



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

### การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก ที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน

### Investigation on Aerodynamics of Small Utility Trucks with Body Kits and Energy Saving Feasibility

คณะผู้วิจัย

1. กุลเชษฐ์ เพียรทอง สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
2. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
3. ทองคำ กิริยะ สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
4. ปรัชญา मुखดา สังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ประจำปีงบประมาณ 2551

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ รวมทั้งการจัดทำรูปเล่มรายงานการวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ขอขอบคุณนักศึกษาผู้ช่วยงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ช่วยสร้างชุดทดลอง ทำการทดลอง และรวบรวมผลการทดลอง อย่างข้มกเขม้น ตลอดระยะในการทำวิจัยที่ผ่านมา การวิจัยครั้งนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้วิจัย

|                      |                                                                                  |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| รายงานการวิจัยเรื่อง | การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กที่ติดอุปกรณ์เสริมและแนวทางการประหยัดพลังงาน |
| หัวหน้าโครงการวิจัย  | ผศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง                                                          |
| ผู้ร่วมโครงการวิจัย  | ผศ. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ<br>นายทองคำ กิริยะ<br>นายปรัชญา มุขดา                   |
| คณะวิศวกรรมศาสตร์    | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี                                                           |
| ปีงบประมาณ           | 2551                                                                             |
| งบประมาณที่ได้รับ    | 426,900 บาท                                                                      |
| คำสำคัญ              | อากาศพลศาสตร์ รถบรรทุกเล็ก อุปกรณ์เสริม                                          |

### บทคัดย่อ

รูปร่างของรถยนต์ มีผลกระทบโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน เนื่องจากรูปร่างของรถยนต์เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อรถยนต์ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ ของรถยนต์บรรทุกเล็กมีที่นั่งด้านหน้าสองตอน ที่มีการปรับปรุงท้ายกระบะ เพื่อนำมาทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) โดยใช้อุโมงค์ลมความเร็วต่ำและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ใช้ซอฟต์แวร์ Fluent แบบ 3 มิติ โดยทดสอบแบบจำลองด้วยอุโมงค์ลมที่ความเร็วระหว่าง 18 – 43 km/hr ก่อนที่จะทดสอบรถขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลขที่ความเร็ว 36 – 126 km/hr ทดสอบรถ 6 กรณีคือเปิดท้ายกระบะปกติ, เปิดฝาท้ายกระบะ, ไม่มีฝาท้ายกระบะ, ปิดท้ายกระบะ, ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง, ครอบท้ายกระบะแบบตรง โดยแบบจำลองทั้งหมดมีพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน การศึกษานี้ เน้นศึกษาคุณลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการหมุนวนของอากาศด้านท้ายกระบะของรถบรรทุกเล็กเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยกรณีครอบท้ายกระบะแบบเฉียงจะลดสัมประสิทธิ์แรงต้านจาก 0.52 เป็น 0.4 (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ 6.91 เปอร์เซ็นต์ กรณีครอบท้ายกระบะแบบตรง เพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านจาก 0.52 เป็น 0.75 เพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็น 8.81 เปอร์เซ็นต์ และศึกษาการลดลงของสัมประสิทธิ์ต้าน ของรถคันหลังที่วิ่งห่างจากคันหน้าทีระยะห่างต่างกัน พบว่า ที่ระยะห่าง 10 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงจากวิ่งปกติคันเดียว 6.52 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) และกรณีวิ่งเยื้องกัน พบว่า รถคันหลังที่วิ่งห่างทีระยะ 10 m และเยื้อง 1 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลง 1.90 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) การศึกษานี้ยังยืนยันอีกว่า การลดการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องผู้โดยสาร หรือลดการหมุนวนของอากาศที่เกิดจากรูปทรงท้ายกระบะ ก็สามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนได้วิธีหนึ่ง

## Investigation on Aerodynamics of Small Utility Trucks with Body Kits and Energy Saving Feasibility

Head of Project Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong

Co-researchers Asst.Prof. Prachasanti Thaiyasuit

Mr. Thongkhum Kiriya

Mr. Prachya Mukda

Faculty of Engineering Ubon Ratchathani University

In Finance Year 426,900 Bath

Keyword Aerodynamics, Small Utility Trucks, Body Kits, CFD.

### Abstract

Configuration of the car usually directly affects to its drag coefficient, because the car configuration is an important factor generating the different flow field. This flow field causes different force and moment reacted to the car. This study aims to investigate the aerodynamic characteristic of the cab pick-up truck. The pick-up box of the car has been modified and tested for drag coefficient by using low speed wind tunnel and using 3 dimensional computational fluid dynamic (CFD) technique (FLUENT). Models are tested at speed between 18 – 43 km/hr in the wind tunnel, before full dimension testing at speed between 36 – 126 km/hr in CFD. Six car models which are (1) normal pick-up box, (2) tailgate down, (3) tailgate off, (4) covered pick-up box, (5) slope rear box, and (6) van. All models have the same frontal area, only aft bodies are different. In this study, the main focus is to investigate the aerodynamic characteristics to reduce the coefficient of drag ( $C_D$ ) due to the wake at the rear body of the pick-up car. When the slope rear box is used the  $C_D$  is reduced from 0.52 to be 0.4 (average speed), resulting fuel consumption reduction by 6.91 percentage. When van case is used, the  $C_D$  increase from 0.52 to be 0.75, the fuel consumption increase by 8.81 percentage. Also, the  $C_D$  of the trail car at different distance is investigated. It was found that, at the trailing distance of 10 m, the fuel consumption of the trail car can be reduced by 6.52 % averagely. In another case, when the trail car is running eccentricly, at trailly distance of 10 m and eccentric distance of 1 m, it gives the best result which the fuel consumption can be reduced by 1.90 %. This study also confirms that reduction of internal flow in to the passenger cab or reduce wake by the geometry at the rear body of the pick-up car can significantly affect the  $C_D$ , hence the energy economy.



## สารบัญ

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                                                | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                                             | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ                                                | ค    |
| สารบัญ                                                         | จ    |
| สารบัญตาราง                                                    | ฉ    |
| สารบัญรูป                                                      | ช    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ                                      | ฎ    |
| <b>บทที่ 1      บทนำ</b>                                       |      |
| 1.1    ความสำคัญและที่มาของปัญหา                               | 1    |
| 1.2    วัตถุประสงค์ของงานวิจัย                                 | 2    |
| 1.3    ขอบเขตงานวิจัย                                          | 3    |
| 1.4    ระเบียบวิธีวิจัย                                        | 3    |
| 1.5    ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                               | 4    |
| <b>บทที่ 2      ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>      |      |
| 2.1    ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์                     | 5    |
| 2.2    การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ด้วยอุโมงค์ลม                   | 11   |
| 2.3    การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ด้วย CFD                    | 14   |
| 2.4    การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง                | 18   |
| <b>บทที่ 3      ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>                         |      |
| 3.1    แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ                               | 21   |
| 3.2    สมการมูลฐานของการไหล                                    | 32   |
| 3.3    Computational Fluid Dynamics (CFD)                      | 37   |
| <b>บทที่ 4      การสร้างและการทดสอบอุโมงค์ลม</b>               |      |
| 4.1    ส่วนประกอบและเครื่องมือวัด                              | 46   |
| 4.2    การทดสอบอุโมงค์ลม                                       | 54   |
| <b>บทที่ 5      การยืนยันผลการทดสอบของอุโมงค์ลม และ CFD</b>    |      |
| 5.1    การยืนยันผลของ CFD                                      | 61   |
| 5.2    การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างการทดลองกับ CFD | 65   |

## สารบัญ (ต่อ)

|                                                                                                       | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>บทที่ 6      การจำลองหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง<br/>                 โดย CFD</b> |      |
| 6.1    กรณีรถบรรทุกเล็กปรับปรุงท้ายกระบะ                                                              | 83   |
| 6.2    กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกัน                                                                     | 92   |
| 6.3    กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งเยื้องกัน                                                                  | 98   |
| 6.4    กรณีอื่น ๆ                                                                                     | 101  |
| <b>บทที่ 7      การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน</b>                                            |      |
| 7.1    ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน                                                    | 113  |
| 7.2    การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์                                          | 122  |
| <b>บทที่ 8      สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>                                                               |      |
| 8.1    สรุปผลการศึกษา                                                                                 | 124  |
| 8.2    ข้อเสนอแนะ                                                                                     | 128  |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>                                                                                  | 130  |
| <b>ภาคผนวก</b>                                                                                        |      |
| ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย                                                                  | 134  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่                                                                           | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1 ความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ                                               | 56   |
| 4.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงกลม                                      | 59   |
| 4.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม                               | 59   |
| 5.1 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/hr                                    | 64   |
| 5.2 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบวัตถุทรงกลม                                         | 66   |
| 6.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD                                                           | 82   |
| 6.2 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ                                                    | 83   |
| 6.3 สรุปกรณีที่ทดสอบ                                                               | 109  |
| 6.4 ผลทดสอบกรณีปรับปรุงท้ายกระบะ                                                   | 111  |
| 6.5 ผลทดสอบกรณีวิ่งตามกัน                                                          | 111  |
| 6.6 ผลทดสอบกรณีวิ่งเยื้องกัน                                                       | 112  |
| 6.7 ผลทดสอบกรณีอื่น ๆ                                                              | 112  |
| 7.1 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ                     | 114  |
| 7.2 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีวิ่งตามกัน                            | 114  |
| 7.3 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีวิ่งเยื้องกัน                         | 115  |
| 7.4 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีอื่น ๆ                                | 115  |
| 7.5 คุณสมบัติของเครื่องยนต์                                                        | 116  |
| 7.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบ                                                           | 117  |
| 7.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ  | 119  |
| 7.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีวิ่งตามกัน         | 119  |
| 7.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีอื่น ๆ             | 120  |
| 7.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ | 120  |
| 7.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีวิ่งตามกัน        | 121  |
| 7.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีวิ่งเยื้องกัน     | 121  |
| 7.13 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีอื่น ๆ            | 121  |
| 7.14 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ                              | 123  |

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่                                           | หน้า |
|----------------------------------------------------|------|
| 8.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD                           | 125  |
| 8.2 กรณีปรับปรุงท้ายกระเบ ที่ความเร็วเฉลี่ย        | 126  |
| 8.3 กรณีลดบรรทุกเล็กวิ่งตามกันที่ความเร็วเฉลี่ย    | 127  |
| 8.4 กรณีลดบรรทุกเล็กวิ่งเยื้องกันที่ความเร็วเฉลี่ย | 127  |
| 8.5 กรณีอื่น ๆ ที่ความเร็วเฉลี่ย                   | 128  |

## สารบัญรูป

| รูปที่                                                                                                  | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1.1 รถบรรทุกเล็กที่มีการคลุมท้ายกระบะ                                                                   | 2    |
| 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์                                           | 6    |
| 2.2 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์                                                    | 7    |
| 2.3 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆ ของรถยนต์นั่ง                                                                | 7    |
| 2.4 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน                                                          | 8    |
| 2.5 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค                                                                     | 9    |
| 2.6 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน                                             | 9    |
| 2.7 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน                                                                   | 10   |
| 2.8 สัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมเจาะรู และไม่เจาะรู                                                     | 11   |
| 2.9 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่                                                                     | 12   |
| 2.10 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน                                              | 14   |
| 2.11 มุม $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$                                                                  | 16   |
| 2.12 การเกิดเวคส่วนท้ายกระบะของรถบรรทุกเล็ก โดย CFD                                                     | 17   |
| 2.13 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH                                                                         | 19   |
| 3.1 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC                                                          | 21   |
| 3.2 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ                                                              | 22   |
| 3.3 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวของวัตถุ                               | 23   |
| 3.4 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ                                                                   | 25   |
| 3.5 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน | 26   |
| 3.6 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน และสำหรับของไหลสมมุติ                                 | 27   |
| 3.7 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก                                                 | 28   |
| 3.8 ตำแหน่งของจุดแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกลม                                                       | 28   |
| 3.9 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล                                      | 29   |
| 3.10 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน                                                       | 29   |
| 3.11 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ                                              | 30   |
| 3.12 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต                                                                       | 31   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                           | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 3.13 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์                                                                    | 31   |
| 3.14 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต                                                                   | 32   |
| 3.15 พลั๊กซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุกรมวล | 33   |
| 3.16 รูปแบบแสดงแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก                                                   | 34   |
| 3.17 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด $dx$ และ $dy$                                 | 35   |
| 3.18 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Segregated solver                                            | 39   |
| 3.19 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Coupled solver                                               | 40   |
| 3.20 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน                                       | 41   |
| 4.1 ขนาดส่วนแพร่เข้า                                                                             | 47   |
| 4.2 ส่วนอากาศแพร่เข้าที่สร้างขึ้น                                                                | 48   |
| 4.3 รังผึ้ง                                                                                      | 48   |
| 4.4 ขนาดส่วนปฏิบัติงาน                                                                           | 49   |
| 4.5 ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น                                                                   | 50   |
| 4.6 ขนาดของส่วนแพร่ออก                                                                           | 51   |
| 4.7 ส่วนแพร่ออกที่สร้างขึ้น                                                                      | 51   |
| 4.8 ขนาดส่วนกำลัง                                                                                | 52   |
| 4.9 ส่วนกำลังที่สร้างขึ้น                                                                        | 53   |
| 4.10 ขนาดของแต่ละส่วนที่นำมาประกอบกัน                                                            | 54   |
| 4.11 หลอดปิโตท และมานอมิเตอร์                                                                    | 55   |
| 4.12 ตำแหน่งการทดสอบความเร็วของอากาศ ส่วนปฏิบัติงาน                                              | 56   |
| 4.13 Load cell                                                                                   | 57   |
| 4.14 วัสดุและแบบจำลอง                                                                            | 58   |
| 4.15 ลักษณะการไหลผ่านวัตถุทรงกลม                                                                 | 60   |
| 4.16 ลักษณะการไหลผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยม                                                          | 60   |
| 5.1 สัมประสิทธิ์แรงต้าน จากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ                                         | 62   |
| 5.2 ลักษณะการกำหนดกริด                                                                           | 63   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                       | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริต                                         | 64   |
| 5.4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลอง และ CFD                                   | 66   |
| 5.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้ง 3 วิธี                                | 67   |
| 5.6 การแสดงการไหลของอากาศผ่านวัตถุทรงกลม ในอุโมงค์ลม และ CFD                 | 68   |
| 5.7 สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลอง และ CFD                                   | 68   |
| 5.8 การแสดงการไหลของอากาศผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ในอุโมงค์ลม และ CFD          | 69   |
| 5.9 ขนาดของแบบจำลอง กริต และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD                 | 69   |
| 5.10 แบบจำลองกริตต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD                        | 70   |
| 5.11 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรณขนาดจำลองกริตต่าง ๆ                             | 72   |
| 5.12 เส้นการไหลของอากาศผ่านรณบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม                           | 76   |
| 5.13 เส้นการแสดงการไหลของอากาศผ่านรณบรรทุกเล็กใน CFD                         | 79   |
| 6.1 แสดงขนาดและเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองขนาดจริง                            | 83   |
| 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการเปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงท้ายกระเบาะกรณีต่าง ๆ | 84   |
| 6.3 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 เปิดท้ายกระเบาะปกติ            | 85   |
| 6.4 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 เปิดท้ายกระเบาะปกติ                  | 85   |
| 6.5 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระเบาะ              | 86   |
| 6.6 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระเบาะ                    | 86   |
| 6.7 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระเบาะ             | 87   |
| 6.8 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระเบาะ                   | 87   |
| 6.9 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 4 ปิดท้ายกระเบาะ                 | 88   |
| 6.10 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 4 ปิดท้ายกระเบาะ                      | 88   |
| 6.11 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 5 ครอบท้ายกระเบาะแบบเฉียง       | 89   |
| 6.12 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 5 ครอบท้ายกระเบาะแบบเฉียง             | 89   |
| 6.13 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 6 ครอบท้ายกระเบาะแบบตรง         | 90   |
| 6.14 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 6 ครอบท้ายกระเบาะแบบตรง               | 90   |
| 6.15 สัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีรวิ้งตามกัน                                     | 93   |
| 6.16 การเปลี่ยนแปลงของความเร็ว                                               | 94   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                     | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------|------|
| 6.17 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 10.0 m       | 96   |
| 6.18 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 12.5 m       | 96   |
| 6.19 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 15.0 m       | 97   |
| 6.20 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 17.5         | 97   |
| 6.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความเร็ว 90 km/hr  | 98   |
| 6.22 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X10, Z1                      | 99   |
| 6.23 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X12.5, Z2                    | 100  |
| 6.24 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X15, Z3                      | 100  |
| 6.25 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X17.5, Z4                    | 101  |
| 6.26 รูปลักษณะภายในห้องผู้โดยสาร                                           | 102  |
| 6.27 กรณียุทธวิธีของบนห้องผู้โดยสาร                                        | 102  |
| 6.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน                                            | 103  |
| 6.29 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีเปิดกระจก 1 ด้าน               | 104  |
| 6.30 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีเปิดกระจก 1 ด้าน                     | 104  |
| 6.31 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีเปิดกระจก 2 ด้าน               | 105  |
| 6.32 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีเปิดกระจก 2 ด้าน                     | 105  |
| 6.33 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีหลังคาท้ายกระบะ                | 106  |
| 6.34 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีหลังคาท้ายกระบะ                      | 106  |
| 6.35 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร | 107  |
| 6.36 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร       | 107  |
| 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับกำลังและแรงบิด                     | 117  |
| 7.2 ตัวอย่างของลักษณะอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์               | 123  |



## 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                        | -         |
| $\alpha$  | ค่ามุมเอียง                 | องศา      |
| $\theta$  | ค่ามุม                      | องศา      |
| %         | เปอร์เซ็นต์                 | -         |
| $dF$      | แรงรวมที่กระทำในแนวแกน      | N         |
| P         | ความดัน                     | pascal    |
| $\rho$    | ความหนาแน่นของอากาศ         | $kg/m^3$  |
| $\mu$     | ความหนืดจลน์                | $N.s/m^3$ |
| $\tau$    | หน่วยแรงเฉือน               | $N/m^2$   |
| $\gamma$  | 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                       | $\text{m/s}^2$ |
| $m$               | มวล                            | kg             |
| $D$               | มิติ                           | -              |
| $\Delta$          | เฉลี่ย                         | -              |
| $k - \varepsilon$ | แบบจำลองความปั่นป่วน k-epsilon | -              |

# บทที่ 1

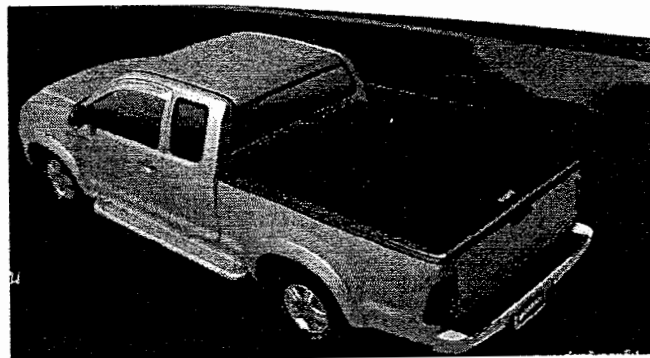
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ตามที่ประเทศไทยประกาศตัวที่จะเป็น Detroit of Asia หรือ ศูนย์กลางการผลิตรถยนต์ของเอเชีย ทั้งรัฐบาลและเอกชนก็ได้ดำเนินการไปหลายส่วนแล้ว มีอุตสาหกรรมยานยนต์เกิดขึ้นมากมายในประเทศไทย จนทำให้ประเทศไทยเป็นผู้ในการผลิตรถยนต์ที่ใหญ่ที่สุดประเทศหนึ่ง และในประเทศไทยเองมีการใช้งานรถยนต์มากประเทศหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตาม โรงงานอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศไทยเอง ส่วนมากจะเป็นผู้ผลิตหรือประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ตามแบบที่ถูกออกแบบมาโดยบริษัทแม่เท่านั้น เรายังไม่มีการศึกษาในเชิงออกแบบหรือพัฒนามากนัก ในด้านพลังงานนั้น เราใช้น้ำมันในการคมนาคมขนส่ง เกือบทั้งหมดเป็นน้ำมันสำเร็จรูป ได้แก่ น้ำมันดีเซล เบนซิน น้ำมันเตา และน้ำมันเครื่องบิน ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับพาหนะต่างๆ ที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น รถยนต์ รถไฟ เรือ และเครื่องบิน เป็นต้น ซึ่งในปี 2551 เรามีความต้องการใช้พลังงาน สำหรับการคมนาคมขนส่งรวมทั้งสิ้นเทียบเท่าน้ำมันดิบ 31 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 38 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมด

การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) มีความสำคัญอย่างหนึ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานของรถยนต์ในปัจจุบัน เพราะการออกแบบรถยนต์ส่วนใหญ่จะเน้นความสวยงาม ทันสมัย แต่การอนุรักษ์พลังงานในด้านรูปร่างของรถยนต์นั้น ยังมีการศึกษาและปรับปรุงน้อยกว่าในด้านเครื่องยนต์และกลไก โดยรูปร่างของรถยนต์เป็นปัจจัยโดยตรงต่อการเพิ่มหรือลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) เพราะฉะนั้น หากการออกแบบรูปร่างและการปรับปรุงรูปร่างรถให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำ ก็จะช่วยลดพลังงานในการขับเคลื่อนด้วยอีกวิธีหนึ่ง อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา มีการใช้รถยนต์เป็นจำนวนมาก และยังต้องการใช้สอยประโยชน์ในการบรรทุกสิ่งของเพื่อทางการค้าและคมนาคม รถบรรทุกขนาดเล็กหรือที่รู้จักกันคือรถปิกอัพ จึงเป็นที่นิยมในประเทศ ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ โดยการทดลองจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย ถึงแม้จะมีการออกแบบที่ดี พอควรแล้ว แต่ก็อาจจะสามารถปรับปรุง หรือ ดัดแปลงให้มีแรงต้านอากาศที่ต่ำลงได้อีก เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และในการใช้งานจริง ผู้ใช้งานมักจะติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อประโยชน์อย่างอื่นหรือเพื่อความสวยงาม ทำให้มีการใช้งานที่ผิดไปจากต้นแบบอยู่เสมอ ก่อให้เกิดแรงต้านของอากาศสูง ซึ่งจะทำให้เพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น และการใช้งานรถบรรทุกขนาดเล็กในประเทศไทย ส่วนมากแล้วเจ้าของรถมักจะไม่ได้บรรทุกสิ่งของจนเต็มท้ายรถและก็ได้มีการปิดคลุมกระบะท้ายรถ ส่วนมากช่วงท้ายรถจะว่าง โดยหลักอากาศพลศาสตร์ บริเวณท้ายรถที่ว่างนี้ เมื่อรถวิ่งไป จะเกิดอากาศหมุนวน (Vortex or recirculation) ซึ่งก็คือการเกิดการสูญเสีย (Loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระบะท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านและเป็นภาระที่เพิ่มให้กับ

เครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ใช้พลังงานสิ้นเปลืองมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วของรถและรูปร่างของกระบะท้าย ดังนั้นการศึกษาปรากฏการณ์นี้โดยละเอียดจะสามารถทำให้ทราบสภาพปัญหา ข้อมูล ความจริง และสามารถเสนอแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมได้ หนึ่งในต่างประเทศ เช่น ออสเตรเลีย มีกฎหมายว่ารถบรรทุกเล็กจะต้อง มีการคลุมกระบะท้ายให้ มิดชิด อาจจะเป็นเรื่อง ของความปลอดภัย หรือ เรื่องการประหยัดพลังงานก็เป็นได้ กระบะท้ายของรถบรรทุกขนาดเล็กในออสเตรเลีย จะค่อนข้างต่ำมาก อาจจะเป็นการออกแบบเพื่อลดแรงต้านก็เป็นไป



รูปที่ 1.1 รถบรรทุกขนาดเล็กที่มีการคลุมท้ายกระบะ

จากงานวิจัยในประเทศไทย การนำวิธีจำลองเชิงตัวเลข (Computational Fluid Dynamics: CFD) มาใช้ในการทดสอบ และลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกขนาดเล็ก พบว่ายังไม่มีงานวิจัยที่เคยทำมาก่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะนำความรู้เรื่องอากาศพลศาสตร์มาศึกษาและปรับปรุงสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณ์ของรถ รวมไปถึงการศึกษาปัญหา ข้อดีข้อเสียของการติดตั้งอุปกรณ์เสริม โดยจะทำการศึกษาทั้งด้านการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม แต่จะเน้นทางด้านการใช้โปรแกรมโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งอาจมีการปรับปรุงรูปร่างของรถบรรทุกขนาดเล็กจริงในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาอุโมงค์ลมให้เหมาะสมกับการศึกษาอากาศพลศาสตร์
2. สามารถเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านแบบจำลองรถบรรทุกขนาดเล็กจาก CFD กับการทดลองในอุโมงค์ลมอย่างถูกต้องและสอดคล้องกัน
3. เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านรูปลักษณ์ต่าง ๆ ของแบบจำลองรถบรรทุกขนาดเล็กขนาดจริงโดย CFD อย่างถูกต้อง
4. เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดเล็ก

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงต้านของรถกระบะขนาดเล็ก ในการปรับปรุงรูปร่างในกรณีต่าง ๆ โดยใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อความถูกต้องและสอดคล้องกัน จึงได้มีการทดสอบพร้อมกับแบบจำลองที่ทดสอบในอุโมงค์ลม ดังนั้นจึงได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัยไว้ดังนี้

1. ใช้ CFD code (FLUENT) 3 มิติในการออกแบบ และการคำนวณเชิงตัวเลข
2. ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก ในประเทศไทย ในช่วงความเร็วไม่เกิน

140 km/hr หรือประมาณ (39 m/s)

3. ใช้รถบรรทุกขนาด 1 ตัน แบบตอนเดียว หรือมีห้องโดยสารเสริม (Cab)
4. สภาพบรรยากาศเป็น บรรยากาศปกติ โดยเฉลี่ยของประเทศไทย
5. ใช้อุโมงค์ลม โดยความเร็วไม่เกิน 15 m /s ในการทดสอบแบบจำลอง

### 1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากหนังสือ และวารสาร
2. ศึกษาวิธีการออกแบบโครงสร้างของอุโมงค์ลมแบบง่าย
3. จัดเตรียมวัสดุ และทำการสร้างอุโมงค์ลม
4. ทดสอบ เปรียบเทียบ และปรับปรุงอุโมงค์ลม
5. ศึกษาการใช้โปรแกรม CFD โดยโปรแกรม FLUEN และ GAMBIT
6. ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาคำนวณ
7. ศึกษาและใช้ CFD จำลองการไหลผ่านวัตถุอย่างง่าย เช่น ทรงกลม ทรงสี่เหลี่ยม

2 และ 3 มิติ

8. ศึกษาปัญหาของรูปร่างที่มีผลกับแรงต้านของรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในประเทศไทย
9. ใช้ CFD จำลองเปรียบเทียบ (Validate) วัตถุอย่างง่าย กับผลทดลองจากงานวิจัยและ

วารสาร

10. ใช้ CFD จำลองรถกระบะขนาดเล็กเพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน

11. ใช้อุโมงค์ลม และ CFD ทดสอบและเปรียบเทียบแรงต้าน ในการปรับปรุงรูปร่าง และลักษณะการวิ่งของรถบรรทุกเล็กบนท้องถนน ซึ่งมีกรณีต่าง ๆ ดังนี้คือ กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ, กรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก, กรณีวิ่งเยื้องกัน และกรณีอื่น ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผล

12. คำนวณอัตราการลงทุนการปรับปรุงรูปร่างรถกับการประหยัดเชื้อเพลิง
13. วิเคราะห์ และสรุปผล
14. เขียนรายงาน การวิจัยฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาแนวทางในการปรับปรุงส่วนอื่น ของรถบรรทุกขนาดเล็กให้สัมประสิทธิภาพด้านลดลงอีกได้ โดยการวิเคราะห์จากการจำลองเชิงตัวเลข
2. ได้องค์ความรู้ในการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดอื่น โดยใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลข
3. ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ ต่อการใช้งานรถบรรทุกขนาดเล็กให้เหมาะสมในแง่อากาศพลศาสตร์
4. ได้เครื่องมือ (อุโมงค์ลม) ที่สามารถทดสอบแบบจำลองต่าง ๆ ได้
5. เสนอแนวทางในการประหยัดพลังงานของการใช้รถบรรทุกขนาดเล็ก

## บทที่ 2

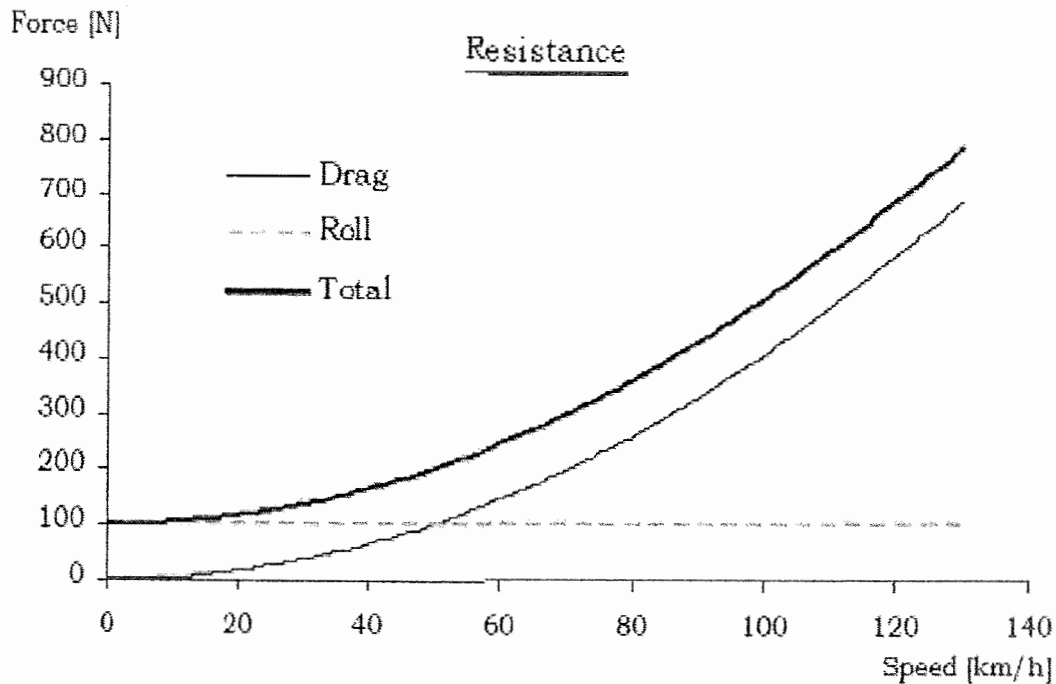
### ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

#### 2.1 ลักษณะแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถยนต์

วินัย ศรีอำพร [2] การไหลของอากาศรอบ ๆ รถยนต์ โดยอากาศครอบคลุมอยู่ผิวนอกของรถยนต์ เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลภายนอก (External flow) ซึ่งการศึกษาการไหลภายนอกมีส่วนสำคัญมากต่อการเคลื่อนที่ของรถยนต์ จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการของอากาศพลศาสตร์มาวิเคราะห์ ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ต่าง ๆ จะต้องพิจารณาที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของรถยนต์ คือ แรงยกและแรงหน่วง (Lift and Drag) ทั้งสองแรงมีความสำคัญมากต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และความเหมาะสมเพื่อให้มีคุณสมบัติทางอากาศพลศาสตร์ที่ดี

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

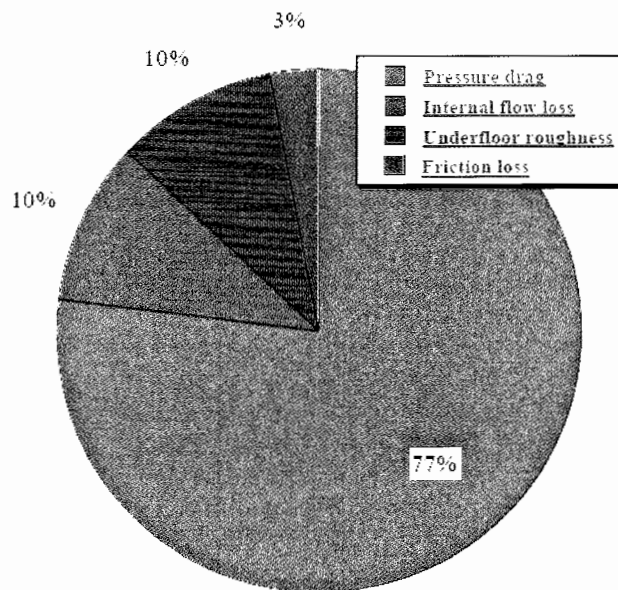


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ Alexander [3]

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อ จะคงที่ตลอดความเร็วที่รถยนต์วิ่ง และแรงต้านอากาศมีผลกระทบกับการเคลื่อนที่ มากกว่าแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน ซึ่งแรงต้านอากาศจะมีค่ามากหรือน้อย ย่อมขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของรถยนต์

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

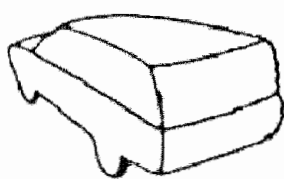




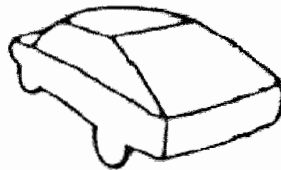
รูปที่ 2.2 สัดส่วนของลักษณะแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ Hocho [4]

### 2.1.1 แรงต้านอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศ (Pressure drag)

เป็นแรงต้านอากาศที่มีค่ามากที่สุด เกิดจากการที่อากาศปะทะพื้นที่ของรถยนต์ ที่มีทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จะส่งผลทำให้เกิดการปั่นป่วนของอากาศเมื่อไหลผ่านรถยนต์ ทำให้เกิดความดันแตกต่างระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถยนต์ ซึ่งค่าแรงต้านอากาศจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของรถยนต์ โดยเฉพาะส่วนท้ายของรถยนต์ จะเกิดการหมุนวนของอากาศมาก โดย Ahmed and Baumert [5] ได้แบ่งลักษณะของรูปทรงท้ายของรถยนต์นั้น เป็น 3 ลักษณะคือ ทรงท้ายสี่เหลี่ยม (Squareback), ทรงท้ายเฉียง (Fastback), และทรงท้ายบาก (Notchback) ดังรูปที่ 2.3



Squareback



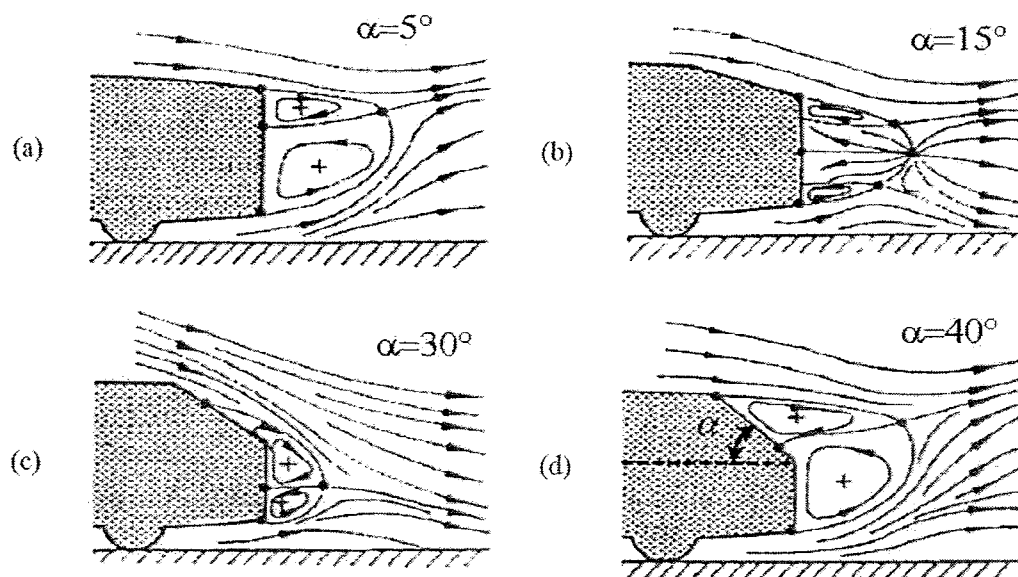
Fastback



Notchback

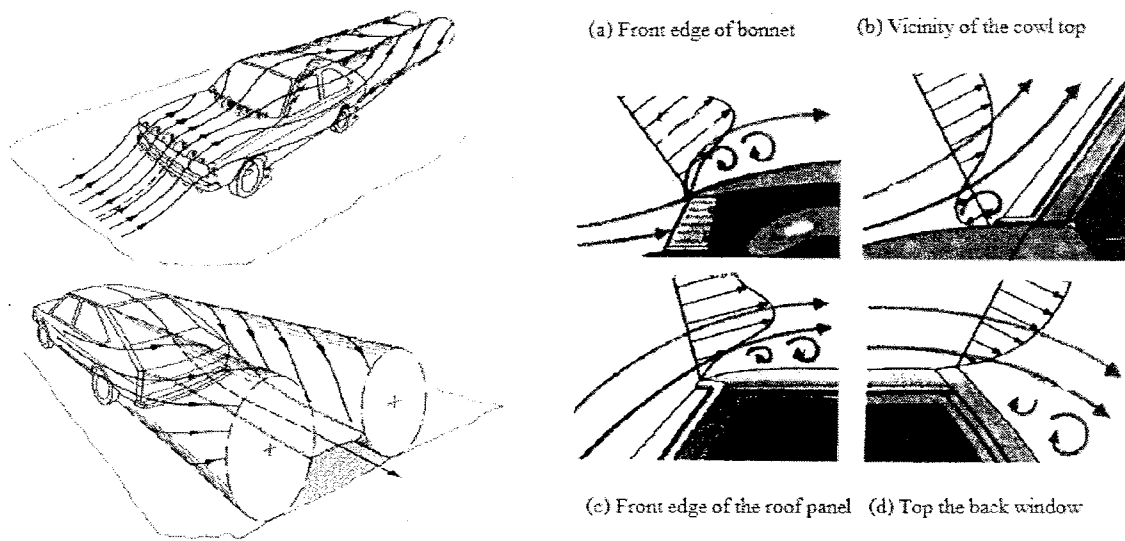
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปทรงท้ายต่าง ๆ ของรถยนต์นั้น Ahmed and Baumert [5]

ซึ่งรูปทรงท้ายแต่ละรูปทรงก็จะส่งผลทำให้เกิดลักษณะการหมุนวนของอากาศที่แตกต่างกัน โดย Ahmed [6] ได้ศึกษาความแตกต่างของการหมุนวนของอากาศของรูปทรงท้ายของรถยนต์ โดยค่ามุมเอียงของรูปทรงท้าย มีค่าแตกต่างกันคือ  $\alpha = 5^\circ$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$  และ  $\alpha = 40^\circ$  พบว่าค่ามุมรูปทรงท้ายที่  $\alpha = 30^\circ$  จะทำให้เกิดการหมุนวนเป็นวงหรือเวค (Wake) ที่มีขนาดเล็กมากที่สุด ซึ่งมีลักษณะด้านอากาศพลศาสตร์ที่ดี ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดเวคที่มีลักษณะ และขนาดที่แตกต่างกัน Ahmed [6]

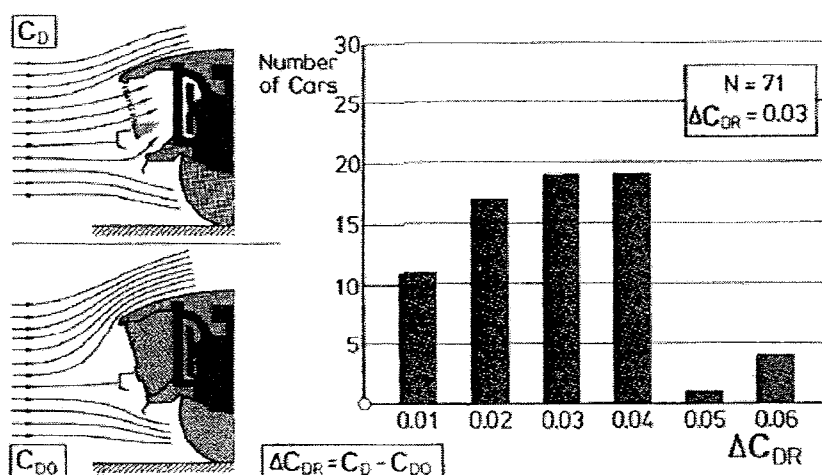
ไม่เฉพาะส่วนท้ายของรถเท่านั้นที่ทำให้เกิดเวค แต่ส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับมุมที่มาก ๆ ก็จะทำให้เกิดเวคเช่นเดียวกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศอย่างฉับพลัน ซึ่ง Scibor [7] พบว่าการเกิดการหมุนวนของอากาศที่ทำให้เกิดเวค นอกจากส่วนท้ายรถแล้วยังมีส่วนหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดเวค คือ 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 ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ส่วนต่าง ๆ ของรถที่ทำให้เกิดเวค Scibor [7]

### 2.1.2 แรงต้านอากาศที่เกิดจากการไหลเข้าภายในรถยนต์ (Internal flow loss)

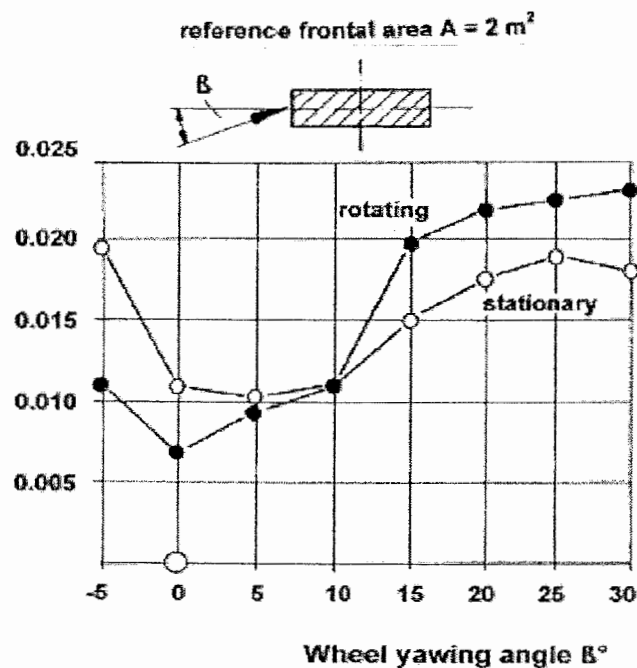
เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของอากาศผ่านเข้าภายในตัวรถเพื่อระบายความร้อนให้กับระบบทำความเย็นในระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ เช่นระบบหม้อน้ำ ระบบเบรก ระบบไอดี เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดการหมุนวนภายในทำให้เกิดการสูญเสีย ซึ่ง Hucho [8] ได้พบว่า รถยนต์โดยส่วนใหญ่ที่มีระบบให้อากาศไหลเข้าไปภายในรถยนต์เพื่อระบายความร้อน เพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ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



รูปที่ 2.6 อัตราการเพิ่มของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากระบบระบายความร้อน Hucho [8]

### 2.1.3 แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างพื้นรถยนต์กับถนน (Underfloor roughness)

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



รูปที่ 2.7 ความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน Hucho [8]

### 2.1.4 แรงต้านอากาศที่เกิดจากการเสียดทานของอากาศ (Friction loss)

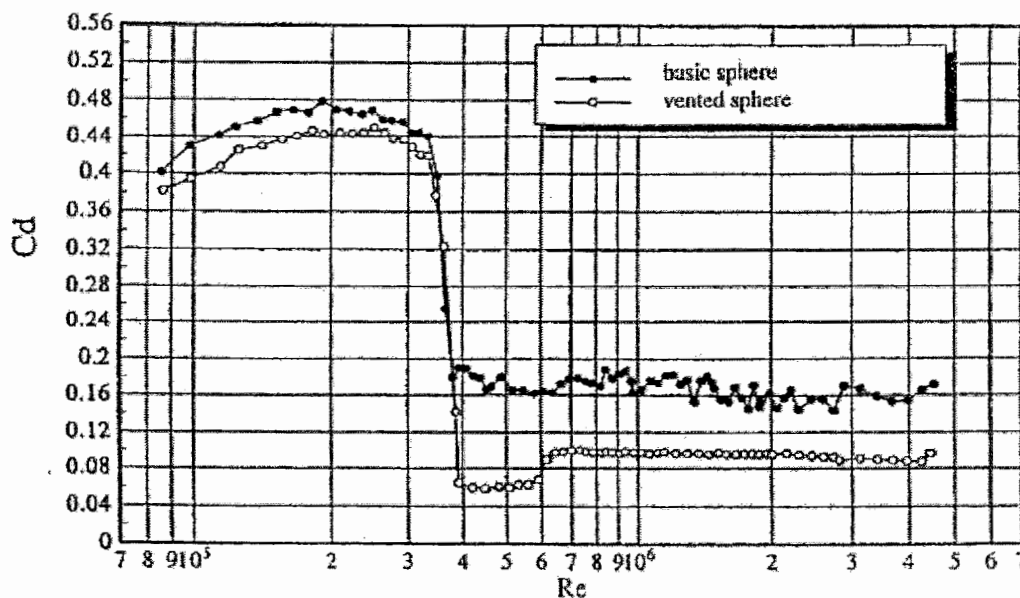
แรงต้านดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของรถ (Wall shear stress) เกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล ซึ่งแรงนี้จะมีทิศทางขนานกับผิวรถยนต์ ซึ่งจากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ลักษณะของแรงนี้จะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากอากาศมีค่าความหนืดต่ำ และอิทธิพลแรงต้านจากค่าความหนืดนี้จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเร็วรถเพิ่มขึ้น

## 2.2 การปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ ด้วยอุโมงค์ลม

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

### 2.2.1 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของรูปทรงต่าง ๆ

Groshe and meier [9] ได้พยายามที่จะลดการเกิดการแยกตัวของวัตถุทรงกลม ใช้วิธีการทดสอบโดยให้อากาศไหลผ่านทรงกลมเจาะรูตรงกลาง ทดสอบด้วยอุโมงค์ลมความดันสูง (High-pressure wind tunnel) ทำให้อากาศที่ผ่านทรงกลมที่เจาะรูเกิดการแยกตัววิกฤตหรือ Supercritical Reynolds number (Supercritical Reynolds number คือการเกิดลักษณะของจุดที่เกิดการแยกตัว เคลื่อนตำแหน่งไปทางด้านท้ายวัตถุ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงอย่างรวดเร็ว) ซึ่งทรงกลมเจาะรูตรงกลางจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงมากกว่าทรงกลมธรรมดา ที่ Reynolds number เดียวกัน ดังรูปที่ 2.8

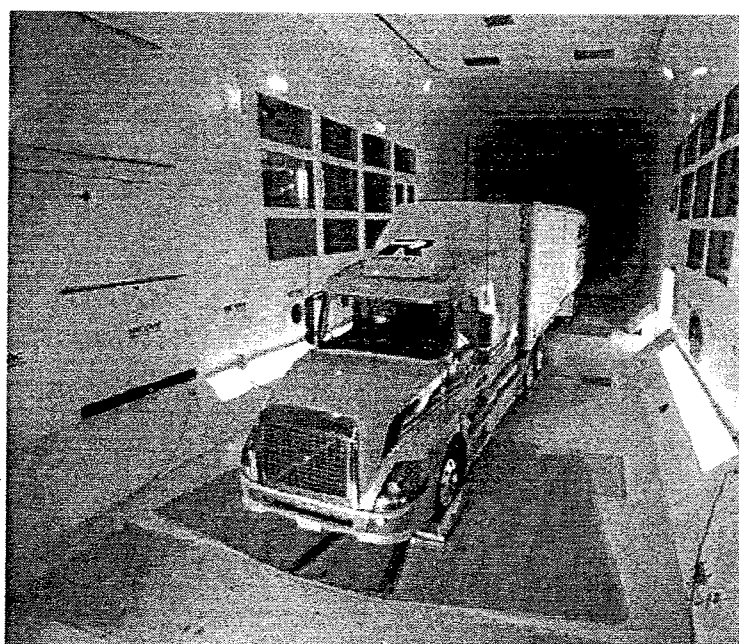


รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมเจาะรู และไม่เจาะรู Groshe and meier [9]

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

### 2.2.2 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์

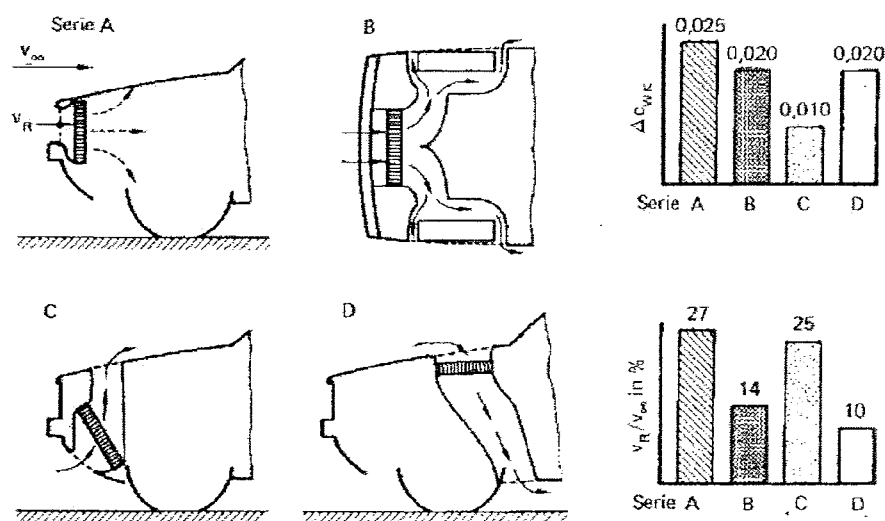
Van Dam [11], Kwon [12] และ Storms [13] ได้นำเอาหลักการของการลดการแยกตัวของอากาศของวัตถุ มาใช้เพื่อปรับปรุงรูปทรงของรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ใช้รูปแบบจำลองในการทดสอบ แต่มักจะเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่วัดได้จากการทดสอบไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จริง เนื่องจากรายละเอียดรูปลักษณะรถแบบจำลองไม่สามารถสร้างเหมือนจริงทุกรายละเอียด ต่อมาได้พัฒนามาใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ที่สามารถทดสอบรถยนต์จริงได้ โดยสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถูกต้อง และวิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน Leuschen and Cooper [14] ก็ได้นำรถบรรทุกขนาดใหญ่ขนาดจริงทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ ศึกษาและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมภายนอก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงต้นแบบเดิม ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ Leuschen and Cooper [14]

พบว่า ไม่ใช่แค่รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่ อุปกรณ์ตกแต่ง หรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งจากกับทิศทางการไหลของอากาศ และยื่นออกจากตัวรถ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะดูดซับพลังงานส่วนเสดความดัน (Pressure head) และเสดความเร็ว (Velocity head) ของอากาศเมื่อปะทะกับรถ เช่น กันชนรถยนต์, อุปกรณ์บังแสงแดดด้านข้างกระจก, อุปกรณ์สำหรับวางของบนหลังคา เป็นต้น ซึ่งเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 4 % ถึง 6 % แต่ก็มีอุปกรณ์เสริมที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการลดการหมุนวนของอากาศ (Vortex or recirculation) เช่น ที่บังล้อ เป็นต้น ซึ่งลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption) 5 % ถึง 7 % เป็นการลดอัตราการสูญเสียโดยการลดการหมุนวนของอากาศ ที่เกิดขึ้นภายนอกตัวรถยนต์ (External flow loss) แต่อุปกรณ์บางชิ้น เช่น สปอยเลอร์ Kieffer, *et al.* [15] ได้ศึกษาอุปกรณ์เสริมที่มีส่วนทำให้แรงต้านสูงขึ้นนั้น ก็ยังมีข้อดีสำหรับเพิ่มแรงกดเพื่อยึดติดถนนสำหรับรถยนต์นั่ง แต่ก็ควรไม่ให้มีค่าสูงมากเกินไปโดย Tomiyama *et al.* [16] ได้ศึกษาแรงยกเพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมของแรงยกกับรูปร่างรถ ใช้โมเดลเป็นเครื่องมือทดสอบ เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎีของแรงยก ซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ แรงยกด้านหน้า และแรงยกด้านหลัง และได้ศึกษาพฤติกรรมของเวดซึ่งมีลักษณะไม่คงตัว (Unsteady) โดยในการศึกษาได้ใช้รถยนต์นั่งติดสปอยเลอร์ พบว่ารูปร่างด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด เรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical afterbody geometry) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดม เกียรติ นนท์แก้ว [17] และ Fukuda, *et al.* [18] ได้ปรับปรุงอากาศพลศาสตร์โดยการควบคุมอากาศที่กระทบกับรถยนต์แบบนั้น ซึ่งจะเน้นอุปกรณ์การควบคุมการไหลผ่านด้านหลังรถซึ่งเป็นที่รู้จักกันคือ สปอยเลอร์ ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของ สปอยเลอร์ ปรับเปลี่ยนมุมมองฯ ขนาด และตำแหน่งของการติดตั้ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะเพิ่มแรงกด และลดแรงต้าน ในการวิเคราะห์พบว่า เมื่อรูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดรูปแบบการไหลในเวดอย่างฉับพลัน และมีเวดขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงต้านสูง และระยะระหว่างพื้นรถและพื้นถนนก็ยังมีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยเช่นกัน

แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (Internal flow loss) โดยอากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (Gab) ทำให้เกิดการหมุนวนภายใน โดยเฉพาะอากาศที่ไหลเข้าภายในเพื่อระบายความร้อน โดย Hucho [8] ได้เปรียบเทียบของสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างการออกแบบช่องระบายอากาศที่แตกต่างกัน ซึ่งได้ใช้รถยนต์แบบนั่งทดสอบ ผลปรากฏว่า การออกแบบที่ให้อากาศไหลเข้าด้านล่างเพื่อระบายความร้อนของเครื่องยนต์ จะเพิ่มสัมประสิทธิ์แรงต้านน้อยที่สุด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การออกแบบช่องระบายความร้อนของเครื่องยนต์ที่แตกต่างกัน Hucho [8]

เช่นเดียวกันกับ ช่วงห่างระหว่างห้องผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระบะของรถบรรทุก ซึ่งจะเกิดเวกซ์ขึ้น โดยสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดช่องว่าง หรืออุปกรณ์เพื่อช่วยลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมีข้อจำกัดของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความละเอียด เช่นการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการปรับมุมของสปอยเลอร์ของรถยนต์แบบนั้น ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากค่าไม่มีความละเอียดพอ และยังมีข้อจำกัดของสภาวะของการทดสอบ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สามารถกำหนดสภาวะ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ

### 2.3 การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ด้วย CFD

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





### 2.3.1 การศึกษาการไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ด้วย CFD

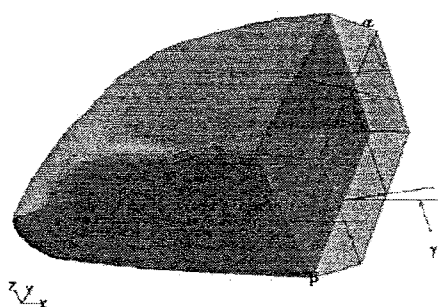
เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ก้อง และคณะ [19] ศึกษาวิธีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ในสองมิติโดยใช้หลักการของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ วิธีปริมาตรจำกัดถูกนำมาใช้เพื่อทำการไม่ต่อเนื่องสมการควบคุมที่เกี่ยวข้อง และใช้ระเบียบวิธี Simpler เพื่อทำให้ผลที่ได้จากการคำนวณจากระบบสมการควบคุมทั้งหมดเป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์มวล วิธีกันค่าถูกนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตของสิ่งกีดขวาง โดยกรณีทดสอบคือการไหลผ่านสิ่งกีดขวางรูปทรงขั้นบันได กลับหลังที่ Reynolds number 100 , 389, และ 1,000 จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจสอบพบการแยกไหลบริเวณด้านหลังของขั้นบันได โดยของไหลบริเวณด้านหลังบันไดมีทิศการไหลกลับทิศทาง Spalart [20] ได้ทำการศึกษาความปั่นป่วนของของไหลที่ผ่านวัตถุ โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลข ทดสอบวัตถุทรงกลม ซึ่งสมการความปั่นป่วนแต่ละชนิดให้ผลที่มีความแตกต่างกัน ประกอบกับการสร้างกริดที่จำนวนต่างกัน ขึ้นอยู่กับการใช้งาน มาประยุกต์กับการทดสอบเครื่องบิน เครื่องอัดอากาศ หรือรถยนต์ โดยรถยนต์จะใช้สมการความปั่นป่วนที่ให้ผลดี 2 แบบคือ k-omega และ k-epsilon Wang [21] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลที่เกิดจากของไหลในค่า Reynold number ที่สูงไหลผ่านวัตถุทรงกระบอก เปรียบเทียบกับการจำลองเชิงตัวเลข 2 มิติ แบบ Large-Eddy Simulation โดยทดลองที่ค่า Reynolds number ระหว่าง  $5.0 \times 10^5 - 3.6 \times 10^6$  ซึ่งเป็นการทดลองในช่วงที่เรียกว่า Supercritical Reynolds number จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นและลดลงไปในแนวทางเดียวกัน แต่ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบนั้นแตกต่างกัน โดยตามทฤษฎีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะเพิ่มขึ้นแต่ในการจำลองที่กล่าวมานั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะคงที่ซึ่งเป็นผลที่ขัดแย้งกันในทางทฤษฎี

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

### 2.3.2 แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์ ด้วย CFD

Van Dam [11] ได้ศึกษากระบวนการหาแรงต้านของวัตถุ โดยได้รวบรวมวิธีต่าง ๆ ในการหาค่าของแรงต้านตั้งแต่ยุคต้น ๆ จนถึงปัจจุบัน ได้มีการพัฒนามาใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข CFD มาทำนายหาค่าแรงต้าน โดยใช้สมการ Euler และ Reynolds-averaged Navier-Stokes เป็นหลักการในการคำนวณเชิงตัวเลขของการไหลผ่านวัตถุมาทำนายสัมประสิทธิ์แรงต้าน และนำมาประยุกต์ มีการเปรียบเทียบกระบวนการในทาง CFD และการทดสอบในอุโมงค์ลม มีการปรับปรุง

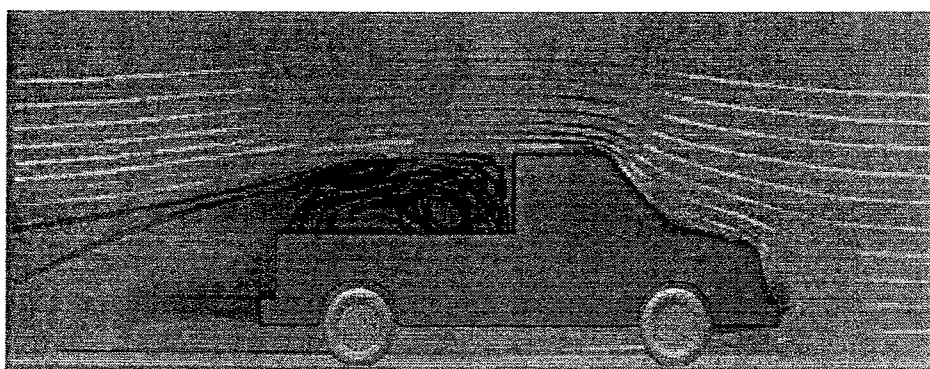
ลักษณะของกระบวนการมาเรื่อย ๆ จนกระทั่งประยุกต์มาใช้ในการทำนายแรงต้านของยานพาหนะ เช่น เครื่องบิน ฮอริคอบเตอร์ รถยนต์ ซึ่งเป็นพื้นฐานการประยุกต์ใช้ในการลดแรงต้านของยานพาหนะ Horinouchi [23], Muyl, *et al.* [24] และ Ozwa, *et al.* [25] ได้นำหลักการมาจำลองเพื่อการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ โดยมีการใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดใต้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดตั้งชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ โดยแรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอกสัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่มีผลจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจากการไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดย Muyl, *et al.* [24] ทำการศึกษาหาความเหมาะสมรูปร่างท้ายรถยนต์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ และใช้สมการแบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล k-epsilon โดยแบ่งรูดออกเป็นสามส่วน คือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง โดยส่วนหลังจะมี Back-light angle, Boat-tail angle และ Ramp angle ตามรูปที่ 2.11 จากการปรับ back-light angle จะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่ด้านท้ายรถต่างกัน ซึ่งการปรับค่ามุม ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) ที่ต่ำจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านสูง แต่เมื่อปรับมุมให้มีค่าที่สูงขึ้นเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง



รูปที่ 2.11 มุม  $\alpha, \beta, \gamma$  (Muyl, 2004)

Singh [26] ไม่เฉพาะมุมส่วนท้ายรถเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน แต่ช่องว่างระหว่างส่วนต่าง ๆ ของรถก็มีผลด้วยเช่นกัน จึงใช้ CFD มาปรับแก้เงื่อนไขในการคำนวณ เพื่อทำการศึกษาระงต้านของยานพาหนะ เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน Turbulent model ต่าง ๆ กับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยใช้รถบรรทุกใหญ่ในการจำลอง ซึ่งผลที่ได้ แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล k-epsilon และกริดที่มีความละเอียดพอ จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบใน

อุโมงค์ลมมากที่สุด และได้นำเงื่อนไขดังกล่าวมาศึกษาการเกิดการหมุนวนของอากาศ ระหว่างหัวรถกับตัวรถของรถบรรทุกใหญ่ ซึ่ง Simon and Gioacchino [27] พบว่า เกิดการไหลวนที่แตกต่างกัน และระยะห่างของหัวรถกับตัวรถต่างกัน ส่งผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถบรรทุก โดยระยะห่างที่น้อยลงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และเนื่องจากโดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กจะสูง เนื่องจากรูปทรงท้ายกระเบนนั้นทำให้อากาศแยกตัว เกิดการหมุนวนของอากาศที่ใหญ่ เนื่องจากความต่างของความดัน ระหว่างด้านหน้าและท้ายกระเบ และอากาศที่หมุนวนจะปะทะกับท้ายกระเบ ดังรูปที่ 2.12 จะทำให้เกิดแรงต้าน และเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ใช้พลังงานสิ้นเปลืองมากขึ้น



รูปที่ 2.12 การเกิดเวคส่วนท้ายกระเบของรถบรรทุกเล็ก โดย CFD Cooper [28]

นอกจากการใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการปรับปรุงรูปทรงหรือรูปลักษณะโดยการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านแล้ว CFD ยังสามารถจำลองเพื่อเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นกับด้านท้ายของรถคันหน้า โดยใช้ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาวิเคราะห์ สามารถเห็นประโยชน์ที่รถคันหลังได้รับอย่างชัดเจน เพราะแรงต้านของอากาศของรถคันหลังจะลดลง โดยกระแสอากาศที่ไหลผ่านใต้ท้องรถคันหลังจะลดลง ประการสำคัญแรงจุดของกระแสลมด้านท้ายของรถคันหน้าจะทำให้รถคันตามมีความเร็วเพิ่มขึ้น โดย Browand [29] และ Yamamoto, *et al.* [30] พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถคันหลังลดลงกว่าคันหน้า และในการทดสอบรถแข่งจากการจำลอง CFD

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวมานั้น การออกแบบรูปร่างรถยนต์ให้เหมาะสม เป็นการทำให้รถยนต์วิ่งผ่านอากาศด้วยแรงต้านลดลง การประกอบชิ้นส่วนก็มีความสำคัญ เช่น การประกอบหน้าต่างและขอบที่แนบสนิทพอดี รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถ เช่น สปอยเลอร์ทางด้านหลังล้อหน้าและล้อหลัง แผ่นกันใต้ท้องรถที่ทำให้ส่วนประกอบของโครงสร้างไม่ขวางการไหลของอากาศ แม้แต่สปอยเลอร์หลังเพื่อลดความปั่นป่วนเมื่ออากาศวิ่งผ่าน อุปกรณ์เหล่านี้สามารถลดแรงต้านอากาศ โดยใช้องค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ หรือ Aerodynamics ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการออกแบบรถยนต์ ในการทดสอบ คันคว่ำ และการวิจัย จะต้องมีการนำโมเดลทั้งแบบจำลองและแบบขนาด Full scale เข้าไป

ทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อตรวจสอบค่าต่าง ๆ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทุน อุปกรณ์ และเวลาในการทดสอบ ปัจจุบันได้มีวิธีจำลองเชิงตัวเลข หรือ (Computation Fluid Dynamics : CFD) เป็นเครื่องมือที่สามารถแสดงผลได้แบบ 3 มิติ ช่วยให้เห็นภาพการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศ และผลที่เกิดกับรถยนต์ได้ชัดเจน

## 2.4 การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

อัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิงของรถยนต์ เป็นสิ่งที่ทุกคนสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากราคาที่สูงขึ้น และสถานะที่ไม่แน่นอนของน้ำมันเชื้อเพลิง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองให้แม่นยำ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก ดังนั้น จึงมีนักวิจัยที่พยายามหาวิธีวัดเพื่อที่จะได้ทราบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และสามารถตัดสินใจในการปรับปรุงรูปทรงหรือตัดสินใจขับซัลดเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง

โดยนักวิจัยได้มีวิธีการวัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานวิจัยนั้น ว่าศึกษาเรื่องใดของรถยนต์ เช่น จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล [31] ได้ศึกษาการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันของรถยนต์ขนาดต่าง ๆ คือรถยนต์นั่งขนาด 1800 cc, 2300 cc และรถบรรทุกเล็ก 300 cc วิ่งที่ความเร็วคงที่ 60 – 120 km/hr การวัดน้ำมันทำโดยการออกแบบถังเชื้อเพลิงพิเศษ และทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนและหลังจากที่ได้ทำการวิ่ง น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้คือ น้ำมันออกเทน 91, 95 และดีเซล ผลการทดสอบพบว่าเครื่องยนต์ทุกชนิดกินน้ำมันต่ำสุดที่ 60 km/hr การสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นเมื่อวิ่งที่ความเร็วสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถบรรทุกเล็ก เนื่องจากการออกแบบทางอากาศพลศาสตร์ที่ไม่ดี โดยอัตราสิ้นเปลืองจะเพิ่มขึ้นมากที่ความเร็ว 100 และ 120 km/hr แต่ในกรณีดังกล่าว เป็นวิธีการวัดและเปรียบเทียบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูง แต่ในลักษณะของการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ หรือการปรับปรุงรูปปลั๊กซ์ของรถยนต์ ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันค่อนข้างต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำหลักการนี้มาวัด แต่มีนักวิจัยชื่อ Leuschen and Cooper [14] ได้หาค่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกใหญ่ ในกรณีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์บังล้อด้านหน้า และหลัง, อุปกรณ์กำเนิดการหมุนวนของอากาศ ตรงตำแหน่งต่าง ๆ (Vortex generator), อุปกรณ์กันแมลง (Bug deflector) เป็นต้น โดยการหาค่าของการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วที่ต้องการทราบ ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม มาแทนค่าจากความสัมพันธ์ของ

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

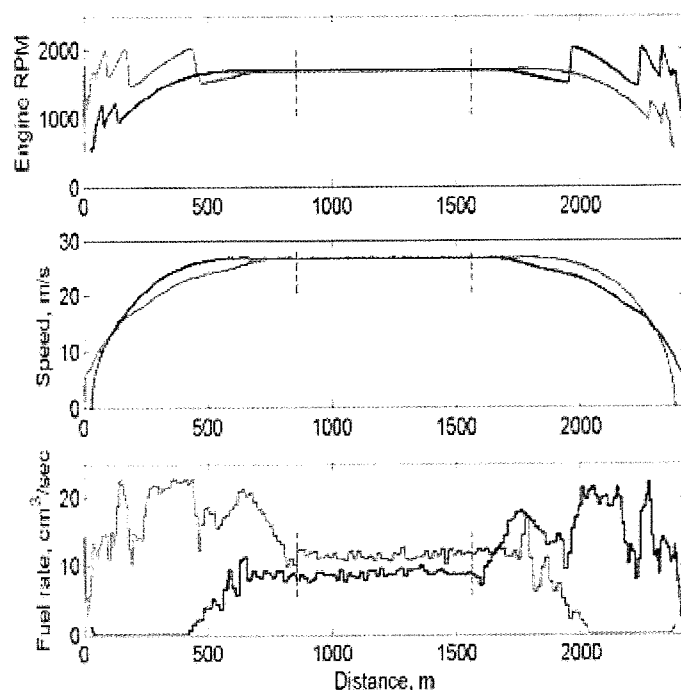
$\Delta\mu(V_t)$  คือการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ความเร็วกำหนด (liters/100 km)

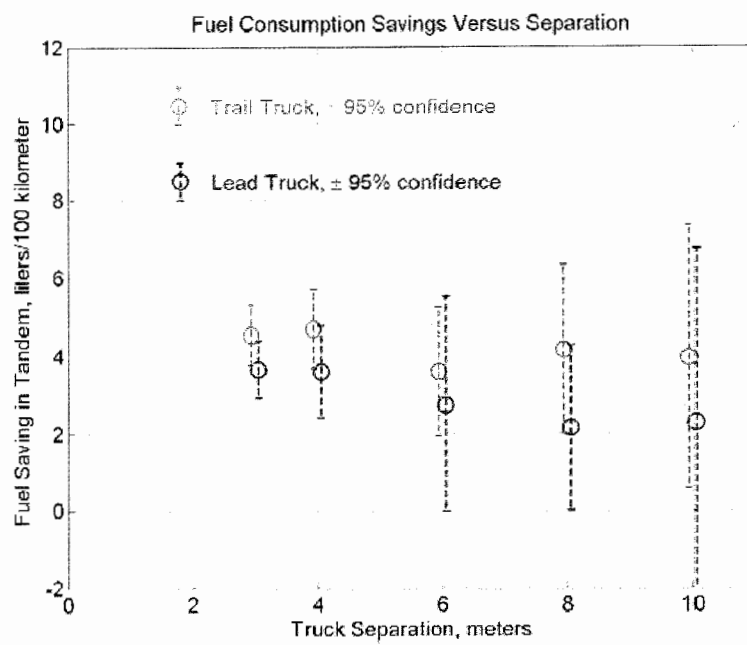
$\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m<sup>3</sup>

$UCF$  คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

- $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของรถ  $2.68576 \text{ (m}^2\text{)}$   
 0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย  
 $SFC$  คืออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (liters/kW-h)

แต่ในความเป็นจริง ค่าที่แทนในสมการ (2.1) ย่อมไม่คงที่ เนื่องจากความเร็วที่ใช้ในการวิ่งมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตามระยะทางในการวิ่ง รวมถึงสภาวะต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงมีนักวิจัยที่ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเครื่องยนต์ โดย Browand [29] ได้ทำการวัดอัตราการสิ้นเปลืองของน้ำมันเชื้อเพลิง ในกรณีรถบรรทุกใหญ่วิ่งตามก้น ซึ่งกำหนดเส้นทางตรงเป็นระยะทาง 3.5 km ระยะห่างระหว่างรถทั้ง 2 คัน 3 m– 10 m โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ชื่อว่า APTH ที่ติดอยู่ที่ตัวเครื่องยนต์ของรถทั้งสองคัน สามารถวัดค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ (Engine RPM) ความเร็วของรถที่ใช้ในการวิ่ง (Speed) และอัตราการกินน้ำมัน (Fuel rate) ตามระยะทางในการวิ่ง และคำนวณออกมาเป็นระดับที่สามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทั้ง 2 คัน โดยค่าของรถคันหลังจะมีค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงจากรถคันหน้า ดังรูปที่ 2.13





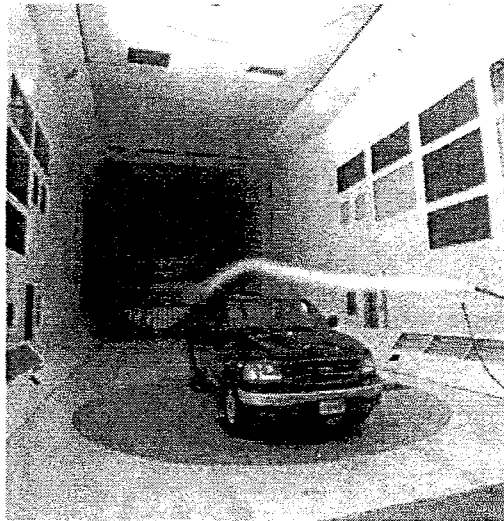
รูปที่ 2.13 ค่าที่ได้จากการวัดโดย APTH [29]

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 แรงที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ

หลักการของอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ในกรณีการเคลื่อนที่ของยานยนต์ต่าง ๆ ต้องพิจารณาถึงแรงที่อากาศกระทำต่อผิวนอกของยานยนต์ คือ แรงยกและแรงต้าน (Lift and Drag) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบรูปทรงที่ถูกต้อง และสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ซึ่งผลการศึกษาส่วนใหญ่จะได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบหุ่นจำลอง เช่น การใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ในการทดสอบ บางทีก็อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบต้นแบบของยานยนต์จริงแทนที่จะใช้หุ่นจำลอง เช่น การทดสอบรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลมในห้องปฏิบัติการด้านอากาศพลศาสตร์ของ NRC (National Research Council of Canada) ดังรูปที่ 3.1

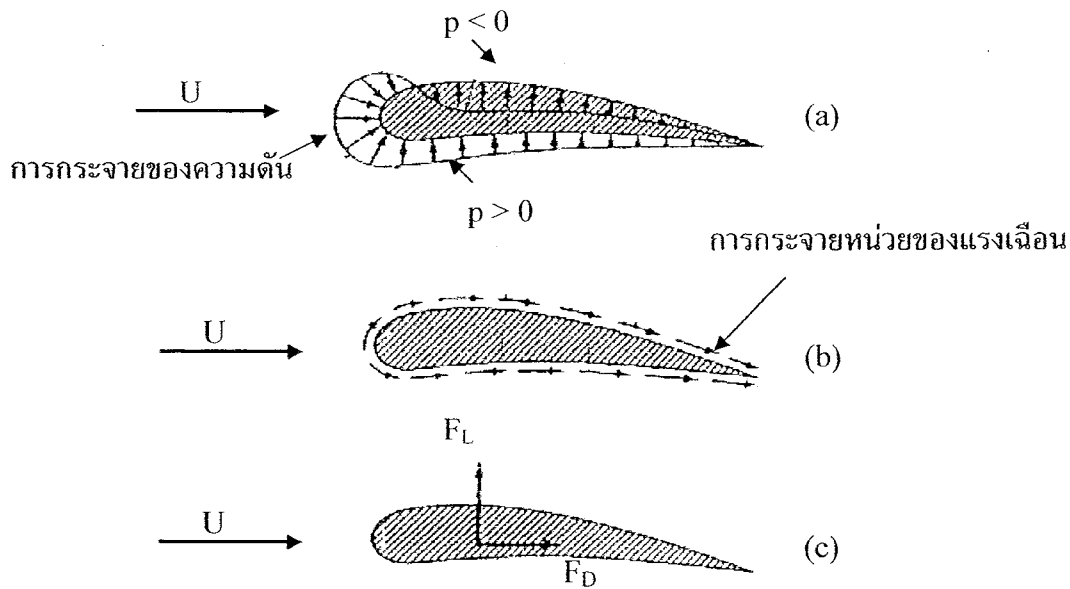


รูปที่ 3.1 การทดสอบรถบรรทุกเล็กจริงในอุโมงค์ลมของ NRC

##### 3.1.1 แรงยกและแรงต้าน

เมื่อวัตถุอยู่ในของไหลจะมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน เกิดจากการผนังผิวหน้าสัมผัสกันระหว่างของไหลกับวัตถุ แรงดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยหน่วยแรงเฉือนที่ผิวดังของเทวัตต์ (Wall shear stress,  $\tau_w$ ) ซึ่งเกิดขึ้นจากความหนืดของของไหล และความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุ เนื่องจากความดัน ( $p$ ) ตัวอย่างการแพร่กระจายของความดันและหน่วยแรงเฉือนตลอดทั่วผิวของเทวัตต์ สามารถแสดงได้ดังรูป ซึ่งแสดงทั้งขนาดและทิศทางของความดันและหน่วยแรงเฉือน

แรงรวมที่กระทำต่อเทหวัตถุในทิศทางของการไหลเรียกว่า แรงหน่วง (Drag,  $F_D$ ) และแรงรวมที่กระทำต่อเทหวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลเรียกว่า แรงยก (Lift,  $F_L$ ) ดังแสดงดังรูปที่ 3.2 และสำหรับเทหวัตถุสามมิติบางชนิดอาจจะมีแรงกระทำทางด้านข้างซึ่งตั้งฉากกับระนาบที่เกิดแรงหน่วงและแรงยกได้



รูปที่ 3.2 แรงเนื่องจากของไหลกระทำกับวัตถุ 2 มิติ (a) แรงเนื่องจากความดัน  
(b) แรงเนื่องจากความหนืด (c) แรงต้านและแรงยก

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือนและความดันที่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของเทหวัตถุสามารถหาได้จาก การอินทิเกรตแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของเทหวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ของแรงรวมที่กระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$  ดังนี้

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (3.1)$$

และ

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (3.2)$$

ดังนั้น จึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ที่กระทำต่อเทหวัตถุได้จาก

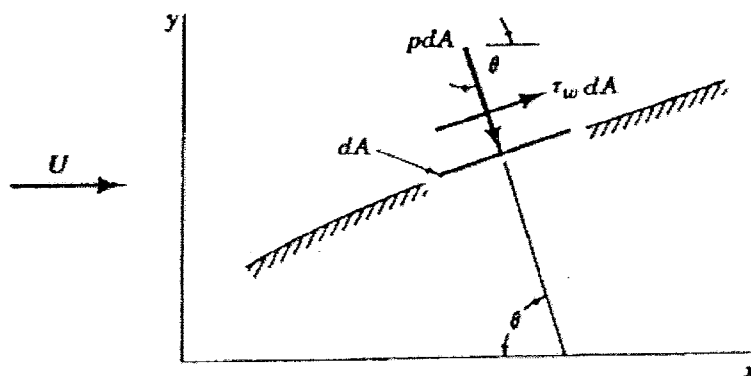
$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (3.3)$$

และ



$$F_L = -\int dF_y = \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA \quad (3.4)$$

ในการอินทิเกรตเพื่อหาค่าแรงต้านและแรงยก จำเป็นต้องรู้ขนาดและรูปร่างของวัตถุที่ศึกษา (ทั้งนี้  $\theta$  จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งบนพื้นผิวของวัตถุ) และการกระจายตัวของ  $\tau_w$  และ  $p$  ตลอดพื้นที่ผิวของวัตถุ ซึ่งการกระจายตัวดังกล่าวเป็นสิ่งที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างยาก ไม่ว่าจะด้วยวิธีการทดลอง หรืออาศัยหลักการทางทฤษฎีก็ตาม การกระจายตัวตลอดพื้นที่ผิว (ของวัตถุ) ของ  $\tau_w$  เป็นสิ่งที่วัดได้ยาก แต่การกระจายตัวของ  $p$  อาจได้มาจากการทดลองโดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันสถิตไว้ทั่วพื้นที่ผิวของวัตถุ



รูปที่ 3.3 แรงเนื่องจากความดันและแรงเฉือน ที่กระทำต่อพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวของวัตถุ

### 3.1.2 แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

แรงต้านที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ภายใต้ของไหลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 อย่างคือ แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure drag,  $F_p$ ) และแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน (Friction drag,  $F_f$ ) แรงต้านเนื่องจากความดันมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่เกิดจากความดันในทิศทางการเคลื่อนที่ที่ของไหลกระทำต่อวัตถุ ซึ่งอาจเขียนได้ในรูปของแรงประกอบเนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่ง (Stagnation pressure) ที่กระทำต่อพื้นที่ทาบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลคูณด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความดัน (Pressure – drag coefficient,  $C_p$ ) ซึ่งสัมประสิทธิ์  $C_p$  ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ และค่าได้จากห้องทดลอง โดยที่  $V$  คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุ  $A$  คือพื้นที่ทาบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล จึงสามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความดันคือ

