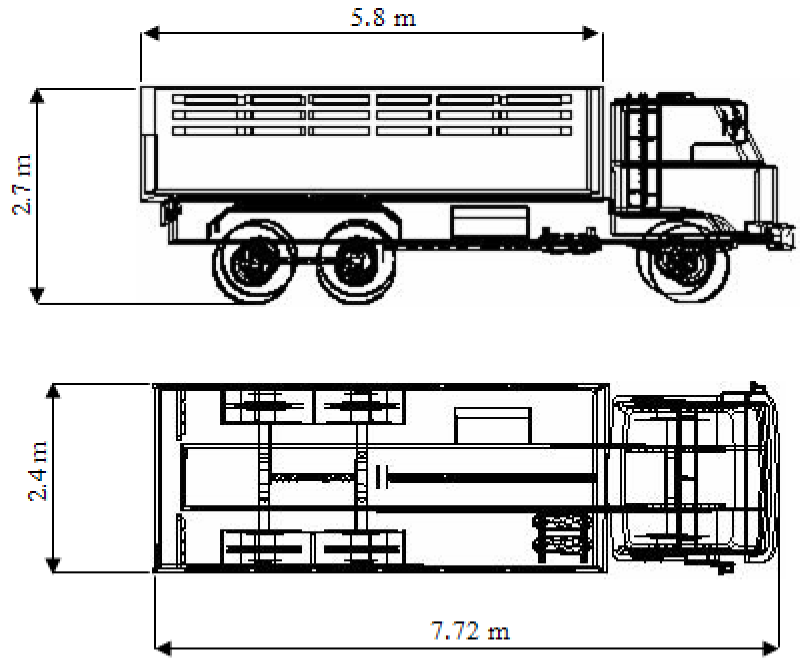
กรณีที่ 1 กรณีปกติ (Normal)

กรณีที่ 2 กรณีเสริมด้านท้ายกระบะ (Modified - Back Tray Half - Sphere case)

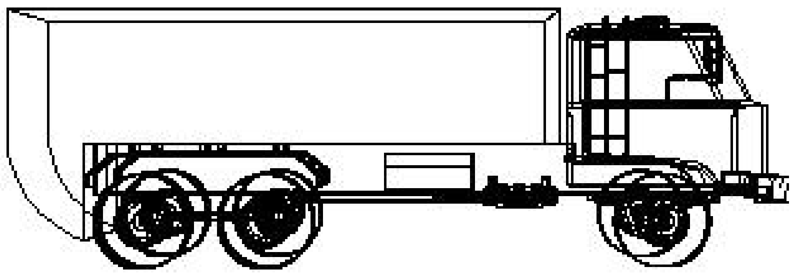
กรณีที่ 3 กรณีปิดช่องว่างบริเวณช่วงต่อกระบะ (Closed Gap Cab Extender)

กรณีที่ 4 กรณีเสริมด้านหน้ารถ (Modified - Front Tray Half - Sphere Case)

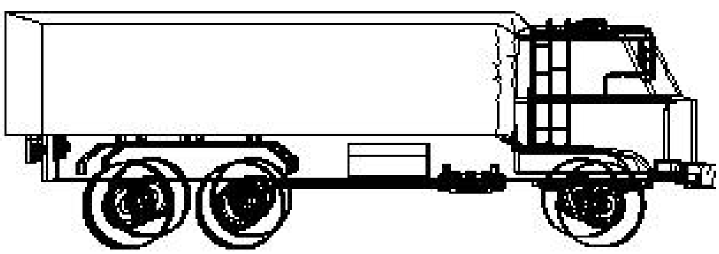
กรณีที่ 5 กรณีเสริมด้านหน้ารถ และเสริมผิวโค้งบริเวณหลังคารถ (Modified - Front Tray Half - Sphere Case and Adjust Roof Fairing)



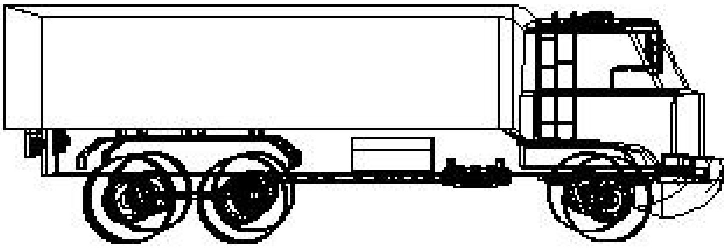
กรณีที่ 1 ปกติ



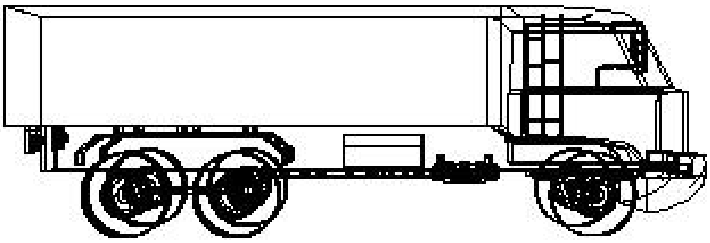
กรณีที่ 2 เสริมด้านท้ายกระบะ



กรณีที่ 3 ปิดช่องว่างบริเวณรอยต่อกระบะ



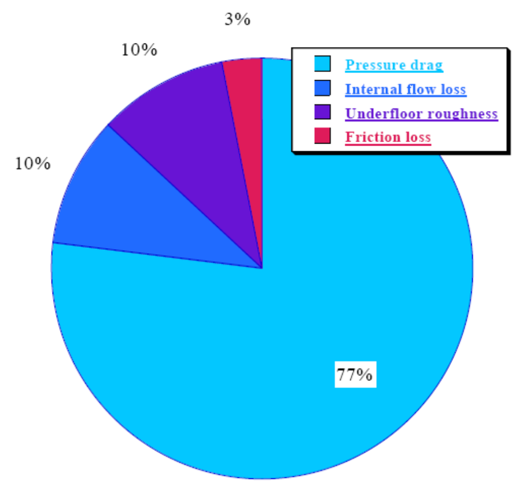
กรณีที่ 4 เสริมด้านหน้ารถ



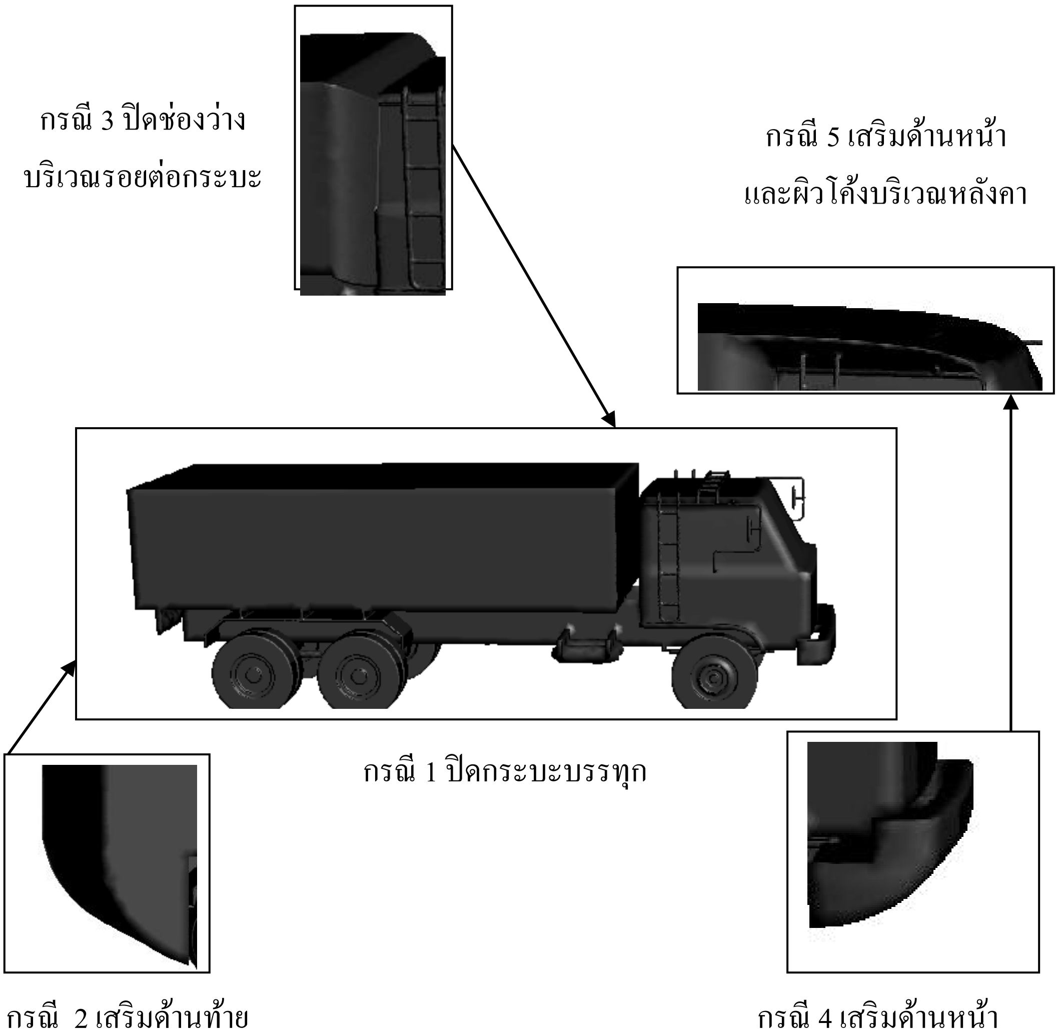
กรณีที่ 5 เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคารถ

ภาพที่ 3.16 กรณีศึกษารถบรรทุกติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ

จากภาพที่ 3.16 สังเกตการสร้างแบบจำลองนั้น จะมีลักษณะที่มีอุปกรณ์เสริมปกปิดส่วนต่างๆ เพื่อบังคับให้การไหลของอากาศเป็นไปอย่างราบเรียบมากที่สุด และพยายามลดช่องว่างที่อากาศสามารถจะไหลเข้าไปหมุนวนให้มากที่สุด ซึ่งจะช่วยลดแรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในตัวรถ (Internal flow loss) ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดแรงต้าน ดังนั้นซึ่งหลักการสร้างเพื่อที่จะลดแรงต้านจำเป็นจะต้องคำนึงว่าจะลดแรงต้านประเภทใด และเกิดขึ้นที่ส่วนไหนตามภาพแผนภูมิที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 สัดส่วนของแรงต้านแต่ละประเภทที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุก



ภาพที่ 3.18 รถบรรทุกติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ

3.3.4 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบใน CFD

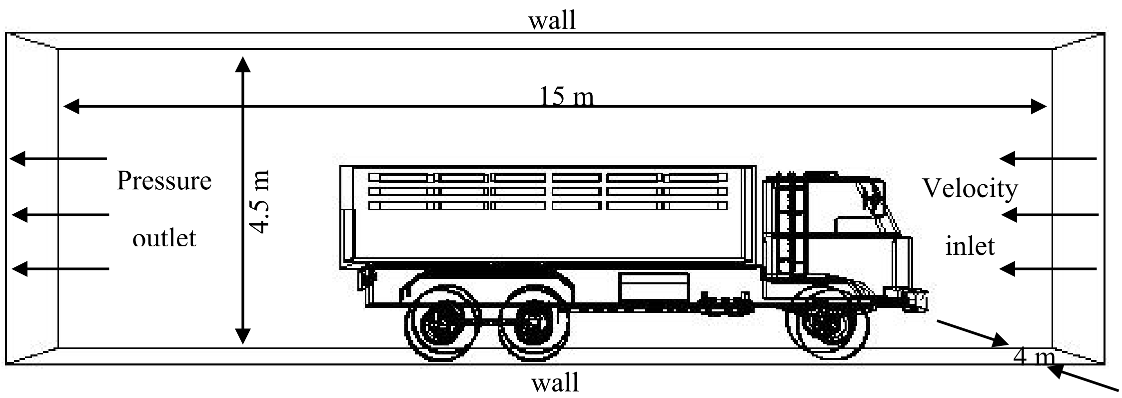
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

GAMBIT เป็นโปรแกรมย่อยโปรแกรมหนึ่งของโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics) โดยส่วนของโปรแกรมนี้เป็นขั้นตอนการกำหนดรูปร่างลักษณะของแบบจำลองและเงื่อนไขขอบเขตการทดสอบ โดยได้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 3.2

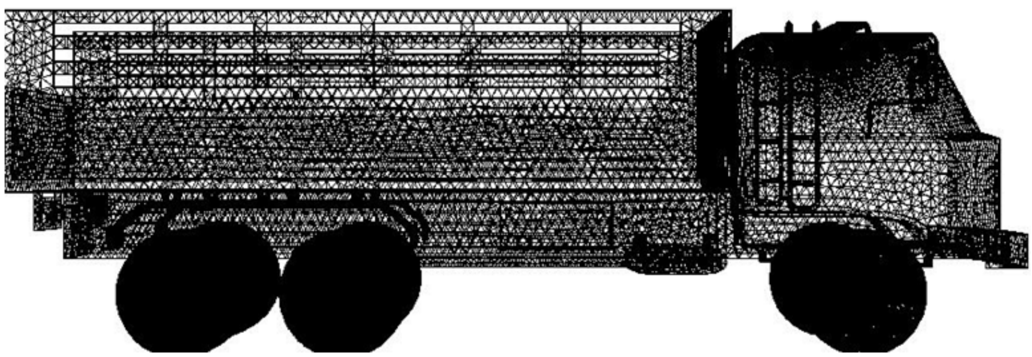
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขขอบเขตโปรแกรม GAMBIT

โปรแกรม GAMBIT	
ขอบเขตทางด้านเข้า (inlet boundary condition)	Velocity inlet
ขอบเขตทางด้านออก (outlet boundary condition)	Pressure outlet
จำนวนกริด	1,400,000 - 1,700,000 cell

จากเงื่อนไขขอบเขตดังกล่าว สามารถนำมาแสดงลักษณะการกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบกับแบบจำลองรถบรรทุกขนาดจริงได้ดังภาพที่ 3.719



ภาพที่ 3.19 เงื่อนไขขอบเขตการจำลอง



ภาพที่ 3.20 ลักษณะการกำหนดกริด (mesh)

FLUENT เป็นโปรแกรมย่อยของโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics) โดยส่วนของโปรแกรมนี้เป็นขั้นตอนการแก้ปัญหาใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขขอบเขตโปรแกรม FLUENT

โปรแกรม FLUENT	
ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)	Segregated Solver
ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)	Implicit method
แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)	Standard k-epsilon (2eqn)
ระเบียบวิธีการแก้ปัญหากการไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method)	Standard near wall function

ของไหลที่ใช้ในการคำนวณด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดใหญ่คือ อากาศ ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลในสภาวะที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible flow) มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีคุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ ดังนี้คือ

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ

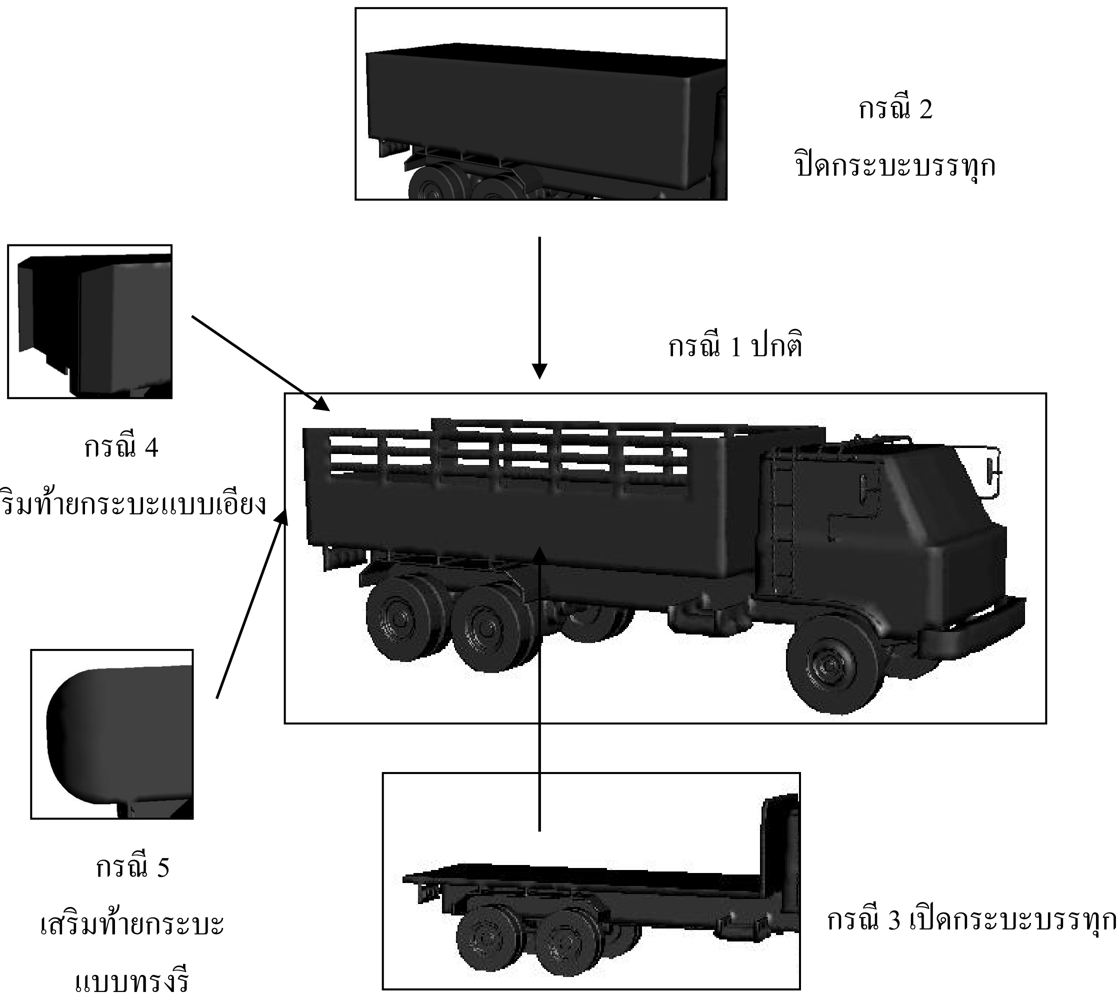
คุณสมบัติของอากาศ	ค่า
ความหนืด (Viscosity), μ (kg/m-s)	1.7894×10^{-5}
ความหนาแน่น (Density), ρ (kg/m^3)	1.225
ความดันเริ่มต้น (operating pressure) , P (pascal)	101,325
อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ(Ratio of specific heat)	1.4
อุณหภูมิ(Temperature)	288.16 K

ซึ่งเราจะใช้ลักษณะของแบบจำลองที่กล่าวมาทั้งหมด และใช้เงื่อนไขในการจำลองดังที่กล่าวมา เพื่อทำการคำนวณ จะได้ผล และการวิเคราะห์ผล ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4
ผลและการวิเคราะห์

ในบทนี้ เป็นการนำเอาเงื่อนไข แบบจำลอง การกำหนดสภาวะ คุณสมบัติของอากาศ มาคำนวณ โดยใช้โปรแกรม FLUENT ในการคำนวณ จะสามารถให้คำตอบในเชิงตัวเลข และในเชิงกราฟริก (ระดับแถบดีบอกความต่ำ-สูงของค่าที่ต้องการทราบ) ซึ่งเราจะสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของความดัน ความเร็วที่เกิดขึ้น กับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่แสดงผลออกมาในเชิงตัวเลขได้อย่างละเอียด เข้าใจง่าย สามารถให้แนวทางในการออกแบบจำลองที่ดีด้านอากาศพลศาสตร์ต่อไปในอนาคต

4.1 ผลการทดสอบกรณีแบบจำลองรถบรรทุกในลักษณะเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ