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (3.5)$$

แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานมีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (Shear stress) ตลอดพื้นผิวของวัตถุในทิศทางของการเคลื่อนที่ โดยทั่ว ๆ ไปจะเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานในรูปของสมการที่ (3.6) โดยที่  $C_f$  คือสัมประสิทธิ์แรงหน่วยเนื่องจากความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด  $L$  คือความยาวของพื้นผิวในแนวขนานกับทิศทางการไหล  $B$  คือความกว้างของพื้นผิว โดยทั่ว ๆ ไปจะหาค่าได้โดยการหารพื้นที่ผิวทั้งหมดด้วย  $L$

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (3.6)$$

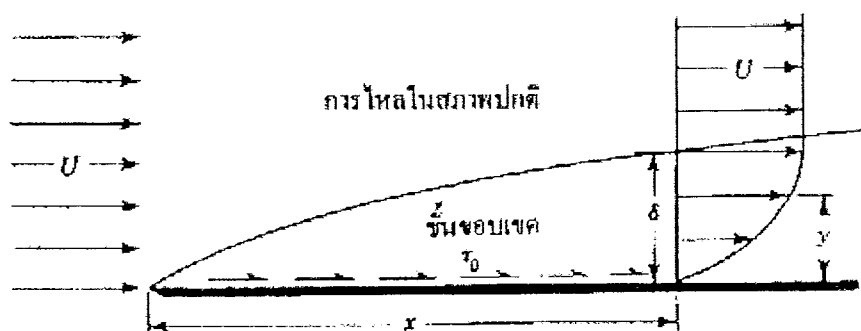
แรงต้านทั้งหมดที่กระทำต่อวัตถุใด ๆ คือผลรวมของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานและแรงต้านเนื่องจากความดันคือ  $F_D = F_f + F_p$  ในกรณีที่วัตถุเป็นทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบิน และเรือดำน้ำ ค่าของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานจะเป็นส่วนสำคัญ ดังนั้นแรงต้านรวมจึงเท่ากับแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่สำหรับวัตถุรูปทรงอื่นที่มีคลื่นวนเกิดขึ้นทางด้านท้าย เช่น แผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล ก็จะมีเฉพาะแรงต้านเนื่องจากความดันเท่านั้น โดยทั่ว ๆ ไปค่าของแรงต้านรวม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.7) โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม และ  $A$  คือพื้นที่หน้าของวัตถุบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A \quad (3.7)$$

### 3.1.3 แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานของขอบชั้น (Friction Drag of Boundary Layer)

ชั้นขอบเขตในการไหลคือชั้นบาง ๆ ของของไหลจริง (Real fluid) ที่อยู่ติดกับผิวของวัตถุ วัตถุในบริเวณดังกล่าวนี้จะได้รับอิทธิพลจากความหนืดของของไหล ทำให้เกิดการกระจายความเร็วในลักษณะที่ความเร็วที่ผิวคงรูป จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่หน่วยแรงเฉือนและความลาดของความเร็วจึง (Velocity gradient) มีค่าสูงมาก ในขณะที่ของไหลจริงนอกชั้นขอบเขตนี้สามารถถือได้ว่าเป็นของไหลสมมุติ (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) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

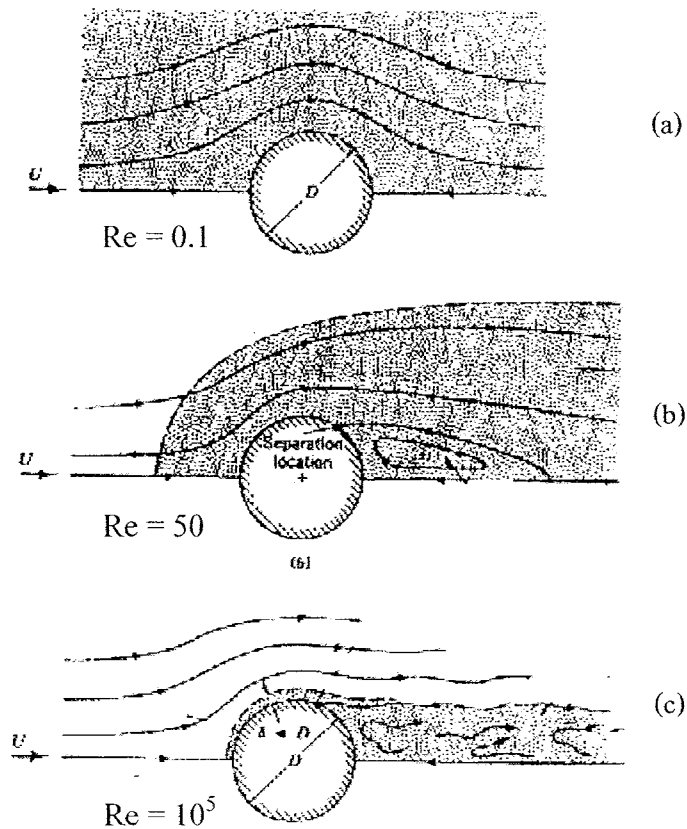


รูปที่ 3.4 ชั้นขอบเขตที่เกิดบนแผ่นระนาบเรียบ

### 3.1.4 Reynolds number

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

กรณี que การไหลผ่านวัตถุที่มีความหนา เช่น ทรงกระบอกที่ขวางทิศทางการไหลที่มีค่า Reynolds Number ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.5



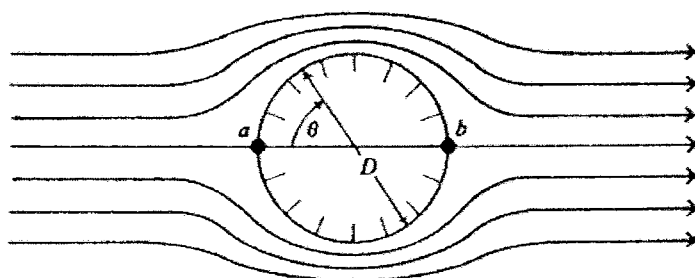
รูปที่ 3.5 ลักษณะการไหลแบบคงตัวผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางตัวขวางทิศทางการไหล โดยมีค่า Reynolds number แตกต่างกัน

หากค่า  $Re$  ต่ำจะมีผลของความหนืดสูงโดยมีความหนาของชั้นขอบเขตมาก ดังรูปที่ 3.5 (a) จะมีค่า  $Re < 0.1$  เส้นการไหลจะมีความสมมาตรระหว่างทางด้านหน้ากับด้านหลัง และทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอก เมื่อค่า  $Re$  สูงขึ้นจะมีความหนาของชั้นขอบเขตแคบลง และผลของความหนืดจะเกิดขึ้นในบริเวณทางด้านหน้าของทรงกระบอก เป็นระยะทางสั้น ๆ โดยยังคงความสมมาตรระหว่างชั้นขอบเขตทางด้านบนกับด้านล่างของทรงกระบอกไว้เช่นเดิม ดังรูปที่ 3.5 (b) คุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะเกิดการแยกตัว (Separation) ขึ้นทางด้านหลังของทรงกระบอก ซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีค่า  $Re$  เพิ่มขึ้น สภาพการไหลจะได้รับอิทธิพลจากความเฉื่อยเพิ่มขึ้น และผลของความเฉื่อยจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของวัตถุซึ่งจะเป็นจุดแยกตัว เนื่องจากของไหลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามผิวโค้งทางด้านหลังของวัตถุ ผลของฟองอากาศที่เกิดจากการแยกตัว (Separation bubble) ทางด้านท้ายของวัตถุซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปทางด้านเหนือของไหล จึงมีความต้านทานต่อการไหล เมื่อค่า Reynolds number สูงมากขึ้นไปอีก เช่น มีค่าเท่ากับ  $10^5$  ดังรูปที่ 3.5 (c) บริเวณที่ได้รับความหนืดจะค่อนข้างทางด้านหลังของวัตถุ และมีความหนาของชั้นขอบเขตที่ค่อนข้าง

บาง (เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก) เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุ ในขณะที่ทางด้านหลังจะเกิดการแยกตัวและจะมีผลของบริเวณที่เกิดคลื่นต่อสภาพการไหลทางด้านท้ายของวัตถุ ซึ่งจะเกิดการแยกตัวนี้จะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

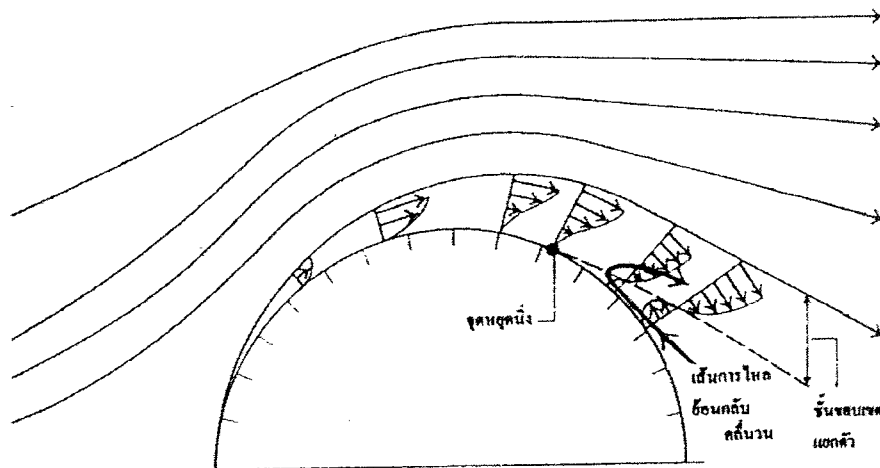
### 3.1.5 การแยกตัว (Separation)

ในกรณีที่วัตถุผิวโค้งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันตลอดผิวโค้งนั้น ดังการไหลผ่านทรงกระบอกที่ยาวมากและวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งแสดงลักษณะของการไหลของของไหลสมมุติผ่านทรงกระบอก เนื่องจากเป็นของไหลสมมุติจึงไม่มีขอบเขตเกิดขึ้น และในลักษณะดังกล่าวมีเส้นการไหลเส้นหนึ่งที่จะเข้ากระทบทรงกระบอกที่จุด  $a$  แล้วแบ่งออกเป็น 2 ส่วนไหลอ้อมทรงกระบอกไปบรรจบกันที่จุด  $b$  ซึ่งเรียกจุด  $a$  และ  $b$  นี้เรียกว่า จุดหยุดนิ่ง (Stagnation points) เพราะที่จุดนี้ของไหลมีความเร็วเป็นศูนย์ พบว่าการกระจายความดันทางด้านหน้าและด้านหลังมีลักษณะเหมือนกัน โดยที่ความดันมีค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าแล้วค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุดเมื่อมุม  $\theta = 90^\circ$  หลังจากนั้นก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่จุดหยุดนิ่งด้านหลังของทรงกระบอก



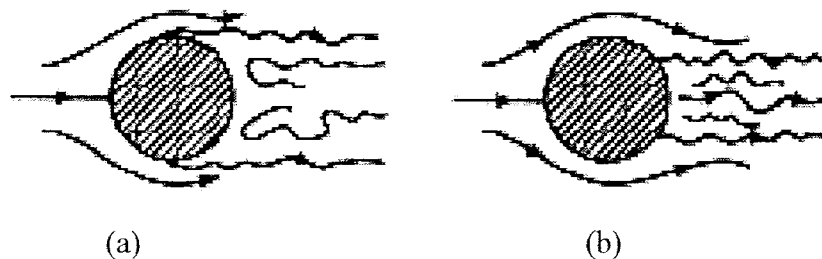
รูปที่ 3.6 การกระจายความดันทางด้านบนและด้านล่างจะเท่ากัน สำหรับของไหลสมมุติ

รูปที่ 3.7 นั้นจะเกิดขึ้นขอบเขต ซึ่งแสดงลักษณะของเส้นการไหลผ่านทรงกระบอกเฉพาะครึ่งบนเท่านั้น ส่วนครึ่งล่างก็มีลักษณะเหมือนกัน เมื่อพิจารณาเส้นการไหลในส่วนด้านหน้าของทรงกระบอก จะพบว่าชั้นขอบเขตเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่จุดหยุดนิ่งด้านหน้าและมีความหนาเพิ่มขึ้นตามระยะทางของผิวทรงกระบอก เนื่องจากความดันที่จุดหยุดนิ่งมีค่าสูงสุดจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงในทิศทางการไหล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดันเช่นนี้เมื่อนำสมการของเบอร์นูลลีมาใช้ในการวิเคราะห์ พบว่าการไหลภายนอกชั้นขอบเขตมีความเร็วกว่าการไหลภายในชั้นขอบเขต ทั้งนี้เพราะของไหลที่อยู่ภายในชั้นขอบเขตได้รับอิทธิพลมาจากความหนืด เกิดแรงเฉือนต้านการไหลจึงไหลช้ากว่าเดิม ชั้นขอบเขตในช่วงครึ่งด้านหน้าของทรงกระบอกเป็นเพียงบาง ๆ และเส้นการไหลไม่แตกต่างจากในกรณีของไหลสมมุติมากนัก



รูปที่ 3.7 ชั้นขอบเขตและการแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกระบอก

การแยกตัวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ประเภทของชั้นขอบเขตว่าเป็นแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน เนื่องจากชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนมีโมเมนตัมมากกว่าจึงสามารถต้านความดันได้ดีกว่า ดังนั้นจึงทำให้จุดแยกตัวเกิดในตำแหน่งที่ค่อนข้างไปทางด้านท้ายมากกว่ากรณีที่เกิดในชั้นขอบเขตแบบราบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



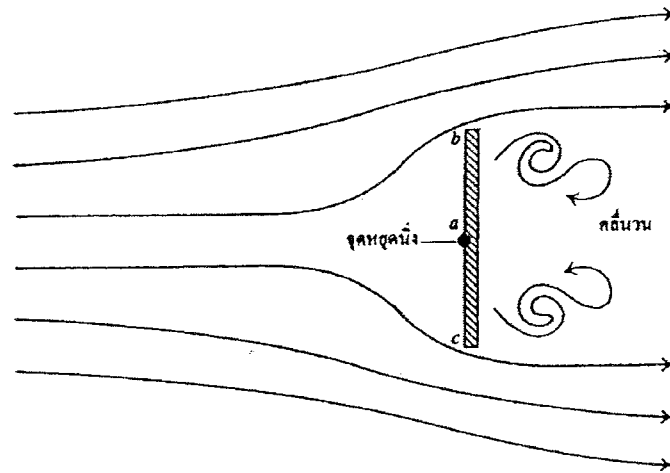
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งของจุดแยกตัวที่เกิดจากการไหลผ่านทรงกลม (a) ทรงกลมผิวเรียบ

(b) ทรงกลมผิวขรุขระ

องค์ประกอบอื่นที่มีผลต่อการแยกตัวคือความขรุขระของผิววัตถุ เนื่องจากของไหลไหลผ่านวัตถุที่มีผิวขรุขระจะก่อให้เกิดชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วนได้มากกว่าวัตถุผิวเรียบ ดังนั้นวัตถุที่มีผิวที่ขรุขระกว่าจะทำให้ตำแหน่งของการแยกตัวอยู่ค่อนข้างไปทางด้านท้าย มากกว่าวัตถุที่มีผิวเรียบ

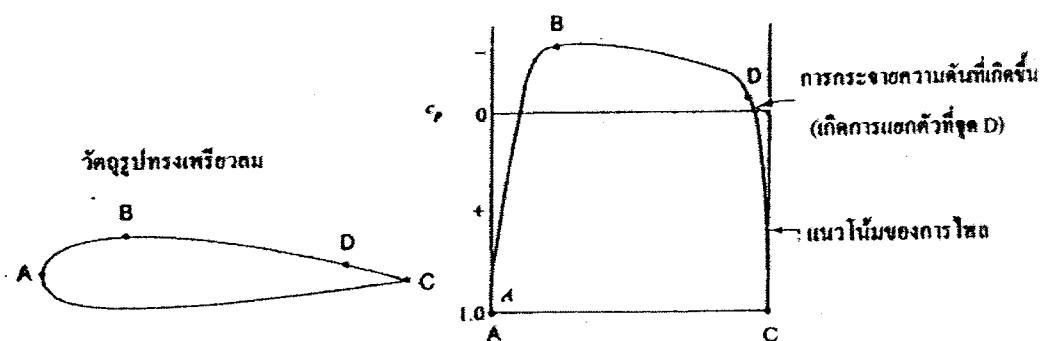
รูปทรงของวัตถุเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อตำแหน่งการแยกตัว ตัวอย่างเช่น ในกรณีวงแหวนระนาบในแนวขนานกับทิศทางการไหล จะเกิดเฉพาะแรงหน่วงเนื่องจากความเสียดทานเท่านั้น และไม่มีความดันย้อนกลับที่จะทำให้เกิดการแยกตัวหรือไม่เกิดแรงต้านเนื่องจากความดัน อย่างไรก็ตาม ถ้าหากวงแหวนระนาบให้อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จะพบว่าไม่มีแรง

ด้านเนื่องจากความเสียดทาน แต่แรงหน่วงเนื่องจากความดันจะมีค่าสูงมาก จุด a คือจุดหยุดนิ่ง จากจุด a ไปทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นระนาบจะมีความเร็วในการไหลสูงขึ้นแต่ความดันจะลดลงจนกระทั่งถึงจุด b และ c ทำให้มีความดันย้อนกลับและเกิดเวกทางด้านหลังของแผ่นระนาบ



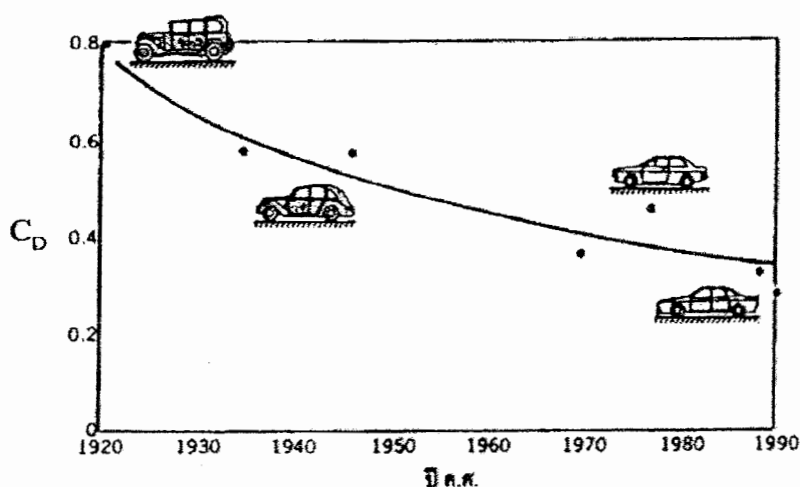
รูปที่ 3.9 คลื่นวนที่เกิดด้านท้ายของแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับทิศทางการไหล

ในทางปฏิบัติสามารถทำให้แรงหน่วงเนื่องจากความดันลดลงได้โดยทำให้จุดแยกตัวไปเกิดที่ส่วนท้ายของวัตถุให้มากที่สุด ด้วยการทำให้วัตถุมีรูปทรงเพรียวลม เช่น ปีกเครื่องบิน (Airfoil) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยมีแผนภาพการกระจายของความดัน จุดหยุดนิ่งคือจุด A กับจุด C และความดันจะมีค่าต่ำสุดที่จุด B ซึ่งเป็นจุดที่มีความหนาแน่นมากที่สุด จากนั้นความหนาของวัตถุจะค่อย ๆ ลดลงจาก B มาจนถึงปลายสุดที่จุด C จึงไม่มีความดันย้อนกลับ ดังนั้นจุดแยกตัวจะไปเกิดที่ปลายสุดทำให้เกิดแรงต้านเนื่องจากความดันน้อย



รูปที่ 3.10 ลักษณะของปีกเครื่องบินและแผนภาพกระจายความดัน

ดังนั้นการพยายามที่จะลดขนาดของแรงต้านที่กระทำต่อรถยนต์ได้มีการดำเนินการมาอย่างต่อเนื่องโดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงรูปทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม ดังตัวอย่างแสดงรูปที่ 3.11 ซึ่งจากรูปจะพบว่ารูปทรงของรถได้รับการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ ตลอดจนลักษณะของหน้าต่าง หรือแม้แต่กระจกมองด้านข้าง นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ทาบบนแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ผลจากการลดแรงหน่วงจะช่วยให้สามารถขับเคลื่อนได้ด้วยความเร็วสูงขึ้นในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลง



รูปที่ 3.11 การพัฒนารูปทรงของรถยนต์เพื่อลดแรงต้านที่กระทำต่อตัวรถ ช่วยให้ขับเคลื่อนได้เร็วขึ้น และใช้น้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

### 3.1.6 ความคล้ายคลึงกัน

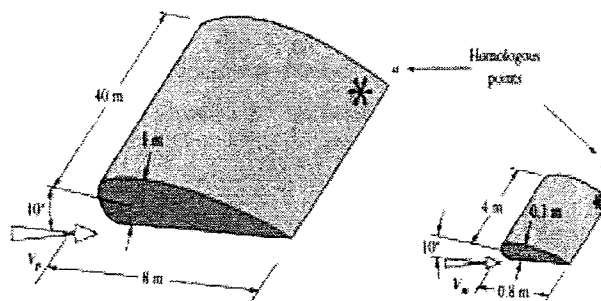
ในการศึกษาและทดสอบหุ่นจำลอง (Physical model) เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้กับต้นแบบ (Prototype) หรือของจริงภายหลัง จำเป็นต้องสร้างหุ่นจำลองให้มีลักษณะคล้ายคลึงกันกับต้นแบบมากที่สุด จึงจะให้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ กฎของความคล้ายคลึงกันมี 2 ประการ ประการแรกคือ ความสะดวกในการเลือกใช้ของไหลกับแบบจำลอง ประการที่สองช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ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

#### 3.1.6.1 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

ในการศึกษาหุ่นจำลองสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ หุ่นจำลองจะต้องมีรูปร่างเหมือนกับต้นแบบ จะแตกต่างกันเฉพาะขนาดเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้รูปแบบของการไหล (Flow patterns) ในหุ่นจำลองและต้นแบบมีความคล้ายคลึงกัน ดังรูปที่ 3.12 ถ้าให้  $L_p$  และ  $L_m$  เป็นความยาวของด้านใด ๆ



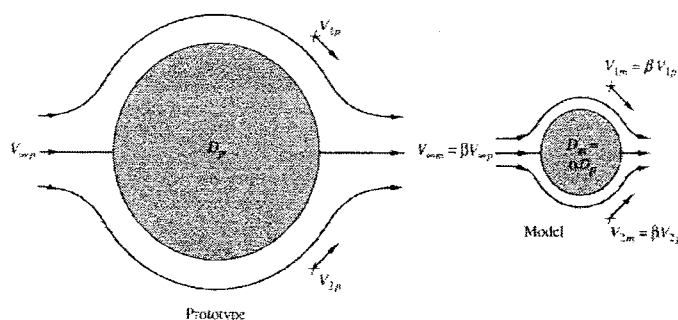
ที่ต้องพิจารณาของต้นแบบและหุ่นจำลองตามลำดับ และ  $L_r$  เป็นสัดส่วนความยาว (Length ratio) โดยที่  $L_r = L_p / L_m$  (สัดส่วนความยาวของต้นแบบกับหุ่นจำลอง) พื้นที่จะแปรผันตาม  $L_r^2$  และปริมาตรจะแปรผันตาม  $L_r^3$



รูปที่ 3.12 ความคล้ายคลึงกันเชิงเรขาคณิต

### 3.1.6.2 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์ (Kinematic similarity)

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



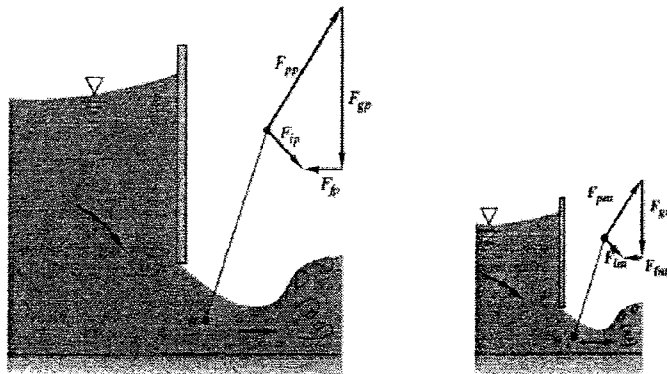
รูปที่ 3.13 ความคล้ายคลึงกันเชิงจลน์

### 3.1.6.3 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

หุ่นจำลองจะต้องมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัตกับต้นแบบก็ต่อเมื่อสัดส่วนของแรงต่างๆ ที่กระทำนั้นเท่ากัน ซึ่งแรงที่กระทำเหล่านี้ประกอบด้วยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ( $F_G$ ) แรงเนื่องจากความดัน ( $F_p$ ) แรงเนื่องจากความหนืด ( $F_v$ ) แรงเนื่องจากความยืดหยุ่น ( $F_r$ ) ถ้าผลลัพธ์ของแรงต่าง ๆ ข้างต้นไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าวัตถุจะต้องมีความเร่งตามกฎข้อที่สองของนิวตัน ทำให้วัตถุไม่อยู่ในสถานะสมดุล แต่แรงลัพธ์นี้สามารถที่จะแปลงเป็นแรงที่กระทำกับวัตถุสมดุลได้ โดยเพิ่ม

แรงเฉื่อย ( $F_i$ ) เข้าไปในระบบ โดยที่แรงเนื่องจากความเฉื่อยนี้มีขนาดเท่ากับแรงลัพธ์แต่ทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ

$$F_G + F_p + F_v + F_T + F_l = 0 \quad (3.8)$$



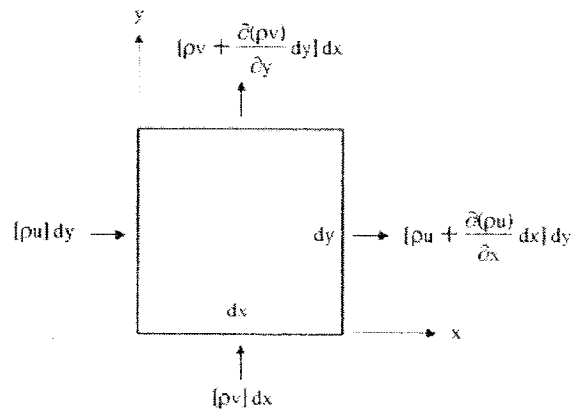
รูปที่ 3.14 ความคล้ายคลึงกันเชิงพลวัต

### 3.2 สมการมูลฐานของการไหล

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

#### 3.2.1 สมการอนุรักษ์มวล

พิจารณาเมื่อของไหลเดินทางผ่านกรอกเล็ก ๆ ขนาด  $dx$  และ  $dy$  ดังรูปที่ 3.15 จากหลักความจริงที่ว่า มวลไม่สามารถสูญหายไปไหน ดังนั้นปริมาณมวลที่ไหลเข้าและออกบริเวณควบคุมนี้จะเท่ากัน นั่นคือ



รูปที่ 3.15 ฟลักซ์ของมวลผ่านกรอบขนาดเล็กที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหลเพื่อใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์มวล

ในทิศแกน x; 
$$\left[ \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy - [\rho u] dy = \frac{\partial(\rho u)}{\partial(x)} dx dy \quad (3.9)$$

ในทิศแกน y; 
$$\left[ \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx - [\rho v] dx = \frac{\partial(\rho v)}{\partial(y)} dx dy \quad (3.10)$$

โดย  $u$  และ  $v$  เป็นความเร็วย่อยในแนวแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ซึ่งความเร็วย่อยนี้มีค่าขึ้นอยู่กับพิกัด  $x, y$  นั่นคือ  $u = u(x, y, t)$  และ  $v = v(x, y, t)$  และเนื่องจากปริมาณมวลในกรอบเล็ก ๆ เป็น  $\rho dx dy$  ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลที่ลดลงไป คือ  $-\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy$  หมายความว่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นของมวลจะเท่ากับปริมาณที่ลดลงภายในกรอบเล็ก ๆ จะได้สมการที่ (3.12) ซึ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์มวล ซึ่งเป็นสมการอธิบายการไหลสมการแรก

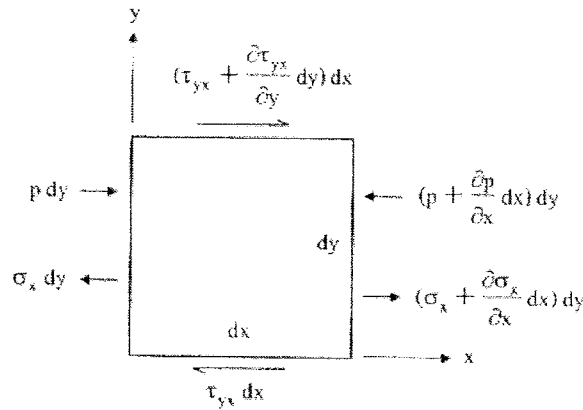
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \right] = 0 \quad (3.11)$$

หรือ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.12)$$

### 3.2.2 สมการอนุพันธ์โมเมนตัม

พิจารณามวลของไหลเล็ก ๆ ขนาด  $dx$  และ  $dy$  ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 รูปแบบแสดงแรงที่กระทำกับมวลของไหลขนาดเล็ก

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน  $F = ma$  เมื่อพิจารณาแรงรวมในทิศแกน  $x$  จะได้

$$F_x = \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right] dx dy + \rho f_x dx dy \quad (3.13)$$

มวลของก้อนของไหลนี้คือ  $m = \rho(dx dy)$  และความเร่งตามแนวแกน  $x$  คือ  $a_x = \frac{Du}{Dt}$  แทน

ค่า  $m$ ,  $a_x$  ลงในกฎข้อที่สองของนิวตัน สมการที่ (3.13) จะได้

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \rho f_x \quad (3.14a)$$

ในทำนองเดียวกันตามแนวแกน  $y$  จะได้

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \rho f_y \quad (3.14b)$$

จากสมการที่ (3.14a และ 3.14b) เป็นสมการอนุพันธ์สามัญซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้ เช่นสมการที่ (3.12) จะได้

ในทิศแกน  $x$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ u \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_x \quad (3.15a)$$

ในทิศแกน  $y$

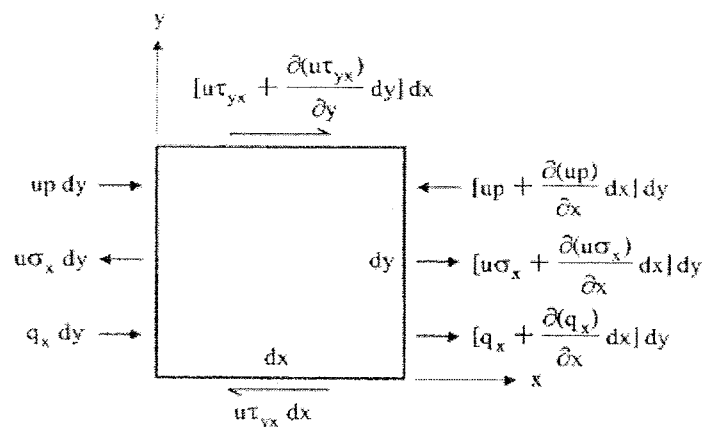
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \text{div}(\vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ u \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \rho f_y \quad (3.15b)$$

สมการที่ (3.15a – 3.15b) นี้แสดงถึงสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนต์ของมวลของไหล

### 3.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด  $dx$  และ  $dy$  ดังรูปที่ 3.17 จากหลักการการอนุรักษ์พลังงานของของไหลและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิค จะได้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้แก่มวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น” ซึ่งสามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้เป็น

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} + \frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.17 พิจารณางานและพลังงานที่เกิดขึ้นกับก้อนมวลขนาด  $dx$  และ  $dy$

จากสมการที่ (3.16) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] + \text{div} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \bar{Q} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\ + \frac{\partial (u\sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (v\sigma_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (3.17)$$

เราเรียกกลุ่มสมการที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (3.12, 3.15 และ 3.17) ว่าระบบสมการ navier-stokes equations เป็นระบบสมการตัวแทนการไหลของของไหลที่เกิดขึ้นจริง จะเห็นได้ว่าสมการเหล่านี้ อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ การแก้สมการ Navier-stokes ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรงนั้นเป็นเรื่องยาก แต่เราสามารถนำเอาวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) ช่วยในการหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ ซึ่งเป็นที่มาของ Computational Fluid Dynamics (CFD) หรือการคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งเป็นพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับปรากฏการณ์การไหลแบบต่างๆ ใน CFD โปรแกรม FLUENT (FLUENT User's Guide, 2001)

### 3.2.4 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

จากสมการอนุรักษ์พลังงานในการไหลแบบคงตัวของของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ สมการพลังงานมีพื้นฐานมาจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งกล่าวว่า สำหรับการไหลแบบคงตัว งานที่ได้รับจากระบบรวมกับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือออกจากระบบ จะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบนั้น นั่นคือ

$$Work + Heat = \Delta Energy \quad (3.18)$$

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

ซึ่งสมการพลังงานและสมการสภาพต่อเนื่องเป็นสมการที่มีความสำคัญมากในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหลที่ก่อดัดไม่ได้ โดยเฉพาะด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งสมการเบอร์นูลลี ที่สร้างขึ้นโดย Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1738 ซึ่งสามารถใช้ได้ดีกับของไหลที่ก่อดัด ดังสมการที่ (3.19)

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (3.19)$$

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

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \text{ค่าคงที่} \quad (3.20)$$

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

โดยได้นำหลักการของสมการเบอร์นูลลี มาใช้ประโยชน์ในการสร้างเครื่องมือ เพื่อใช้ในการวัดความดัน และความเร็วของอากาศ โดยเฉพาะในการวัดค่าความดัน และความเร็วที่จะทำการศึกษา ด้านอากาศพลศาสตร์ เช่น มนรอมิเตอร์ (Barometers) หลอดปีโดท (Pitot tube) เป็นต้น ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดกับเครื่องมือนี้ในบทต่อไป

### 3.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)

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

- 1) ขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนของการกำหนดรูปร่างลักษณะและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา รวมทั้งการแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ
- 2) ขั้นตอนการคำนวณ ทำการแก้ปัญหามาจากขั้นตอนที่ 1 โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหา ทั้งนี้ระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธีได้แก่ 1) วิธีผลต่างสับเนื่อง (Finite difference method) 2) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) 3) วิธีปริมาตรสับเนื่อง (Finite volume method) ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป
- 3) ขั้นตอนการแสดงผล (Post-processor) เป็นขั้นตอนแสดงผลเฉลยหรือแสดงการจำลองปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของปัญหา อาจอยู่ในรูปของ ระดับแถบสี (Contour) กราฟ ตัวเลข หรือแสดงในลักษณะของเวกเตอร์

การวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลนั้น จะเกี่ยวข้องกับการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลที่เกิดขึ้นซึ่งเกิดจากสมการ อนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ซึ่งได้กล่าวของรายละเอียดในหัวข้อที่ผ่านมา การคำนวณหรือแก้ปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้มีหลายวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีปริมาตรสับเนื่อง (Finite volume) กับโปรแกรม FLUENT 6.3 แก้ปัญหาและการวิเคราะห์กับอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก

### 3.3.1 ระเบียบวิธีปริมาตรสับเนื่อง (Finite volume method)

เทคนิคการคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ในปัจจุบันพบว่าส่วนใหญ่แล้วมักใช้ระเบียบวิธีสับเนื่อง สร้างโปรแกรมคำนวณแก้ปัญหา เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้สำหรับการคำนวณพฤติกรรมของไหลในของไหลโดยเฉพาะ ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะทำอินทิเกรตสมการของปัญหาตลอดปริมาตรควบคุมที่กำหนด

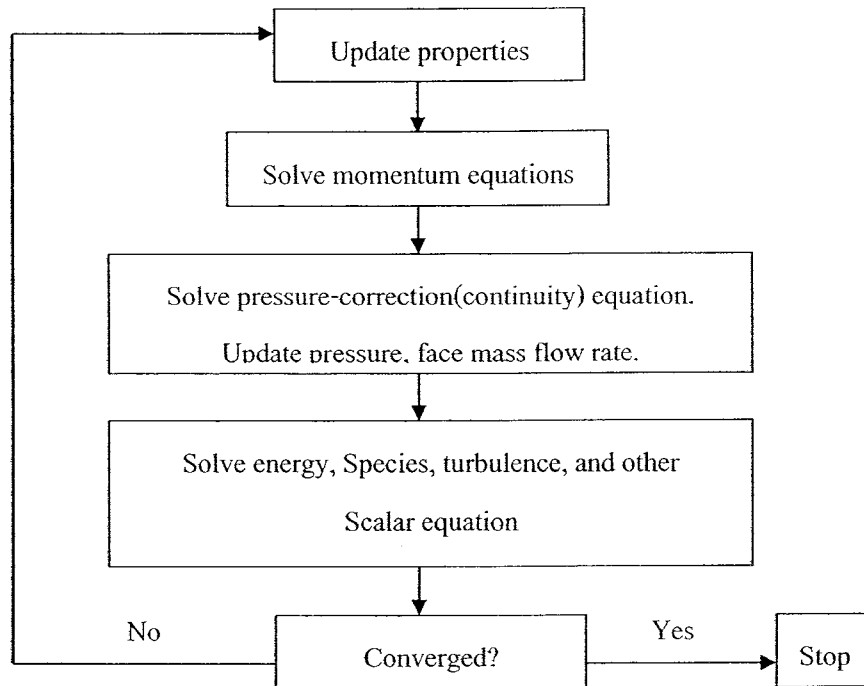
### 3.3.2 ระเบียบขั้นตอนการแก้ปัญหา

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ประกอบด้วยการคำนวณหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ทั้งสามสมการและสมการอื่น เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน สมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด) และสมการสเกลาร์อื่น ๆ ซึ่งลำดับการหาคำตอบของสมการแต่ละอย่างมีผลต่อการลู่เข้าของคำตอบและค่าผลเฉลย โดยทั่วไประเบียบวิธีเชิงตัวเลขจะมีระเบียบของลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหายู่ 2 อย่างตามแต่ลักษณะของปัญหา (FLUENT User' Guide, 2001) ดังนี้

3.3.2.1 ระเบียบขั้น Segregated solver เป็นระเบียบขั้นที่จะแก้สมการอนุพันธ์โมเมนตัมก่อนสมการอื่น ทั้งนี้การแก้ปัญหาคู่สมการจะกระทำเป็นรอบและแก้ซ้ำ เนื่องจากสมการอนุพันธ์จะอยู่ในรูปไม่เชิงเส้น ขั้นตอนการแก้ปัญหามาตามระเบียบขั้น Segregated solver แสดงดังรูป 3.18 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) สมบัติของสารจะถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณ ค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ
- 2) คำนวณสมการอนุพันธ์โมเมนตัมทั้งสามสมการ เพื่อคำนวณค่าความดันและอัตราการไหล ซึ่งจะได้ความเร็วของการไหล
- 3) เนื่องจากค่าความเร็วที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 อาจเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมกับสมการอนุพันธ์มวล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าที่ได้ ด้วยสมการปรับแก้ความดัน (Pressure-correction equation) ประดิษฐ์จากสมการอนุพันธ์มวลกับโมเมนตัม โดยค่าความดัน อัตราการไหลและความเร็วที่ได้จะมีค่าเหมาะสมมากขึ้น
- 4) ขั้นตอนนี้เป็นการแก้สมการอื่นที่เพิ่มเติมเข้ามา สำหรับแต่ละปัญหา เช่น สมการพลังงาน แบบจำลองความปั่นป่วน และสมการสเกลาร์อื่น โดยใช้ค่าจากขั้นตอนที่ 3
- 5) การยอมรับค่าที่ได้จากการคำนวณ จะถูกกำหนดขึ้น จากผลต่างของเศษเหลือในแต่ละรอบของการคำนวณ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ต้องทำการคำนวณซ้ำ (กลับไปขั้นตอนที่ 1) จนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้





รูปที่ 3.18 ลำดับการคำนวณของระเบียบชั้นแบบ Segregated solver

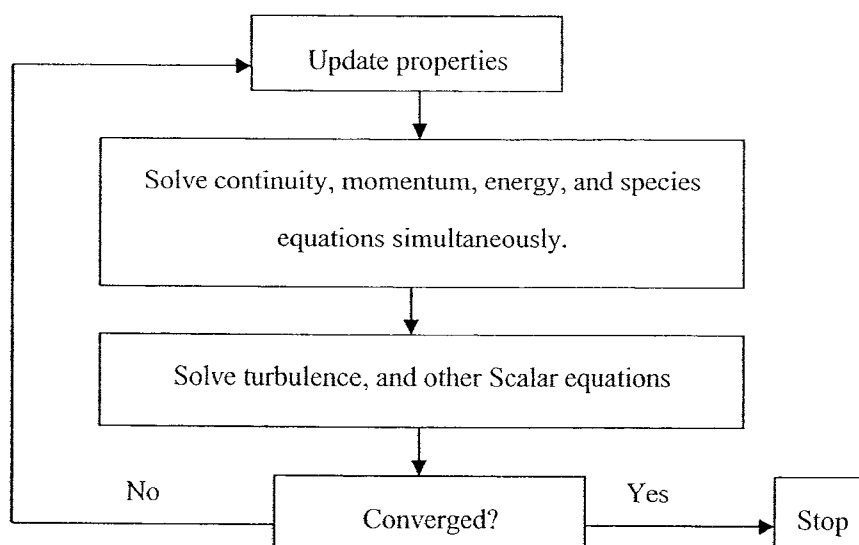
3.3.2.2 ระเบียบชั้น Coupled solver เป็นระเบียบชั้นที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข เป็นวิธีที่เอาสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (เมื่อกรณีของไหลมีหลายชนิด) แก้มการพร้อมกันก่อนจะแก้สมการสเกลาร์อื่น ๆ การคำนวณสมการเหล่านี้ยังต้องทำเป็นรอบ เช่นเดียวกับระเบียบชั้นตอนแรก ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 3.19

1) ระเบียบชั้นตอนแรก สมบัติของสารถูกป้อนเข้าสู่ขั้นตอนการแก้สมการ หากเป็นการเริ่มการคำนวณค่าคุณสมบัติที่ใช้ คือ ค่ากำหนดเริ่มต้นของปัญหา และจะมีการปรับปรุงค่าทุก ๆ รอบของการคำนวณ

2) ขั้นตอนต่อมา คำนวณสมการอนุรักษ์ทั้งสามสมการ และสมการชนิดของของไหล (กรณีของไหลมีหลายชนิด)

3) คำนวณสมการแบบจำลองความปั่นป่วน และ สมการสเกลาร์อื่น ๆ โดยค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

4) ประเมินผลต่างเศษเหลือของรอบว่ายอมรับได้หรือไม่ หากมีค่าสูงกว่าที่ยอมรับได้ จะต้องทำการคำนวณกลับไปขั้นตอนที่ 1 และวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 3.19 ลำดับการคำนวณของระเบียบขั้นตอนแบบ Coupled solver

### 3.3.3 ระเบียบวิธีคำนวณ

การคำนวณสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นมี 2 ระเบียบวิธี คือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit method) และระเบียบวิธีแบบปริยาย (Implicit method) ความแตกต่างของระเบียบวิธีทั้งสองคือ การสร้างสมการเชิงตัวเลขที่เป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างโนดหรืออีลิเมนต์ เพื่อทดแทนความสัมพันธ์ของสมการเชิงอนุพันธ์ กล่าวคือ ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้ง ตัวรู้ค่าถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เพื่อหาตัวไม่รู้ค่าหนึ่งตัว ระเบียบวิธีแบบปริยายจะใช้กับการคำนวณแบบ Segregated solver เพราะการคำนวณแบบ Segregated solver จะคำนวณค่าตัวแปรเดียวของทุกอีลิเมนต์พร้อมกันที่เวลาเดียวกัน ก่อนคำนวณตัวแปรอื่น ๆ ที่ละตัวแปร ทั้งนี้ระเบียบขั้นตอน Coupled solver สามารถเลือกใช้ทั้งสองระเบียบวิธีเพื่อการแก้ปัญหาได้

### 3.3.4 ระเบียบวิธีแก้ปัญหการไหลของบริเวณใกล้ผนัง

พฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับผนังเป็นปัญหาและอุปสรรคสำคัญกับการจำลองการไหลเชิงตัวเลข ที่ผนังความเร็วของของไหลจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ เนื่องจากการหน่วงของความหนืดบริเวณนี้ มีผลกับการไหลมาก นอกจากนี้แล้วความเสียดทานที่ผนังยังเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการหมุนวนและความปั่นป่วนของของไหล ดังนั้นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจำเป็นต้องมีวิธีที่ใช้สำหรับแก้ปัญหานี้

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

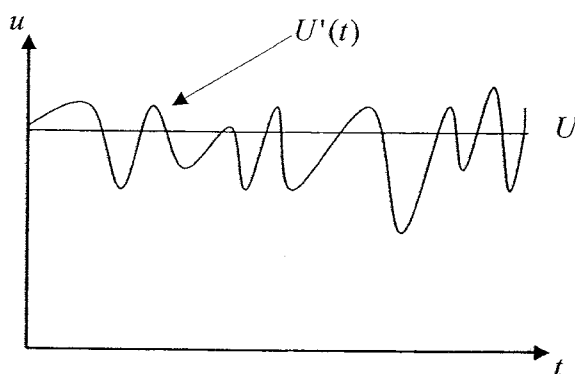
ทำอีลิเมนต์บริเวณใกล้ผนังให้เล็กและคำนวณแต่ละอีลิเมนต์ไปเรื่อย ๆ จนติดผนัง ขณะที่ Near wall function ทำการสร้างฟังก์ชันแยกจากแบบจำลองความปั่นป่วน เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติการไหลต่าง ๆ ที่อีลิเมนต์ติดกับผนัง ฟังก์ชันที่วางไว้ในโปรแกรม FLUENT มี 2 อย่าง ได้แก่ Standard near wall function และ Non-equilibrium near wall function ซึ่งข้อจำกัดของฟังก์ชันทั้งสอง คือ ค่าของการไหลที่ค่า  $Re$  ต่ำได้ไม่ดีนัก และมีข้อสมมุติฐานที่ไม่ครอบคลุมทุกปัญหา ด้วยเหตุนี้ จึงมีการประดิษฐ์แบบจำลองที่สามารถใช้ได้กับปัญหาความปั่นป่วนในบริเวณค่า  $Re$  ต่ำซึ่ง แบบจำลองที่วางไว้คือ Enhanced near-wall model โดยใช้หลักการของการสร้างฟังก์ชันนำไปปรับปรุงแบบจำลองความปั่นป่วนซึ่งทำให้การแก้ปัญหาคำนวณการไหลที่เกิดใกล้ผนังมีประสิทธิภาพ และยังสามารถใช้งานได้ครอบคลุมปัญหามากขึ้น

### 3.3.5 แบบจำลองความปั่นป่วนของการไหล

การไหลที่ค่า Reynolds's number สูง สภาวะการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งการไหลจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจึงเป็นเรื่องยากและให้เวลาในการคำนวณนาน ดังนั้นนักวิจัยจึงพยายามจำลองความไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วนที่ใช้กับวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงแบบจำลองเหล่านั้น จำเป็นต้องทราบพฤติกรรมและคุณสมบัติพื้นฐานของความปั่นป่วนในการไหลของของไหล และสมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds ก่อนอธิบายแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Fox, McDonald and Pritchard, 2003)

#### 3.3.5.1 สมการค่าเฉลี่ยของ Reynolds

ความเร็วและคุณสมบัติต่าง ๆ ของการไหลแบบปั่นป่วนจะเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไม่เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 3.20 โดย  $u(x, y, z, t)$  เป็นคุณสมบัติของของไหล เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง และเวลา



รูปที่ 3.20 การเปลี่ยนแปลงอย่างไม่เป็นระเบียบของการไหลแบบปั่นป่วน

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

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} = \int_0^{\Delta t} u dt \quad (3.20)$$

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

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (3.21)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมใน 3 มิติ

$$\frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \bar{U}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{u}) + \left[ -\frac{\partial(\rho \bar{u}'^2)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' v')}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{u}' w')}{\partial z} \right] + \rho f_x \quad (3.22a)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{u} \bar{v}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} \bar{v}) + \left[ -\frac{\partial(\rho \bar{u}' v')}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \bar{v}'^2)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \bar{v}' w')}{\partial z} \right] + \rho f_y \quad (3.22b)$$

สมการข้างต้นนี้เราเรียกว่า สมการของ Reynolds หรือ Reynolds-Average Navier-Stokes equation (RANS) จะเห็นว่ารูปสมการนี้คล้ายกับสมการนาเวียร์-สโตกส์เดิมแต่มีเทอมความเค้น (ในวงเล็บทางขวามือ) เพิ่มขึ้น โดยสมการใน 3 มิติ จะมีทั้งหมดหกเทอมด้วยกันเราเรียกความเค้นเหล่านี้ว่า Reynolds stresses

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

$$\text{Reynolds stresses, } -\rho \bar{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial z_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3.23)$$

โดย  $\mu_t$  คือ Turbulent viscosity เป็นตัวแปรที่จำเป็นจะต้องสร้างสมการเข้ามาเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสมการหาคำตอบได้ สมการเหล่านี้ คือ แบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

### 3.3.5.2 แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ Standard $k - \varepsilon$

แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard  $k - \varepsilon$  เป็นแบบจำลองที่ Turbulent viscosity เป็นฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence kinetic energy,  $k$ ) และอัตราการกระจายพลังงานจลน์ (Dissipation of turbulence kinetic energy,  $\varepsilon$ ) โดยมีการส่งถ่าย 2 ชุดเป็นสมการของ  $k$  และ  $\varepsilon$  (FLUENT User's Guide, 2001) อย่างละชุด ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}.k \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad}.\varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3.25)$$

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.26)$$

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

### 3.3.5.3 แบบจำลองความปั่นป่วน แบบ RNG $k - \varepsilon$

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \text{grad}.k \right] + G_k + G_b + \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \bar{U}) = \text{div} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \text{grad}.\varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.28)$$

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

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon} \mu}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_v}} \quad (3.29)$$

โดย

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

สมการที่ (3.29) จะใช้ได้ดีเมื่อการไหลนั้นมีค่า Reynolds number ต่ำ แต่ถ้าการไหลนั้นมีค่า Reynolds number สูงจะต้องใช้สมการที่ (3.27) แทนโดยกำหนดให้ค่า  $C_\mu = 0.0845$  การคำนวณเพื่อหาค่า  $\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon$  นั้นใช้สมการ

$$\alpha_k \left| \frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929} \right|^{0.6321} \left| \frac{\alpha - 2.3929}{\alpha_0 - 2.3929} \right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \quad (3.30)$$

ถ้าหากเป็นกรณีค่า Reynolds number สูง  $\alpha_k$  และ  $\alpha_\varepsilon \approx 1.393$  ค่า  $R_\varepsilon$  ในสมการที่ (3.18) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$Re = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.31)$$

ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (3.27) และ (3.28) จะมีค่าเป็น  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.68$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่ง และแรงที่กระทำหรือแรงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเป็นศาสตร์แขนงหนึ่งของกลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) หรือสมการการอนุรักษ์การไหลของของไหล ที่สามารถอธิบายสภาวะของของไหลของการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและเวลา เป็นพื้นฐานในการคำนวณของไหลพลศาสตร์ CFD บวกแนวคิดของนักวิจัยอื่น ๆ ดังที่กล่าวมานั้น ผู้เขียนจะเน้นองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) เป็นหลัก เพื่อที่จะใช้ในการออกแบบเครื่องมือในการวิจัย เช่น อุโมงค์ลม (Wind tunnel) การปรับปรุงชิ้นส่วนต่าง ๆ และการใช้เครื่องมือในการวัด รวมไปถึงการใช้งานของโปรแกรมในการคำนวณของไหลพลศาสตร์ เพื่อจะใช้ในการศึกษา วิเคราะห์ กับสิ่งที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านวัตถุทุกเล็ก เพื่อเป็นแนวคิดใน

การปรับปรุงรูปทรง ลักษณะการใช้งาน วิธีการใช้งานของรถบรรทุกเล็ก เพื่อลดแรงต้าน โดยขั้นตอนการวิจัยนั้น จะกล่าวในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การสร้างและการทดสอบอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ ประเภทความดันปกติ อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งทำได้โดยการใช้พัดลมดูดหรือเป่าอากาศผ่านวัสดุทดสอบ ประเภทความดันสูง อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ทำได้โดยการใช้ถังลมอัดอากาศแล้วเป่าผ่านวัสดุทดสอบ นอกจากนี้แล้วอุโมงค์ลมทั้งสองประเภทข้างต้นยังสามารถแบ่งได้เป็นอีก 2 แบบ คือ อุโมงค์ลมแบบปิด อุโมงค์แบบนี้จะให้อากาศไหลหมุนเวียนอยู่ภายในตลอดเวลา อุโมงค์ลมแบบเปิด อุโมงค์ลมประเภทนี้จะให้อากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนปฏิบัติงานแล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง

#### 4.1 ส่วนประกอบและเครื่องมือในการวัด

อุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นเพื่อทำการทดลอง เป็นอุโมงค์ลมประเภทความดันปกติ และเป็นอุโมงค์ลมแบบเปิด เพราะเป็นอุโมงค์ลมที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน งบประมาณในการสร้างต่ำ เป็นอุโมงค์ลมชนิดดูดลมเข้าสามารถทำความเร็วที่ผ่านส่วนปฏิบัติงานได้อยู่ในช่วง 0-15 m/s หรือ 0-54 km/hr ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้คือ

##### 4.1.1 ส่วนอากาศแพร่เข้า (Effuser or Contraction Cone)

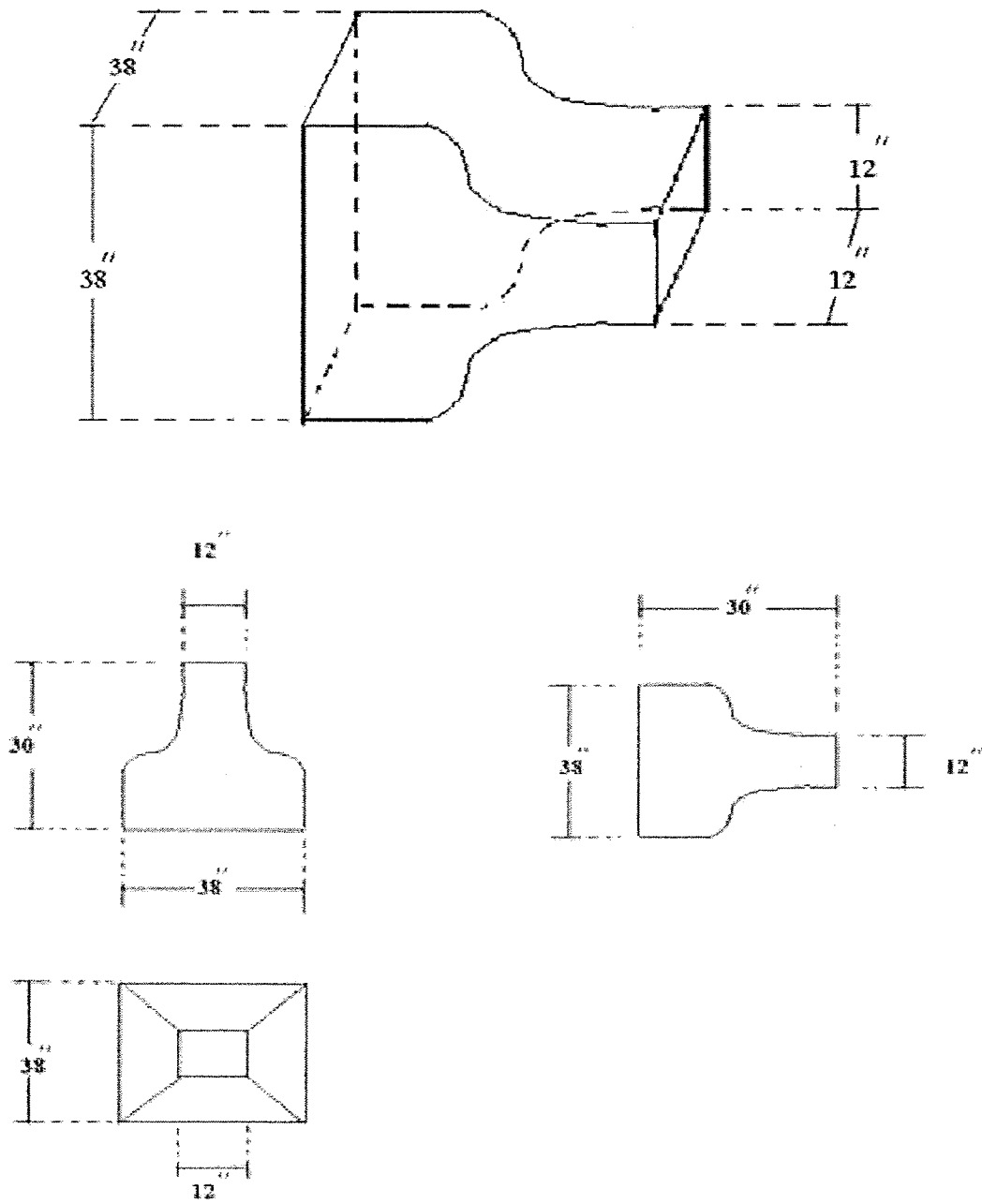
ส่วนอากาศแพร่เข้าจะเป็นส่วนแรกที่อากาศจะไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมชนิดดูด ลักษณะของส่วนที่อากาศแพร่เข้านี้เป็นการยากมากในการออกแบบในส่วนอง ความโค้งต่างๆ ของส่วนที่เป็นด้านยาว เพื่อที่จะลดค่าความดันสูญเสียในส่วนนี้ ส่วนของอากาศแพร่เข้าจะมีปากทางเข้าที่มีพื้นที่หน้าตัดค่อนข้างใหญ่ ทำจากเหล็กแผ่นเรียบหนา 1 mm ปากทางเข้าขนาด 38" x 38" และจะค่อย ๆ ลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดลงอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งถึงส่วนปฏิบัติงานที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาด 12" x 12" และส่วนอากาศแพร่เข้ามีความยาว 30" อัตราส่วนของปากทางเข้าต่อทางออกเป็น 10:1 เพื่อให้กระแสอากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเป็นไปตามสมการแห่งความต่อเนื่องคือ

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (4.1)$$

|       |       |                                          |
|-------|-------|------------------------------------------|
| เมื่อ | $A_1$ | แทนพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า Contraction  |
|       | $A_2$ | แทนพื้นที่หน้าตัดของทางเข้า Test Section |
|       | $V_1$ | แทนความเร็วของทางเข้า Contraction        |



V<sub>2</sub> แทนความเร็วของทางเข้า Test Section

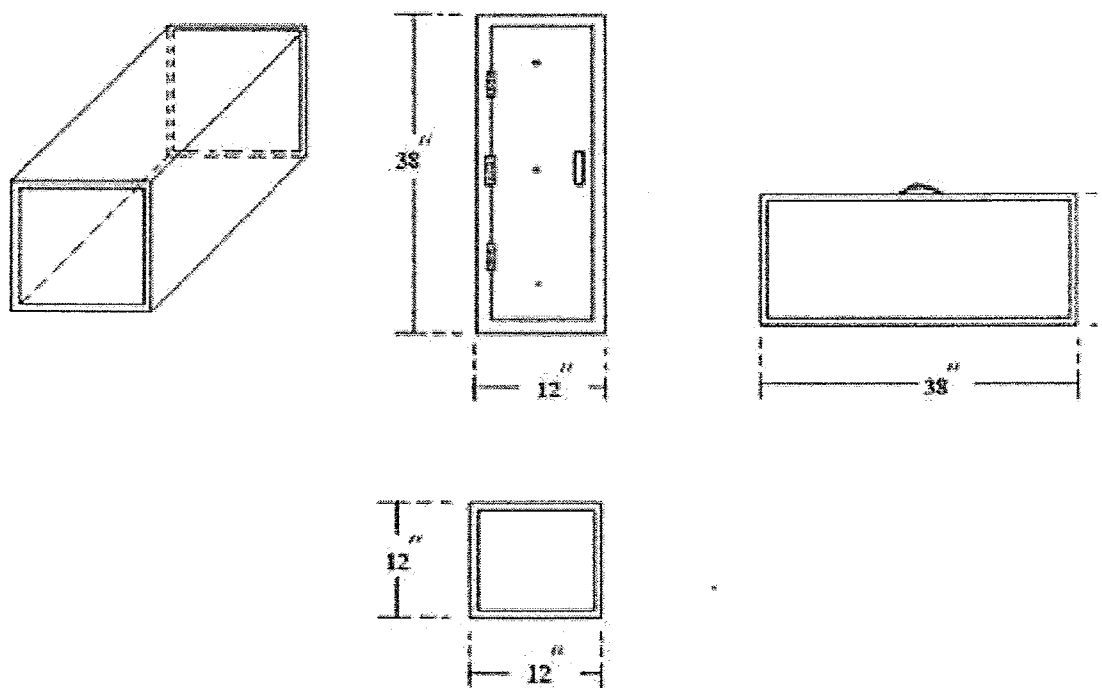


รูปที่ 4.1 ขนาดส่วนแพร่เข้า

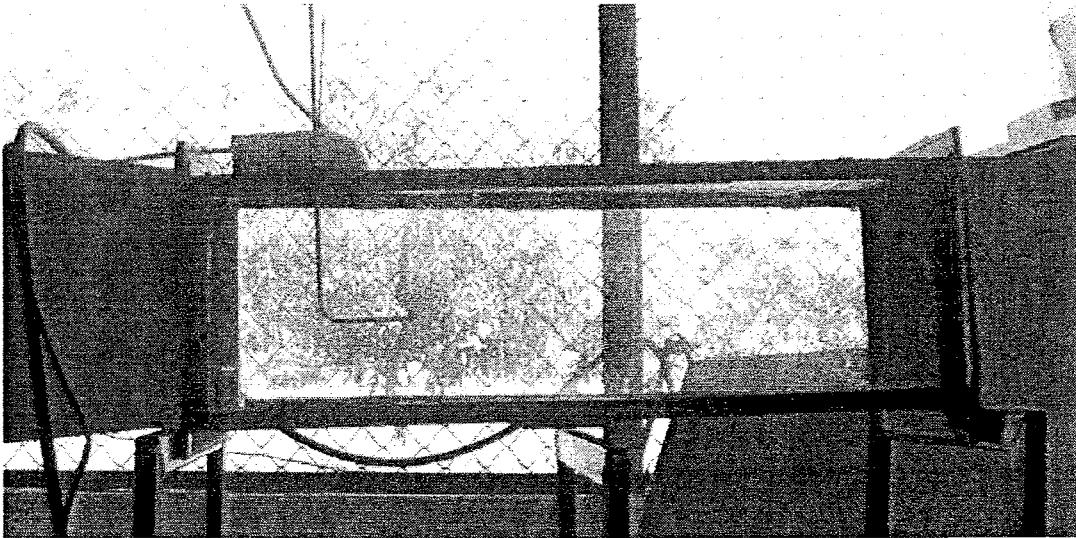
#### 4.1.3 ส่วนของการปฏิบัติงาน (Test section)

ส่วนปฏิบัติงานเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของอุโมงค์ลม เพราะเป็นส่วนที่ใช้ในการทดสอบวัสดุทดสอบหรือแบบจำลอง เพื่อให้กระไหลผ่านส่วนปฏิบัติงานมีค่าคงที่จึงต้องทำให้พื้นที่หน้าตัดส่วนนี้มีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ซึ่งอาจมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูป วงกลม วงรี หรือรูปสี่เหลี่ยมก็ได้ และวัสดุที่ใช้ทำนิยมใช้วัสดุโปร่งใส เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุทดสอบหรือแบบจำลองได้

ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น ทำด้วยแผ่นอะคริลิกใส หนา 2 mm ประกอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดพื้นที่หน้าตัด 12" x 12" ยาว 38" ส่วนบนทำเป็นฝาปิดรูปสี่เหลี่ยม เพื่อเป็นช่องสำหรับใส่ชิ้นงานทดสอบที่ฝาปิดเจาะสามรูที่ตรงหัว ท้าย และตรงกลางของฝาปิด เพื่อใส่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ บริเวณทางเข้าและทางออกของส่วนปฏิบัติงานจะติดตั้งวาล์วเพื่อป้องกันรอยรั่วที่เกิดบริเวณรอยต่อของส่วนปฏิบัติงานกับส่วนของ Contraction cone และส่วนของ Diffuser



รูปที่ 4.4 ขนาดส่วนปฏิบัติงาน

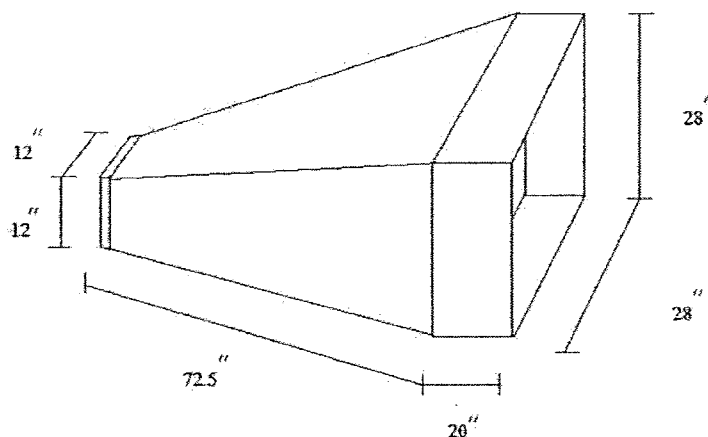


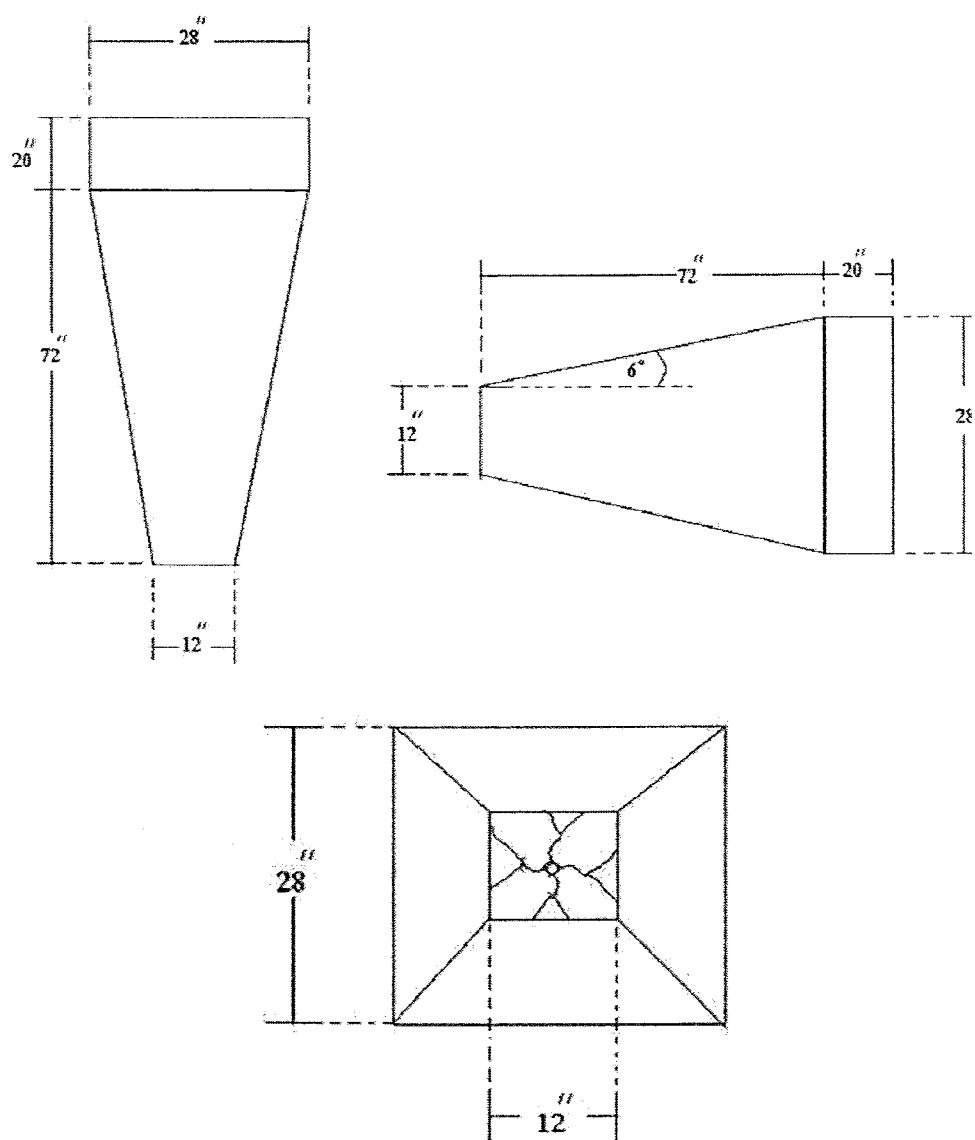
รูปที่ 4.5 ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น

#### 4.1.4 ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

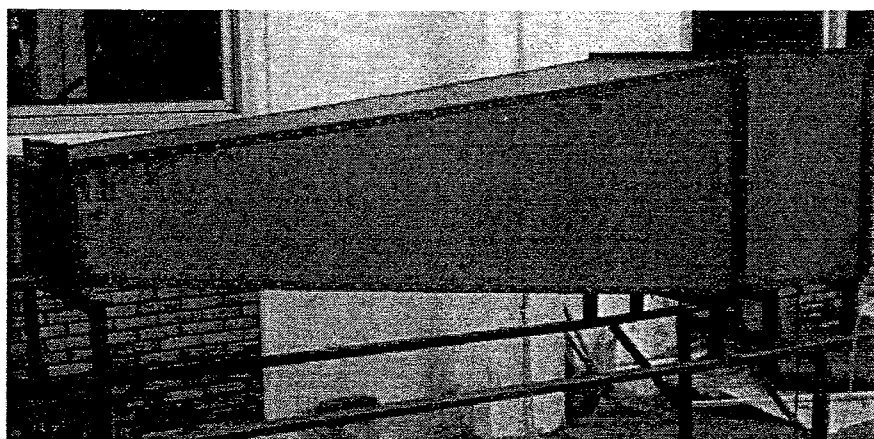
ส่วนของอากาศแพร่ออกนี้ เป็นส่วนที่รับของไหลต่อจากส่วนของห้องทดสอบ และจะมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความยาวของส่วนของอากาศแพร่ออก จะทำหน้าที่ในการลดความเร็วของลมหรือของไหลที่จะไหลออกจากตัวโมเดล เนื่องจากลมที่ไหลออกถ้าหากไม่ได้ผ่านส่วนของอากาศแพร่ออกนี้แล้วจะทำให้ลมที่ไหลออกมีความเร็วที่สูง ก่อให้เกิดเสียงดัง และส่วนที่อากาศแพร่ออกนี้ยังเป็นตัวช่วยในการลดการใช้พลังงานในชุดของตัวขับลมอีกด้วย โดยเป็นการเพิ่มความเร็วมในส่วนห้องทดสอบลมไปในตัว

ส่วนของอากาศแพร่ออกที่สร้างขึ้นทำด้วยเหล็กแผ่นเรียบหนา 1 mm ด้านหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดพื้นที่หน้าตัด 12" x 12" ส่วนหลังเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดพื้นที่หน้าตัด 28" x 28" ส่วนของอากาศที่แพร่ออกนี้มีความยาว 82" ความชันระหว่างปลายทั้งสองข้างมีค่า 6° อัตราส่วนของปากทางเข้าต่อทางออกเป็น 1:6





รูปที่ 4.6 ขนาดของส่วนแพร่ออก



รูปที่ 4.7 ส่วนแพร่ออกที่สร้างขึ้น

#### 4.1.5 ส่วนกำลัง (Power Section)

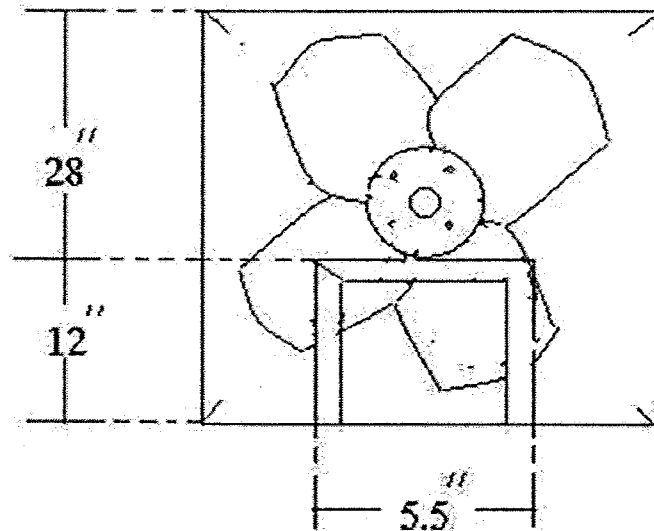
ส่วนกำลังนี้จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้แก่อากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ลมประกอบด้วย มอเตอร์พัดลม และอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ ส่วนนี้จะอยู่ท้ายสุดของอุโมงค์ลมชนิดดูด พลังงานที่อากาศได้จากมอเตอร์จะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ดังนั้น จากหลักการคงตัวของพลังงานและสมการแห่งการต่อเนื่อง (Equation of Continuity) จะได้

$$P = \frac{\rho A V^3}{2} \quad (4.2)$$

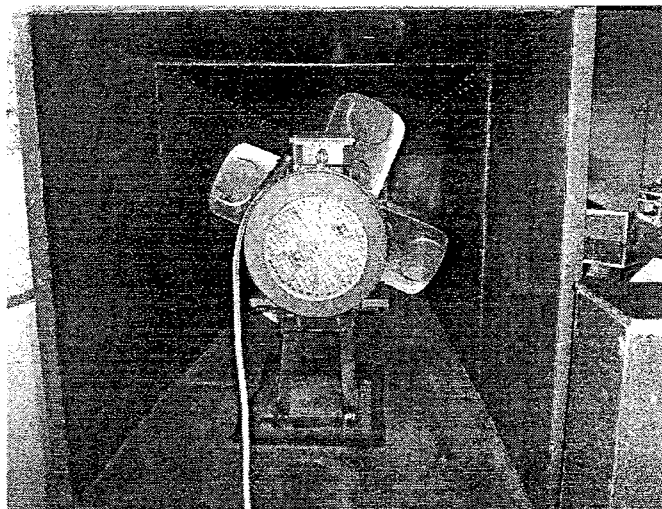
โดยที่  $P$  คือกำลังของมอเตอร์ (Watt),  $A$  คือพื้นที่หน้าตัด ( $m^2$ ),  $V$  อัตราเร็วของกระแสอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด ( $m/s$ ),  $\rho$  แทนความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )

ส่วนกำลังที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

- มอเตอร์ขนาด 5.5 แรงม้า 380 V 1450 rev/min
- ใบพัดชนิด 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24"
- อุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์

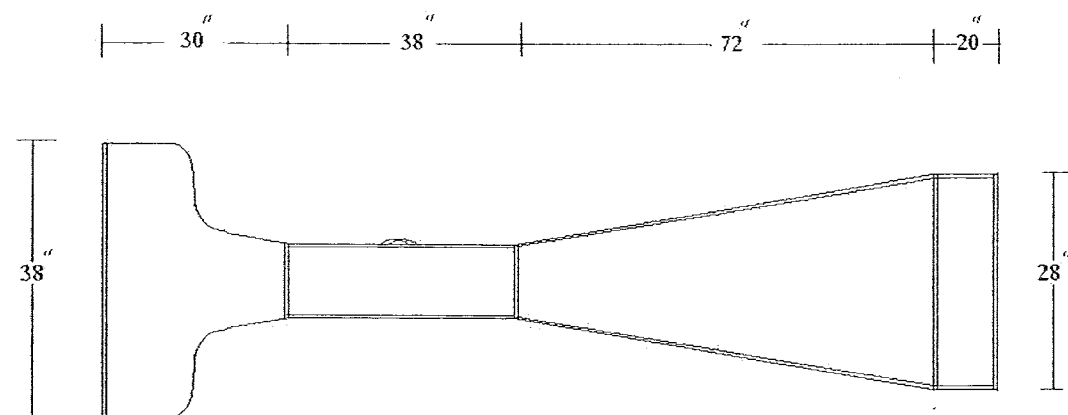


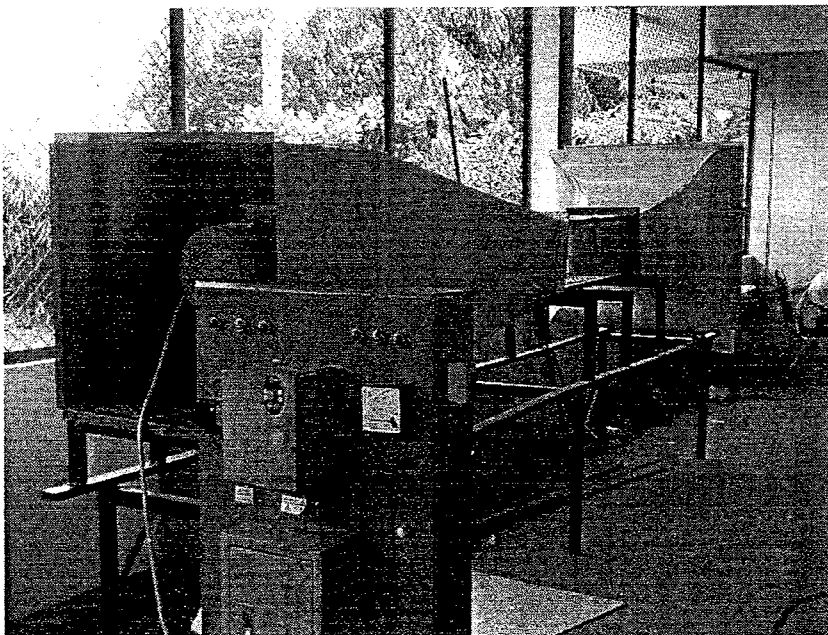
รูปที่ 4.8 ขนาดส่วนกำลัง



รูปที่ 4.9 ส่วนกำลังที่สร้างขึ้น

จากส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ได้มีการออกแบบ และสร้างขึ้นได้นำมาประกอบกันเป็นอุโมงค์ลม ที่มีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 4.10





รูปที่ 4.10 ขนาดของแต่ละส่วนที่นำมาประกอบกัน

## 4.2 การทดสอบอุโมงค์ลม

จากหัวข้อที่ผ่านมา เป็นการสร้างอุโมงค์ลมที่มีสภาพสมบูรณ์พร้อมใช้งาน ดังนั้นจำเป็นต้องยังที่จะต้องมีการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบพื้นฐานการทำงานของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่สร้างขึ้น เพื่อหาสมรรถนะต่างๆ ของตัวอุโมงค์ลม โดยจะใช้วิธีการทดสอบที่เป็นพื้นฐานอย่างง่าย ซึ่งผลที่ได้จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์และสรุปผลได้ในระดับหนึ่ง โดยวิธีและขั้นตอนการทดสอบตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 4.2.1 การทดสอบความเร็วของอากาศโดยใช้หลอดปีโตท และมานอมิเตอร์

ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 แล้วว่าการไหลของของไหลนั้น เราสามารถพิจารณาการไหลได้ตามสถานะต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติทางกายภาพหรือสถานะของจลศาสตร์ของไหล เช่น ความราบเรียบและไม่ราบเรียบของการไหล (Laminar and Turbulent Flow) หรือความสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอของการไหล เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้เราจะทดสอบการไหลที่มีความราบเรียบหรือมีความสม่ำเสมอหรือไม่ โดยพิจารณาการวัดที่ระนาบของหน้าตัดที่ระยะต่างๆ ใช้หลอดปีโตท และมานอมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ต้องใช้ควบคู่กัน สำหรับวัดความดัน และความเร็วของอากาศในส่วนปฏิบัติงาน หลักการคือ วัดความดันแตกต่าง (Differential pressure) ซึ่งประกอบด้วยท่อสองชั้นเพื่อวัดความดันสถิต (Static pressure) และความดันในระบบ (Total pressure) จากจุดวัดความดันสองจุด