ภาพที่ 4.1 รถบรรทุกปรับเปลี่ยนรูปทรงท้ายกระบะลักษณะต่าง ๆ

4.1.1 ผลสัมประสิทธิ์แรงต้าน

จากเงื่อนไขขอบเขตที่ได้กำหนดไว้เบื้องต้นนั้น ดำเนินการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกขนาดจริง ด้วยโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (Computational fluid dynamics) โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรถบรรทุกปกติกับรถบรรทุกที่มีการปรับเปลี่ยนรูปทรงท้ายกระบะ ซึ่งจะทำการทดสอบที่ความเร็วระหว่าง 10 m/s – 35 m/s

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	380.8474	0.9698	-
2	417.7964	1.0638	0.0941
3	320.8414	0.8170	-0.1528
4	301.7685	0.7684	-0.2013
5	250.5476	0.6380	-0.3317

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	826.0382	0.9348	-
2	917.0526	1.0378	0.1031
3	704.5972	0.7974	-0.1374
4	657.3149	0.7439	-0.1909
5	542.2892	0.6137	-0.3211

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	1438.9732	0.9161	-
2	1608.4515	1.0239	0.1078
3	1235.7549	0.7866	-0.1293
4	1147.6533	0.7306	-0.1854
5	943.90941	0.6009	-0.3151

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	2219.0791	0.9042	-
2	2490.7251	1.0147	0.1106
3	1913.6045	0.7796	-0.1244
4	1772.0329	0.7219	-0.1821
5	1452.9925	0.5919	-0.3122

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	3167.4233	0.8961	-
2	3563.7482	1.0083	0.1121
3	2738.3508	0.7747	-0.1214
4	2529.5072	0.7156	-0.1804
5	2070.2375	0.5857	-0.3104

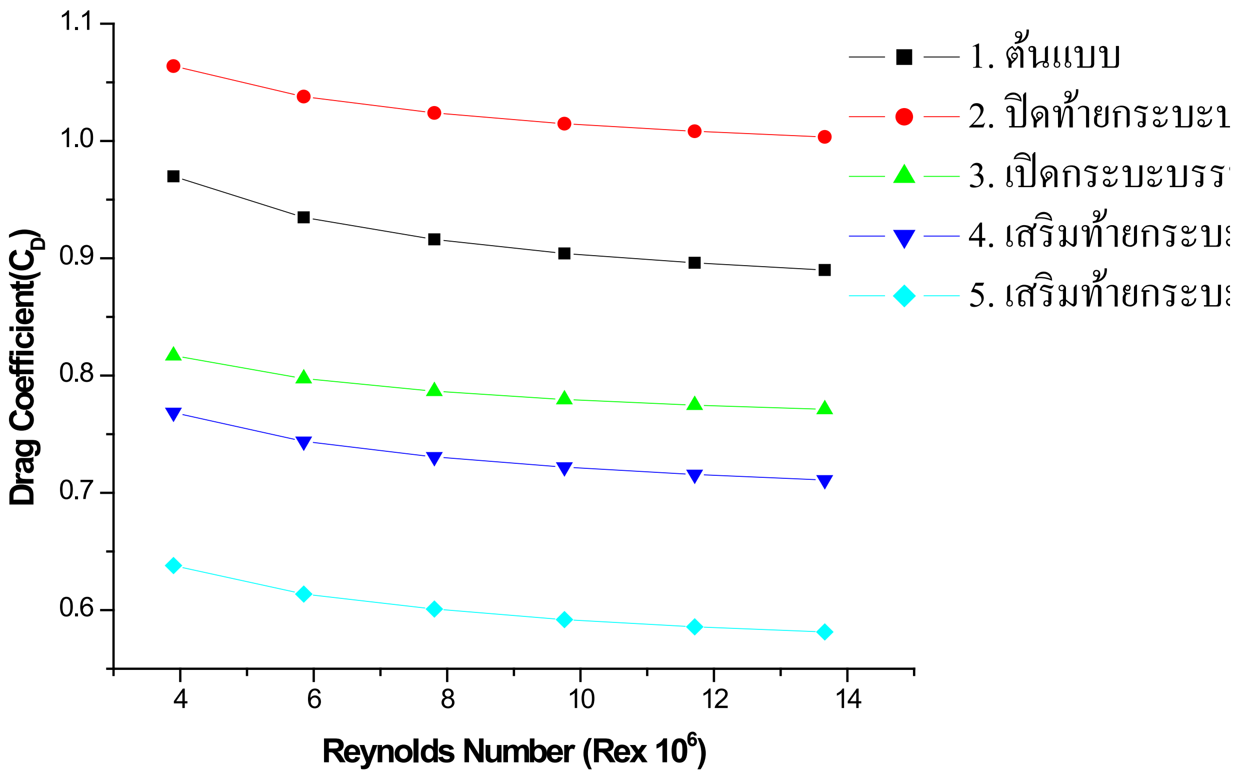
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 35 m/s

กรณี	แรงต้าน (N)	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	ผลต่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน
1	4281.4077	0.8899	-
2	4827.1073	1.0034	0.1134
3	3709.7155	0.7711	-0.1188
4	3420.1115	0.7109	-0.1791
5	2796.9174	0.5814	-0.3085

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความเร็วต่างๆ

Re.	case1	case2	case3	case4	case5
3.90×10^6	0.9698	1.0638	0.8170	0.7684	0.6380
5.85×10^6	0.9348	1.0378	0.7974	0.7439	0.6137
7.81×10^6	0.9160	1.0239	0.7866	0.7306	0.6009
9.76×10^6	0.9041	1.0147	0.7796	0.7219	0.5919
11.71×10^6	0.8961	1.0083	0.7747	0.7156	0.5857
13.66×10^6	0.8899	1.0034	0.7711	0.7109	0.5814
เฉลี่ย	0.91845	1.02531	0.78773	0.73188	0.60193

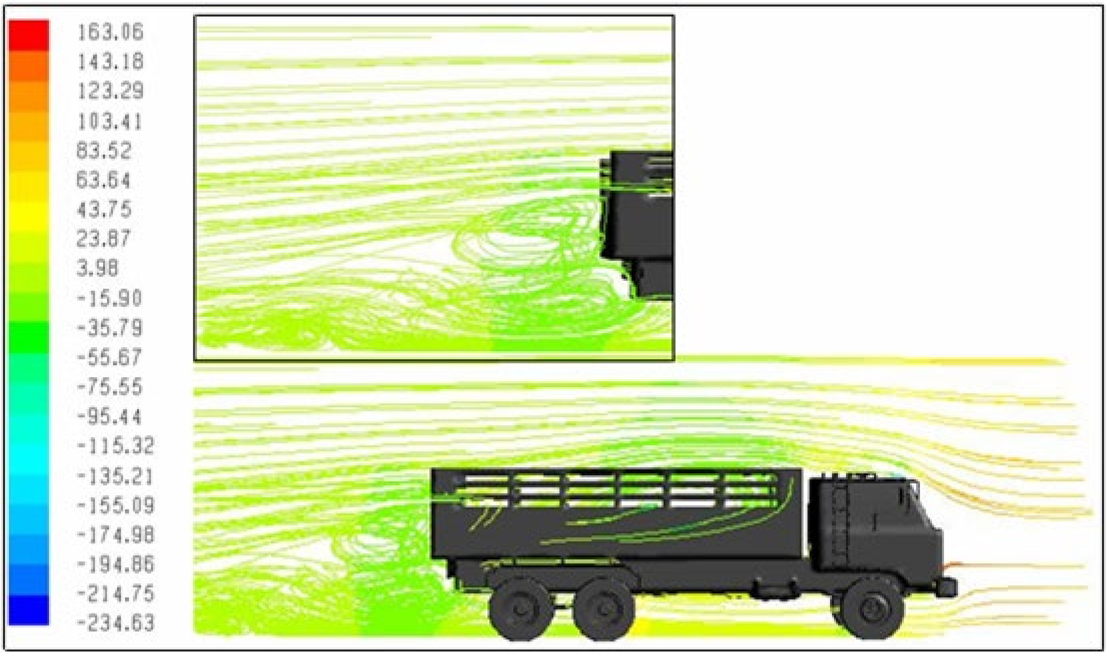
จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient: C_D) กับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number: Re) ที่ความเร็วการทดลองต่างๆสามารถนำมาแสดงได้ดังรูป



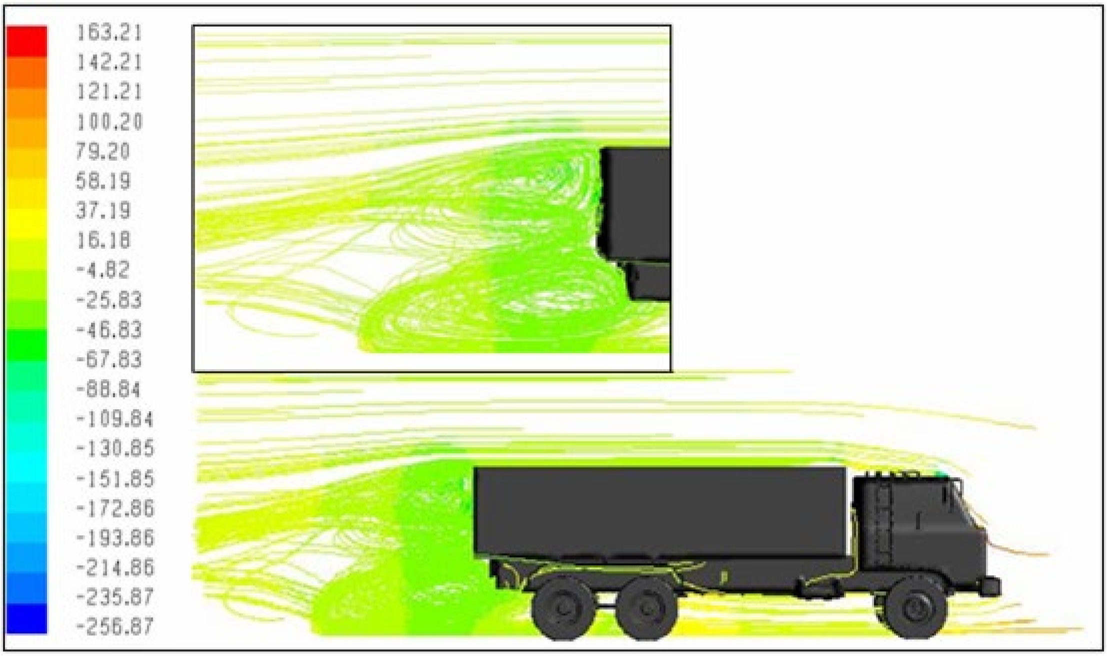
ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ

4.1.2 การกระจายตัวของความดัน

สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันของอากาศบริเวณรอบๆตัวรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถบรรทุก ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อหลังการปรับแต่งอุปกรณ์เสริมกระบะของรถบรรทุกโดยที่ทำให้การไหลราบเรียบมากขึ้น จะช่วยให้แรงต้านของรถบรรทุกลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความดันดังนี้



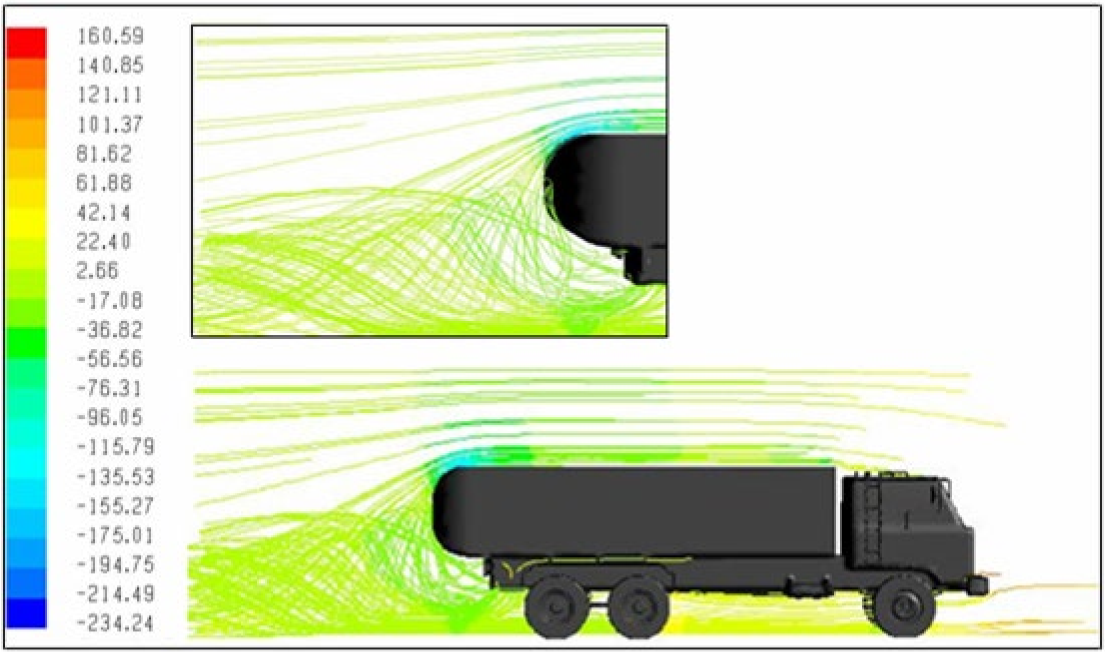
ภาพที่ 4.3 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 รถบรรทุกปกติ



ภาพที่ 4.4 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 2 ปิดกระบะบรรทุก

ภาพที่ 4.5 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 3 เปิดกระบะบรรทุก

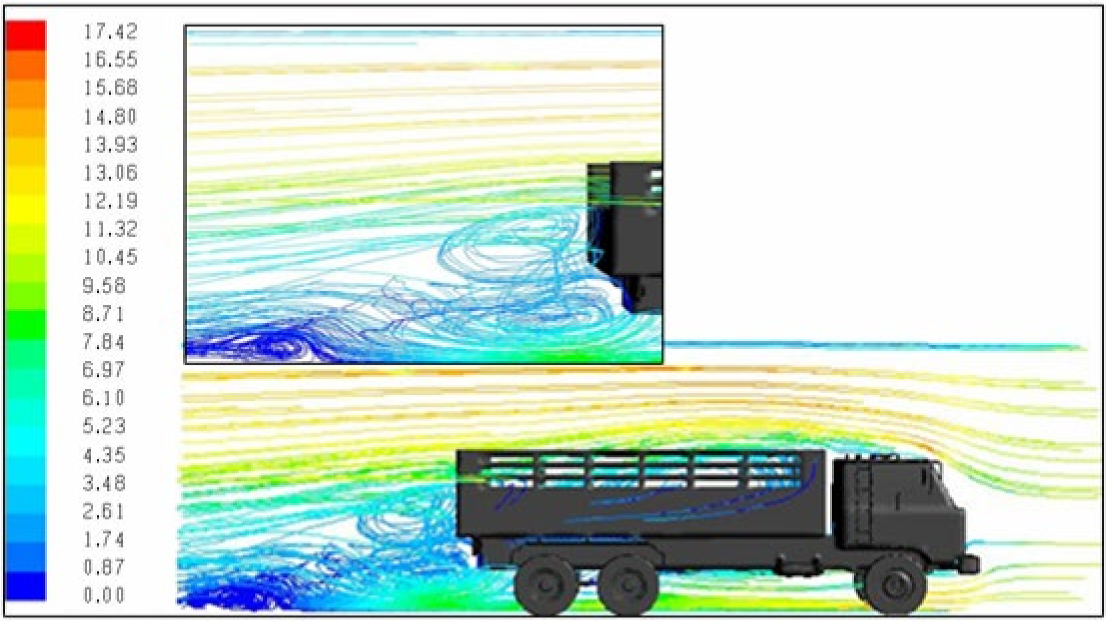
ภาพที่ 4.6 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 4 เสริมท้ายกระบะแบบเอียง



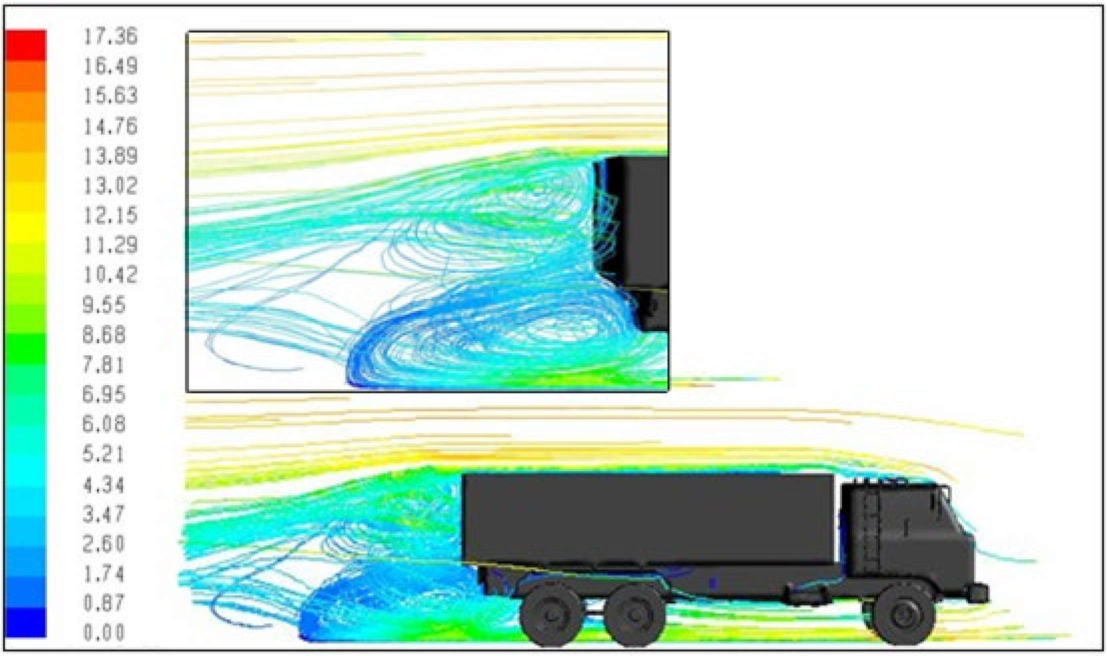
ภาพที่ 4.7 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 5 เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี

4.1.3 การกระจายตัวของความเร็ว

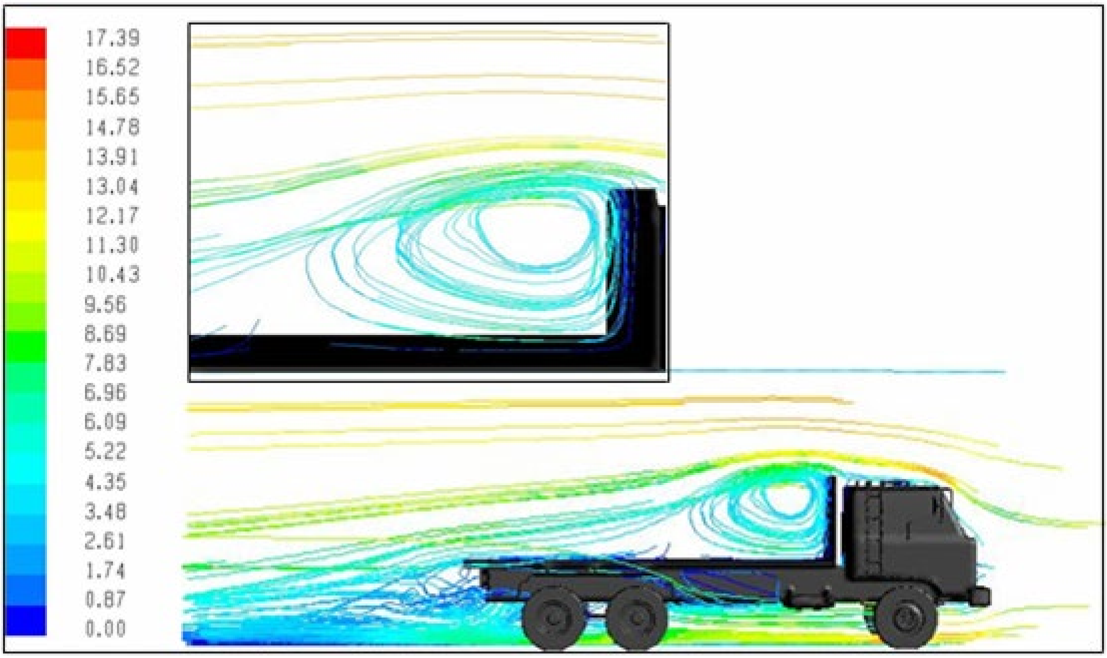
ความแปรปรวนของอากาศบริเวณรอบๆตัวรถนั้น ก็มีผลทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงขึ้นได้ หากความแปรปรวนของอากาศบริเวณกระบะบรรทุกและบริเวณท้ายรถมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดแรงฉุดบริเวณดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความเร็วดังนี้



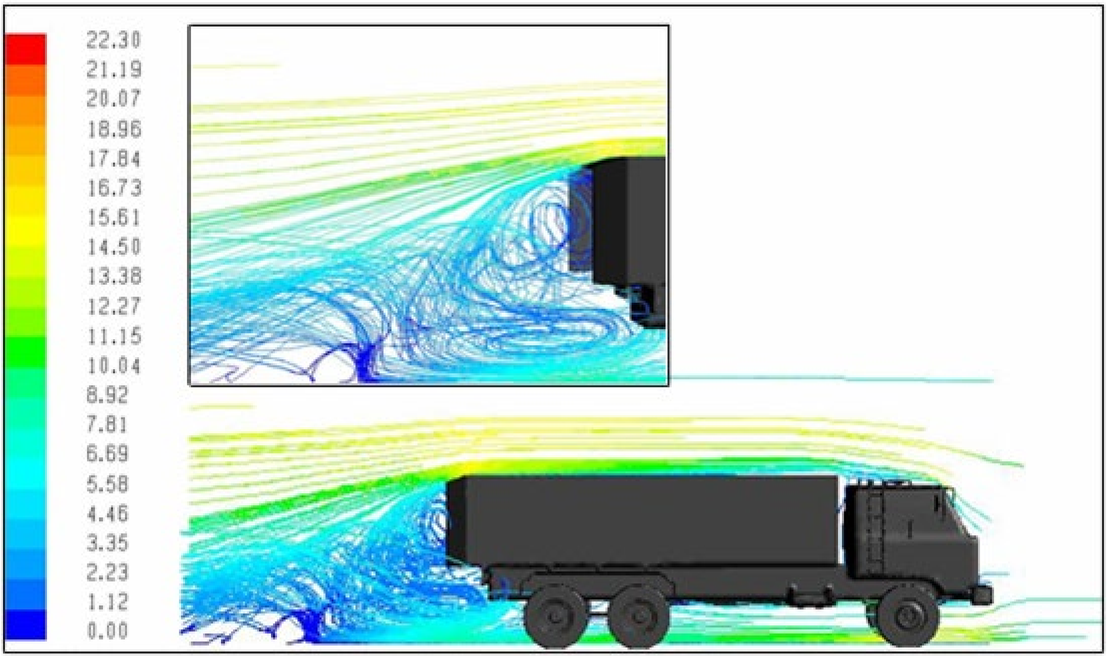
ภาพที่ 4.8 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 รถบรรทุกปกติ



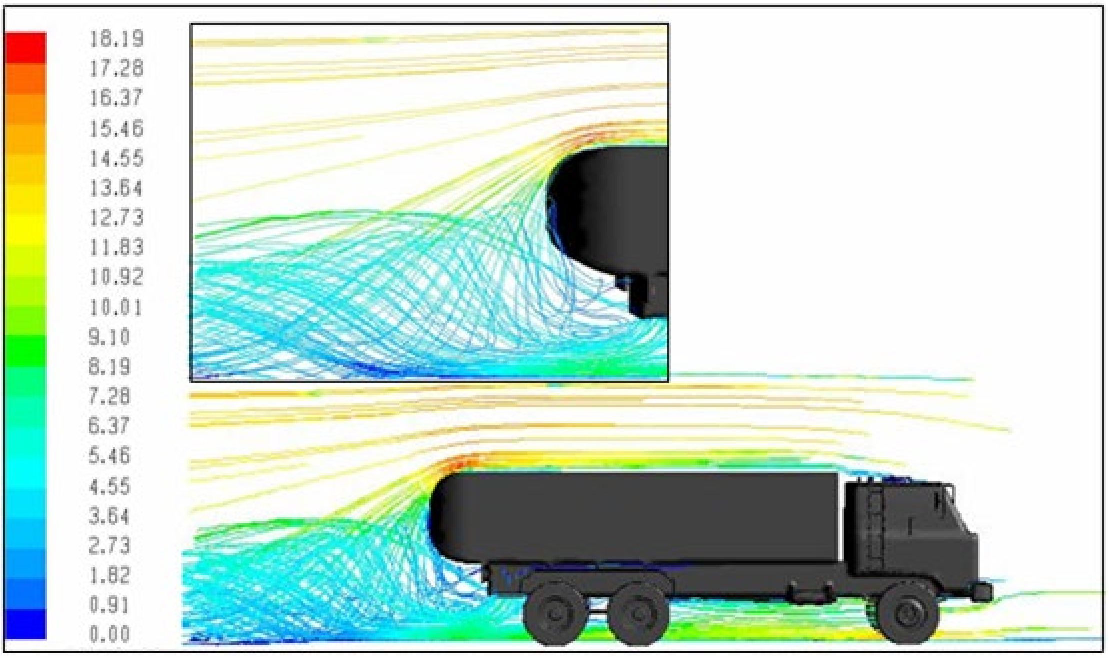
ภาพที่ 4.9 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 2 ปิดกระบะบรรทุก



ภาพที่ 4.10 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 3 เปิดกระบะบรรทุก



ภาพที่ 4.11 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 4 เสริมท้ายกระบะแบบเอียง



ภาพที่ 4.12 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 5 เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี

4.1.4 วิเคราะห์ผลกรณีเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันและความแปรปรวนของอากาศรอบบริเวณของรถบรรทุก โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความแปรปรวนของอากาศและเพิ่มความดันแตกต่าง

ส่วนท้ายของรถให้มีความใกล้เคียงกับความดันส่วนหน้าเพื่อลดความแตกต่างของความดันลง โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$F_D = \int_{front} p\cos\theta dA - \int_{back} p\cos\theta dA \tag{4.1}$$

กรณีที่ 1 รถบรรทุกปกติ ขนาดของแรงต้านจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ผลต่างของการกระจายตัวของความดันรอบๆบริเวณตัวรถและความแปรปรวนของอากาศที่ผ่านตัวรถ หากพิจารณาจากภาพที่ 4.3 สามารถแบ่งความแตกต่างของความดันออกเป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณห้องโดยสาร บริเวณกระบะบรรทุก และบริเวณท้ายรถ ซึ่งทั้ง 3 บริเวณมีแตกต่างของความดันอย่างชัดเจน โดยที่บริเวณห้องโดยสารจะมีความดันสูงกว่าบริเวณอื่นๆ ส่วนบริเวณกระบะบรรทุกและบริเวณท้ายรถจะมีความดันลดลง ผลต่างของความดันที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าการแยกตัว และพิจารณาภาพที่ 4.8 จากภาพที่บริเวณกระบะรถบรรทุกและบริเวณท้ายรถมีความแปรปรวนของอากาศสูงจึงเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน อากาศที่หมุนวนมีผลทำให้เกิดแรงต้านที่บริเวณท้ายรถเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเส้นระดับแถบสีความดันและความเร็วแล้ว หากต้องการลดค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกลงจะต้องลดค่าผลต่างของความดันบริเวณรอบๆตัวรถลง หรือลดความแปรปรวนของอากาศผ่านตัวรถ ดังนั้นจึงได้มีการปรับแต่งและติดตั้งอุปกรณ์เสริมขึ้นเพื่อต้องการลดแรงต้านของรถบรรทุก

กรณีที่ 2 ปิดกระบะบรรทุก ลักษณะการใช้งานของกรณีนี้เป็นการปิดหรือคลุมบริเวณกระบะบรรทุกซึ่งเป็นที่พบเห็นกันมากจึงต้องการนำมาวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงหรือเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีรถบรรทุกปกติ จากภาพที่ 4.4 และ 4.9 ลักษณะการไหลของอากาศมีความแปรปรวนบริเวณท้ายรถสูงขึ้นจากกรณีปกติ ผลจากการปิดบริเวณกระบะบรรทุกทำให้สามารถลดความแตกต่างของความดันบริเวณกระบะบรรทุกลงได้แต่ในขณะเดียวกันมีผลทำให้ความดันบริเวณท้ายรถมีค่าสูงขึ้นเกิดการหมุนวนมากกว่ากรณีปกติผลจากความแปรปรวนของอากาศและผลต่างของความดันที่สูงขึ้นบริเวณท้ายรถจึงทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่ามากขึ้นด้วย

กรณีที่ 3 เปิดกระบะบรรทุก จากการวิเคราะห์ผลของกรณีที่ 2 แสดงว่าส่วนที่เป็นกระบะบรรทุกนั้นมีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่มาก เพราะฉะนั้น จึงมีการทดลองทำการปรับแต่งบริเวณกระบะบรรทุกโดยนำเอาส่วนที่เป็นกระบะบรรทุกส่วนข้างออกคงเหลือแต่เพียงพื้นที่บรรทุก แล้วนำมาวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงจากกรณีที่ และกรณีที่ 2 จากภาพที่ 4.5 และ 4.10 จะเห็นได้ว่าการแปรปรวนของอากาศและความดันแตกต่างที่บริเวณท้ายรถมีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 แต่ก็ยังเกิดความแปรปรวนของอากาศและการหมุนวนของความดันอยู่ที่บริเวณระหว่างห้องโดยสารกับพื้นบรรทุกด้านหลัง อย่างไรก็ตามผลจากการทดสอบในกรณีนี้ทำให้ช่วย

ลดสัมประสิทธิ์แรงต้านลงซึ่งการทดสอบในกรณีนี้เป็นเพียงกรณีศึกษาเท่านั้น เพราะกระบะบรรทุกเป็นลักษณะเฉพาะไม่สามารถที่จะนำออกได้ เพียงแต่ได้นำมาพิจารณาประกอบการศึกษา อย่างไรก็ตามหากสามารถทำได้จริงขณะที่รถบรรทุกใช้งานจริงก็จะต้องมีสิ่งของที่บรรทุกด้วย สิ่งของดังกล่าวก็จะมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านไปด้วย

กรณีที่ 4 เสริมท้ายกระบะบรรทุกแบบเอียง การทดสอบในกรณีนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากกรณีที่ 2 เนื่องจากต้องการจะลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของตัวรถในขณะใช้งานจริง พิจารณาภาพที่ 4.6 และ 4.11 ลักษณะความแปรปรวนของอากาศและความแตกต่างของความดันบริเวณท้ายรถมีค่าลดลงมากทำให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีที่ 2 และยังมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงจากกรณีที่ 1และกรณีที่ 3 ด้วย หากนำผลจากการทดสอบจากกรณีนี้ไปเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 พิจารณาความแปรปรวนของอากาศและผลต่างของความดันบริเวณท้ายรถจะเห็นลักษณะการไหลคล้ายคลึงกันซึ่งไม่แตกต่างกันมากนักแต่เหตุที่สัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีปกติมีค่าสูงกว่านั้นเพียงเพราะยังเกิดการไหลวนของอากาศและผลต่างของความดันบริเวณกระบะบรรทุกนั้นซึ่งกรณีนี้ไม่เกิดขึ้นจึงมีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีนี้มีค่าลดลง

กรณีที่ 5 เสริมท้ายกระบะบรรทุกแบบทรงรี การทดสอบในกรณีนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากกรณีที่ 2 คล้ายกับกรณีที่ 4 ผลจากการทดสอบมีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเมื่อเปรียบกับทุกกรณีที่ทำการทดสอบมา พิจารณาจากภาพที่ 4.7 และ 4.12 ความแปรปรวนของอากาศมีลักษณะการไหลที่ราบเรียบจึงช่วยลดแรงฉุดบริเวณท้ายรถลดลงตามไปด้วยและการแยกตัวของความดันก็มีค่าน้อยลงเพราะฉะนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากการทดสอบในกรณีนี้จึงมีค่าต่ำสุด

4.1.5 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

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

ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบในกรณีต่าง ๆ จากบทที่ผ่านมา มาหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) เพื่อที่จะได้

ทราบค่าที่จริงของการลดหรือเพิ่มขึ้นของพลังงาน จากการติดตั้งอุปกรณ์เสริม หรือการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ

ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) จากทฤษฎีของลูสเชน โดยยึดกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบะปกติ นำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จาก

$$\Delta\overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{baseline} - \overline{C_D}(V_t)_{\mathrm{mod}\,ifile} \tag{4.2}$$

$\Delta\overline{C_D}(V_t)$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วที่ต้องการหา

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

$\overline{C_D}(V_t)_{\mathrm{mod}\,ifile}$ คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือตำแหน่งในการวิ่ง ที่ความเร็วที่ต้องการหา

ตารางที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่างๆ

ความเร็ว (km/hr)	สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนแปลงจากกรณีรถบรรทุกปกติ				
	รถบรรทุกปกติ	**ปิดกระบะบรรทุก**	**เปิดกระบะบรรทุก**	**เสริมท้ายกระบะแบบเอียง**	**เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี**
36	-	0.0941	-0.1528	-0.2013	-0.3317
54	-	0.1030	-0.1374	-0.1909	-0.3211
72	-	0.1078	-0.1293	-0.1854	-0.3151
90	-	0.1106	-0.1244	-0.1821	-0.3121
108	-	0.1121	-0.1214	-0.1804	-0.3104
126	-	0.1134	-0.1188	-0.1790	-0.3085
เฉลี่ย	**-**	**0.1068**	**-0.1306**	**-0.1865**	**-0.3164**

โดยค่าที่ได้จากคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีต่าง ๆ ที่คำนวณจากตารางที่ 4.8 นำไปหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการสิ้นเปลืองน้ำมันจากสมการ

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

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

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 6.41153 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาจากหัวข้อต่อไปนี้

การคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากสมการที่ 4.3 ค่าที่นำไปแทนในสมการนั้นทุกค่าสามารถหาได้ ยกเว้นอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ สามารถหาได้จากสมการ

$$SFC = \frac{\rho x Flowlate}{Horespower} \tag{4.4}$$

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (It/kW-hr)

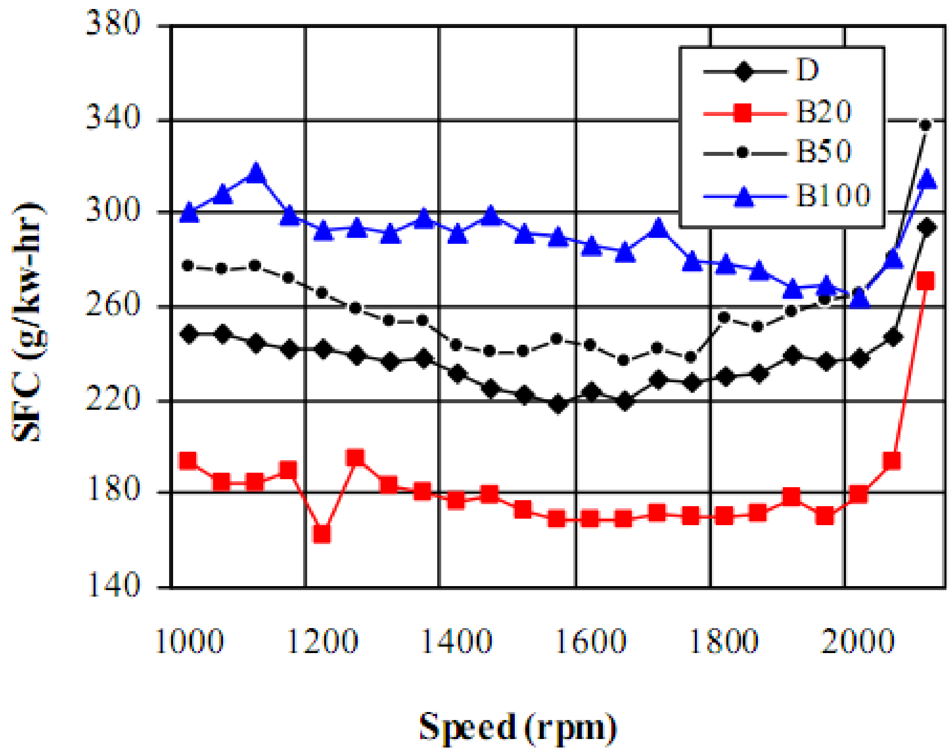
ρ คือความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.84 kg/It

Flow late คืออัตราการกินน้ำมัน (It/hr)

Horespower คือกำลังม้า (kW)

จากโครงการทดสอบการใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเรือประมงแบบรากเดี่ยว ของนายทวีศักดิ์ พนาสถิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์เรือประมง ซึ่งแต่เดิมส่วนใหญ่ใช้เครื่องยนต์ CUMMING ซึ่งมีการใช้เชื้อเพลิงปริมาณมาก จึงได้นำเอาเครื่องยนต์ HINO รุ่น EH700 ขนาด 168 แรงม้า มาใช้แทน

เนื่องด้วยเครื่องยนต์ที่นำมาใช้แทนดังกล่าวเป็นเครื่องยนต์ชนิดเดียวกับเครื่องยนต์รถบรรทุกขนาดจริง จึงได้นำเอาคุณสมบัติเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบมาใช้ในโครงงานนี้



ที่มา : นายทวีศักดิ์ พนาสถิตย์

ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากภาพที่ 4.13 เป็นกราฟการหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จึงนำมาแสดงเป็นตารางการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

ตารางที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

Speeds km/hr	**rev/min**	**SFC (kg/kW-hr)**	**SFC (liters/kW-hr)**
36	1,000	0.250	0.29
54	1,600	0.220	0.26
72	2,000	0.235	0.28
90	2,500	0.300	0.36
108	3,000	0.300	0.36
126	3,000	0.300	0.36

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

จากค่าที่ได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน และการทดสอบหา อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนั้น ต้องนำมาแทนค่าในสมการที่ 4.3 เพื่อที่จะหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ในที่นี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ดังนี้คือ

จากกรณีเสริมท้ายกระบะแบบทรงรี วิ่งที่ความเร็ว 36 km/hr การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันคือ จากสมการ 4.3

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

จาก $\Delta\overline{C_D}(V_{36km/hr})$ = 0.3318

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 6.41153 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

แทนค่าสมการที่ 4.3

$$\Delta\mu(V_{36km/hr}) = \frac{1.225 \times 1.072 \times 0.29 \times 10^{-3} \times 36^2 \times -0.3318 \times 6.41125}{0.85} = -1.24$$

liters/100km

ตารางที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากกรณีรถบรรทุกปกติ

(+ คือเพิ่ม, - คือลด)

ความเร็ว (km/hr)	**การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน จากกรณีรถบรรทุกปกติ (liters/100 km)**				
	รถบรรทุกปกติ	**ปิดกระบะบรรทุก**	**เปิดกระบะบรรทุก**	**เสริมท้ายกระบะแบบเอียง**	**เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี**
36	-	+0.35	-0.56	-0.75	-1.24
54	-	+0.77	-1.03	-1.43	-2.41
72	-	+1.55	-1.85	-2.66	-4.53
90	-	+2.08	-2.34	-3.43	-5.88
108	-	+3.88	-4.20	-6.25	-10.75
126	-	+5.35	-5.60	-8.44	-14.55