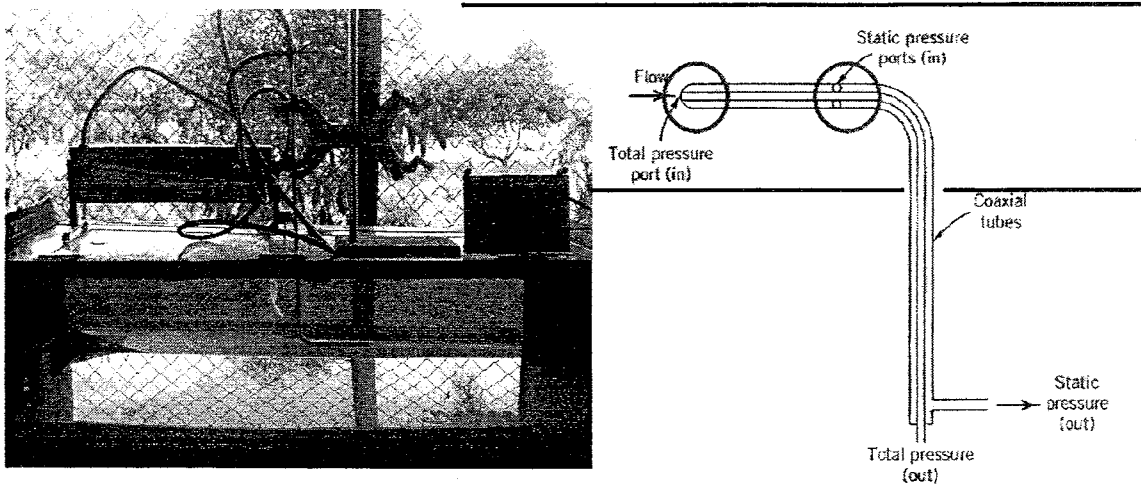
ที่ตั้งฉากกัน ความเร็วจะประเมินได้จาก ความแตกต่างของความดันทั้งสองจุด ( $P_1 - P_2$ ) ซึ่งหาความเร็วได้จาก สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli equation) คือ

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \quad (4.3)$$

โดยที่ Static pressure + Dynamic pressure = Total pressure ดังนั้น ความเร็วของไหลคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างความดันรวมและความดันสถิตย์

$$P_s + \rho \frac{V^2}{2} = P_t \quad (4.4)$$

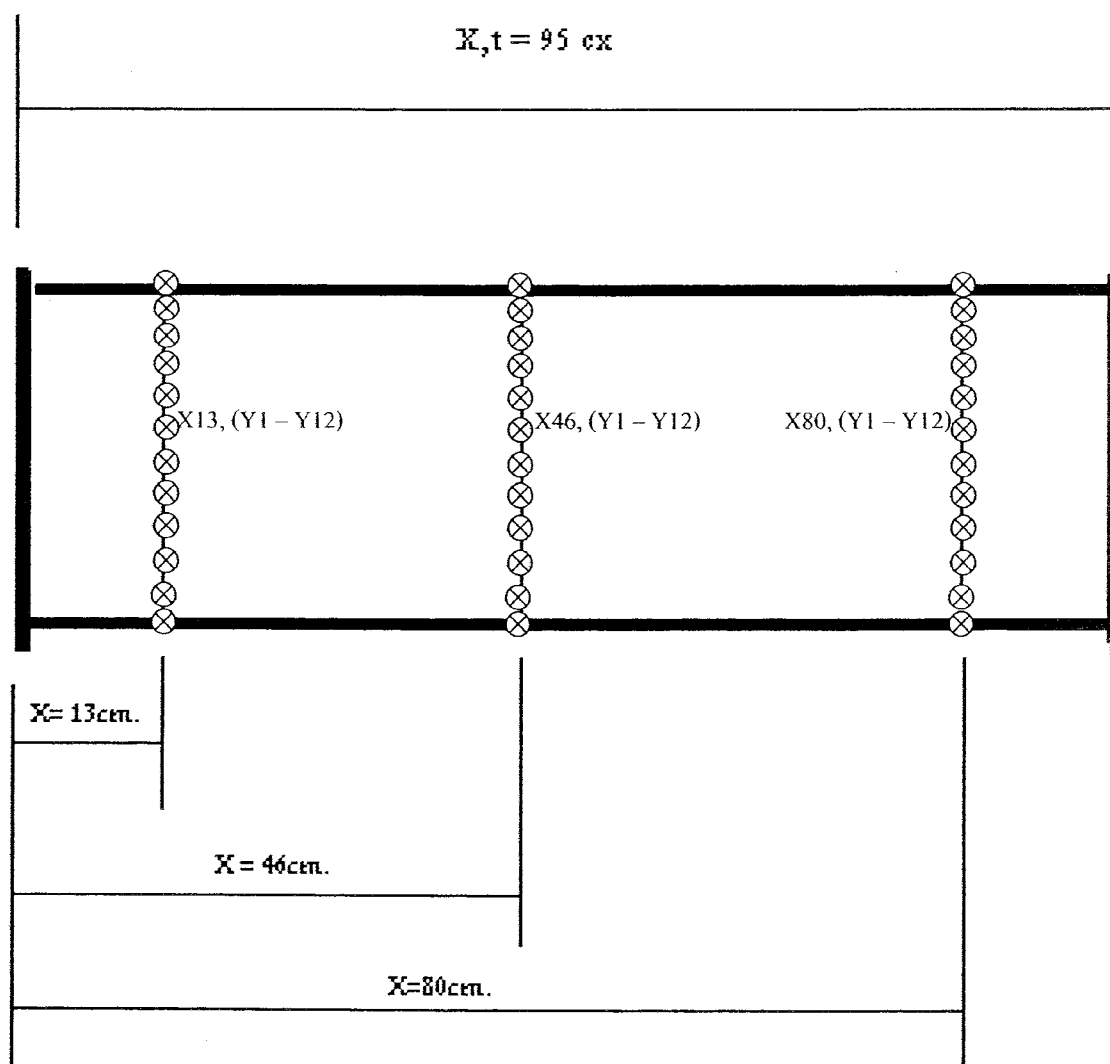
$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.11 หลอดปีโดท และมานอมิเตอร์

ในการทดสอบนั้นเป็นการทดสอบความเร็วของอากาศของส่วนของส่วนปฏิบัติงาน ซึ่งจะทดสอบความเร็วตามแนวยาว (X) และตามแนวส่วนสูง (Y) ซึ่งกำหนดให้ระยะ X ต่าง ๆ ตามแนวยาวที่ระยะ X13 cm, X46 cm และ X80 cm และตามแนวส่วนสูงที่ระยะ Y1 – Y12 แต่ละจุดห่างกัน 1.1 cm โดยกำหนดความเร็วไว้ที่ 10 m/s ดังรูปที่ 4.12





รูปที่ 4.12 ตำแหน่งการทดสอบความเร็วของอากาศ ส่วนปฏิบัติงาน

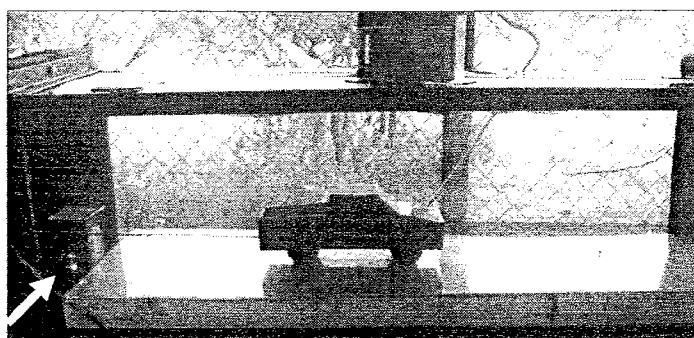
#### ตารางที่ 4.1 ความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ

[illegible]

จากตารางที่ 4.1 ความเร็วที่เกิดขึ้นในส่วนปฏิบัติงานไม่มีความแตกต่างกันเกือบทุกตำแหน่ง แต่จะลดลงเมื่อเข้าใกล้ชิดกับผนังส่วนปฏิบัติงาน และจะลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าเป็นศูนย์เมื่อตำแหน่งชิดกับผนัง เนื่องจากค่าความหนืดของอากาศกับผนัง จึงเกิดหน่วงจากความเสียดทานของชั้นขอบเขต (Friction drag of boundary layer) จะเกิดชั้นขอบเขตการไหลชั้นบาง ๆ ของอากาศที่ติดกับผิวส่วนปฏิบัติงาน ทำให้เกิดการกระจายความเร็วในลักษณะที่ความเร็วที่ผิวคงรูป โดยที่ผิวจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังที่กล่าวมาในบทที่ 3

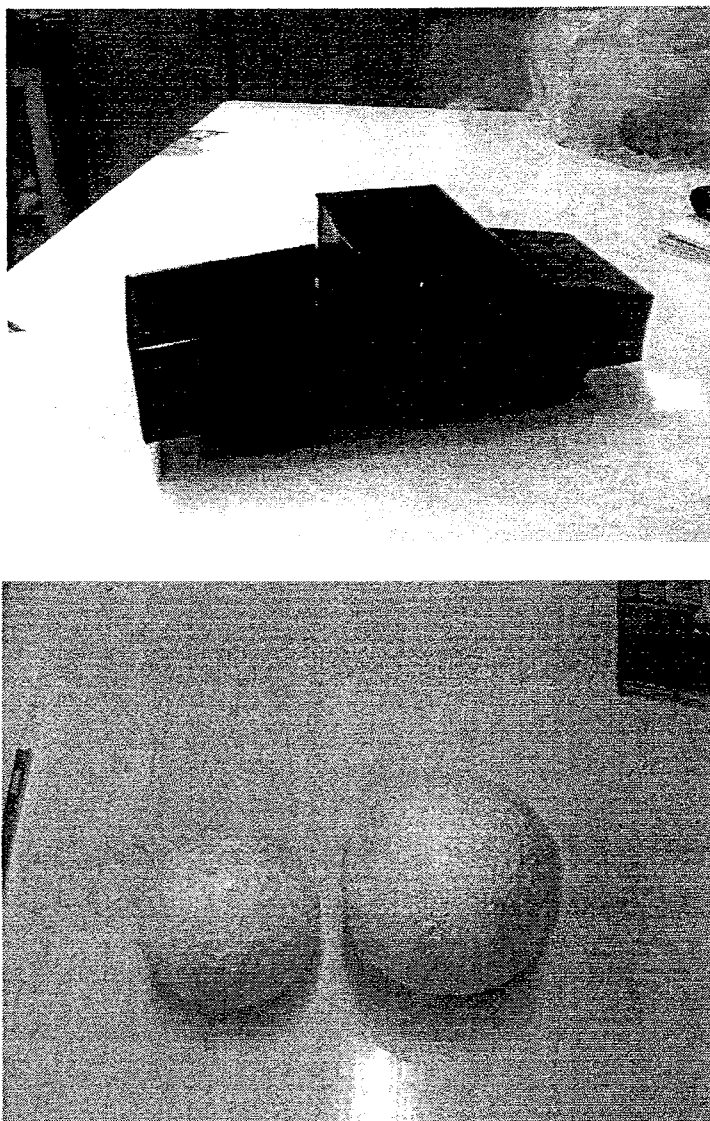
#### 4.2.2 การทดสอบแรงต้านของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ โดยเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell)

เครื่องมือวัดแรงต้าน เป็นเครื่องมือวัดแรงที่อากาศไหลกระทำกับแบบจำลอง เมื่อมีแรงมากระทำกับแบบจำลองในทิศทางตั้งฉาก ทำให้เกิดแรงกดจากส่วนที่ยึดแบบจำลองมายึดติดกับ Load cell ซึ่งภายในจะมีแผ่นวัดแรงซึ่งติดกับแท่งอะโลมิเนียม ทำให้เกิดการโก่งตัว ค่าก็จะถูกส่งไปที่หน้าจอแสดงผล ซึ่งแสดงในหน่วยเป็นกรัม แสดงค่าต่ำสุดได้ที่ 0.5 g ซึ่งก็จะสามารถแปลงให้เป็นหน่วย (นิวตัน: N) ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 Load cell

ส่วนแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบนั้น ใช้วัสดุทำจากโฟม ซึ่งมีน้ำหนักน้อยมาก (เทียบกับแรงต้าน) โดยน้ำหนักของแบบจำลอง สามารถไม่ต้องนำมาคิดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวส่วนปฏิบัติกับแบบจำลองได้ โดยใช้แผ่นพลาสติกหุ้มส่วนผิวนอก เพื่อให้ผิวของแบบจำลองเรียบ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบแรงต้านมีแบบต่าง ๆ ดังนี้คือ แบบจำลองทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm, ทรงสี่เหลี่ยม, แบบจำลองรถบรรทุกเล็ก โดยมีอัตราส่วน 1:20 ของรถต้นแบบ ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณี คือ กรณีเปิดกระบะปกติ (Normal pick-up box), เปิดฝาท้ายกระบะ (Tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (Tailgate off), ปิดฝาท้ายกระบะ (Covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (Lope rear box), และครอบท้ายกระบะแบบตรง (Van) โดยที่พื้นที่หน้าตัด (Frontal area) ของรถเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$



รูปที่ 4.14 วัสดุและแบบจำลอง

ในการทดสอบนั้นแรงต้าน เป็นการทดสอบโดยใช้แบบจำลองรูปทรงเลขาคณิตอย่างง่าย เพื่อที่จะนำผลที่ได้จากการทดสอบไปแปลงหาค่า สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient,  $C_D$ ) ค่า Reynolds number (Re) เป็นต้น โดยทดสอบที่ความเร็วของอากาศระหว่าง 5 – 10 m/s (18 – 36 km/hr) ซึ่งในการทดสอบนั้นเป็นการทดสอบวัตถุทรงกลม และทรงสี่เหลี่ยม ค่าที่ได้ดังตาราง 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงกลม

| ความเร็วอากาศ (m/s) | Reynolds number | แรงต้าน (N) | สัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) |
|---------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| 5                   | 34,237          | 0.047       | 0.421                         |
| 6                   | 41,084          | 0.067       | 0.417                         |
| 7                   | 47,929          | 0.086       | 0.395                         |
| 8                   | 54,776          | 0.106       | 0.374                         |
| 9                   | 61,623          | 0.129       | 0.361                         |
| 10                  | 68,470          | 0.154       | 0.35                          |

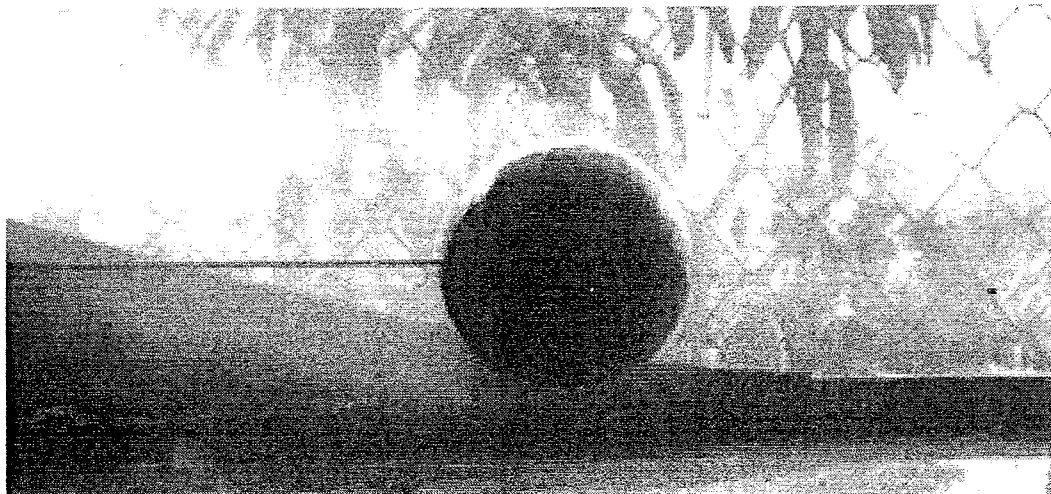
ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

| ความเร็วอากาศ (m/s) | Reynolds number | แรงต้าน (N) | สัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) |
|---------------------|-----------------|-------------|-------------------------------|
| 5                   | 28,075          | 0.132       | 1.188                         |
| 6                   | 33,690          | 0.185       | 1.158                         |
| 7                   | 39,305          | 0.246       | 1.133                         |
| 8                   | 44,920          | 0.314       | 1.109                         |
| 9                   | 50,535          | 0.391       | 1.092                         |
| 10                  | 56,150          | 0.476       | 1.078                         |

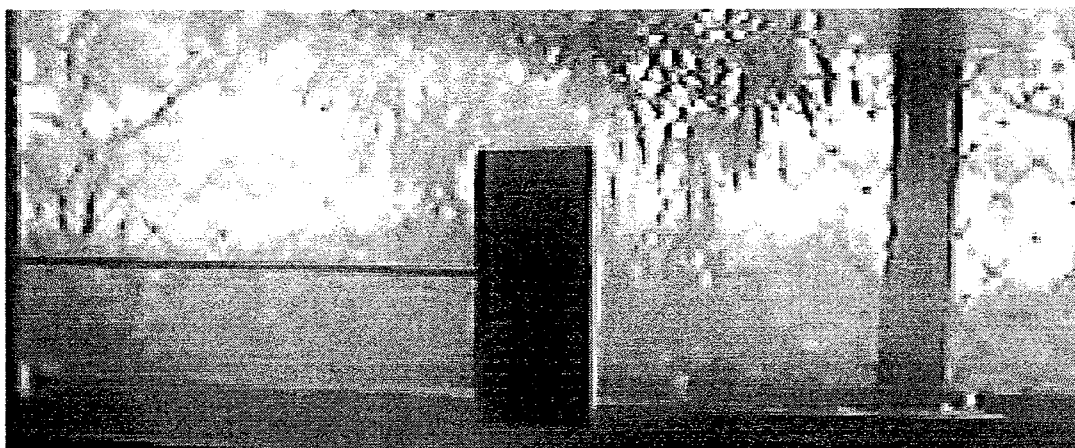
ซึ่งจากตารางการทดสอบแรงต้านของทรงกลม และสี่เหลี่ยม ค่าแรงต้านอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วของอากาศ เช่นเดียวกันกับค่า Reynolds number เพิ่มขึ้น แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลง ซึ่งค่าที่ได้จะได้มีการเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลข (CFD) และผลที่เกิดขึ้นจากสภาวะที่เปลี่ยนแปลงจะอธิบายในบทต่อไป

#### 4.2.3 การทดสอบ Flow Visualization

เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตพฤติกรรมต่าง ๆ ของของไหลที่ไหลผ่านแบบจำลองรูปทรงเลขาคณิตอย่างง่าย ซึ่งใช้รูปทรงสี่เหลี่ยม และทรงกลมเช่นเดียวกันกับการทดสอบแรงต้าน การทดสอบนี้จะทำให้เราเห็นทิศทางการไหล เส้นทางการไหลที่ไหลภายในส่วนปฏิบัติการ ทดสอบโดยการนำวัตถุทรงกลมติดตั้งในส่วนปฏิบัติการ นำสิ่งที่ก่อให้เกิดควัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ควันที่เกิดจากการเผาธูปนำไปไว้บริเวณส่วนอากาศแพร่เข้า โดยควันจะลู่เข้าสู่ภายในอุโมงค์ลม ซึ่งสามารถสังเกตกระแสการไหล การแยกตัวของอากาศจากการกระทบตัวของวัตถุรูปทรงที่ใช้ทดสอบได้ จากรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.15 ลักษณะการไหลผ่านวัตถุทรงกลม



รูปที่ 4.16 ลักษณะการไหลผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงให้เห็นการไหลผ่านวัตถุจากวันที่ใช้ทำการทดสอบ ซึ่งลักษณะการไหลก่อนกระทบกับวัตถุจะมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยมีลักษณะเป็นเส้นตรงก่อนที่จะกระทบกับวัตถุ ซึ่งเมื่อกระทบกับวัตถุทรงกลมอากาศด้านหลังวัตถุจะเกิดการแยกตัวของอากาศเป็นลู่ และจะรวมตัวกันเมื่อระยะห่างออกไป ที่ระยะหนึ่ง เช่นเดียวกันกับวัตถุทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเกิดการแยกตัวเช่นเดียวกันแต่มีลักษณะที่รุนแรงกว่าทรงกลม เนื่องจากวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมีลักษณะไม่เพรียวลม เกิดการแยกตัวของอากาศสูง จึงทำให้แรงต้านของอากาศสูงกว่าทรงกลมเช่นเดียวกัน ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 ดังที่กล่าวมา

ผลที่ได้จากการทดสอบอุโมงค์ลมที่กล่าวมา คือการทดสอบความเร็วของอากาศ การทดสอบแรงต้าน และการทดสอบพฤติกรรมของการไหล จะนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ CFD เพื่อความถูกต้องในบทต่อไป

## บทที่ 5

### การยืนยันผลการทดสอบของอุโมงค์ลม และ CFD

ในบทนี้ จะอธิบายขั้นตอนในการทดสอบแรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ในกรณีต่างๆ ซึ่งการทดสอบ จะแบ่งเป็น 2 วิธี คือการทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลม (Wind tunnel) และการทดสอบแบบจำลองโดยใช้วิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ซึ่งจะเริ่มต้นจากการใช้เงื่อนไขในการคำนวณเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) แบบต่าง ๆ หาจำนวนของเมชที่เหมาะสม (Mesh independent) การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมกับงานวิจัยท่านอื่น (Validation) และเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลองทั้ง 2 วิธี ของวัตถุทรงกลมรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 แบบ

#### 5.1 การยืนยันผลของ CFD

การคำนวณของไหลพลศาสตร์ ซึ่งในด้านอากาศพลศาสตร์ ประการที่ต้องการวิเคราะห์เป็นลำดับแรกก็คือ แรงต้าน ซึ่งในการทดลองในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดด้านขนาดของแบบจำลอง ความเร็วของอากาศที่ผ่านแบบจำลองซึ่งมีค่าที่ต่ำ ความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด สิ้นเปลืองทุน และเวลาในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ในการทดสอบ ดังนั้น CFD จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการลดปัญหาดังที่กล่าวมา แต่ก่อนที่จะทำการทดลองโดย CFD ของแบบจำลองขนาดเท่ากับต้นแบบ จำเป็นที่จะต้องทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กันกับการทดลองกับอุโมงค์ลม เพื่อให้แน่ใจว่าเงื่อนไขในการคำนวณ มีความถูกต้อง แม่นยำ และยอมรับได้ โดยการยืนยันผลได้มีการทำหลายส่วน เช่นการยืนยันผลของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) จำนวนกริด (Grid) โดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองโดยอุโมงค์ลม และ CFD รวมทั้งผลการศึกษาของนักวิจัยท่านอื่น ดังนั้นการยืนยันผลก่อนการจำลองเพื่อหาค่าแรงต้านของรถบรรทุกเล็กในกรณีศึกษาต่างๆ จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญของงานวิจัยนี้ เพื่อให้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำที่สุด

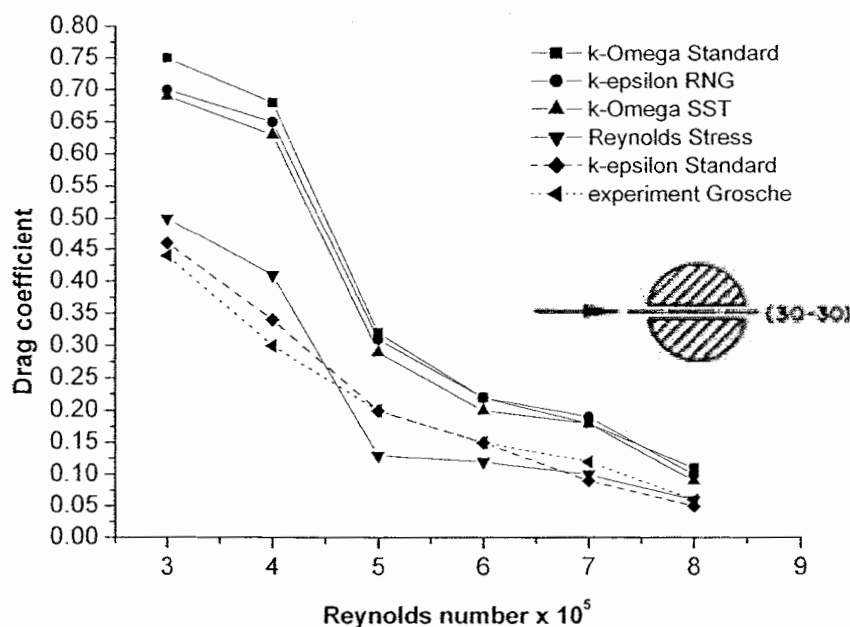
##### 5.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากทฤษฎีของ CFD ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และงานวิจัยท่านอื่นดังที่กล่าวมานั้น ทำให้ทราบข้อมูลของแบบจำลอง CFD ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาทางด้านอากาศพลศาสตร์ ในการทดสอบแรงต้านของรถบรรทุกเล็ก โดยใช้โปรแกรม FLUENT 6.3 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีปริมาตรสับแบ่ง (Finite volume method) ระเบียบขั้นการแก้ปัญหาใช้ Segregated solver, ระเบียบวิธีคำนวณใช้ Implicit method, ระเบียบวิธีแก้ปัญหาการไหลของบริเวณใกล้ผนังใช้ Standard wall function, เงื่อนไขขอบเขตทางเข้าเป็น Velocity inlet, เงื่อนไขขอบเขตทางออกเป็น Pressure outlet ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ

โดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ, โดยไม่มีส่วนของสมการพลังงานมาเกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เหล่านี้สามารถกำหนดได้ในโปรแกรม FLUENT 6.3

### 5.1.2 การยืนยันผลการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระเบียบการแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังที่กล่าวมา แต่การจำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์ เป็นการไหลที่มีค่า Reynolds number สูง ซึ่งสภาวะในการไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหลอย่างไม่เป็นระเบียบ การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วย CFD ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ แบบจำลองความปั่นป่วนเพื่อมาช่วยในการแก้ปัญหาคำนวณ ซึ่งในโปรแกรม FLUENT 6.3 มีให้เลือกหลายแบบจำลอง เพราะฉะนั้นจึงได้มีการเปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ โดยการทดสอบแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model) แบบต่าง ๆ ซึ่งจากรูปที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบและเพื่อยืนยันผลของสมการการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent model) ให้มีความถูกต้องกับลักษณะการคำนวณ โดยกำหนดจำนวนกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ กริดที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับการศึกษาของ Groshe and meier (2001: 1201-1218) ซึ่งเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับวัตถุทรงกลมเจาะรูตรงกลาง โดยใช้ข้อมูลเป็นเครื่องมือในการทดสอบ



รูปที่ 5.1 สัมประสิทธิ์แรงต้าน จากแบบจำลองความปั่นป่วนแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Groshe มากที่สุด ซึ่งจากข้อมูล และทฤษฎีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

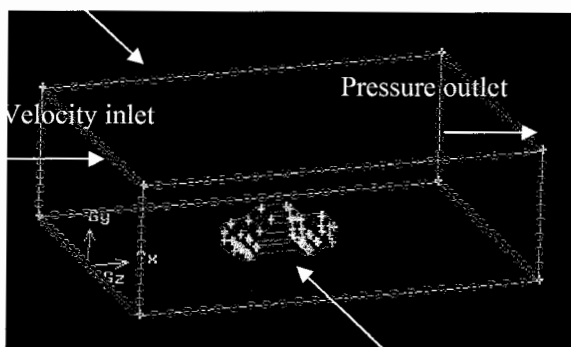
แบบจำลองนี้เหมาะสมกับการ จำลองการไหลด้านอากาศพลศาสตร์มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ k-epsilon Standard เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่ใช้ในการคำนวณ CFD ของรถบรรทุกเล็กต่อไป

### 5.1.3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ของการเพิ่มจำนวนกริด

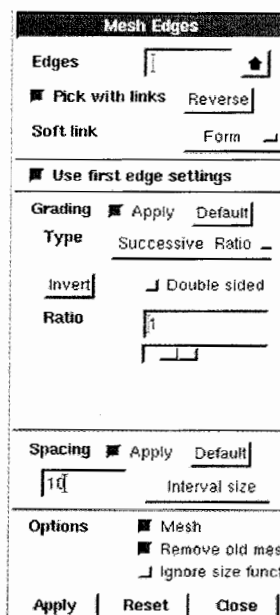
จากระเบียบขั้นตอนการทำงานของ CFD มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการประมวลผล (Pre-processor) เป็นขั้นตอนที่เราต้องแบ่งปัญหาออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ ซึ่งเราใช้ระเบียบวิธีแก้ปัญหการไหลบริเวณใกล้ผนัง เป็นแบบ Near-wall model โดยเป็นเทอมของแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k-epsilon standard ดังนั้นต้องกำหนดจำนวนความละเอียดของกริด และกำหนดอิทธิพลของบริเวณใกล้ผนังให้เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการเพิ่มจำนวน และความละเอียดของกริด ของตัวรถบรรทุกเล็ก และผนัง เพื่อหาความเหมาะสมของเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เพราะถ้าหากเรากำหนดให้มีความละเอียดมากเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณ

จากขั้นตอนการประมวลผล ได้กำหนดระยะห่างของจุดเพื่อที่จะเป็นจุดเชื่อมกันของกริด โดยใช้โปรแกรม GAMBIT ซึ่งระยะห่างของตัวรถบรรทุกเล็กต้องมีความละเอียดกว่าผิวของผนังล้อมรอบรถ จากรูปที่ 5.2 เป็นการแสดงการกำหนดความละเอียดของกริด โดยการเพิ่มระยะห่างของจุด บนผิวรถบรรทุกเล็ก

Spacing = 80



Spacing = 2 - 10



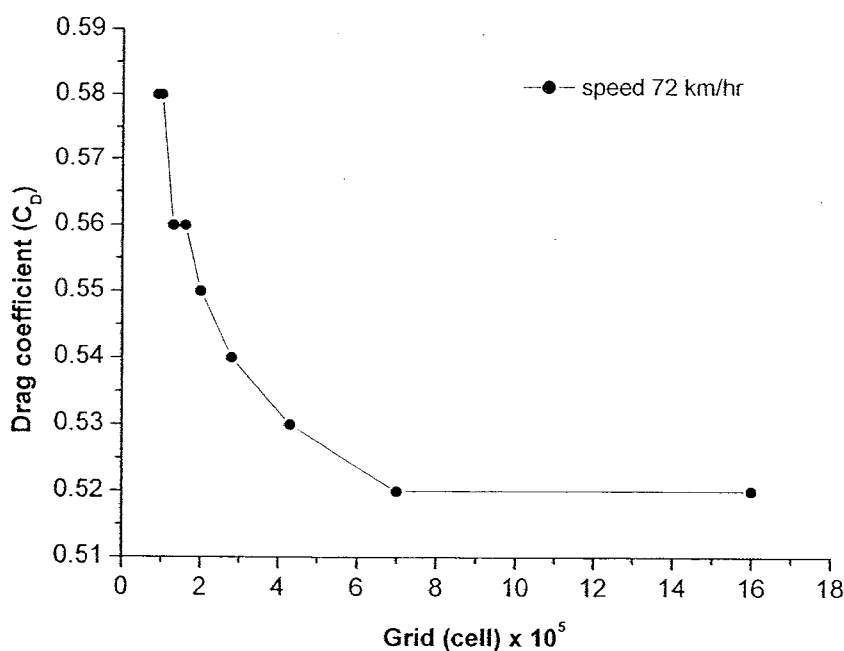
รูปที่ 5.2 ลักษณะการกำหนดกริด



จากภาพนั้นเป็นการกำหนดระยะระหว่างจุด (Spacing) ของรถบรรทุกเล็กที่ 2-10 หน่วย และบริเวณผนังที่ระยะ 80 หน่วย กับรถบรรทุกเล็กที่มีพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 72 km/hr และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากที่กล่าวมาข้างต้นนำมาใช้ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของแรงต้าน (Drag force) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 จำนวนกริดและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ 72 km/hr

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



รูปที่ 5.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน และจำนวนกริด

จากตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งจากผล เมื่อมีการเพิ่มจำนวนกริดมากขึ้นทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และลดลงเรื่อย ๆ จนถึงค่าค่าหนึ่ง ที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านคงที่ ซึ่งหากมีการเพิ่มขึ้นของกริดอีกก็ไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้าน นั่นคือ กำหนดระยะระหว่างจุดบนผิวรถที่ 3 หน่วย และที่บริเวณผนัง 80 หน่วย จำนวนกริดประมาณ 728,644 cell ซึ่งจะได้นำข้อกำหนดนี้ไปใช้ในการคำนวณ

## 5.2 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ระหว่างการทดลองกับ CFD

จากเงื่อนไขในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และคุณสมบัติของอากาศที่ใช้ในการคำนวณ ที่ได้ จาก ทฤษฎี และการเปรียบเทียบที่ได้ยืนยันผลมาแล้วนั้น จึงต้องมีการเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 2 วิธีเพื่อยืนยันผลโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน และพฤติกรรมการไหล โดยการทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลมทดสอบที่ความเร็วระหว่าง 18 – 36 km/hr (Reynolds number  $2.8 \times 10^4 - 5.7 \times 10^4$ ) และทดสอบด้วย CFD ทดสอบที่ความเร็วระหว่าง 18 – 126 km/hr (Reynolds number  $2.8 \times 10^4 - 2.4 \times 10^5$ ) ซึ่งได้มีการทดสอบรูปทรงต่าง ๆ ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (5.1)$$

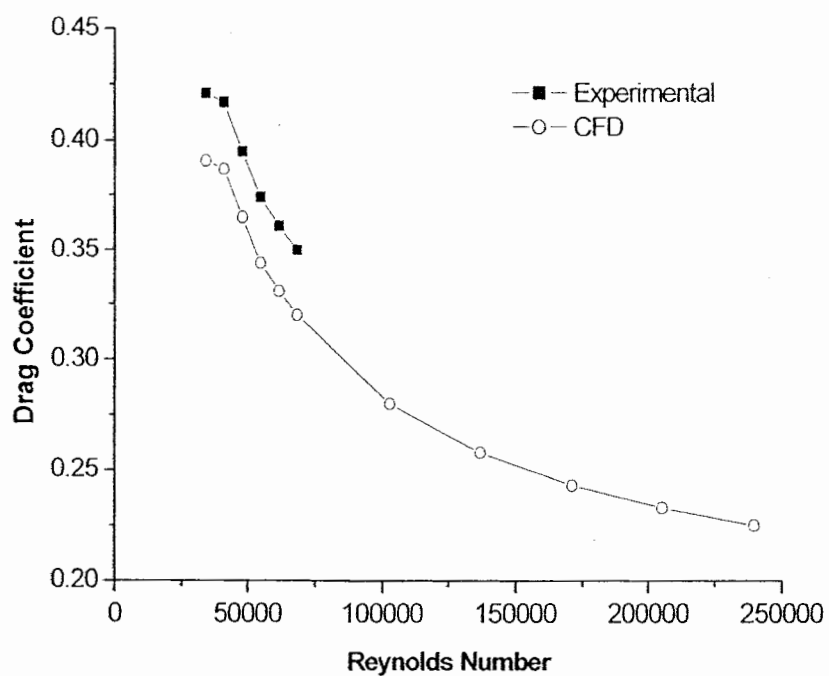
โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ ) และ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ซึ่งการทดลองทั้ง 2 วิธี ขนาดของส่วนปฏิบัติ (Test section) สภาวะการไหลเหมือนกัน ดังนี้คือ

### 5.2.1 ทรงกลม (sphere)

เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) ของวัตถุทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ผิวเรียบ ซึ่งจากการทดลองจะให้ผลดังตารางที่ 5.2 ดังต่อไปนี้คือ

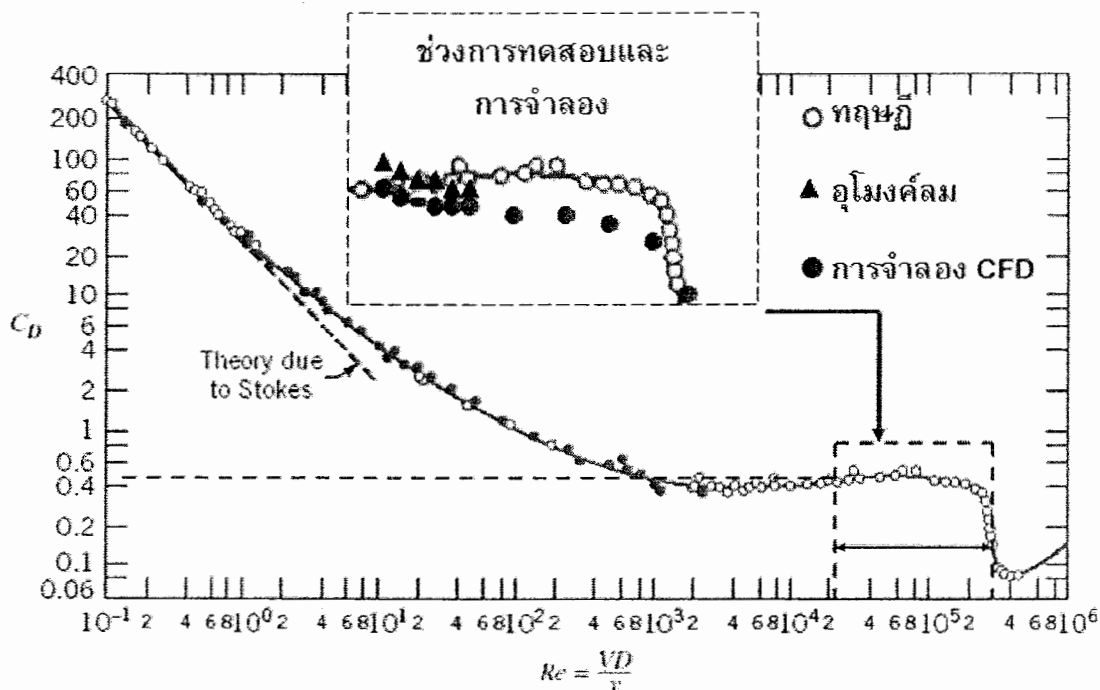
ตารางที่ 5.2 ค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบวัตถุทรงกลม

| ความเร็วอากาศ (m/s) | Reynolds number | $F_D$ (N)<br>อุโมงค์ลม | $F_D$ (N)<br>CFD | $C_D$<br>อุโมงค์ลม | $C_D$<br>CFD |
|---------------------|-----------------|------------------------|------------------|--------------------|--------------|
| 5                   | 34,237          | 0.204                  | 0.188            | 0.424              | 0.391        |
| 6                   | 41,084          | 0.289                  | 0.268            | 0.417              | 0.387        |
| 7                   | 47,929          | 0.373                  | 0.344            | 0.395              | 0.365        |
| 8                   | 54,776          | 0.461                  | 0.424            | 0.374              | 0.344        |
| 9                   | 61,623          | 0.563                  | 0.485            | 0.361              | 0.311        |
| 10                  | 68,470          | 0.674                  | 0.616            | 0.35               | 0.320        |
| 15                  | 120,705         | -                      | 1.213            | -                  | 0.280        |
| 20                  | 136,940         | -                      | 1.987            | -                  | 0.258        |
| 25                  | 171,175         | -                      | 2.924            | -                  | 0.243        |
| 30                  | 205,410         | -                      | 4.037            | -                  | 0.233        |
| 35                  | 239,645         | -                      | 5.306            | -                  | 0.225        |



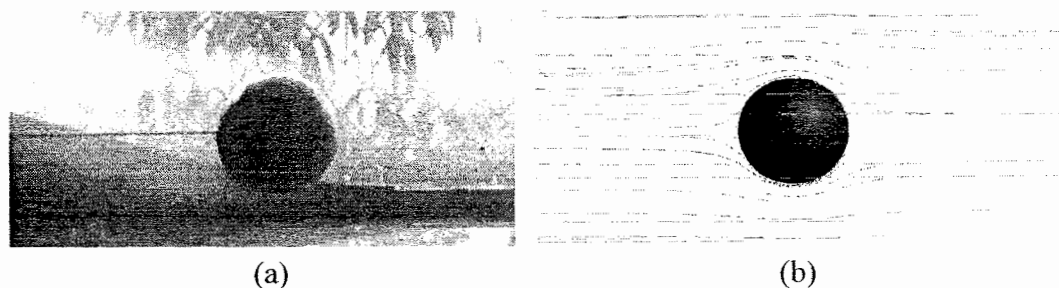
รูปที่ 5.4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลอง และ CFD

จากรูปที่ 5.4 ซึ่งจากการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและCFD ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข 5 % (โดยเฉลี่ย) ซึ่งจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดสอบทั้งสองแบบเปรียบเทียบกับทฤษฎี ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านทั้ง 3 วิธี

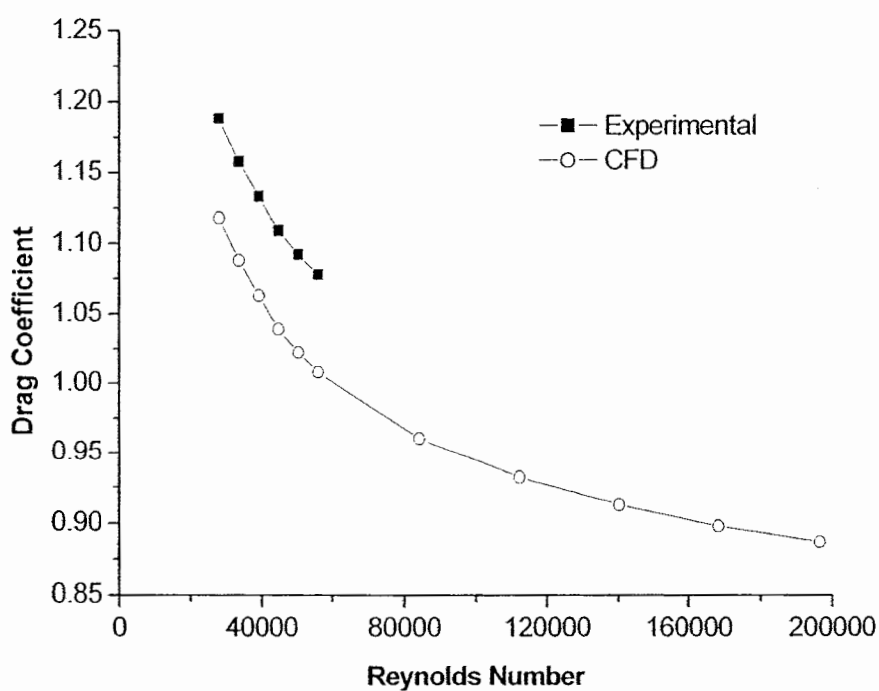
จากรูปที่ 5.5 เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมในอุโมงค์ลม และวิธีจำลองเชิงตัวเลข เปรียบเทียบกับทฤษฎีอยู่ในช่วง Reynolds number เท่ากับ  $2.2 \times 10^4 - 3.0 \times 10^5$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลง เมื่อ Reynolds number สูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดที่ผิวทรงกลมกับอากาศลดลง ผิวทรงกลมจะได้รับผลจากความดันอากาศเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี



รูปที่ 5.6 การแสดงการไหลของอากาศผ่านวัตถุทรงกลม ในอุโมงค์ลม และ CFD

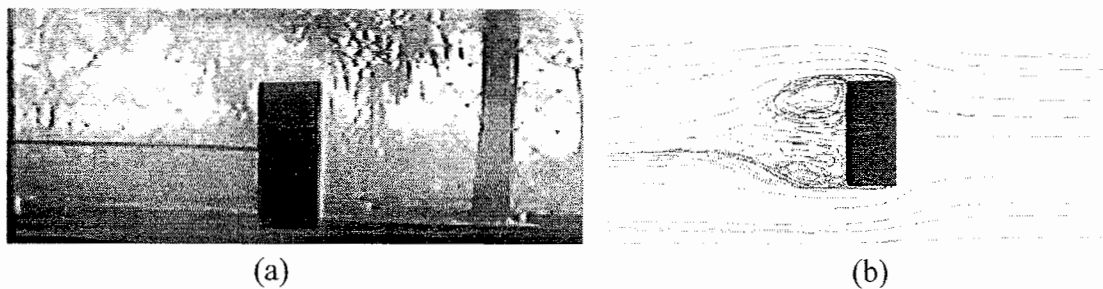
### 5.2.2 ทรงสี่เหลี่ยม (Square)

เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 9 x 4 x 8 cm ได้ผลดังรูปที่ 5.7



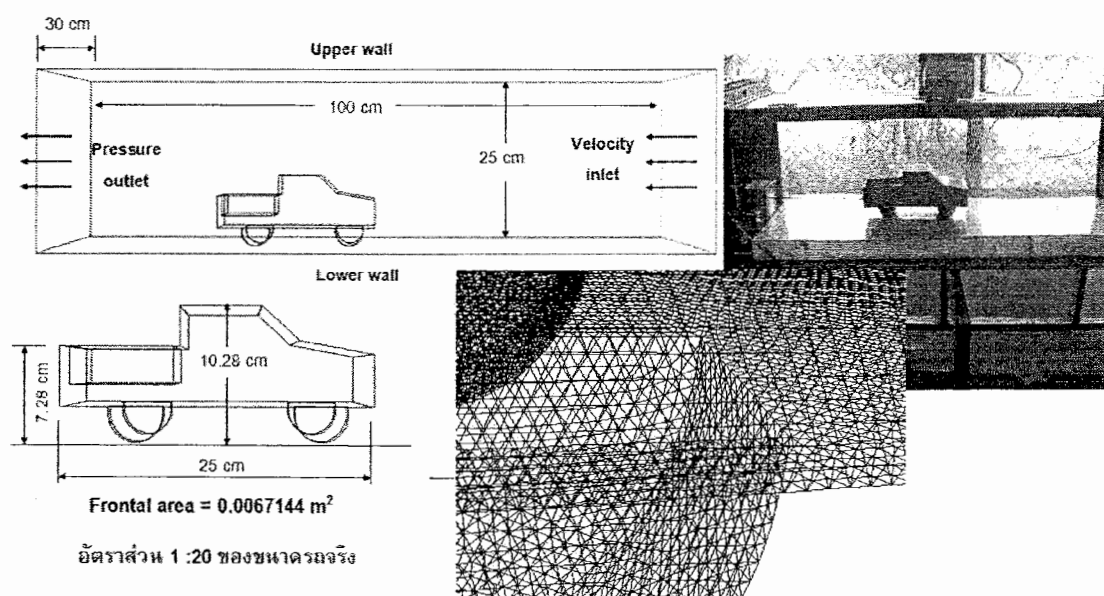
รูปที่ 5.7 สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดลอง และ CFD

ซึ่งจากการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลม และ CFD ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข 5% เช่นเดียวกับทรงกลม (โดยเฉลี่ย)



รูปที่ 5.8 การแสดงการไหลของอากาศผ่านวัตถุทรงสี่เหลี่ยม ในอุโมงค์ลม และ CFD

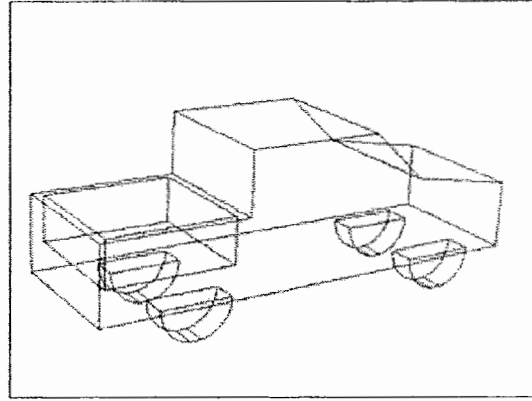
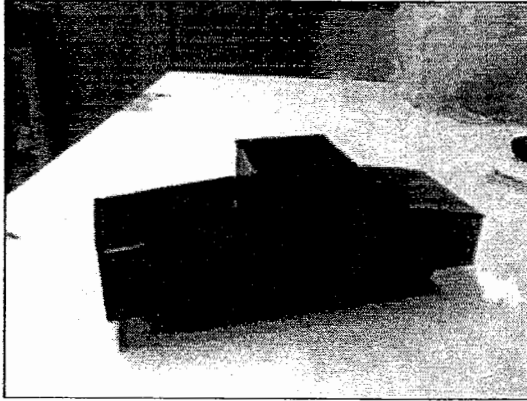
### 5.2.3 รถบรรทุกเล็ก



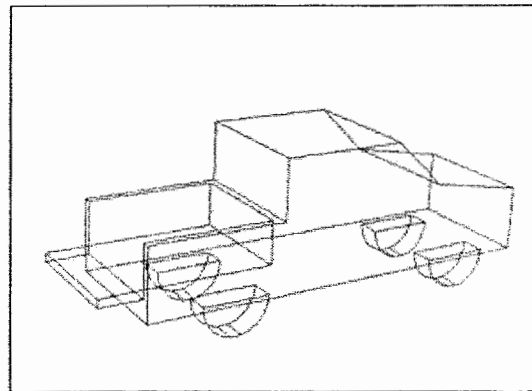
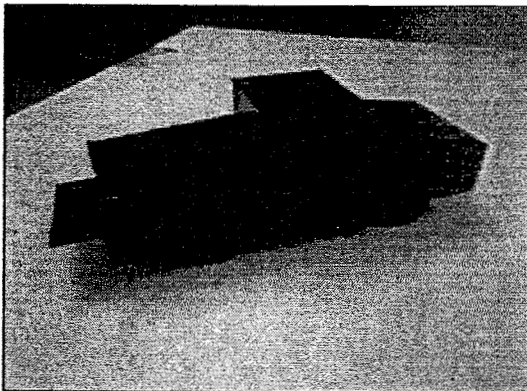
รูปที่ 5.9 ขนาดของแบบจำลอง กริด และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม แบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดรถจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$  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), และครอบท้าย

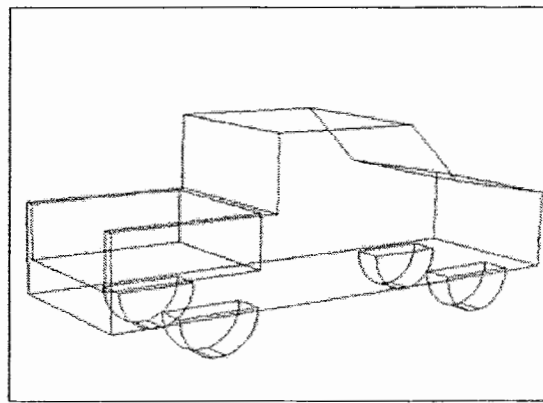
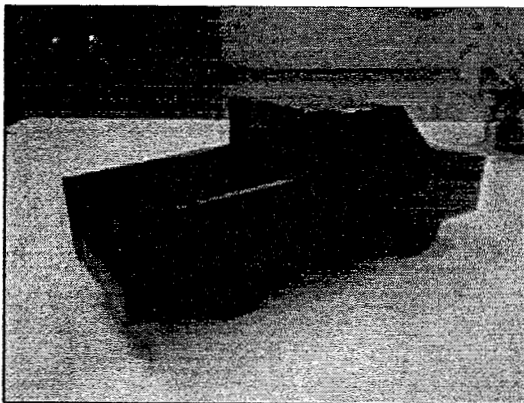
กระบะแบบตรง (Van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน รูปทางด้านซ้ายเป็นแบบจำลองที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และด้านขวาเป็นแบบจำลองที่จำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข แสดงดังรูปที่ 5.10



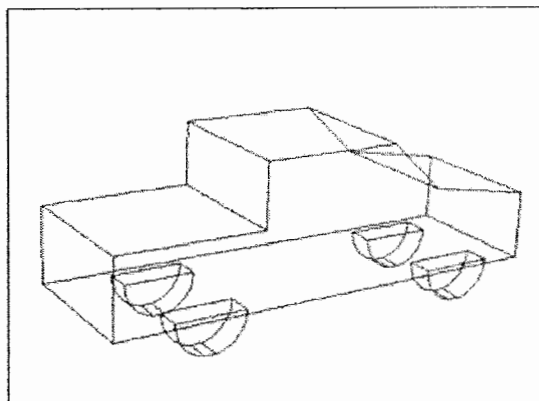
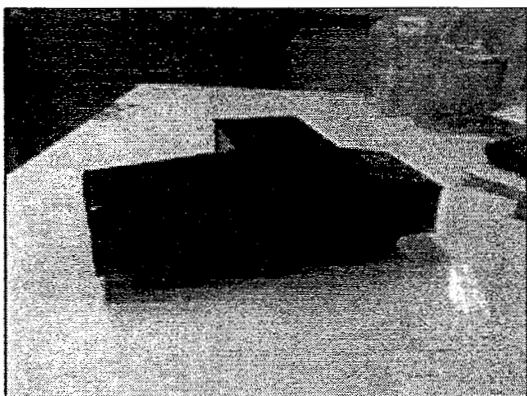
(a) กรณีที่ 1 เปิดกระบะปกติ



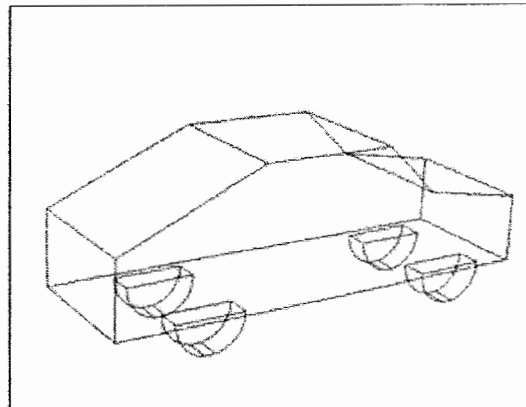
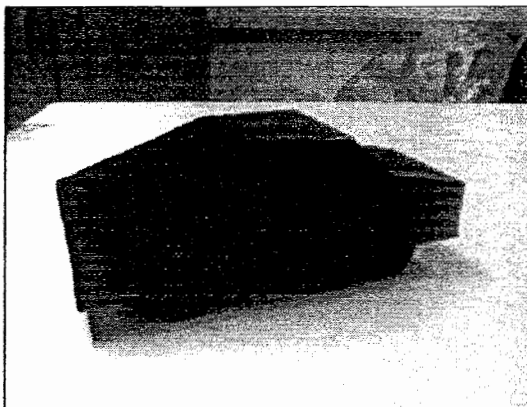
(b) กรณีที่ 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



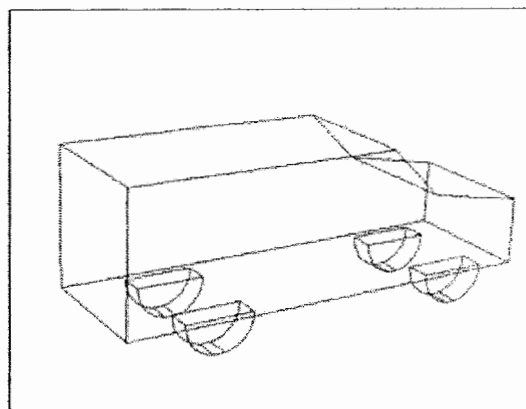
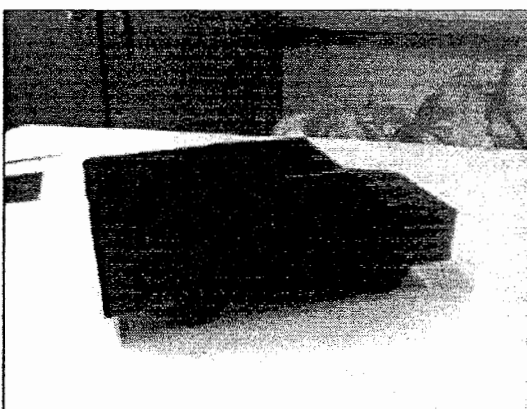
(c) กรณีที่ 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณีที่ 4 ปิดท้ายกระบะ



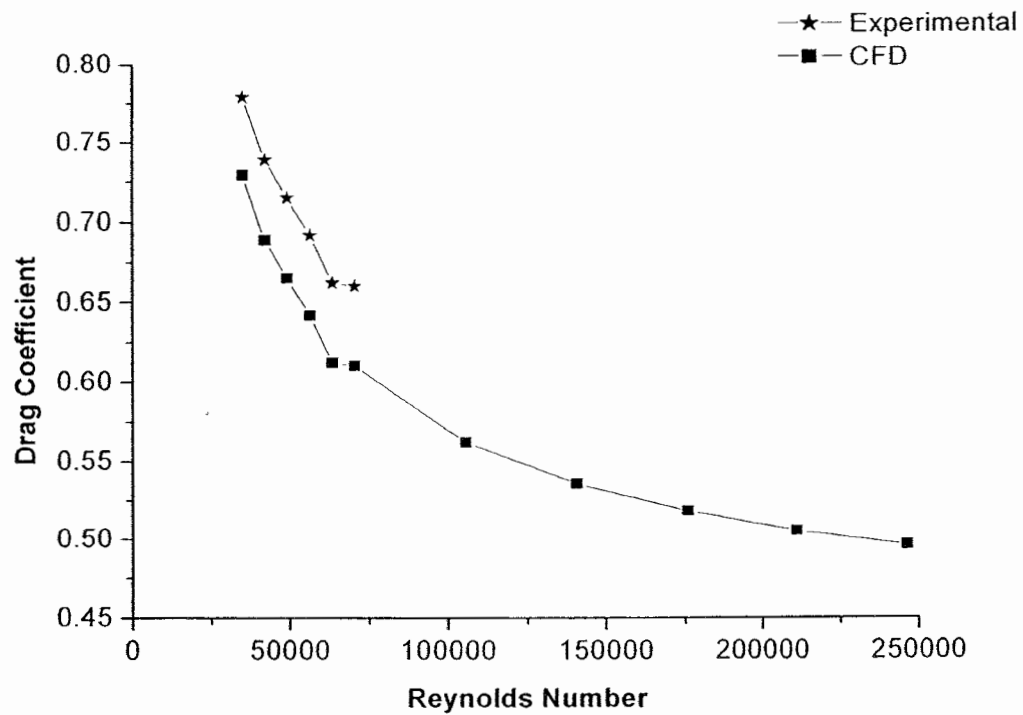
(e) กรณีที่ 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง



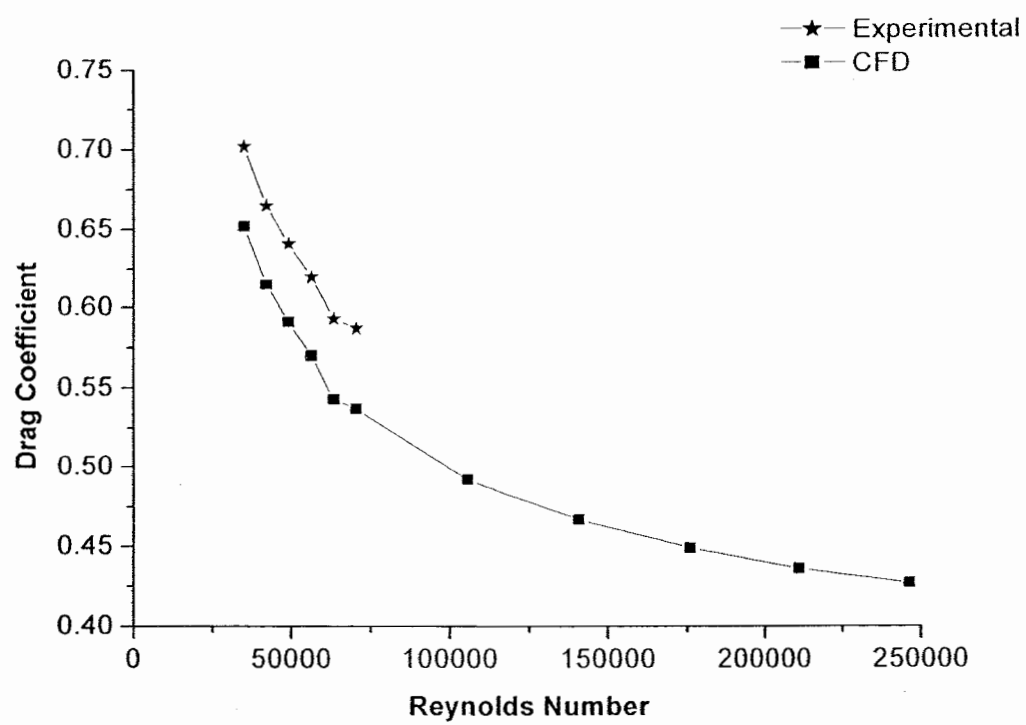
(f) กรณีที่ 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

รูปที่ 5.10 (a) – (f) แบบจำลองกรณีต่างๆ ที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD

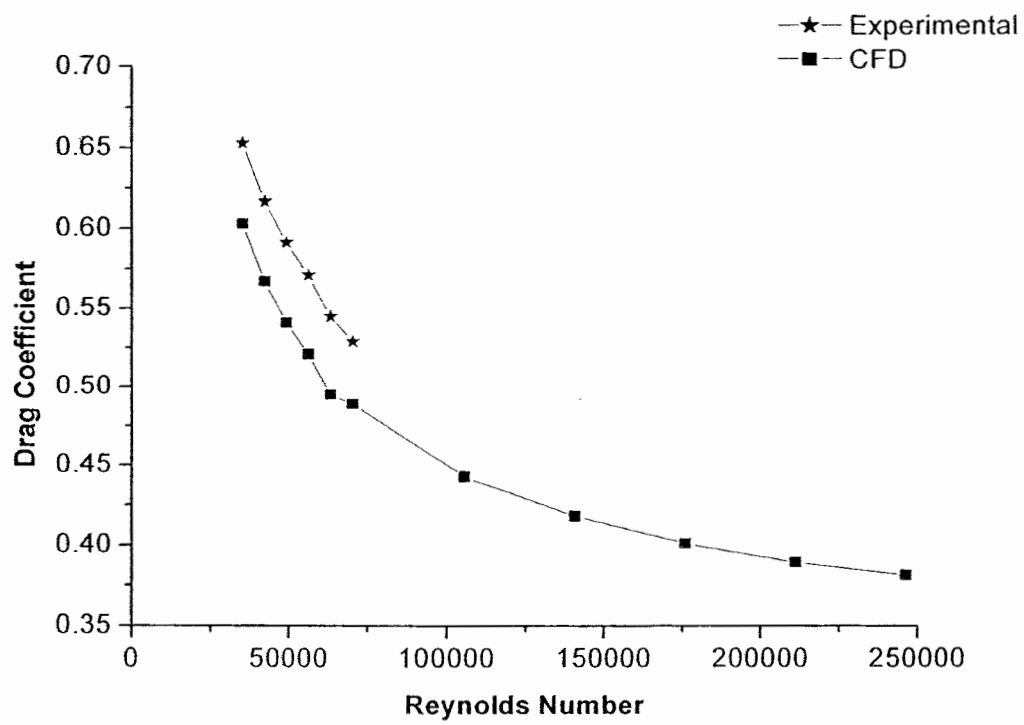




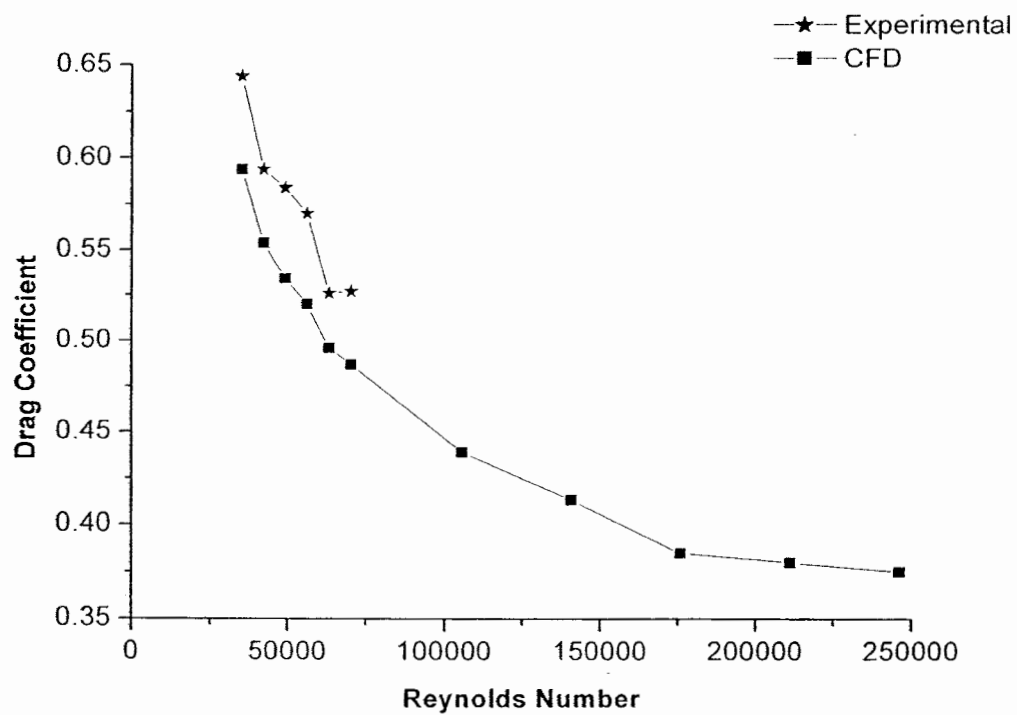
(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



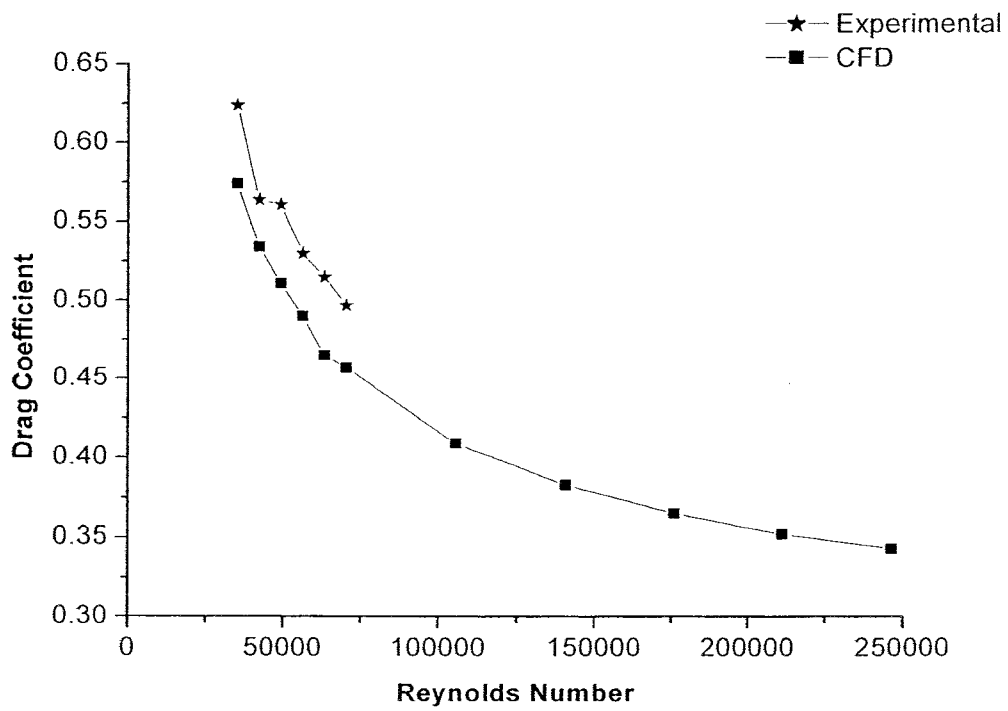
(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



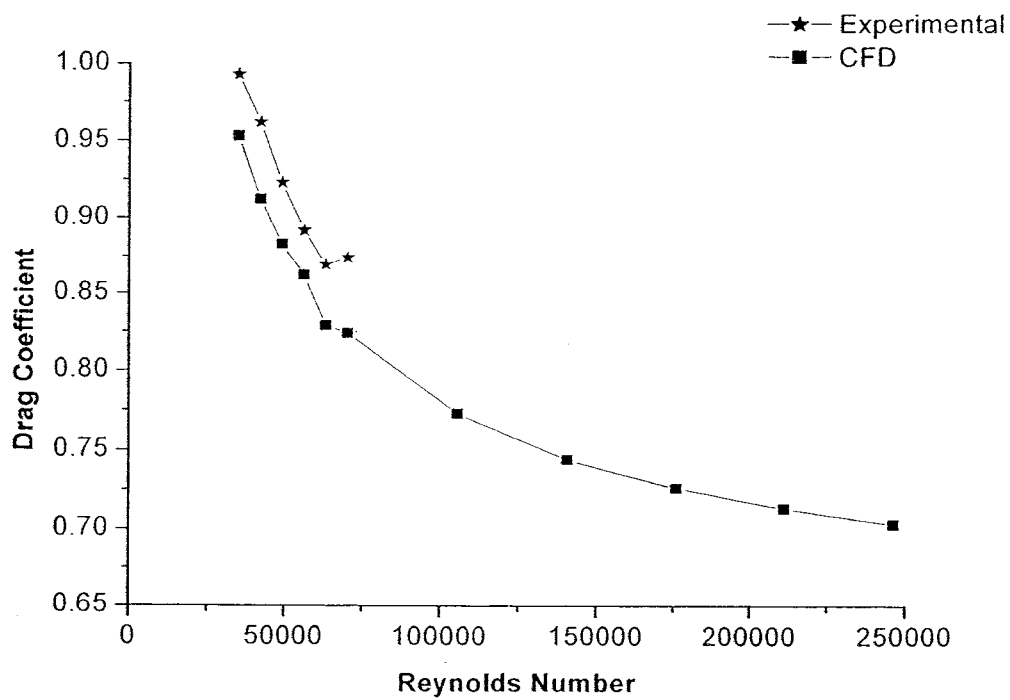
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



(e) กรณี 5 คออบท้ายกระเบแบบเฉียง

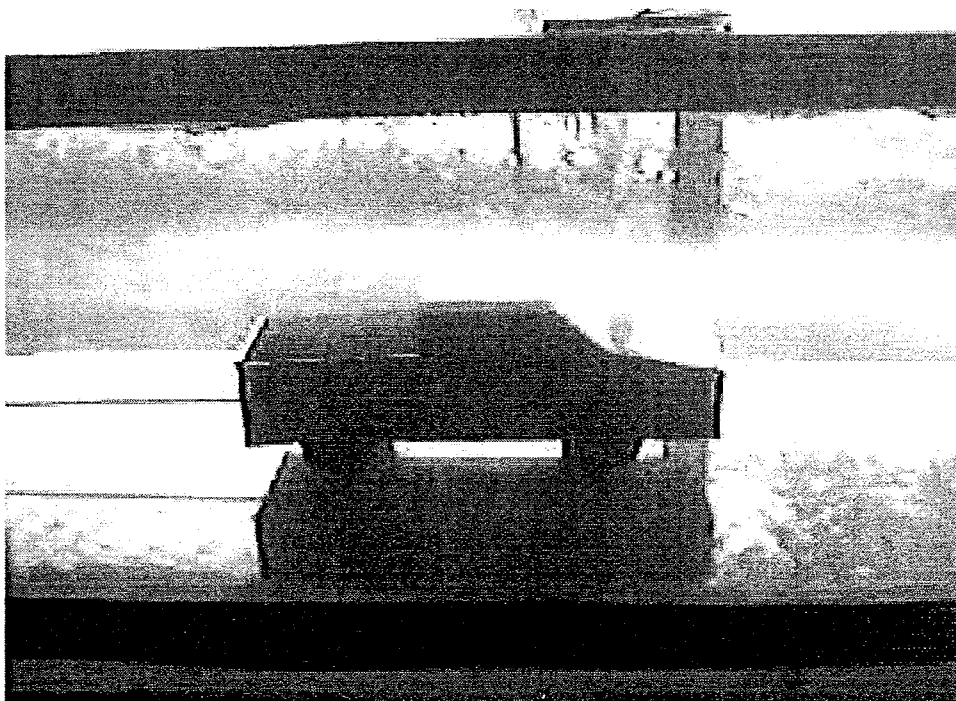


(f) กรณี 6 คออบท้ายกระเบแบบตรง

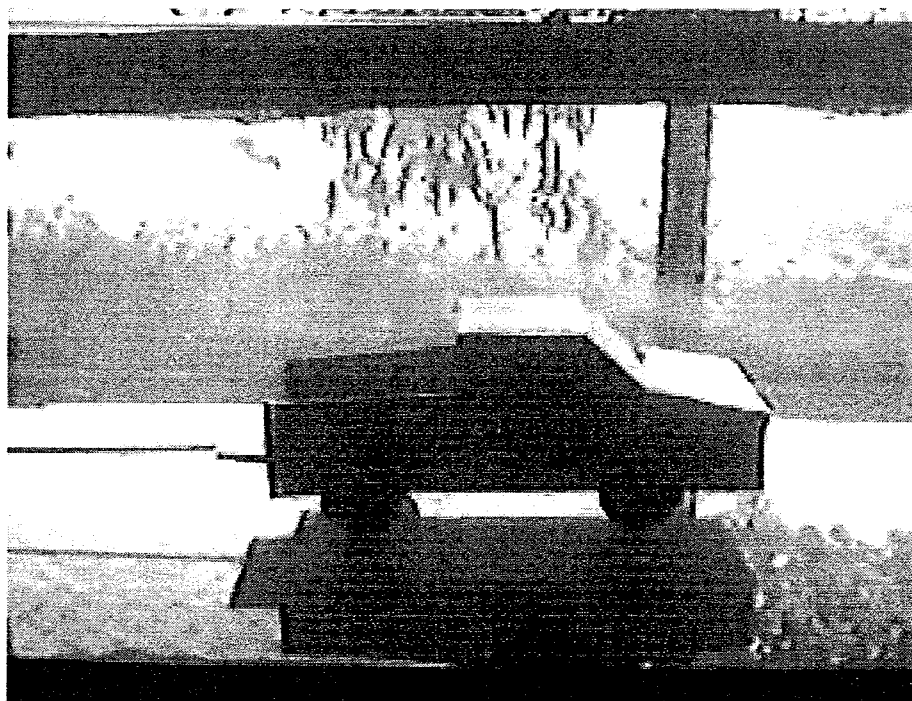
รูปที่ 5.11 (a) – (f) สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถขนาดจำลอง กรณีต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.11 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างท้ายกระบะกรณีต่าง ๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ Reynolds number เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณีก็จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ว่ามีผลกับรูปทรงท้ายกระบะ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 % เนื่องจากความกว้างช่วงการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ทำให้สภาวะการไหลไม่คงที่ เช่นความเร็ว ความดัน ความหนืด โดยเมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแคบลง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมทดสอบสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งแสดงการไหลผ่านรถบรรทุกเล็กของกรณีต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.12 เป็นการแสดงภาพที่ได้จากการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม ซึ่งได้ใช้ควันจากการเผาไหม้ไหลไปกับกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลอง เพื่อแสดงการไหลผ่าน โดยแต่ละรูปทรงของรถบรรทุกเล็กจะทำให้กระแสการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงไป เกิดการหมุนวนของอากาศด้านท้ายของรถ แต่การแสดงผลการไหลนั้นให้ภาพเพื่อในการวิเคราะห์การไหลไม่ชัดเจนเท่าที่ควร จึงได้มีการจำลองการไหลโดย CFD เพื่อเปรียบเทียบและแสดงกระแสการไหล การเกิดการหมุนวนได้อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.13 โดยใช้เงื่อนไขในการจำลองเหมือนกันกับการจำลองการไหลผ่านวัตถุทรงกลม จะเห็นว่ากระแสการไหลของการปรับเปลี่ยนรูปทรงท้ายกระบะมีความแตกต่างกัน เกิดการหมุนวนของอากาศ และเกิดการปะทะส่วนท้ายกระบะในกรณีของเปิดกระบะปกติ แต่ในกรณีปิดท้ายกระบะ และครอบกระบะแบบเฉียงการหมุนวนของอากาศด้านท้ายจะลดลงอย่างชัดเจน แต่ในการจำลองนี้ เป็นการจำลองของรถแบบจำลองขนาดย่อ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบจึงไม่สามารถยืนยันได้ว่ามีความถูกต้อง

ดังนั้นในบทต่อไปจะเป็นการจำลองการไหลของแบบจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดจริง ในกรณีต่าง ๆ โดยเงื่อนไขจากการเปรียบเทียบการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านของการทดสอบในอุโมงค์ลม จะมีค่าสูงกว่าการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านใน CFD แต่ค่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก ซึ่งอาจสรุปได้ว่า เงื่อนไขการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณมีความถูกต้อง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง ของกรณีต่าง ๆ ในบทต่อไป



(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



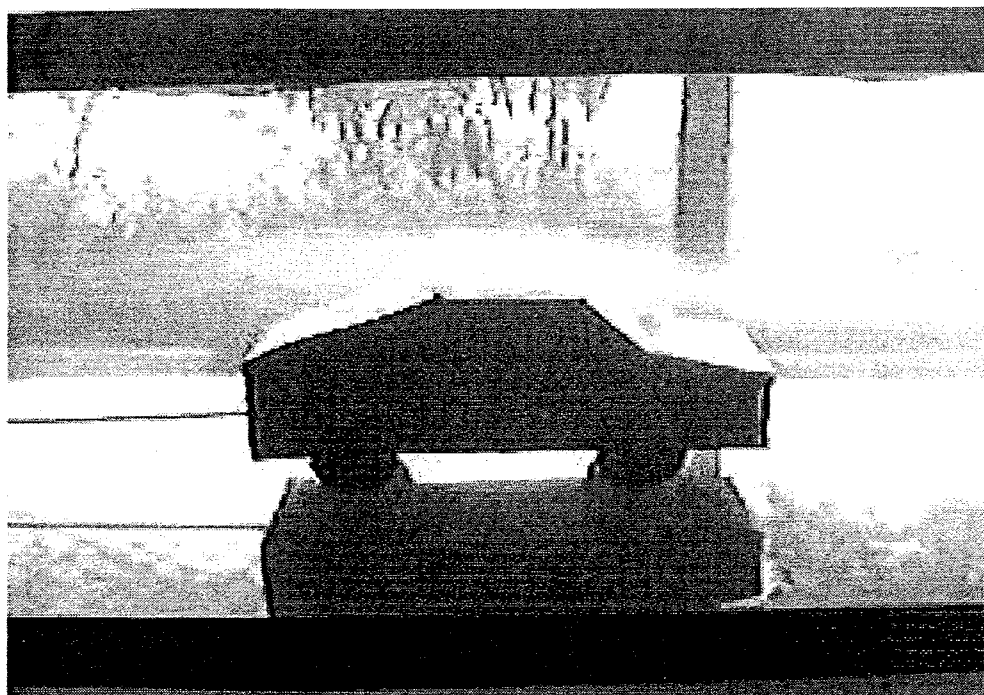
(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



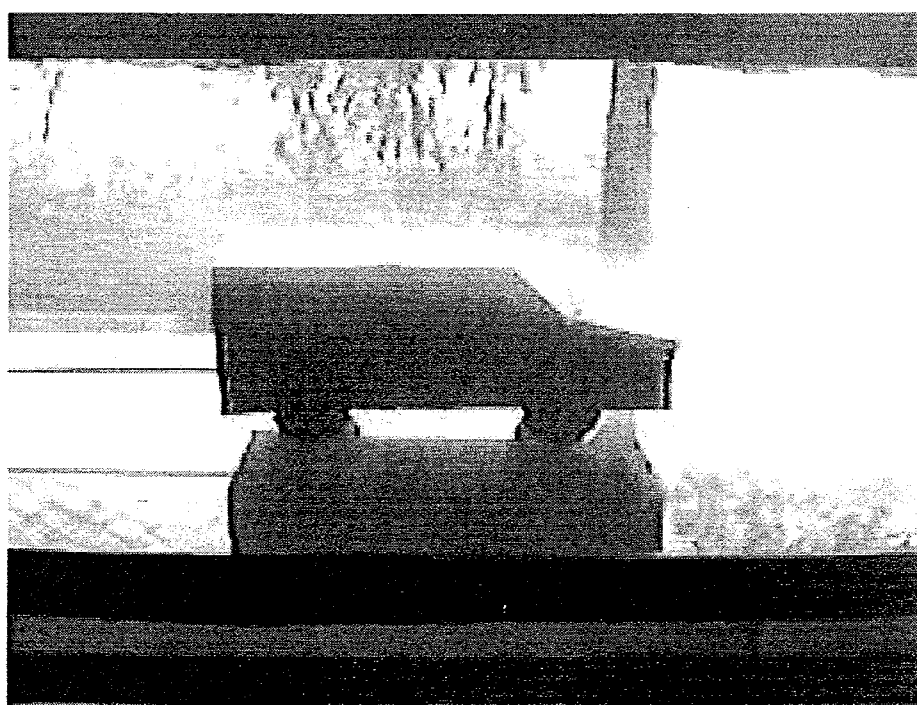
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาทำกระบะ



(d) กรณี 4 ปิดทำกระบะ

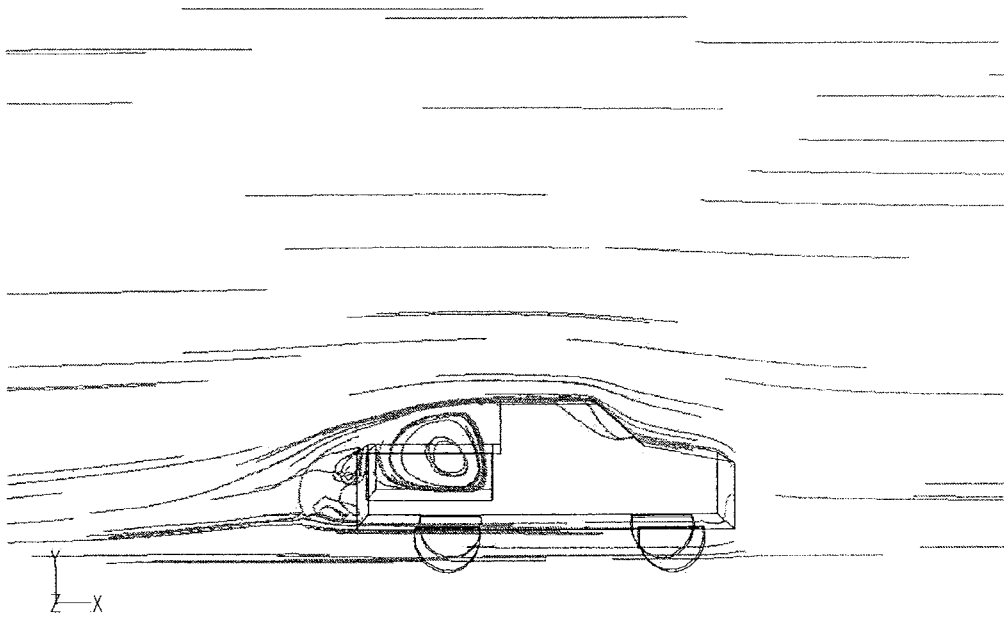


(e) กรณี 5 กรอบท้ายกระบะแบบเฉียง

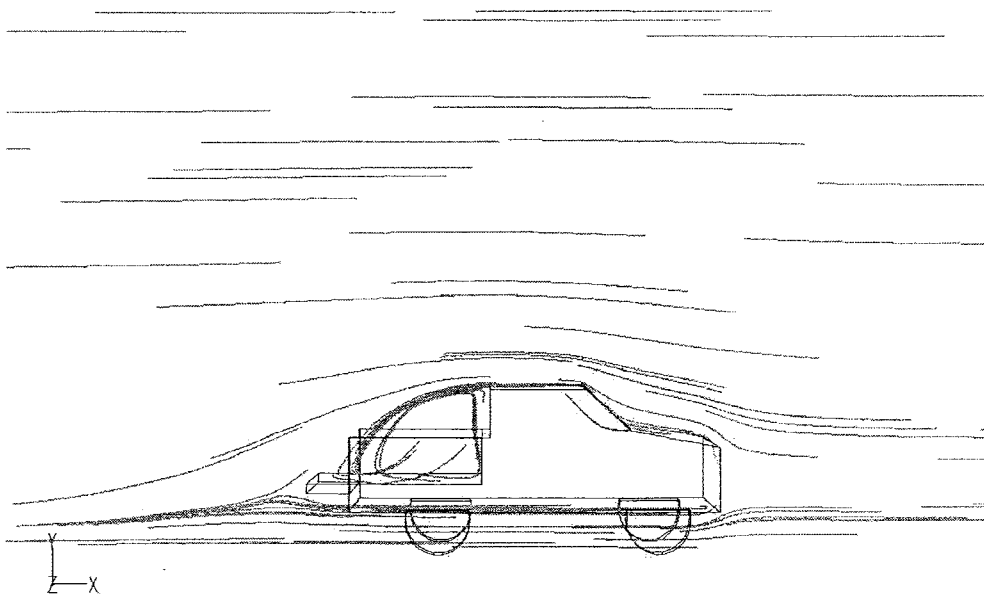


(f) กรณี 6 กรอบท้ายกระบะแบบตรง

รูปที่ 5.12 (a) – (f) เส้นการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็กในอุโมงค์ลม

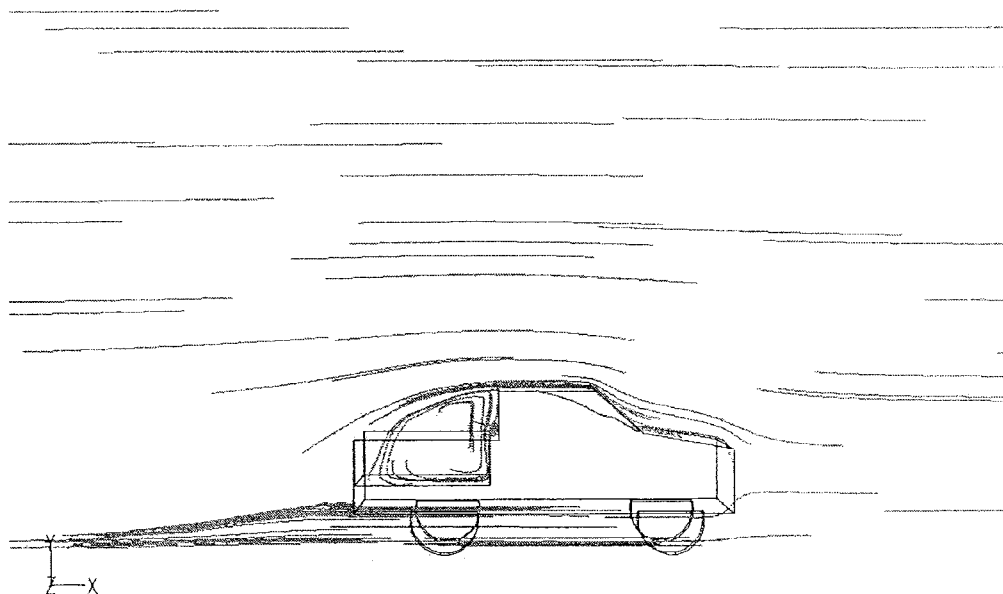


(a) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ

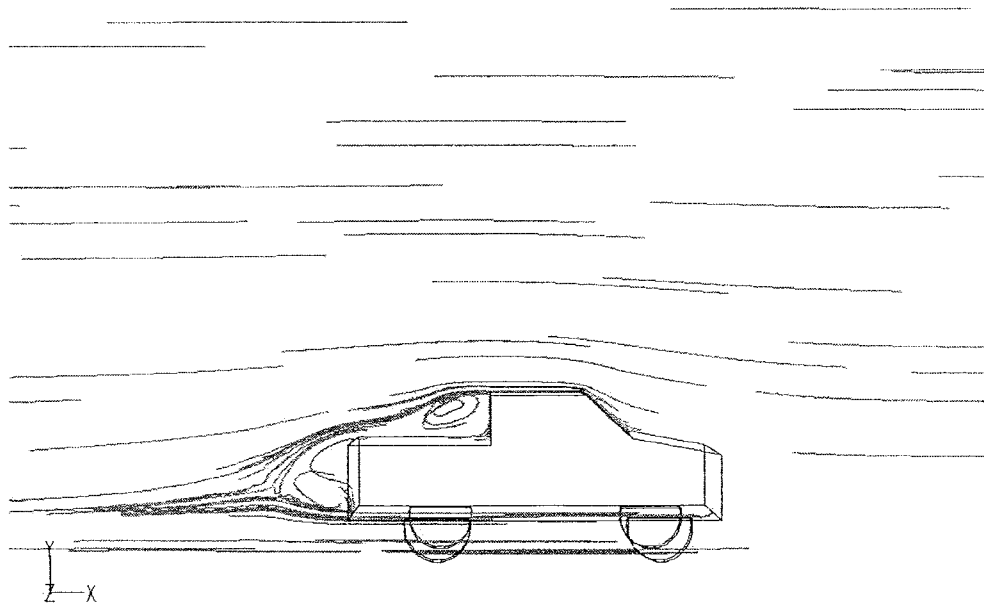


(b) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ

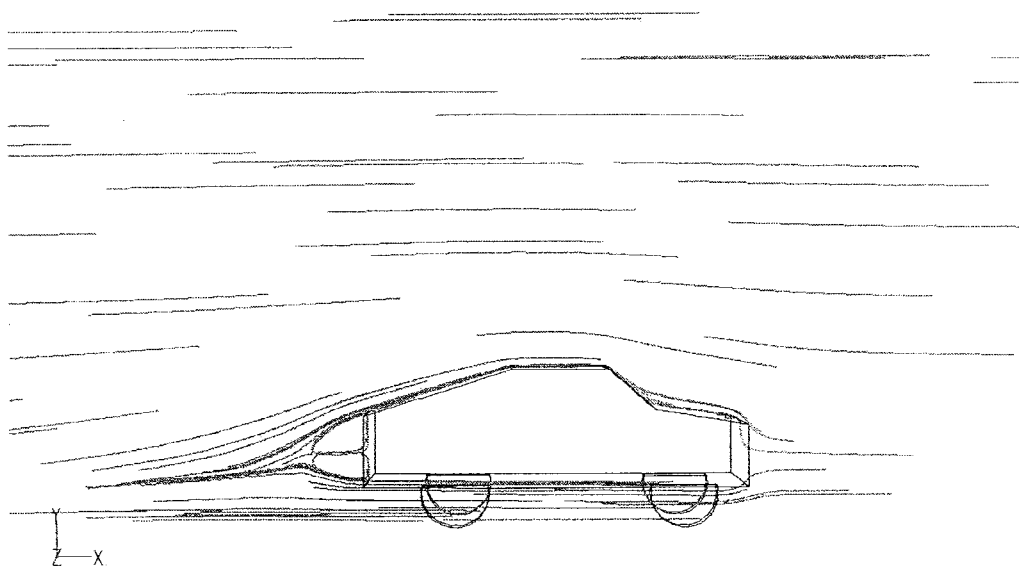




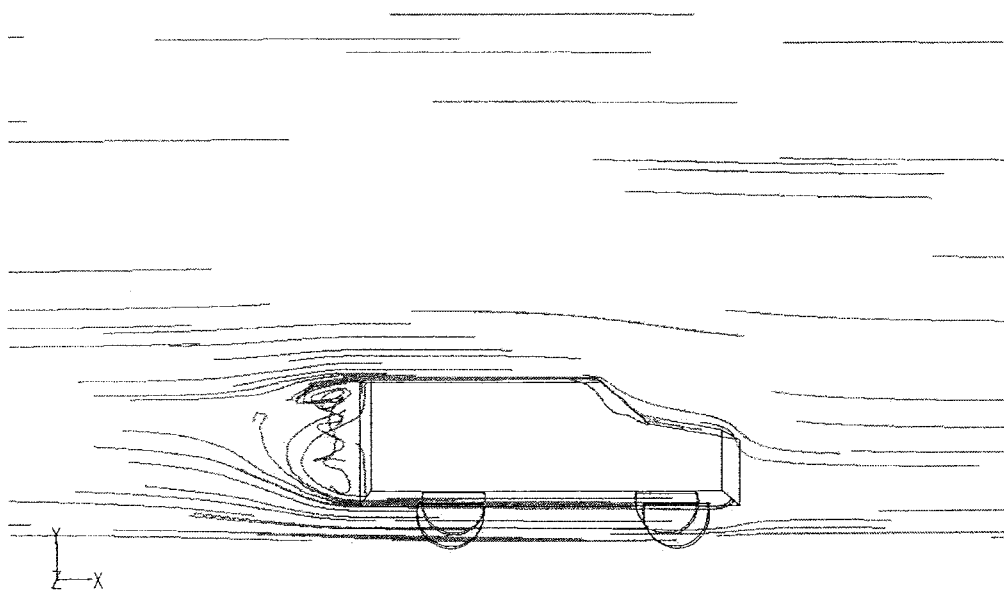
(c) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ



(d) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



(e) กรณี 5 ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง



(f) กรณี 6 ครอบท้ายกระบะแบบตรง

รูปที่ 5.13 (a) – (f) เส้นการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็กใน CFD

บทที่ 6  
การจำลองหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็ก  
ขนาดจริงโดย CFD

จากบทที่ผ่านมา เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองขนาดย่อ ของรถบรรทุกเล็ก และได้มีการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมนั้นมีข้อจำกัดหลายประการ เช่นความเร็วของอากาศที่ใช้ทดสอบมีความเร็วต่ำ แบบจำลองที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กซึ่งทำให้วัดค่า การสังเกตเพื่อวิเคราะห์การไหลทำได้ยาก ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กแบบจำลองขนาดจริงโดย CFD ซึ่งใช้เงื่อนไขและหลักการเดียวกันกับการจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดย่อที่ผ่านมา

จากทฤษฎีของ CFD ผลการทดลอง และเปรียบเทียบเงื่อนไขในการคำนวณจากบทที่แล้ว สามารถสรุปเงื่อนไขการคำนวณที่ใช้ในการจำลองรถบรรทุกเล็ก ได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD

|                                                                              |                           |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| โปรแกรม GAMBIT                                                               |                           |
| ขอบเขตทางด้านเข้า (inlet boundary condition)                                 | Velocity inlet            |
| ขอบเขตทางด้านออก (outlet boundary condition)                                 | Pressure outlet           |
| จำนวนกริด                                                                    | ประมาณ 728,644 cell       |
| โปรแกรม FLUENT                                                               |                           |
| ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)                                                  | Segregated Solver         |
| ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)                                             | Implicit method           |
| แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)                                       | Standard k-epsilon (2eqn) |
| ระเบียบวิธีการแก้ปัญหាកาการไหลบริเวณใกล้ผนัง<br>(Near-wall treatment method) | near-wall model           |

ของไหลที่ใช้ในการคำนวณด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็กคือ อากาศ ซึ่งเป็นการคำนวณการไหลในสถานะที่กดอัดไม่ได้ (Incompressible flow) มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้อยมากเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งการกำหนดค่าคุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ ดังนี้คือ

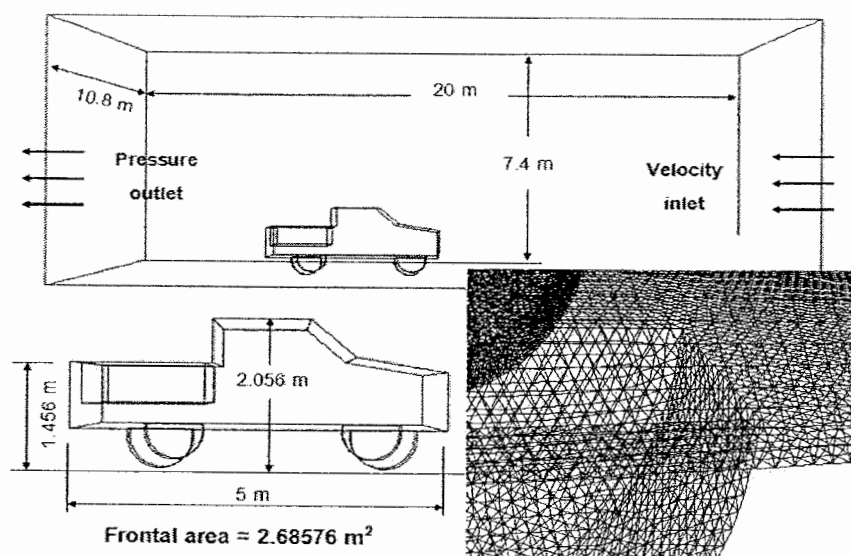
ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติของอากาศในการคำนวณ

| คุณสมบัติของอากาศ                                  | ค่า                     |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| ความหนืด (Viscosity), $\mu$ (kg/m-s)               | $1.7894 \times 10^{-5}$ |
| ความหนาแน่น (Density), $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 1.225                   |
| ความดันเริ่มต้น (Operating pressure), P (pascal)   | 101,325                 |
| อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ (Ratio of specific heat)   | 1.4                     |
| อุณหภูมิ (Temperature), (K: Kelvin)                | 288.16                  |

ดังนั้นในบทนี้ เป็นการนำเอาเงื่อนไขการคำนวณของไหลพลศาสตร์ มาใช้ในด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก เพื่อหาแนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีต่าง ๆ โดยอาศัยองค์ความรู้จาก ทฤษฎี และหลักการของผู้ที่ทำการศึกษาวิจัยมาก่อน มาประยุกต์ใช้ในกรณีดังต่อไปนี้

### 6.1 กรณีรถบรรทุกเล็กปรับปรุงท้ายกระบะ

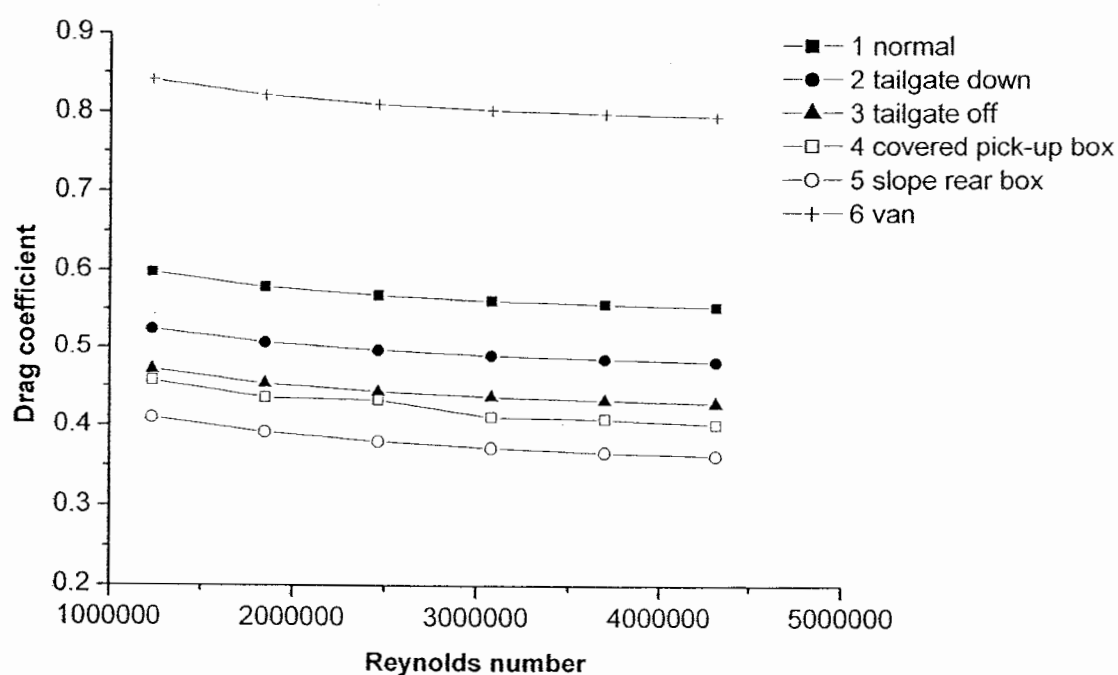
ในกรณีนี้เป็นกรณีเดียวกันกับการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองจากบทที่ผ่านมา แต่จะเปลี่ยนแบบจำลองเป็นขนาดจริง ซึ่งขนาดของแบบจำลอง และเงื่อนไขในการคำนวณจะแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงขนาดและเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองขนาดจริง

### 6.1.1 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีรถบรรทุกเล็กปรับปรุงท้ายกระบะ

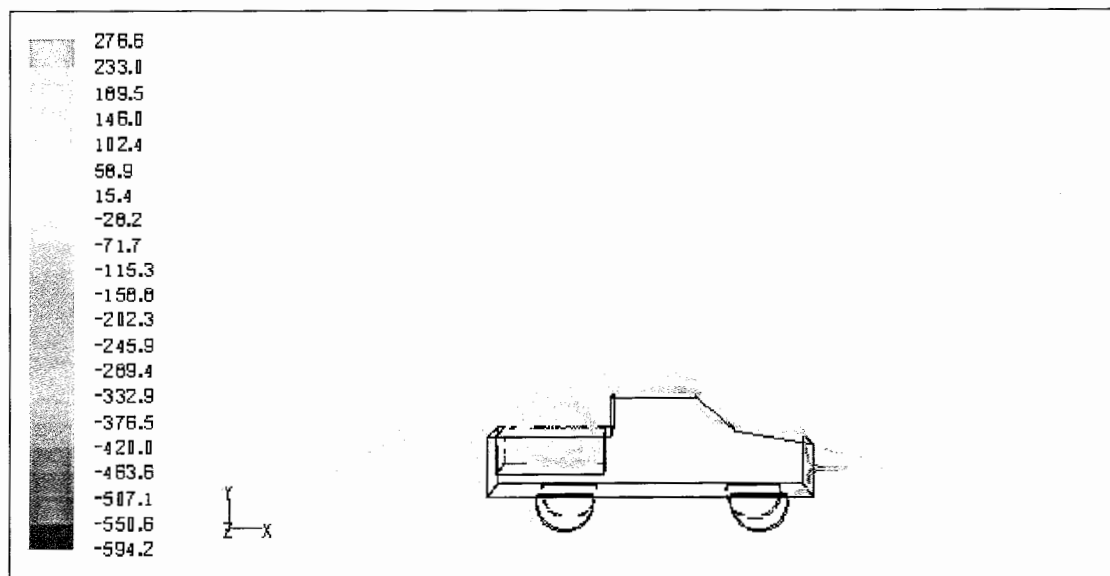
เป็นการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 36-126 km/hr (Reynolds number  $12 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณีคือ เปิดท้ายกระบะปกติ (Normal pick-up box), เปิดฝาท้ายกระบะ (Tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (Tailgate off), ปิดท้ายกระบะ (Covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (Slope rear box), และครอบท้ายกระบะแบบตรง (Van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์ดังรูปที่ 6.2



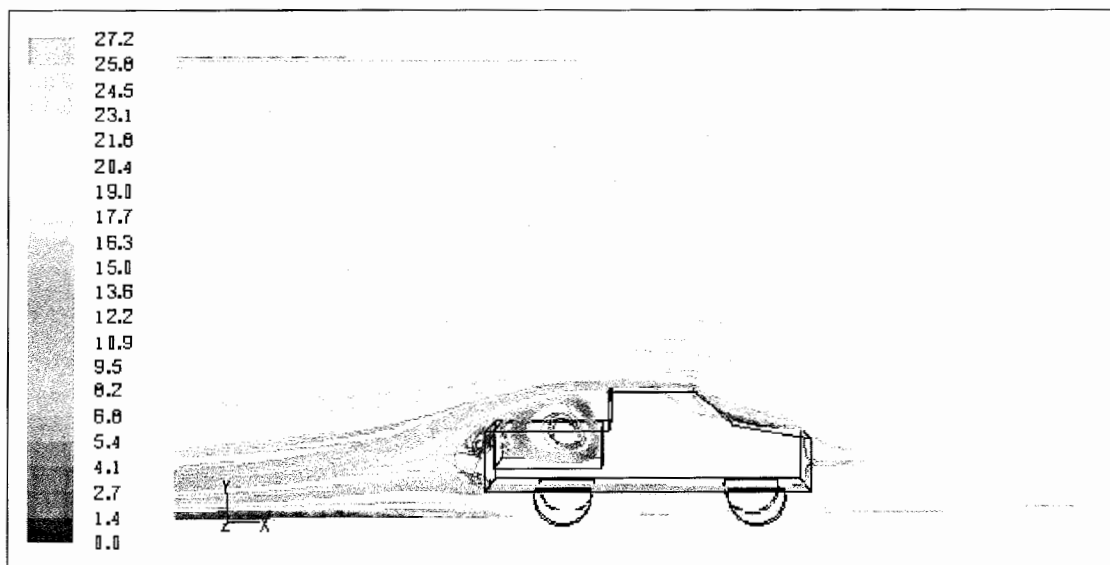
รูปที่ 6.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการเปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงท้ายกระบะกรณีต่าง ๆ

### 6.1.2 การกระจายตัวของความเร็วและความดัน

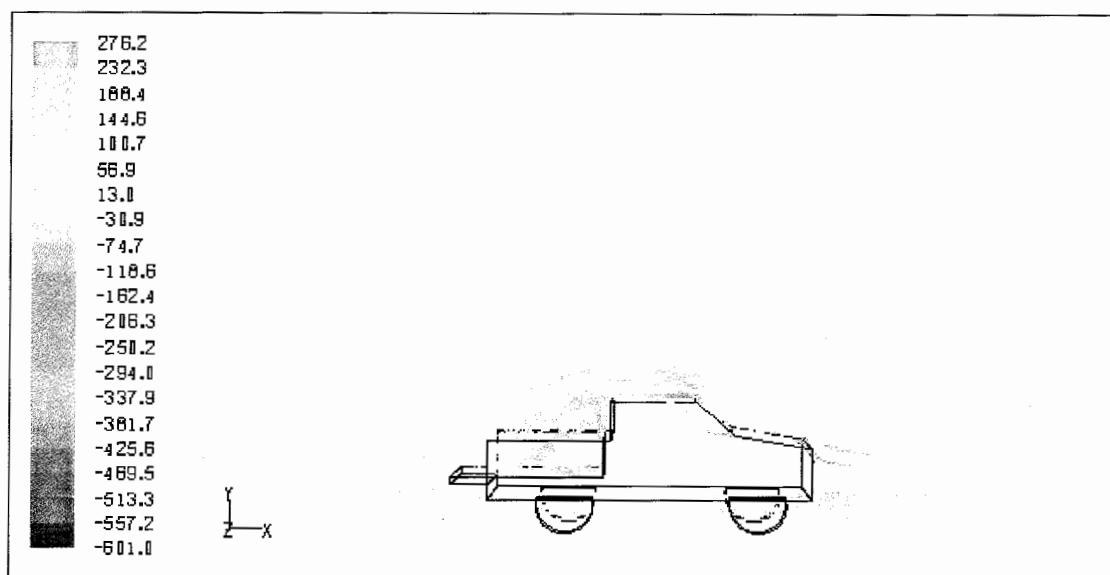
จากรูปที่ 6.2 นั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้า และด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการปรับปรุงกระบะของรถโดยที่ทำการไหลราบเรียบมากขึ้น จะช่วยให้แรงต้านลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นระดับแถบสีของความเร็ว และความดัน



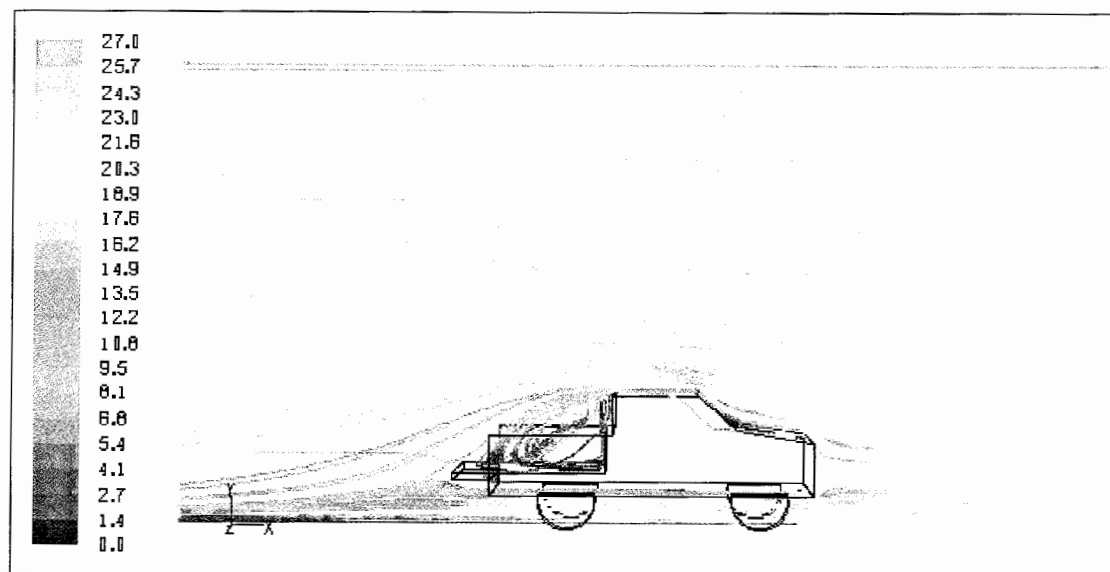
รูปที่ 6.3 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



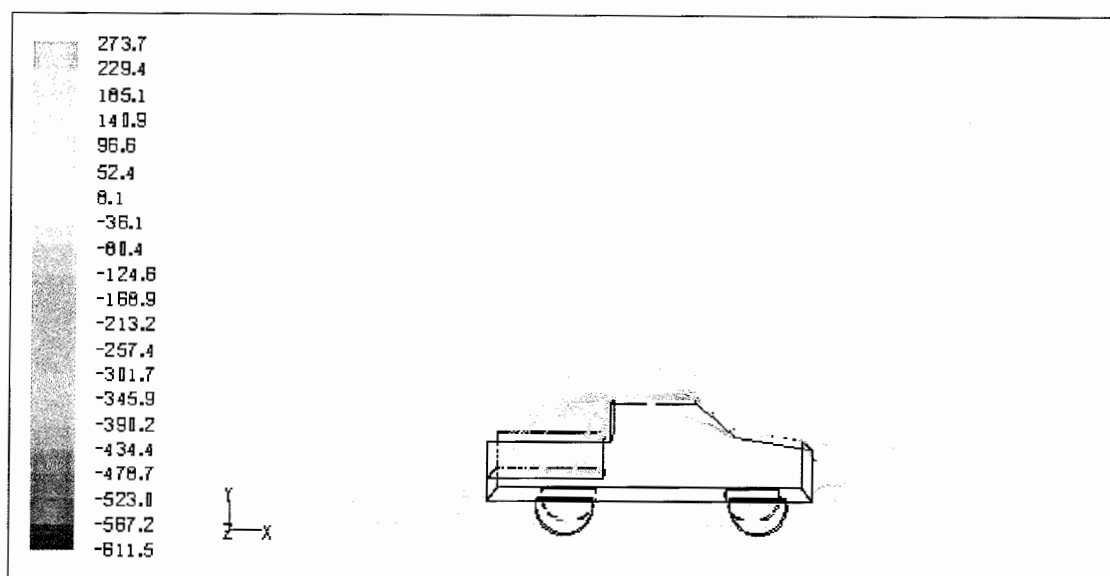
รูปที่ 6.4 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 1 เปิดท้ายกระบะปกติ



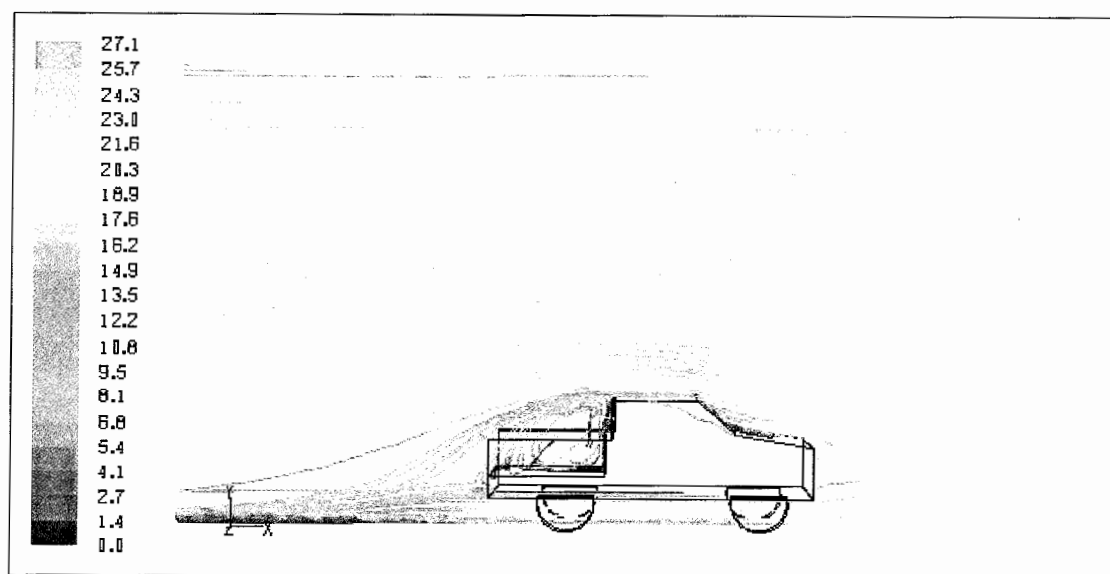
รูปที่ 6.5 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ



รูปที่ 6.6 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 2 เปิดฝาท้ายกระบะ

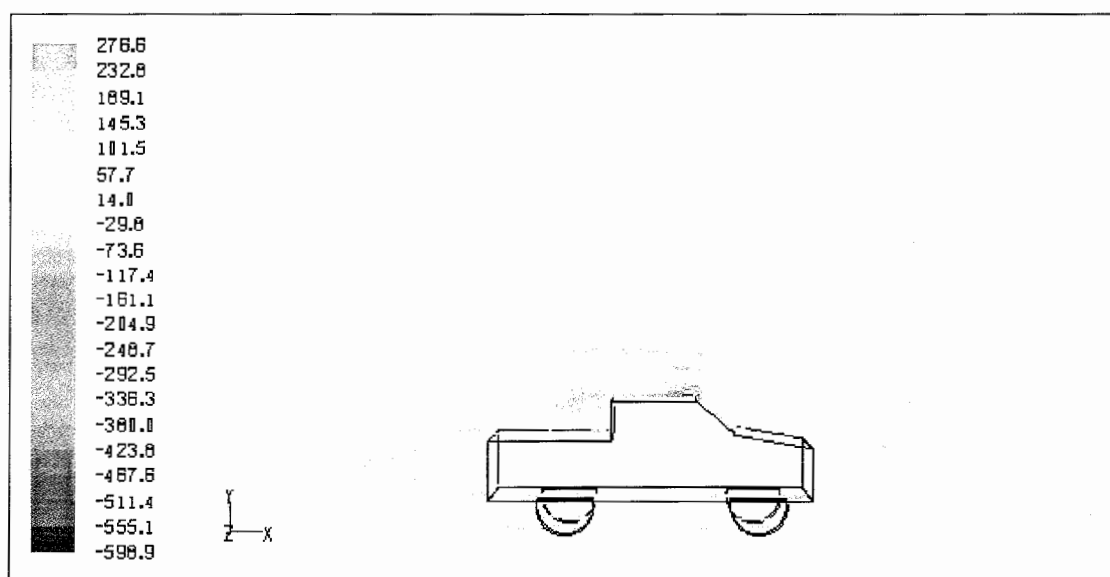


รูปที่ 6.7 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ

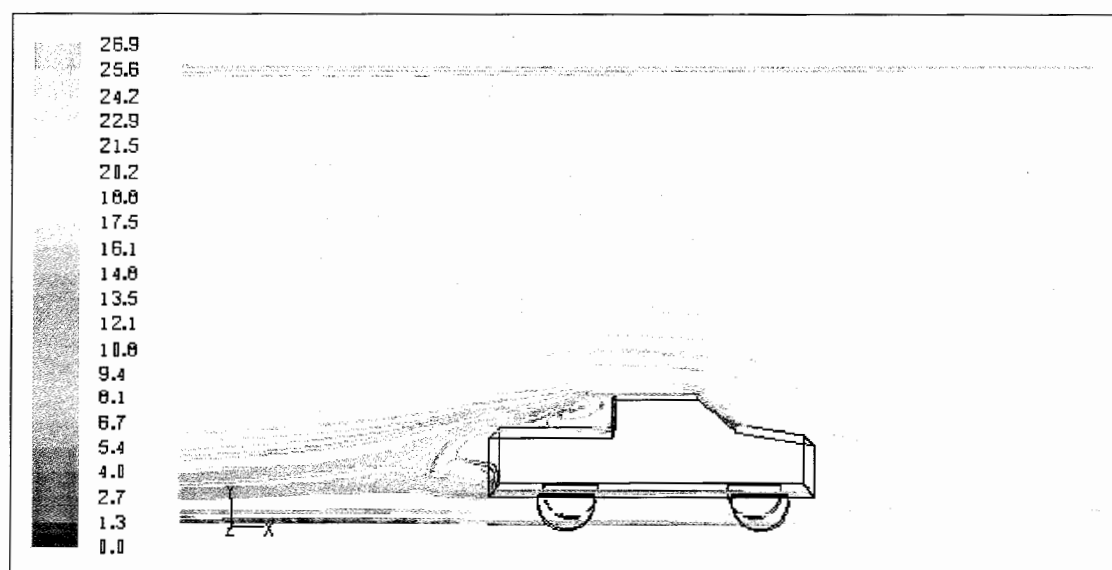


รูปที่ 6.8 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ

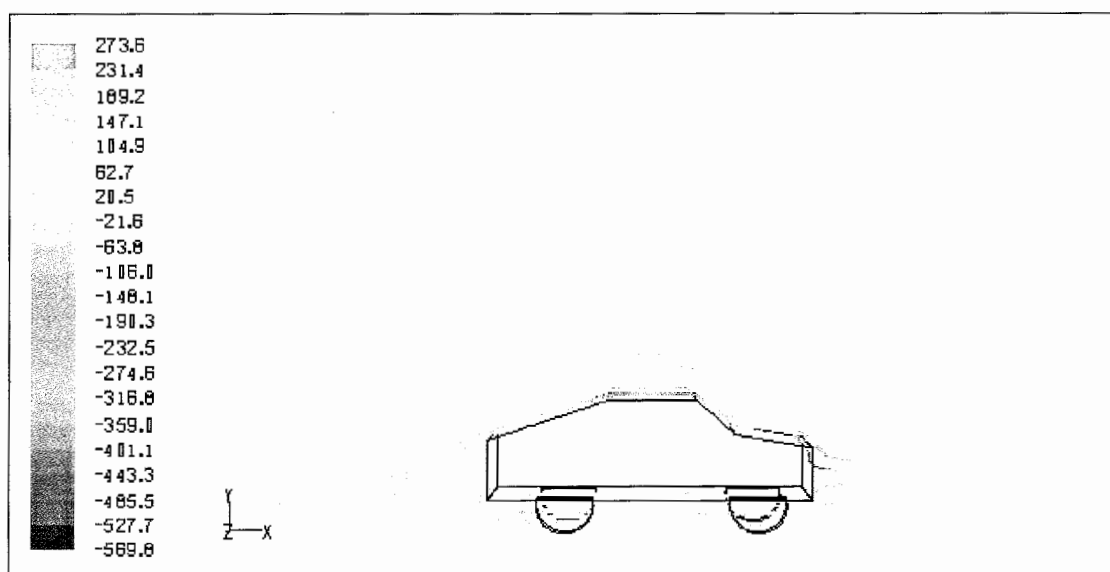




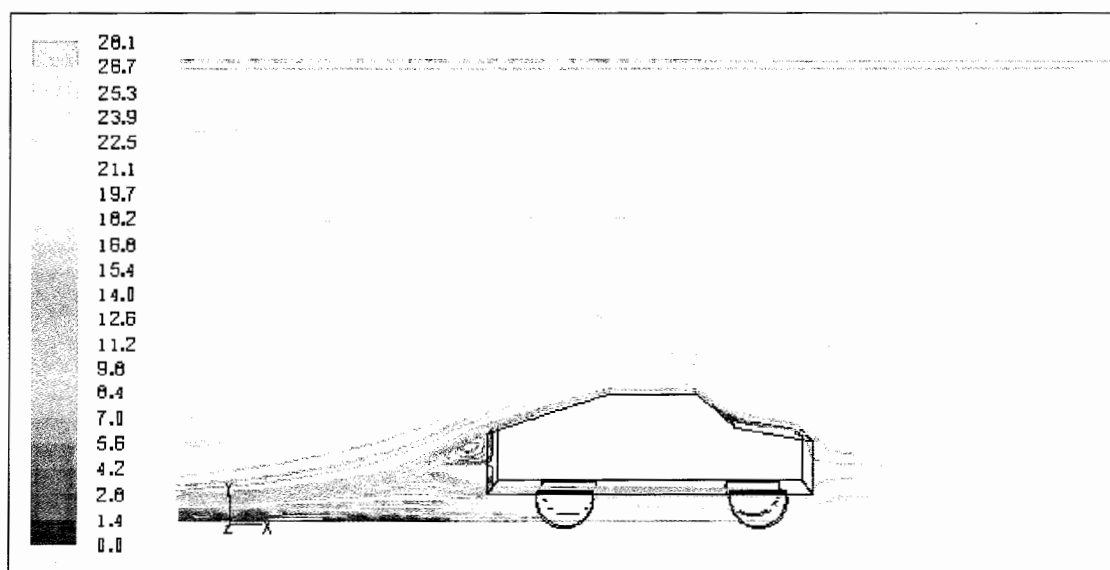
รูปที่ 6.9 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



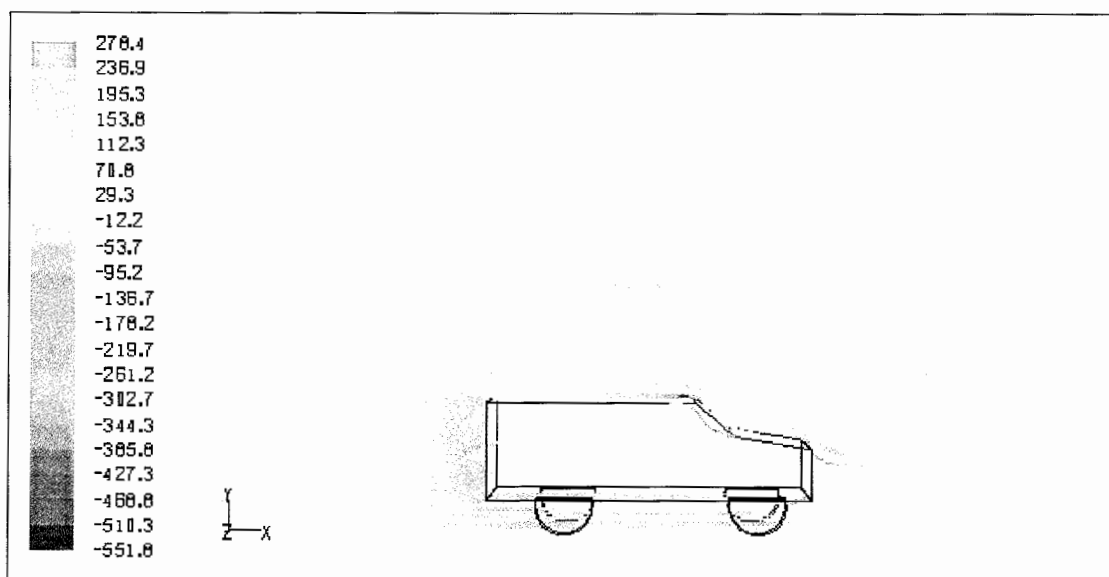
รูปที่ 6.10 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 4 ปิดท้ายกระบะ



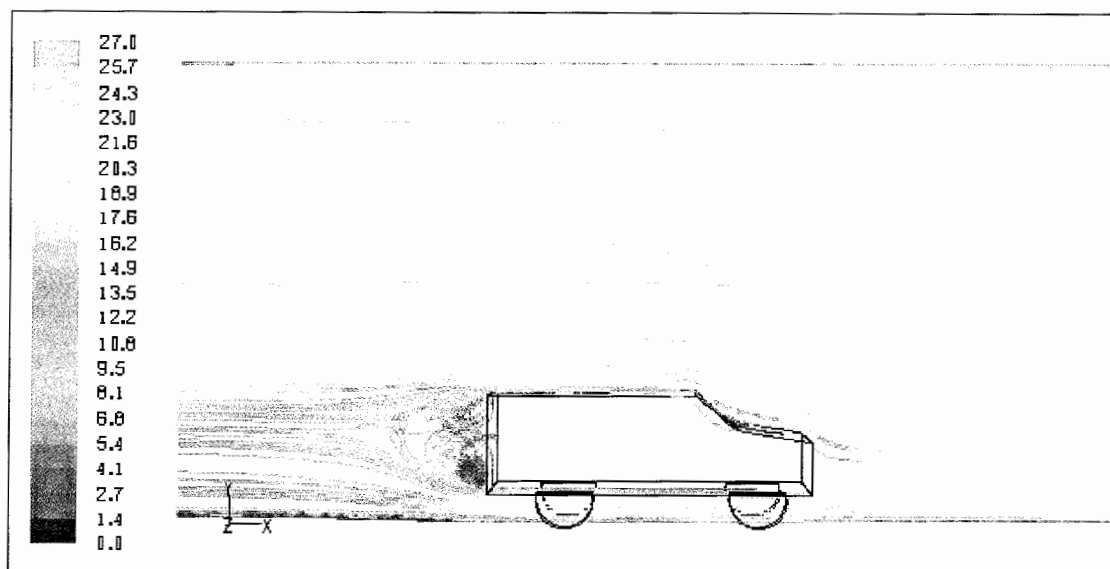
รูปที่ 6.11 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 5 รอบท้ายกระบะแบบเฉียง



รูปที่ 6.12 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 5 รอบท้ายกระบะแบบเฉียง



รูปที่ 6.13 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณี 6 รอบทำยกระเบแบบตรง



รูปที่ 6.14 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณี 6 รอบทำยกระเบแบบตรง

### 6.1.3 วิเคราะห์ผลการกระจายความดัน กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือ เพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันในด้านท้ายของรถ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

$$F_D = \int_{front} p \cos \theta dA - \int_{back} p \cos \theta dA \quad (6.1)$$

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดท้ายกระบะปกติ นั้น ขนาดของแรงต้านนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระบะ และ 3 บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดัน ส่วนบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจากโมเมนตัม ของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระบะ ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 6.3 และ 6.4 (1 เปิดท้ายกระบะปกติ) ที่ตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารกับบริเวณกระบะ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (Separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบป่วนป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (Wake) ซึ่งก็คือการเกิด การสูญเสีย (Loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระบะท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เกิดจากการไหลของอากาศชั้นนอกมีความเร็วกว่าการไหลของชั้นใน เพราะอากาศที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (Viscosity,  $\mu$ ) เกิดแรงเฉือนต้านการไหลช้าลงและความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นใน มีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูงได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระบะลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอก ส่งถ่ายเข้าสู่ยานภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและด้านหลัง มีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของอากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระบะ ดังนั้นแรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้านที่สูงขึ้น ดังสมการที่ (6.1)

กรณีที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีลักษณะเปิดฝาท้ายกระบะนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านมีการลดลงน้อยมาก โดยใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ 1 แต่ในกรณีที่ 2 การปะทะของอากาศกับฝาท้ายกระบะจะลดลง เนื่องจากเปลี่ยนแนวการติดตั้งฝาท้ายกระบะไปทิศทางขนานกับการไหล ซึ่งเปรียบเสมือนกันยกกระดานของพื้นท้ายรถสูงขึ้น โดยจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน (แรงกดเพิ่มขึ้น) แต่จะมีผลกระทบกับการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงยก มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งการยกกระดานพื้นท้ายรถจะมีผลต่อการกระจายตัวความดันที่ผิวบนของรถน้อยมาก แต่ความดันพื้นรถในกรณีที่ 1 จะสูงกว่าใน

กรณีที่ 2 เนื่องจากการเปิดฝาท้ายกระบะบังคับให้เกิดการหักตัวของการไหล ซึ่งต้องใช้โมเมนต์เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงต้านและแรงยกลดลงในระดับหนึ่ง

กรณีที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงจาก 2 กรณีข้างต้น เนื่องจากการปิดท้ายอากาศกับฝาท้ายกระบะ และลดความแตกต่างของแรงดันด้านล่างพื้นรถ กับบริเวณส่วนบนของท้ายกระบะ จึงทำให้แรงดันมีความสมดุลกันเร็วขึ้น ระยะการหมุนวนจึงสั้นลง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงด้วย

กรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยปิดท้ายกระบะรถ ที่มีการลดลงของการหมุนวนของอากาศ เนื่องจากการปิดท้ายของฝาท้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระบะ จนมาถึงบริเวณท้ายกระบะ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1, 2 และ 3

กรณีที่ 5 เป็นกรณีที่ ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น จากรูปร่างท้ายกระบะเป็นลักษณะเปรี๊ยะลม จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและต่ำกว่าทุกกรณีข้างต้น

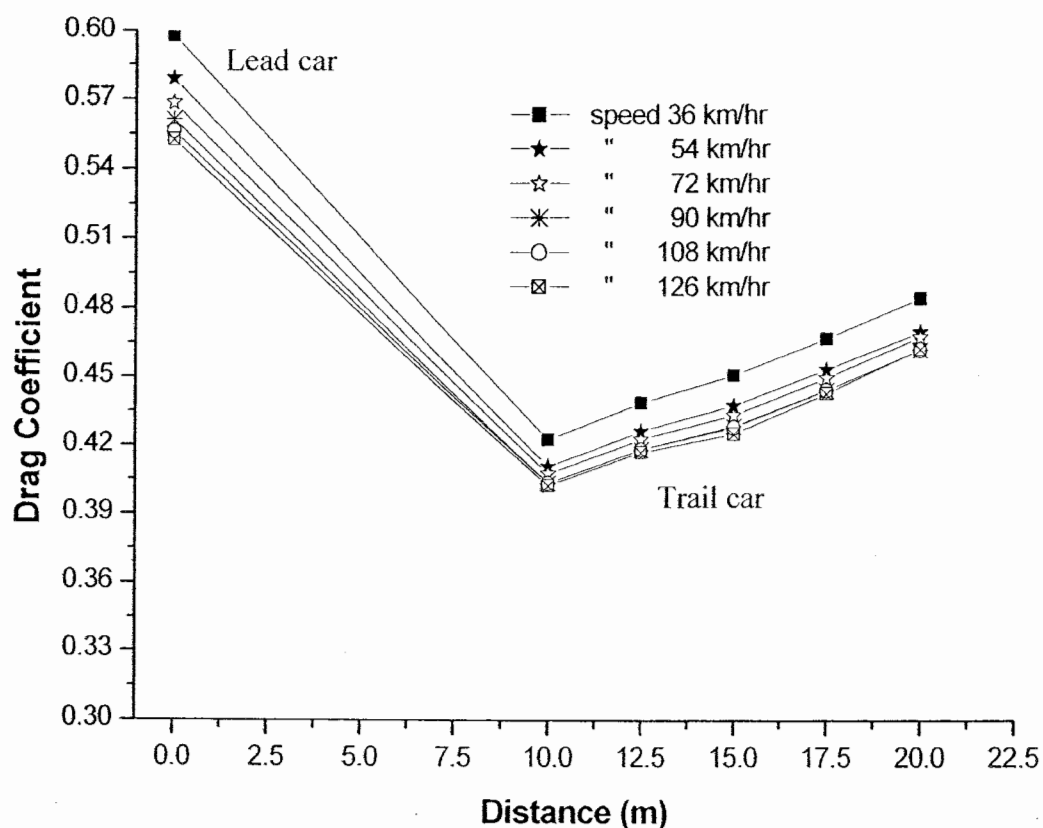
กรณีที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยครอบท้ายของกระบะทั้งหมด ความหนาของบริเวณห้องโดยสารและบริเวณกระบะจะเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและล่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมตัดตรง ซึ่งเป็นรูปทรงด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical after body geometry) โดยจากรูป พบว่ารูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างฉับพลัน มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี

## 6.2 กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกัน

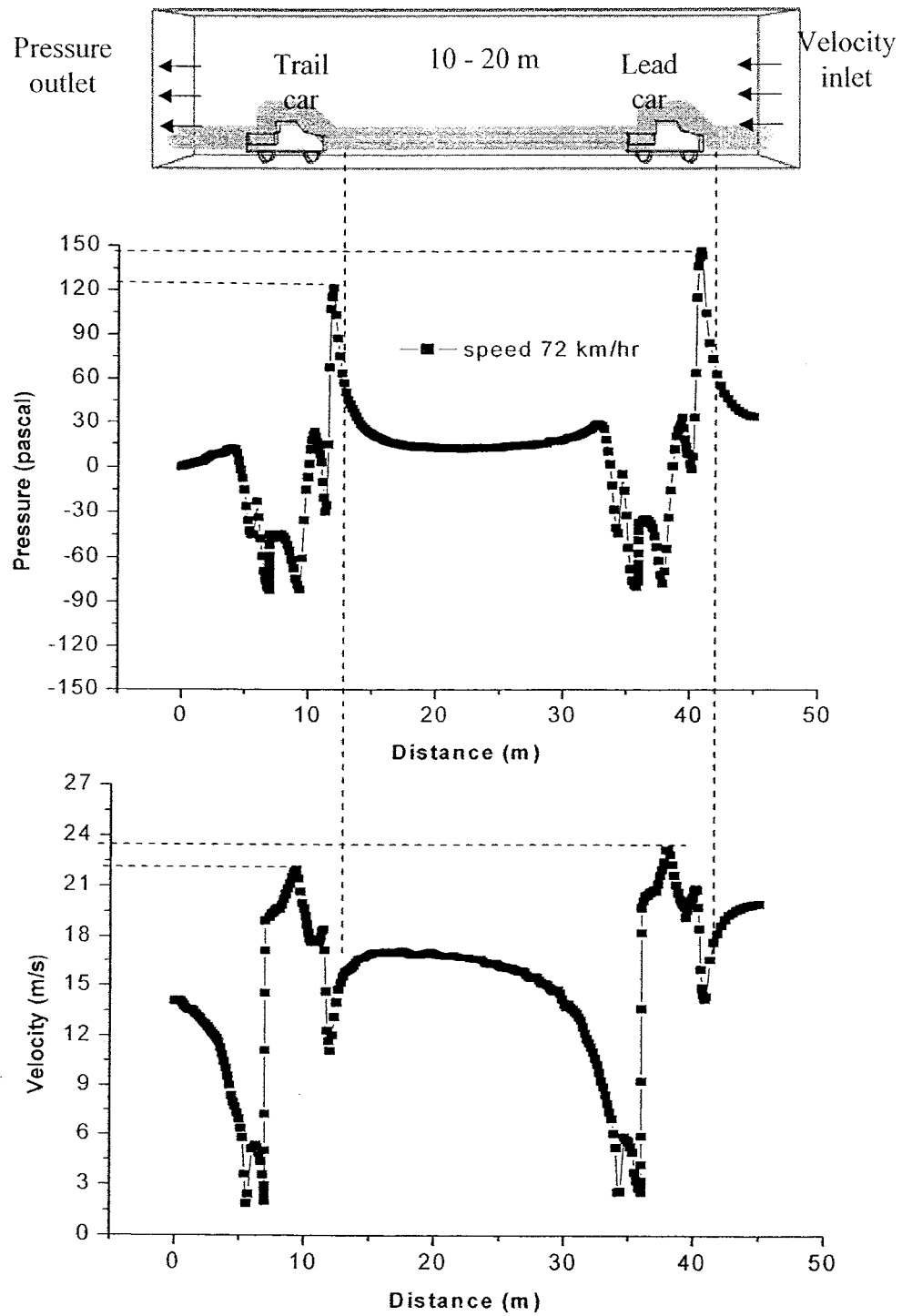
เป็นการจำลองรถขนาดจริง เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยรถทั้งสองคันอยู่ห่างกันตามแนวยาว (แนวแกน x) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 m ทดสอบที่ความเร็ว 36, 54, 72, 90, 108, และ 126 km/hr (Reynolds number  $12 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน โดยได้ขยายขนาดความกว้าง และความสูง ของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้ทดสอบ โดยใช้ กริด 750,000 cell ที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) ขนาดพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$

### 6.2.1 การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกัน

จากผลการทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังมีค่าลดลงน้อยกว่าคันทันหน้าดังแสดง ดังรูปที่ 6.15 เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถทั้งสองคัน โดยคันทันหน้าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วหรือ Reynolds number โดยเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Reynolds number ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างของรถคันหลัง ส่วนรถคันหลังค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงจากรถคันทันหน้า และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะห่างที่ลดลง



รูปที่ 6.15 สัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีรถวิ่งตามกัน



รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนแปลงของความเร็ว และความดันที่เกิดขึ้นกับรถคันหน้า (Lead car) และคันหลัง (Trail car) ตามแนวแกน X

### 6.2.2 การสูญเสียเฮด (Head loss) จากการปะทะ

จากรูปที่ 6.16 เป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงความดันและความเร็วกระทำกับรถคันหน้า โดยการวางตำแหน่งความดันที่กึ่งกลางรถตามแนวแกน X ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กระทำกับรถคันหลัง เพราะอากาศเมื่อปะทะกับด้านหน้าของรถคันหน้าความเร็วจะลดลง เพราะเข้าใกล้จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) ซึ่งจะมีความดันมากกว่าความดันก่อนที่จะเริ่มเข้าปะทะกับด้านหน้ารถ หรือ ความดันในระบบ (Total pressure) และจะลดต่ำลงบริเวณท้ายกระบะเนื่องจากความเร็วลดลง ซึ่งทำให้ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics pressure) ลดลงด้วย ดังนั้นพลังงานจะมีค่าลดลง เพราะ รถคันหน้าจะดูดซับพลังงานที่เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure head) และเฮดความเร็ว (velocity head) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎสมดุลพลังงาน สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

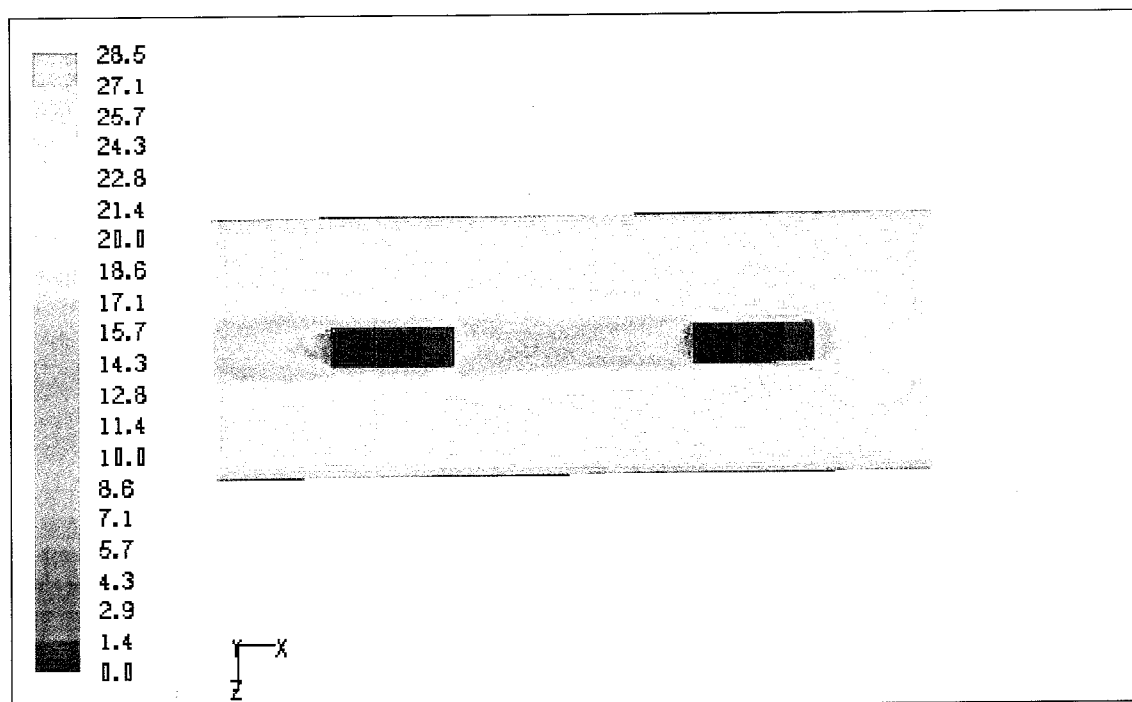
$$\left( \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right)_{Lead\_car} = \left( \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)_{Trail\_car} + h_L \quad (6.2)$$

$h_L$  คือการสูญเสียเฮดรวม (Head loss) แทนการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล,  $p_1$  คือความดันที่รถคันหน้า,  $p_2$  คือความดันที่รถคันหลัง,  $v_1$  คือความเร็วที่รถด้านหน้า,  $v_2$  คือความเร็วที่รถด้านหลัง,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ เท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  คืออัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ซึ่งค่า  $p_1 > p_2$  และ  $v_1 > v_2$  เสมอ

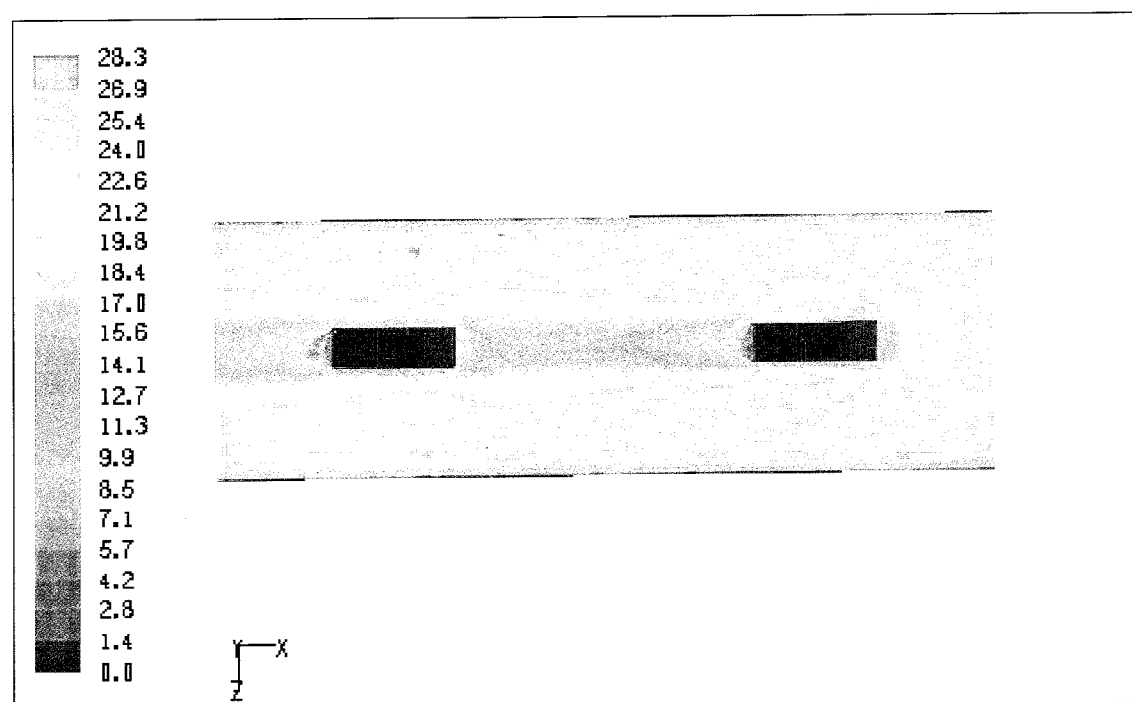
### 6.2.3 วิเคราะห์ความเร็วที่ลดลงของรถคันหลัง

ค่าความเร็วที่เกิดขึ้นของรถคันหน้าและคันหลังมีความแตกต่างกัน สังเกตจากระดับแถบสีบริเวณด้านหน้าของรถ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าโมเมนตัมที่อากาศกระทำกับรถคันหน้า และ คันหลังนั้นมีค่าแตกต่างกัน จากรูปที่ 6.17 ที่ระยะห่างระหว่างรถ 10 m ความเร็วที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของรถคันหลังจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจะเริ่มสูงขึ้นเมื่อเริ่มเข้าสู่ช่วงล่างของรถเนื่องจากอากาศสามารถไหลผ่านช่วงล่างของรถ แต่เมื่อระยะห่างของรถเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วบริเวณนี้ก็จะสูงขึ้น แสดงว่ารถคันหลังได้รับโมเมนตัมสูงด้วยเช่นเดียวกัน และค่าความดันก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นที่ระยะห่าง 10 m จึงเป็นระยะห่างที่ได้รับโมเมนตัมน้อยที่สุด จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงมากที่สุดด้วย

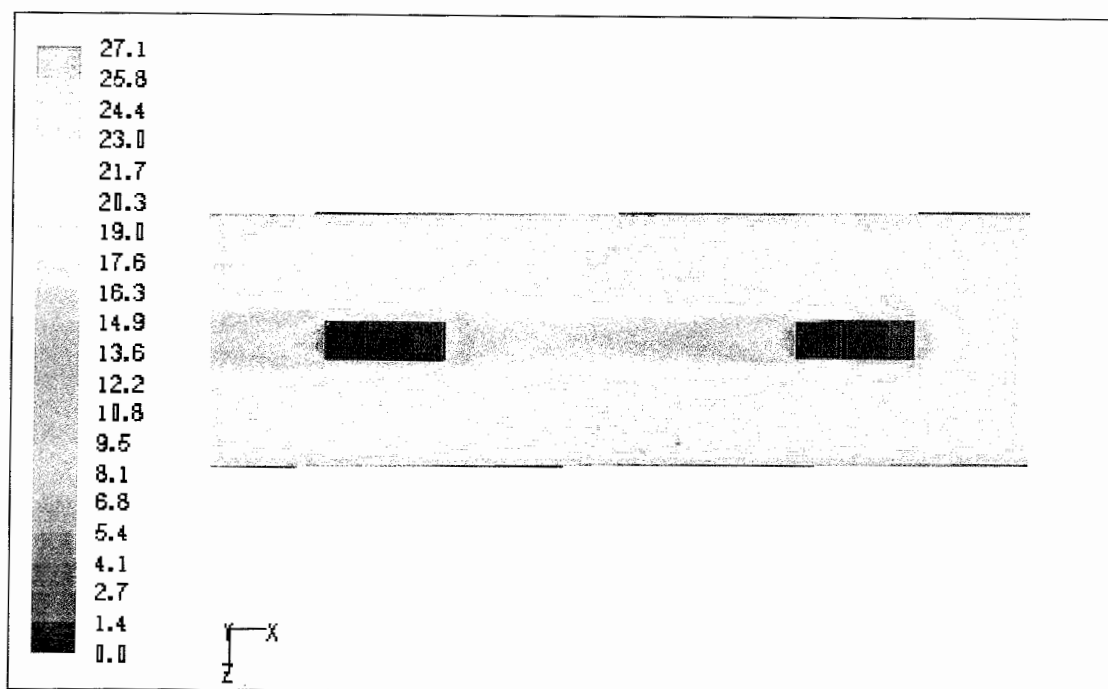




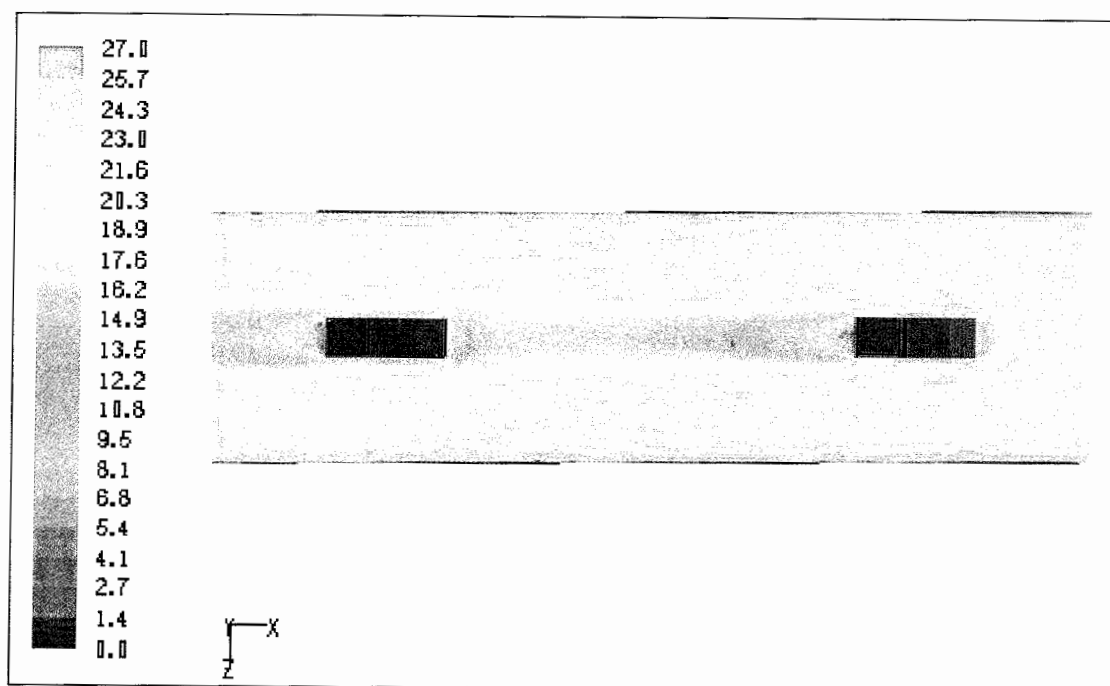
รูปที่ 6.17 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 10.0 m



รูปที่ 6.18 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 12.5 m

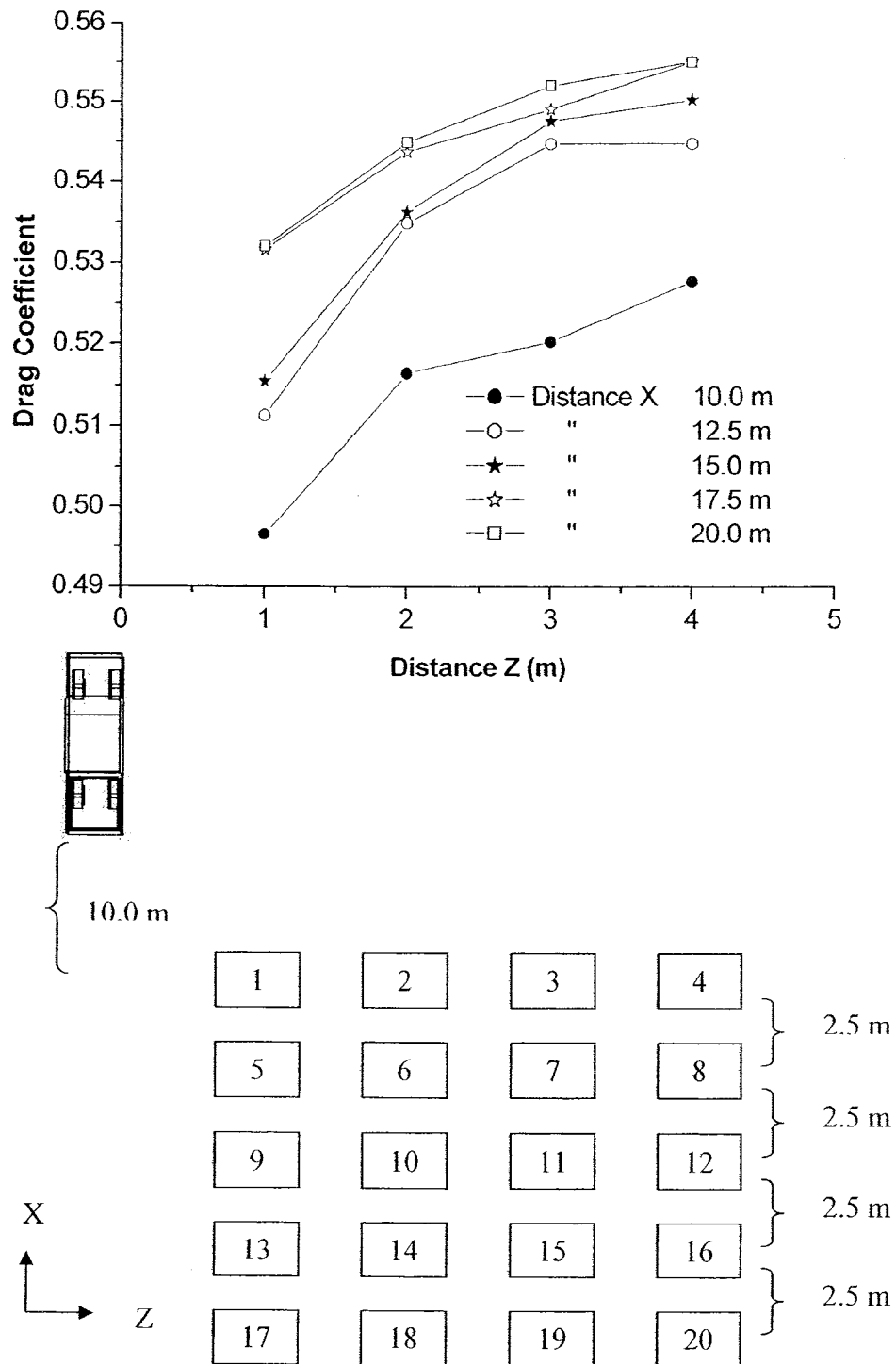


รูปที่ 6.19 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 15.0 m



รูปที่ 6.20 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ของรถคันหลังที่ระยะห่าง 17.5

### 6.3 กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งเยื้องกัน

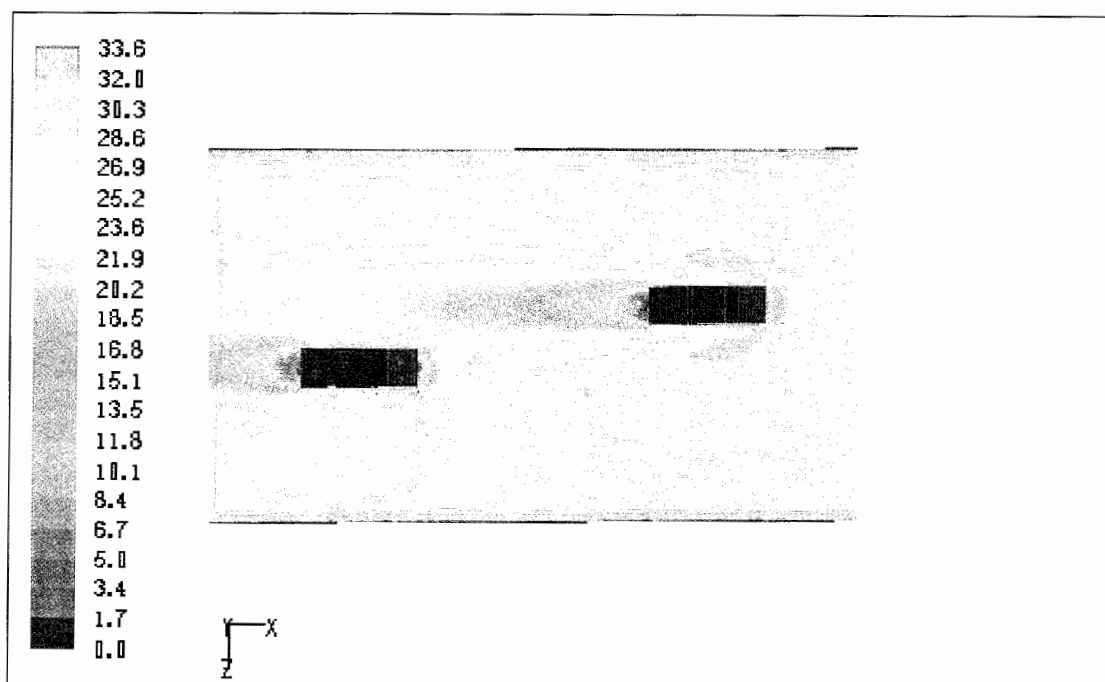


รูปที่ 6.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ความเร็ว 90 km/hr

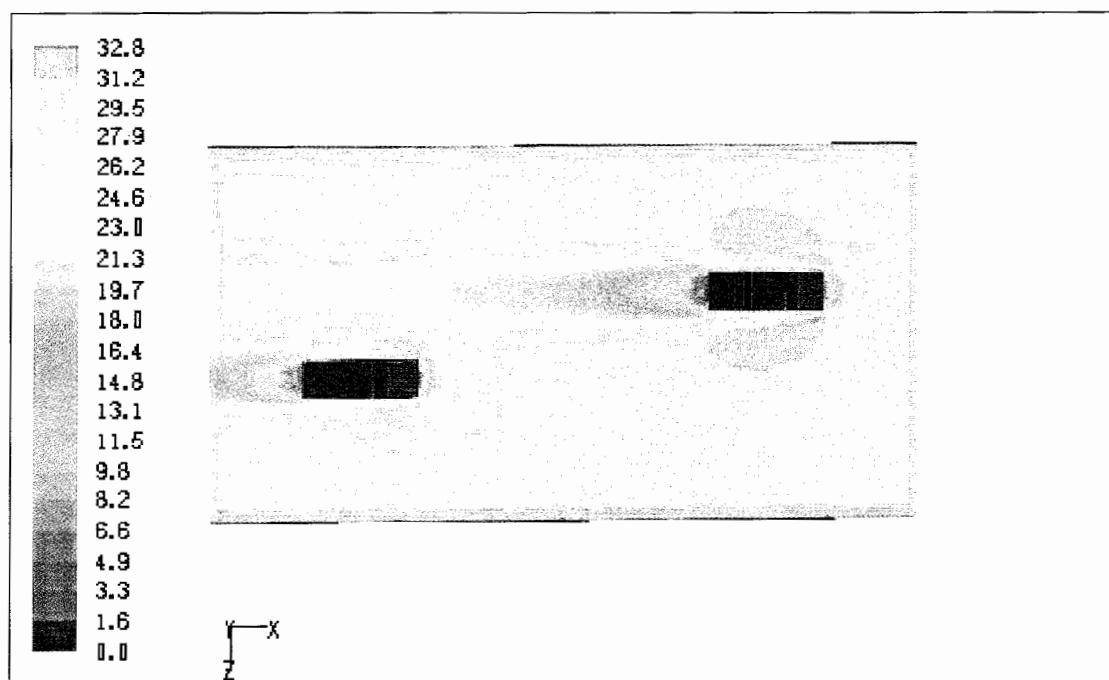
เป็นการจำลองรถขนาดจริง เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง โดยที่รถทั้งสองอยู่ห่างกันตามแนวยาว (Distance X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, และ 20 m และห่างกันตามแนวขวาง (Distance Z) 1, 2, 3, และ 4 m ซึ่งแต่ละตำแหน่งของรถคันหลังที่ทำการทดสอบจะเรียงลำดับเป็นหมายเลข 1-20 ทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน และเงื่อนไขขอบเขตในการจำลองเหมือนกรณีรถวิ่งตามกันตามแนวยาว ดังรูปที่ 6.21 ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านตามระยะห่างของรถตามแนวแกน X และแกน Z

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังจะลดลงจากคันหน้า เนื่องรถคันหลังวิ่งเข้าใกล้สนามการไหลแบบปั่นป่วน ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถคันหน้า ซึ่งมีเสถียรความดัน และเสถียรความเร็วที่ลดลง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังลดลงด้วย และเมื่อรถคันหลังอยู่ระยะห่างออกไปตามแนวแกน X และแกน Z ค่าเสถียรความดัน และเสถียรความเร็วที่รถคันหลังได้รับจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงเพิ่มขึ้นตามระยะที่รถคันหลังอยู่ห่างออกไปทั้งตามแนวแกน X และแกน Z แต่จะมีค่าต่ำกว่ารถคันหน้า