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย

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

ตารางที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย (+ คือเพิ่ม, - คือลด)

กรณี	ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)	คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิง
ปิดท้ายกระบะบรรทุก	+2.33	+7.76
เปิดกระบะบรรทุก	-2.59	-8.63
เสริมท้ายกระบะแบบเอียง	-3.82	-12.73
เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี	-6.56	-21.86

4.1.6 การวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน สามารถทราบถึงอัตราการเพิ่มหรือลดเงินทุนที่จะต้องจ่ายกับน้ำมันที่เราต้องใช้กับรถบรรทุกเล็กว่ามากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับสภาวะด้านการตลาดของซื้อขายน้ำมัน ซึ่งในปัจจุบันก็ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เชื้อเพลิงที่ใช้กับรถบรรทุกเล็กที่เราใช้อยู่เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ซึ่งกำลังจะหมดไป และยิ่งนับวันก็มีราคาที่สูงขึ้น หากกรณีที่ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงก็ย่อมเป็นผลดีต่อผู้ที่นำไปปฏิบัติ แต่ต้องคำนึงก่อนว่า ก่อนที่จะมีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการเสียเงินทุนกับการซื้ออุปกรณ์เพื่อมาปรับแต่งรูปทรงของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้น แต่ละยี่ห้อก็ย่อมมีราคาที่แตกต่างกัน แล้วแต่ละบุคคลที่จะนำมาใช้ โดยบางครั้งราคาที่เราซื้ออุปกรณ์เสริม หรืออุปกรณ์แต่งรถบรรทุกเล็กนั้นมาซึ่งเชื่อว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้จริง แต่ในบางครั้งอายุของรถก็อาจจะหมดก่อนเวลาที่จะคุ้มทุน ดังนั้นจากข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ทราบแล้วจากหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องมาคำนวณหาราคาที่ต้องจ่ายกับค่าน้ำมัน

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ของการคำนวณราคาน้ำมันที่ลดหรือเพิ่มจากราคาเดิมที่ต้องจ่ายจากกรณีรถบรรทุกปกติ ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับราคาอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ มาคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุน

โดยกำหนดที่ระยะเวลา 1 เดือน การใช้งานของรถบรรทุกขนาดใหญ่ในประเทศไทยโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 5,000 km และน้ำมันดีเซล ราคาลิตรละ 30.00 บาท (อ้างอิง 17 ตุลาคม 2555 ปตท.) ราคาอุปกรณ์เสริมที่ต้องจ่ายคิดที่ราคาท้องตลาด และเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก ความเร็วของรถที่ใช้งานคิดที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.11 มาใช้ในการคำนวณ

จากตารางที่ 4.11 นั้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงมากที่สุดคือ อุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี ลองมาคืออุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงโดยสามารถหาระยะเวลาคุ้มทุนได้ดังนี้

ต้นทุน ราคาอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี 10,000 บาท

ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถประหยัดน้ำมันได้ $6.56 \times \frac{5000}{100} = 328$ ลิตร

คิดเป็นเงิน $328 \times 30.00 = 9{,}840.00$ บาท

ดังนั้น ระยะเวลาคุ้มทุน คือ $\frac{10{,}000}{9{,}840.00} = 1.02$ **เดือน**

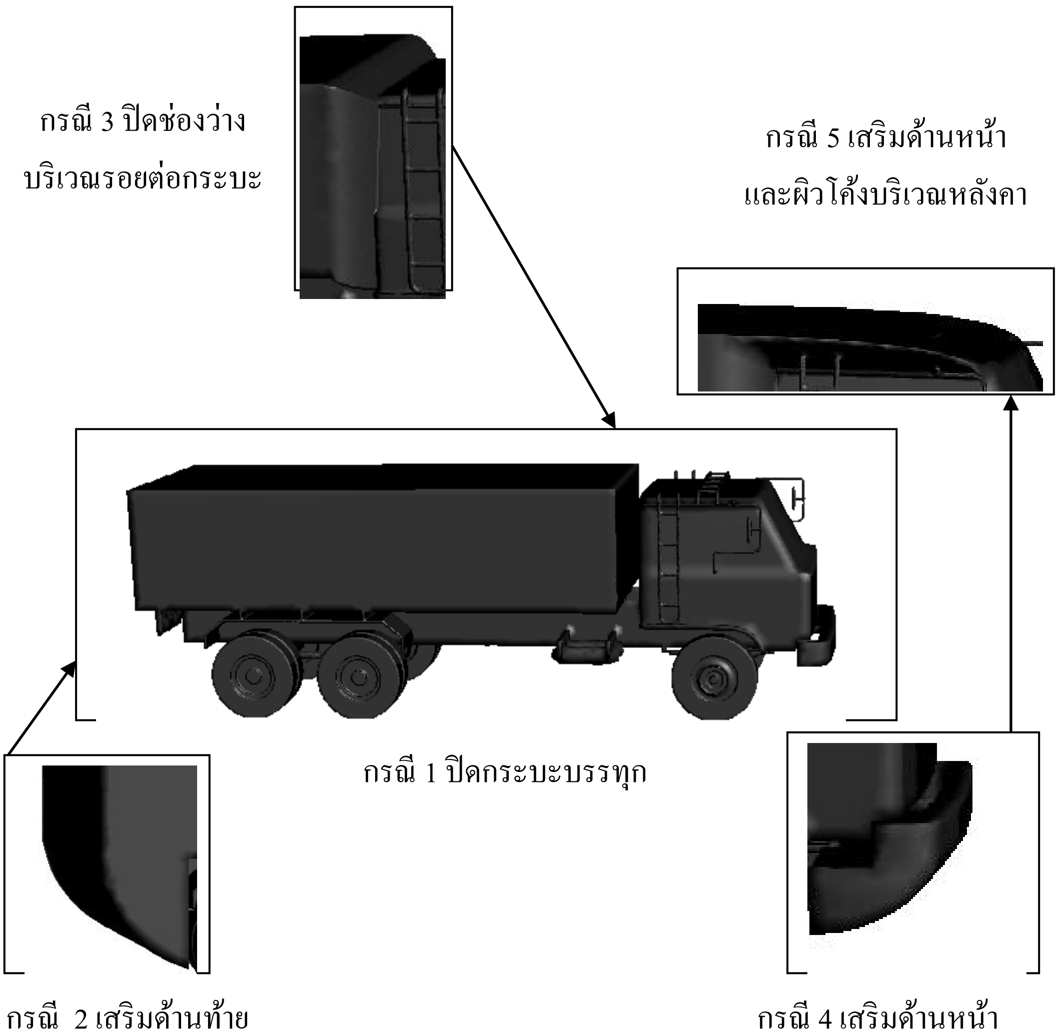
ต้นทุน ราคาอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียง 4,000 บาท

ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถประหยัดน้ำมันได้ $3.28 \times \frac{5000}{100} = 164$ ลิตร

คิดเป็นเงิน $164 \times 30.00 = 4{,}920.00$ บาท

ดังนั้น ระยะเวลาคุ้มทุน คือ $\frac{4{,}000}{4{,}920.00} = 0.81$ **เดือน**

4.2 ผลการทดสอบกรณีแบบจำลองรถบรรทุก ในลักษณะติดตั้งอุปกรณ์เสริม



ภาพที่ 4.14 รถบรรทุกติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ

4.2.1 ผลสัมประสิทธิ์แรงต้าน

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยในบทที่แล้ว ทำให้ได้ผลการคำนวณและนำมาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรถบรรทุกกรณีปกติ คือปิดกระบะบรรทุก กับรถบรรทุกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ซึ่งจะทำการทดสอบที่ความเร็วระหว่าง 10 m/s - 30 m/s ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 10 m/s

กรณี	**แรงต้าน (N)**	**พื้นที่ (m^2)**	**สัมประสิทธิ์แรงต้าน**	**การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อเปรียบกับกรณีที่1**
1	417.7964	6.4112	1.0638	-
2	410.9209	6.4112	1.0451	- 0.0187
3	394.3583	6.4112	1.0042	- 0.0596
4	398.3605	6.4112	1.0007	- 0.0631
5	380.2908	6.4112	0.9553	- 0.1085

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 15 m/s

กรณี	**แรงต้าน (N)**	**พื้นที่ (m^2)**	**สัมประสิทธิ์แรงต้าน**	**การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อเปรียบกับกรณีที่1**
1	917.0526	6.4190	1.0378	-
2	904.8359	6.4190	1.0228	- 0.0150
3	865.1233	6.4190	0.9791	- 0.0587
4	872.9123	6.4190	0.9746	- 0.0632
5	832.9864	6.4190	0.9300	- 0.1078

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s

กรณี	**แรงต้าน (N)**	**พื้นที่ (m^2)**	**สัมประสิทธิ์แรงต้าน**	**การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อเปรียบกับกรณีที่1**
1	1608.4515	6.4115	1.0239	-
2	1589.4322	6.4115	1.0126	- 0.0113
3	1516.2163	6.4115	0.9652	- 0.0587
4	1529.1750	6.4115	0.9603	- 0.0636
5	1459.0061	6.4115	0.9163	- 0.1076

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 25 m/s

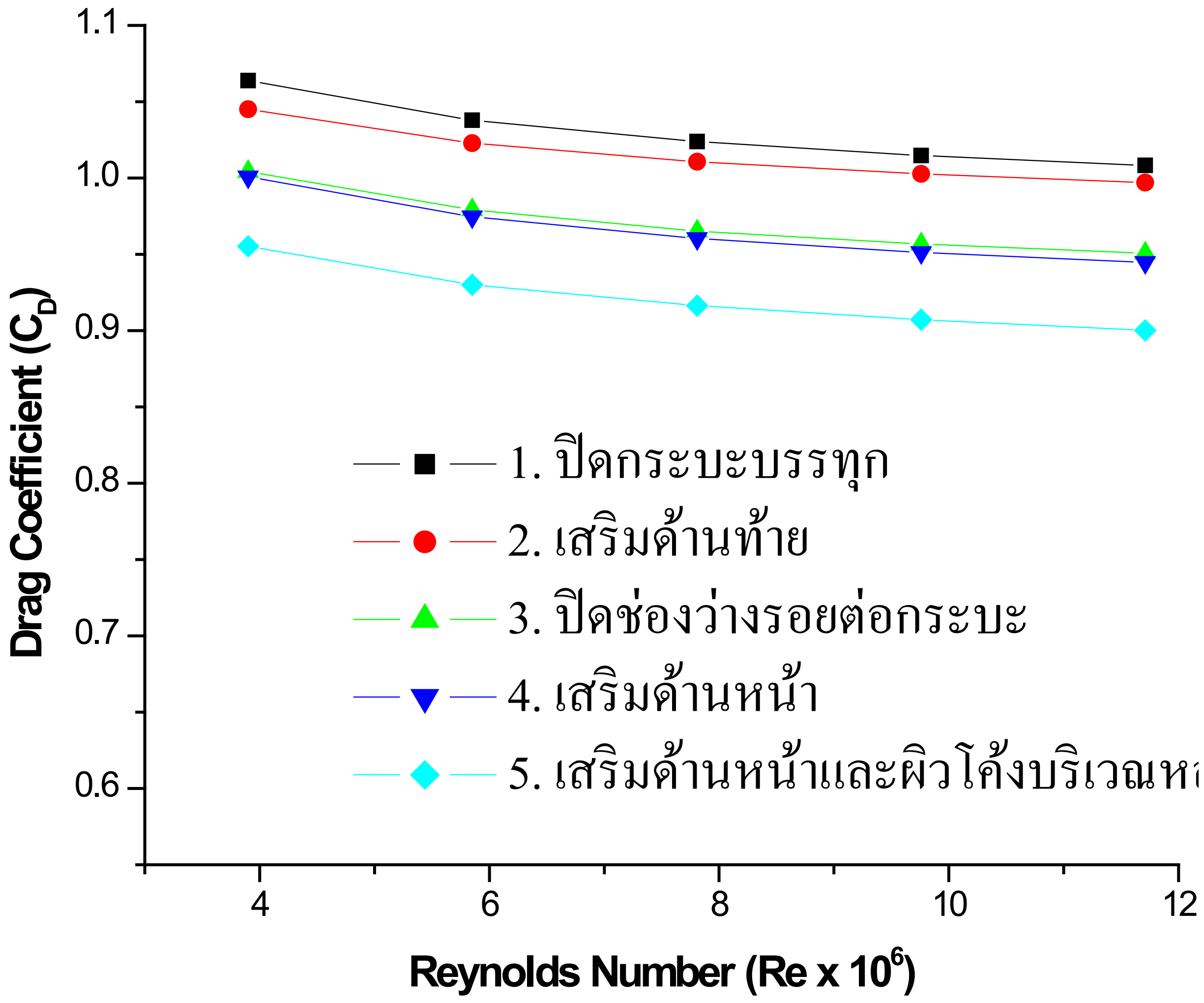
กรณี	**แรงต้าน (N)**	**พื้นที่ (m^2)**	**สัมประสิทธิ์แรงต้าน**	**การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อเปรียบกับกรณีที่1**
1	2490.7251	6.4990	1.0147	-
2	2464.0132	6.4990	1.0027	- 0.0120
3	2348.3464	6.4990	0.9567	- 0.0580
4	2366.6451	6.4990	0.9512	- 0.0635
5	2257.1218	6.4990	0.9072	- 0.1075

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบที่ความเร็ว 30 m/s

กรณี	**แรงต้าน (N)**	**พื้นที่ (m^2)**	**สัมประสิทธิ์แรงต้าน**	**การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อเปรียบกับกรณีที่1**
1	3563.7482	6.4990	1.0083	-
2	3527.9075	6.4990	0.9970	- 0.0133
3	3360.2822	6.4990	0.9507	- 0.0576
4	3384.9054	6.4990	0.9448	- 0.0635
5	3228.2939	6.4990	0.9001	- 0.1072

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความเร็วต่างๆ

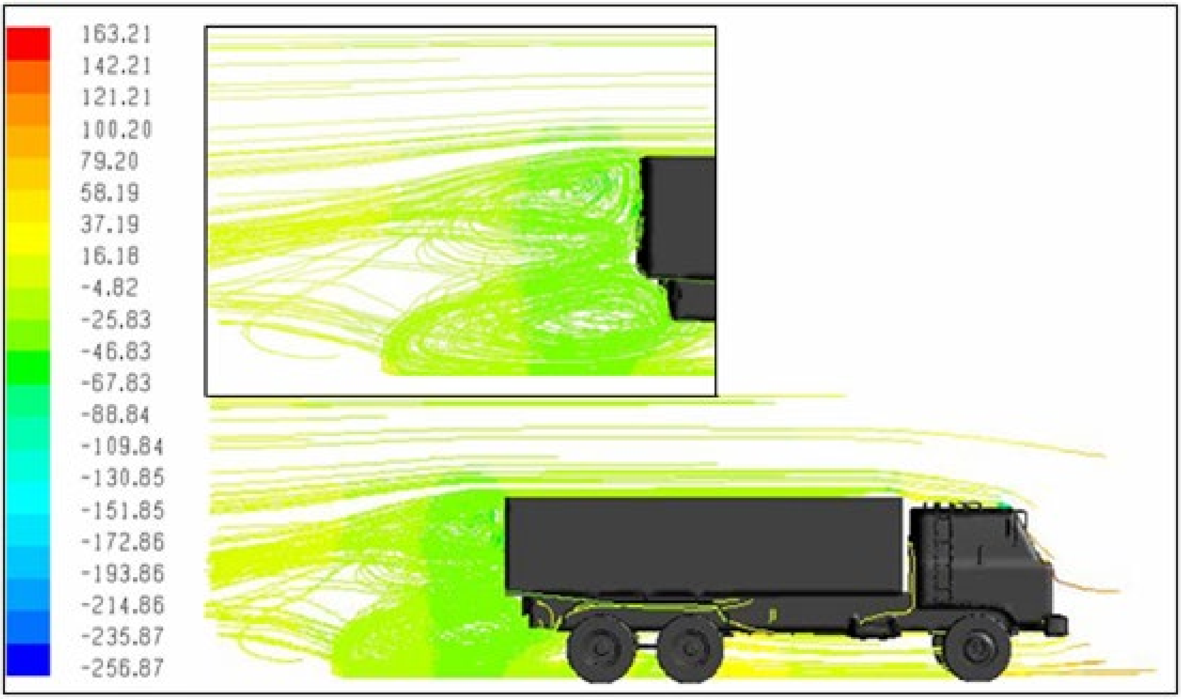
Re.	**case1**	**case2**	**case3**	**case4**	**case5**
3.90×10^6	1.0638	1.0451	1.0042	1.0007	0.9553
5.85×10^6	1.0378	1.0228	0.9791	0.9746	0.9300
7.81×10^6	1.0239	1.0106	0.9652	0.9603	0.9163
9.76×10^6	1.0147	1.0027	0.9567	0.9512	0.9072
11.71×10^6	1.0083	0.9970	0.9507	0.9448	0.9001
เฉลี่ย	**1.0353**	**1.0150**	**0.9711**	**0.9663**	**0.9217**



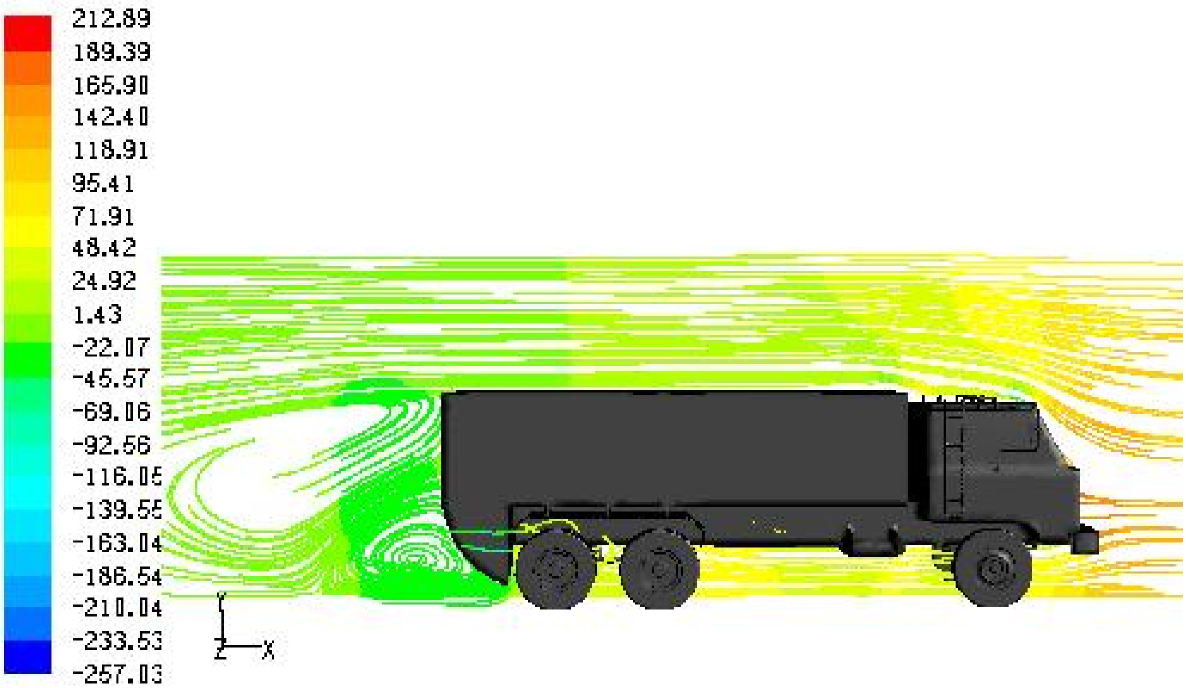
ภาพที่ 4.15 สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เรย์โนลด์นัมเบอร์ต่าง ๆ

4.2.2 ผลการกระจายตัวของความดัน

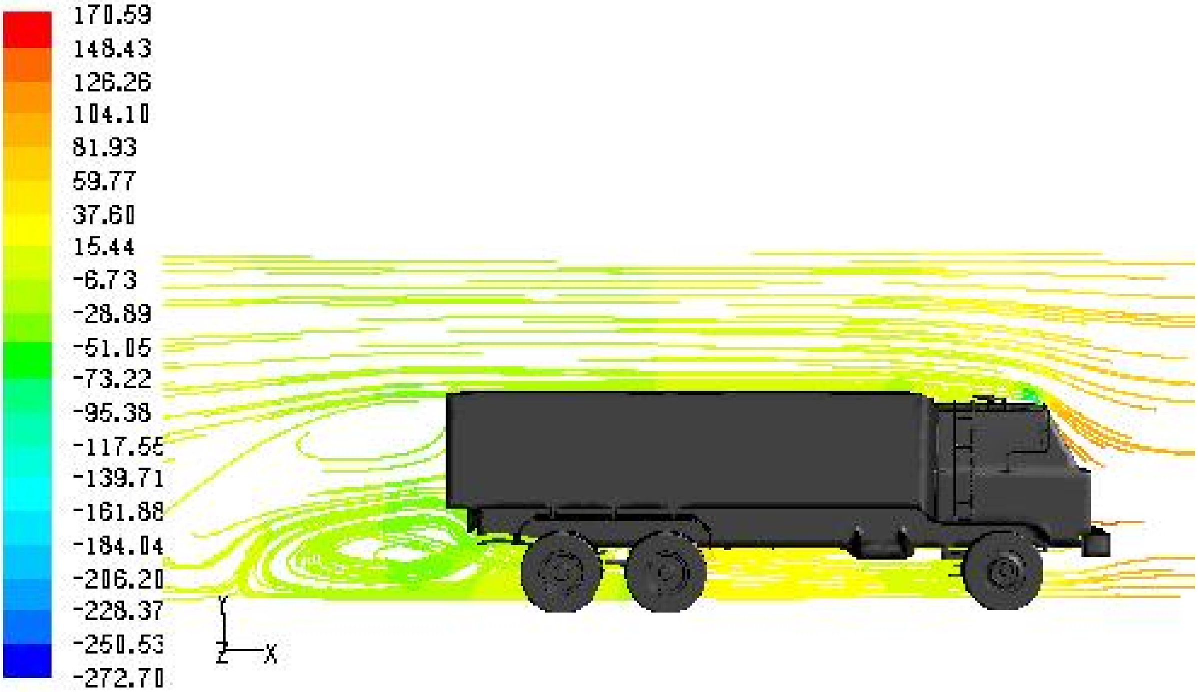
สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันของอากาศบริเวณรอบ ๆ ตัวรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ เพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถบรรทุก จะช่วยให้แรงต้านของรถบรรทุกลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความดัน ดังนี้



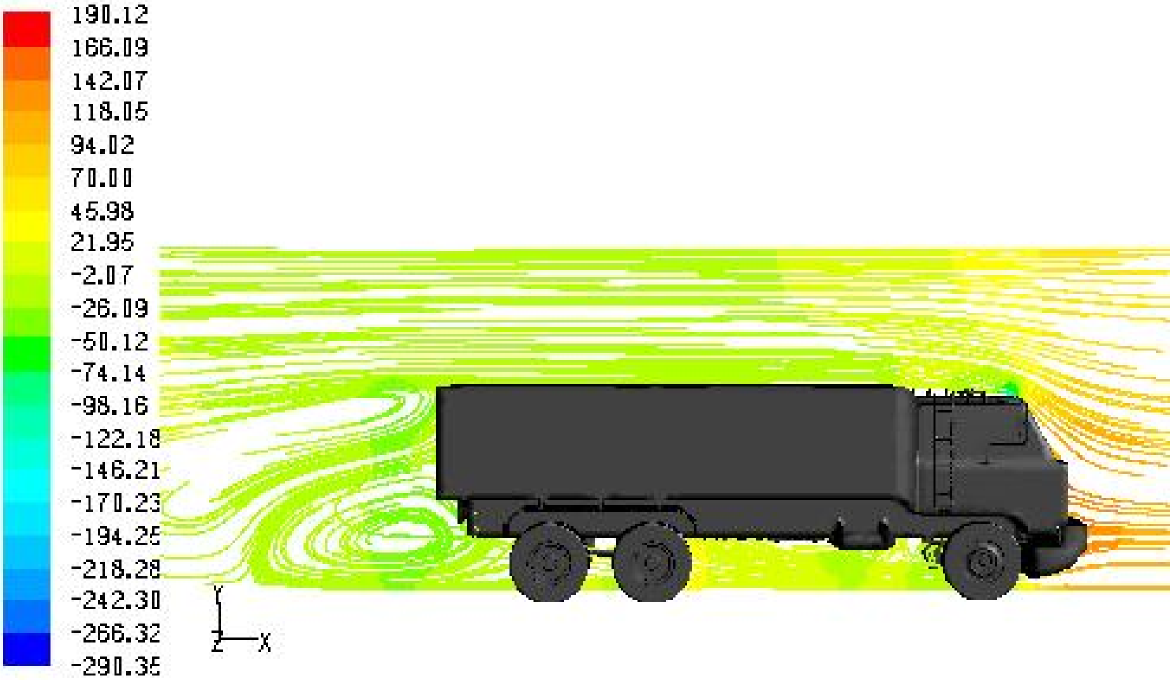
ภาพที่ 4.16 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 ปิดกระบะบรรทุก



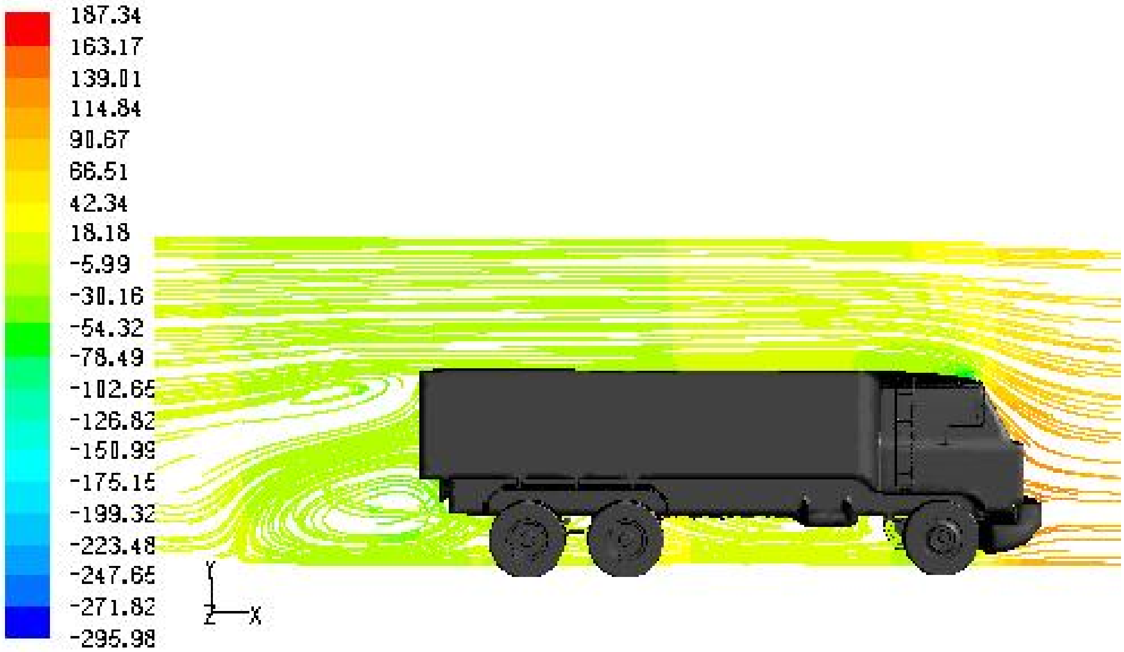
ภาพที่ 4.17 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 2 เสริมด้านท้าย



ภาพที่ 4.18 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 3 ปิดช่องว่างรอยต่อกระบะ



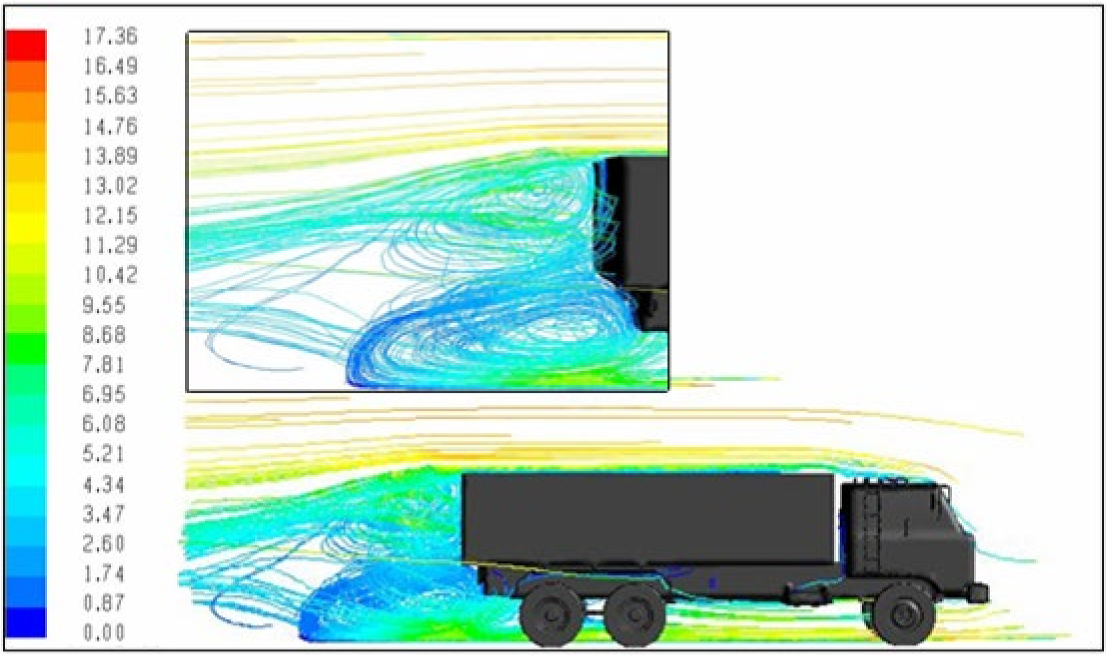
ภาพที่ 4.19 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 4 เสริมด้านหน้า



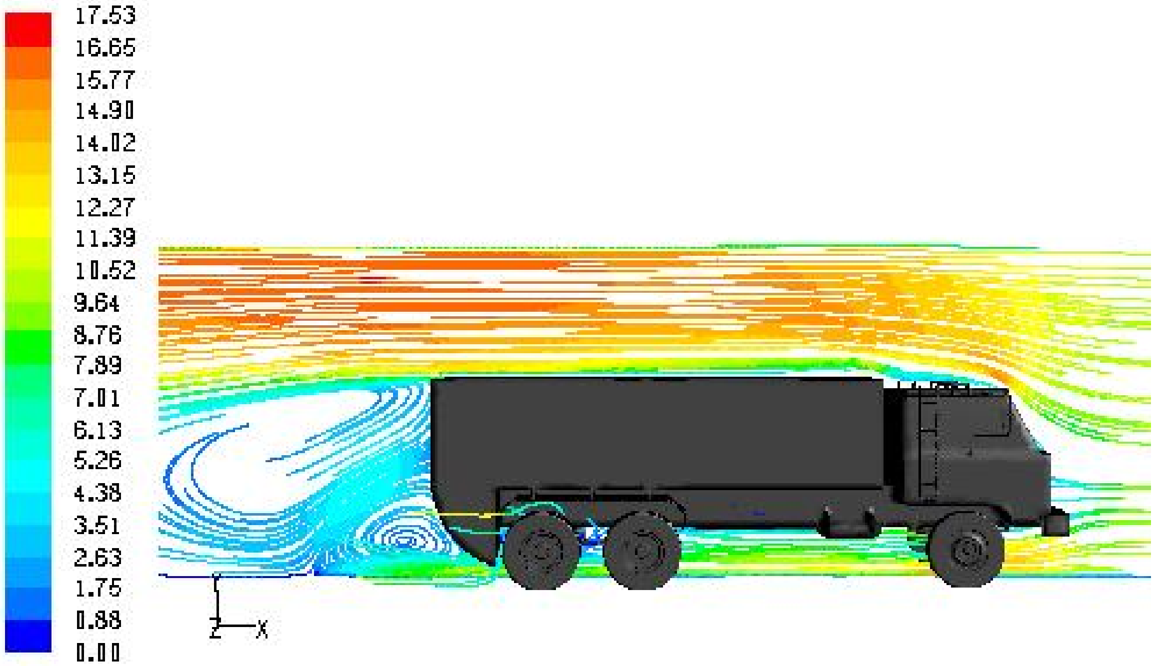
ภาพที่ 4.20 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 5 เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา

4.2.3 ผลการกระจายตัวของความเร็ว

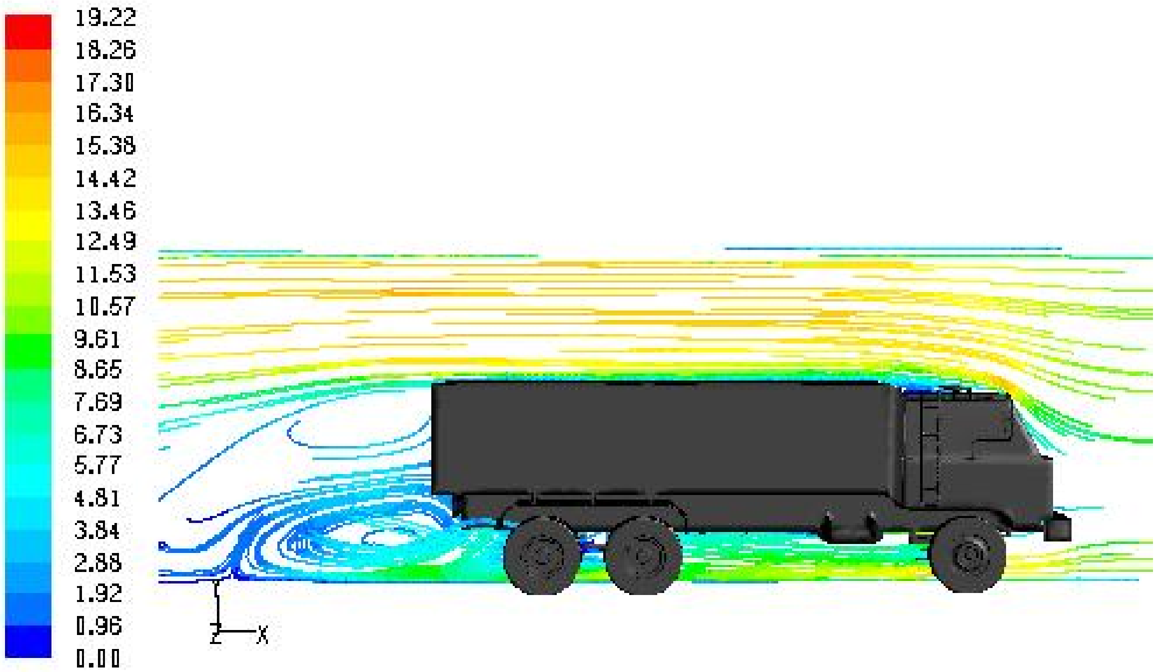
ความแปรปรวนของอากาศบริเวณรอบ ๆ ตัวรถบรรทุกนั้น ก็มีผลทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงต้านขึ้นได้ และเมื่อสมดุลการไหลของอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ความแปรปรวนของอากาศบริเวณปิดกระบะบรรทุกและบริเวณท้ายรถมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดแรงฉุดบริเวณดังกล่าวขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความเร็วดังนี้



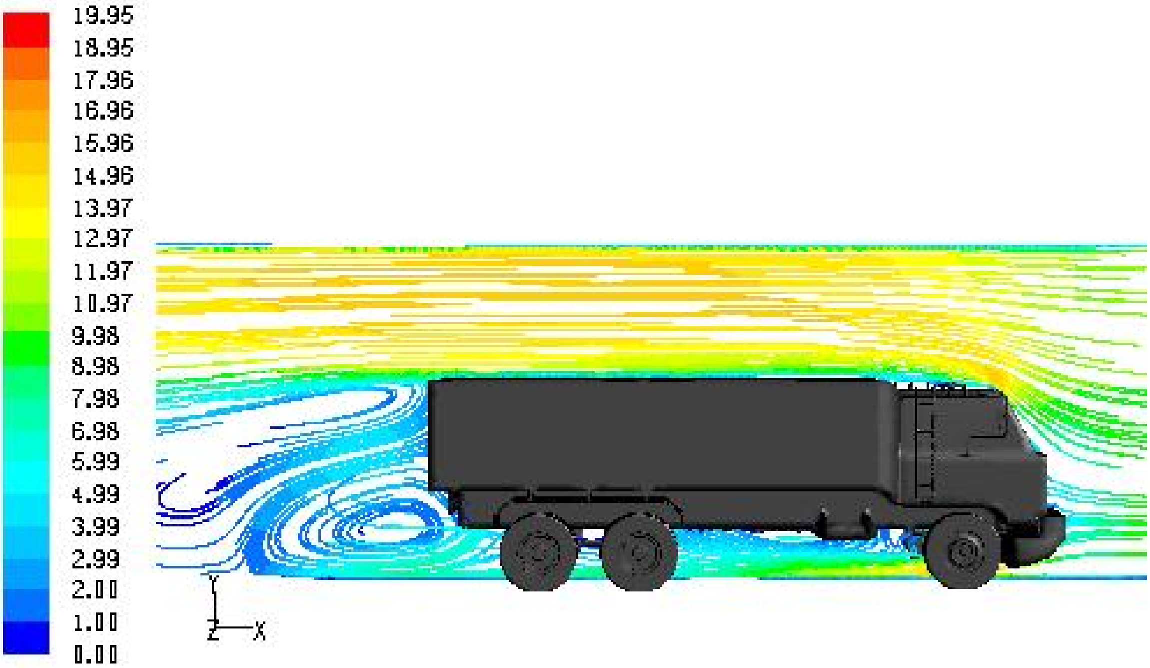
ภาพที่ 4.21 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 ปิดกระบะบรรทุก



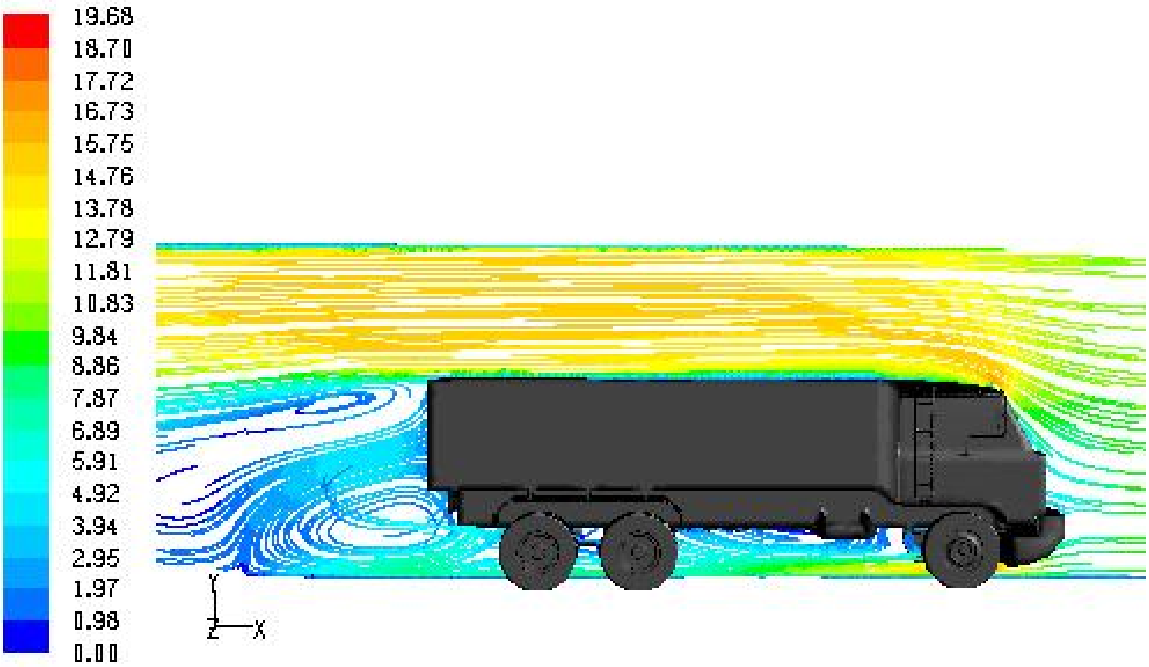
ภาพที่ 4.22 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 2 เสริมด้านท้าย