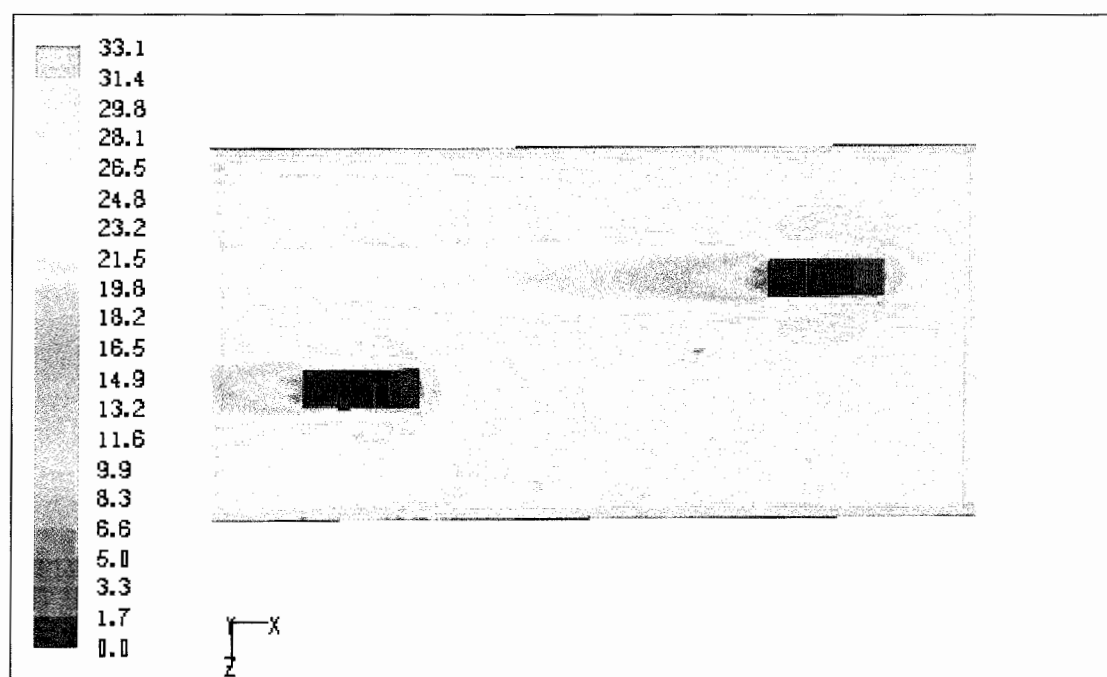
โดยมักพบกรณีแบบนี้เช่น จักรหะรถวิ่งแข่งกัน หรือจักรหะรถวิ่งแยกกันบนถนนทางด่วน ซึ่งแรงต้านก็จะเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง และความเร็วในการวิ่ง ซึ่งจากรูปที่ 6.22 แสดงกระแสการไหลที่แตกต่างกัน ตามตำแหน่งของรถทั้งสองคัน



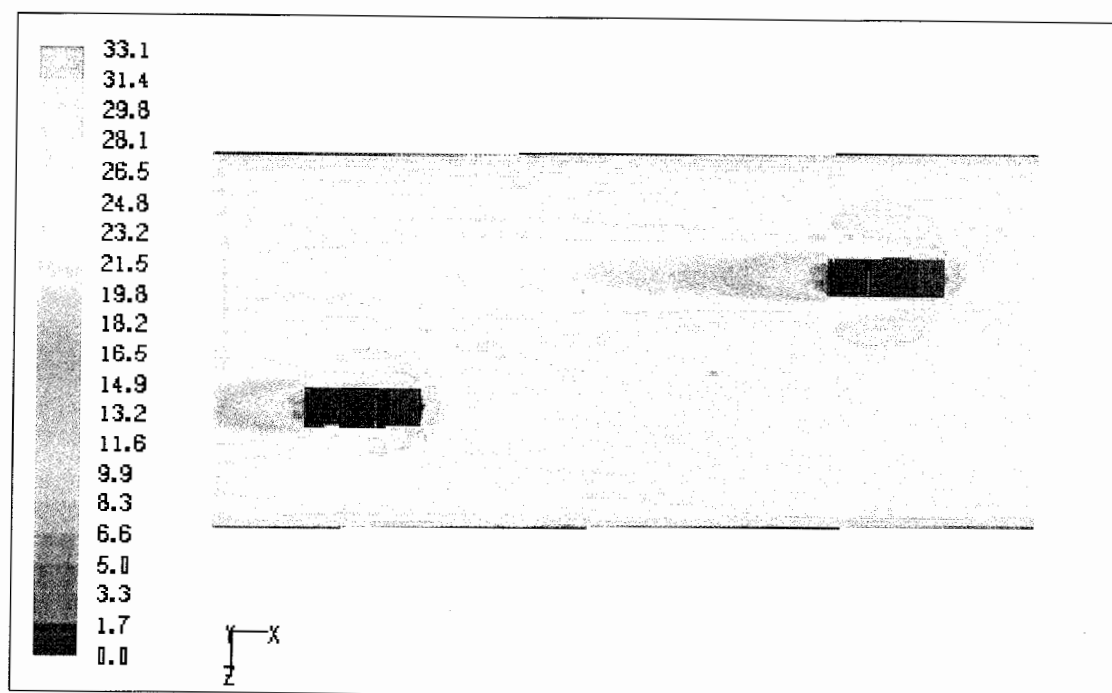
รูปที่ 6.22 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X10, Z1



รูปที่ 6.23 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X12.5, Z2



รูปที่ 6.24 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X15, Z3



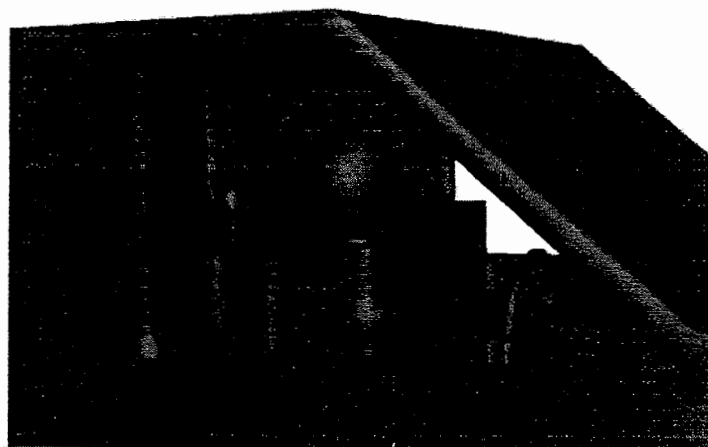
รูปที่ 6.25 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะ X17.5, Z4

#### 6.4 กรณีอื่น ๆ

เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีการใช้อุปกรณ์เสริม คือกรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Upper box) กรณีติดหลังคาส่วนท้ายกระบะ (Roof pick-up box) และกรณีเปิดกระจกด้านข้างรถ (Open windshield) 100 % 1 ด้าน และ 2 ด้าน ซึ่งทดสอบที่ความเร็วทดสอบที่ความเร็ว 36-126 km/hr (Reynolds number  $1.2 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ )

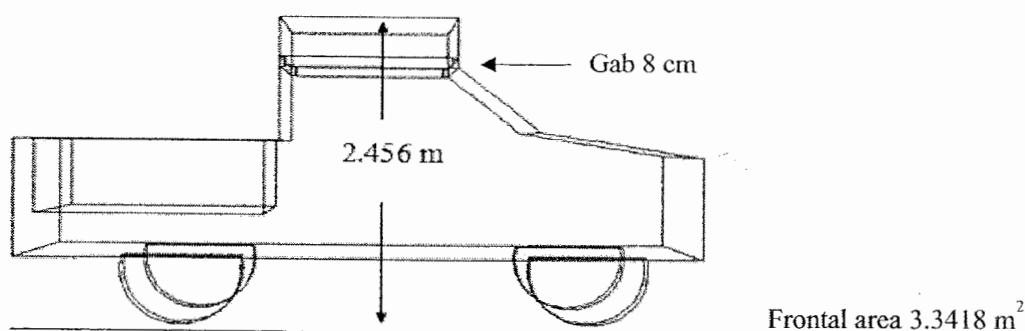
##### 6.4.1 ลักษณะเฉพาะของรูปร่างที่ใช้ในการทดสอบ

ในกรณีของติดหลังคาส่วนท้ายกระบะนั้น เป็นกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมด้านหลัง ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรถจะเท่ากับกรณีอื่นที่มีการทดสอบก่อนหน้านี้ โดยพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$  เช่นเดียวกับกับกรณีเปิดกระจกด้านข้างรถ แต่ในกรณีนี้จะมีที่ว่างภายในห้องผู้โดยสาร และจะมีส่วนประกอบภายในเช่น คนขับ ที่นั่งด้านหน้า ด้านหลัง พวงมาลัย เป็นต้น เพื่อความสมจริงในการทดสอบการไหล และสังเกตการณ์หมุนวนของอากาศภายในรถ ดังรูปที่ 6.26



รูปที่ 6.26 รูปลักษณะภายในห้องผู้โดยสาร

แต่ในการทดสอบกรณีมีที่ว่างของบนห้องผู้โดยสารนั้น จะเป็นอุปกรณ์ที่ยื่นออกจากส่วนบนของตัวรถ ซึ่งจะทำให้พื้นที่หน้าตัดแตกต่างจากกรณีอื่น ๆ โดยเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $3.3418 \text{ m}^2$  ดังรูปที่ 6.27 ซึ่งที่ว่างของจะมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมอยู่เหนือห้องผู้โดยสาร โดยจะมีช่องว่างระหว่างชิ้นส่วน (Gab) 8 cm ซึ่งเป็นพื้นที่ว่างโดยที่อากาศสามารถไหลผ่านได้

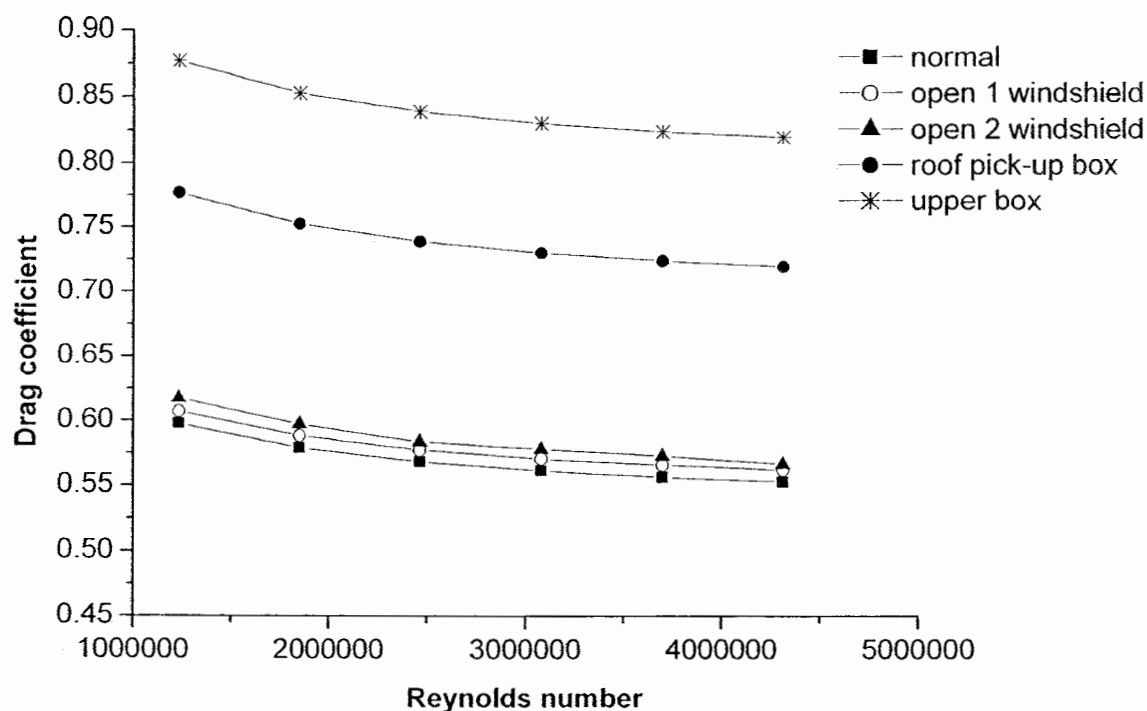


รูปที่ 6.27 กรณีมีที่ว่างของบนห้องผู้โดยสาร

#### 6.4.2 สัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบของกรณีต่าง ๆ

เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับกรณีปกติ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลง ตามค่า Reynolds number ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม และกรณีเปิดกระจกรถ จะให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่สูงกว่ากรณีปกติทุกกรณี ซึ่งกรณีมีที่ว่างของส่วนบนห้องผู้โดยสาร

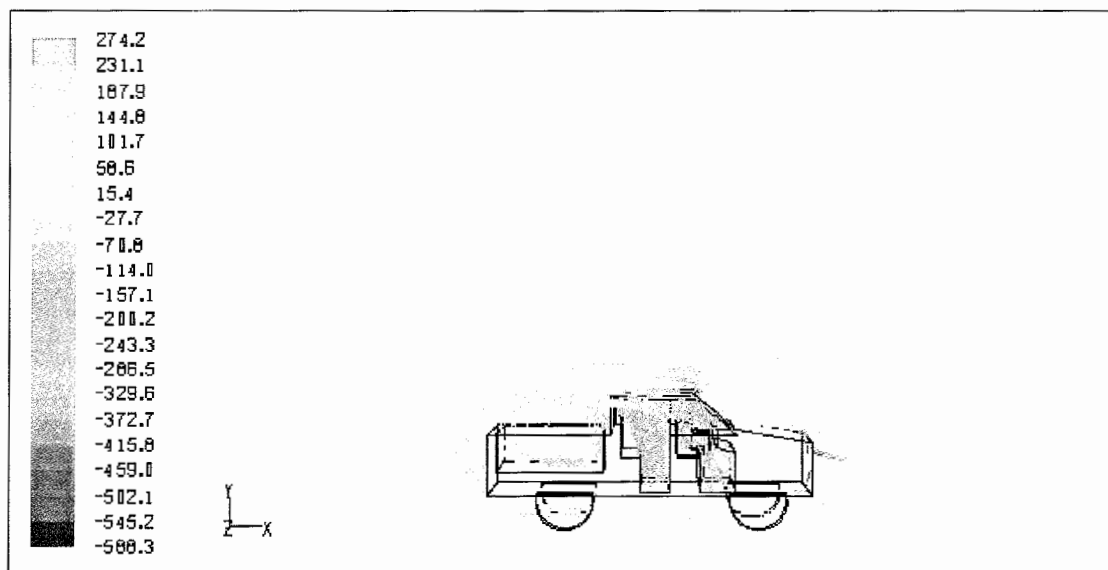
จะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุด และกรณีอื่น ๆ จะลดลงตามรูปที่ 6.28 เนื่องจากอากาศเกิดการปะทะ และเกิดการหมุนวนของอากาศภายในห้องผู้โดยสาร ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสีย ทำให้ลักษณะของการไหลของอากาศที่ไม่สมดุล ในสภาวะความดันที่ไม่คงที่



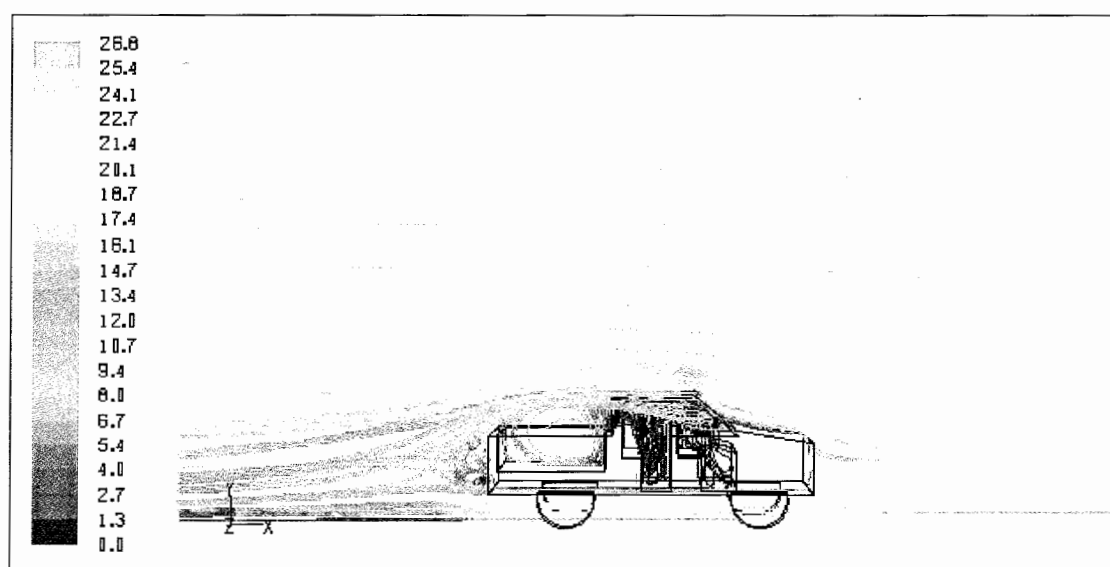
รูปที่ 6.28 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

จากรูปที่ 6.29 - 6.36 เป็นการแสดงระดับแถบสีของความเร็ว และความดันที่เกิดขึ้นจากการจำลองในกรณี เปิดกระจกรถ 1 และ 2 ด้าน, กรณีมีหลังคาท้ายกระบะ และกรณีมีที่วางของบนห้องผู้โดยสาร โดยแต่ละกรณี ความเร็วและความดันที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน โดยระดับสีที่เกิดขึ้นทั้งสองค่า ความเร็วและความดันจะมีระดับสีที่แปรผกผันกัน เนื่องจากพลังงานเสดความดันที่ลดลงจะ เปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานในส่วนของเสดความเร็ว ส่วนในกรณีเปิดกระจกรถนั้น จะมีความแตกต่างจากกรณีอื่นเนื่องจากอากาศสามารถไหลเข้าไปสู่ภายในห้องผู้โดยสาร ทำให้เกิดการหมุนวนภายในห้องผู้โดยสาร แต่จะมีค่าที่ต่ำกว่าด้านนอก เนื่องจากการไหลเข้าไปสู่ห้องโดยสารทำให้เกิดการสูญเสียจากการชนของอากาศ ความเร็วและความดันที่เกิดขึ้นจึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนท้ายกระบะนั้น ทุกกรณีก็ยังคงเกิดการหมุนวน และเกิดการปะทะอากาศกับท้ายกระบะ แต่ในกรณีมีที่วางของบนห้องผู้โดยสาร จะเกิดการหมุนวนของอากาศจากการปะทะที่รุนแรงกว่ากรณีอื่น

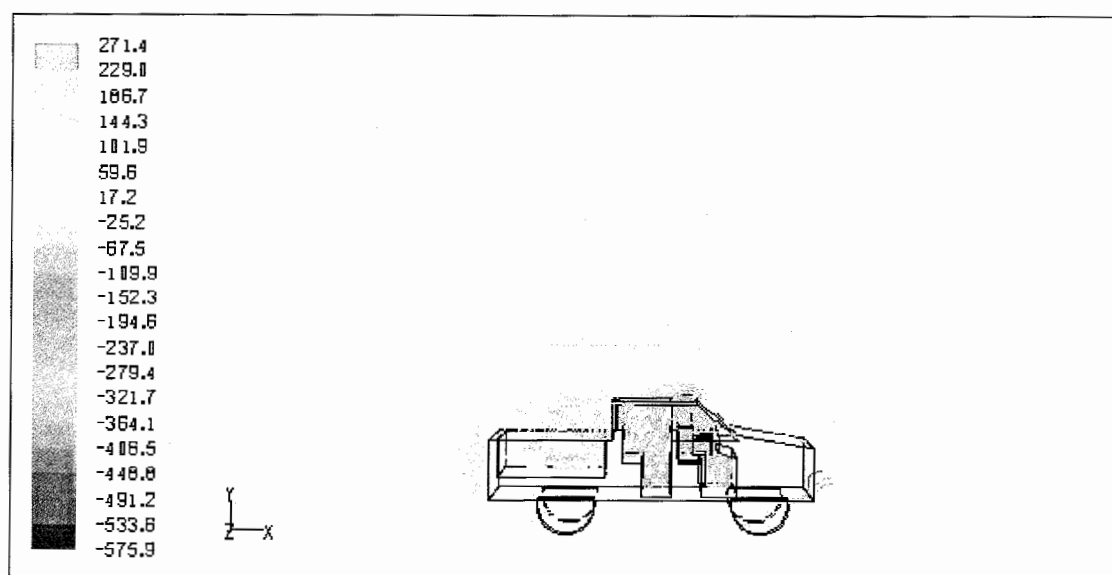




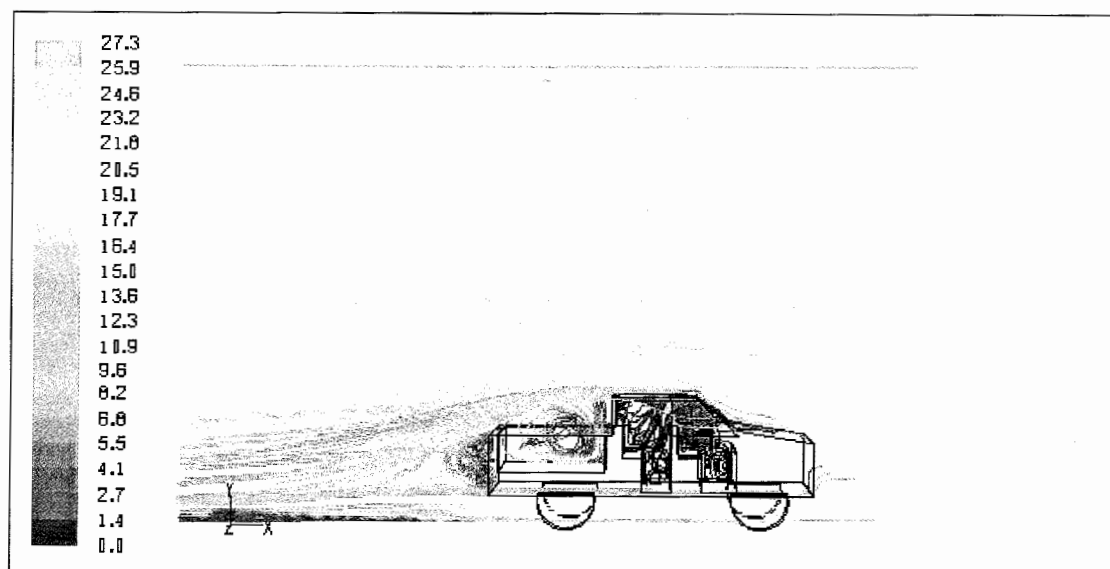
รูปที่ 6.29 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีเปิดกระจก 1 ด้าน



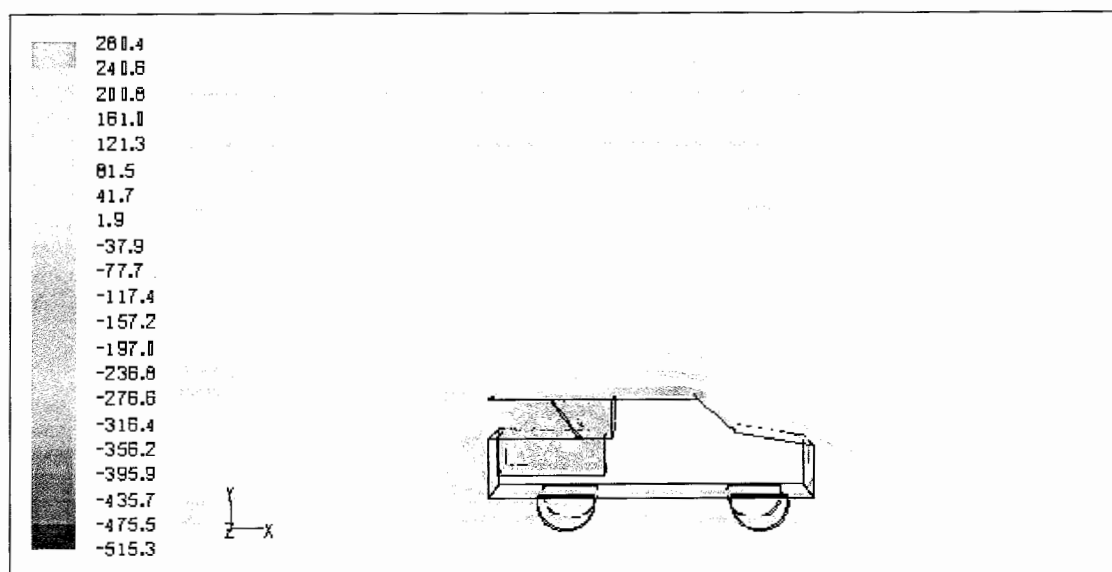
รูปที่ 6.30 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีเปิดกระจก 1 ด้าน



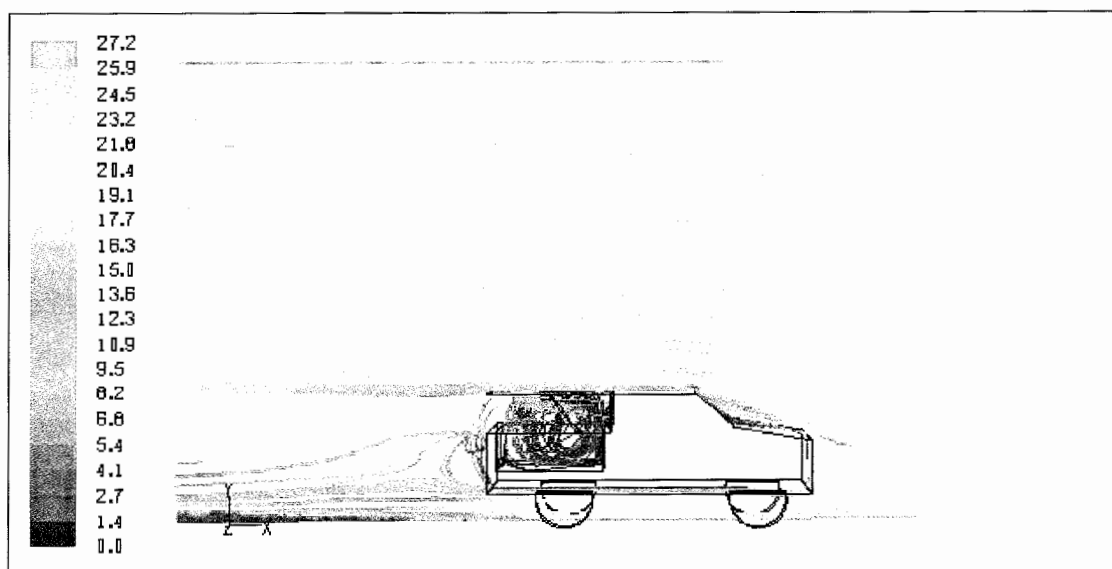
รูปที่ 6.31 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีเปิดกระจก 2 ด้าน



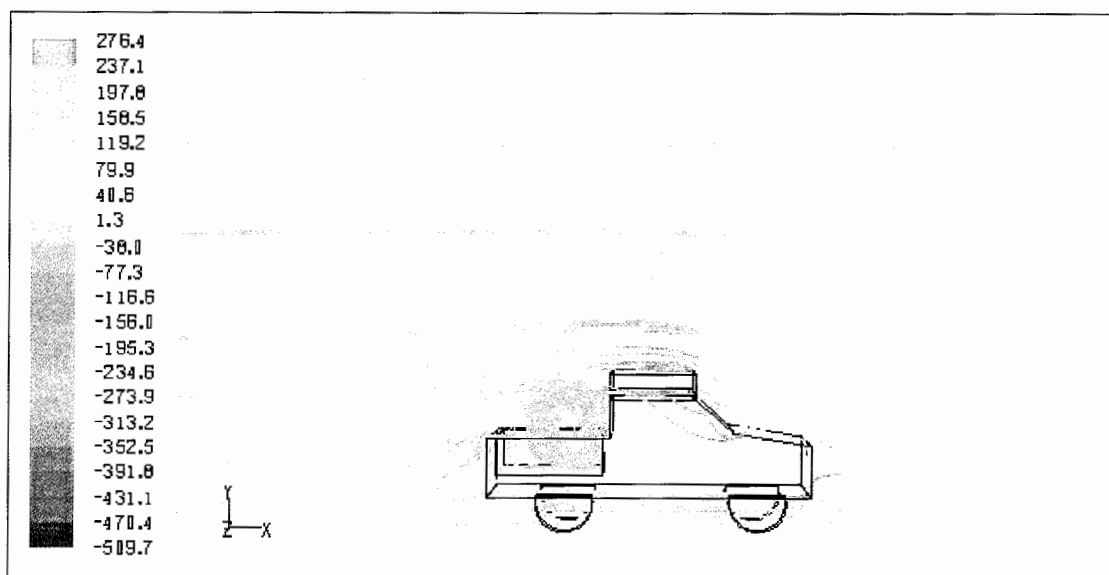
รูปที่ 6.32 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีเปิดกระจก 2 ด้าน



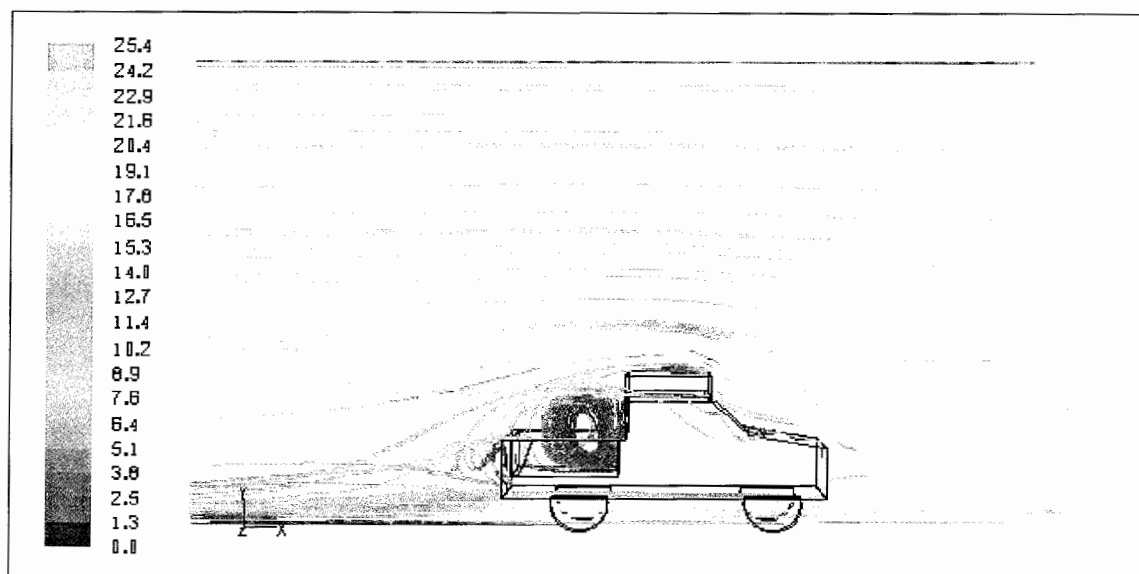
รูปที่ 6.33 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีหลังคาท้ายกระบะ



รูปที่ 6.34 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีหลังคาท้ายกระบะ



รูปที่ 6.35 เส้นระดับแถบสีความดันสถิต (pascal) กรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร



รูปที่ 6.36 เส้นระดับแถบสีความเร็ว (m/s) กรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร

#### 6.4.3 วิเคราะห์ผลการกระจายตัวของความดัน และความเร็ว

จากภาพเส้นกระจายความดัน ลักษณะการไหลของแต่ละกรณีมีความแตกต่างกัน โดยที่กรณีเปิดฝาท้ายปกติที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วว่ารูปทรงของกรณีปกติ ทำให้อากาศที่ไหลผ่านเกิดการแยกตัว และเกิดการปะทะของอากาศที่หมุนวนที่ท้ายกระบะ ซึ่งจะแตกต่างกับกรณี

กรณีเปิดกระโจมด้านข้าง 100 % 1 ด้าน โดยจะทำให้อากาศสามารถไหลเข้าสู่ห้องผู้โดยสาร และเกิดการหมุนวนกระจายทั่วห้องผู้โดยสาร เกิดการปะทะระหว่างอากาศกับผนังอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งตัวคนขับด้วย ทำให้แรงดันสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่เปิดกระโจมด้านข้าง แต่แรงดันจะเพิ่มขึ้นไม่มาก เนื่องจากอากาศสามารถไหลเข้าห้องผู้โดยสารได้เพียงด้านเดียว ทำให้อากาศมีการระบายออกได้น้อย ดังนั้นอากาศที่ผ่านเข้ามาใหม่ก็จะไหลเข้าได้ไม่มาก

กรณีเปิดกระโจมด้านข้าง 100 % 2 ด้าน ลักษณะการไหลจะคล้ายกับการเปิดกระโจม 1 ด้าน แต่ปริมาณของอากาศที่เข้าไปในห้องผู้โดยสารจะสูงกว่า เนื่องจากอากาศสามารถเข้าได้ 2 ช่องทาง และมีการระบายอากาศได้ดีกว่า ความแรงของอากาศที่เข้าปะทะ ส่วนประกอบภายในจะรุนแรงมากขึ้น แรงดันและสัมประสิทธิ์แรงดันที่ได้จากการทดสอบจะสูงกว่า ดังนั้นเมื่อเราขับรถหากเราเปิดกระโจม 2 ด้าน จะมีความรู้สึกการถ่ายเทอากาศได้ดี และอากาศที่ปะทะร่างกายเรา จะแรงกว่าเปิดกระโจม 1 ด้าน

กรณีติดอุปกรณ์เสริมโดยการติดหลังคาท้ายกระบะ ซึ่งจากภาพนั้น อากาศที่ไหลส่วนบนของรถ อากาศส่วนหนึ่งจะไหลข้ามรถเนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลลงในส่วนท้ายกระบะได้ เนื่องจากติดหลังคา ทำให้เกิดการแยกตัวของอากาศกันสูงมาก และอากาศส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปตรงด้านข้าง ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนวนและเกิดการปะทะกับท้ายกระบะ เสดความดัน และเสดความเร็ว ของส่วนหน้าและหลังของรถแตกต่างกันสูง ทำให้อากาศที่ไหลผ่านรถเกิดความสมดุลกันมากขึ้น สัมประสิทธิ์แรงดันจากการทดสอบจึงสูงขึ้น

กรณีมีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร เป็นลักษณะรูปทรงกล่องสี่เหลี่ยมที่วางบนส่วนห้องผู้โดยสาร โดยอากาศที่จะไหลข้ามส่วนบนของรถ จะไปติดที่กล่องสี่เหลี่ยมทำให้เกิดแรงดันสูง และอากาศส่วนหนึ่งจะสามารถไหลออกจากช่องระหว่าง กล่องและส่วนบนของรถ สังเกตจากรูปอากาศที่เข้าปะทะที่วางของแล้วไหลออก จะเป็นแถบระดับสีที่ความดันต่ำมาก เกิดการแยกตัวที่ตำแหน่งด้านหลัง และยังเกิดการปะทะกับท้ายกระบะ ดังนั้นความต่างของความดันจึงมีค่าที่สูง สัมประสิทธิ์แรงดันที่ได้จากการทดสอบในกรณีนี้จึงสูงที่สุด

ตารางที่ 6.3 สรุปกรณีที่ทดสอบ

|                                                                             |                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ (ทดสอบที่ความเร็ว 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126 km/hr) |                                                |
| 1.                                                                          | เปิดท้ายกระบะปกติ                              |
| 2.                                                                          | เปิดฝาท้ายกระบะ                                |
| 3.                                                                          | ไม่มีฝาท้ายกระบะ                               |
| 4.                                                                          | ปิดท้ายกระบะ                                   |
| 5.                                                                          | ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง                          |
| 6.                                                                          | ครอบท้ายกระบะแบบตรง                            |
| กรณีวิ่งตามกัน (ทดสอบที่ความเร็ว 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126 km/hr)        |                                                |
| 1.                                                                          | วิ่งตามกันที่ระยะห่าง 10 m                     |
| 2.                                                                          | วิ่งตามกันที่ระยะห่าง 12.5 m                   |
| 3.                                                                          | วิ่งตามกันที่ระยะห่าง 15 m                     |
| 4.                                                                          | วิ่งตามกันที่ระยะห่าง 17.5 m                   |
| 5.                                                                          | วิ่งตามกันที่ระยะห่าง 20 m                     |
| กรณีวิ่งเยื้องกัน (ทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr)                               |                                                |
| 1.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 10 m ระยะเยื้อง 1 m   |
| 2.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 10 m ระยะเยื้อง 2 m   |
| 3.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 10 m ระยะเยื้อง 3 m   |
| 4.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 10 m ระยะเยื้อง 4 m   |
| 5.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 12.5 m ระยะเยื้อง 1 m |
| 6.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 12.5 m ระยะเยื้อง 2 m |
| 7.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 12.5 m ระยะเยื้อง 3 m |
| 8.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 12.5 m ระยะเยื้อง 4 m |
| 9.                                                                          | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 15 m ระยะเยื้อง 1 m   |
| 10.                                                                         | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 15 m ระยะเยื้อง 2 m   |
| 11.                                                                         | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 15 m ระยะเยื้อง 3 m   |
| 12.                                                                         | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 15 m ระยะเยื้อง 4 m   |
| 13.                                                                         | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 17.5 m ระยะเยื้อง 1 m |
| 14.                                                                         | วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 17.5 m ระยะเยื้อง 2 m |

ตารางที่ 6.3 สรุปกรณีที่ทดสอบ (ต่อ)

|                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|
| 15. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 17.5 m ระยะเยื้อง 3 m               |
| 16. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 20 m ระยะเยื้อง 4 m                 |
| 17. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 20 m ระยะเยื้อง 1 m                 |
| 18. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 20 m ระยะเยื้อง 2 m                 |
| 19. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 20 m ระยะเยื้อง 3 m                 |
| 20. วิ่งเยื้องกันที่ระยะห่าง 20 m ระยะเยื้อง 4 m                 |
| กรณีอื่น ๆ (ทดสอบที่ความเร็ว 18, 36, 54, 72, 90, 108, 126 km/hr) |
| 1. เปิดกระจก 1 ด้าน                                              |
| 2. เปิดกระจก 2 ด้าน                                              |
| 3. มีหลังคาท้ายกระบะ                                             |
| 4. มีที่วางของบนห้องผู้โดยสาร                                    |

บทนี้เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกทุกเล็กลักษณะจริง ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของรถ ตำแหน่งหรือพลังงานที่เข้าปะทะกับรถ ซึ่งการแยกตัวของอากาศจะเป็นตัวชี้วัดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงว่าเป็นรูปทรงที่ดูดซับพลังงานของการไหลของอากาศมากน้อยเท่าไร ซึ่งค่าที่บ่งชี้คุณลักษณะของรูปทรงของการต้านอากาศ จะออกมาเป็นค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้าน แต่ในการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของรถ ไม่ใช่เพื่อเอาชนะแรงต้านของอากาศเพียงอย่างเดียว แต่จะสูญเสียไปกับการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ แรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นถนน หรือนำเอาพลังงานมาใช้ในการปรับอากาศ แสงสว่าง และระบบอัตโนมัติเพื่ออำนวยความสะดวก ซึ่งผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้ดังตารางที่ 6.3 – 6.6 จะนำผลเพื่อไปหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงในบทต่อไป

ตารางที่ 6.4 ผลทดสอบกรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

| ความเร็ว<br>(V), km/hr | Reynolds<br>number | แรงต้าน ( $F_D$ ) แต่ละกรณี, N |         |         |         |         |          | สัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                        |                    | 1                              | 2       | 3       | 4       | 5       | 6        | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 10                     | 1,232,256          | 98.324                         | 86.246  | 77.463  | 75.228  | 67.507  | 138.307  | 0.5977                        | 0.5243 | 0.4709 | 0.4573 | 0.4104 | 0.8407 |
| 15                     | 18,48,384          | 214.276                        | 187.511 | 167.842 | 161.103 | 144.961 | 303.919  | 0.5789                        | 0.5066 | 0.4535 | 0.4353 | 0.3916 | 0.8211 |
| 20                     | 2,464,513          | 373.958                        | 326.647 | 291.779 | 284.434 | 250.172 | 533.015  | 0.5683                        | 0.4964 | 0.4434 | 0.4323 | 0.3801 | 0.8101 |
| 25                     | 30,40,640          | 577.123                        | 503.331 | 448.989 | 422.782 | 382.849 | 825.355  | 0.5613                        | 0.4896 | 0.4367 | 0.4112 | 0.3724 | 0.8028 |
| 30                     | 3,696,769          | 823.622                        | 717.331 | 639.277 | 604.367 | 542.719 | 1180.764 | 0.5563                        | 0.4845 | 0.4318 | 0.4082 | 0.3666 | 0.7975 |
| 35                     | 4,312,898          | 1113.339                       | 968.511 | 862.511 | 808.423 | 729.638 | 1599.126 | 0.5525                        | 0.4806 | 0.4279 | 0.4011 | 0.3621 | 0.7935 |

ตารางที่ 6.5 ผลทดสอบกรณีวิ่งตามกัน

| ความเร็ว<br>(V), km/hr | Reynolds<br>number | F <sub>D</sub> คันหน้า N | F <sub>D</sub> รดคันหลังที่ระยะต่าง ๆ, N |         |        |         |         | C <sub>D</sub> คันหลัง | C <sub>D</sub> รดคันหลังที่ระยะต่าง ๆ, N |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------|--------|---------|---------|------------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                        |                    |                          | 10.0m                                    | 12.5m   | 15.0m  | 17.5m   | 20.0m   |                        | 10.0m                                    | 12.5m  | 15.0m  | 17.5m  | 20.0m  |
| 10                     | 1,232,256          | 98.324                   | 69.480                                   | 72.164  | 74.14  | 76.795  | 79.646  | 0.5977                 | 0.4224                                   | 0.4387 | 0.4507 | 0.4668 | 0.4841 |
| 15                     | 18,48,384          | 214.276                  | 151.992                                  | 157.745 | 161.95 | 167.730 | 173.734 | 0.5789                 | 0.4106                                   | 0.4262 | 0.4375 | 0.4532 | 0.4694 |
| 20                     | 2,464,513          | 373.958                  | 268.02e                                  | 278.134 | 285.05 | 295.775 | 307.496 | 0.5683                 | 0.4073                                   | 0.4227 | 0.4332 | 0.4495 | 0.4673 |
| 25                     | 30,40,640          | 577.123                  | 414.562                                  | 429.883 | 440.46 | 456.566 | 474.662 | 0.5613                 | 0.4032                                   | 0.4181 | 0.4284 | 0.4441 | 0.4617 |
| 30                     | 3,696,769          | 823.622                  | 596.845                                  | 618.985 | 633.51 | 657.565 | 683.613 | 0.5563                 | 0.4031                                   | 0.4181 | 0.4279 | 0.4441 | 0.4617 |
| 35                     | 4,312,898          | 1113.339                 | 810.284                                  | 840.221 | 856.46 | 892.284 | 931.122 | 0.5525                 | 0.4021                                   | 0.4169 | 0.425  | 0.4427 | 0.462  |



ตารางที่ 6.6 ผลทดสอบกรณีนึ่งเยื้องกัน

| ระยะห่าง<br>ในแนวแกน X (m) | แรงต้าน ( $F_D$ ) ที่ความเร็ว 90 km/hr<br>ที่ระยะห่างในแนวแกน Z (m) |         |         |         |   | สัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) ที่ความเร็ว 90 km/hr<br>ที่ระยะห่างในแนวแกน Z (m) |        |        |        |   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---|---------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|---|
|                            | 1                                                                   | 2       | 3       | 4       |   | 1                                                                               | 2      | 3      | 4      |   |
| รถคันหน้า                  | -                                                                   | -       | -       | -       | - | -                                                                               | -      | -      | -      | - |
| 10.0                       | 510.473                                                             | 530.933 | 534.840 | 542.448 |   | 0.4965                                                                          | 0.5164 | 0.5202 | 0.5276 |   |
| 12.5                       | 525.690                                                             | 549.851 | 560.029 | 560.029 |   | 0.5113                                                                          | 0.5348 | 0.5447 | 0.5447 |   |
| 15.0                       | 530.007                                                             | 551.290 | 562.908 | 565.684 |   | 0.5155                                                                          | 0.5362 | 0.5475 | 0.5502 |   |
| 17.5                       | 546.560                                                             | 559.001 | 564.450 | 570.619 |   | 0.5316                                                                          | 0.5437 | 0.549  | 0.555  |   |
| 20.0                       | 546.972                                                             | 560.235 | 567.534 | 570.619 |   | 0.532                                                                           | 0.5449 | 0.552  | 0.555  |   |

ตารางที่ 6.7 ผลทดสอบกรณีนื่นอื่น ๆ

| ความเร็ว<br>(V), km/hr | Reynolds<br>number | แรงต้าน ( $F_D$ ) แต่ละกรณี, N |          |          |          |          | สัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                        |                    | 1                              | 2        | 3        | 4        | 5        | 1                             | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 10                     | 1,232,256          | 98.324                         | 99.887   | 101.572  | 127.868  | 144.323  | 0.5977                        | 0.6072 | 0.6174 | 0.7773 | 0.8773 |
| 15                     | 18,48,384          | 214.276                        | 217.772  | 221.068  | 278.667  | 315.713  | 0.5789                        | 0.5884 | 0.5973 | 0.7529 | 0.8529 |
| 20                     | 2,464,513          | 373.958                        | 380      | 384      | 486.394  | 552.226  | 0.5683                        | 0.5775 | 0.5836 | 0.7392 | 0.8392 |
| 25                     | 30,40,640          | 577.123                        | 586.757  | 594.417  | 750.943  | 853.768  | 0.5613                        | 0.5707 | 0.5781 | 0.7304 | 0.8304 |
| 30                     | 3,696,769          | 823.622                        | 837.569  | 847.865  | 1072.030 | 1220.205 | 0.5563                        | 0.5657 | 0.5727 | 0.7241 | 0.8241 |
| 35                     | 4,312,898          | 1113.339                       | 1132.392 | 1141.357 | 1449.882 | 1651.454 | 0.5525                        | 0.5619 | 0.5664 | 0.7195 | 0.8195 |

## บทที่ 7

### การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

#### 7.1 ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันให้ถูกต้องและแม่นยำโดยทั่วไปแล้วทำได้ค่อนข้างยาก เว้นแต่รถยนต์แพง ๆ ที่จะมีอุปกรณ์การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันติดตั้งที่บริเวณคอนโซล การที่ได้ทราบถึงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทำให้เราสามารถตัดสินใจขับซัลดเพื่อให้ประหยัดน้ำมันได้อย่างถูกต้อง การวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากมีตัวแปรเนื่องจากสิ่งแวดล้อมมากมาย จึงมีผู้วิจัยที่คิดค้นวิธีที่จะคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถบรรทุกขนาดเล็ก โดย Leuschen and Cooper ได้สร้างสูตรการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน จากการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกขนาดใหญ่ โดยเปรียบเทียบกับรถต้นแบบที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงแต่อย่างใด ซึ่งจะได้นำหลักการนี้มาใช้ในการวิจัยนี้

ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบในกรณีต่าง ๆ จากบทที่ผ่านมาหาค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) เพื่อที่จะได้ทราบค่าที่จริงของการลดหรือเพิ่มขึ้นของน้ำมัน จากการเปลี่ยนแปลงรูปทรง หรือรูปแบบของการวิ่งบนท้องถนนของรถบรรทุกเล็ก

##### 7.1.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) จากทฤษฎีของลูสเซน โดยยึดกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบังปกติ นำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยคำนวณได้จาก

$$\Delta \overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{baseline} - \overline{C_D}(V_t)_{mod ifile} \quad (7.1)$$

$\Delta \overline{C_D}(V_t)$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วที่ต้องการหา  
 $\overline{C_D}(V_t)_{baseline}$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถกรณีปกติ ที่ความเร็วที่ต้องการหา  
 $\overline{C_D}(V_t)_{mod ifile}$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรง หรือตำแหน่งในการวิ่ง ที่ความเร็วที่ต้องการหา

ตารางที่ 7.1 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

| ความเร็ว<br>(km/hr) | กรณี |                     |                      |                  |                           |                         |
|---------------------|------|---------------------|----------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|
|                     | ปกติ | เปิดฝาท้าย<br>กระบะ | ไม่มีฝาท้าย<br>กระบะ | ปิดท้าย<br>กระบะ | ครอบ<br>กระบะ<br>แบบเฉียง | ครอบ<br>กระบะ<br>แบบตรง |
| 36                  | -    | 0.0734              | 0.1268               | 0.1404           | 0.1873                    | -0.243                  |
| 54                  | -    | 0.0723              | 0.1254               | 0.1436           | 0.1873                    | -0.2442                 |
| 72                  | -    | 0.0719              | 0.1249               | 0.1359           | 0.1882                    | -0.2418                 |
| 90                  | -    | 0.0717              | 0.1246               | 0.1521           | 0.1889                    | -0.2415                 |
| 108                 | -    | 0.0718              | 0.1245               | 0.1481           | 0.1897                    | -0.2412                 |
| 126                 | -    | 0.0719              | 0.1246               | 0.1514           | 0.1904                    | -0.241                  |

ตารางที่ 7.2 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีวิ่งตามกัน

| ความเร็ว<br>(km/hr) | ระยะห่างในแนวแกน X (m) โดยเปรียบเทียบกับรถคันหน้า |        |        |        |        |        |
|---------------------|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 0 m                                               | 10.0 m | 12.5 m | 15.0 m | 17.5 m | 20.0 m |
| 36                  | -                                                 | 0.1753 | 0.159  | 0.147  | 0.1309 | 0.1136 |
| 54                  | -                                                 | 0.1683 | 0.1527 | 0.1414 | 0.1257 | 0.1095 |
| 72                  | -                                                 | 0.161  | 0.1456 | 0.1351 | 0.1188 | 0.101  |
| 90                  | -                                                 | 0.1581 | 0.1432 | 0.1329 | 0.1172 | 0.0996 |
| 108                 | -                                                 | 0.1532 | 0.1382 | 0.1284 | 0.1122 | 0.0946 |
| 126                 | -                                                 | 0.1504 | 0.1356 | 0.1275 | 0.1098 | 0.0905 |

ส่วนกรณีวิ่งเยื้องกันนั้น จะเป็นการทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr ความเร็วเดียว เนื่องจากเป็นกรณีที่ต้องการทราบแนวโน้มของการขับขึ้นเยื้องจากแนวตรง ซึ่งใช้ขอบเขตที่กว้าง และให้เวลาในการคำนวณนาน ซึ่งจากผลดังตารางที่ 7.3 แนวโน้มจากค่าที่ได้จากการคำนวณไม่แตกต่างกันมาก จากกรณีวิ่งตามกัน

ตารางที่ 7.3 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีวิ่งเยื้องกัน ที่ 90 km/hr

| ระยะห่าง<br>ในแนวแกน X | ระยะห่างในแนวแกน Z |        |        |        |        |
|------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
|                        | 0                  | 1 m    | 2 m    | 3 m    | 4 m    |
| 0                      | -                  | -      | -      | -      | -      |
| 10.0 m                 | -                  | 0.0648 | 0.0449 | 0.0411 | 0.0337 |
| 12.5 m                 | -                  | 0.05   | 0.0265 | 0.0166 | 0.0166 |
| 15.0 m                 | -                  | 0.0458 | 0.0251 | 0.0138 | 0.0111 |
| 17.5 m                 | -                  | 0.0297 | 0.0176 | 0.0123 | 0.0063 |
| 20.0 m                 | -                  | 0.0293 | 0.0164 | 0.0093 | 0.0063 |

ตารางที่ 7.4 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีอื่นๆ

| ความเร็ว<br>(km/hr) | กรณี |                     |                     |             |                       |
|---------------------|------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
|                     | ปกติ | เปิดกระจก 1<br>ด้าน | เปิดกระจก 2<br>ด้าน | มีที่วางของ | มีหลังคาท้าย<br>กระบะ |
| 36                  | -    | -0.0095             | -0.0197             | -0.2796     | -0.1796               |
| 54                  | -    | -0.0095             | -0.0175             | -0.274      | -0.174                |
| 72                  | -    | -0.0092             | -0.0153             | -0.2709     | -0.1709               |
| 90                  | -    | -0.0094             | -0.0168             | -0.2691     | -0.1691               |
| 108                 | -    | -0.0094             | -0.0164             | -0.2678     | -0.1678               |
| 126                 | -    | -0.0094             | -0.0139             | -0.267      | -0.167                |

โดยค่าที่ได้จากคำนวณการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีต่าง ๆ ที่คำนวณจากตารางที่ 7.1 – 7.4 นำไปหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากสมการ

$$\Delta\mu(V_t) = \frac{\rho \times UCF \times SFC \times V_t^2 \overline{\Delta C_D(V_t)} A}{0.85} \quad (7.2)$$

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

$\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m<sup>3</sup>

$UCF$  คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.68576 (m<sup>2</sup>),  
 0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย  
 $SFC$  คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) ซึ่งเป็นค่าที่ต้อง  
 คำนวณหาจากหัวข้อต่อไป

### 7.1.2 การคำนวณหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC)

จากสมการ (6.2) ค่าที่นำไปแทนในสมการนั้นทุกค่าสามารถหาได้ ยกเว้นอัตราการสิ้นเปลือง  
 น้ำมันจำเพาะ สามารถหาได้จากสมการ

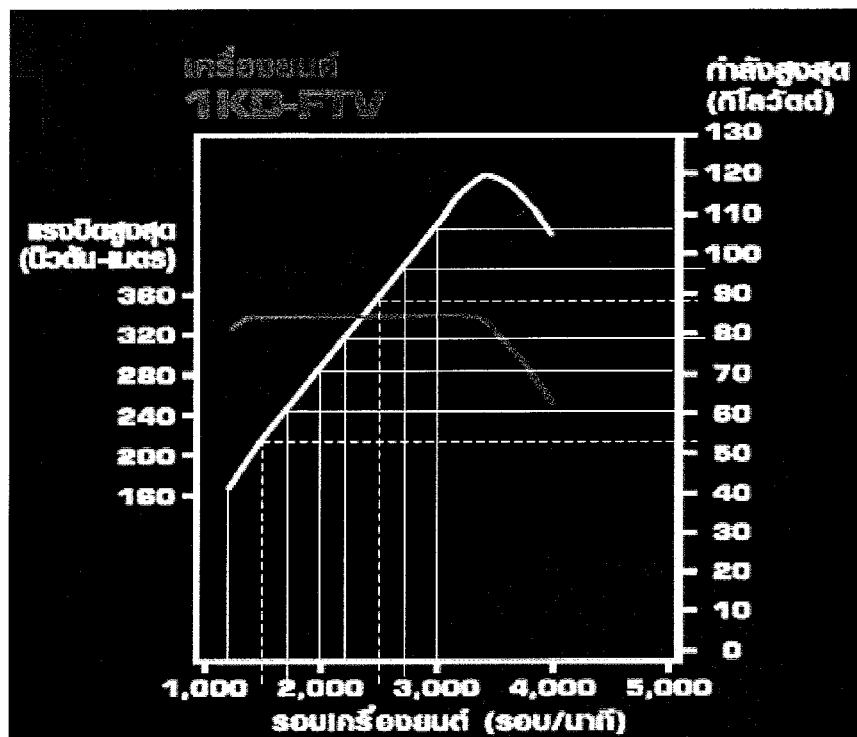
$$SFC = \frac{\rho \times \text{Flow rate}}{\text{Horespower}} \quad (7.3)$$

$SFC$  คืออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-hr)  
 $\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 0.84 kg/liters  
 Flow late คืออัตราการกินน้ำมัน (liters/hr)  
 Horespower คือกำลังม้า (kW)

โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล คอมมอนเรลขนาดกระบอกสูบ 3.0 liters ยี่ห้อโตโยต้า วิโก้พรีรันเนอร์  
 ในการทดสอบ จริงเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ใช้ในการวิ่งกับกำลังม้า เอาไปแทนใน  
 สมการ โดยคุณสมบัติของรถบรรทุกเล็ก และเครื่องยนต์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางที่ 7.5

ตารางที่ 7.5 คุณสมบัติของเครื่องยนต์

| ขนาดเครื่องยนต์          | คอมมอนเรล ขนาด 3.0 liters DOHC 16 วาล์ว |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| แรงม้าสูงสุด             | 130 kW                                  |
| รอบสูงสุด                | 3,400 rev/min                           |
| แรงบิดสูงสุด             | 343 N-m/1,400-3,200 rev/min             |
| ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ | 36 – 144 km/hr                          |
| ทดเกียร์                 | ตามรอบ และความเร็วที่เหมาะสม            |



รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรอบเครื่องยนต์กับกำลังและแรงบิด

จากรูปที่ 7.1 เป็นกราฟที่ได้จากการทดสอบหาลำดับสูงสุดที่ความเร็วต่าง ๆ เพื่อนำค่ามาคำนวณหาอัตราสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (SFC) โดยที่หน้าปัดบนคอนโซลรถจะบอกเป็นรอบของเครื่องยนต์ และการทดสอบนั้นเป็นลักษณะการวิ่งถนนเรียบ ทดเกียร์ตามรอบและความเร็วปกติ

ตารางที่ 7.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบ

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

### 7.1.3 การคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

จากค่าที่ได้จากการคำนวณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน และการทดสอบหา อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนั้น ต้องนำมาแทนค่าในสมการที่ 7.2 เพื่อที่จะหาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ในที่นี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ดังนี้คือ

จากกรณีปรับปรุงท้ายกระบะโดยครอบท้ายกระบะแบบเฉียง วิ่งถนนเรียบที่ความเร็ว 90 km/hr การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันคือ

จากสมการที่ (7.2)

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

จากสมการที่ (7.3)

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

ดังนั้น

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

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

แปลงหน่วย

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

จาก

$$\overline{\Delta C_D}(V_{90\text{km/hr}}) = 0.1889$$

$\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m<sup>3</sup>

$UCF$  คือค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของรถ 2.68576 (m<sup>2</sup>)

0.85 คือค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถคิดที่ความเร็วเฉลี่ย

แทนค่าสมการ (7.2)

$$\Delta\mu(V_{90\text{km/hr}}) = \frac{1.225 \times 1.072 \times 0.1 \times 10^{-3} \times 8,100 \times 0.1889 \times 2.68576}{0.85} = 0.6348 \text{ (liters/100 km)}$$

#### 7.1.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ

จากตัวอย่างนั้นแสดงว่ากรณีการปรับปรุงท้ายกระบะ ครอปท้ายกระบะแบบเฉียงนั้นสามารถลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากเดิมได้ 0.6348 (liters/100 km) ซึ่งทุกความเร็วและทุกกรณีได้คำนวณดังตารางดังนี้ โดยกำหนด (ค่าบวกคือลด ลบคือเพิ่มจากปกติ)

ตารางที่ 7.7 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

| ความเร็ว<br>(km/hr) | กรณี |                     |                      |                  |                           |                         |
|---------------------|------|---------------------|----------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|
|                     | ปกติ | เปิดฝาท้าย<br>กระบะ | ไม่มีฝาท้าย<br>กระบะ | ปิดท้าย<br>กระบะ | ครอป<br>กระบะ<br>แบบเฉียง | ครอป<br>กระบะ<br>แบบตรง |
| 36                  | -    | 0.0434              | 0.0749               | 0.0829           | 0.1108                    | -0.1437                 |
| 54                  | -    | 0.1221              | 0.2118               | 0.2425           | 0.3163                    | -0.4091                 |
| 72                  | -    | 0.1763              | 0.3062               | 0.3332           | 0.4615                    | -0.5929                 |
| 90                  | -    | 0.2409              | 0.4187               | 0.5044           | 0.6348                    | -0.8116                 |
| 108                 | -    | 0.3266              | 0.5664               | 0.6737           | 0.8629                    | -1.0972                 |
| 126                 | -    | 0.3741              | 0.6484               | 0.7878           | 0.9908                    | -1.2541                 |

ตารางที่ 7.8 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีวิ่งตามกัน

| ความเร็ว<br>(km/hr) | ระยะห่างในแนวนอน X (m) เทียบกับรถคันหน้า |        |        |        |        |        |
|---------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                     | 0 m                                      | 10.0 m | 12.5 m | 15.0 m | 17.5 m | 20.0 m |
| 36                  | -                                        | 0.1037 | 0.094  | 0.0869 | 0.0774 | 0.0672 |
| 54                  | -                                        | 0.2769 | 0.2513 | 0.2327 | 0.2068 | 0.1802 |
| 72                  | -                                        | 0.395  | 0.3572 | 0.3315 | 0.2915 | 0.2478 |
| 90                  | -                                        | 0.5313 | 0.4813 | 0.4466 | 0.3939 | 0.4376 |
| 108                 | -                                        | 0.6969 | 0.6287 | 0.5841 | 0.5095 | 0.4303 |
| 126                 | -                                        | 0.7827 | 0.7057 | 0.6635 | 0.5714 | 0.471  |

จากกรณีวิ่งเยื้องกันกัน เป็นกรณีคิดที่ความเร็ว 90 km/hr เพียงความเร็วเดียว ดังนั้นจึงจะข้ามในกรณีนี้ก่อน ซึ่งตารางของกรณีวิ่งเยื้องกันจะอยู่หัวข้อถัดไป



ตารางที่ 7.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วต่าง ๆ กรณีอื่น ๆ

| ความเร็ว<br>(km/hr) | กรณี |                     |                     |             |                       |
|---------------------|------|---------------------|---------------------|-------------|-----------------------|
|                     | ปกติ | เปิดกระจก 1<br>ด้าน | เปิดกระจก 2<br>ด้าน | มีที่วางของ | มีหลังคาท้าย<br>กระบะ |
| 36                  | -    | -0.0056             | -0.0117             | -0.1654     | -0.1063               |
| 54                  | -    | -0.016              | -0.0296             | -0.4628     | -0.2864               |
| 72                  | -    | -0.0226             | -0.0375             | -0.6642     | -0.4191               |
| 90                  | -    | -0.0316             | -0.0565             | -0.9044     | -0.5684               |
| 108                 | -    | -0.0428             | -0.0746             | -1.2182     | -0.7635               |
| 126                 | -    | -0.0489             | -0.0723             | -1.3894     | -0.8692               |

#### 7.1.5 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย

ในการขับขีรถบรรทุกเล็กส่วนมากแล้วจะขับขึ้นถนนทุก ๆ แบบ เนื่องจากการบรรทุกสิ่งของหรือคนต้องการที่จะไปให้ถึงจุดหมายทุกที่ แม้แต่เส้นทางที่ยากลำบาก แต่จะศึกษาเฉพาะเส้นทางเรียบ และในการวิ่งในเส้นทางเรียบที่ใช้ระยะทางไกล ก็จะวิ่งด้วยความเร็วแตกต่างกัน โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน ความเร็วที่ทำการทดสอบ และอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะนำมาเฉลี่ย และคำนวณหาค่าดังตาราง

ตารางที่ 7.10 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

| กรณี                  | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km (L) | อัตราการสิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| ปกติ                  | -                               | -                             | 0 %                              |
| เปิดฝาท้ายกระบะ       | 0.2139                          | 213.9                         | 2.62 %                           |
| ไม่มีฝาท้ายกระบะ      | 0.3711                          | 371.1                         | 4.55 %                           |
| ปิดท้ายกระบะ          | 0.4374                          | 437.4                         | 5.37 %                           |
| ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง | 0.5629                          | 562.9                         | 6.91 %                           |
| ครอบท้ายกระบะแบบตรง   | -0.7181                         | -718.1                        | -8.81 %                          |

ตารางที่ 7.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีวิ่งตามกัน

| ระยะห่างแนวแกน<br>X (m) | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km (L) | อัตราการสิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| รถคันหน้า               | -                               | -                             | -                                |
| 10.0 (m)                | 0.4644                          | 464.4                         | 5.70 %                           |
| 12.5 (m)                | 0.4197                          | 479.7                         | 5.15 %                           |
| 15.0 (m)                | 0.3903                          | 390.3                         | 4.79 %                           |
| 17.5 (m)                | 0.3418                          | 341.8                         | 4.19 %                           |
| 20.0 (m)                | 0.2885                          | 288.5                         | 3.54 %                           |

ตารางที่ 7.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีวิ่งเยื้องกัน

| ระยะห่าง<br>แนวแกน X<br>(m) | อัตราการสิ้นเปลืองที่ความเร็ว 90 km/hr<br>(L/100 km) ที่ระยะห่างแนวแกน Z (m) |        |        |        |        | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km<br>(L) | อัตราการ<br>สิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------------------------------------|
|                             | 1 m                                                                          | 2 m    | 3 m    | 4 m    | เฉลี่ย |                                  |                                      |
| รถคันหน้า                   | -                                                                            | -      | -      | -      | -      | -                                | -                                    |
| 10.0 (m)                    | 0.2178                                                                       | 0.1509 | 0.1381 | 0.1133 | 0.1550 | 115.0                            | 1.90 %                               |
| 12.5 (m)                    | 0.1681                                                                       | 0.0891 | 0.0558 | 0.0558 | 0.0922 | 92.2                             | 1.13 %                               |
| 15.0 (m)                    | 0.1539                                                                       | 0.0844 | 0.0464 | 0.0373 | 0.0805 | 80.5                             | 0.99 %                               |
| 17.5 (m)                    | 0.0998                                                                       | 0.0592 | 0.0413 | 0.0212 | 0.0554 | 55.4                             | 0.68 %                               |
| 20.0 (m)                    | 0.0985                                                                       | 0.0551 | 0.0313 | 0.0212 | 0.0515 | 51.5                             | 0.63 %                               |

ตารางที่ 7.11 การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีอื่น ๆ

| กรณี              | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km (L) | อัตราการสิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| เปิดกระจก 1 ด้าน  | -0.0279                         | -27.9                         | -0.34 %                          |
| เปิดกระจก 2 ด้าน  | -0.0470                         | -47.9                         | -0.58 %                          |
| มีที่วางของ       | -0.8007                         | -800.7                        | -9.82 %                          |
| มีหลังคาท้ายกระบะ | -0.5022                         | -502.2                        | -6.12 %                          |

จากค่าของการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองที่คำนวณบนพื้นฐานทฤษฎีของลูสเซนในหัวข้อนี้ ทำให้ทราบอัตราการสิ้นเปลืองของการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ และความมั่นใจวิธีการขับที่ถูกต้องที่จะทำให้ประหยัดน้ำมัน และข้อดีอย่างหนึ่งก็คือเป็นข้อมูลที่ประชาชนทั่วสามารถสัมผัสได้จริง ซึ่งต่างจากข้อมูลในห้องทดสอบซึ่งควบคุมสภาวะแวดล้อมได้ แต่อาจจะคลาดเคลื่อนจากการขับที่สภาวะจริง ผู้วิจัยจึงได้นำวิธีนี้คำนวณหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุกเล็ก โดยใช้ทฤษฎีดังกล่าว และการวัดจากการทดสอบการวิ่งบนท้องถนนมาประกอบกัน ดังนั้นการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันตามวิธีนี้จึงมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงบ้างเล็กน้อย

## 7.2 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์

การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน สามารถทราบถึงอัตราการเพิ่มหรือลดเงินทุนที่จะต้องจ่ายกับน้ำมันที่เราต้องใช้กับรถบรรทุกเล็กกว่ามากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับสภาวะด้านการตลาดของซื้อขายน้ำมัน ซึ่งในปัจจุบันก็ทราบกันดีอยู่แล้วว่า เชื้อเพลิงที่ใช้กับรถบรรทุกเล็กที่เราใช้อยู่ เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียม กำลังจะหมดไปในโลก และยิ่งนับวันก็มีราคาที่สูงขึ้น ซึ่งก็เป็นสิ่งที่ต้องอยู่แล้วว่า หากกรณีที่ให้อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันลดลงก็ย่อมเป็นผลดีต่อผู้ที่นำไปปฏิบัติ แต่ต้องคำนึงก่อนว่า ก่อนที่จะมีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการเสียเงินทุนกับการซื้ออุปกรณ์เพื่อมาปรับแต่งรูปทรงของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งอุปกรณ์แต่ละชิ้น แต่ละยี่ห้อก็ย่อมมีราคาที่แตกต่างกัน แล้วแต่ละบุคคลที่จะนำมาใช้ โดยบางครั้งราคาที่เรซื้ออุปกรณ์เสริม หรืออุปกรณ์แต่งรถบรรทุกเล็กนั้นมา ซึ่งเชื่อว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้จริง แต่ในบางครั้งอายุของรถก็อาจจะหมดก่อนเวลาที่จะคุ้มทุน ดังนั้นจากข้อมูลอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ทราบแล้วจากหัวข้อที่ผ่านมา จำเป็นต้องมาคำนวณหาราคาที่ต้องจ่ายกับค่าน้ำมัน

ซึ่งในหัวข้อนี้จะเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ของการคำนวณราคาน้ำมันที่ลดหรือเพิ่มจากราคาเดิมที่ต้องจ่ายจากกรณีปกติ ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบกับราคาอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ มาคำนวณหาระยะเวลาในการคืนทุน โดยกำหนดที่ระยะเวลา 1 เดือน การใช้งานของรถบรรทุกเล็กในประเทศไทยโดยเฉลี่ยจะอยู่ที่ 3,000 km และราคาของน้ำมันดีเซล ราคาเฉลี่ย 42 บาท (อ้างอิงจาก กรกฎาคม 2551) ราคาอุปกรณ์เสริมที่ต้องจ่ายคิดที่ราคาท้องตลาด และเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก ดังภาพ 6.1 ความเร็วของรถที่ใช้งานคิดที่ความเร็วเฉลี่ย โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 7.10 มาใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ 7.12 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

| กรณี                  | ราคาน้ำมันจากปกติ<br>1 เดือน (บาท) | ราคาอุปกรณ์เสริม<br>(บาท) | ระยะเวลาคู้มทุน<br>(เดือน) |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| ปกติ                  | -                                  | -                         | -                          |
| เปิดฝาท้ายกระบะ       | ลด 270                             | -                         | -                          |
| ไม่มีฝาท้ายกระบะ      | ลด 468                             | -                         | -                          |
| ปิดท้ายกระบะ          | ลด 551                             | 2,000                     | 4                          |
| ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง | ลด 709                             | 25,000                    | 35                         |
| ครอบท้ายกระบะแบบตรง   | เพิ่ม 905                          | 30,000                    | -                          |



รูปที่ 7.2 ตัวอย่างของลักษณะอุปกรณ์ที่นำมาปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์

## บทที่ 8

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) มีความสำคัญอย่างหนึ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานของรถยนต์ในปัจจุบัน เพราะการออกแบบรถยนต์ส่วนใหญ่จะเน้นความสวยงาม ทันสมัย แต่การอนุรักษ์พลังงานในด้านรูปร่างของรถยนต์นั้น ยังมีการศึกษาและปรับปรุงน้อยกว่าในด้านเครื่องยนต์และกลไก โดยรูปร่างของรถเป็นปัจจัยโดยตรงต่อการเพิ่มหรือลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient) เพราะฉะนั้น หากการออกแบบรูปร่างและการปรับปรุงรูปร่างรถให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำ ก็จะช่วยลดพลังงานในการขับเคลื่อนด้วยอีกวิธีหนึ่ง อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศที่กำลังพัฒนา มีการใช้รถยนต์เป็นจำนวนมาก และยังต้องการใช้สอยประโยชน์ในการบรรทุกสิ่งของเพื่อทางการค้าและคมนาคม รถบรรทุกเล็กหรือที่รู้จักกันคือรถปิคอัพ จึงเป็นที่นิยมในประเทศ ดังนั้นการพัฒนาคำความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ โดยการทดลองจึงเป็นสิ่งจำเป็น รถบรรทุกเล็กที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย ถึงแม้จะมีการออกแบบที่ดี พอควรแล้ว แต่ก็อาจจะสามารถปรับปรุง หรือดัดแปลงให้มีแรงต้านอากาศที่ต่ำลงได้อีก เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และในการใช้งานจริง ผู้ใช้งานมักจะติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อประโยชน์อย่างอื่นหรือเพื่อความสวยงามทำให้มีการ ใช้งานที่ผิดไปจากต้นแบบอยู่เสมอ ก่อให้เกิดแรงต้านของอากาศสูง ดังนั้นจึงนำความรู้เรื่องอากาศพลศาสตร์มาศึกษาและปรับปรุงสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปลักษณะของรถ รวมไปถึงการศึกษา ปัญหา ข้อดีข้อเสีย ของการติดตั้งอุปกรณ์เสริม โดยจะทำการศึกษาทั้งด้านการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม แต่จะเน้นทางด้านการใช้โปรแกรม การคำนวณเชิงตัวเลขของของไหลพลศาสตร์ (Computational fluid dynamics: CFD)

#### 8.1 สรุปผลการศึกษา

ในการทดสอบใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดกับมอเตอร์ ขนาด 5.5 hp มีเครื่องมือควบคุมมอเตอร์ (Invertor) เพื่อปรับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง มีความเร็วที่ 5-10 m/s (18 - 36 km/hr) ใช้บาร์โรมิเตอร์ (Barometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็ว ใช้ทดสอบแบบจำลอง ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (8.1)$$

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ ) และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ ) โดยนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้สมการการคำนวณการไหล k-epsilon จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจากการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข 5 % (โดยเฉลี่ย) ซึ่งได้ใช้เงื่อนไขการคำนวณ CFD ดังนี้คือ

ตารางที่ 8.1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD

|                                                                           |                           |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| โปรแกรม GAMBIT                                                            |                           |
| ขอบเขตทางด้านเข้า (Inlet boundary condition)                              | Velocity inlet            |
| ขอบเขตทางด้านออก (Outlet boundary condition)                              | Pressure outlet           |
| จำนวนกริด (รูปพีระมิด)                                                    | ประมาณ 728,644 cell       |
| โปรแกรม FLUENT                                                            |                           |
| ระเบียบการแก้ปัญห (Solver)                                                | Segregated Solver         |
| ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)                                          | Implicit method           |
| แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)                                    | Standard k-epsilon (2eqn) |
| ระเบียบวิธีการแก้ปัญหการไหลบริเวณใกล้ผนัง<br>(Near-wall treatment method) | Near-wall model           |

โดยได้ใช้เงื่อนไขการคำนวณ นำมาจำลองการไหลของอากาศผ่านรถบรรทุกเล็ก 4 กรณีหลัก ดังนี้คือ

กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ เป็นการทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 36-126 km/hr (Reynolds number  $12 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณีคือ เปิดท้ายกระบะปกติ (Normal pick-up box), เปิดฝาท้ายกระบะ (Tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (Tailgate off), ปิดท้ายกระบะ (Covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (Slope rear box), และครอบท้ายกระบะแบบตรง (Van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้า

และด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้า และเพิ่มความดันในด้านท้ายของรถ ดังสมการ

$$F_D = \int_{front} p \cos \theta dA - \int_{back} p \cos \theta dA \quad (8.2)$$

พบว่า กรณีครอบท้ายกระบะแบบเฉียง ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น จากรูปร่างท้ายกระบะเป็นลักษณะเปรี๊ยะลม จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านบน และด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและต่ำกว่าทุกกรณีข้างต้น

ตารางที่ 8.2 กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ ที่ความเร็วเฉลี่ย

| กรณี                  | อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (%) |
|-----------------------|------------------------------|
| ปกติ                  | 0 %                          |
| เปิดฝาท้ายกระบะ       | 2.62 %                       |
| ไม่มีฝาท้ายกระบะ      | 4.55 %                       |
| ปิดท้ายกระบะ          | 5.37 %                       |
| ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง | 6.91 %                       |
| ครอบท้ายกระบะแบบตรง   | -8.81 %                      |

กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกัน เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลังที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยรถทั้งสองคันอยู่ห่างกันตามแนวยาว (แนวแกน X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 m ทดสอบที่ความเร็ว 36, 54, 72, 90, 108, และ 126 km/hr (Reynolds number  $12 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน โดยได้ขยายขนาดความกว้าง และความสูง ของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้ทดสอบ พบว่าที่ระยะห่างระหว่างรถ 10 m ความเร็วที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของรถคันหลังจะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และจะเริ่มสูงขึ้นเมื่อเริ่มเข้าสู่ช่วงล่างของรถเนื่องจากอากาศสามารถไหลผ่านช่วงล่างของรถ แต่เมื่อระยะห่างของรถเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วบริเวณนี้ก็จะสูงขึ้น แสดงว่ารถคันหลังได้รับโมเมนตัมสูงด้วยเช่นเดียวกัน และค่าความดันก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นที่ระยะห่าง 10 m จึงเป็นระยะห่างที่ได้รับโมเมนตัมน้อยที่สุด จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงมากที่สุดด้วย

ตารางที่ 8.3 กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันที่ความเร็วเฉลี่ย

| ระยะห่าง | อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (%) คั่นหลัง |
|----------|---------------------------------------|
| 10.0 (m) | 5.70 %                                |
| 12.5 (m) | 5.15 %                                |
| 15.0 (m) | 4.79 %                                |
| 17.5 (m) | 4.19 %                                |
| 20.0 (m) | 3.54 %                                |

กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งเยื้องกัน เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง โดยที่รถทั้งสองอยู่ห่างกันตามแนวยาว (Distance X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, และ 20 m และห่างกันตามแนวขวาง (Distance Z) 1, 2, 3, และ 4 m ทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน และเงื่อนไข ขอบเขตในการจำลองเหมือนกรณีรถวิ่งตามกันตามกัน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงเพิ่มขึ้นตามระยะที่รถคันหลังอยู่ห่างออกไปทั้งตามแนวแกน X และแกน Z แต่จะมีค่าต่ำกว่ารถคันหน้า

ตารางที่ 8.4 กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งเยื้องกันที่ความเร็วเฉลี่ย

| ระยะห่าง | อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (%) คั่นหลัง |
|----------|---------------------------------------|
| 10.0 (m) | 1.90 %                                |
| 12.5 (m) | 1.13 %                                |
| 15.0 (m) | 0.99 %                                |
| 17.5 (m) | 0.68 %                                |
| 20.0 (m) | 0.63 %                                |

กรณีอื่นๆ เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีการใช้อุปกรณ์เสริม คือกรณีที่มีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสาร (Upper box) กรณีติดหลังคาส่วนท้ายกระบะ (Roof pick-up box) และกรณีเปิดกระจกด้านข้างรถ (Open windshield) 100 % 1 ด้าน และ 2 ด้าน ซึ่งทดสอบที่ความเร็ว ทดสอบที่ความเร็ว 36-126 km/hr (Reynolds number  $1.2 \times 10^6$  -  $4.4 \times 10^6$ ) ซึ่งกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม และกรณีเปิดกระจกรถ จะให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่สูงกว่ากรณีปกติทุกกรณี ซึ่งกรณีที่มีที่วางของส่วนบนห้องผู้โดยสารจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุด และกรณีอื่นๆจะลดลง เนื่องจากอากาศเกิด



การปะทะ และเกิดการหมุนวนของอากาศภายในห้องผู้โดยสาร ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสีย ทำให้ลักษณะของการไหลของอากาศที่ไม่สมดุล ในสภาวะความดันที่ไม่คงที่

ตารางที่ 8.5 กรณีอื่น ๆ ที่ความเร็วเฉลี่ย

| กรณี              | อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (%) |
|-------------------|------------------------------|
| เปิดกระจก 1 ด้าน  | -0.34 %                      |
| เปิดกระจก 2 ด้าน  | -0.58 %                      |
| มีที่วางของ       | -9.82 %                      |
| มีหลังคาท้ายกระบะ | -6.12 %                      |

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ผลการทดลองนั้นมีความคลาดเคลื่อน เนื่องมาจากสภาวะในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กนั้นไม่สามารถกำหนดให้เหมือนสภาวะจริงได้ทุกเงื่อนไข ทั้งในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านในอุโมงค์ลม หรือ CFD ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงเป็นการเสนอแนะทางการแก้ไขปัญหา เพื่อให้มีการพัฒนา หรือนำปัญหาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับด้านอากาศพลศาสตร์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นและข้อเสนอแนะกับงานวิจัยนี้ มีดังนี้

**ปัญหาจากอุโมงค์ลม** เนื่องจากอุโมงค์ลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ความเร็วที่ใช้ทดสอบค่อนข้างต่ำ ซึ่งไม่สามารถที่จะเปรียบเทียบ เพื่อยืนยันความถูกต้องกับผลที่ได้จาก CFD ที่ความเร็วสูงได้ ซึ่งอาจจะมีผลที่แตกต่างกัน เนื่องจากผนังของอุโมงค์ลม กับผนังจำลองของ CFD ไม่สามารถกำหนดให้แน่ชัดได้ว่ามีความคล้ายคลึงกันมากเท่าไร ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ต่างกัน ในสภาวะที่ความเร็วของอากาศสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างอุโมงค์ลม ขนาด ส่วนกึ่งกลางที่ใช้ดูอากาศที่สูงขึ้น เพื่อยืนยันความถูกต้องที่หลากหลาย ๆ สภาวะ

**ปัญหาของคอมพิวเตอร์** ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของ CFD ในกรณีการกำหนดขอบเขต และเงื่อนไขที่มีโดเมนขนาดใหญ่ และต้องการกริดที่มีความละเอียดสูง โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหน่วยความจำที่ค่อนข้างสูง แต่ก็ยังเป็นปัญหาในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่อนข้างสูง และเป็นข้อจำกัดของการกำหนดโดเมนที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นในการแก้ปัญหาควรใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้

การกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขของ CFD ให้มีสภาวะให้เหมือนจริง 100 % นั้นเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของ ความดัน อุณหภูมิ ความเร็วของอากาศ หรือทิศทางของอากาศ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดเงื่อนไขเพื่อใช้ในการจำลองหลาย ๆ กรณี ที่สภาวะต่างกัน เพื่อค่าที่ได้เพื่อให้ในการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องมากขึ้น

ความละเอียดของรูปร่างแบบจำลอง เป็นสิ่งที่ต้องคำนึง เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองนั้น รูปร่างย่อมไม่มีความเหมือนจริงได้ 100 % ซึ่งจะทำให้ค่าที่ได้ มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองให้เหมือนจริงและถูกต้องให้มากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมธุรกิจพลังงาน การนำเข้าน้ำมันดิบ พ.ศ. 2551, <http://www.doeb.go.th/information>, 21 กรกฎาคม 2551.
- [2] วินัย ศรีอำพร. กลศาสตร์ของไหล, 2541, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [3] D. Alexander, "Reducing drag in future vehicles", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, Vol. 88, pp.120-144
- [4] W.H. Hucho, "Aerodynamics of road vehicles", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, Vol. 94, pp.334-361
- [5] S.R. Ahmed, and Baumert W. "The structure of wake flow behind road vehicles", ASME Journal of Fluids Engineering, 1979, Vol. 101, pp.201-220
- [6] S.R. Ahmed, "Influence of base slant on wake structure and drag of road vehicles", ASME Journal of Fluids Engineering, 1983, Vol. 105, pp.429-434
- [7] A.J. Scibor, "Road vehicle aerodynamics", 2<sup>nd</sup> Edition Pentech Press Limited ISBN-07273-1805-5, 1984.
- [8] W.H. Hucho, "Aerodynamics of road vehicles state of the art and tasks for the future", Automotive dynamics stability and controls conference and exhibition, 2006.
- [9] F.R. Grosche, 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
- [10] A. Prasad, 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
- [11] C. P. Van Dam, "Recent experience with different methods of drag prediction", Progress in Aerospace Sciences, 1999, Vol. 35, pp.751-798
- [12] H. Kwon, Park Y. Lee D. and Kim M. "Wind tunnel experiments on Korean high-speed trains using various ground simulation techniques", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, Vol. 89, pp.1179-1195
- [13] B.L. Storms, "A study of Reynolds number effects and drag reduction concepts on a generic tractor trailer", 34<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2004.
- [14] J. Leuschen, 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.