ภาพที่ 4.23 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 3 ปิดช่องว่างรอยต่อกระบะ



ภาพที่ 4.24 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 4 เสริมด้านหน้า



ภาพที่ 4.25 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 5 เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา

4.2.4 ผลการวิเคราะห์รูปร่างอากาศพลศาสตร์

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันและความแปรปรวนของอากาศรอบบริเวณของรถบรรทุก โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความแปรปรวนของอากาศและเพิ่มความดันแตกต่าง ส่วนท้ายของรถให้มีความใกล้เคียงกับความดันส่วนหน้า เพื่อลดความแตกต่างของความดันลง โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ (4.1)

กรณีที่ 1 ปิดกระบะบรรทุก

ลักษณะการใช้งานของกรณีนี้เป็นการปิดหรือคลุมบริเวณกระบะบรรทุก จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากเส้นระดับแถบสีความดันและความเร็ว ขนาดของแรงต้านจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ผลต่างของการกระจายตัวของความดันรอบ ๆ บริเวณตัวรถและความแปรปรวนของอากาศที่ผ่านตัวรถ สามารถแบ่งความแตกต่างของความดันออกเป็น 3 บริเวณความดัน คือ 1.บริเวณห้องโดยสาร 2.บริเวณปิดกระบะบรรทุก และ 3. บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดัน คือ ส่วนบริเวณห้องโดยสารจะมีความดันที่ค่อย ๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมของอากาศ และเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่งตำแหน่งบริเวณปิดกระบะ พิจารณาจากภาพที่ 4.16 และ 4.21 (กรณี 1 ปกติปิดกระบะบรรทุก) ที่ตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารถึงบริเวณปิดกระบะบรรทุก จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (Separation) และในบริเวณส่วนท้ายรถจะสังเกตเห็นเส้นการไหลแยกที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนของกระแสอากาศหมุนวน (Vortice) เกิดการสูญเสีย (Loss) ทางของไหลพลศาสตร์ ซึ่งแกนของกระแสหมุนวนนี้จะตั้งฉากกับการไหลภายนอก ทำให้การหมุนวนของอากาศก็ลดลงน้อยลงเช่นกัน เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารที่ค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณปิดกระบะ จนมาถึงบริเวณส่วนท้ายกระบะ อากาศหมุนวนนี้เมื่อประทะกับกระบะท้ายจะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง การไหลของอากาศชั้นนอกจะมีความเร่งมากกว่าการไหลของชั้นในเพราะอากาศที่อยู่ในชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (Viscosity) จึงมีความดันย้อนกลับน้อยส่งผลให้จุดที่เกิดการแยกตัว (Separation) จะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ผลของความดันด้านท้ายรถที่มีค่าสูงขึ้นและผลต่างของการกระจายตัวของความดันที่สูงขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และขนาดของการกระจายตัวของความเร็วของอากาศด้านพื้นล่างของรถสูงกว่าด้านบน มีลักษณะขนานไปกับแกนของกระแสอากาศหมุนวน

กรณีที่ 2 เสริมด้านท้าย

แนวคิดการการออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อนำทดสอบในกรณีนี้ คือ การเพิ่มรูปทรงส่วนบริเวณท้ายกระบะด้านล่างเป็นรูปทรงลักษณะส่วนโค้งครึ่งวงกลม (Half - Sphere) ซึ่งเป็นรูปทรงที่สามารถช่วยลดแรงต้านได้ดีอีกแบบหนึ่ง

พิจารณาจากภาพที่ 4.17 และ 4.22 ลักษณะการไหลของอากาศกรณีนี้จะคล้ายกับกรณีที่ 1 ในส่วนของบริเวณห้องโดยสารเรื่อยมาจนถึงบริเวณส่วนปิดกระบะ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ที่แตกต่างกันในส่วนของบริเวณท้ายรถ กล่าวคือ ความดันอากาศบริเวณด้านท้ายรถเพิ่มขึ้น ทำให้แรงฉุดอากาศค่อยๆลดลง การไหลย้อนกลับที่เรียกว่าการเกิดการแยกตัว (Separation) จะเกิดบริเวณส่วนล่างของท้ายรถจนถึงพื้นด้านล่างที่มีการเพิ่มอุปกรณ์เสริม การหมุนวนของอากาศ (Vortice) หรือการไหลแบบปั่นป่วนนั้น จะเกิดขึ้นน้อยลงกว่ากรณีแรก จากแผนภาพความดันแทบจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของเส้นระดับความดันมากนัก แต่ผลของต่างของการกระจายตัวของความดันยังคงเพิ่มขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงไม่มากนักเช่นเดียวกัน

กรณีที่ 3 ปิดช่องว่างรอยต่อกระบะ

แนวคิดการการออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อนำทดสอบในกรณีนี้ เนื่องจากการเพิ่มอุปกรณ์เสริมบริเวณท้ายกระบะ ช่วยทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงไม่มากนัก จากผลวิเคราะห์ของกรณีที่ 1 จึงมีแนวคิดที่จะปิดช่องว่างระหว่างห้องโดยสารกับบริเวณปิดกระบะบรรทุก เนื่องจากพิจารณาเห็นว่ายังมีการหมุนวนเนื่องจากการแยกตัวของกระแสอากาศทำให้เกิดแรงฉุดบริเวณดังกล่าวที่ศึกษา ดังนั้นเพื่อลดช่องว่างของการไหลของอากาศที่จะผ่านเข้าไป (Lead) ทำให้โมเมนตัมของอากาศทิศทางที่ไหลเข้าเกิดการเปลี่ยนแปลง และพิจารณาจากภาพที่ 4.18 และ4.23 ผลที่ได้จากการศึกษาคือการไหลย้อนกลับหรือเรียกว่าการเกิดการแยกตัว (Separation) และระยะการหมุนวนส่วนท้ายรถสั้นลง ลดความแตกต่างของการกระจายตัวของความดัน สัมประสิทธิ์ แรงต้านจึงลดลงจากทั้งสองกรณีที่ผ่านมา

กรณีที่ 4 เสริมด้านหน้า

การทดสอบในกรณีนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากกรณีที่ 2 กล่าวคือ แนวคิดในการออกแบบเกี่ยวกับแรงต้านของรูปทรง อาจกล่าวได้ว่าขนาดของภาคตัดของส่วนหน้าที่ใหญ่ที่สุดจะมีอิทธิพลต่อแรงต้านรวมรองลงมาจากส่วนหลักก็คือแรงต้านจากส่วนท้ายของรูปทรงซึ่งเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นมากในการออกแบบพื้นผิว และรูปร่างทรงกลมที่เหมาะสมก็คือรูปร่างแบบ(Half - Sphere) พิจารณาจากภาพที่ 4.19 และ 4.24 ลักษณะการไหลของอากาศที่ไหลผ่านส่วนห้องโดยสาร ในกรณีนี้ เนื่องจากมีการเสริมส่วนด้านหน้าของรถทำให้ความเร็วของอากาศด้านช่วงล่างลดลงและความดันส่วนด้านหน้ารถสูงขึ้น และเมื่ออากาศไหลผ่านไปจนถึงบริเวณปิดกระบะบรรทุก จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ไปจนถึงบริเวณส่วนท้ายรถความแตกต่างของการกระจายตัวของความดัน มีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ 3 แต่บริเวณความแตกต่างของความดันในแต่ละส่วนมีความสมดุลกันมากขึ้น กระแสการหมุนวนของอากาศมีการเกิดลดลง ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงลดน้อยลงตามไปด้วย

กรณีที่ 5 เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา

แนวคิดการการออกแบบอุปกรณ์เสริมเพื่อนำทดสอบในกรณีนี้ เนื่องจากการเพิ่มผิวส่วนโค้งบริเวณหลังคารถ รูปทรงลักษณะ หยดน้ำแบ่งครึ่ง (Streamline Half - Body at a Ground Plane) รูปทรงนี้ถ้ามีลักษณะยาวเกินไป ถึงแม้ว่าจะช่วยลดอากาศที่หมุนวนได้จนเหลือน้อยมากที่สุดก็ตาม แต่แรงฉุดของบริเวณผิวสัมผัสของหยดน้ำกับแพนอากาศ จะทำให้เกิดแรงต้านอากาศเพิ่มมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามวัตถุทรงหยดน้ำที่สั้นเกินไปจะมีอากาศหมุนวนบริเวณส่วนท้ายมาก ถึงแม้แรงฉุดบริเวณ

ผิวสัมผัสจะน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้เหมาะสมกับพื้นที่ของบริเวณรถหรือจำกัดความได้ว่าต้องเป็นรูปร่างเพรียวลม ซึ่งเป็นรูปทรงที่ดีที่สุด พิจารณาจากภาพที่ 4.20 และ 4.25 ลักษณะการไหลสมดุลกันมากขึ้น ความดันแตกต่างส่วนท้ายของรถให้มีความใกล้เคียง กับความดันส่วนหน้ามากที่สุด ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านหลังคารถมีความเร็วสูงกว่าส่วนล่างของรถ ลักษณะการไหลแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนต่าง ๆ ตั้งแต่บริเวณห้องโดยสาร บริเวณปิดกระบะบรรทุก และบริเวณท้ายรถน้อยที่สุด มีความสมดุลของการไหลมากขึ้น ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีนี้ต่ำกว่าทุกกรณีที่ได้กล่าวมา

อนึ่งการออกแบบโดยการเพิ่มอุปกรณ์เสริมในแต่ละกรณีเนื่องจากรถบรรทุกที่มีผลแรงต้านอากาศพลศาสตร์ที่ต่ำมากไม่สามารถออกแบบแยกพิจารณาเป็นชิ้นๆได้ แต่ต้องพิจารณาแรงต้านรวมเป็นสำคัญ และปัจจัยอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4.2.5 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ผลที่ได้จาการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) จากทฤษฎีของลูสเชน โดยยึดกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบะปกติ นำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จาก

$$\Delta\overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{baseline} - \overline{C_D}(V_t)_{\mathrm{mod}\,ifile} \tag{4.5}$$

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

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

$\overline{C_D}(V_t)_{\mathrm{mod}\,ifile}$ คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงหรือตำแหน่งในการวิ่ง ที่ความเร็วที่ต้องการหา

ตารางที่ 4.18 ผลการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีติดตั้งอุปกรณ์เสริมแบบต่าง ๆ

ความเร็ว (km/hr)	**สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนแปลงจากกรณีรถบรรทุกปกติ**				
	กรณีที่ 1	**กรณีที่ 2**	**กรณีที่ 3**	**กรณีที่ 4**	**กรณีที่ 5**
36	-	0.0187	0.0596	0.0631	0.1085
54	-	0.0150	0.0587	0.0632	0.1078
72	-	0.0133	0.0587	0.0636	0.1076
90	-	0.0120	0.0580	0.0635	0.1075
108	-	0.0113	0.0576	0.0635	0.1072
เฉลี่ย	-	0.0140	0.0585	0.0633	0.1077

โดยค่าที่ได้จากคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีต่าง ๆ ที่คำนวณจากตารางที่ 4.17 นำไปหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงการสิ้นเปลืองน้ำมันจากสมการ

$$\Delta\mu(V_t) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_t^{\,2}\Delta\overline{C_D}(V_t)A}{0.85} \tag{4.6}$$

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

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 6.41153 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องคำนวณหาจากหัวข้อต่อไปนี้

การคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากสมการที่ 4.6 ค่าที่นำไปแทนในสมการนั้นทุกค่าสามารถหาได้ ยกเว้นอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ สามารถหาได้จากสมการ

$$SFC = \frac{\rho x Flowlate}{Horespower} \tag{4.7}$$

SFC คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (lt/kW-hr)

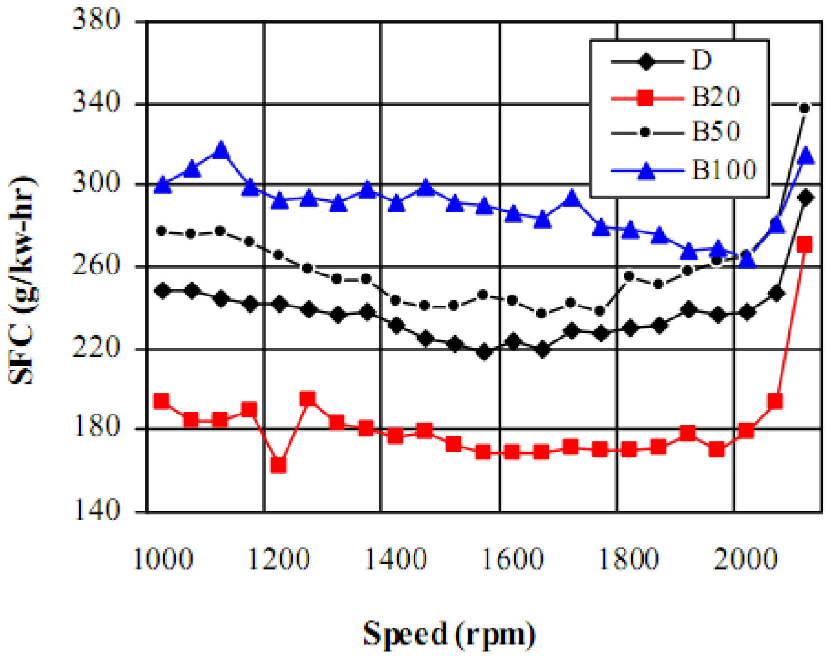
ρ คือความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.84 kg/lt

Flow late คืออัตราการกินน้ำมัน (lt/hr)

Horespower คือกำลังม้า (kW)

จากโครงการทดสอบการใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเรือประมงแบบรากเดี่ยว ของนายทวีศักดิ์ พนาสถิตย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลการใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์เรือประมง ซึ่งแต่เดิมส่วนใหญ่ใช้เครื่องยนต์ CUMMING ซึ่งมีการใช้เชื้อเพลิงปริมาณมาก จึงได้นำเอาเครื่องยนต์ HINO รุ่น EH700 ขนาด 168 แรงม้า มาใช้แทน

เนื่องด้วยเครื่องยนต์ที่นำมาใช้แทนดังกล่าวเป็นเครื่องยนต์ชนิดเดียวกับเครื่องยนต์รถบรรทุกขนาดจริง จึงได้นำเอาคุณสมบัติเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบมาใช้ในโครงงานนี้



ที่มา : นายทวีศักดิ์ พนาสถิตย์

ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากภาพที่ 4.26 เป็นกราฟการหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC) ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จึงนำมาแสดงเป็นตารางการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

ตารางที่ 4.19 ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ(SFC) (นายทวีศักดิ์ พนาสถิต)

Speeds km/hr	**rev/min**	**SFC (kg/kW-hr)**	**SFC (liters/kW-hr)**
36	1,000	0.250	0.29
54	1,600	0.220	0.26
72	2,000	0.235	0.28
90	2,500	0.300	0.36
108	3,000	0.300	0.36
126	3,000	0.300	0.36

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

จากค่าที่ได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน และการทดสอบหา อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนั้น ต้องนำมาแทนค่าในสมการที่ 4.6 เพื่อที่จะหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ในที่นี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ดังนี้คือ

จากกรณีเสริมท้ายกระบะแบบทรงรี วิ่งที่ความเร็ว 36 km/hr การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันคือ จากสมการ 4.6

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

จาก

$\Delta\overline{C_D}(V_{36km/hr}) = 0.1085$

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m^3

UCF คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 6.41125 m^2

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

แทนค่าสมการที่ 4.6

$$\Delta\mu(V_{36km/hr}) = \frac{1.225 \times 1.072 \times 0.29 \times 10^{-3} \times 36^2 \times 0.1085 \times 6.41125}{0.85} = 0.4 \text{ liters/100km}$$

ตารางที่ 4.20 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากกรณีรถบรรทุกปกติปิดกระบะบรรทุก (- คือลด)

ความเร็ว (km/hr)	**การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน จากกรณีรถบรรทุกปกติปิดกระบะบรรทุก (liters/100 km)**				
	กรณีที่ 1	**กรณีที่ 2**	**กรณีที่ 3**	**กรณีที่ 4**	**กรณีที่ 5**
36	-	-0.03	-0.22	-0.23	-0.40
54	-	-0.11	-0.44	-0.47	-0.82
72	-	-0.19	-0.84	-0.92	-1.56
90	-	-0.34	-1.66	-1.85	-3.14
108	-	-0.47	-2.42	-2.67	-4.51

ผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย

ในการขับขี่รถบรรทุกนั้นส่วนมากแล้วจะขับขี่บนถนนทุก ๆ แบบ เนื่องจากการบรรทุกสิ่งของ หรือคนต้องการที่จะไปให้ถึงจุดหมายทุกที่ แม้แต่เส้นทางที่ยากลำบาก แต่จะศึกษาเฉพาะเส้นทางเรียบ และในการวิ่งในเส้นทางเรียบที่ใช้ระยะทางไกล ก็จะวิ่งด้วยความเร็วแตกต่างกัน

โดยในหัวข้อนี้ จะเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วที่ทำการทดสอบ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนำมาเฉลี่ย และคำนวณหาค่าดังตาราง

ตารางที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย (-คือลด)

กรณี	**ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)**	**คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิง**
เสริมด้านท้าย	-0.228	-1.14
ปิดช่องว่างรอยต่อกระบะ	-1.116	-5.58
เสริมด้านหน้า	-1.228	-6.14
เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา	-2.086	-10.4

4.2.6 ผลศึกษาการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์

จากตารางที่ 4.20 นั้นจะเห็นว่าอุปกรณ์ที่ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงมากที่สุดคือ กรณีเพิ่มอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถและเสริมผิวโค้งบริเวณหลังคารถ รองมาคือกรณีเพิ่มอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถ โดยสามารถหาระยะเวลาคุ้มทุนได้ดังนี้

ต้นทุน ราคาอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถและเสริมผิวโค้งบริเวณหลังคา 10,000 บาท ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถประหยัดน้ำมันได้

$$3.15\times\frac{5,000}{100} = 157.5 \text{ ลิตร คิดเป็นเงิน } 157.5\times 30.00 = 4,725.00 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ระยะเวลาคุ้มทุน คือ $\frac{10,000}{4,725.00}$ **= 2.11 เดือน**

ต้นทุน ราคาอุปกรณ์เสริมด้านหน้ารถ 5,000 บาท ในระยะเวลา 1 เดือน สามารถประหยัดน้ำมันได้

$$1.85\times\frac{5,000}{100} = 92.5 \text{ ลิตร คิดเป็นเงิน } 92.5\times 30.00 = 2,775.00 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ระยะเวลาคุ้มทุน คือ $\frac{5,000}{2,775.00}$ **= 1.80 เดือน**

4.3 การสร้างอุปกรณ์ และการทดสอบกับรถบรรทุกจริง

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการนำค่าการเปลี่ยนแปลงแรงต้าน หรือสัมประสิทธิ์แรงต้านมาคำนวณเป็นอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จนนำมาสู่การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาจุดคุ้มทุนหรือความเหมาะสมในการลงทุน ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการตัดสินใจที่จะลงทุนติดตั้งอุปกรณ์เสริมที่มีการทดสอบมาทั้งหมด ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะในการทดสอบ หัวข้อ 4.1.6 และ 4.2.6 เราเลือกจุดคุ้มทุนจากการการคำนวณที่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ลดลงมากที่สุดดังนี้คือ

ตารางที่ 4.22 เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและจุดคุ้มทุน ของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์

กรณี	**อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (liters/100 km)**	**คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิง**	**ระยะคุ้มทุน (เดือน)**
เสริมท้ายกระบะแบบเอียง	-3.82	-12.73	0.81
เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี	-6.56	-21.86	1.02
เสริมด้านหน้า	-1.228	-6.14	1.80
เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา	-2.086	-10.4	2.11

จากตาราง 4.21 จะเห็นได้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงนั้น จะไม่มีความสอดคล้องกันกับระยะคุ้มทุน เนื่องจากบางอุปกรณ์ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงมาก แต่มีราคาที่สูงในการจัดซื้อจัดจ้าง ดังนั้นสิ่งที่เป็นต้องนำมาตัดสินใจก็คือ ความเหมาะสมในการใช้งาน

ความเหมาะสมกับการใช้งานก็คือ การที่ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์นั้นไม่ก่อให้เกิดอุปสรรค์ในการใช้งาน และในทางกฎหมาย และอีกอย่างที่ขาดไม่ได้ก็คือความคุ้มค่า ซึ่งก็คือระยะคุ้มทุนที่น้อยที่สุด นั้นก็คือกรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง ซึ่งข้อดีของกรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียงคือ

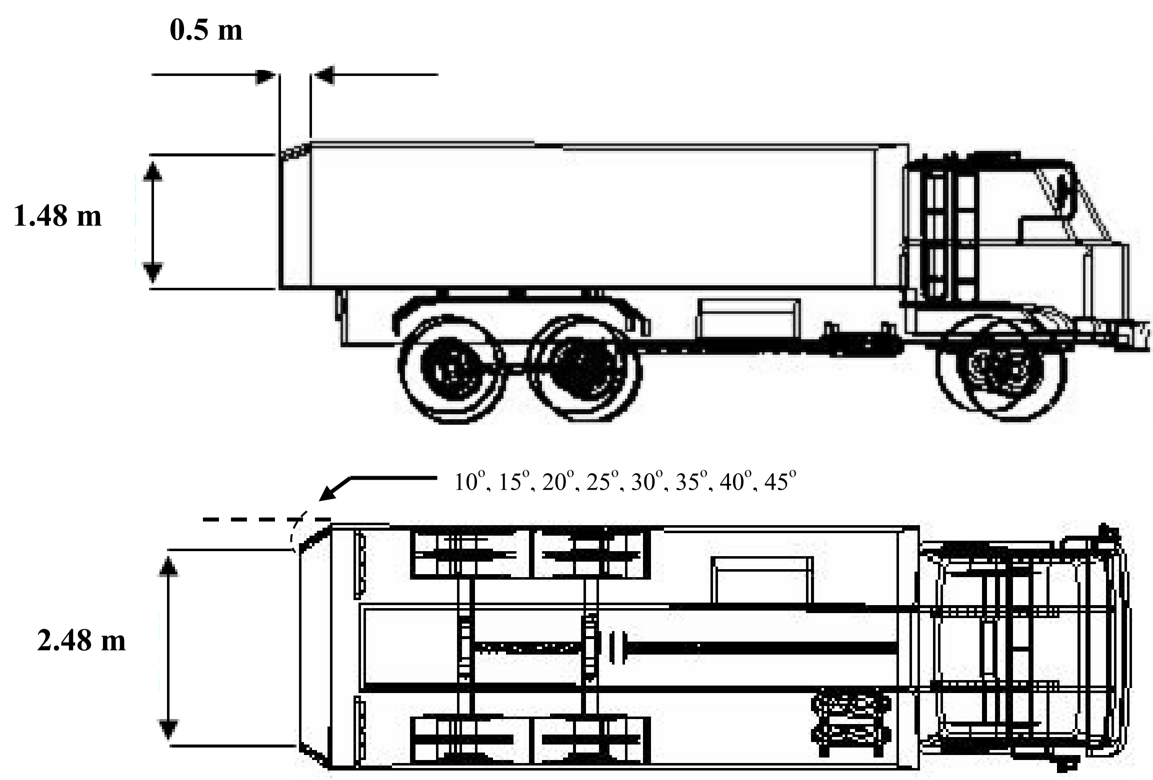
1. ไม่เกิดอุปสรรค์ในการใช้งานมาก
2. ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมาก
3. ไม่ขัดต่อกฎหมาย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ยื่นออกด้านท้ายความยาวไม่เกิน 1 เมตร
4. ติดตั้งง่าย สามารถติดตั้ง เก็บ และสร้างขึ้นมาได้ง่าย

ดังนั้นจากเหตุผลทั้งหมดที่ได้จากการ ศึกษา ทดสอบ และวิเคราะห์มาทั้งหมด เราจึงเลือก กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง มาใช้ในการออกแบบสร้าง และติดตั้ง เพื่อทดสอบกับรถบรรทุก นำมาหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพื่อเปรียบเทียบกับการวิธีคำนวณเชิงเลข เพื่อความถูกต้อง และน่าเชื่อถือ นำไปสู่การนำไปใช้จริงในอนาคต

4.3.1 การวิเคราะห์มุมของอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงโดย CFD

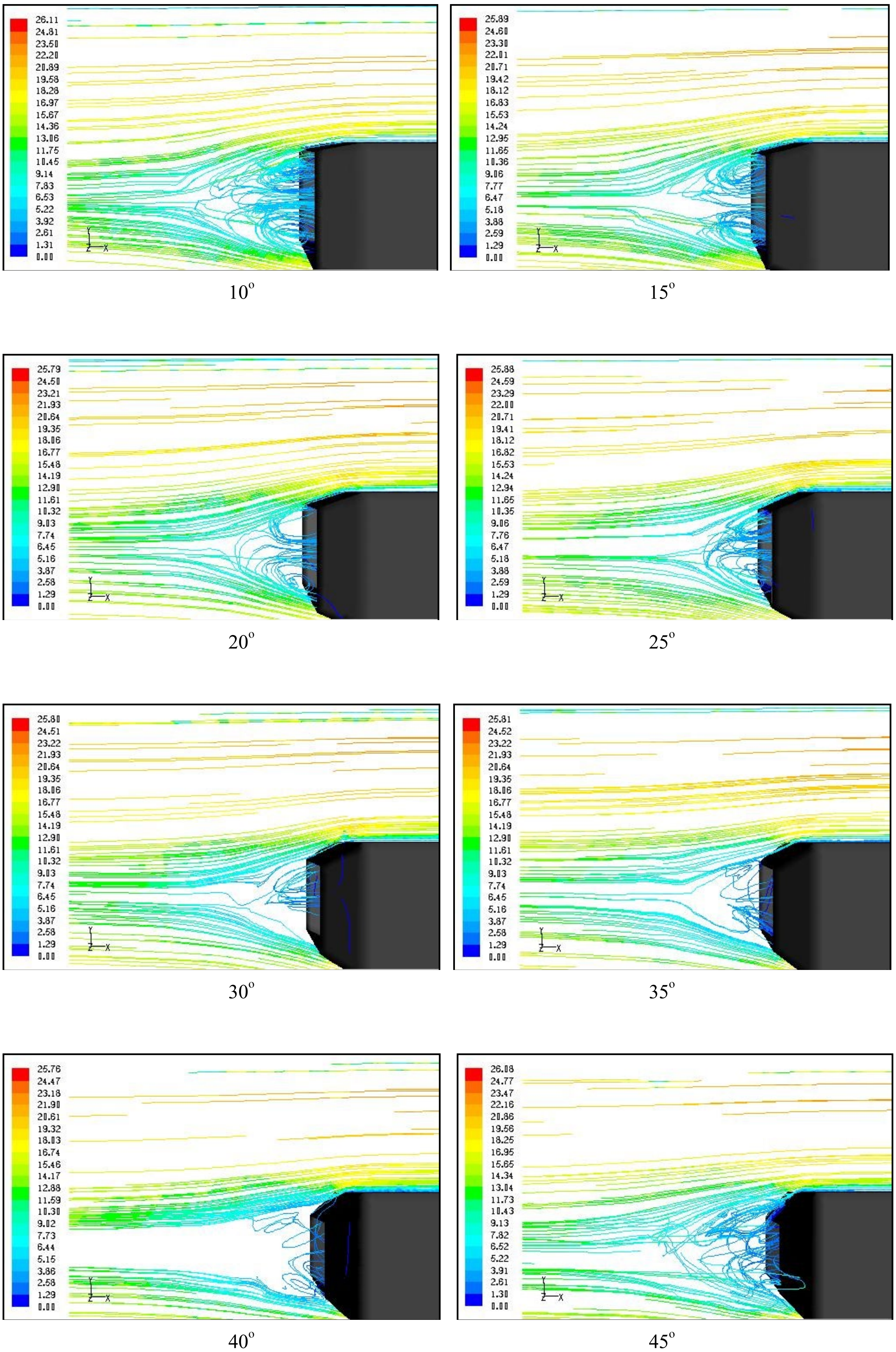
มุมเอียงของอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงนั้น มีผลโตรงตรงต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถบรรทุก เนื่องจาก สภาวะและลักษณะการไหลของอากาศจะมีความแตกต่างกันซึ่งเกิดจากความเร่งของอากาศที่ไหลจากแผ่นเอียงมีความแตกต่างกัน จึงทำให้ ความดัน ความเร็ว และลักษณะการหมุนวนของอากาศมีความแตกต่างกันด้วย

ดังนั้นก่อนจะมีการออกแบบสร้างจริง จึงจะต้องมีการทดสอบ โดยการการปรับเปลี่ยนมุมของแผ่นเอียงที่ติดตั้งที่ท้ายกระบะ เพื่อนำมาวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้น เพื่อหามุมที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถมีค่าน้อยที่สุด ดังภาพ 4.27

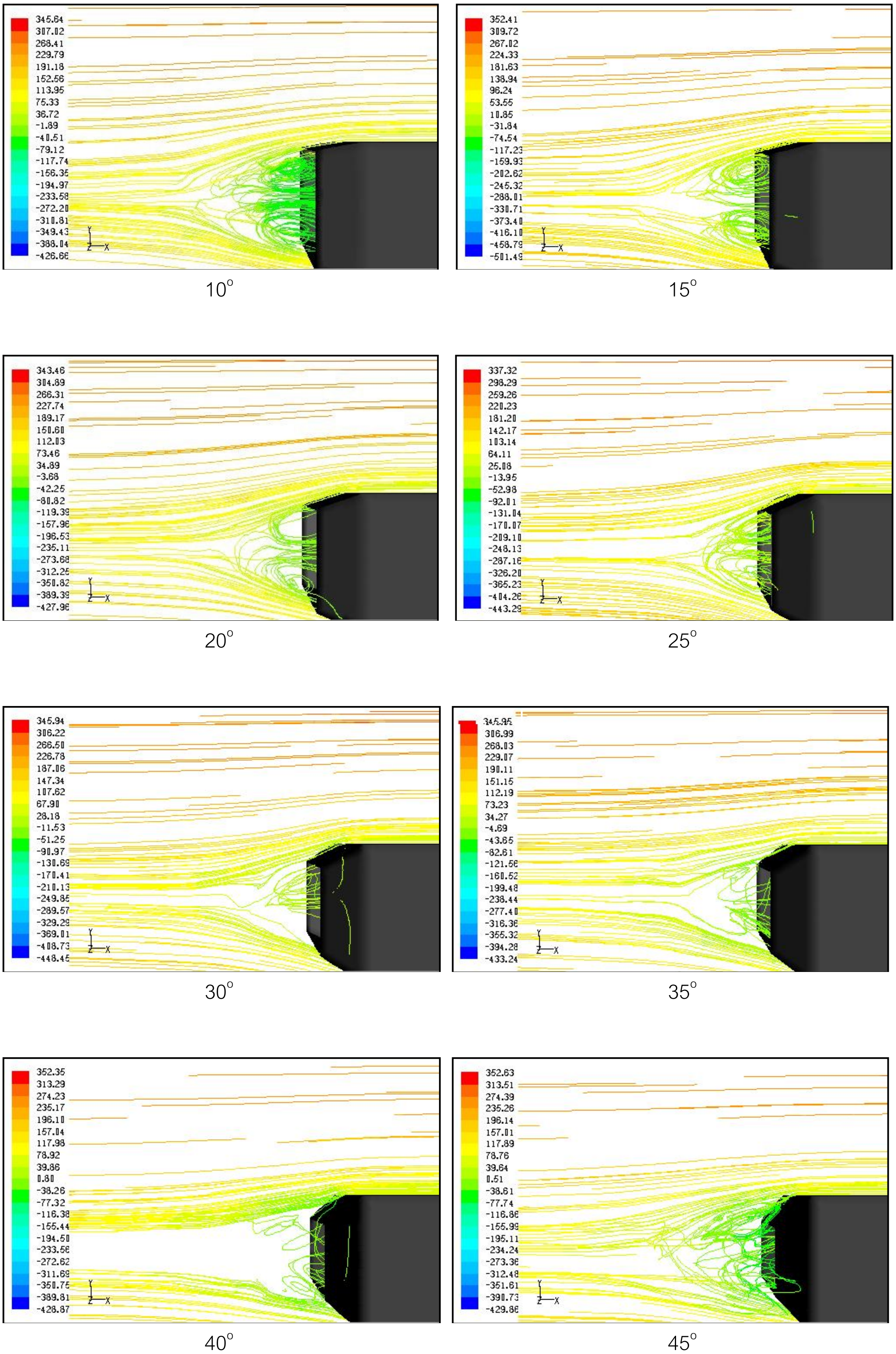


ภาพที่ 4.27 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียง

ลักษณะของการจำลอง เป็นการใช้แผ่นสังกะสีที่มีลักษณะบางมาทำให้มีลักษณะเป็นกล่อง แต่จะปรับเปลี่ยนมุมด้านท้ายให้มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° ตามลำดับ เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ลักษณะการไหล อาทิเช่น ความดัน ความเร็ว ลักษณะการหมุนวน ความราบเรียบของอากาศที่เกิดขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยใช้ความเร็วที่ 72 km/hr



ภาพที่ 4.28 การกระจายตัวความเร็วของอากาศ (m/s) และการหมุนวน

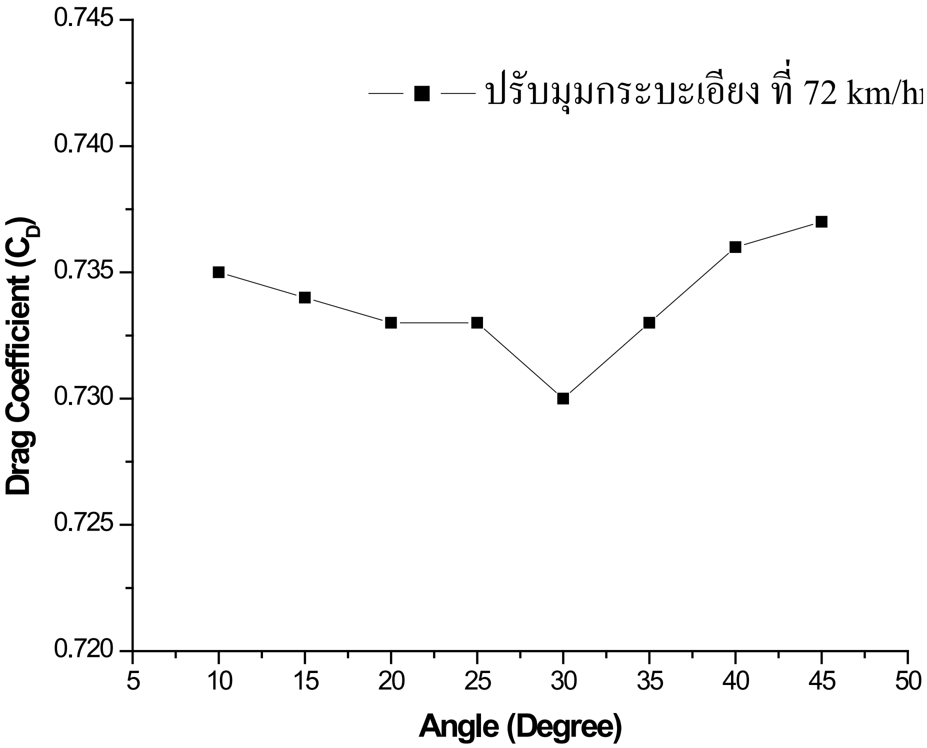


ภาพที่ 4.29 การกระจายตัวความดันของอากาศ (pascal) และการหมุนวน

จากภาพที่ 4.28 และ 4.29 เป็นลักษณะการกระจายตัวของเส้นความเร็ว ที่มีการปรับมุมกระบะเอียง ซึ่งเห็นว่าเมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมเอียงที่น้อย ๆ จาก 10° - 25° ความเร็วก็จะค่อย ๆ มี

ความสมดุลกันขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจาก อัตราเร่งของอากาศที่ไหลออกจากพื้นเอียง มีค่าคงที่ขึ้นตามการเพิ่มจำนวนของมุมเอียง ซึ่งก็เป็นผลให้การหมุนวนของอากาศมีลักษณะที่ลดลง และมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านนั้นลดลงตามมา จนกระทั่งถึงมุม 30° จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าต่ำสุด ดังเหตุผลที่กล่าวมา ซึ่งจากภาพ มุม 30° เป็นค่ามุมที่ทำให้การไหลความเร็ว และความดันของอากาศมีความสมดุลมากที่สุด จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำที่สุด

ลักษณะเดียวกัน เมื่อเพิ่มปรับเปลี่ยนมุมเอียงเพิ่มขึ้นจาก 30° จาก 35° - 45° จะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลของอากาศจะค่อย ๆ เริ่มแยกตัวออกจากกันตามมุมที่เพิ่มขึ้น การหมุนวนของอากาศเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากตามแตกต่างของความเร็ว และความดันของอากาศเริ่มมีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศสูงขึ้น เมื่อเพิ่มมุมเอียงที่มากกว่า 30°



ภาพที่ 4.30 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง

ดังนั้นจากภาพที่ 4.30 และเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้ข้อสรุปในการออกแบบคือ **ใช้มุมเอียงที่ 30° ของอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียง ในการติดตั้งรถบรรทุกเพื่อใช้ในการทดสอบจริง**

4.3.2 การสร้าง และติดตั้งอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงกับรถบรรทุกจริง

จากหัวข้อที่ผ่านมาซึ่งได้ข้อสรุปในการสร้าง การติดตั้งอุปกรณ์เสริม ลักษณะ ขนาด และมุมเอียงของเสริมท้ายกระบะแบบเอียง โดยใช้รถบรรทุกสิบล้อ เครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ HINO รุ่น EH700 ขนาด 10.8 ตัน 6 สูบ 6,443 ซีซี ดังภาพที่ 4.31 ใช้ในการทดสอบ