- [15] W. Kieffer, 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
- [16] M. Tomiyama, 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
- [17] อาทิตย ฤทธิเลื่อน และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว. "การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง", *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2546, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2
- [18] H. Fukuda, Yanagimoto K, China H. and Nakagawa K. 1995. "Improvement of vehicle aerodynamics by wake control", *JSAE Review*, 1995, Vol. 16, pp.151-155
- [19] ก้อง อุทัยภาส และวรางรัตน์ จันทสาโร. "การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง", *วิศวกรรมสาร มก*, 2546, ปีที่ 10, ฉบับที่ 4
- [20] P.R. Spalart, "Strategies for turbulence modeling and simulation", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2002, Vol. 21, pp.252-263
- [21] M. Wang, 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.
- [22] S. Perzo, and Davidson L. "On CFD and transient flow in vehicle aerodynamic", *SAE Technical paper*, 2000, Vol. 25, pp.125-139
- [23] N. Horinouchi, "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System", *SAE 950628*, 1995.
- [24] F. Muyl, Dumsa L. and Herbert V. "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry", *Computers & Fluids*, 2004, Vol. 33, pp.849-858
- [25] H. Ozawa, Nishikawa S. and Higashida D. "Development of aerodynamics for a solar race car", *JSAE Review*, 1998, Vol. 19, pp.343-349
- [26] S. N. Singh, Rai L. and Bhatnagar A. "Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles", *Proc. KMEchE*, 2002, 219: Part D
- [27] W. Simon, 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
- [28] K.R. Cooper, "Pickup truck aerodynamics", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, Vol. 92, pp.342-256

- [29] F. Brownd, “Reducing aerodynamics drag and fuel consumption”, Advanced Transportation Workshop Stanford University, 2005
- [30] S. Yamamoto, 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
- [31] จินดา เจริญพรพาณิชย์ และพงษ์ศักดิ์ คำมูล. “อัตราการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของรถยนต์ขนาดต่างๆ ที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, 2548, TFM054
- [32] ปราโมทย์ เตชะอำไพ. “ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการคำนวณพลศาสตร์ของไหล”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [33] J. Bettle, 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
- [34] M.S. Kim, 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
- [35] J.P. Pinelli, Subramanian C. and Plamondon M. “Wind effects on emergency vehicles”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, Vol. 92, pp.663-685
- [36] J. Robert, “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
- [37] T. Nouzawa, “Unsteady-wake analysis of the aerodynamic drag of a notchback model with critical afterbody geometry”, SAE-92020, 1992.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก

### ผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

- กุลเชษฐ์ เพียรทอง, ปรัชญา มุขดา และวิระพันธ์ สีหนาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านของรบบรทุกเล็กกรณีวิ่งตามกัน,” วารสาร ม. อบ. 11(1): มกราคม-เมษายน, 2552.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับรถยนต์รบบรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. น.231-237. โรงเรียนนายเรืออากาศ, 2550.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์ของรบบรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 1. น.87-95. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “อากาศพลศาสตร์ของรบบรทุกเพื่อการประหยัดพลังงานโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. น.543-553. มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2551.
- ปรัชญา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหนาม. “การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านกรณีวิ่งตามกันของรบบรทุกเล็กโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22. น.225-237. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.
- ปรัชญา มุขดา และกุลเชษฐ์ เพียรทอง. “การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์รบบรทุกเล็กโดยการจำลองเชิงตัวเลข,” ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3. น.129-137. ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค, 2550.

## การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก

### Reduction of drag coefficient of the trail pick-up truck

กุลเชษฐ์ เพียรทอง ปรัชญา มุขดา และวิระพันธ์ สีหานาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Kulachate Pianthong Prachya Mukda and Wirapan Seehanam

Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ ในการวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็กห้องผู้โดยสาร 2 ตอน เพื่อศึกษาการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) โดยวิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ใช้ซอฟต์แวร์ Fluent จำลองแบบ 3 มิติ ในการศึกษาขั้นต้น ใช้ข้อมูลลมความเร็วต่ำร่วมกับ CFD ทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ที่ความเร็วระหว่าง 18 - 43 km/hr เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผล ก่อนที่จะทดสอบรถขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ที่ความเร็ว 36 - 126 km/hr เพื่อศึกษาการลดลงของสัมประสิทธิ์ต้าน ของรถคันหลังที่วิ่งห่างจากคันหน้าในระยะห่างต่างกัน พบว่า ที่ระยะห่าง 10 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงจากวิ่งปกติคันเดียว 6.52 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) และกรณีวิ่งเยื้องกัน พบว่า รถคันหลังที่วิ่งห่างที่ระยะ 10 m และเยื้อง 1 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลง 1.90 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย)

**คำสำคัญ** สัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็ก คำนวณของไหลพลศาสตร์



## Abstract

This research aims to investigate the aerodynamic of the trailing cab pick-up truck. The drag coefficient ( $C_D$ ) is the main focus by using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The commercial software, FLUENT, is employed in three dimensional (3D) model. The low speed wind tunnel was used to test to model of pick-up truck at velocity between 18 – 43 km/hr, the results was then validated with CFD simulation. Then the full size of pick-up truck was simulated by CFD at velocity between 36 – 126 km/hr. In this study, the  $C_D$  of the trail car at different distance is investigated. It was found that, at the trailing distance of 10 m, the fuel consumption trail car can be reduced by 6.52 % averagely. In another case, when the trail car is running accentricly, the trailly distance of 10 m and accentric distance of 1 m, gives the result which the fuel consumption can be reduced by 1.90 %.

**Keywords:** drag coefficient, pick-up truck, computational fluid dynamic

## บทนำ

การออกแบบรูปร่างรถยนต์ให้เหมาะสม เป็นการทำให้รถยนต์วิ่งผ่านอากาศด้วยแรงต้านลดลง การประกอบชิ้นส่วนก็มีส่วนสำคัญ เช่น การประกอบหน้าด่างและขอบที่แนบสนิทพอดี รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถ เช่น อุปกรณ์ควบคุมกระแสดม (Spoiler) ด้านหลังล้อหน้าและล้อหลัง แผ่นกันใต้ท้องรถที่ทำให้ส่วนประกอบของโครงสร้างไม่ขวางการไหลของอากาศ แม้แต่ อุปกรณ์ควบคุมกระแสดมหลัง เพื่อลดความปั่นป่วนเมื่ออากาศวิ่งผ่าน อุปกรณ์เหล่านี้สามารถลดแรงต้านอากาศ โดยใช้องค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ หรือ Aerodynamics ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการออกแบบรถยนต์ ในการทดสอบ คันคว่ำ และการวิจัย จะต้องมีการนำโมเดลทั้งแบบจำลองและแบบขนาดจริง เข้าไปทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อตรวจสอบหาค่าต่างๆ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทุน อุปกรณ์ และเวลาในการทดสอบ ปัจจุบันได้มีการใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ หรือ CFD (Computation Fluid Dynamic) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถแสดงผลได้แบบ 3 มิติ ช่วยให้เห็นภาพการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศ และผลที่เกิดกับรถยนต์ได้ชัดเจน

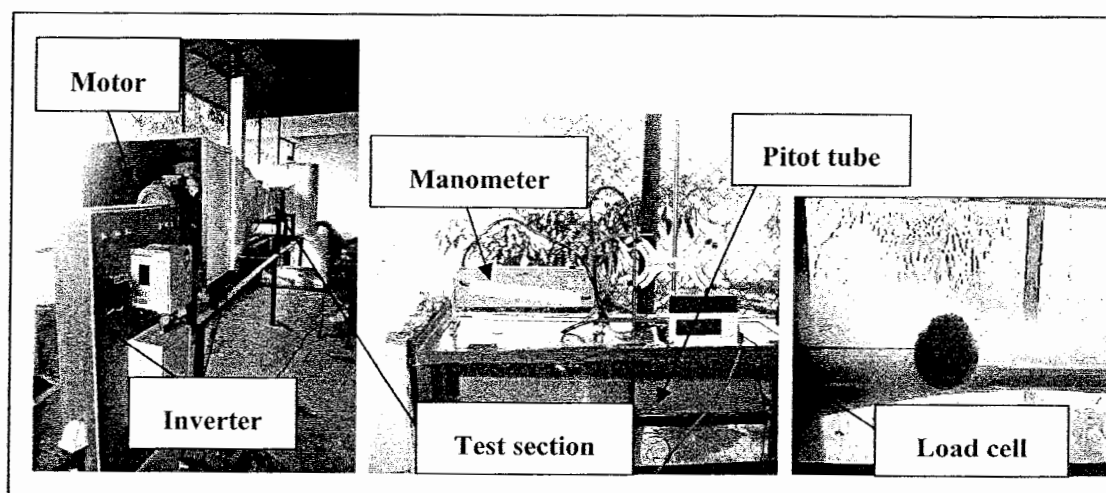
Spalart (2000) กล่าวว่า การคำนวณของไหลพลศาสตร์ หรือวิธีจำลองเชิงตัวเลข นิยมใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT สำหรับการจำลองการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ โดยวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มการเกิดการแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนหลังของแบบจำลอง ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่ Reynolds number ต่ำ แต่เมื่อ Reynolds number ที่ใช้ในการจำลองมีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจากการทดสอบในอุโมงค์ลมมีลักษณะการไหลเป็น 3 มิติ จึงได้มีการพัฒนาการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ Horinouchi (1995) และ Van Dam (1999) ได้นำแบบจำลองเพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ ใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดใต้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ Prasad et al. (1997) พบว่า แรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอก สัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์ จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่มีผลจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจากการไหลปั่นป่วนด้านท้าย Muyl et al. (2004) และ Grosche (2001) กล่าวว่า ในรถยนต์ทุกชนิดในปัจจุบันนั้น เป็นไปไม่ได้เลยที่จะไม่ให้เกิดการไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดยเฉพาะรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่ เพราะรูปทรงมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ และไม่มีลักษณะลู่ลม จะทำให้อากาศเกิดการแยกตัว เกิดการไหลแบบปั่นป่วนด้านท้ายมาก ซึ่งทำให้ค่าแรงต้านสูง แต่อากาศด้านท้ายที่เกิดจากการแยกตัวนั้น ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) จะลดลง จึงได้มีการทดสอบให้รถบรรทุกขนาดใหญ่ 2 คัน วิ่งตามกัน โดย Browand (2005) พบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลงกว่าคันหน้า และในการทดสอบรถแข่งของการจำลอง CFD ยังสามารถจำลองสิ่งที่เกิดขึ้นกับด้านท้ายของรถคันหน้า ซึ่งการอาศัยองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาวิเคราะห์ สามารถเห็นประโยชน์ที่รถคันหลังได้รับอย่างชัดเจน เพราะแรงต้านของอากาศของรถคันหลังจะลดลง โดยกระแสอากาศที่ไหลผ่านใต้ท้องรถคันหลังจะลดลง ประการสำคัญแรงกดของกระแสลมด้านท้ายของรถคันหน้าจะทำให้รถคันตามมีความเร็วเพิ่มขึ้น

จึงได้นำหลักการที่กล่าวมา มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ โดยเป็นการทดสอบรถบรรทุกเล็กห้องผู้โดยสาร 2 คน ซึ่งเป็นยานพาหนะที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย มาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีวิ่งตามกัน โดยรถทั้งสองคัน วิ่งตามกันแนวยาว และแนวเอียง ที่

ระยะห่างต่าง ๆ โดยใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน และลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยใช้ทฤษฎีของ Leuschen (2006) เพื่อหาจากการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีปกติ ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไข วิธีการจับจีที่เหมาะสม

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD

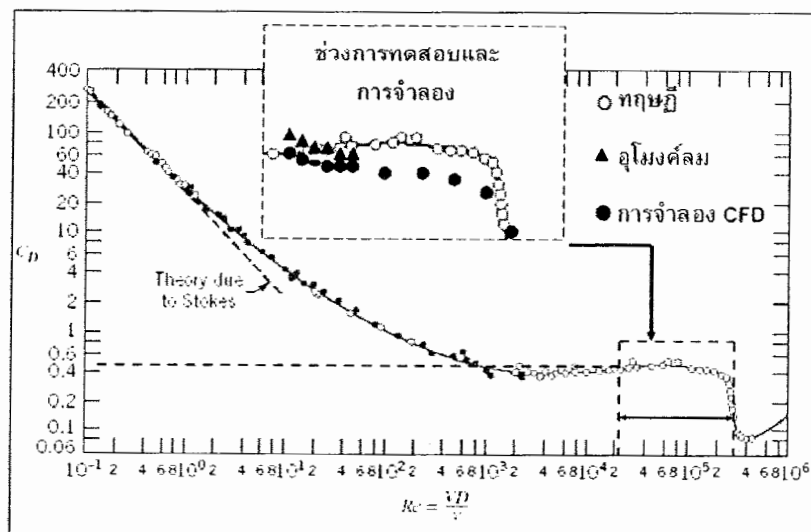


รูปที่ 1 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน (อุโมงค์ลม)

ในการทดสอบใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดกับมอเตอร์ ขนาด 5.5 hp มีเครื่องมือควบคุมมอเตอร์ (Inverter) เพื่อปรับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง มีความเร็วที่ 5 ถึง 10 m/s (18 - 36 km/hr) ใช้มานอมิเตอร์ (Manometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็วอากาศ แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งใช้ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

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

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ ) โดยนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิง จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจากการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลขประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (โดยเฉลี่ย) ซึ่งจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดสอบทั้งสองแบบ และเปรียบเทียบกับทฤษฎี แสดงในรูปที่ 2

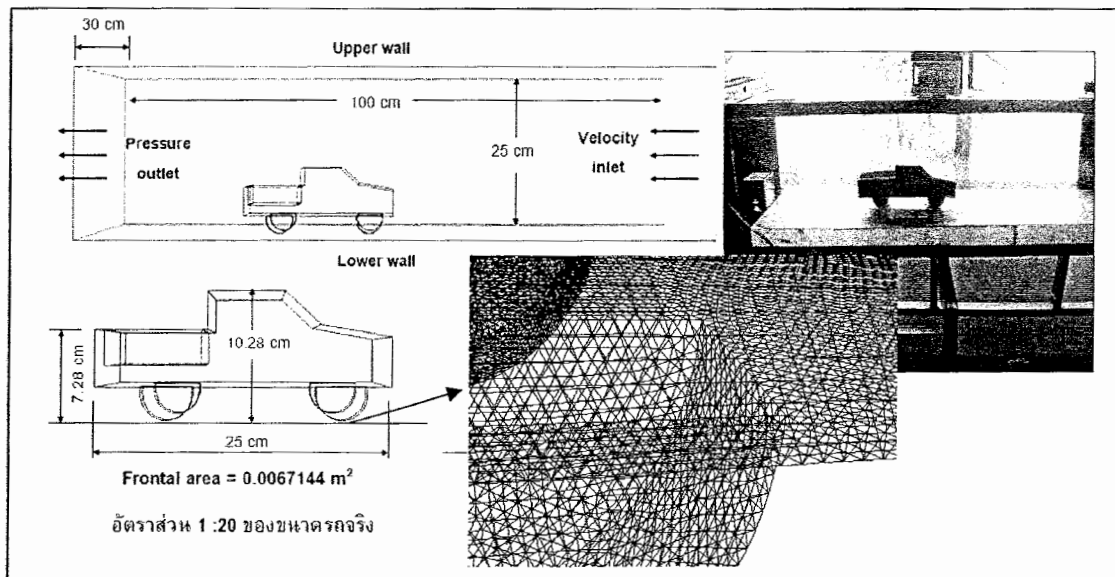


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ )

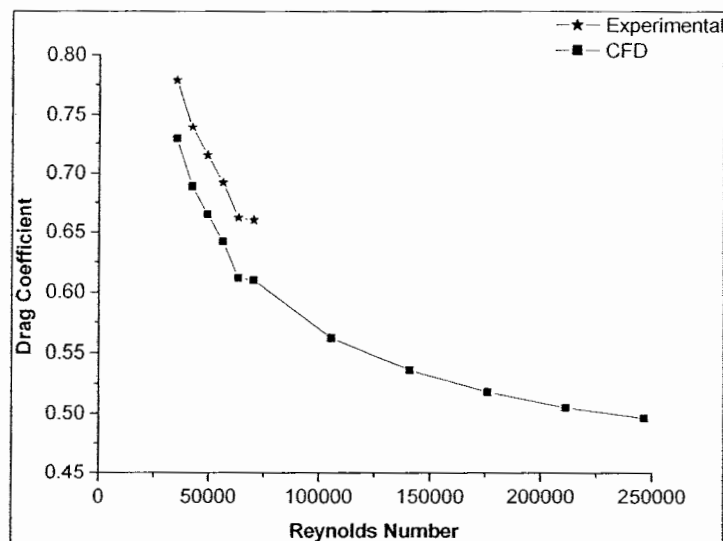
จากรูปที่ 2 เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมในอุโมงค์ลม และ CFD เปรียบเทียบกับทฤษฎีอยู่ในช่วง Reynolds number เท่ากับ  $2.2 \times 10^4 - 3.0 \times 10^5$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อ Reynolds number สูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดที่ผิวทรงกลมกับอากาศลดลง ผิวทรงกลมจะได้รับผลจากความดันอากาศเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี ซึ่งสามารถนำสภาวะการไหล สมการการคำนวณ ชนิดและจำนวนกริด ไปทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กเพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านต่อไป

## 2. การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ใช้วัสดุทำจากโฟม แบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 18 - 36 km/hr โดยทดสอบควบคู่กับวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ขนาดแบบจำลอง และ Test section เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนที่จะทดสอบขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขนาดของแบบจำลอง กริด และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ในอุโมงค์ลม และ CFD

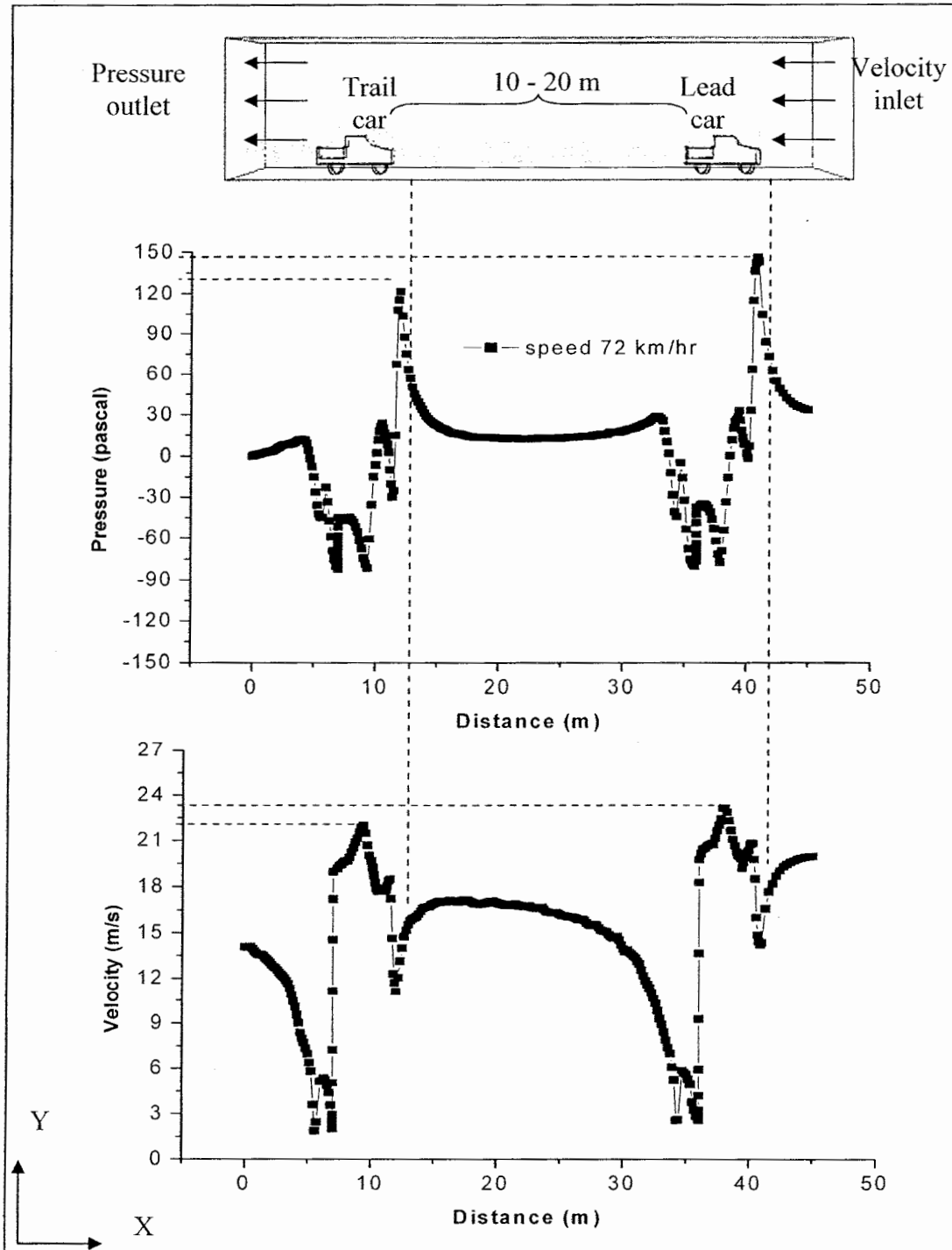
รูปที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ Reynolds number เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความกว้างของ Test section ในอุโมงค์ลม ทำให้สภาวะการไหลไม่คงที่ เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนืด เมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแคบลง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ที่จะนำขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองมาใช้ในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในการทดสอบรถขนาดจริง

### 3. การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กขนาดจริง กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันตามแนวยาว (แกน X)

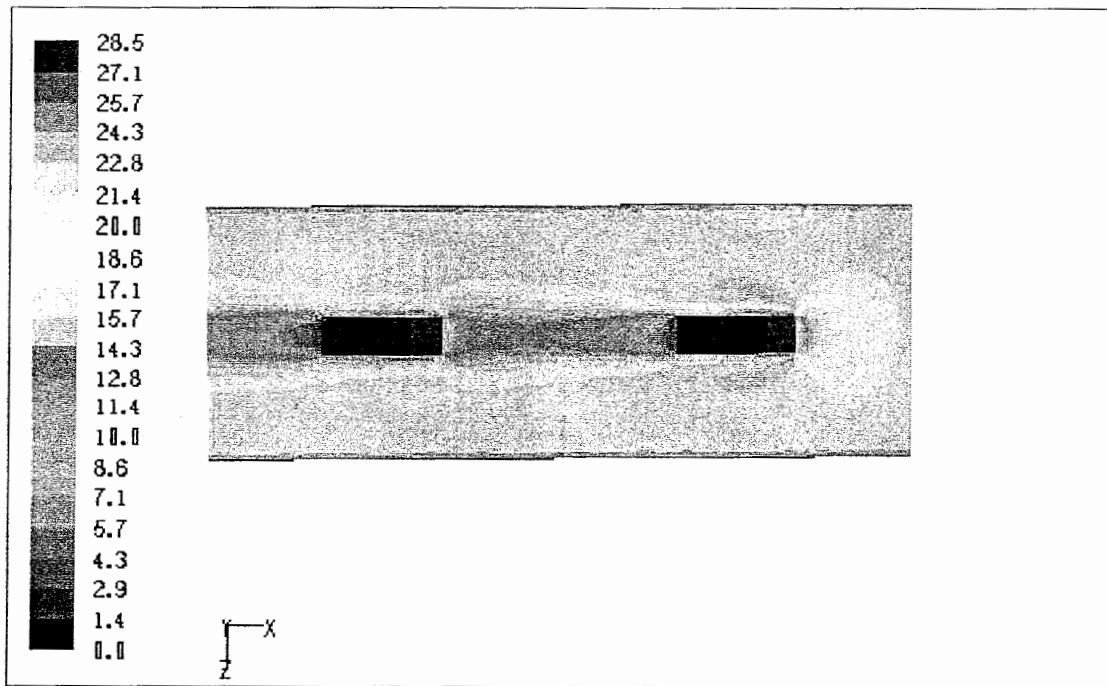
เงื่อนไขในการคำนวณไปใช้จำลองรถขนาดจริง แสดงในตารางที่ 1 โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยรถทั้งสองคันอยู่ห่างกันตามแนวยาว (แกน x) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 m ดังแสดงในรูปที่ 5 และทดสอบที่ความเร็ว 36, 54, 72, 90, 108, และ 126 km/hr หรือ (Reynolds number  $1.2 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน โดยได้ขยายขนาดความกว้าง และความสูง ของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD

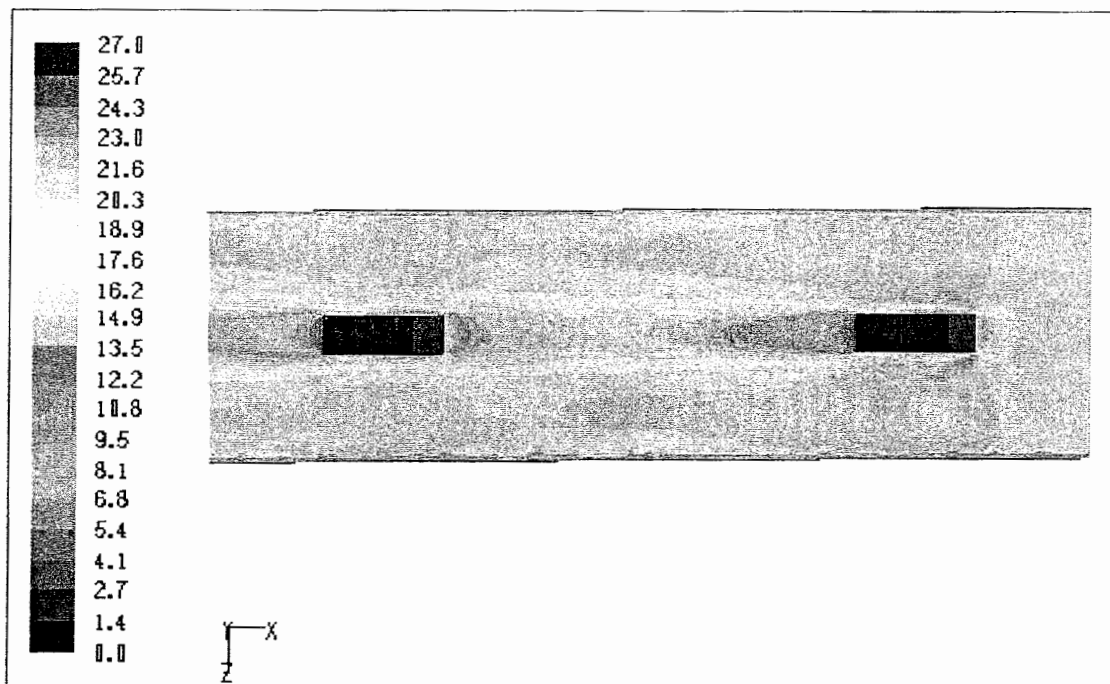
|                                                                          |                        |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| โปรแกรม GAMBIT                                                           |                        |
| ขอบเขตทางด้านเข้า (Inlet boundary condition)                             | Velocity inlet         |
| ขอบเขตทางด้านออก (Outlet boundary condition)                             | Pressure outlet        |
| จำนวน Grid                                                               | ประมาณ 728,644 cell    |
| โปรแกรม FLUENT                                                           |                        |
| ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)                                              | Segregated Solver      |
| ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)                                         | Implicit method        |
| แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulent model)                                   | Standard k-epsilon     |
| ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาคากรไหลบริเวณใกล้ผนัง (Near-wall treatment method) | Standard wall function |



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความดัน และความเร็วที่เกิดขึ้นกับรถคันหน้า (Lead car) และคันหลัง (Trail car) ตรงกลางของรถ ตามแนวแกน X



รูปที่ 6 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะกันหลัง X 10



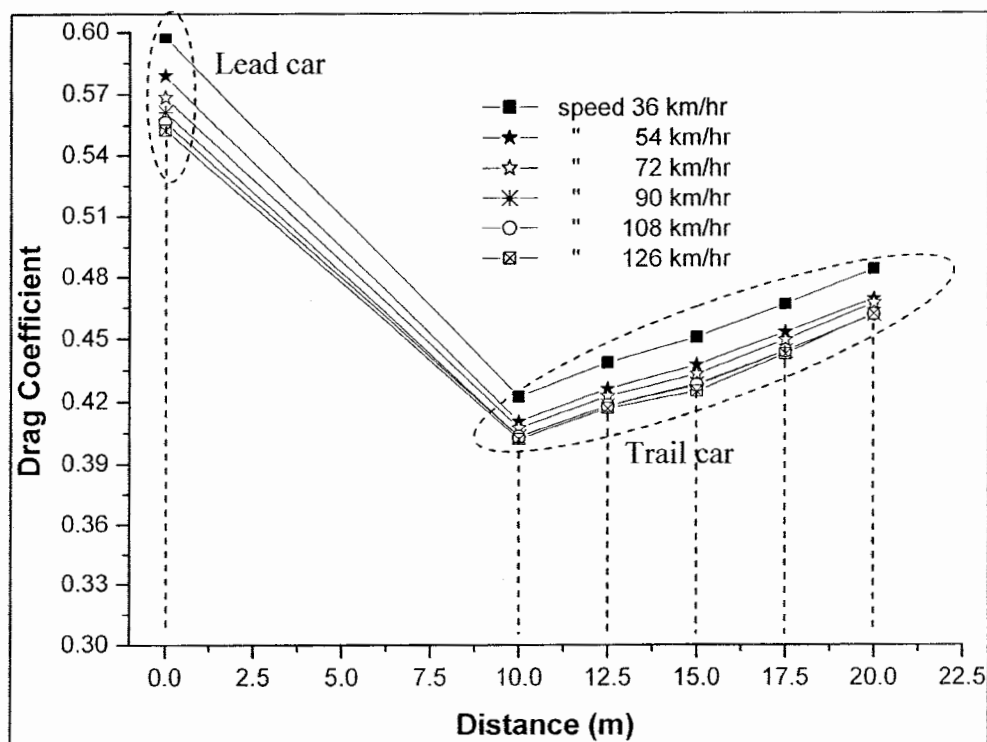
รูปที่ 7 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะกันหลัง X 17.5



การเปลี่ยนแปลงความดัน และความเร็วของอากาศที่กระทำกับรถคันหน้ามีค่าสูงกว่าที่กระทำกับรถคันหลัง เพราะอากาศที่ปะทะกับด้านหน้าของรถ ความเร็วจะลดลง เนื่องจากเข้าใกล้จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) ซึ่งจะมีมีความดันมากกว่าความดันก่อนที่จะเริ่มเข้าปะทะกับด้านหน้ารถ หรือความดันในระบบ (Total pressure) และจะลดต่ำลงบริเวณท้ายกระบะเนื่องจากความเร็วลดลง ทำให้ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics pressure) ลดลงด้วย ดังนั้นพลังงานจะมีค่าลดลงเพราะ รถคันหน้าจะดูดซับพลังงานที่เรียกว่า เสดความดัน (Pressure head) และเสดความเร็ว (Velocity head) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎสมมูลพลังงาน สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

$$\left( \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right)_{Lead\_car} = \left( \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)_{Trail\_car} + h_L \quad (2)$$

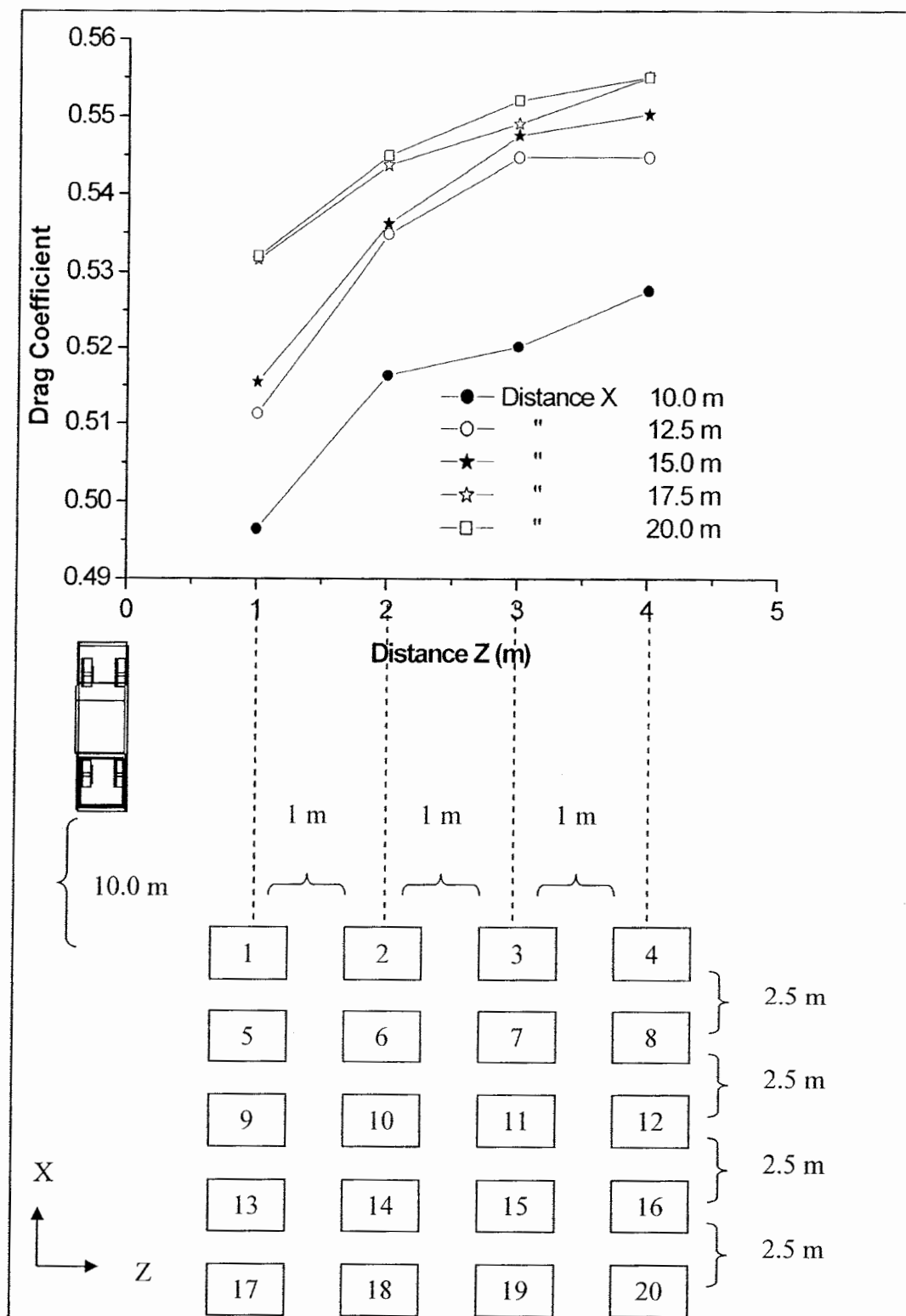
$h_L$  คือการสูญเสียเสดรวม (head loss) แทนการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล,  $p_1$  คือความดันที่รถคันหน้า,  $p_2$  คือความดันที่รถคันหลัง,  $v_1$  คือความเร็วที่รถคันหน้า,  $v_2$  ความเร็วที่รถคันหลัง,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ เท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  คืออัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ซึ่งค่า  $p_1 > p_2$  และ  $v_1 > v_2$  เสมอ ในกรณีที่ทำการทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังมีค่าลดลงกว่าคันหน้าดังแสดง ในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถทั้งสองคัน โดยคันหน้าค่า  $C_D$  จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วหรือ Reynolds number เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Reynolds number จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้  $C_D$  ลดลง แต่จะไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของรถคันหลัง ส่วนรถคันหลังค่า  $C_D$  จะลดลงจากรถคันหน้า และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรถคันหลังมีระยะห่างเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เสดความดัน และเสดความเร็วที่รถคันหลังได้รับ จากอิทธิพลของอากาศที่ปะทะรถคันหน้าจะลดลงตามระยะห่างที่มากขึ้น อีกอย่างหนึ่งคือความเร็วหรือ Reynolds number ที่สูงขึ้น อิทธิพลของอากาศไหลสวนทิศทางย้อนกลับตามรูปทรงของรถ ทำให้เกิดการแยกตัว (Separation) ที่สูงขึ้น และในส่วนที่แยกนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน หรือเรียกว่าเกิดคลื่นวน (Wake) ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถคันหน้า ทำให้ Reynolds number สูงขึ้น จึงมีส่วนทำให้ค่า  $C_D$  ลดลงด้วยเช่นกัน



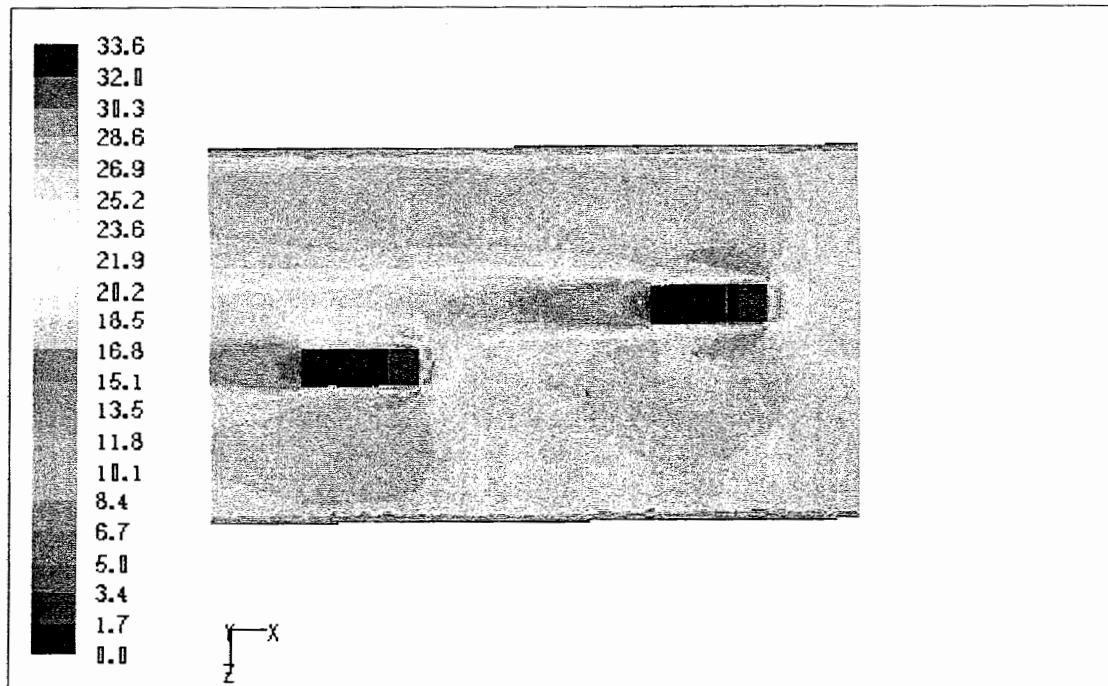
รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลัง ที่ความเร็วและระยะห่างที่ต่างกัน

#### 4. การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันเรียงกัน

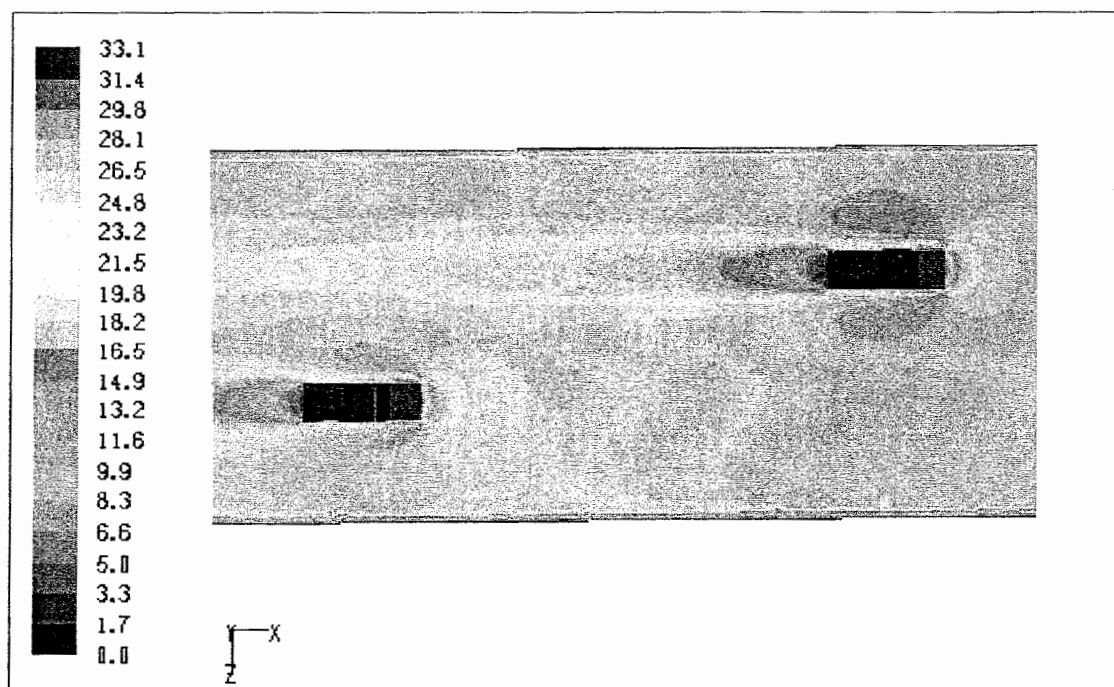
เป็นการจำลองรถขนาดจริง เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลัง โดยที่รถทั้งสองอยู่ห่างกันตามแนวยาว (Distance X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, และ 20 m และห่างกันตามแนวขวาง (Distance Z) 1, 2, 3, และ 4 m ซึ่งแต่ละตำแหน่งของรถคันหลังที่ทำการทดสอบจะเรียงลำดับเป็นหมายเลข 1 - 20 ทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr ความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน ขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองเหมือนกรณีวิ่งตามกันตามแนวยาว ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ระยะห่างของรถตามแนวแกน X และ แกน Z โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังจะลดลงจากคันหน้า เนื่องจากรถคันหลังวิ่งเข้าใกล้สนามการไหลแบบปั่นป่วน ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถคันหน้า ซึ่งมีเสถียรภาพและเสถียรภาพที่ลดลง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังลดลงด้วย และเมื่อรถคันหลังอยู่ระยะห่างออกไปตามแนวแกน X และแกน Z ค่าเสถียรภาพและเสถียรภาพที่รถคันหลังได้รับจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงเพิ่มขึ้นตามระยะที่รถคันหลังอยู่ห่างออกไปทั้งตามแนวแกน X และแกน Z



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังที่ระยะห่าง ระยะเชิงต่างๆ ที่ความเร็ว 90 km/hr



รูปที่ 10 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X 10, Z 1



รูปที่ 11 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X 17.5, Z 2

## 5. อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) โดยยึดรถคันหน้าเข้ามาเป็นกรณีเปรียบเทียบ หาผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยคำนวณได้จาก

$$\Delta \overline{C_D}(V_t) = \overline{C_D}(V_t)_{baseline} - \overline{C_D}(V_t)_{mod ifile} \quad (3)$$

$\Delta \overline{C_D}(V_t)$  คือค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วเดียวกัน โดยยึดรถคันหน้าเป็นมาตรฐาน โดยค่าที่ได้ นำไปหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันได้จากสมการ

$$\Delta \mu(V_t) = \frac{\rho \times ucf \times sfc \times V_t^2 \Delta \overline{C_D}(V_t) A}{0.85} \quad (4)$$

$\Delta \mu(V_t)$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วกำหนด (L/100 km),  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $ucf$  = ค่าแฟกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072,  $sfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล คอมมอนเรล ขนาดกระบอกสูบ 3 ลิตร ยี่ห้อโตโยต้า วิโก้รีรันเนอร์ทดสอบ,  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของรถ ( $\text{m}^2$ ),  $0.85$  = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถ โดยคิดที่ความเร็วเฉลี่ย และเทียบกับระยะทางวิ่งที่ 100,000 km ค่าเป็นขวกแสดงว่าลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน กรณีวิ่งตามกัน (ที่ความเร็วเฉลี่ย)

| ระยะห่างแนวแกน<br>(X) (m) | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(ลิตร/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km (ลิตร) | ลดอัตราการ<br>สิ้นเปลืองน้ำมันเฉลี่ย<br>(%) |
|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| รถคันหน้า                 | -                                  | -                                | -                                           |
| 10.0                      | 0.4644                             | 464.4                            | 5.70 %                                      |
| 12.5                      | 0.4197                             | 479.7                            | 5.15 %                                      |
| 15.0                      | 0.3903                             | 390.3                            | 4.79 %                                      |
| 17.5                      | 0.3418                             | 341.8                            | 4.19 %                                      |
| 20.0                      | 0.2885                             | 288.5                            | 3.54 %                                      |

ตารางที่ 3 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน กรณีวิ่งตามกัน ที่ความเร็ว 90 km/hr

| ระยะห่างแนวแกน<br>(X) (m) | ที่ความเร็ว 90 km/hr<br>(ลิตร/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km (ลิตร) | ลดอัตราการ<br>สิ้นเปลืองน้ำมัน |
|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| รถคันหน้า                 | -                                     | -                                | -                              |
| 10.0                      | 0.5313                                | 531.3                            | 6.52 %                         |
| 12.5                      | 0.4813                                | 481.3                            | 5.91 %                         |
| 15.0                      | 0.4466                                | 446.6                            | 5.48 %                         |
| 17.5                      | 0.3939                                | 393.9                            | 4.83 %                         |
| 20.0                      | 0.3347                                | 334.7                            | 4.11 %                         |

ตารางที่ 4 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน กรณีวิ่งเยื้องกัน ที่ความเร็ว 90 km/hr

| ระยะห่าง<br>แนวแกน<br>(X) (m) | อัตราการสิ้นเปลืองที่ 90 km/hr (ลิตร/100 km)<br>ที่ระยะเยื้องต่าง ๆ แนวแกน (Z) |        |        |        |        | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km<br>(ลิตร) | ลดอัตรา<br>การ<br>สิ้นเปลือง<br>น้ำมันเฉลี่ย |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------------|----------------------------------------------|
|                               | 1 m                                                                            | 2 m    | 3 m    | 4 m    | เฉลี่ย |                                     |                                              |
| รถคันหน้า                     | -                                                                              | -      | -      | -      | -      | -                                   | -                                            |
| 10.0                          | 0.2178                                                                         | 0.1509 | 0.1381 | 0.1133 | 0.1550 | 115.0                               | 1.90 %                                       |
| 12.5                          | 0.1681                                                                         | 0.0891 | 0.0558 | 0.0558 | 0.0922 | 92.2                                | 1.13 %                                       |
| 15.0                          | 0.1539                                                                         | 0.0844 | 0.0464 | 0.0373 | 0.0805 | 80.5                                | 0.99 %                                       |
| 17.5                          | 0.0998                                                                         | 0.0592 | 0.0413 | 0.0212 | 0.0554 | 55.4                                | 0.68 %                                       |
| 20.0                          | 0.0985                                                                         | 0.0551 | 0.0313 | 0.0212 | 0.0515 | 51.5                                | 0.63 %                                       |

ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 เป็นการคำนวณคำนวณที่ความเร็ว 90 km/hr ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้วิ่งในสภาวะปกติ โดยผลของการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน แสดงให้เห็นว่า เมื่อรถคันหลัง วิ่งเข้าใกล้รถคันหน้ามากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เกิดจาก สนามการไหลที่มีค่าเสดพลังงานที่ต่ำกว่าจะมีผลกระทบกับรถคันหลังมากที่สุด แต่ระยะห่างที่ใกล้เกินไปก็มีผลกับความปลอดภัยเป็นหลัก ซึ่งเราสามารถนำหลักการนี้มาประยุกต์ และวิธีการขับขี เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

ความพยายามที่จะลดแรงต้านที่กระทำกับรถยนต์ ได้ดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง โดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับปรุงทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม แต่วิธีการขับซึ่งโดยการวิ่งตามรถคันหน้า ก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถลดอัตราการสิ้นเปลือง ซึ่งจากการทดสอบ ที่ระยะห่าง 10 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลงจากคันหน้า 6.52 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ในกรณีที่ 2 โดยรถคันหลังวิ่งเยื้องกัน ที่ระยะห่าง 10 m และระยะเยื้อง 1 เมตร อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถคันหลังลดลงจากคันหน้า 1.90 % จากงานวิจัยนี้สรุปว่า รถคันหลังที่วิ่งเข้าใกล้รถคันหน้าทั้งแนวยาวและแนวขวางมากขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังลดลงเท่านั้น เนื่องจากความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) จะลดลงเมื่อเข้าใกล้คันหน้า ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการลด อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ได้อีกวิธีหนึ่ง

ค่าที่ได้จากการทดสอบอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจาก CFD ไม่สามารถที่จะกำหนดสถานะคุณสมบัติได้เหมือนจริงทุกประการ และการวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันให้แม่นยำนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ถึงแม้จะควบคุมสถานะการขับให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนงานวิจัย ประจำปี 2550

## บรรณานุกรม

- Spalart, P.R. 2000. "Strategies for turbulence modeling and simulation". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. (21): 252-263.
- Horinouchi, N. 1995. "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System". SAE 950628.
- Van Dam, C. P. 1999. "Recent experience with different methods of drag prediction". *Progress in Aerospace Sciences*. (35): 751-798.
- Prasad, A. and Williamson, C.H.K. 1997. "A method for the reduction of bluff body drag". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. (69-71): 155-167.

- Grosche, F.R. and Meier, G.E.A. 2001. "Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. (89): 1201-1218.
- Muyl, F., Dumsa, L. and Herbert, V. 2004. "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry". *Computers & Fluids*. (33): 849-858
- Brownd, F. 2005. "Reducing aerodynamics drag and fuel consumption". *Advanced Transportation Workshop Stanford University*.
- Leuschen, J. and Cooper, K.R. 2006. "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers". *2006 SAE International*, 06CV-222.



## อากาศพลศาสตร์เพื่อการประหยัดพลังงานสำหรับรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยวิธีจำลอง เชิงตัวเลข

### Aerodynamics for Energy Economy in Small Utility Truck By Computational Fluid Dynamics

ปรัชญา มุขดา<sup>1\*</sup>, กุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>1</sup>, วีระพันธ์ สีหานาม<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร 0-8687-44606 โทรสาร 0-45353-380 \*อีเมล: mukdaen@hotmail.com

Prachya Mukda<sup>1\*</sup>, Kulachate Pianthong<sup>1</sup>, Wirapan Seehanam<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University, Ubon Ratchatani, 34190,

Thailand. Tel: 0-8687-44606 Ext. 3382, Fax: 0-45353-380 \*E-mail: mukdaen@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

รูปร่างของรถยนต์ มีผลกระทบโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากรูปร่างของรถยนต์เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงและโมเมนต์ที่กระทำต่อรถยนต์ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคูณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ ของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กที่มีทั้งด้านหน้าสองตอน ในกรณีต่าง ๆ เช่น การปรับปรุงส่วนกระเบของรถ การต่อเติมอุปกรณ์เสริมของรถที่มีรูปร่างแตกต่างจากเดิม ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน และศึกษากรณีรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กวิ่งตามกัน ในระยะห่างและความเร็วที่ต่างกัน โดยตรวจสอบผ่านการจำลองเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Fluent จำลองแบบ 3 มิติ ในการศึกษา จะศึกษาที่ความเร็วระหว่าง 10 – 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ค่าเรย์นอลด์สประมาณ  $10^4 - 10^7$  เพื่อตรวจสอบกลไกการลดแรงต้าน และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสนามการไหล จากการศึกษาสามารถนำความเข้าใจเกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็ก มาใช้ในการลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน เพื่อประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อน

car at various speeds and distances have been investigated. The investigation has been carried out by using 3 dimensional computational fluid dynamic technique (Fluent). The car speed are between 10 – 120 km/hr or Reynolds number of  $10^4 - 10^7$ . From the study, the understand on the aerodynamic of the pick-up car be obtained and is useful to reduce to drag coefficient in order to save the driving energy.

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ ยึดทฤษฎีของสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาวิธีการจำลองเชิงตัวเลข โดยนำผลมาเปรียบเทียบกับทดสอบในอุโมงค์ลม และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแต่ละชนิด นำมาใช้ในการจำลองเพื่อหาแรงต้านของยานพาหนะชนิดต่าง ๆ เช่น เครื่องบิน รถไฟ รถยนต์ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการประยุกต์การจำลองเพื่อลดแรงต้านของยานพาหนะ [1,2] โดยใช้หลักการเดียวกันกับการศึกษาการลดแรงต้านของวัตถุเพียวลม (bluff body) เพื่อที่จะทำให้ผลต่างของแรงดันและจุดแยกตัวของอากาศ (separation point) ที่ไหลผ่านวัตถุเกิดน้อยที่สุด [3] ได้นำหลักการนี้มาปรับปรุงรูปร่างของรถยนต์ประเภทต่าง ๆ เพื่อลดแรงต้าน และเพิ่มความเร็วในการขับเคลื่อนของรถแข่ง [4] สามารถนำความรู้ด้านศึกษาอากาศพลศาสตร์ออกแบบรถยนต์แบบใหม่ในอนาคต เพื่อการออกแบบการทดสอบในอุโมงค์ลมการผลิตรถยนต์ มีการทดสอบในวิธีจำลองเชิงตัวเลข ผลกระทบของอุโมงค์ลมในการทดสอบ องค์ประกอบที่มีผลต่อรูปร่างของรถ เพื่อการผลิตอุปกรณ์การทดสอบใช้เวลาน้อย และมีคุณภาพ [5] ได้นำความรู้มาใช้

#### Abstract

Configuration of car usually affects directly to the drag coefficient, because car configuration is an important factor generating the different flow field. This flow field causes different force and moment reacted to the car. This study aims to investigate the aerodynamic characteristic of the cab pick-up truck. The pick-up box of the car has been modified while the frontal area is kept constant. Also, the aerodynamics of the tailed

ในการวางแผนในการขับขึ้นเพื่อการประหยัดพลังงาน และความปลอดภัย ในกรณีของรถยนต์ขนาดเล็ก และรถบรรทุกขณะวิ่งแซง เพื่อที่จะนำค่าแรงต้าน แรงดัน ที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ขนาดเล็ก เพื่อการออกแบบโครงสร้างการควบคุมของรถให้มีเสถียรภาพการขับที่สูงสุด [6] อย่างไรก็ตาม การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในเมืองไทยในปัจจุบัน ถึงแม้จะมีการออกแบบเพื่อลดแรงต้านที่ได้อยู่แล้ว แต่ก็สามารถที่จะปรับปรุงรูปร่างของรถ ให้ลดแรงต้านลดลงอีกได้

การศึกษานี้ จะนำความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาศึกษารถยนต์บรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในทั่วไปในประเทศไทย โดยการปรับปรุงรูปร่างของกระเบของรถ ศึกษากรณีของรถวิ่งตามกันที่ระยะห่าง และความเร็วที่ต่างกัน ทดสอบโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics) เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาประยุกต์ในการออกแบบรูปร่างของรูปทรงกระเบ และการวางแผนในการขับขึ้น เพื่อประหยัดพลังงาน

## 2. ทฤษฎี

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือน และความดันที่กระจายทั่วพื้นผิวของวัตถุสามารถหาได้จากกรณีที่เกิดแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน x และ y ของแรงรวมกระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$  คือ

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (1)$$

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (2)$$

เมื่อ  $\tau_w$  คือแรงเฉือนที่ผิววัตถุ (wall shear stress),  $p$  คือความดันที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุเนื่องจากความดัน ดังนั้นจึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน x และ y ที่กระทำต่อวัตถุได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (3)$$

$$F_L = \int dF_y = - \int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (4)$$

เมื่อ  $F_D$  คือแรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Drag),  $F_L$  คือแรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Lift) ทำการออกแบบเพื่อลดแรงต้านโดยพิจารณาเฉพาะ pressure drag

$$F_D = \int_{front} p \cos\theta dA - \int_{back} p \cos\theta dA \quad (5)$$

ซึ่งลักษณะการไหลที่นำมาวิเคราะห์ คือการไหลแบบปั่นป่วนอัดตัวไม่ได้ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุและค่า Reynolds number คือสัดส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$R = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (6)$$

โดย  $R$  คือ Reynolds number,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ,  $V$  คือความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุ,  $L$  คือความยาวของวัตถุที่มีผลต่อสภาพการไหล และ  $\mu$  คือค่าความหนืดของอากาศ

ในกรณีศึกษา Reynolds number จะอยู่ในช่วง  $10^4 - 10^7$  ซึ่งสภาพการไหลจะมีผลโดยตรงมาจากความเฉื่อยเป็นหลัก โดยแรงหลักที่กระทำกับวัตถุคือแรงต้านเนื่องจากความดัน (pressure drag;  $F_p$ ) สามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความดันคือ

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (7)$$

โดย  $V$  คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุ,  $A$  คือพื้นที่ที่หาบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล,  $C_p$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความดัน (pressure drag coefficient) และแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (shear stress;  $F_f$ ) สามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานคือ

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (8)$$

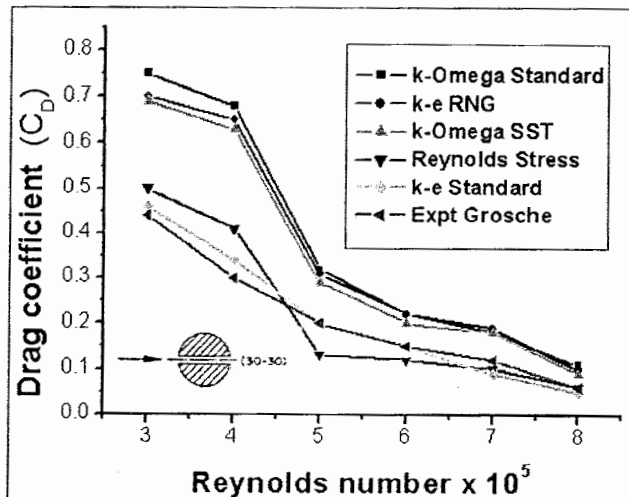
โดย  $C_f$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด,  $L$  คือความยาวของพื้นผิวในแนวนานกับทิศทางการไหล และ  $B$  คือความกว้างของพื้นผิว สมการหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (9)$$

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ, และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

## 3. การคำนวณเชิงตัวเลขและการตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน

การศึกษาค้นคว้า ได้ตรวจสอบการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนประเภทต่าง ๆ โดยตรวจสอบผ่านทาง การจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ Fluent เทียบกับการศึกษาของ Grosche [3] ซึ่งเป็นการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของวัตถุทรงกลม เเจาะรูตรงกลาง โดยใช้ข้อมูลเป็นเครื่องมือในการทดสอบ ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 1

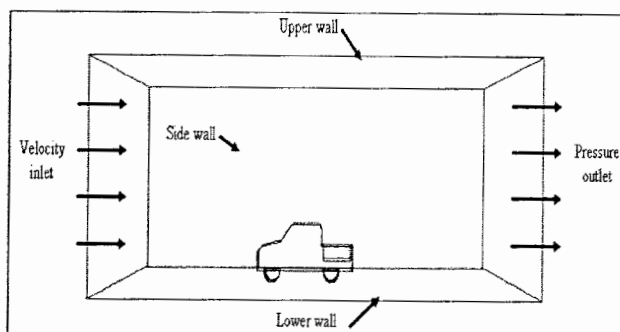


รูปที่ 1 เปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่าง ๆ กับผลการทดสอบของ Grosche [3]

จากผลการเปรียบเทียบ จึงเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน k- $\epsilon$  ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมของ Grosche [3] มากที่สุด โดยใช้จำนวนของ กริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ เป็น Mesh แบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) ซึ่งจะใช้ในการจำลองของรถบรรทุกขนาดเล็ก

### 3.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพด้าน กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

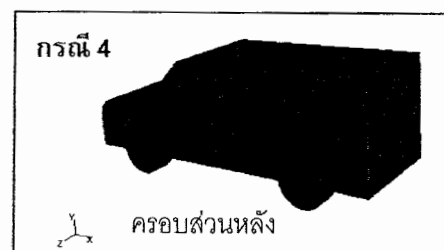
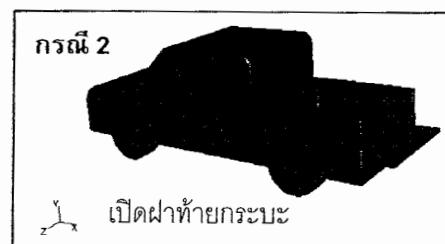
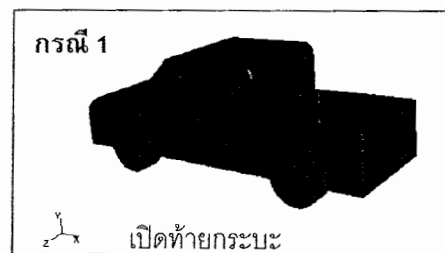
กำหนดแบบขอบเขตการจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยกำหนดเป็นกล่องสี่เหลี่ยม เสมือนเป็นบรรยากาศล้อมรอบรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นการศึกษากริดขนาดเล็กที่นิ่งด้านหน้าสองตอน ในกรณีกระบะหลังเป็นลักษณะเปิดท้ายกระบะปกติ, เปิดฝาท้ายกระบะ, ปิดท้ายกระบะ และรถครอบส่วนหลังทั้งหมด ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน k- $\epsilon$  จำนวนของกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ เป็น Mesh แบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) โดยทดสอบที่ความเร็ว 10, 15, 20, 25, 30, 35 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์นอลด์สประมาณ ( $10^4 - 10^7$ ) เพื่อที่จะศึกษาอากาศพลศาสตร์และตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่เกิดจากการปรับปรุงรูปร่างของท้ายกระบะ เพื่อที่จะนำมาปรับปรุงเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านต่อไป



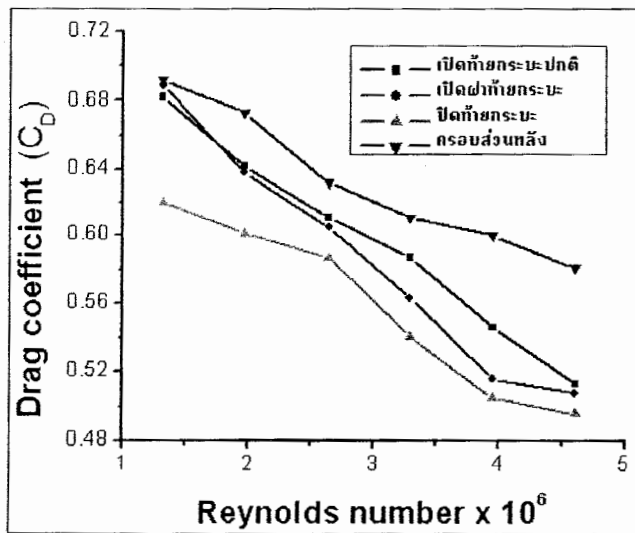
รูปที่ 2 ขอบเขตและเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณดังรูปที่ 2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความเร็วสัมพัทธ์ของอากาศที่ผิวรถยนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของความหนืด
2. สมมุติให้ความเร็วรถคงที่และคงตัว
3. ความดันในสนามความเร็วที่ทางออก (Pressure outlet) ไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ และให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ
4. การศึกษาที่สมมุติให้เป็นการไหลที่ไม่มีลมปะทะด้านข้าง

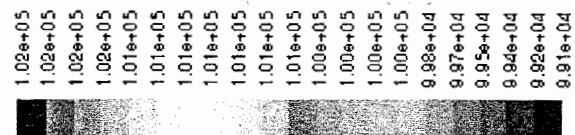
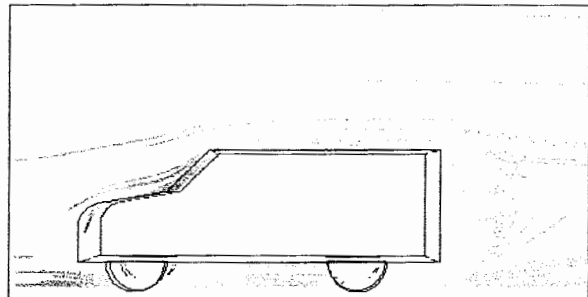
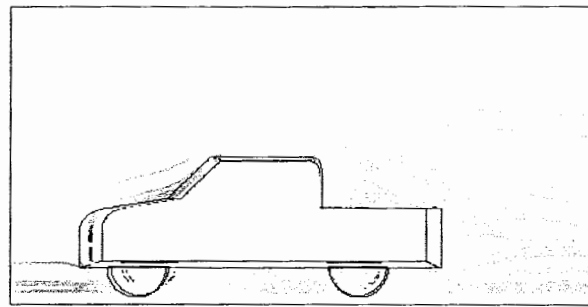
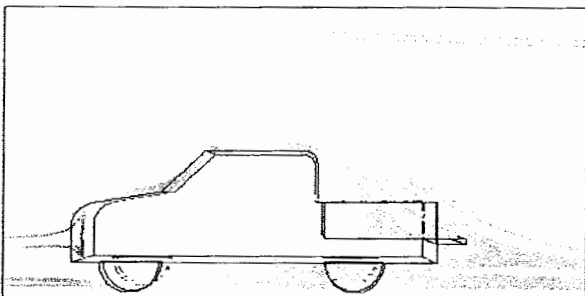
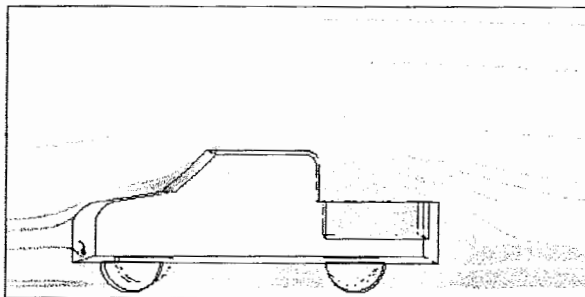


รูปที่ 3 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์แรงต้านกับค่า Reynolds number ของกรณีที่ใช้ในการจำลอง

จากผลการจำลองนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบเพื่อลดความดันใน ด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อ การปรับปรุงกระบะของรถโดยที่ทำให้การไหลราบเรียบมากขึ้น จะช่วยให้แรงต้านลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเส้นแสดงระดับความดันในรูปที่ 5



รูปที่ 5 Path line colored by static pressure (pascal)

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีการเปิดกระบะปกติ นั้น ขนาดของแรงต้านนั้น จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระบะ, 3 บริเวณท้ายรถทั้ง ด้านบนและด้านล่าง

ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดัน ซึ่งบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจาก โมเมนตัมของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระบะ ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งระหว่างห้องโดยสารกับบริเวณกระบะ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (wake) ซึ่งก็คือการเกิดการสูญเสีย (loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระบะท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เมื่อนำสมการเบอร์นูลลีมาวิเคราะห์ จะพบว่า การไหลของชั้นนอกมีความเร็วกว่าการไหลของชั้นใน เพราะของไหลที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (viscosity,  $\mu$ ) เกิดแรงเฉือนต้านการไหลช้าลงและความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นในมีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูง ๆ ได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระบะลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน (พิจารณาจากสมการเบอร์นูลลี) เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอก ส่งถ่ายเข้าสู่ภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและ

ด้านหลัง มีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของอากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระเบระ ดังนั้นแรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้าน ดังสมการที่ (5) ดังที่กล่าวมา

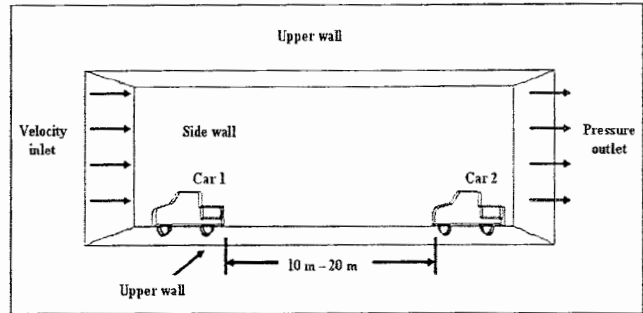
กรณีที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีลักษณะเปิดฝาท้ายกระเบระ นั้น ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านมีการลดลงน้อยมาก โดยใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ 1 ซึ่งในกรณีที่ 2 นั้นการปะทะของอากาศกับฝาท้ายกระเบระจะลดลง เนื่องจากเปลี่ยนแนวการติดตั้งฝาท้ายกระเบระไปทิศทางขนานกับการไหล ซึ่งเปรียบเสมือนกันยกกระดานของพื้นท้ายรถสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน (แรงกดเพิ่มขึ้น) แต่จะมีผลกระทบกับการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงยก มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งการยกกระดานพื้นท้ายรถจะมีผลต่อการกระจายตัวความดันที่ผิวบนของรถน้อยมาก แต่ความดันพื้นรถในกรณีที่ 1 จะสูงกว่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากการเปิดฝาท้ายกระเบระบังคับให้เกิดการหักตัวของอากาศ ซึ่งต้องใช้แรง (โมเมนตัม) เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงต้านและแรงยกลดลงในระดับหนึ่ง

กรณีที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยปิดครอบกระเบระ โดยการกระจายของความดันจากรูปที่ 5 กรณีที่ 3 เป็นการลดลงของการหมุนวนของอากาศ เนื่องจากไม่มีการปะทะของฝาท้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระเบระ จนมาถึงบริเวณท้ายกระเบระ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1 และ 2

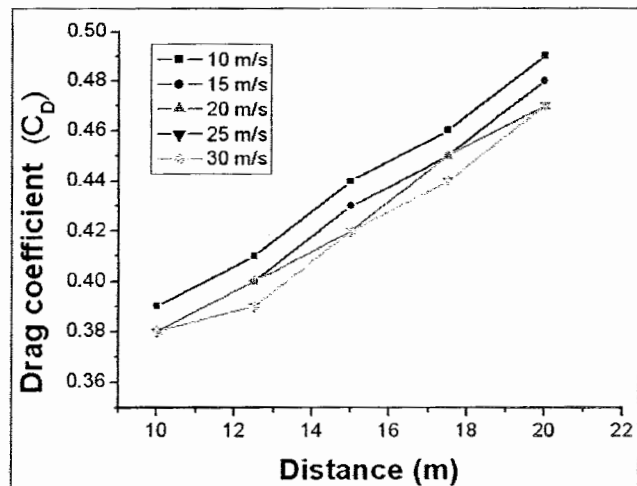
กรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยครอบหลังของกระเบระทั้งหมด วิเคราะห์จากรูปที่ 5 กรณีที่ 4 ความหนาของบริเวณห้องโดยสารและบริเวณกระเบระจะเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและล่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมตัดตรง ซึ่งเป็นรูปทรงด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical After body Geometry) โดยจากรูป พบว่ารูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างฉับพลัน มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี

### 3.2 การตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีวิ่งตามกัน

จากการศึกษาเบื้องต้น เป็นการกำหนดแบบขอบเขตการจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยกำหนดเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ลักษณะเดียวกันกับกรณีปรับปรุงท้ายกระเบระ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นการศึกษารถบรรทุกขนาดเล็กวิ่งตามกัน ในระยะห่างต่างกัน โดยจำลองที่ความเร็วหลายระดับ จำนวนของกริด (Grid) 750,000 เอลิเมนต์ เป็น Mesh แบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) โดยทดสอบระยะห่าง 10 - 20 เมตร ที่ความเร็ว 10, 15, 20, 25, 30 เมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาอากาศพลศาสตร์และตรวจสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ระยะห่าง และที่ระดับความเร็วต่าง ๆ ของรถที่วิ่งตามหลัง

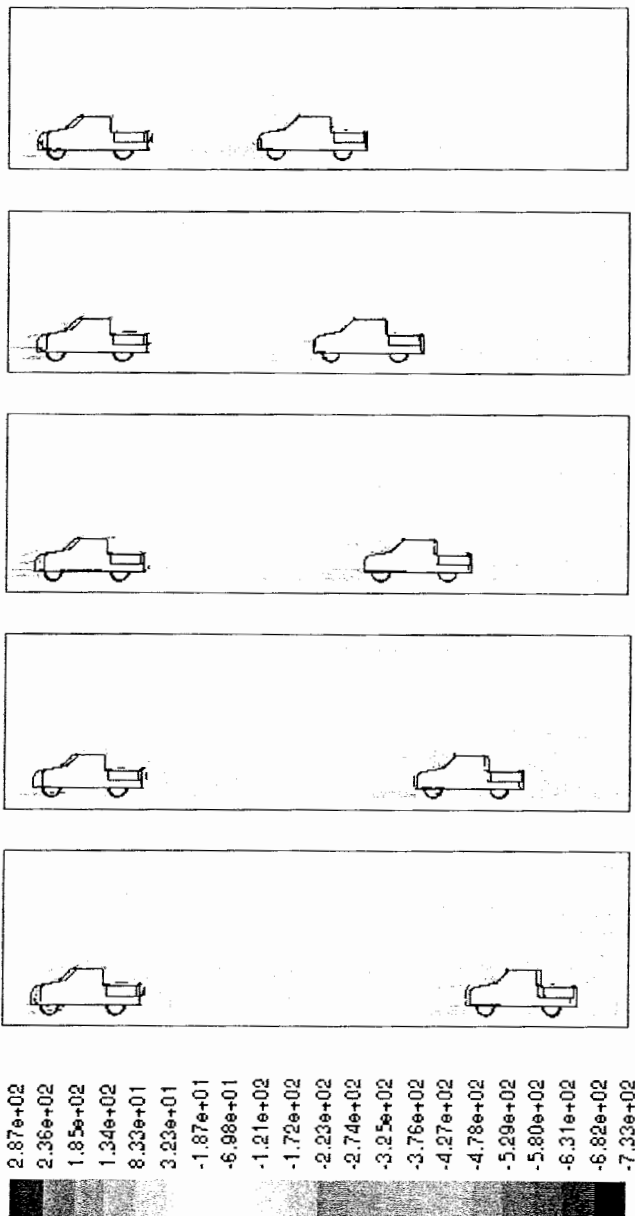


รูปที่ 6 ขอบเขตและเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง



รูปที่ 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันที่ 2 ที่ระยะห่างและระดับความเร็วต่าง ๆ

จากรูปที่ 7 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันที่ 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันที่ 2 จะแปรผันตรงกับระยะห่างกับรถคันที่ 1 เมื่อระยะห่างมาก ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมากตาม เนื่องจากอิทธิพลของอากาศไหลสวนทิศทางย้อนกลับตามรูปทรงของรถ ทำให้เกิดการแยกตัว (Separation) และในส่วนที่แยกนี้ จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน หรือเรียกว่าเกิดคลื่นวน (wake) ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถ คันที่ 1 ซึ่งทำให้ค่าเรย์นัลด์ส์สูงขึ้น จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำลง และเมื่อระยะห่างมากขึ้น อิทธิพลของคลื่นระลอกของรถคันที่ 1 ก็ต่ำลง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันที่ 2 สูงขึ้น สามารถอธิบายได้จาก รูปที่ 8 ซึ่งแสดงเส้นระดับความดันและทิศทางการไหล ในระยะห่างต่าง ๆ กัน โดยความดันที่เกิดขึ้นของรถคันที่ 2 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทำให้แรงต้านเนื่องจากความดันลดลง สัมประสิทธิ์แรงต้านจึงต่ำลง



รูปที่ 8 Path line colored by static pressure (pascal)

#### 4. สรุปผลและเสนอแนะ

##### 4.1 กรณีปรับปรุงท้ายกระบะ

จากการวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (จากการจำลองรถบรรทุกขนาดเล็ก 3 มิติ) ที่ความเร็วต่าง ๆ ของทั้ง 4 กรณีนั้น ซึ่งจากการปรับปรุง สามารถตรวจสอบการลดลงและเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากการเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 เปิดท้ายกระบะ ซึ่งเป็นกรณีที่มีการใช้งานของรถโดยปกติ ในกรณีที่ 2 เปิดฝาท้ายกระบะสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ย 1.73%, กรณีที่ 3 ปิดครอบกระบะ สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ย 6.45%, กรณีที่ 4 โดยครอบท้ายกระบะทั้งหมด กรณีนี้จากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของกระบะ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 5.60% จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีเปิดท้ายกระบะจะให้ค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด เพราะฉะนั้นการพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่กระทำ

กับรถบรรทุกขนาดเล็กให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงทรงให้มีลักษณะเพรียวลม นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ที่ทาบในแนวทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ หรือกล่าวคือ ออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ

##### 4.2 กรณีร่ว้งตามกัน

ตารางที่ 1 การลดลงโดยเฉลี่ยของ ( $C_D$ ) รถคันที่ 2 ที่ความเร็วต่าง ๆ

| ระยะห่าง (m) | ( $C_D$ ) คันที่ 1 | ( $C_D$ ) ที่ลดลงคันที่ 2 |
|--------------|--------------------|---------------------------|
| 10.0         | 0.65               | 30.14%                    |
| 12.5         | 0.65               | 27.83%                    |
| 15.0         | 0.65               | 19.08%                    |
| 17.5         | 0.65               | 14.38%                    |
| 20.0         | 0.65               | 8.57%                     |

จากตารางเมื่อระยะห่างของรถสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ยของรถคันที่ 2 จะสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันที่กระทำ เนื่องจากอิทธิพลของการแยกตัวจากการไหลผ่านรถคันที่ 1 ต่ำลง ดังนั้นกรณีการขับรถยนต์เพื่อที่จะให้แรงต้านของรถต่ำ ก็ควรที่จะขับรถให้ใกล้กับรถยนต์คันหน้าให้มากที่สุด แต่ก็ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและตามข้อที่กฎหมายกำหนด โดยจะมีการปรับปรุงและศึกษาต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน สามารถช่วยให้การขับเคลื่อนรถด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการขาดแคลนข้อมูลที่ใช้ได้ถูกต้องด้วยกันดังนี้ คือความไม่ถูกต้องของแบบจำลองของความปั่นป่วน ความผิดพลาดของการแสดงเค้าโครงรถ จำนวนกริดที่น้อยเกินไป และการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขต

##### เอกสารอ้างอิง

- [1] C.P. van Dam. Recent experience with different methods of drag prediction. Progress in Aerospace Sciences, 35 (1999) ,751-798
- [2] S N Singh, L Rai, P Puri, and A Bhatnagar. Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles Proc. KMEchE. Automobile Engineering, 219(2000), 98-114
- [3] F.R. Grosche, G.E.A. Meier. Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2001), 1201-1218
- [4] H. Fukuda, K. Yanaginoto, H. China, and K. Nakagawa. Improvenent of vehicle aerodynamics by wake control. SAE Review, 16 (1995), 151-155
- [5] F. Muyl, L. Dumas, and V. Herbert. Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry. Computers & Fluids, 33 (2004) 849-858

- [6] M.Tomiyama, K. maeda, and F. Nakamura. The development of a method to obtain the optimum lift coefficient using the vehicle dynamic analysis. JSAE Review, 23 (2002), 69-74
- [7] S. Yamamoto, K. Yanagimoto. H. Fukuda, H. China, and K. Nakagawa. Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles. JSAE Review, 18 (1997), 39-44
- [8] อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว. การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่งวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 13, ฉบับที่ 2 เม.ย.-มิ.ย 2546

# อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดเล็ก โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

## Aerodynamics Utility Truck By Computational Fluid Dynamics

ปรัชญา มุขดา<sup>1\*</sup>, วีระพันธ์ สีหานาม<sup>2</sup> และ กุลเชษฐ เพียรทอง<sup>3</sup>

นักศึกษาระดับมหาบัณฑิต<sup>2</sup> นักศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต<sup>3</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทรศัพท์ 0833662686 โทรสาร 045353380 อีเมลล์ mukdaen@hotmail.com

P. Mukda<sup>1\*</sup>, W. Seehanam<sup>2</sup> and K. Pianthong<sup>3</sup>

Master Degree Student<sup>2</sup> PhD Candidate<sup>3</sup> Assistant Professor, Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrab,  
Ubon Ratchathani, Thailand 34190 Tel 0833662686 Fax 045353380 email: mukdaen@hotmail.com

**บทคัดย่อ**—งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับรูปร่างท้าย  
ระนะของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็ก ห้องผู้โดยสารสอง 2 ตอน โดยมีการ  
รับเปลี่ยนอุปกรณ์ท้ายกระบะ หรือการติดตั้งอุปกรณ์เสริม และศึกษาผลกระทบ  
การไหลของอากาศเข้าสู่ภายในห้องผู้โดยสาร เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบ  
ประสิทธิภาพด้าน โดยใช้โปรแกรมจำลองความเร็วต่ำ และวิธีจำลองเชิงตัวเลข  
ซอฟต์แวร์ Fluent จำลองแบบ 3 มิติ ใช้สมการคำนวณการไหลมาตรฐาน k- $\epsilon$   
ทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 18 – 43 km/hr เพื่อ  
เปรียบเทียบและยืนยันผลก่อนการทดสอบขนาดจริง ด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข  
ที่ความเร็ว 36 – 126 km/hr ทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีเปิดกระบะ  
กบติ ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีต่างๆ คือ เปิดฝาท้ายกระบะ, ไม่มีฝาท้าย  
กระบะ, ปิดกระบะ, ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง, ครอบท้ายกระบะแบบตรง,  
และการเปิดกระจกรถวิ่ง 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ด้านและ 2 ด้าน ที่ความเร็วและ  
พื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน จากการทดสอบพบว่า กรณีเปลี่ยนรูปร่างท้าย  
กระบะ ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง มีสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุดคือ 0.4 (ที่  
ความเร็วเฉลี่ย) ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ 6.91 เปอร์เซ็นต์ กรณีครอบ  
ท้ายกระบะแบบตรง มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุดคือ 0.75 เพิ่มอัตราการ  
สิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 8.81 เปอร์เซ็นต์ และกรณีเปิดกระจกรถวิ่ง 1 ด้าน และ 2  
ด้าน จะเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็น 0.34 และ 0.58 เปอร์เซ็นต์  
การศึกษานี้ยืนยันว่า การลดการไหลเข้าห้องผู้โดยสาร หรือลดการหมุนวนของ  
อากาศที่เกิดจากรูปร่างท้ายกระบะ และการเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบะให้มี  
กะทัดรัดกลม ก็จะลดพลังงานในการขับเคลื่อนได้วิธีหนึ่ง

**คำสำคัญ**—อากาศพลศาสตร์, รถบรรทุกขนาดเล็ก, จำลองเชิงตัวเลข

**Abstract**— This study aims to investigate the aerodynamic characteristic  
of the cab pick-up truck. The pick-up box of the car has been modified and  
tested for drag coefficient by using low speed wind tunnel and using 3  
dimensional computational fluid dynamic (CFD) technique (FLUENT).  
Models are tested at speed between 18 – 43 km/hr in the wind tunnel, before  
all dimension tested at speed between 36 – 126 km/hr in CFD. Six car models

which are (1) normal pick-up box. (2) tailgate down. (3) tailgate off (4)  
covered pick-up box. (5) slope rear box. (6) van. All models have the same  
frontal area, only aft bodies are different. And open windshield 100 percentage  
1 side and 2 side cases are also studied. In this study, the main focus is to  
investigate the aerodynamic characteristics to reduce the coefficient of drag,  
( $C_D$ ) due to the wake at the rear body of the pick-up car. When the slope rear  
box is used the  $C_D$  is reduced from 0.52 to be 0.4 (speed average), fuel  
consumption reduce by 6.91 percentage. When van case is used, the  $C_D$   
increase by 0.75, the fuel consumption increase by 8.81 percentage, and open  
windshield 1 side and 2 side increase fuel consumption by 0.34 and 0.58. This  
study confirms that reduction of internal flow in to the cab or reduce wake by  
the geometry at the rear body of the pick-up car can significantly affect the  $C_D$ ,  
hence the energy economy.