ภาพที่ 4.31 รถบรรทุก กรณีปกติ

ภาพที่ 4.32 ใช้ผ้าใบคลุมกระบะ หรือปิดกระบะบรรทุก

อุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงนั้น จำเป็นต้องมีน้ำหนักที่เบา และแข็งแรง สามารถติดตั้ง และถอดเก็บได้ง่าย จึงใช้โครงเหล็กกลวงเป็นโครงสร้าง และใช้แผ่นสังกะสีเป็นแผ่นเรียบที่ใช้ปิดทับโครงสร้าง ดังภาพที่ 4.33

ภาพที่ 4.33 การติดตั้งอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียง

ภาพที่ 4.34 กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง

4.3.3 การทดสอบ และผลการทดสอบ

ในการทดสอบนั้น เป็นการทดสอบใช้ถนนเพชรเกษม ทางหลวงหมายเลข 4 จากอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี - อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบศีรีขันธ์ รวมระยะทางคือ 100 km ซึ่งมีเงื่อนไขในการทดสอบดังนี้คือ

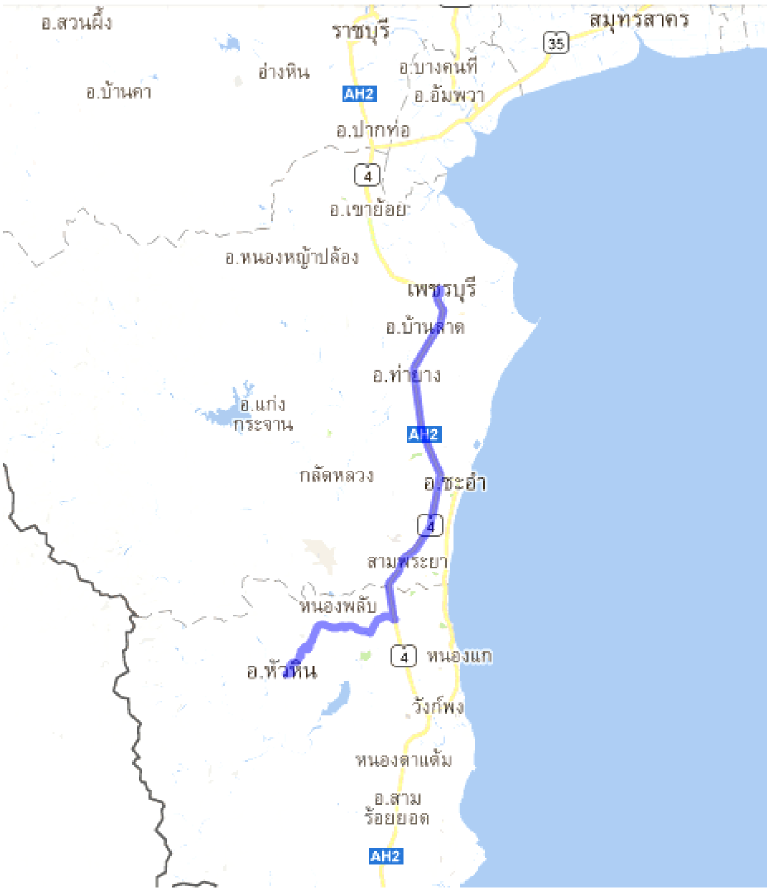
1. เปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทั้งหมด 3 กรณี คือ 1.กรณีปกติซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบ 2. กรณีปิดกระบะบรรทุกและ 3. กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเอียง (ทุกรณีไม่มีการบรรทุกสัมภาระ)

2. ใช้การเดินรถทดสอบ ไป – กลับ รวมระยะทาง 200 km ของแต่ละกรณี

3. ลักษณะการขับรถ เหมือนการขับในการทำงานปกติ

4. การตรวจสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน เป็นลักษณะการตรวจสอบน้ำมันที่ลดลงของการเดินทาง โดยการเติมน้ำมันเต็มถังก่อนวิ่งทดสอบ แล้วเติมน้ำมันเต็มถังอีกครั้งเมื่อเปลี่ยนกรณีการทดสอบ และเช็คการจ่ายน้ำมันที่หัวจ่ายน้ำมัน

5. สถานีจ่ายน้ำมัน ในการทดสอบสถานีเดียวกัน และหัวจ่ายเดียวกัน โดยใช้สถานีปตท. สาขาเพชรบุรี – บ้านลาด กม. 173



ภาพที่ 4.35 เส้นทางที่ใช้ในการทดสอบรถบรรทุก

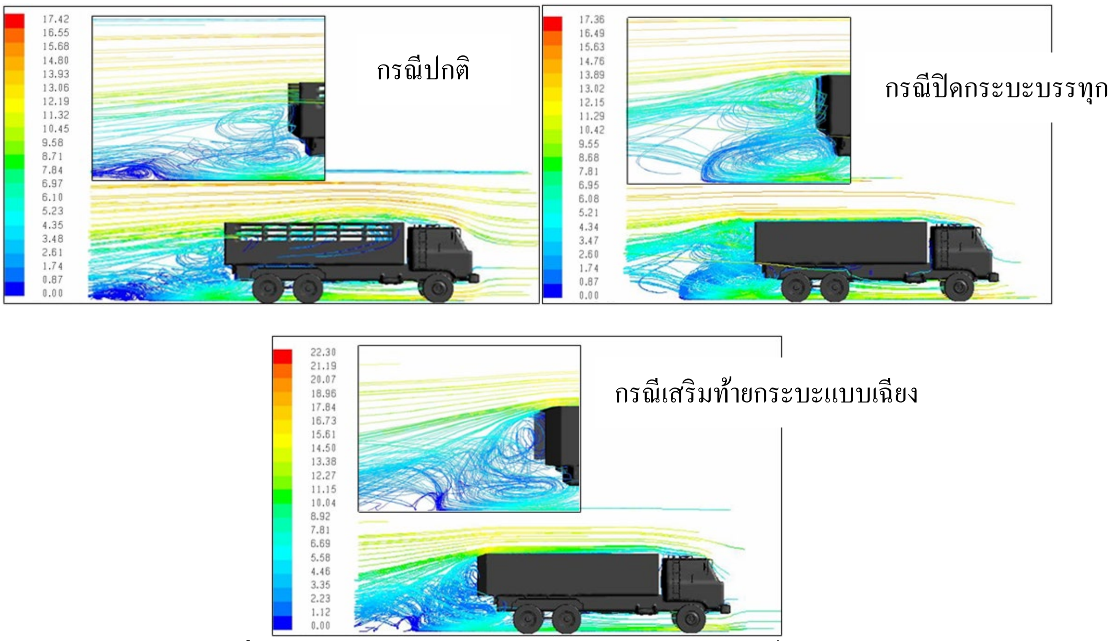
ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบ

กรณี	**เส้นทาง ไป – กลับ**	**ระยะทาง (km)**	**ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)**	**จำนวนเงินเติมน้ำมัน (บาท)**	**ปริมาณน้ำมัน (ลิตร)**	**อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)**
ปกติ	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,813.14	60.58	-
ปิดกระบะบรรทุก	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,960.00	65.49	+ 8.10
เสริมท้ายกระบะแบบเอียง	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,630.01	54.46	- 10.10

จากตารางผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้น และลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแต่ละกรณีเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปกติ เหมือนกับการเปรียบเทียบการจำลองโดย CFD

กรณีปิดกระบะบรรทุก จากการทดสอบมีผลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับในทางทฤษฏี และผลจากการจำลองโดย CFD เป็นผลมาจากการปิดกระบะบรรทุก ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างส่วนหน้า และส่วนท้ายของรถบรรทุก

กรณีเสริมท้ายกระบะแบบเฉียง จากการทดสอบมีผลทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง ซึ่งสอดคล้องเช่นเดียวกันกับทางทฤษฏี และผลจากการจำลองโดย CFD เป็นผลมาจากการมีแผ่นเอียงด้านท้ายกระบะ ทำให้อากาศที่ไหลผ่านตัวรถบรรทุกมีความสมดุลกันมากขึ้น ความแตกต่างของความดันอากาศจึงลดลง ทำให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงมากกว่ากรณีปกติ ดังภาพที่ 4.36 เพื่อเปรียบเทียบการไหลของอากาศทั้ง 3 กรณี



ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบลักษณะการไหลของอากาศทั้ง 3 กรณี

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและการทดลองของโครงการวิจัยนี้ มีข้อสรุปผลกาศึกษา มีข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นองค์ความรู้ เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป กับนักวิจัยท่านอื่น และเพื่อเป็นหลักการในการออกแบบ สร้างอุปกรณ์เสริมกับรถบรรทุก รวยถึงยานพาหนะอื่นด้วยเช่นกัน

5.1 สรุปผลการศึกษา

1. โครงการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษา ทบทวนงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์ และยานพาหนะอื่น ๆ ทั้งวิธีการศึกษา การทดลอง การจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงการหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงด้วยวิธีการต่าง ๆ

2. โครงการวิจัยนี้ได้เสนอเงื่อนไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ในการคำนวณด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุก อาทิ ลักษณะแบบจำลอง กริด แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเป็นต้น

3. ได้มีการปรับปรุงอุโมงค์ลมเพื่อใช้ในการทดสอบด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อให้มีความถูกต้องกับการทดสอบแบบจำลองของรถบรรทุกกรณีต่าง ๆ

4. ได้มีการเสนอการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายที่ใช้ทดสอบด้านอากาศพลศาสตร์ อาทิ แรงต้าน การสร้างภาพเพื่อสังเกตเห็นลักษณะการไหลของอากาศในอุโมงค์ลม

5. การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม และ CFD มีความใกล้เคียงกัน แตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ในเชิงทฤษฎี

6. รถบรรทุกที่ใช้สร้างโมเดลในการจำลอง CFD และทดสอบจริง คือรถเครื่องยนต์ดีเซลยี่ห้อ HINO รุ่น EH700 ขนาด 10.8 ตัน 6 สูบ 6,443 ซีซี เป็นกรณีศึกษา ซึ่งเป็นรถบรรทุกที่นิยมใช้ในประเทศไทย

7. ผลการจำลอง CFD ในกรณีเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ สามารถคำนวณเป็นอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ดังนี้คือ

กรณี	**ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)**	**คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิง**
ปิดท้ายกระบะบรรทุก	+2.33	+7.76
เปิดกระบะบรรทุก	-2.59	-8.63
เสริมท้ายกระบะแบบเอียง	-3.82	-12.73
เสริมท้ายกระบะแบบทรงรี	-6.56	-21.86

8. ผลการจำลอง CFD ในกรณีติดตั้งอุปกรณ์เสริม

กรณี	**ที่ความเร็วเฉลี่ย (liters/100 km)**	**คิดเป็นร้อยละของการประหยัดเชื้อเพลิง**
เสริมด้านท้าย	-0.228	-1.14
ปิดช่องว่างรอยต่อกระบะ	-1.116	-5.58
เสริมด้านหน้า	-1.228	-6.14
เสริมด้านหน้าและผิวโค้งบริเวณหลังคา	-2.086	-10.4

9. การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของแรงต้านเป็นผลจากรูปทรงท้ายกระบะเนื่องจาก รูปทรงท้ายกระบะผลต่อลักษณะการไหลของอากาศที่แตกต่างกัน รูปทรงที่ทำให้อากาศมีการไหลที่มีความสมดุลระกว่างด้านหน้า และด้านท้ายมากเท่าไหร่ ก็จะทำให้แรงต้านของรถมีค่าน้อยลงเท่านั้น

10. ความแตกต่างของความดันอากาศระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ มีผลต่อแรงต้านโดยตรง ความแตกต่างมีค่ามากเท่าไหร่ เท่ากับว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถมีค่ามากเท่านั้น

11. สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถ จะขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของรถ

12. การทดสอบจริงได้มีการเปรียบเทียบกัน 3 กรณี ผลดังตารางข้างล่าง และมีความ **สอดคล้องกันระหว่าง การจำลอง CFD และการทดสอบจริง** มีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง

กรณี	**เส้นทาง ไป – กลับ**	**ระยะทาง (km)**	**ราคาน้ำมัน (บาท/ลิตร)**	**จำนวนเงินเติมน้ำมัน (บาท)**	**ปริมาณน้ำมัน (ลิตร)**	**อัตราการเปลี่ยนแปลง (%)**
ปกติ	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,813.14	60.58	-
ปิดกระบะบรรทุก	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,960.00	65.49	+ 8.10
เสริมท้ายกระบะแบบเอียง	เพชรฯ-หัวหิน	200	29.93	1,630.01	54.46	- 10.10

13. การติดตั้งอุปกรณ์เสริมท้ายกระบะแบบเอียงนั้น เป็นอุปกรณ์ที่มีระยะคุ้มทุนที่สั้น และสามารถนำมาติดตั้ง และสามารถประหยัดน้ำมันได้จริง สอดคล้องกับผลจากการคำนวณ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองโดย CFD นั้น ไม่สามารถที่จะกำหนดเงื่อนไข สภาวะให้เสมือนจริง 100 % ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงเงื่อนไข หรือพัฒนาสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงให้มากที่สุด

2. หากจะมีการทดสอบแบบจำลอง CFD ด้านอากาศพลศาสตร์ ของรถยนต์ประเภทอื่น หรือยานพาหนะประเภทอื่น ควรจะมีการเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลก่อน (Validation) เพื่อความแน่นอนของเงื่อนไขในการจำลอง และความน่าเชื่อถือ

3. การทดสอบจริง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ควรจะมีเครื่องมือวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันโดยตรง และเป็นเครื่องมือที่ทันสมัย เพื่อความถูกต้อง และแม่นยำ

4. การสร้างอุปกรณ์เสริมแต่ละชนิด ควรจะเลือกวัสดุที่มีน้ำหนักที่เบาที่สุด และแข็งแรง เพราะน้ำหนักจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน เมื่อเทียบกับกรณีปกติ

5. การทดสอบจริง ควรทดสอบกับการใช้งานจริง และในช่วงเวลาที่นานให้มากที่สุด เช่น การเดินรถในการใช้งานประจำวัน ประจำเดือน หรือปี เพราะจะได้ค่าเฉลี่ยของการทดสอบรถที่หลากหลายสภาวะ และเป็นผลที่น่าเชื่อถือมากที่สุด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	-
F_D	แรงต้านรวม	N
Re	Reynolds number	-
m/s	เมตรต่อวินาที	-
km/hr	กิโลเมตรต่อชั่วโมง	-
m	เมตร	-
cm	เซนติเมตร	-
mm	มิลลิเมตร	-
m^2	ตารางเมตร	-
hp	แรงม้า	kW
V	Volt	-
rev/min	รอบต่อนาที	-
//	นิ้ว	-
g	กรัม	-
α	ค่ามุมเอียง	องศา
θ	ค่ามุม	องศา
%	เปอร์เซ็นต์	-
dF	แรงรวมที่กระทำในแนวแกน	N
P	ความดัน	pascal
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
μ	ความหนืดจลน์	$N.s/m^3$
τ	หน่วยแรงเฉือน	N/m^2
γ	น้ำหนักจำเพาะ	N/m^3
Z	ระดับความสูง	m
u, v, w	ความเร็ว	m/s
t	เวลา	s
U'	การไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	**ความหมาย**	**หน่วย**
a	ความเร่ง	m/s^2
m	มวล	kg
D	มิติ	-
Δ	เฉลี่ย	-
$k-\varepsilon$	แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon	-

เอกสารอ้างอิง

กรมธุรกิจพลังงาน การนำเข้าน้ำมันดิบ พ.ศ. 2551, http.//www.doeb.go.th/information, 21 กรกฎาคม 2551.

ก้อง อุทโยภาศ และวรางรัตน์ จันทสาโร. “การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง”, วิศวกรรมสาร มก, 2546, ปีที่ 10, ฉบับที่ 4

จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล. “อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ขนาดต่างๆ ที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่”, การประชุมวิชาการเครือข่าววิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 2548, TFM054

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

วินัย ศรีอำพร. กลศาสตร์ของไหล, 2541, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว. “การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง”, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2

Alexander D. “Reducing drag in future vehicles”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, Vol. 88, pp.120-144

Ahmed S.R. and Baumert W. “The structure of wake flow behind road vehicles”, ASME Journal of Fluids Engineering, 1979, Vol. 101, pp.201-220

Ahmed S.R. “Influence of base slant on wake structure and drag of road vehicles”, ASME Journal of Fluids Engineering, 1983, Vol. 105, pp.429-434

Bettle J. Holloway A.G.L. and Venart J.E.S. “A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, Vol. 91, pp.573

Browond F. “Reducing aerodynamics drag and fuel consumption”, Advanced Transportation Workshop Stanford University, 2005

Cooper K.R. “Pickup truck aerodynamics”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, Vol. 92, pp.342-256

Fukuda H. Yanagimoto K. China H. and Nakagawa K. 1995. “Improvement of vehicle aerodynamics by wake control”, JSAE Review, 1995, Vol. 16, pp.151-155

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, 2001, Vol. 89, pp.1201-1218

Hucho W.H. “Aerodynamics of road vehicles”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, Vol. 94, pp.334-361

Hucho W.H. “Aerodynamics of road vehicles state of the art and tasks for the future”, Automotive dynamics stability and controls conference and exhibition, 2006.

Horinouchi N. “Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System”, SAE 950628, 1995.

Kwon H., Park Y. Lee D. and Kim M. “Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techiques”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, Vol. 89, pp.1179-1195

Kieffer W., Moujaes S. and Armbya N. “CFD study of section characteristics of Formula Mazda race car wings”, Mathematical and Computer Modelling, 2006, Vol. 43, pp.1275-1287

Kim M.S. and Geropp D. “Experimental investigation of the ground effect on the flow around some tow-dimensional bluff bodies with moving-belt technique”, Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, Vol. 74-76, pp.511-519

Leuschen J. and Cooper K.R. “Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers”, 2006 SAE International, 2006, 06CV-222.

Muyl F. Dumsa L. and Herbert V. “Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry”, Computers & Fluids, 2004, Vol. 33, pp.849-858

Nouzawa T. “Unsteady-wake analysis of the aerodynamic drag of a notchback model with critical afterbody geometry”, SAE-92020, 1992.

Ozawa H. Nishikawa S. and Higashida D. “Development of aerodynamics for a solar race car”, JSAE Review, 1998, Vol. 19, pp.343-349

Prasad A. and Williamson C.H.K. “A method for the reduction of bluff body drag”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, Vol. 69-71, pp.155-167

Perzo S. and Davidson L. “On CFD and transient flow in vehicle aerodynamic”, SAE Technical paper, 2000, Vol. 25, pp.125-139

Pinelli J.P. Subramanian C. and Plamondon M. “Wind effects on emergency vehicles”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, Vol. 92, pp.663-685

Robert J. “Development of pneumatic aerodynamic devices to improve the performance economic and safety of heavy vehicles”, SAE Technical paper series, 2001, Vol. 90, pp.120-139

Scibor A.J. “Road vehicle aerodynamics”, 2nd Edition Pentech Press Limited ISBN-07273-1805-5, 1984.

Storms B.L. “A study of Reynolds number effects and drag reduction concepts on a generic tractor trailer”, 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2004.

Spalart P.R. “Strategies for turbulence modeling and simulation”, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, Vol. 21, pp.252-263

Singh S. N. Rai L. and Bhatnagar A. “Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles”, Proc. KMechE, 2002, 219: Part D

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, 1999, Vol. 90, pp.89 – 99

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, 2002, Vol. 23, pp.69-74

Van Dam C. P. “Recent experience with different methods of drag prediction”, Progress in Aerospace Sciences, 1999, Vol. 35, pp.751-798

Wang M., Catalano P. and Laccarino G. “Prediction of high Reynolds number flow over a circular cylinder using LES with wall modeling”, Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, 2001.

Yamamoto S. Yanagimoto S. Fukuda K. China H. and Nakagawa K. “Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles”, JSAE Review, 1997, Vol. 18, pp.39-44