**Keywords**—aerodynamic, utility truck, computation fluid dynamic.

### 1. บทนำ

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้ยกอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมหลักของ  
ประเทศไทย โดยจะผลักดันให้เป็น “คิโตรอยด์แห่งเอเชีย” ในการผลิตรถบรรทุก  
เล็ก ขนาด 1 ตัน หรือ รถปิกอัพ ที่มีอัตราการผลิตสูงที่สุด และประเทศไทยยังม  
การใช้รถบรรทุกเล็กมากที่สุดในโลก แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการออกแบบ  
รถบรรทุกเล็กให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำอยู่แล้ว แต่ก็สามารถนำองค์  
ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์มาปรับปรุงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าต่ำกว่าที่  
เป็นอยู่ได้อีก เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และการใช้งานจริง ผู้ใช้งาน  
บางส่วนมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเปลี่ยนแปลงจาก  
รถที่ผลิตจากโรงงาน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น  
ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์มา  
พัฒนาปรับปรุงรูปร่างท้ายกระบะ หรือการใช้งานอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุก  
เล็กให้ถูกวิธี

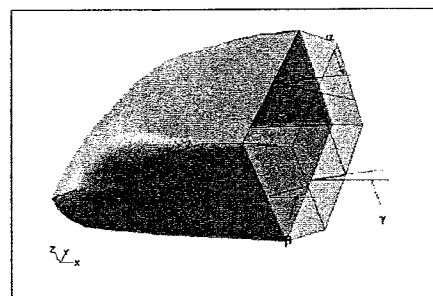


### การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลม

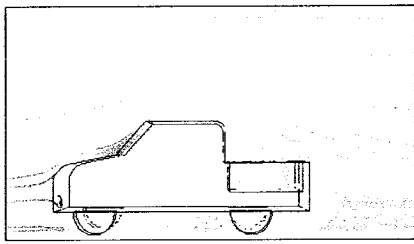
ซึ่งการศึกษานั้น อุโมงค์ลม (wind tunnel) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการศึกษาในอากาศพลศาสตร์ ใช้ทดสอบแรงต้านของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ และใช้วิเคราะห์นามการไหลที่เกิดจากการแยกตัวของอากาศ (separation) ซึ่งจะเกิดการแยกตัวเมื่อวัตถุเป็นรูปร่างไม่มีลักษณะเพริวลม (buff body) เนื่องจากความแตกต่างของความดันที่จุดแยกตัวมีค่ามาก จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าที่สูงตามไปด้วย [1] โดยได้นำเอาหลักการนี้มาปรับปรุงรูปทรงของรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งในการทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ใช้รูปแบบจำลองในการทดสอบ แต่จะเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่วัดได้จากการทดสอบไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จริง เนื่องจากรายละเอียดรูปลักษณะรถยนต์แบบจำลอง ไม่สามารถสร้างเหมือนจริงทุกรายละเอียด ซึ่งก็ได้ใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ที่สามารถทดสอบรถยนต์จริงได้ โดยสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถูกต้อง และวิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน [2] แต่ไม่ใช้รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่ปรกติคแต่ง หรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ และยื่นออกจากตัวรถ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (loss) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะดูดซับพลังงานส่วนเสดความดัน (pressure head) และเสดความเร็ว (velocity head) ของอากาศเมื่อปะทะกับรถ เช่น กันชนรถยนต์, อุปกรณ์บังแสงแดดด้านข้างกระจก, อุปกรณ์สำหรับวางของบนหลังคาในต้น ซึ่งเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 4 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็มีการเสริมที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในลดการหมุนวนของอากาศ (vortex or recirculation) เช่น ที่บังล้อ เป็นต้น ซึ่งลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ [3] ซึ่งเป็นการลดอัตราการสูญเสียโดยลดการหมุนวนของอากาศ ที่เกิดขึ้นภายนอกตัวรถยนต์เท่านั้น (external flow loss) แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีรสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (internal flow loss) ลออากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (gap) ทำให้เกิดการหมุนวนภายใน ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับช่วงห่างระหว่างองผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระบะของรถบรรทุก โดยสามารถลดการสูญเสียที่เคขึ้น โดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดหรือลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมิข้อจำกัดของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความละเอียด เช่น การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการการปรับมุมของสปอร์เตอร์ของรถยนต์แบบง ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้เองจากค่าไม่มีความละเอียดพอ และยังมีข้อจำกัดของสภาวะของการทดสอบใน ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สามารถกำหนดสภาวะ หรือแม้แต่การปรับรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ [4]

### การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

การคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics: CFD) หรือที่เรียกว่า วิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่สำคัญในกระบวนการออกแบบรถยนต์ ซึ่งนิยมใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT สำหรับการจำลองการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ โดยวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume) เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มการเกิดการแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนหลังของแบบจำลองใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำ แต่เมื่อค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการจำลองมีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจากการทดสอบในอุโมงค์ลมมีลักษณะการไหลเป็น 3 มิติ จึงได้มีการพัฒนาการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ [5], [6] นำมาจำลองเพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ โดยมีการใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดได้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) ในการสร้างสมการเชิงตัวเลข ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์จะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ [7] ซึ่งแรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอก สัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่มีผลจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจากกรไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดย Muyl [8] ทำการศึกษาหาความเหมาะสมรูปร่างท้ายรถยนต์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตคส์และสมการการคำนวณการไหล k- $\epsilon$  โดยแบ่งรถออกเป็นสามส่วน คือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง โดยส่วนหลังจะมี back-light angle, boat-tail angle และ ramp angle ตามรูปที่ 1 การปรับ back-light angle จะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่ด้านท้ายรถด่างกัน โดยการปรับค่ามุม ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) ที่ต่ำจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านสูง แต่เมื่อปรับมุมให้มีค่าที่สูงขึ้น จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงด้วย



รูปที่ 1 แสดงมุม ( $\alpha, \beta, \gamma$ )



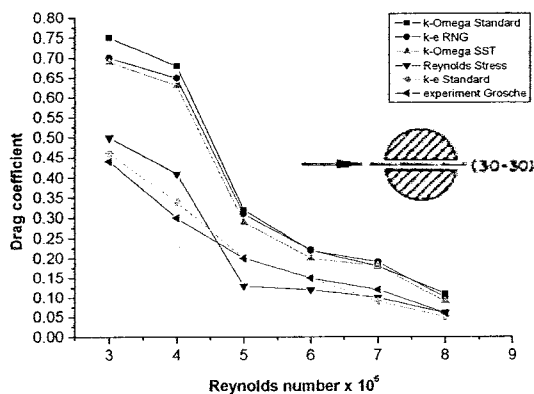
รูปที่ 2 แสดงการไหลผ่านรถบรรทุกเล็ก

ดังนั้นโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กจะสูง เนื่องจากปรงท้ายกระบะนั้นทำให้อากาศแยกตัว เกิดการหมุนวน (wake) ของอากาศที่ใหญ่ เนื่องจากความต่างของความดัน ระหว่างด้านหน้าและท้ายกระบะ และอากาศที่หมุนวนจะปะทะกับท้ายกระบะ ตามรูปที่ 2 จะทำให้เกิดแรงต้าน และไม่กระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ใช้พลังงานสิ้นเปลืองมากขึ้น ดังนั้นเนวิจันนี้เป็นการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงท้ายกระบะของรถบรรทุกเล็ก เพื่อให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง โดยใช้อุโมงค์ลมแบบเครื่องมือทดสอบ ควบคุมการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics) และสรุปข้อบกพร่องของการใช้งานในปัจจุบัน พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไข หรือวิธีการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดการเปลืองพลังงานให้มากที่สุด

## II. ระเบียบการวิจัย

ารทดสอบสมการจำลองการไหลชนิดต่าง ๆ

การศึกษานี้เป็นการใช้วิธีจำลองเชิงตัวเลข เพื่อการทดสอบสมการการคำนวณการไหลชนิดต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลว่า สมการชนิดใดมีความถูกต้องกับลักษณะการจำลอง โดยใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT จำนวน กริด (grid) 355,000 เอลิเมนต์ mesh ที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับารศึกษาของ Grosche *et al.*, (2001) ซึ่งเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) วัตถุทรงกลม เจาตรงกลาง โดยใช้อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือในการทดสอบ โดยสมการการคำนวณการไหล ชนิดมาตรฐาน k-ε ให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบในอุโมงค์ลมของ Grosche มากที่สุด ซึ่งผลได้แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เปรียบเทียบ turbulent model จำลองการไหล กับผลการ

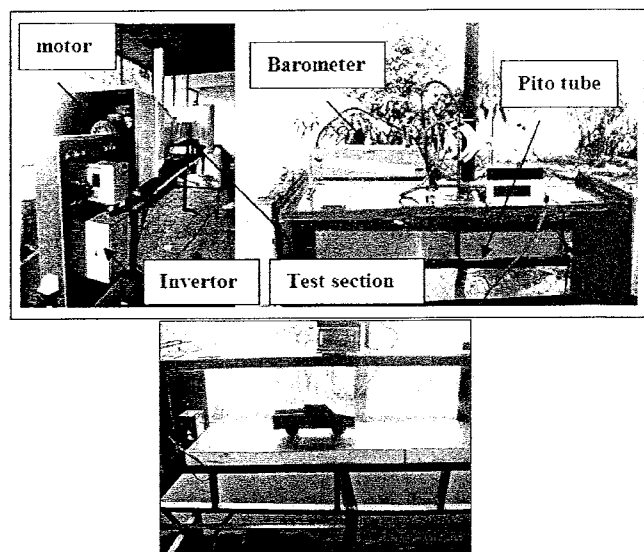
ทดสอบของ Grosche

การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลม โดยการทดสอบในอุโมงค์ลม และ CFD

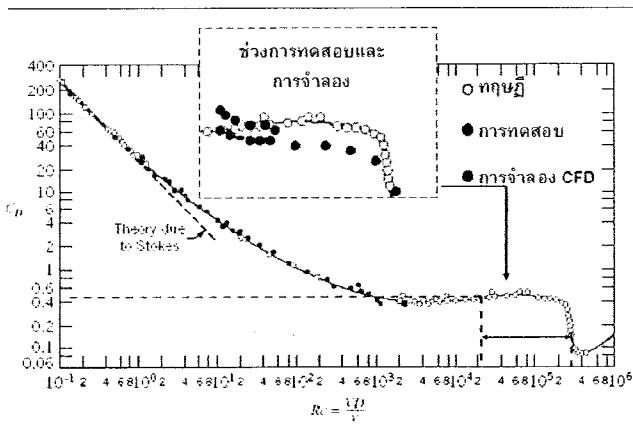
ในการทดสอบใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดกับมอเตอร์ (Motor) ขนาด 5.5 hp มีเครื่องมือควบคุมมอเตอร์ (Inverter) ให้อากาศที่ไหลผ่านส่วนปฏิบัติงาน มีความเร็วที่ 5 ถึง 10 m/s (18 - 36 km/hr) ใช้บาร์โรมิเตอร์ (Barometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็วอากาศ แสดงในรูปที่ 4 ใช้ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

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

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ ) และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ ) โดยนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้สมการการคำนวณการไหล k-ε ที่ได้ยืนยันความถูกต้องแล้ว จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจากการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลขนั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมจะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข 5 เปอร์เซ็นต์ (โดยเฉลี่ย) ซึ่งจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดสอบทั้งสองแบบ และเปรียบเทียบกับทฤษฎี แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน (อุโมงค์ลม)

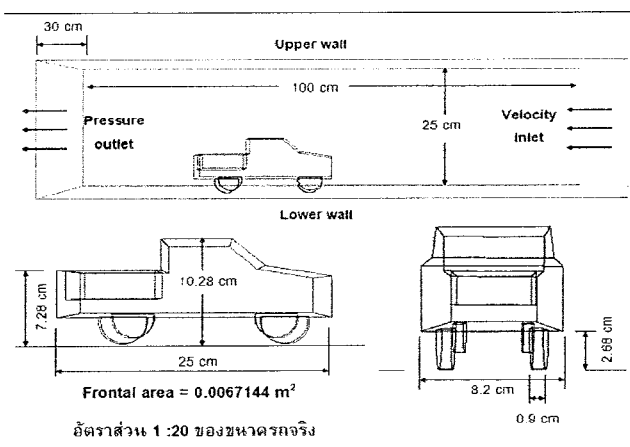


รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ )

จากรูปที่ 5 เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมในอุโมงค์ลมละวี่จำลองเชิงตัวเลข เปรียบเทียบกับทฤษฎีในช่วงค่าเรย์โนลด์ส เท่ากับ  $2 \times 10^1 - 3.0 \times 10^4$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์สสูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดที่ผิวทรงกลมกับอากาศลดลง ผิวทรงกลมจะรับผลจากความดันอากาศเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี ซึ่งสามารถนำสภาวะการไหล สมการการคำนวณ ชนิดและขนาดกริด ไปทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กเพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านต่อไป

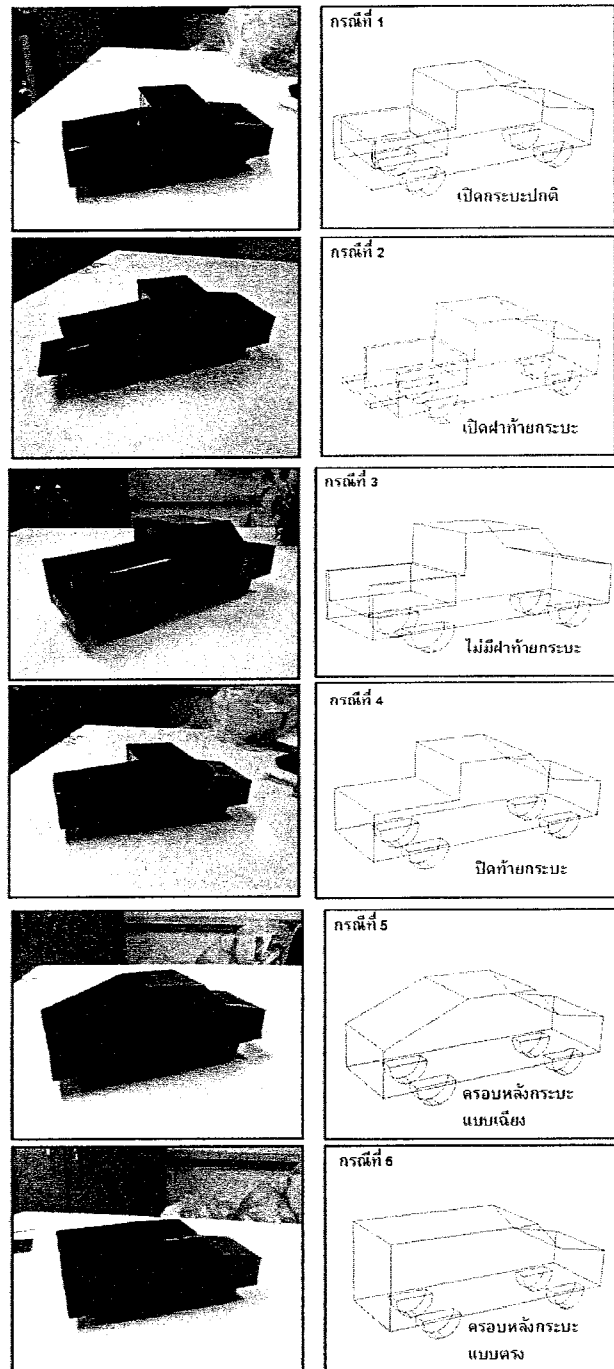
ารทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลองขนาดเล็ก กรณีกวาง ๆ อยุ่ในอุโมงค์ลม และวิธีจำลองเชิงตัวเลข

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ใช้วัสดุทำจากโฟม แบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (frontal area) เท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 18 - 36 km/hr โดยทดสอบควบคู่กับวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ขนาดแบบจำลอง และ test section เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบผลอนที่ทดสอบขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

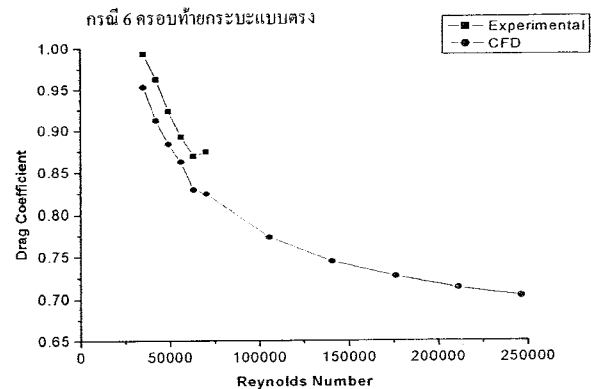
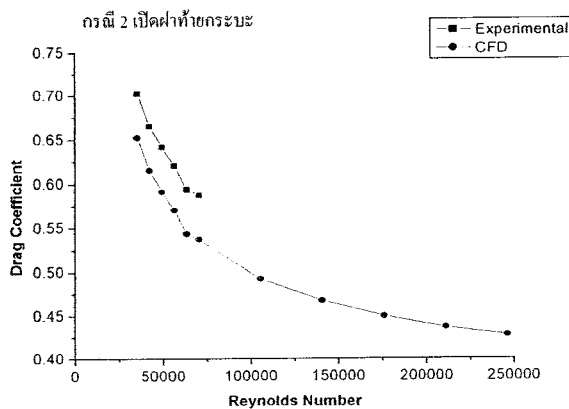
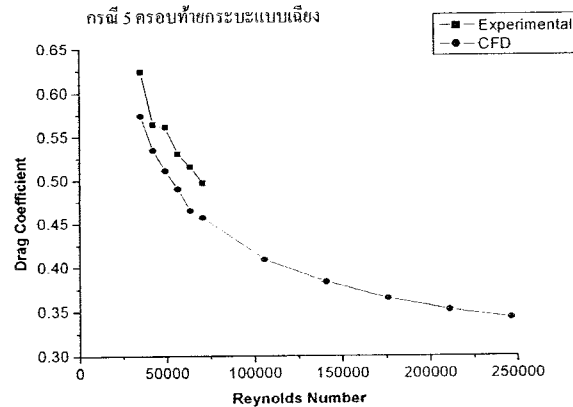
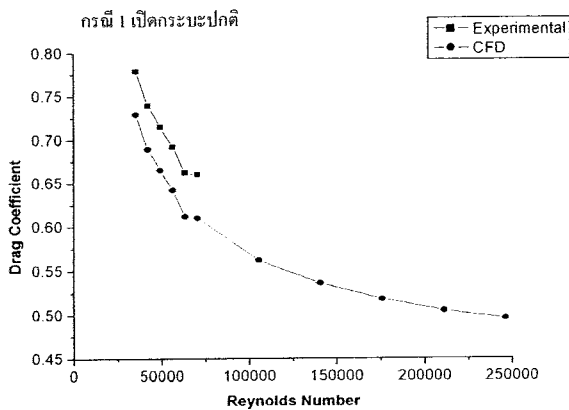


รูปที่ 6 ขนาดของแบบจำลอง และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลม

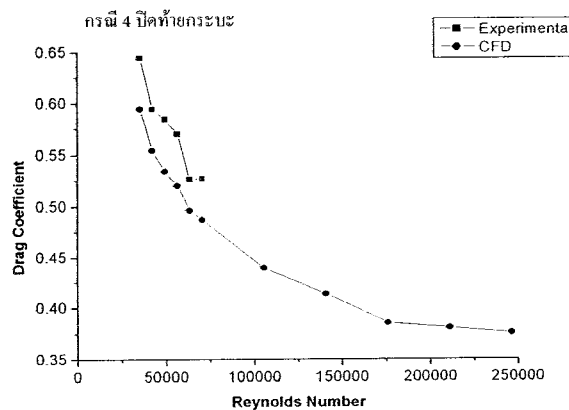
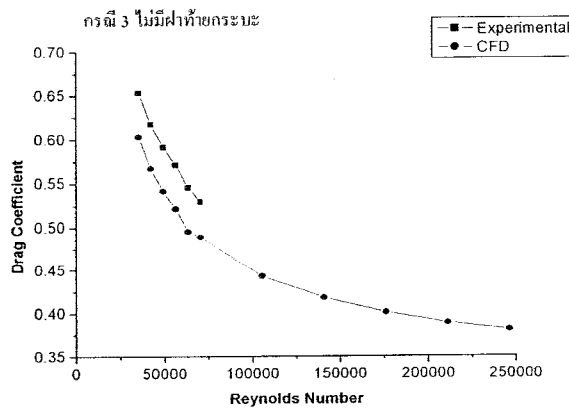
โดยทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณี คือ กรณีเปิดกระบะปกติ (normal pick-up box) ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีต่างๆ คือ เปิดฝาท้ายกระบะ (tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (tailgate off), ปิดท้ายกระบะ (covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (loped rear box) และครอบท้ายกระบะแบบตรง (van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน รูปทางด้านซ้ายเป็นแบบจำลองที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และด้านขวาเป็นแบบจำลองที่จำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองกรณีต่างๆที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD



รูปที่ 8 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถขนาดจำลอง กรณีต่าง

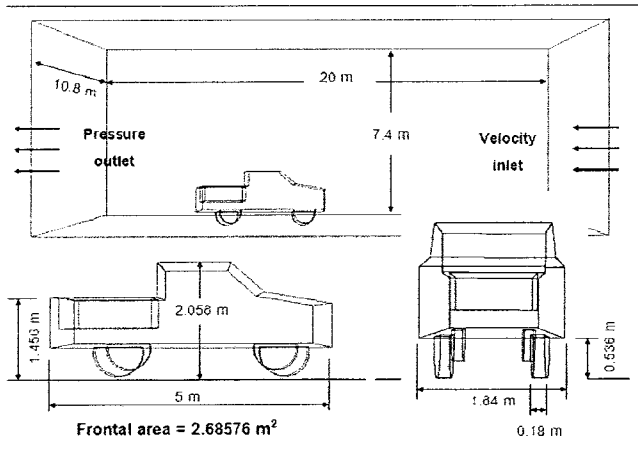


จากกราฟ เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างท้ายกระบังกรณีต่าง ๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ เรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณีก็จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ว่ามีผลกับรูปทรงท้ายกระบัง โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความกว้างช่วงการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ทำให้เกิดการไหลไม่คงที่ เช่นความเร็ว ความดัน ความหนืด โดยเมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแบบจำลอง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมทดสอบสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข

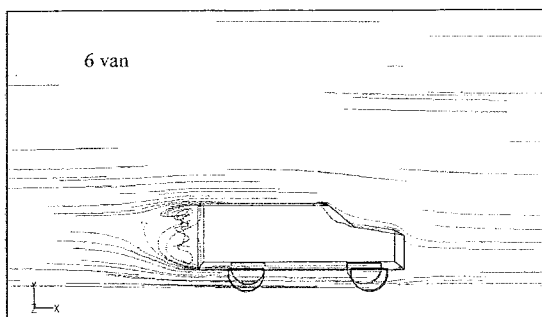
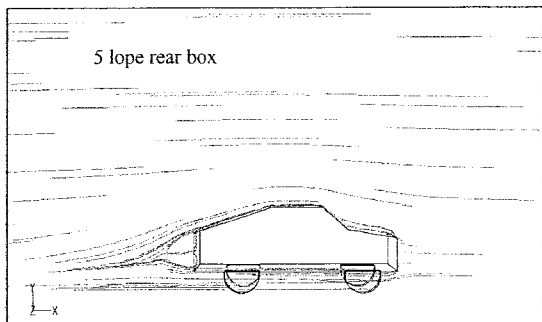
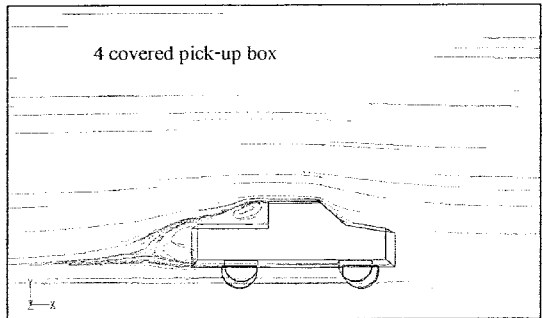
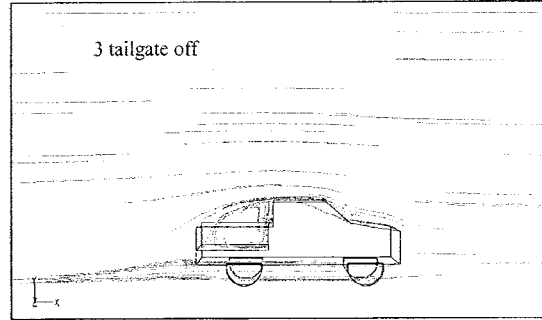
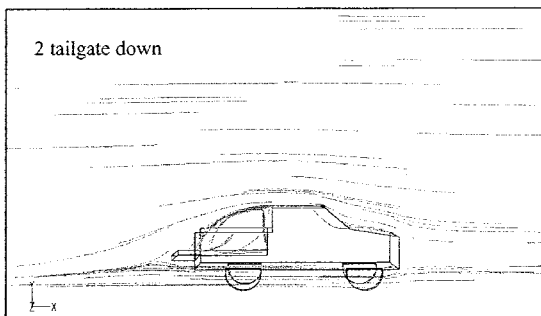
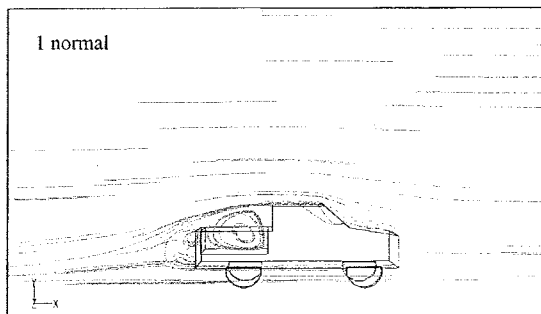
การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลองขนาดจริง กรณีต่าง ๆ โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

เป็นการจำลองขนาดจริง ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบังทั้ง 6 กรณี โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ และเพิ่มกรณีศึกษาที่มีความรูปร่างซับซ้อนขึ้น คือกรณีเปิดกระบังข้าง 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ด้าน และ 2 ด้าน เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไป โดยขยายขนาดความกว้าง และความสูง ของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ใช้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้จำลอง ทดสอบที่ความเร็ว 36 - 126 km/hr ค่าเรย์โนลด์เท่ากับ

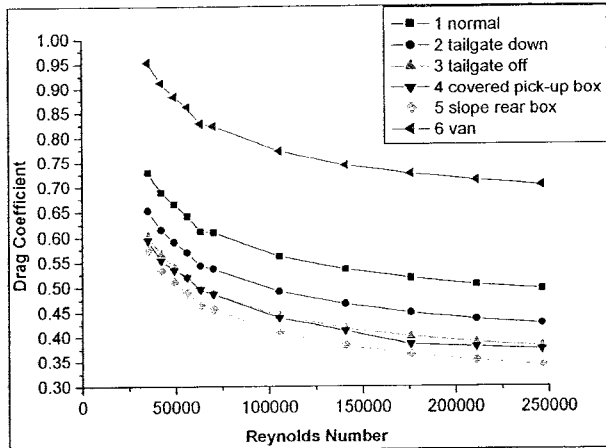
$6 \times 10^1 - 2.5 \times 10^5$  ใช้เงื่อนไขในการทดสอบเดียวกันกับ การทดสอบวัตถุทรงกลม โดยใช้กริด 550,000 อิเลเมนต์ mesh ที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูประฆัง) สมการคำนวณการไหลชนิดมาตรฐาน k-E ความเร็วที่ผิวของรถเป็นนัยเนื่องจากอิทธิพลของความหนืด อาภาสเข้ากำหนดเป็น velocity inlet อาภาสออกกำหนดเป็น pressure outlet โดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถและให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศขนาดพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$  ดังรูปที่ 9



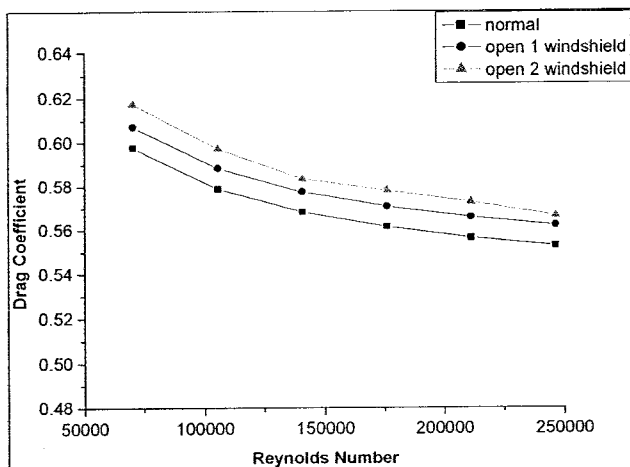
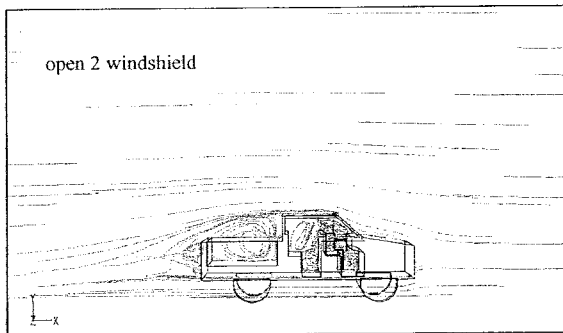
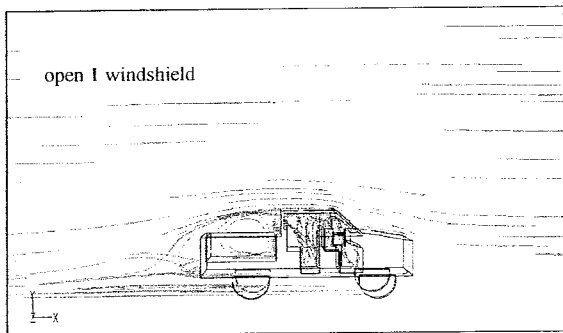
รูปที่ 9 แสดงขนาดและเงื่อนไขในการทดสอบแบบจำลองขนาดจริง



รูปที่ 10 แสดงการหมุนวนของอากาศที่แตกต่างกัน โดยรูปร่างท้ายกระบะแตกต่างกัน



รูปที่ 11 กราฟแสดงค่า  $C_D$  ที่เปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงท้ายกระบะกรณีต่าง ๆ



รูปที่ 12 แสดงการหมุนวนของอากาศและค่า  $C_D$  กรณีเปิดกระฉากข้าง

### III. วิเคราะห์ผล

#### กรณีเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบะ

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันในด้านท้ายของรถ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

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

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระบะปกติ นั้น ขนาดของแรงต้านนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระบะ และ 3 บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดัน ส่วนบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจากโมเมนตัม ของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระบะ ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 10 ที่ตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารกับบริเวณกระบะ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (wake) ซึ่งก็คือการเกิด การสูญเสีย (loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระบะท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เกิดจากการไหลของอากาศชั้นนอกมีความเร็วกว่าการไหลของชั้นใน เพราะอากาศที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (viscosity,  $\mu$ ) เกิดแรงเสียดทานการไหลช้าลงและความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นใน มีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูงได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระบะลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอก ส่งถ่ายเข้าสู่ภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและด้านหลัง มีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของอากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระบะ ดังนั้นแรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้านที่สูงขึ้น ดังสมการที่ (2)

กรณีที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีลักษณะเปิดฝาท้ายกระบะนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านมีการลดลงน้อยมาก โดยใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ 1 แต่ในกรณีที่ 2 การปะทะของอากาศกับฝาท้ายกระบะจะลดลง เนื่องจากเปลี่ยนแนวการติดตั้งฝาท้ายกระบะ ไปทิศทางขนานกับการไหล ซึ่งเปรียบเสมือนกับยกระดับของพื้นท้ายรถสูงขึ้น โดยจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน (แรงกดเพิ่มขึ้น) แต่จะมีผลกระทบกับการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงยก มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งการยกระดับพื้นท้ายรถจะมีผลต่อการกระจายตัวของความดันที่ผิวบนของรถน้อยมาก แต่ความดันพื้นรถในกรณีที่ 1 จะสูงกว่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากการเปิดฝาท้ายกระบะบังคับให้เกิดการหักตัวของการไหล ซึ่งต้องใช้แรง (โมเมนตัม) เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงดันและแรงยกลดลงในระดับหนึ่ง

กรณีที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงจาก 2 กรณีข้างต้น เนื่องจากไม่มีผลกระทบอากาศกับฝ้ายกระเบ และลดความแตกต่างของแรงดันด้านล่างพื้นล กับบริเวณส่วนบนของท้ายกระเบ จึงทำให้แรงดันมีความสมดุลกันเร็วขึ้นระหว่างการหมุนวนจึงสั้นลง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงด้วย

กรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยปิดครอบกระเบรด ที่มีการลดลงของารหมุนวนของอากาศ เนื่องจากไม่มีการปะทะของฝ้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค้อย ๆ ลดลงมาริเวณกระเบ จนมาถึงบริเวณท้ายกระเบ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้นละสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1, 2 และ 3

กรณีที่ 5 เป็นกรณีที่ ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น จากรูปร่างท้ายกระเบเป็นลักษณะเปรียวลม จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านหลังและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและากว่าทุกกรณีข้างต้น

กรณีที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยครอบหลังของกระเบทั้งหมด ความนาของบริเวณห้องโดยสารและบริเวณกระเบจะเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณท้ายรถังด้านล่างและล่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคี่ตรง ซึ่งเป็นรูปทรงด้านท้ายที่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical fter body Geometry) โดยจากรูป พบว่ารูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างบพล้น มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี

#### กรณีเปิดกระจกด้านข้างเร็ว

กรณีที่ 7 เป็นกรณีที่เปิดกระจก 1 ด้าน จะเห็นว่า การหมุนวนของอากาศส่วนึ่งจะเข้าไปในห้องโดยสาร ทำให้เกิดแรงดันภายใน และเมื่ออากาศแยกตัวลออกจากห้องโดยสาร ก็จะทำให้เกิดการหมุนวนภายนอกอีกครั้งหนึ่ง ทำให้ัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มสูงขึ้น

กรณีที่ 8 เป็นกรณีที่เปิดกระจก 2 ด้าน โดยอากาศจะสามารถไหลและเกิดการุนวน ได้ทั้งสองด้านของรถ โดยปริมาณอากาศที่ไหลเข้าจะเพิ่มขึ้นเช่นกันละแยกออกจากตัวรถ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 ด้าน

ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาารมารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงาน (fuel consumption) โดยยึดกรณี 1 ซึ่งเป็น กรณีเปิดกระเบปิดนำมาเป็นกรณีเปรียบเทียบ หาค่าผลต่างของัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยคำนวณได้จาก

$$\Delta \overline{C_D}(V_i) = \overline{C_D}(V_i)_{baseline} - \overline{C_D}(V_i)_{mod ifile} \quad (3)$$

คือค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วเดียวกัน โดยยึดกรณีที่ 1 เป็นมาตรฐาน โดยค่าที่ได้ นำไปหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานได้จากสมการ

$$\Delta \mu(V_i) = \frac{\rho \times ucf \times sfc \times V_i^2 \Delta(V_i) A}{0.85} \quad (4)$$

$\Delta \mu(V_i)$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ที่ความเร็วกำหนด ( $L/100 \text{ km}$ ),  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $ucf$  = ค่าแฟคเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072,  $sfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (liters/kW-h) โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล คอมมอนเรล 3 ลิตร ยี่ห้อโตโยต้า วิโก้พรีรันเนอร์ทดสอบ,  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของรถ ( $\text{m}^2$ ),  $0.85$  = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถ โดยคิดที่ความเร็วเฉลี่ย และเทียบกับระยะทางวิ่งที่  $100,000 \text{ km}$  (ตารางที่ 1) ค่าเป็นบวกแสดงว่าลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ค่าเป็นลบคือเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ความเร็วเฉลี่ย

| กรณีทดสอบ          | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>( $L/100 \text{ km}$ ) | วิ่งระยะทาง<br>$100,000 \text{ km}$ (L) | อัตรา<br>สิ้นเปลือง<br>เชื้อเพลิง (%) |
|--------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| เปิดกระเบปกติ      | -                                           | -                                       | 0 %                                   |
| เปิดท้ายกระเบ      | 0.2139                                      | 213.9                                   | 2.62 %                                |
| ไม่มีฝ้ายท้ายกระเบ | 0.3711                                      | 371.1                                   | 4.55 %                                |
| ปิดท้ายกระเบ       | 0.4374                                      | 437.4                                   | 5.37 %                                |
| ครอบกระเบแบบเฉียง  | 0.5629                                      | 562.9                                   | 6.91 %                                |
| ครอบกระเบแบบคี่ตรง | -0.7181                                     | -718.1                                  | -8.81 %                               |
| เปิดกระจก 1 ด้าน   | -0.0279                                     | -27.9                                   | -0.34 %                               |
| เปิดกระจก 2 ด้าน   | -0.0470                                     | -47.9                                   | -0.58 %                               |

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ความเร็ว 90 km/hr

| กรณีทดสอบ          | ที่ 90 km/hr<br>$\Delta \mu(V_i)$ ( $L/100 \text{ km}$ ) | วิ่งระยะทาง<br>$100,000 \text{ km}$ (L) | อัตรา<br>สิ้นเปลือง<br>เชื้อเพลิง (%) |
|--------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| เปิดกระเบปกติ      | -                                                        | -                                       | 0 %                                   |
| เปิดท้ายกระเบ      | 0.2409                                                   | 240.9                                   | 2.96 %                                |
| ไม่มีฝ้ายท้ายกระเบ | 0.4187                                                   | 418.7                                   | 5.14 %                                |
| ปิดท้ายกระเบ       | 0.5044                                                   | 504.4                                   | 6.19 %                                |
| ครอบกระเบแบบเฉียง  | 0.6348                                                   | 634.8                                   | 7.79 %                                |
| ครอบกระเบแบบคี่ตรง | -0.8116                                                  | -811.6                                  | -9.96 %                               |
| เปิดกระจก 1 ด้าน   | -0.0316                                                  | -31.6                                   | -0.39 %                               |
| เปิดกระจก 2 ด้าน   | -0.0565                                                  | -56.5                                   | -0.69 %                               |

โดยตารางที่ 2 คำนวนที่ความเร็ว 90 km/hr ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้วิ่งที่สภาวะปกติ โดยผลของการคำนวณของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงท้ายกระเบ ที่ทำให้อากาศเกิดการแยกตัวและหมุนวนลดลง จะช่วยลดประหยัเชื้อเพลิงของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กได้วิธีหนึ่ง และควรหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ที่สามารถทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ เช่นการเปิดกระจกรถขณะวิ่งดังที่กล่าวมา โดยสามารถนำงานวิจัยนี้ไปปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกทุกเล็ก และเป็นแนวทางในการปรับปรุงรูปร่างส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ทุกชนิดได้

#### IV.สรุป

จากผลทดสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์ และวิธีจำลองเชิงตัวเลข แสดงให้เห็นว่า ลมมีค่าใกล้เคียงกันและมีความถูกต้อง โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข สามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วสูง และวิเคราะห์การจำลองที่มีรูปร่างมีความละเอียด เพื่อได้แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงทรงท้ายกระบะให้มีลักษณะเพรียวลม นอกจากนั้นการลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ทาบในแนวศทางตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ หรือกล่าวคือ ออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ให้มีความดันเกิดมุลูให้มากที่สุด

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดใคร่ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ อาจารย์ที่ปรึกษา สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนในงานวิจัยครั้งนี้ คณะผู้ร่วมดำเนินงานวิจัยทุกท่าน และคณะกรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชานหนักสูตรและบุคลากรในหลักสูตรบัณฑิตศึกษาทุกหลักสูตร ที่ให้ความรู้และช่วยเหลือในรูปแบบต่างๆ ให้การจัดการประชุมครั้งนี้เกิดขึ้นได้

#### เอกสารอ้างอิง

- 1] F.R. Gosche and G.E.A. Meier, "Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, pp. 1201-1218, 2001.
- 2] C.P. Van Dam, "Recent experience with different methods of drag prediction," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 35, pp. 751-798, 1999.
- 3] J. Leuschen and K.R. Cooper, "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers," *2006 SAE International*, 06CV-222, 2006.
- 4] H. Fukuda, K. Yanagimoto, H. China and K. Nakagawa, "Improvement of vehicle aerodynamics by wake control," *JSAE Review*, vol. 16, pp. 151-155, 1995.
- 5] อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุคมเกียรติ นนทแก้ว, "การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, เมษายน - มิ.ย. 2546.
- 6] A. Prasad and C.H.K. Williamson, "A method for the reduction of bluff body drag," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 69-71, pp. 155-167, 1997.

- [7] S.N. Singh, L. Rai, P. Puri and Bhatnagar, "Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles," *Proc. IMechE. Automobile Engineering*: 219 Part D, 2005.
- [8] N. Horinouchi, "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," *SAE 950628*, 1995.
- [9] F. Mui, L. Dumsa and V. Herbert, "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry," *Computers & Fluids*, vol. 33, pp. 849-858, 2004.
- [10] M. Tomiyama, K. Maeda, and F. Nakamura, "The development of a method to obtain the optimum lift coefficient using the vehicle dynamic analysis," *JSAE Review*, vol 23, pp. 69-74, 2002.
- [11] S. Yamamoto, K. Yanagimoto, H. Fukuda, H. China, and K. Nakagawa, 1997, "Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles," *JSAE Review*, vol 18, pp. 39-44, 1997.



การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 4  
14-16 พฤษภาคม 2551 ณ โรงแรมโรสการ์เดน ริเวอร์ไซด์ จังหวัดนครปฐม

## อากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดเล็ก โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข Aerodynamics Utility Truck By Computational Fluid Dynamics

ปริญญ์ มุกดา, วีระพันธ์ สีหานาม และ กุลเชษฐ์ เพียรทอง  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทร 0-8336-62686 โทรสาร 045-353380 E-mail: mukdaen@hotmail.com

Prachya Mukda, Wirapan Seehanam and Kulachate Pianthong  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University  
Ubon Ratchatani, 34190, Thailand. Tel: 0-8336-2686 Fax: 045-353380 E-mail: mukdaen@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับรูปร่างท้ายกระบะของรถบรรทุกขนาดเล็ก ห่องผู้โดยสารสอง 2 ตอน โดยมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ท้ายกระบะ หรือการติดตั้งอุปกรณ์เสริม และศึกษาผลกระทบจากการไหลของอากาศ เข้าสู่ภายในห่องผู้โดยสาร เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองเชิงตัวเลข ซอฟต์แวร์ Fluent จำลองแบบ 3 มิติ ใช้สมการคำนวณการไหลมาตรฐาน k-ε ทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกขนาดเล็ก ที่ความเร็ว 18 – 43 km/hr เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลก่อนการทดสอบขนาดจริง ด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลขที่ความเร็ว 36 – 126 km/hr ทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีเปิดกระบะปกติ ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีต่างๆ คือ เปิดฝาท้ายกระบะ, ไม่มีฝาท้ายกระบะ, ปิดกระบะ, ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง, ครอบท้ายกระบะแบบตรง, และการเปิดกระจกรถวิ้ง 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ด้านและ 2 ด้าน ที่ความเร็วและพื้นที่หน้าตัดของรถเดียวกัน จากการทดสอบพบว่า กรณีเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบะ ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง มีสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำสุดคือ 0.4 (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ 6.91 เปอร์เซ็นต์ กรณีครอบท้ายกระบะแบบตรง มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุดคือ 0.75 เพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 8.81 เปอร์เซ็นต์ และกรณีเปิดกระจกรถวิ้ง 1 ด้าน และ 2 ด้านจะเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเป็น 0.34 และ 0.58 เปอร์เซ็นต์ การศึกษานี้ยืนยันว่า การลดการไหลเข้าห่องผู้โดยสาร หรือลดการหมุนวนของอากาศที่เกิดจากรูปร่างท้ายกระบะ และการเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบะให้มีลักษณะเพริ้วลม ก็จะสามารถลดพลังงานในการขับเคลื่อนได้วิธีหนึ่ง

### Abstract

This study aims to investigate the aerodynamic characteristic of the cab pick-up truck. The pick-up box of the car has been modified and tested for drag coefficient by using low speed wind tunnel and using 3 dimensional computational fluid dynamic

(CFD) technique (FLUENT). Models are tested at speed between 18 – 43 km/hr in the wind tunnel, before full dimension tested at speed between 36 – 126 km/hr in CFD. Six car models which are (1) normal pick-up box. (2) tailgate down. (3) tailgate off (4) covered pick-up box. (5) slope rear box. (6) van. All models have the same frontal area, only aft bodies are different. And open windshield 100 percentage 1 side and 2 side cases are also studied. In this study, the main focus is to investigate the aerodynamic characteristics to reduce the coefficient of drag, ( $C_D$ ) due to the wake at the rear body of the pick-up car. When the slope rear box is used the  $C_D$  is reduced from 0.52 to be 0.4 (speed average), fuel consumption reduce by 6.91 percentage. When van case is used, the  $C_D$  increase by 0.75, the fuel consumption increase by 8.81 percentage, and open windshield 1 side and 2 side increase fuel consumption by 0.34 and 0.58. This study confirms that reduction of internal flow in to the cab or reduce wake by the geometry at the rear body of the pick-up car can significantly affect the  $C_D$ , hence the energy economy.

### 1. บทนำ

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้ยกอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย โดยจะผลักดันให้เป็น “ศักราชแห่งเอเชีย” ในการผลิตรถบรรทุกขนาดเล็ก ขนาด 1 ตัน หรือ รถปิกอัพ ที่มีอัตราการผลิตสูงที่สุด และประเทศไทยยังมีการใช้รถบรรทุกขนาดเล็กมากที่สุดในโลก แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะมีการออกแบบรถบรรทุกขนาดเล็กให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำอยู่แล้ว แต่ก็สามารถนำองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาปรับปรุงให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าต่ำกว่าที่เป็นอยู่ได้อีก เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และการใช้งานจริง ผู้ใช้งานบางส่วนมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเปลี่ยนแปลงจากรถที่ผลิตจากโรงงาน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่

จำเป็น ดังนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์มาพัฒนาปรับปรุงรูปร่างท้ายกระเบ หรือการใช้งานอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็กให้ถูกวิธี

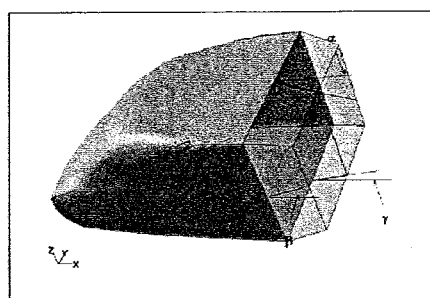
### 1.1 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลม

ซึ่งการศึกษานั้น อุโมงค์ลม (wind tunnel) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการศึกษาด้านอากาศพลศาสตร์ ใช้ทดสอบแรงต้านของวัตถุทรงต่าง ๆ และใช้วิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดจากการแยกตัวของอากาศ (separation) ซึ่งจะทำให้การแยกตัวสูงเมื่อวัตถุเป็นรูปร่างไม่มีลักษณะเพรียวลม (buff body) เนื่องจากความแตกต่างของความดันที่จุดแยกตัวมีค่ามาก จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าที่สูงตามไปด้วย [1] โดยได้นำเอาหลักการนี้มาปรับปรุงรูปร่างของรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นการทดสอบในอุโมงค์ลมขนาดเล็ก ใช้ระบบจำลองในการทดสอบ แต่ก็จะเกิดความคลาดเคลื่อนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่วัดได้จากการทดสอบไม่ตรงกับค่าที่เกิดขึ้นกับรถยนต์จริง เนื่องจากรายละเอียดรูปลักษณะรถแบบจำลอง ไม่สามารถสร้างเหมือนจริงทุกรายละเอียด ซึ่งก็ได้ใช้อุโมงค์ลมขนาดใหญ่ที่สามารถทดสอบรถยนต์จริงได้ โดยสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถูกต้อง และวิเคราะห์สนามการไหลที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน [2] แต่ไม่ใช่รูปทรงของรถยนต์เพียงอย่างเดียวที่มีผลกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แม้แต่อุปกรณ์ตกแต่งหรืออุปกรณ์เสริมเพื่ออำนวยความสะดวกในการใช้งาน ก็มีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอุปกรณ์เสริม ที่ติดตั้งจากกับทิศทางการไหลของอากาศ และยื่นออกจากตัวรถ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสูญเสีย (loss) โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะดูดซับพลังงานส่วนเอดความดัน (pressure head) และเอดความเร็ว (velocity head) ของอากาศเมื่อปะทะกับรถ เช่น กันชนรถยนต์, อุปกรณ์บังแสงแดดด้านข้างกระจก, อุปกรณ์สำหรับวางของบนหลังคา เป็นต้น ซึ่งเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 4 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็มีอุปกรณ์เสริมที่ช่วยลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในลดการหมุนวนของอากาศ (vortex or recirculation) เช่น ที่บังล้อ เป็นต้น ซึ่งลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 5 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ [3] ซึ่งเป็นการลดอัตราการสูญเสียโดยการลดการหมุนวนของอากาศ ที่เกิดขึ้นภายนอกตัวรถยนต์เท่านั้น (external flow loss) แต่สาเหตุการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศผ่านรถยนต์นั้น ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศเข้าสู่ภายในรถยนต์ (internal flow loss) โดยอากาศสามารถไหลเข้าผ่านช่องว่างระหว่างส่วนประกอบของชิ้นส่วนรถยนต์ (gap) ทำให้เกิดการหมุนวนภายใน ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับช่วงห่างระหว่างห้องผู้โดยสารกับส่วนท้ายกระเบของรถบรรทุก โดยสามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อปิดหรือลดการไหลเข้าสู่ช่องว่าง แต่การทดสอบในอุโมงค์ลมก็ยังมีความจำเป็นของการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีที่ที่มีการปรับเปลี่ยนขนาดหรือมุมหักเหของอุปกรณ์เสริมที่มีความละเอียด เช่นการวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของการการปรับมุมของสปอร์ยเลอร์ของรถยนต์แบบนั้น ซึ่งค่าที่วัดได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้ เนื่องจากค่าไม่มีความละเอียดพอ และยังมีข้อจำกัดของสภาวะของการทดสอบ เช่น ความเร็ว ความดัน อุณหภูมิของอากาศ เป็นต้น โดยการทดสอบส่วนใหญ่จะจำกัดอยู่ในสภาวะบรรยากาศแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันได้มีวิธีการทดสอบสัมประสิทธิ์

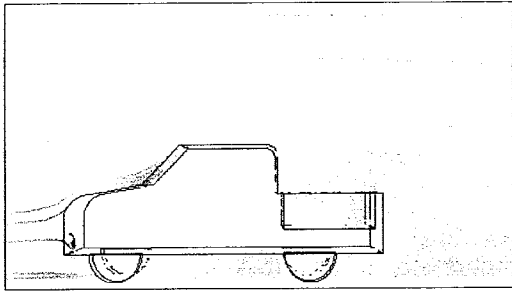
แรงต้านที่สามารถกำหนดสภาวะ หรือแม้แต่การปรับเปลี่ยนรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์เสริมโดยไม่สิ้นเปลืองเงินทุน และเวลาในการทดสอบ [4]

### 1.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

การคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics: CFD) หรือที่เรียกว่า วิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่สำคัญในกระบวนการออกแบบรถยนต์ ซึ่งนิยมใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT สำหรับการจำลองการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ โดยวิธีปริมาตรจำกัด (finite volume) เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มการเกิดการแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนหลังของแบบจำลอง ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่ค่าเรย์โนลด์ต่ำ แต่เมื่อค่าเรย์โนลด์ที่ใช้ในการจำลองมีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจากการทดสอบในอุโมงค์ลมมีลักษณะการไหลเป็น 3 มิติ จึงได้มีการพัฒนาการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ [5], [6] นำมาจำลองเพื่อการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ โดยมีการใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดใต้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference) ในการสร้างสมการเชิงตัวเลข ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์จะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ [7] ซึ่งแรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอก สัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่เกิดจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจาก การไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดย Mui [8] ทำการศึกษาหาความเหมาะสมรูปร่างท้ายรถยนต์โดยใช้สมการนาเวียร์-สโตคส์และสมการการคำนวณการไหล k- $\epsilon$  โดยแบ่งรถออกเป็นสามส่วน คือส่วนหน้า ส่วนกลาง และส่วนหลัง โดยส่วนหลังจะมี back-light angle, boat-tail angle และ ramp angle ตามรูปที่ 1 การปรับ back-light angle จะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่ด้านท้ายรถต่างกัน โดยการปรับค่ามุม ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) ที่ต่ำจะทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศขนาดใหญ่ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านสูง แต่เมื่อปรับมุมให้ค่าที่สูงขึ้นเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง



รูปที่ 1 แสดงมุม ( $\alpha, \beta, \gamma$ )



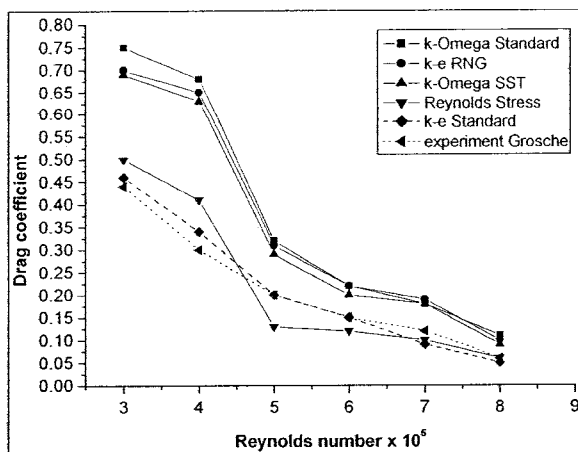
รูปที่ 2 แสดงการไหลผ่านรถบรรทุกเล็ก

ดังนั้นโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กจะสูง เนื่องจากรูปทรงท้ายกระบอกนั้นทำให้อากาศแยกตัว เกิดการหมุนวน (wake) ของอากาศที่ใหญ่ เนื่องจากความต่างของความดัน ระหว่างด้านหน้าและท้ายกระบอก และอากาศที่หมุนวนจะปะทะกับท้ายกระบอกตามรูปที่ 2 จะทำให้เกิดแรงต้าน และเพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เครื่องยนต์ใช้พลังงานสิ้นเปลืองมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงท้ายกระบอกของรถบรรทุกเล็ก เพื่อให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง โดยใช้ซูโม่คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดสอบ ควบคู่กับการใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ (computational fluid dynamics) และสรุปข้อบกพร่องของการใช้งานในปัจจุบัน พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไข หรือวิธีการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานให้มากที่สุด

## 2. ระเบียบการวิจัย

### 2.1 การทดสอบสมการจำลองการไหลชนิดต่าง ๆ

การศึกษาขั้นต้น เป็นการใช้อัตราจำลองเชิงตัวเลข เพื่อการทดสอบสมการการคำนวณการไหล (turbulent model) ชนิดต่าง ๆ



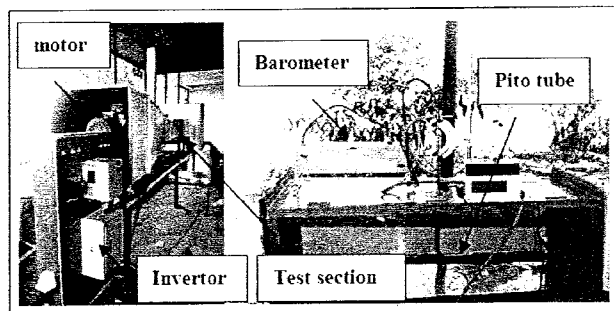
รูปที่ 3 เปรียบเทียบ turbulent model จำลองการไหล กับผลการทดสอบของ Grosche

จากรูปที่ 3 เป็นการเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลของ สมการการจำลองการไหล ให้มีความถูกต้องกับลักษณะการจำลอง โดยใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT จำนวน กริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ mesh ที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) เทียบกับการศึกษาของ Grosche et al., (2001) ซึ่งเป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) วัตถุทรงกลม เจาะตรงกลาง โดยใช้ซูโม่คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดสอบ โดย

สมการการคำนวณการไหล ชนิดมาตรฐาน k-E ให้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบในซูโม่คอมพิวเตอร์ของ Grosche มากที่สุด

### 2.2 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลม โดยการทดสอบในซูโม่คอมพิวเตอร์ และ CFD

ในการทดสอบซูโม่คอมพิวเตอร์แบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดกับมอเตอร์ (Motor) ขนาด 5.5 hp มีเครื่องมอควบคุมมอเตอร์ (Inverter) ให้อากาศที่ไหลผ่านส่วนปฏิบัติงาน มีความเร็วที่ 5 ถึง 10 m/s (18 – 36 km/hr) ใช้บาร์โรมิเตอร์ (Barometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็วอากาศ แสดงในรูปที่ 4

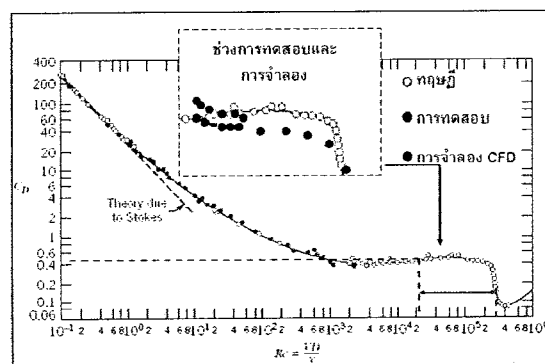


รูปที่ 4 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน (ซูโม่คอมพิวเตอร์)

ใช้ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงต้าน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

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

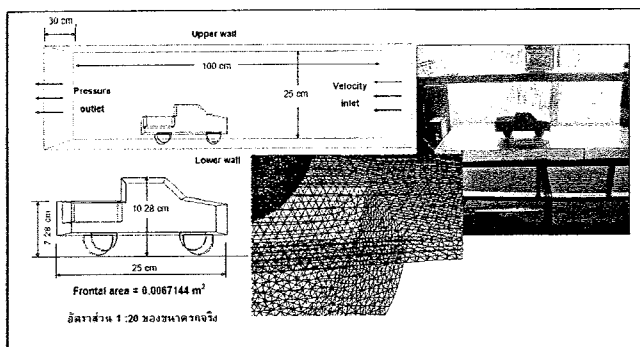
โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ ) โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งใช้สมการการคำนวณการไหล k-E ที่ได้ยืนยันความถูกต้องแล้ว จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในซูโม่คอมพิวเตอร์

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ )

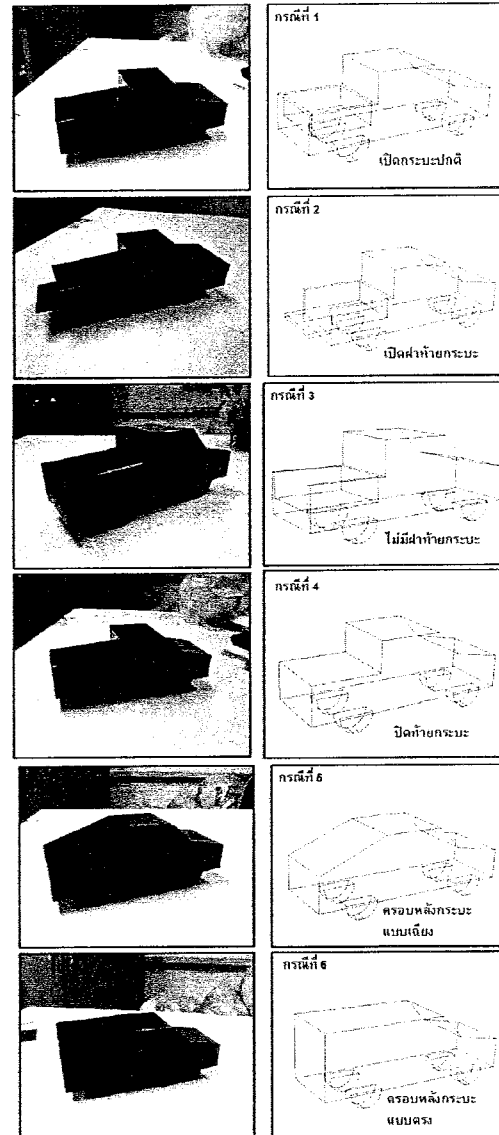
ซึ่งจากการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข 5 เปอร์เซ็นต์ (โดยเฉลี่ย) ซึ่งจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดสอบทั้งสองแบบ และเปรียบเทียบกับทฤษฎี แสดงในรูปที่ 5 เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมในอุโมงค์ลม และวิธีจำลองเชิงตัวเลข เปรียบเทียบกับทฤษฎีอยู่ในช่วงค่าเรย์โนลด์ เท่ากับ  $2.2 \times 10^4 - 3.0 \times 10^5$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลง เมื่อค่าเรย์โนลด์สูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดที่ผิวทรงกลมกับอากาศลดลง ผิวทรงกลมจะได้รับผลจากความดันอากาศเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี ซึ่งสามารถนำสภาวะการไหล สมการการคำนวณ ชนิดและจำนวนกริด ไปทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก เพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านต่อไป

### 2.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลองขนาดเล็ก กรณีต่าง ๆ โดยอุโมงค์ลม และวิธีจำลองเชิงตัวเลข

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ใช้วัสดุทำจากโฟมแบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (frontal area) เท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 18 - 36 km/hr โดยทดสอบควบคู่กับวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ขนาดแบบจำลอง และ test section เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบผล ก่อนที่จะทดสอบขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยทดสอบรถบรรทุกเล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงท้ายกระบะ 6 กรณี คือ กรณีเปิดกระบะปกติ (normal pick-up box) ซึ่งเป็นกรณีเปรียบเทียบกับกรณีต่าง ๆ คือ เปิดฝาท้ายกระบะ (tailgate down), ไม่มีฝาท้ายกระบะ (tailgate off), ปิดท้ายกระบะ (covered pick-up box), ครอบท้ายกระบะแบบเฉียง (lope rear box), และครอบท้ายกระบะแบบตรง (van) โดยที่พื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน รูปทางด้านซ้ายเป็นแบบจำลองที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลม และด้านขวาเป็นแบบจำลองที่จำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข แสดงดังรูปที่ 6 และ 7

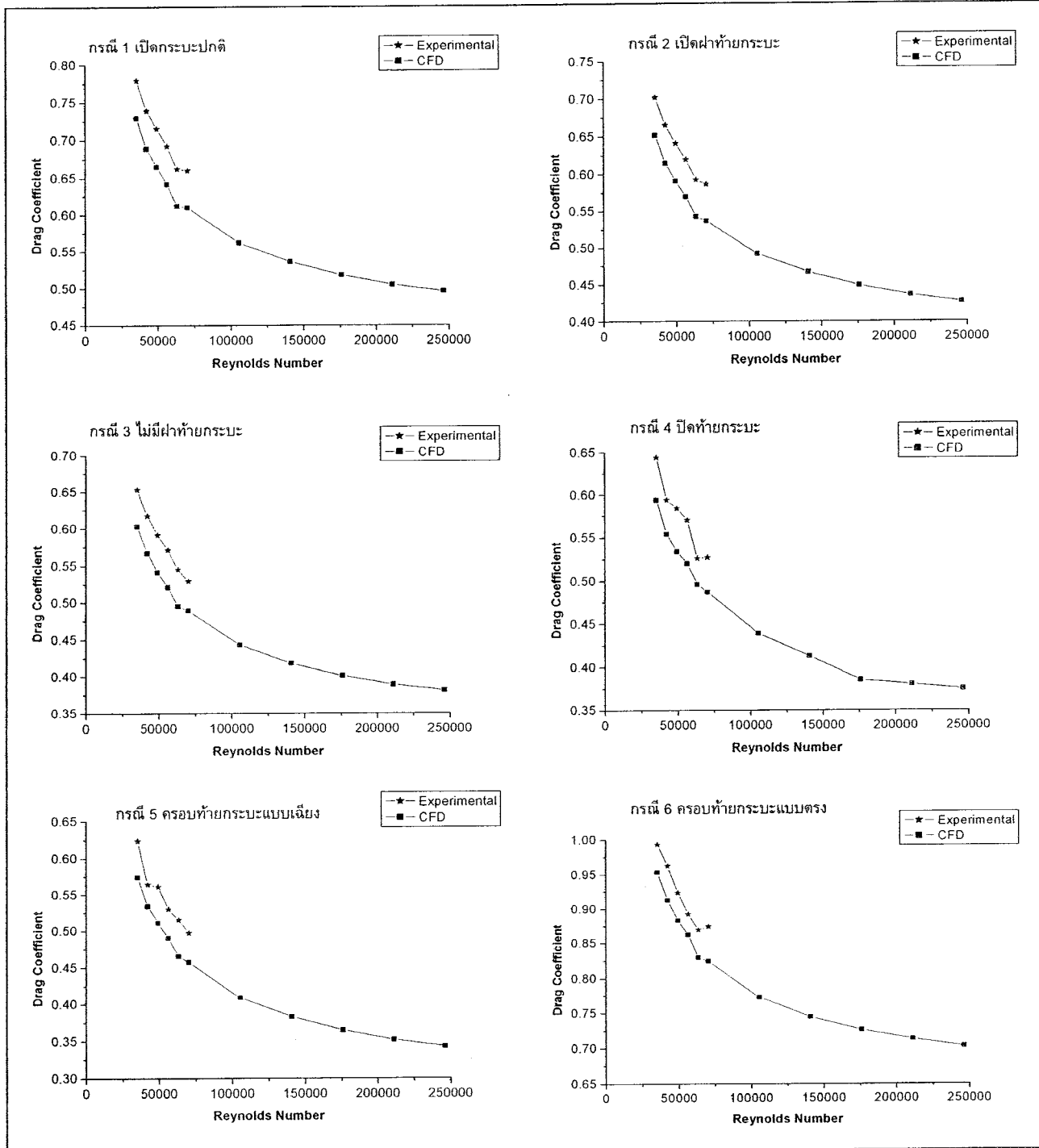


รูปที่ 6 การจำลอง กริด และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลม



รูปที่ 7 แบบจำลองกรณีต่าง ๆ ที่ใช้ทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD

จากรูปที่ 8 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างท้ายกระบะกรณีต่าง ๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ เรย์โนลด์เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านของแต่ละกรณีก็จะมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ว่ามีผลกับรูปทรงท้ายกระบะ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความกว้างช่วงการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ทำให้สภาวะการไหลไม่คงที่ เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนืด โดยเมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแคบลง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมทดสอบสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข

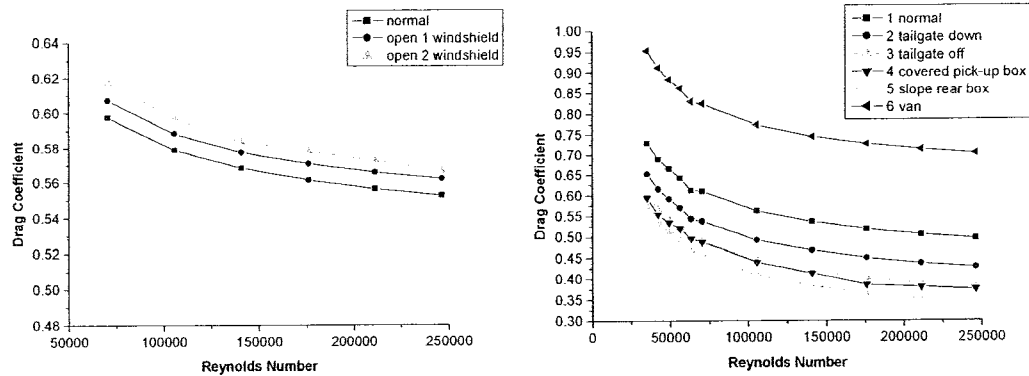


รูปที่ 8 กราฟแสดงสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถขนาดจำลอง กรณีต่าง ๆ

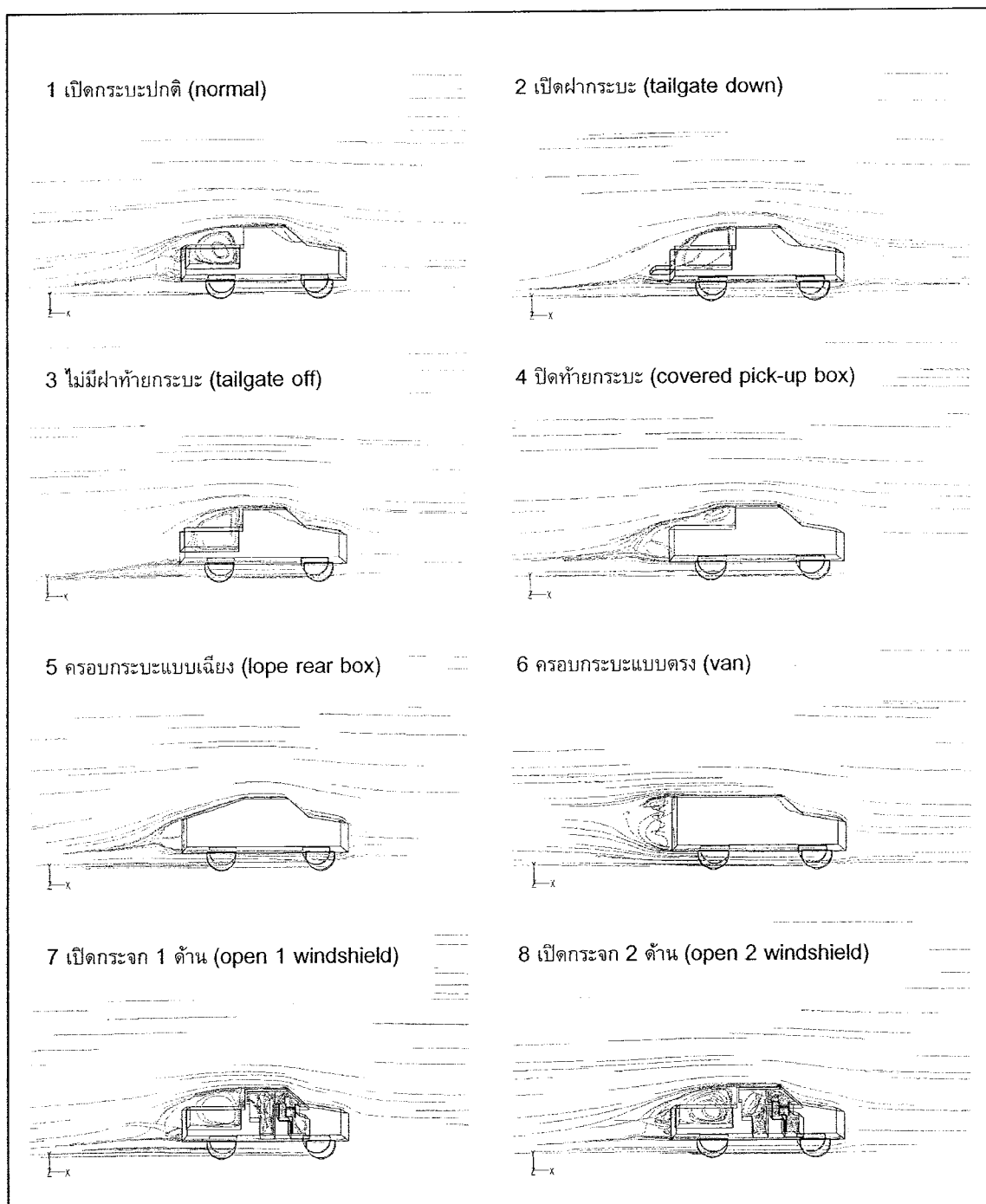
#### 2.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลอง ขนาดจริง กรณีต่าง ๆ โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

เป็นการจำลองขนาดจริง ที่มีการเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระบะทั้ง 6 กรณี โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ และเพิ่มกรณีศึกษาที่มีความรูปร่างซับซ้อนขึ้น คือ กรณีเปิดกระโปรงข้าง 100 เปอร์เซ็นต์ 1 ด้าน และ 2 ด้าน เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไป โดยขยายขนาดความกว้าง และความสูง ของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้จำลอง ทดสอบที่ความเร็ว 36 - 126 km/hr ค่าเรย์โนลด์เท่ากับ  $2.6 \times 10^4$  -  $2.5 \times 10^5$  ใช้

เงื่อนไขในการทดสอบเดียวกันกับ การทดสอบวัตถุทรงกลม โดยใช้กริด 550,000 อิเลเมนต์ mesh ที่ใช้เป็นแบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) สมการคำนวณการไหลชนิดมาตรฐาน k-ε ความเร็วที่ผิวของรถเป็นศูนย์เนื่องจากอิทธิพลของความหนืด อากาศเข้ากำหนดเป็น velocity inlet อากาศออกกำหนดเป็น pressure outlet ให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศโดยไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ ขนาดพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากับ  $2.68576 \text{ m}^2$



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่า  $C_D$  ที่เปลี่ยนรูปร่างของรูปทรงท้ายกระบะกรณีต่าง ๆ



รูปที่ 10 แสดงการหมุนวนของอากาศที่แตกต่างกัน

### 3. วิเคราะห์ผล

#### 3.1 กรณีเปลี่ยนรูปร่างท้ายกระเบ

จากผลการทดสอบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระเบของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบ คือเพื่อลดความดันด้านหน้าและเพิ่มความดันในด้านท้ายของรถ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการ

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

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีเปิดกระเบปกตินั้น ขนาดของแรงต้านนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระเบ และ 3 บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดันส่วนบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจากโมเมนตัม ของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระเบ ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 10 ที่ตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารกับบริเวณกระเบ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (wake) ซึ่งก็คือการเกิด การสูญเสีย (loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระเบท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เกิดจากการไหลของอากาศนั้นนอกมีความเร่งมากกว่าการไหลของชั้นใน เพราะอากาศที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (viscosity,  $\mu$ ) เกิดแรงเฉื่อยต้านการไหลช้าลงและความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นใน มีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูงได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระเบลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอก ส่งถ่ายเข้าสู่ยานภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและด้านหลัง มีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของอากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระเบ ดังนั้นแรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้านที่สูงขึ้น ดังสมการที่ (2)

กรณีที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีลักษณะเปิดฝาท้ายกระเบนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านมีการลดลงน้อยมาก โดยใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ 1 แต่ในกรณีที่ 2 การปะทะของอากาศกับฝาท้ายกระเบจะลดลง เนื่องจากเปลี่ยนแนวการติดตั้งฝาท้ายกระเบไปทิศทางขนานกับการไหล ซึ่งเปรียบเสมือนกันยกกระดานของพื้นท้ายรถสูงขึ้น โดยจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน )แรงกดเพิ่มขึ้น (แต่จะมีผลกระทบกับการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงยก มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งการยกกระดานพื้นท้ายรถจะมีผลต่อการกระจายตัวของความดันที่ผิวบนของรถน้อยมาก แต่ความดันพื้นรถในกรณีที่ 1 จะสูงกว่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากการเปิดฝาท้ายกระเบบังคับให้เกิดการหักตัวของการไหล ซึ่งต้องใช้แรง (โมเมนตัม) เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงต้านและแรงยกลดลงในระดับหนึ่ง

กรณีที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงจาก 2 กรณีข้างต้น เนื่องจากไม่มีการปะทะอากาศกับฝาท้ายกระเบ และลดความแตกต่างของแรงดันด้านล่างพื้นรถ กับบริเวณส่วนบนของท้ายกระเบ จึงทำให้แรงดันมีความสมดุลกันเร็วขึ้น ระยะการหมุนวนจึงสั้นลง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงด้วย

กรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยปิดครอบกระเบรถ ที่มีการลดลงของการหมุนวนของอากาศ เนื่องจากไม่มีการปะทะของฝาท้ายช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระเบ จนมาถึงบริเวณท้ายกระเบ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1, 2 และ 3

กรณีที่ 5 เป็นกรณีที่ ลักษณะการไหลมีความสมดุลกันมากขึ้น จากรูปร่างท้ายกระเบเป็นลักษณะเปรียวลม จะเกิดการแยกตัวของอากาศน้อย ทำให้การไหลด้านบนและด้านล่างมีความสมดุลกัน ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงและต่ำกว่าทุกกรณีข้างต้น

กรณีที่ 6 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยครอบหลังของกระเบทั้งหมด ความหนาของบริเวณห้องโดยสารและบริเวณกระเบจะเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและล่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมตัดตรง ซึ่งเป็นรูปทรงด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (critical after body geometry) โดยจากรูป พบว่ารูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างฉับพลัน มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี

#### 3.2 กรณีเปิดกระบอกด้านข้างรถ

กรณีที่ 7 เป็นกรณีที่เปิดกระบอก 1 ด้าน จะเห็นว่า การหมุนวนของอากาศส่วนหนึ่งจะเข้าไปในห้องโดยสาร ทำให้เกิดแรงต้านภายใน และเมื่ออากาศแยกตัวไหลออกจากห้องโดยสาร ก็จะทำให้เกิดการหมุนวนภายนอกอีกครั้งหนึ่ง ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มสูงขึ้น

กรณีที่ 8 เป็นกรณีที่เปิดกระบอก 2 ด้าน โดยอากาศจะสามารถไหลและเกิดการหมุนวน ได้ทั้งสองด้านของรถ โดยปริมาณอากาศที่ไหลเข้าจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน และแยกออกจากตัวรถ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านรวมของรถ เพิ่มขึ้นมากกว่า เปิดกระบอก 1 ด้าน

ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงาน (fuel consumption) โดยยึดกรณี ที่ 1 ซึ่งเป็น กรณีเปิดกระเบปกติเข้ามาเป็นกรณีเปรียบเทียบ หาค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยคำนวณได้จาก

$$\Delta C_D(V_t) = C_D(V_t)_{baseline} - C_D(V_t)_{modify} \quad (3)$$

คือค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วเดียวกัน โดยยึดกรณีที่ 1 เป็นมาตรฐาน โดยค่าที่ได้ นำไปหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานได้จากสมการ

$$\Delta \mu(V_t) = \frac{\rho \times ucf \times sfc \times V_t^2 \Delta(V_t) A}{0.85} \quad (4)$$

$\Delta\mu(V_i)$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ความเร็วกำหนด (L/100 km),  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m<sup>3</sup>,  $ucf$  = ค่าแฟกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072,  $sfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (liters/kW-h) โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล คอมมอนเรล 3 ลิตร ยี่ห้อโตโยต้า วิโก้พรีรันเนอร์ ทดสอบ,  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของรถ (m<sup>2</sup>), 0.85 = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถ โดยคิดที่ความเร็วเฉลี่ย และเทียบกับระยะทางวิ่งที่ 100,000 km (ตารางที่ 1) ค่าเป็นบวกแสดงว่าลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ค่าเป็นลบคือเพิ่มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ความเร็วเฉลี่ย

| กรณีทดสอบ            | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000<br>km (L) | อัตราการ<br>สิ้นเปลือง<br>เชื้อเพลิง (%) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| 1 เปิดกระบอกปิด      | -                               | -                                | 0 %                                      |
| 2 เปิดท้ายกระบะ      | 0.2139                          | 213.9                            | 2.62 %                                   |
| 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ   | 0.3711                          | 371.1                            | 4.55 %                                   |
| 4 ปิดท้ายกระบะ       | 0.4374                          | 437.4                            | 5.37 %                                   |
| 5 ครอบกระบะแบบเฉียง  | 0.5629                          | 562.9                            | 6.91 %                                   |
| 6 ครอบกระบะแบบตัดตรง | -0.7181                         | -718.1                           | -8.81 %                                  |
| 7 เปิดกระจก 1 ด้าน   | -0.0279                         | -27.9                            | -0.34 %                                  |
| 8 เปิดกระจก 2 ด้าน   | -0.0470                         | -47.9                            | -0.58 %                                  |

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ความเร็ว 90 km/hr

| กรณีทดสอบ            | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000<br>km (L) | อัตราการ<br>สิ้นเปลือง<br>เชื้อเพลิง (%) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|
| 1 เปิดกระบอกปิด      | -                               | -                                | 0 %                                      |
| 2 เปิดท้ายกระบะ      | 0.2439                          | 240.9                            | 2.96 %                                   |
| 3 ไม่มีฝาท้ายกระบะ   | 0.4187                          | 418.7                            | 5.14 %                                   |
| 4 ปิดท้ายกระบะ       | 0.5044                          | 504.4                            | 6.19 %                                   |
| 5 ครอบกระบะแบบเฉียง  | 0.6348                          | 634.8                            | 7.79 %                                   |
| 6 ครอบกระบะแบบตัดตรง | -0.8116                         | -811.6                           | -9.96 %                                  |
| 7 เปิดกระจก 1 ด้าน   | -0.0316                         | -31.6                            | -0.39 %                                  |
| 8 เปิดกระจก 2 ด้าน   | -0.0565                         | -56.5                            | -0.69 %                                  |

โดยตารางที่ 2 คำนวณที่ความเร็ว 90 km/hr ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้วิ่งที่สภาวะปกติ โดยผลของการคำนวณของอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงท้ายกระบะ ที่ทำให้อากาศเกิดการแยกตัวและหมุนวนลดลง จะช่วยลดประหยัดเชื้อเพลิงของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กได้วิธีหนึ่ง และควรหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ที่สามารถทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศ เช่นการเปิดกระจกระยะวิ่งดังที่กล่าวมา โดยสามารถนำงานวิจัยนี้ไปปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกเล็ก และเป็นแนวทางในการปรับปรุงรูปร่างส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ทุกชนิดได้

#### 4. สรุป

จากผลทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลม และวิธีจำลองเชิงตัวเลข แสดงให้เห็นว่าผลมีค่าใกล้เคียงกันและมีความถูกต้อง โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลขสามารถทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วสูง และวิเคราะห์การจำลองที่มีรูปร่างมีความละเอียด เพื่อได้แนวทางการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงทรงท้ายกระบะให้มีลักษณะเพรียวลม นอกจากนั้นการลดขนาดของแรงต้านก็ต้อง

พิจารณาถึงการลดพื้นที่ทาบในแนวทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ หรือกล่าวคือ ออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ให้มีความดันเกิดสมดุลให้มากที่สุด

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดใครขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุน และคณะกรรมการผู้จัดงานทุกท่าน

#### เอกสารอ้างอิง

- 1 F.R. Gosche and G.E.A. Meier, "Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control," **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 89, pp. 1201-1218, 2001.
- 2 C.P. Van Dam, "Recent experience with different methods of drag prediction," **Progress in Aerospace Sciences**, vol. 35, pp. 751-798, 1999.
- 3 J. Leuschen and K.R. Cooper, "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers," **2006 SAE International**, 06CV-222, 2006.
- 4 H. Fukuda, K. Yanagimoto, H. China and K. Nakagawa, "Improvement of vehicle aerodynamics by wake control," **JSAE Review**, vol. 16, pp. 151-155, 1995.
- 5 อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว, "การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง," **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, เมษายน - มิ.ย. 2546.
- 6 A. Prasad and C.H.K. Williamson, "A method for the reduction of bluff body drag," **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 69-71, pp. 155-167, 1997.
- 7 S.N. Singh, L. Rai, P. Puri and Bhatnagar, "Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles," **Proc. IMechE. Automobile Engineering**: 219 Part D, 2005.
- 8 N. Horinouchi, "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System," **SAE 950628**, 1995.
- 9 F. Muyl, L. Dumsa and V. Herbert, "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry," **Computers & Fluids**, vol. 33, pp. 849-858, 2004.
- 10 M. Tomiyama, K. Maeda, and F. Nakamura, "The development of a method to obtain the optimum lift coefficient using the vehicle dynamic analysis," **JSAE Review**, vol 23, pp. 69-74, 2002.
- 11 S. Yamamoto, K. Yanagimoto, H. Fukuda, H. China, and K. Nakagawa, 1997, "Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles," **JSAE Review**, vol 18, pp. 39-44, 1997.



## การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก

### Reduction of drag coefficient of the trail pick-up truck

ปรัชญา มุกดา<sup>1\*</sup>, กุลเชษฐ์ เพียรทอง<sup>1</sup>, วิระพันธ์ สีหานาม<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร 0-87-9597828 โทรสาร 0-45353-380 \*อีเมล: mukdaen@hotmail.com

Prachya Mukda<sup>1\*</sup>, Kulachate Pianthong<sup>1</sup>, Wirapan Seehanam<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatany University, Ubon Ratchatani, 34190,

Thailand. Tel: 0-87-9597828 Ext. 3382, Fax: 0-45353-380 \*E-mail: mukdaen@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอากาศพลศาสตร์ ในการวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็กห้องผู้โดยสาร 2 ตอน เพื่อศึกษาการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) โดยวิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ (CFD) ใช้ซอฟต์แวร์ Fluent จำลองแบบ 3 มิติ ในการศึกษาขั้นต้น ใช้อุโมงค์ลมความเร็วต่ำร่วมกับ CFD ทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ที่ความเร็วระหว่าง 18 - 43 km/hr เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผล ก่อนที่จะทดสอบรถขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ที่ความเร็ว 36 - 126 km/hr เพื่อศึกษาการลดลงของสัมประสิทธิ์ด้าน ของรถคันหลังที่วิ่งห่างจากคันหน้าในระยะห่างต่างกัน พบว่า ที่ระยะห่าง 10 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลงจากวิ่งปกติกันเดียว 6.52 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) และกรณีวิ่งเยื้องกัน พบว่า รถคันหลังที่วิ่งห่างที่ระยะ 10 m และเยื้อง 1 m อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลง 1.90 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย)

#### Abstract

This research aims to investigate the aerodynamic of the trailing cab pick-up truck. The drag coefficient ( $C_D$ ) is the main focus by using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The commercial software, FLUENT, is employed in three dimensional (3D) model. The low speed wind tunnel was used to test to model of pick-up truck at velocity between 18 - 43 km/hr, the results was then validated with CFD simulation. Then the full size of pick-up truck was simulated by CFD at velocity between 36 - 126 km/hr. In this study, the  $C_D$  of the trail car at different distance is investigated. It was find that, at the trailing distance of 10 m, the fuel consumption trail car can be reduced by 6.52 % averagely. In another case, when the trail car is running

accentricly, the trailly distance of 10 m and accentric distance of 1 m, gives the best result which the fuel consumption can be reduced by 1.90 %.

#### 1. บทนำ

การออกแบบรูปร่างรถยนต์ให้เหมาะสม เป็นการทำให้รถยนต์วิ่งผ่านอากาศด้วยแรงต้านลดลง การประกอบชิ้นส่วนก็มีส่วนสำคัญ เช่น การประกอบหน้าต่างและขอบที่แนบสนิทพอดี รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เสริมรถ เช่น สปอยเลอร์ด้านหลังล้อหน้า และล้อหลัง แผ่นกันใต้ท้องรถที่ทำให้ส่วนประกอบของโครงสร้างไม่ขวางการไหลของอากาศ แม้แต่ สปอยเลอร์หลังเพื่อลดความปั่นป่วนเมื่ออากาศวิ่งผ่านอุปกรณ์เหล่านี้สามารถลดแรงต้านอากาศ โดยใช้องค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ หรือ Aerodynamics ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของการออกแบบรถยนต์ ในการทดสอบ คันคว่ำ และการวิจัย จะต้องมีการนำโมเดลทั้งแบบจำลองและแบบขนาดจริง เข้าไปทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อตรวจสอบหาค่าต่างๆ ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองทุน อุปกรณ์ และเวลาในการทดสอบ ปัจจุบันได้มีการใช้การคำนวณเชิงตัวเลขของไหลพลศาสตร์ หรือ CFD (Computation Fluid Dynamic) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถแสดงผลได้แบบ 3 มิติ ช่วยให้เห็นภาพการเคลื่อนที่ของกระแสอากาศ และผลที่เกิดขึ้นกับรถยนต์ได้ชัดเจน

(Spalart, 2000) กล่าวว่า การคำนวณของไหลพลศาสตร์ หรือวิธีจำลองเชิงตัวเลข นิยมใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT สำหรับการจำลองการไหลแบบราบเรียบอัดตัวไม่ได้ โดยวิธีปริมาตรจำกัด (Finite volume) เริ่มต้นจากการทดสอบไหลผ่านแบบจำลองใน 2 มิติ ซึ่งผลที่ได้จากการจำลอง มีแนวโน้มเกิดการแยกตัวของอากาศบริเวณส่วนหลังของแบบจำลอง ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอุโมงค์ลมที่ Reynolds number ต่ำ แต่เมื่อค่าเรย์โนลด์สที่ใช้ในการจำลองมีค่ามากขึ้น ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจาก

การทดสอบในอุโมงค์ลมมีลักษณะการไหลเป็น 3 มิติ จึงได้มีการพัฒนาการจำลองการไหลแบบ 3 มิติ (Horinouchi, 1995) และ (Van Dam, 1999) ได้นำแบบจำลองเพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถยนต์ ใช้ศึกษาความลาดเอียงด้านข้างของรูปทรงท้ายรถยนต์ และชายหน้า ที่ติดใต้บังโคลน ใช้สมการนาเวียร์-สโตค สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความลาดเอียงเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันที่ส่วนหลังของแบบจำลองมีค่าสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเช่นกันเมื่อมีการติดตั้งชายหน้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นำไปสู่การไหลแบบราบเรียบ (Prasad *et al.*, 1997) พบว่าแรงต้านส่วนใหญ่ของตัวรถ มาจากเทอมของความดันที่แยกตัวออกจากผิวนอก สัมประสิทธิ์แรงต้าน 40 เปอร์เซ็นต์จะขึ้นอยู่กับรูปทรงภายนอกและส่วนใหญ่อะกิดขึ้นที่ท้ายรถ โดยสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่ มีผลจากรูปร่างหน้ารถ แต่แรงต้านส่วนใหญ่จะมาจากการไหลปั่นป่วนด้านท้าย (Muyl *et al.*, 2004) และ (Grosche, 2001) กล่าวว่า ในรถยนต์ทุกชนิดในปัจจุบันนั้น เป็นไปไม่ได้เลยที่จะไม่ให้เกิดการไหลปั่นป่วนด้านท้าย โดยเฉพาะรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่ เพราะรูปทรงมีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ และไม่มีลักษณะลู่ลม จะทำให้อากาศเกิดการแยกตัว เกิดการไหลแบบปั่นป่วนด้านท้ายมาก ซึ่งทำให้ค่าแรงต้านสูง แต่อากาศด้านท้ายที่เกิดจากการแยกตัวนั้น ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) จะลดลง จึงได้มีการทดสอบให้รถบรรทุกขนาดใหญ่น 2 คัน วิ่งตามกัน โดย (Browand, 2005) พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลงกว่าคันหน้า และในการทดสอบร่นแข่งของการจำลอง CFD ยังสามารถจำลองสิ่งที่เกิดขึ้นกับด้านท้ายของรถคันหน้า ซึ่งการอาศัยองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์ มาวิเคราะห์ สามารถเห็นประโยชน์ที่รถคันหลังได้รับอย่างชัดเจน เพราะแรงต้านของอากาศของรถคันหลังจะลดลง โดยกระแสอากาศที่ไหลผ่านใต้ท้องรถคันหลังจะลดลง ประการสำคัญแรงดูดของกระแสลมด้านท้ายของรถคันหน้าจะทำให้รถคันตามมีความเร็วเพิ่มขึ้น จึงได้นำหลักการที่กล่าวมา มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ โดยเป็นการทดสอบรถบรรทุกเล็กห้องผู้โดยสาร 2 ตอน ซึ่งเป็นยานพาหนะที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย มาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในกรณีวิ่งตามกัน โดยรถทั้งสองคัน วิ่งตามกันแนวยาว และแนวเอียง ที่ระยะห่างต่าง ๆ โดยใช้ CFD เป็นเครื่องมือในการทดสอบ เพื่อเป็นแนวทางในการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน และลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงโดยใช้ทฤษฎีของ (Leuschen, 2006) เพื่อหาจากการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านจากกรณีปกติ ที่ความเร็วต่าง ๆ ที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม พร้อมทั้งเสนอแนวทางแก้ไขวิธีการขับที่เหมาะสม

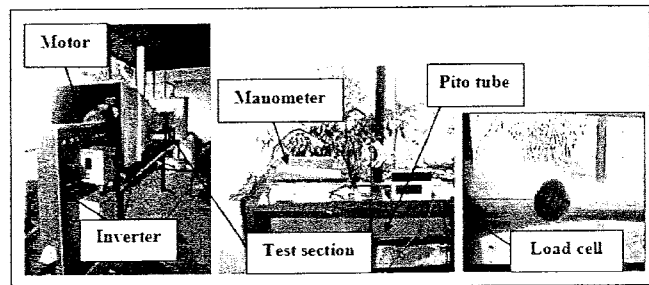
## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

### 2.1 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลม โดยการ

#### ทดสอบใน อุโมงค์ลม และ CFD

ในการทดสอบใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด โดยอากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง (Test section) แล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง อากาศมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ โดยใช้พัดลมดูด

อากาศที่ติดกับมอเตอร์ ขนาด 5.5 hp มีเครื่องมือควบคุมมอเตอร์ (Inverter) เพื่อปรับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านส่วนทดสอบแบบจำลอง มีความเร็วที่ 5 ถึง 10 m/s (18 - 36 km/hr) ใช้manoมิเตอร์ (Manometer) เป็นเครื่องมือวัดความดันและความเร็วอากาศ

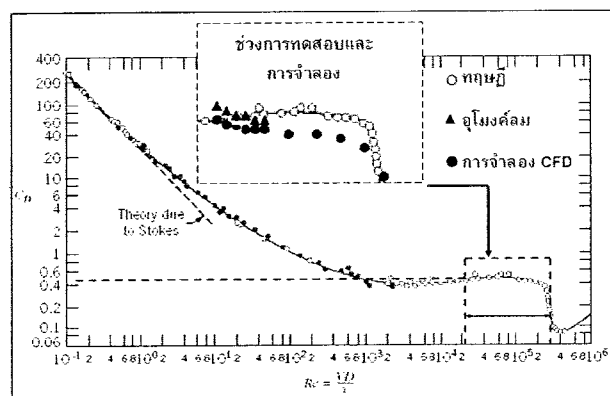


รูปที่ 1 ชุดทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน (อุโมงค์ลม)

แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งใช้ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 m ที่ติดกับเครื่องมือวัดแรงดัน (Load cell) ซึ่งจะเป็นแรงที่อากาศกระทำกับวัตถุทรงกลม นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน จากสมการ

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

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ (N),  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ ) โดยนำผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบด้วยวิธีจำลองเชิง จำลองที่ขนาดและสภาวะเดียวกันกับการทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งจากการทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยอุโมงค์ลมและวิธีจำลองเชิงตัวเลข ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม จะให้ผลต่างที่มีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลขประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ (โดยเฉลี่ย) ซึ่งจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการทดสอบทั้งสองแบบ และเปรียบเทียบกับทฤษฎี แสดงในรูปที่ 2

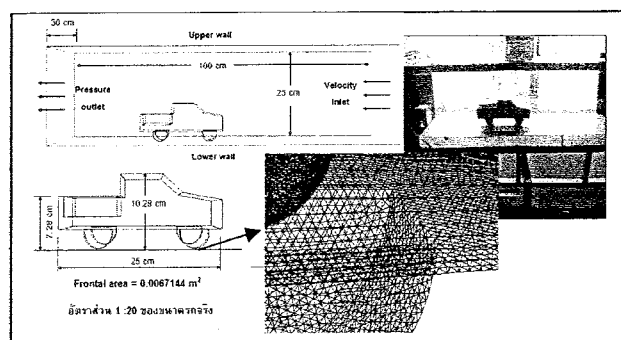


รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ )

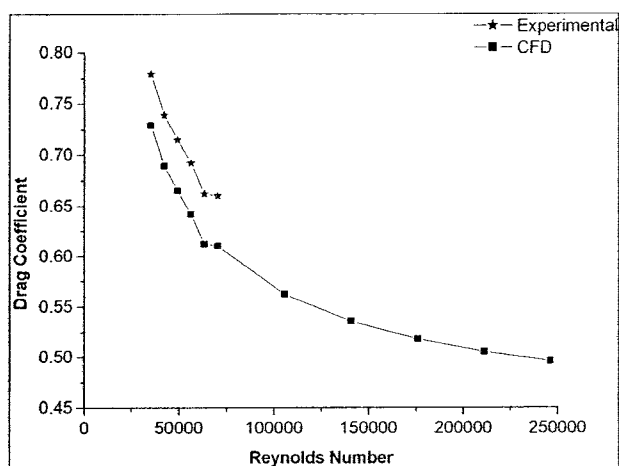
จากรูปที่ 2 เป็นการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลมในอุโมงค์ลม และ CFD เปรียบเทียบกับทฤษฎีอยู่ในช่วง Reynolds number เท่ากับ  $2.2 \times 10^4 - 3.0 \times 10^5$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อ Reynolds number สูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของความหนืดที่ผิวทรงกลมกับอากาศลดลง ผิวทรงกลมจะได้รับผลจากความดันอากาศเพิ่มขึ้น โดยการทดสอบทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกันกับทฤษฎี ซึ่งสามารถนำผลการไหล สมการการคำนวณ ชนิดและจำนวนกริด ไปทดสอบแบบจำลองรถบรรทุกเล็กเพื่อตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านต่อไป

## 2.2 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กแบบจำลอง

การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม ใช้วัสดุทำจากโฟม แบบจำลองมีอัตราส่วน 1:20 ของขนาดจริง มีขนาดพื้นที่หน้าตัด (Frontal area) เท่ากับ  $0.0067144 \text{ m}^2$  ทดสอบที่ความเร็ว 18 - 36 km/hr โดยทดสอบควบคู่กับวิธีจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้ขนาดแบบจำลอง และ Test section เท่ากัน เพื่อเปรียบเทียบผลก่อนที่จะทดสอบขนาดจริงด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขนาดของแบบจำลอง กริด และลักษณะการทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองรถบรรทุกเล็ก ในอุโมงค์ลมและ CFD

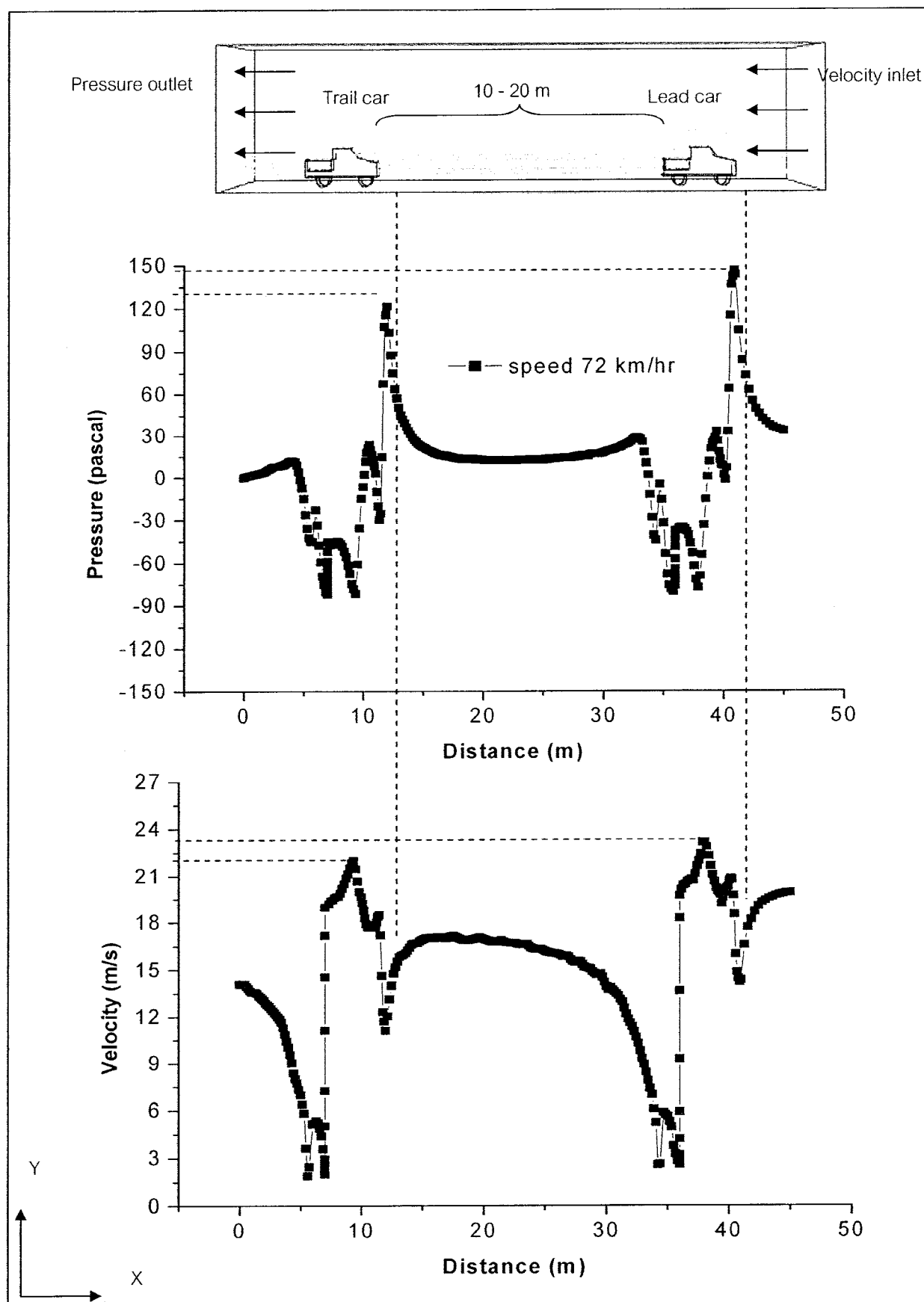
รูปที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองของรถบรรทุกเล็ก ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงเมื่อค่าความเร็วหรือ Reynolds number เพิ่มขึ้น เหมือนกับการทดสอบวัตถุทรงกลม โดยค่าที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลมจะมีค่าสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งมีความแตกต่างไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความกว้างของ Test section ในอุโมงค์ลม ทำให้สภาวะการไหลไม่คงที่ เช่นความเร็ว ความดัน ความหนืด เมื่ออากาศไหลผ่านช่วงการทดสอบแคบลง จะให้ความเร็วสูงขึ้น ความหนืดของอากาศก็มีผลกับผนังของส่วนทดสอบ ทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใช้อุโมงค์ลมสูงกว่าวิธีจำลองเชิงตัวเลข ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ที่จะนำขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองมาใช้ในการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในการทดสอบขนาดจริง

## 2.3 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้าน รถบรรทุกเล็กขนาดจริง กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันตามแนวยาว (แกน x)

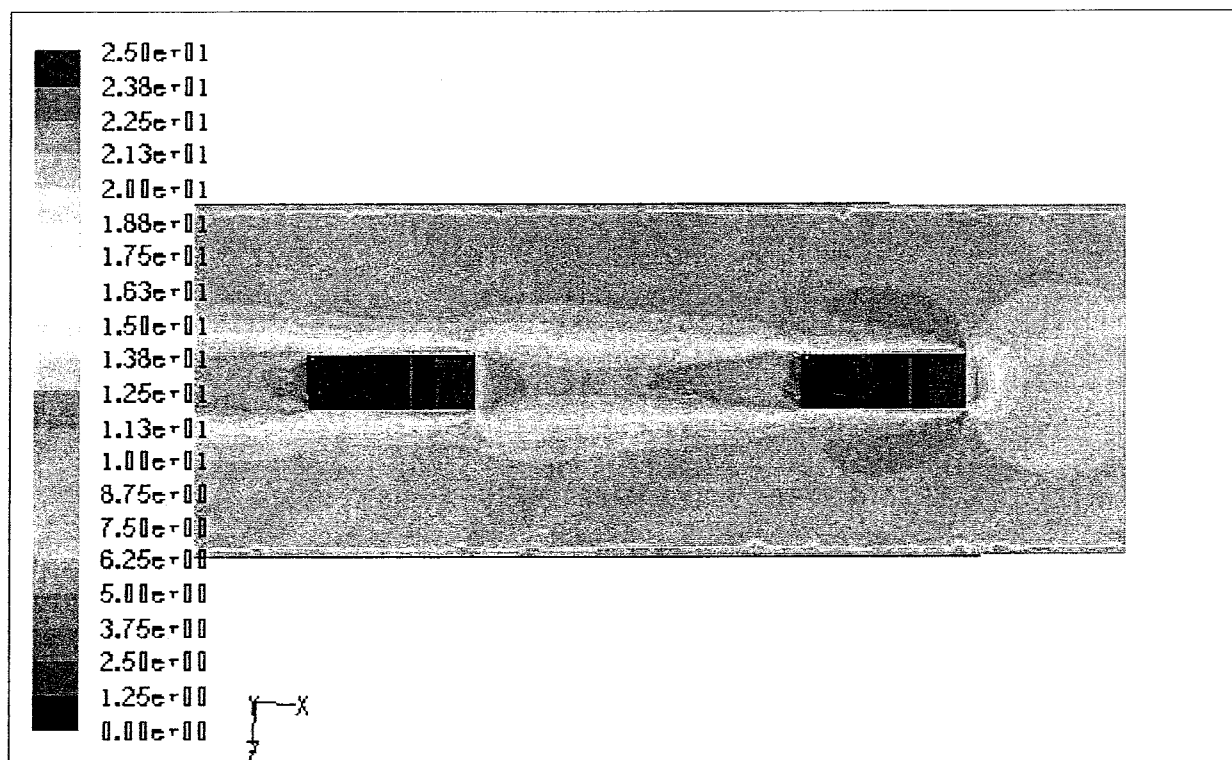
เงื่อนไขในการคำนวณไปใช้จำลองรถขนาดจริง แสดงในตารางที่ 1 โดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข 3 มิติ เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนแปลงไปของรถคันหลัง ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว โดยรถทั้งสองคันอยู่ห่างกันตามแนวยาว (แกน X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, 20 m ดังแสดงในรูปที่ 5 และทดสอบที่ความเร็ว 36, 54, 72, 90, 108, และ 126 km/hr หรือ (Reynolds number  $1.2 \times 10^6 - 4.4 \times 10^6$ ) โดยความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน โดยได้ขยายขนาดความกว้าง และความสูงของผนังด้านข้างและด้านบนของส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้มีผลกับสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการคำนวณ CFD

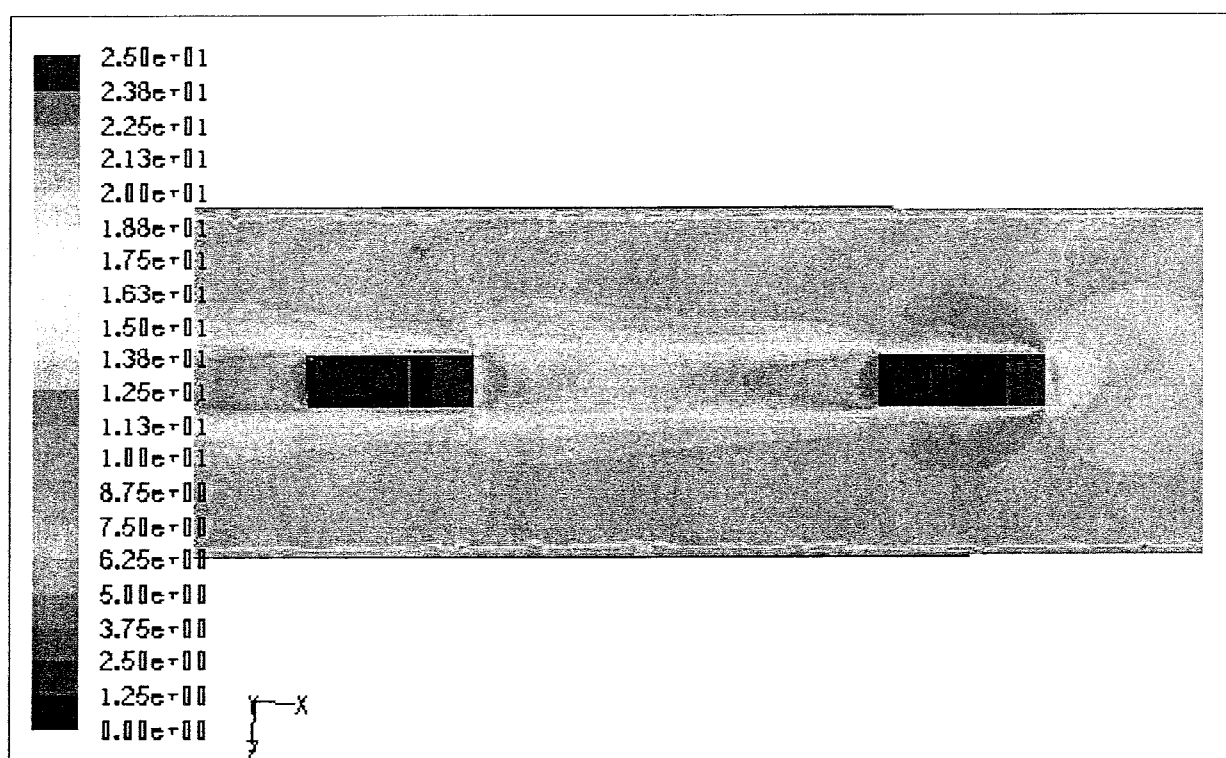
|                                                                                |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| โปรแกรม GAMBIT                                                                 |                        |
| ขอบเขตทางด้านเข้า<br>(Inlet boundary condition)                                | Velocity inlet         |
| ขอบเขตทางด้านออก<br>(Outlet boundary condition)                                | Pressure outlet        |
| จำนวน Grid                                                                     | ประมาณ 728,644 cell    |
| โปรแกรม FLUENT                                                                 |                        |
| ระเบียบการแก้ปัญหา (Solver)                                                    | Segregated Solver      |
| ระเบียบวิธีคำนวณ (Linearization)                                               | Implicit method        |
| แบบจำลองความปั่นป่วน<br>(Turbulent model)                                      | Standard k-epsilon     |
| ระเบียบวิธีการแก้ปัญหาการไหล<br>บริเวณใกล้ผนัง<br>(Near-wall treatment method) | Standard wall function |



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความดัน และความเร็วที่เกิดขึ้นกับรถคันหน้า (Lead car) และคันหลัง (Trail car) ตรงกลางของรถ ตามแนวแกน x



รูปที่ 6 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X10

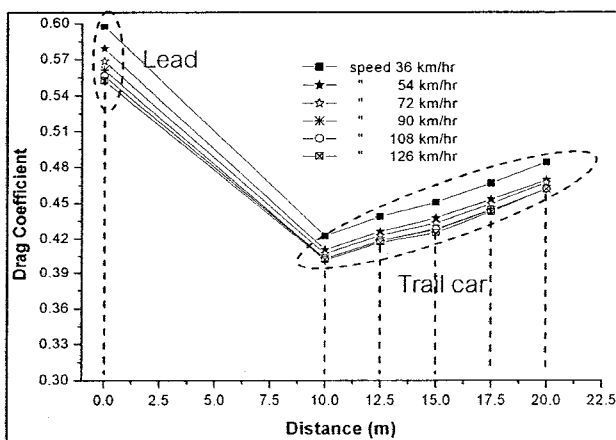


รูปที่ 7 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X12.5

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความดัน และความเร็วของอากาศที่กระทำกับรถคันหน้ามีค่าสูงกว่าที่กระทำกับรถคันหลัง เพราะอากาศปะทะกับด้านหน้าของรถคันหน้าความเร็วจะลดลง เพราะเข้าใกล้จุดหยุดนิ่ง (Stagnation point) ซึ่งมีความดันมากกว่าความดันก่อนที่จะเริ่มเข้าปะทะกับด้านหน้ารถ หรือความดันในระบบ (Total pressure) และจะลดต่ำลงบริเวณท้ายกระบะเนื่องจากความเร็วลดลง ซึ่งทำให้ความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics pressure) ลดลงด้วย ดังนั้นพลังงานจะมีค่าลดลงเพราะ รถคันหน้าจะดูดซับพลังงานที่เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure head) และเฮดความเร็ว (Velocity head) ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกฎสมมูลพลังงาน สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

$$\left( \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right)_{Lead\_car} = \left( \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right)_{Trail\_car} + h_L \quad (2)$$

$h_L$  คือการสูญเสียเฮดรวม (head loss) แทนการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของของไหล,  $p_1$  คือความดันที่รถคันหน้า,  $p_2$  คือความดันที่รถคันหลัง,  $v_1$  คือความเร็วที่รถคันหน้า,  $v_2$  ความเร็วที่รถคันหลัง,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ เท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  คืออัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ซึ่งค่า  $p_1 > p_2$  และ  $v_1 > v_2$  เสมอ ในกรณีที่ทำการศึกษา ซึ่งจะหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังมีค่าลดลงน้อยกว่าคันทันที่แสดง ในรูปที่ 8



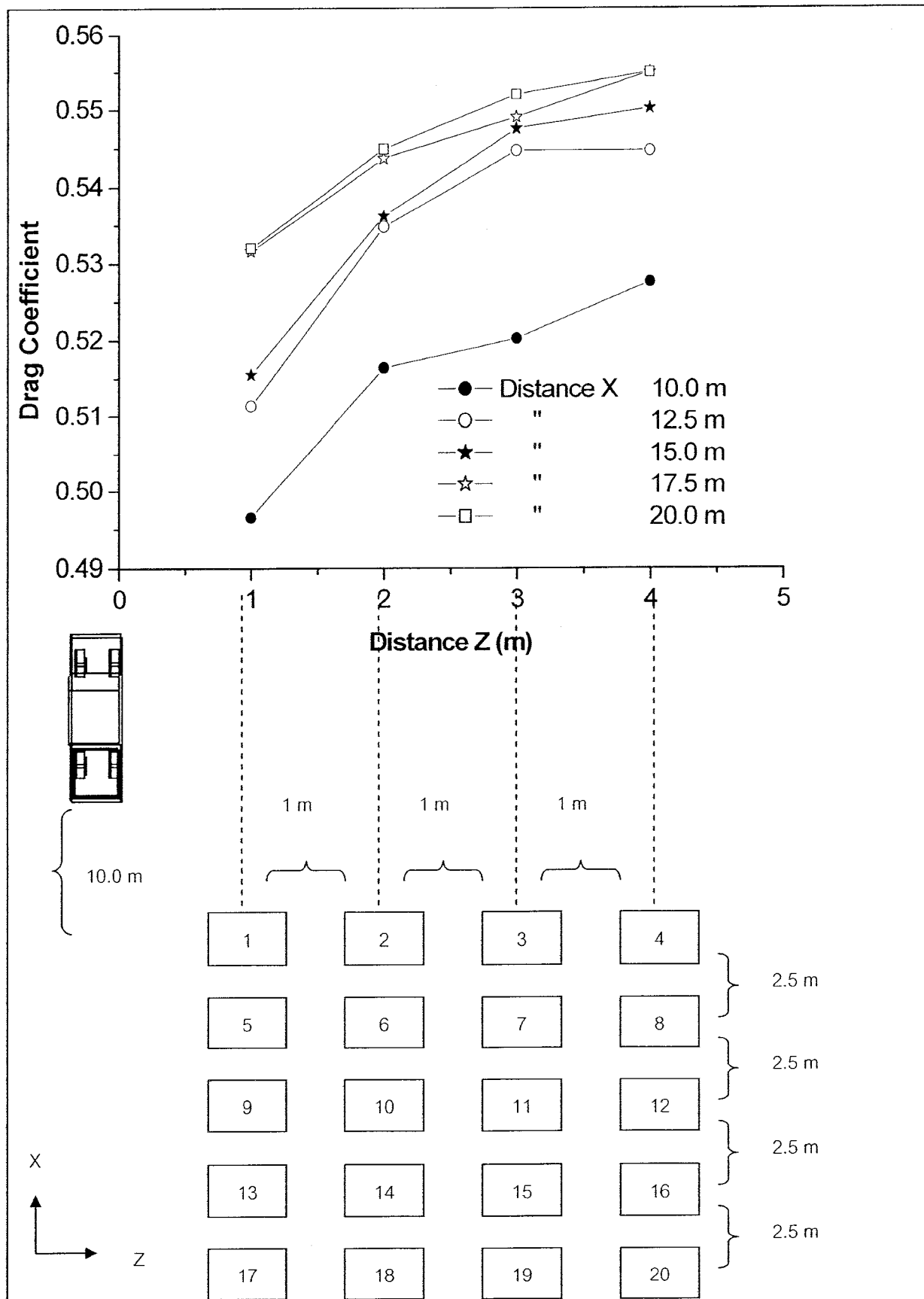
รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลัง ที่ความเร็วและระยะห่างที่ต่างกัน

เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถทั้งสองคัน โดยคันทันค่า  $C_D$  จะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วหรือ Reynolds number เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Reynolds number ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้  $C_D$  ลดลง แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างของรถคันหลัง ส่วนรถคันหลังค่า  $C_D$  จะลดลงจากรถคันหน้า และจะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะห่างที่ลดลง เนื่องจากระยะห่างเข้าใกล้คันทันหน้า เฮดความดัน และเฮดความเร็วจะลดลง จึงทำให้พลังงานที่รถคันหลังได้รับลดลงเมื่อระยะห่างที่ลดลงด้วย และจากความเร็วและ Reynolds number สูงขึ้น

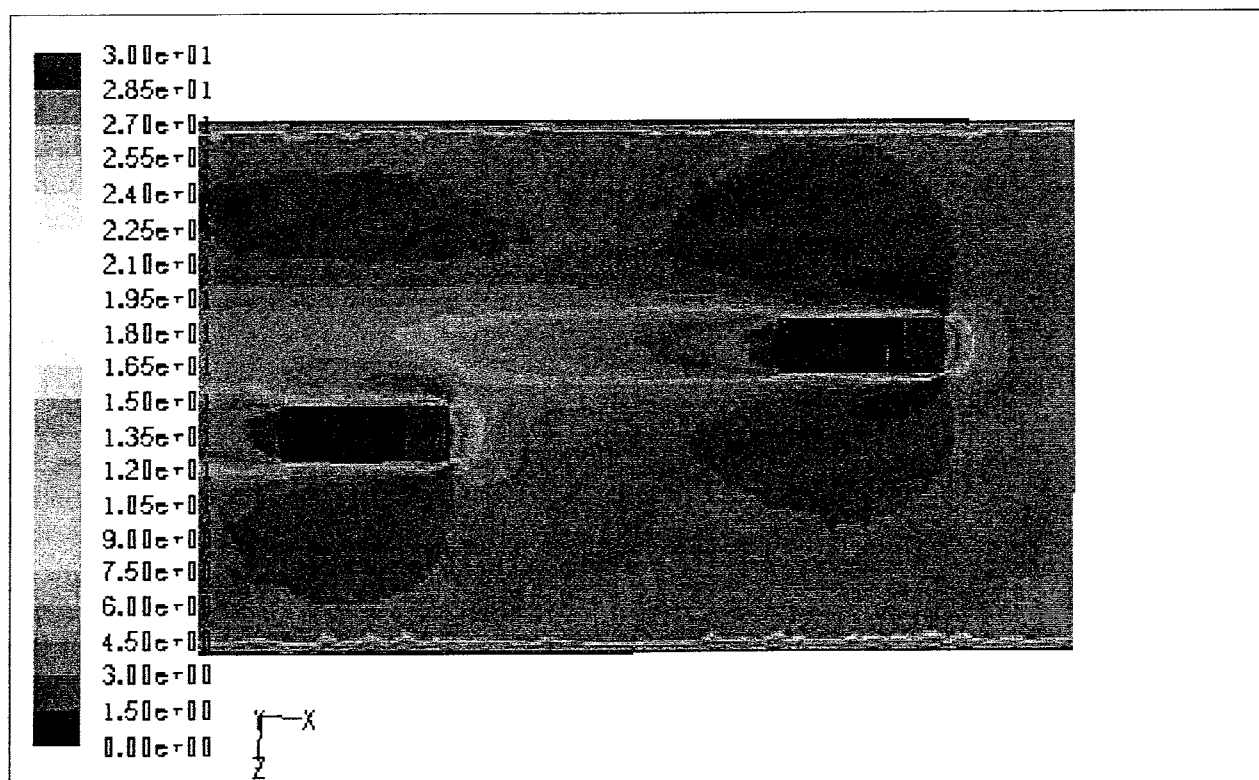
อิทธิพลของอากาศไหลสวนทิศทางย้อนกลับตามรูปทรงของรถ ทำให้เกิดการแยกตัว (Separation) สูงขึ้น และในส่วนที่แยกนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน หรือเรียกว่าเกิดคลื่นวน (Wake) ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถคันหน้า ทำให้ Reynolds number สูงขึ้น จึงมีส่วนทำให้ค่า  $C_D$  ลดลงด้วยเช่นกัน

#### 2.4 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกเล็กขนาดจริง กรณีรถบรรทุกเล็กวิ่งตามกันเยื้องกัน

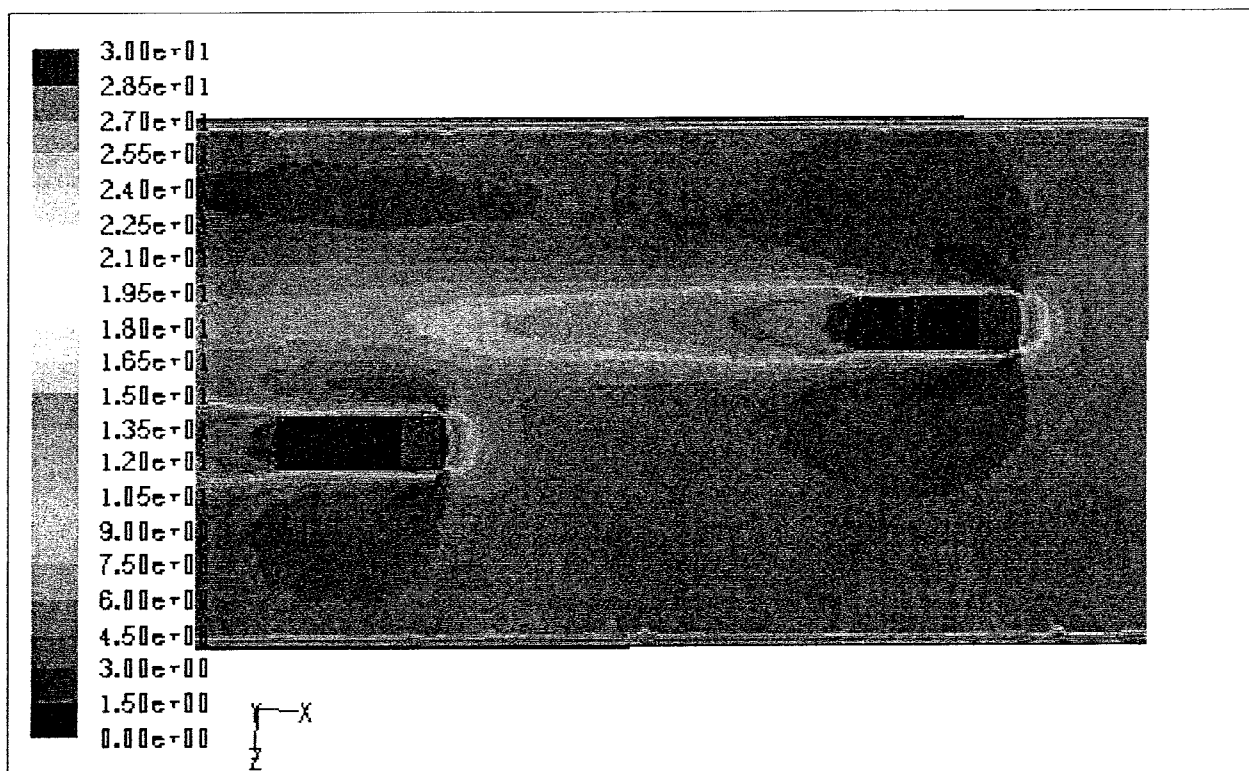
เป็นการจำลองรถขนาดจริง เพื่อตรวจสอบผลสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปของรถคันหลังโดยที่รถทั้งสองอยู่ห่างกันตามแนวยาว (Distance X) ที่ระยะ 10, 12.5, 15, 17.5, และ 20 m และห่างกันตามแนวขวาง (Distance Z) 1, 2, 3, และ 4 m ซึ่งแต่ละตำแหน่งของรถคันหลังที่ทำการทดสอบจะเรียงลำดับเป็นหมายเลข 1 - 20 ทดสอบที่ความเร็ว 90 km/hr ความเร็วรถทั้งสองเท่ากัน ขอบเขตและเงื่อนไขในการจำลองเหมือนกรณีรถวิ่งตามกันตามแนวยาว ดังรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ระยะห่างของรถตามแนวแกน X และ แกน Z โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังจะลดลงจากคันทันหน้า เนื่องรถคันหลังวิ่งเข้าใกล้สนามการไหลแบบปั่นป่วน ที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถคันหน้า ซึ่งมีเฮดความดัน และเฮดความเร็วที่ลดลง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังลดลงด้วย และเมื่อรถคันหลังอยู่ระยะห่างออกไปตามแนวแกน X และ แกน Z ค่าเฮดความดันและเฮดความเร็วที่รถคันหลังได้รับจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจึงเพิ่มขึ้นตามระยะที่รถคันหลังอยู่ห่างออกไปทั้งตามแนวแกน X และแกน Z



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลังที่ระยะห่าง ระยะเยื้องต่างๆ ที่ความเร็ว 90 km/hr



รูปที่ 10 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X10, Z1



รูปที่ 11 ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ที่ระยะคันหลัง X12.5, Z2



## 2.5 อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของการเปลี่ยนแปลง $C_D$

ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบหาสัมประสิทธิ์แรงต้านของกรณีต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption) โดยยึดรถคันหน้ามาเป็นกรณีเปรียบเทียบ หาผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยคำนวณได้จาก

$$\Delta \overline{C_D}(V_i) = \overline{C_D}(V_i)_{baseline} - \overline{C_D}(V_i)_{modified} \quad (3)$$

$\Delta \overline{C_D}(V_i)$  คือค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ความเร็วเดียวกัน โดยยึดรถคันหน้าเป็นมาตรฐาน โดยค่าที่ได้ นำไปหาค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันได้จากสมการ

$$\Delta \mu(V_i) = \frac{\rho \times ucf \times sfc \times V_i^2 \Delta \overline{C_D}(V_i) A}{0.85} \quad (4)$$

$\Delta \mu(V_i)$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วกำหนด (L/100 km),  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ 1.225 kg/m<sup>3</sup>,  $ucf$  = ค่าแฟกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงหน่วย เท่ากับ 1.072,  $sfc$  = อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจำเพาะ (liters/kW-h) โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลคอมมอนเรล ขนาดกระบอกสูบ 3 ลิตร ยี่ห้อโตโยต้า วิโก้รีรันเนอร์ทดสอบ,  $A$  = พื้นที่หน้าตัดของรถ (m<sup>2</sup>), 0.85 = ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของรถ โดยคิดที่ความเร็วเฉลี่ย และเทียบกับระยะทางวิ่งที่ 100,000 km ค่าเป็นบวกแสดงว่าลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ความเร็วเฉลี่ย กรณีวิ่งตามกัน

| ระยะห่าง<br>แนวแกน<br>(X) (m) | ที่ความเร็วเฉลี่ย<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km<br>(ลิตร) | ลดอัตราการ<br>สิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| รถคันหน้า                     | -                               | -                                   | -                                      |
| 10.0                          | 0.4644                          | 464.4                               | 5.70 %                                 |
| 12.5                          | 0.4197                          | 479.7                               | 5.15 %                                 |
| 15.0                          | 0.3903                          | 390.3                               | 4.79 %                                 |
| 17.5                          | 0.3418                          | 341.8                               | 4.19 %                                 |
| 20.0                          | 0.2885                          | 288.5                               | 3.54 %                                 |

ตารางที่ 3 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ 90 km/hr กรณีวิ่งตามกัน

| ระยะห่าง<br>แนวแกน<br>(X) (m) | ที่ความเร็ว 90<br>km/hr<br>(L/100 km) | วิ่งระยะทาง<br>100,000 km<br>(ลิตร) | ลดอัตราการ<br>สิ้นเปลือง<br>น้ำมัน (%) |
|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| รถคันหน้า                     | -                                     | -                                   | -                                      |
| 10.0                          | 0.5313                                | 531.3                               | 6.52 %                                 |
| 12.5                          | 0.4813                                | 481.3                               | 5.91 %                                 |
| 15.0                          | 0.4466                                | 446.6                               | 5.48 %                                 |
| 17.5                          | 0.3939                                | 393.9                               | 4.83 %                                 |
| 20.0                          | 0.3347                                | 334.7                               | 4.11 %                                 |

ตารางที่ 4 ค่าอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่ 90 km/hr กรณีวิ่งเยื้องกัน

| ระยะห่าง<br>แนวแกน<br>(X) (m) | อัตราการสิ้นเปลืองที่ความเร็ว 90 km/hr (L/100 km)<br>ที่ระยะเยื้องต่าง ๆ แนวแกน (Z) |        |        |        |        | วิ่ง<br>ระยะทาง<br>100,000<br>km (ลิตร) | ลดอัตรา<br>การ<br>สิ้นเปลือง<br>น้ำมัน(%) |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
|                               | 1 m                                                                                 | 2 m    | 3 m    | 4 m    | เฉลี่ย |                                         |                                           |
| รถคัน<br>หน้า                 | -                                                                                   | -      | -      | -      | -      | -                                       | -                                         |
| 10.0                          | 0.2178                                                                              | 0.1509 | 0.1381 | 0.1133 | 0.1550 | 115.0                                   | 1.90 %                                    |
| 12.5                          | 0.1681                                                                              | 0.0891 | 0.0558 | 0.0558 | 0.0922 | 92.2                                    | 1.13 %                                    |
| 15.0                          | 0.1539                                                                              | 0.0844 | 0.0464 | 0.0373 | 0.0805 | 80.5                                    | 0.99 %                                    |
| 17.5                          | 0.0998                                                                              | 0.0592 | 0.0413 | 0.0212 | 0.0554 | 55.4                                    | 0.68 %                                    |
| 20.0                          | 0.0985                                                                              | 0.0551 | 0.0313 | 0.0212 | 0.0515 | 51.5                                    | 0.63 %                                    |

ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 เป็นการคำนวณคำนวณที่ความเร็ว 90 km/hr ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้วิ่งในสภาวะปกติ โดยผลของการคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน แสดงให้เห็นว่า เมื่อรถคันหลัง วิ่งเข้าใกล้รถคันหน้า มากเท่าไร ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เกิดจาก สนามการไหลที่มีค่าเฮด พลังงานที่ต่ำกว่าจะมีผลกระทบกับรถคันหลังมากที่สุด แต่ระยะห่างที่ ใกล้เกินไปก็จะมีผลกับความปลอดภัยเป็นหลัง ซึ่งเราสามารถนำหลักการ นี้มาประยุกต์ และวิธีการขับขี่ เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน

## 3. สรุปและข้อเสนอแนะ

ความพยายามที่จะลดแรงต้านที่กระทำกับรถยนต์ ได้ดำเนินการมา อย่างต่อเนื่อง โดยพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้เหลือน้อย ที่สุดด้วยการปรับปรุงทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม แต่วิธีการขับขี่ โดยการวิ่งตามรถคันหน้า ก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถลดอัตราการสิ้น เปลือง ซึ่งจากการทดสอบ ที่ระยะห่าง 10 m อัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงของรถคันหลังลดลงจากคันหน้า 6.52 % (ที่ความเร็วเฉลี่ย) ใน กรณีที่ 2 โดยรถคันหลังวิ่งเยื้องกัน ที่ระยะห่าง 10 m และระยะเยื้อง 1 เมตร อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันของรถคันหลังลดลงจากคันหน้า 1.90 % จากงานวิจัยนี้สรุปว่า รถคันหลังที่วิ่งเข้าใกล้รถคันหน้าทั้งแนวยาว และแนวขวางมากขึ้นเท่าไร จะทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถคันหลัง ลดลงเท่านั้น เนื่องจากความดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Dynamics Pressure) จะลดลงเมื่อเข้าใกล้คันหน้า ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการ ลด อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ได้อีกวิธีหนึ่ง

ค่าที่ได้จากการทดสอบอาจเกิดความคลาดเคลื่อนจาก CFD ไม่ สามารถที่จะกำหนดสภาวะ คุณสมบัติได้เหมือนจริงทุกประการ และการวัดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันให้แม่นยำนั้นทำได้ค่อนข้างยาก ถึงแม้ จะควบคุมสภาวะการขับขี่ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนงานวิจัย ประจำปี 2550

## เอกสารอ้างอิง

- Spalart, P.R. 2000. "Strategies for turbulence modeling and simulation". *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 21: 252-263.
- Horinouchi, N. 1995. "Numerical Investigation of Vehicle Aerodynamics with Overlaid Grid System". SAE 950628.
- Van Dam, C. P. 1999. "Recent experience with different methods of drag prediction". *Progress in Aerospace Sciences*. 35: 751-798.
- Prasad, A. and Williamson, C.H.K. 1997. "A method for the reduction of bluff body drag". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 69-71: 155-167.
- Grosche, F.R. and Meier, G.E.A. 2001. "Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 89: 1201-1218.
- Muyl, F., Dumsa, L. and Herbert, V. 2004. "Hybrid method for aerodynamic shape optimization in automotive industry". *Computers & Fluids*. 33: 849-858
- Brownd, F. 2005. "Reducing aerodynamics drag and fuel consumption". *Advanced Transportation Workshop* Stanford University.
- Leuschen, J. and Cooper, K.R. 2006. "Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers". 2006 SAE International, 06CV-222.

# การศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถยนต์บรรทุกขนาดเล็กโดยการจำลองเชิงตัวเลข

## Investigation on Aerodynamics of Small Utility Truck By Computational Fluid Dynamics

ปรัชญา มุขดา\*กุลเชษฐ์ เพียรทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190 โทร 045-288376-377 โทรสาร 045-288378 E-mail:

[K.Pianthong@ubu.ac.th](mailto:K.Pianthong@ubu.ac.th)

Prachya Mukda\*Kulachate Pianthong

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchatani University

34190, Thailand Telephone: 045-288376-377, Fax: 045-288378, E-mail: [K.Pianthong@ubu.ac.th](mailto:K.Pianthong@ubu.ac.th)

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและปรับปรุงคุณลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดเล็กที่นั่งด้านหน้าสองตอน (cab) ที่ใช้ในประเทศไทย ในกรณีศึกษา 4 ข้อ เปิดท้ายกระบะปกติ, เปิดฝาท้ายกระบะ, ปิดครอบกระบะ และกรณีครอบส่วนหลังทั้งหมด (van) ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน (Frontal area) ทุกกรณี โดยตรวจสอบผ่านการจำลองเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics) ซึ่งใช้โปรแกรม Fluent ที่ได้มีการเปรียบเทียบและยืนยันกับผลการศึกษาที่เคยทำมาก่อน ในศึกษาการไหลผ่าน ใช้ค่าความเร็วระหว่าง 30 – 130 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือเท่ากับค่าเรย์นัลด์ประมาณ  $(1 \times 10^6 - 4.5 \times 10^6)$  โดยมีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อตรวจสอบกลไกการลดแรงต้านพบว่า สัมประสิทธิ์แรงต้านของรถมีค่าสูงกรณีเปิดท้ายกระบะ เนื่องจากเกิดอากาศหมุนวนสูงในส่วนท้ายกระบะ (wake) ซึ่งจะเกิดการสูญเสีย (loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวน เมื่อปะทะกับท้าย

กระบะจะทำให้เกิดแรงต้าน, กรณีเปิดฝาท้ายกระบะ สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงโดยเฉลี่ย 1.73 เปอร์เซ็นต์, กรณีปิดครอบกระบะ สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงโดยเฉลี่ย 6.45 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างความดันด้านหน้าและท้ายกระบะลดลง ความรุนแรงของ wake และความดันย้อนกลับลดลง และกรณีครอบส่วนหลังกระบะทั้งหมด สัมประสิทธิ์แรงต้านเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 5.60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นรูปทรงท้ายวิกฤต (Critical Afterbody Geometry) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างฉับพลัน มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี การปรับปรุงทางอากาศพลศาสตร์นี้จะมีอิทธิพลอย่างสูงต่อการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน

**คำสำคัญ :** การศึกษาอากาศพลศาสตร์ รถยนต์บรรทุกขนาดเล็ก การจำลองเชิงตัวเลข

## Abstract

This study aims to investigate and improve the aerodynamic characteristic of the small pick-up car (cap) in Thailand. Four car models which are (1) normal pick-up box. (2) tail gate opening. (3) covered pick-up box. (4) van. All models have the same frontal area, only aft bodies are different. The FLUENT, CFD package, is used to investigate the flow velocities between 30 – 130 km/hr (or equivalent to Reynolds number of  $(1 \times 10^6 - 4.5 \times 10^6)$ ). The main focus, in this study, is to investigate the aerodynamic mechanism to reduce the coefficient of drag, ( $C_d$ ) due to the wake at the rear body of the pick-up car. When the tail gate is opened the  $C_d$  is lowered by 1.73%. When the pick-up box is fully covered. The  $C_d$  is reduced by 6.45%. This is due to the difference of the pressure at the front and rear of the car. When the van model is used the  $C_d$  is increased by 5.60% because of the critical afterbody effect. From this study, the geometry at the rear body of the pick-up car can significantly affect the  $C_d$ , hence the energy economy.

## 1. บทนำ

การปรับปรุงด้านอากาศพลศาสตร์ของรถ (Aerodynamics) มีความสำคัญอย่างหนึ่งต่อการอนุรักษ์พลังงานของรถยนต์ในปัจจุบัน เพราะการออกแบบรถยนต์ส่วนใหญ่จะเน้นความสวยงามทันสมัย แต่การอนุรักษ์พลังงานในด้านรูปร่างของรถยนต์นั้น ยังมีการศึกษาและปรับปรุงน้อยกว่าในด้านเครื่องยนต์และกลไก โดยรูปร่างของรถเป็นปัจจัย

โดยตรงต่อการเพิ่มหรือลดลงของสัมประสิทธิ์แรง

ต้าน เพราะฉะนั้น หากการออกแบบรูปร่างและการปรับปรุงรูปร่างรถให้มีสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่ำ ก็จะช่วยลดพลังงานในการขับเคลื่อนด้วยอีกวิธีหนึ่ง ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้ด้านอากาศพลศาสตร์โดยการทดลองจึงเป็นสิ่งจำเป็น รถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย ถึงแม้จะมีการออกแบบที่ดีพอควรแล้ว แต่ก็อาจจะสามารถปรับปรุง หรือดัดแปลงให้มีแรงต้านอากาศที่ต่ำลงได้อีก เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงาน และในการใช้งานจริง ผู้ใช้งานมักจะติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อประโยชน์อย่างอื่นหรือเพื่อความสวยงาม ทำให้มีการใช้งานที่ผิดไปจากต้นแบบอยู่เสมอ อาจก่อให้เกิดแรงต้านของอากาศสูง ซึ่งจะทำให้เพิ่มภาระให้กับเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

จากการศึกษาที่ผ่านมา Van Dam และคณะ [1] ศึกษากระบวนการทำนายแรงต้านของวัตถุ ซึ่งได้รวบรวมวิธีการต่าง ๆ ในการหาค่าแรงต้านตั้งแต่ยุคต้น ๆ จนถึงปัจจุบัน โดยศึกษาทฤษฎีของสมการ Euler และ Reynolds-averaged Navier-Stokes เป็นพื้นฐานในการศึกษาการใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลข และได้นำมาเปรียบเทียบกับทดสอบในอุโมงค์ลม โดยได้สรุปความเหมาะสมของกริด และแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแต่ละชนิด นำมาใช้ในการจำลองเพื่อหาแรงต้านของยานพาหนะชนิดต่าง ๆ เช่น เครื่องบิน รถไฟ รถยนต์ ซึ่งเป็นพื้นฐานการประยุกต์ใช้ในการจำลองเพื่อลดแรงต้านของยานพาหนะ ต่อมา Singh และคณะ [2] ทำการศึกษาแรงต้านของรถบรรทุกโดยวิธีคำนวณเชิงตัวเลข โดยเปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิดต่าง ๆ กับผลการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน k- $\epsilon$  ให้ผลที่ใกล้เคียงมากที่สุด และ

ได้นำมาศึกษาผลของระยะห่างระหว่างหัวรถกับตู้ของรถบรรทุก ซึ่งระยะห่างที่น้อยที่สุดจะเกิดแรงต้านที่ต่ำเนื่องจากอากาศที่หมุนวนจะมีขนาดเล็ก และมีการปะทะที่น้อยกว่าระยะห่างมาก ต่อมา Grosche และคณะ [3] ทำการศึกษาการลดแรงต้านของวัตถุทรงเพรียวลม (bluff body) และพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถยนต์ให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงทรงของรถให้มีลักษณะเพรียวลม เพื่อที่จะทำให้เกิดจุดแยกตัว (separation point) เกิดขึ้นด้านท้ายของรถยนต์ให้มากที่สุด และต่อมา Himeno และคณะ [4] ได้นำทฤษฎีการแยกตัว เพื่อใช้ในการออกแบบรถยนต์ยี่ห้อฮิสสัน โดยการปรับปรุงรูปทรงภายนอกให้มีการเกิดการแยกตัวของอากาศให้น้อยที่สุด เนื่องจากทำให้เกิดจะเกิดอากาศหมุนวน (vortex or recirculation) ซึ่งก็เป็นการเกิดการสูญเสีย (loss) ของรถยนต์

ในงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกขนาดเล็ก ด้วยวิธีจำลองเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics) โดยใช้โปรแกรม Fluent ใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน k-ε ร่วมกับระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบและยืนยันกับผลการศึกษาที่ได้ทำมาก่อน (validation) มาทำการจำลองการไหลผ่านรถบรรทุกขนาดเล็ก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การปรับปรุงรูปลักษณะของรถเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้าน โดยการปรับปรุงรูปร่างท้ายกระบะของรถ ในกรณีเปิดท้ายกระบะ ซึ่งเป็นกรณีต้นแบบเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงต้านกับกรณีศึกษาอื่น ๆ คือ กรณีเปิดฝาท้ายกระบะ กรณีปิดครอบกระบะ และกรณีครอบท้ายกระบะทั้งหมด (van) สำหรับขั้นตอนการวิจัยได้ดำเนินดังนี้คือ 1. สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ที่ใช้ 2. การกำหนดปัญหา 3. การตรวจสอบ

สัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองการไหลแบบ

ปั่นป่วนมาตรฐาน k-ε เปรียบเทียบกรณีศึกษาต่าง ๆ ที่กล่าวมา 4. สรุปผลและเสนอแนะ

## 2. ทฤษฎี

แรงรวมของหน่วยแรงเฉือน และความดันที่กระจายทั่วพื้นผิวของวัตถุสามารถหาได้จากการอินทิเกรตแรงทั้งสองครอบคลุมพื้นที่ผิวของวัตถุ โดยมีแรงย่อยในแนวแกน x และ y ของแรงรวมกระทำบนพื้นที่เล็ก ๆ  $dA$  คือ

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (1)$$

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (2)$$

เมื่อ  $\tau_w$  คือแรงเฉือนที่ผิววัตถุ (wall shear stress),  $p$  คือความเค้นที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าของวัตถุเนื่องจากความดัน ดังนั้นจึงสามารถหาแรงรวมในแนวแกน x และ y ที่กระทำต่อวัตถุได้จาก

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (3)$$

$$F_L = \int dF_y = -\int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (4)$$

เมื่อ  $F_D$  คือแรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Drag),  $F_L$  คือแรงรวมที่กระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหล (Lift) ทำการออกแบบเพื่อลดแรงต้านโดยพิจารณาเฉพาะ pressure drag

$$F_D = \int_{front} p \cos\theta dA - \int_{back} p \cos\theta dA \quad (5)$$

ซึ่งลักษณะการไหลที่นำมาวิเคราะห์ คือการไหลแบบปั่นป่วนอัดตัวไม่ได้ จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ และค่า Reynolds number คือสัดส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อยต่อแรงเนื่องจากความหนืด สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$R = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (6)$$

โดย  $R$  คือ Reynolds number,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ,  $V$  คือความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุ,  $L$  คือความยาวของวัตถุที่มีผลต่อสภาพการไหล และ  $\mu$  คือค่าความหนืดของอากาศ

ในกรณีศึกษาค่า Reynolds number จะอยู่ในช่วง  $10^4 - 10^7$  ซึ่งสภาพการไหลจะมีผลโดยตรงมาจากความเฉื่อยเป็นหลัก โดยแรงหลักที่กระทำกับวัตถุคือแรงต้านเนื่องจากความดัน (pressure drag;  $F_p$ ) สามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความดันคือ

$$F_p = C_p \rho \frac{V^2}{2} A \quad (7)$$

โดย  $V$  คือความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุ,  $A$  คือพื้นที่หาบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล,  $C_p$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความดัน (pressure drag coefficient) และแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของหน่วยแรงเฉือน (shear stress;  $F_f$ ) สามารถเขียนสมการของแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานคือ

$$F_f = C_f \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (8)$$

โดย  $C_f$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืด,  $L$  คือความยาวของ

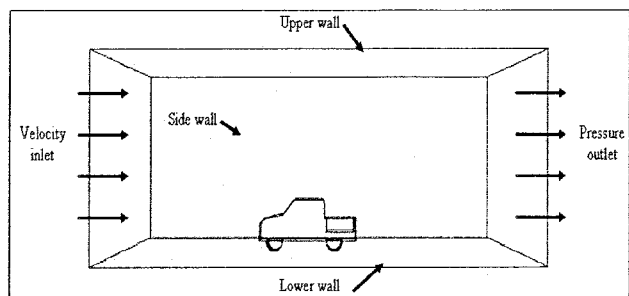
พื้นผิวในแนวขนานกับทิศทางการไหล และ  $B$  คือความกว้างของพื้นผิว  
สมการหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (9)$$

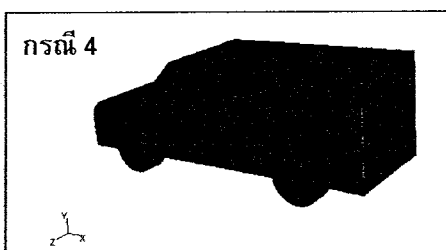
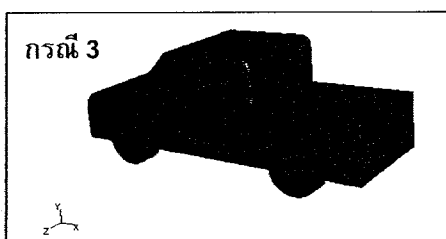
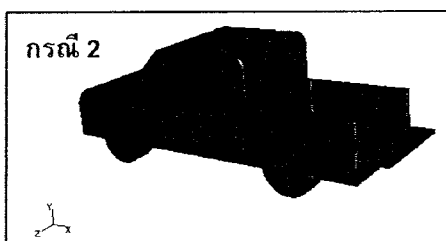
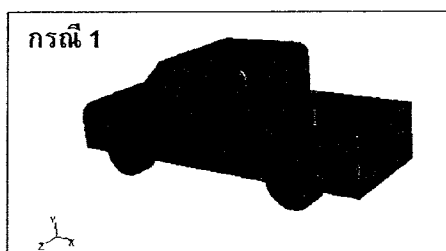
โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์แรงต้านรวม,  $F_D$  คือแรงต้านรวมที่กระทำต่อวัตถุ,  $\rho$  คือความหนาแน่นของอากาศ, และ  $A$  คือพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล (frontal area)

### 3. การคำนวณเชิงตัวเลข

การกำหนดแบบขอบเขตการจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยกำหนดเป็นกล่องสี่เหลี่ยม เสมือนเป็นบรรยากาศล้อมรอบรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 ระยะความยาวของรถเป็น  $L$  ระยะจากด้านอากาศเข้าถึงด้านหน้ารถเป็น  $2L$  ด้านท้ายรถถึงทางออกเป็น  $3L$  ความสูงจากพื้นถึงผนังด้านบนเป็น  $2L$  ระยะด้านข้างรถเป็น  $W$  ระยะจากด้านข้างตัวรถถึงผนังด้านข้างเป็น  $9.5W$  ระยะพื้นถนนถึงพื้นรถคือ  $L_G$  ระยะความสูงของรถจากพื้นคือ  $4.9 L_G$  ใช้ระบบแกน 3 มิติ แกนอ้างอิงติดอยู่กับที่ ในรูปที่ 2 เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์คือรถบรรทุกขนาดเล็กที่นั่งด้านหน้าสองตอน (cab) ในกรณีกระเบหลังเป็นลักษณะเปิดท้ายกระเบปกติ, เปิดฝาท้ายกระเบ, ปิดท้ายกระเบ และรถครอบส่วนหลังทั้งหมด (van) ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของรถเท่ากัน (Frontal area)



รูปที่ 1 เงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์



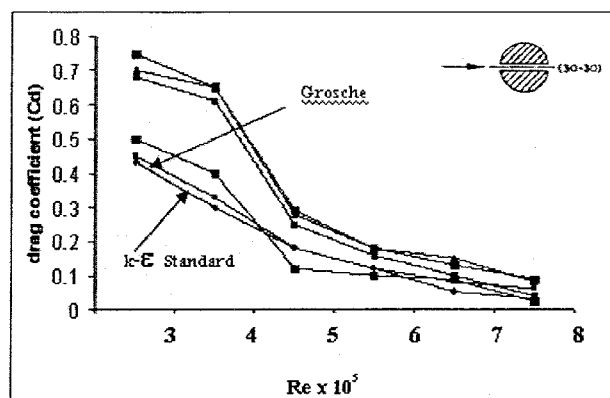
รูปที่ 2 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณดังรูปที่ 1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ความเร็วสัมผัสพัทธ์ของอากาศที่ผิวรถยนต์เป็นศูนย์ เนื่องจากอิทธิพลของความหนืด (No slip boundary condition)
2. สมมุติให้ความเร็วรถคงที่และคงตัว (Uniform Velocity inlet)
3. ความดันในสนามความเร็วที่ทางออก (Pressure outlet) ไม่ถูกรบกวนจากรูปร่างของรถ และให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ
4. การศึกษาที่สมมุติให้เป็นการไหลที่ไม่มีลมปะทะด้านข้าง
5. ที่ผนังด้านบน (Upper wall) และด้านข้าง (Side wall) สมมุติให้ไม่มีฟลักซ์เนื่องจากการพา (Convective flux) และไม่มีฟลักซ์เนื่องจากการแพร่ (Diffusive flux)
6. ผนังด้านล่าง (Lower wall) หรือพื้นถนน ให้เงื่อนไข เช่นเดียวกันกับข้อ 5 และสมมุติให้ความเร็วสัมผัสพัทธ์ระหว่างอากาศกับท้องถนน (Slip condition) เนื่องจากการจำลองต้องการให้เสมือนว่ารถเคลื่อนที่เข้าไปยังอากาศนิ่ง

#### 4. การตรวจสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถและวิเคราะห์ผล

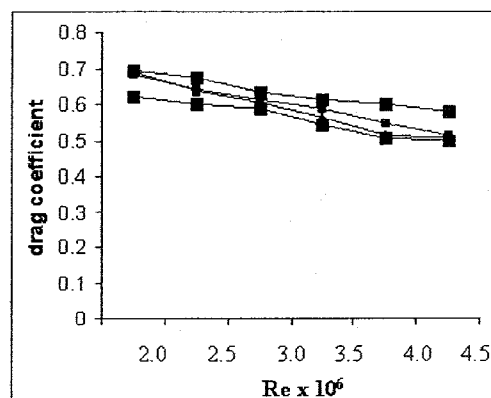
การตรวจสอบค่าแรงต้าน โดยตรวจสอบผ่านการจำลองเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics) ซึ่งใช้โปรแกรม Fluent ที่ได้มีการเปรียบเทียบและยืนยัน (validation) กับผลการศึกษาของ Grosche และคณะ [3] ซึ่งเป็นการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของวัตถุทรงกลมเปรียบเทียบกับวัตถุทรงกลมเจาะรูตรงกลางในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ ใช้อุโมงค์เป็นเครื่องมือในการทดสอบ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 3 โดยเป็นการเปรียบเทียบผลการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนต่าง ๆ กับผลการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของ Grosche



- k-omega Standard
- k-ε Standard
- k-ε RNC
- k-ε SST
- Reynolds Stress
- ผลการทดลองของ Grosche

รูปที่ 3 เปรียบเทียบแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน  
ต่าง ๆ กับผลการทดสอบของ Grosche

ดังนั้นจึงเลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนมาตรฐาน k-ε ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษามากที่สุด โดยจำนวนของกริด (Grid) 355,000 เอลิเมนต์ เป็น Mesh แบบ Tri/Tet (กริดรูปพีระมิด) โดยทดสอบที่ความเร็ว 10, 15, 20, 25, 30, 35 เมตรต่อวินาที ค่าเรย์นัลด์ประมาณ  $(1 \times 10^6 - 4.5 \times 10^6)$  เพื่อตรวจสอบแรงต้านของรถกระบะขนาดเล็ก ที่มีรูปร่างของท้ายกระบะแตกต่างกัน มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( $C_D$ ) ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1 แสดงค่าแรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ความเร็วที่ใช้ในการวิเคราะห์



- เปิดกระบะปกติ
- เปิดฝาท้ายกระบะ
- ปิดครอบกระบะ
- ครอบส่วนหลังทั้งหมด

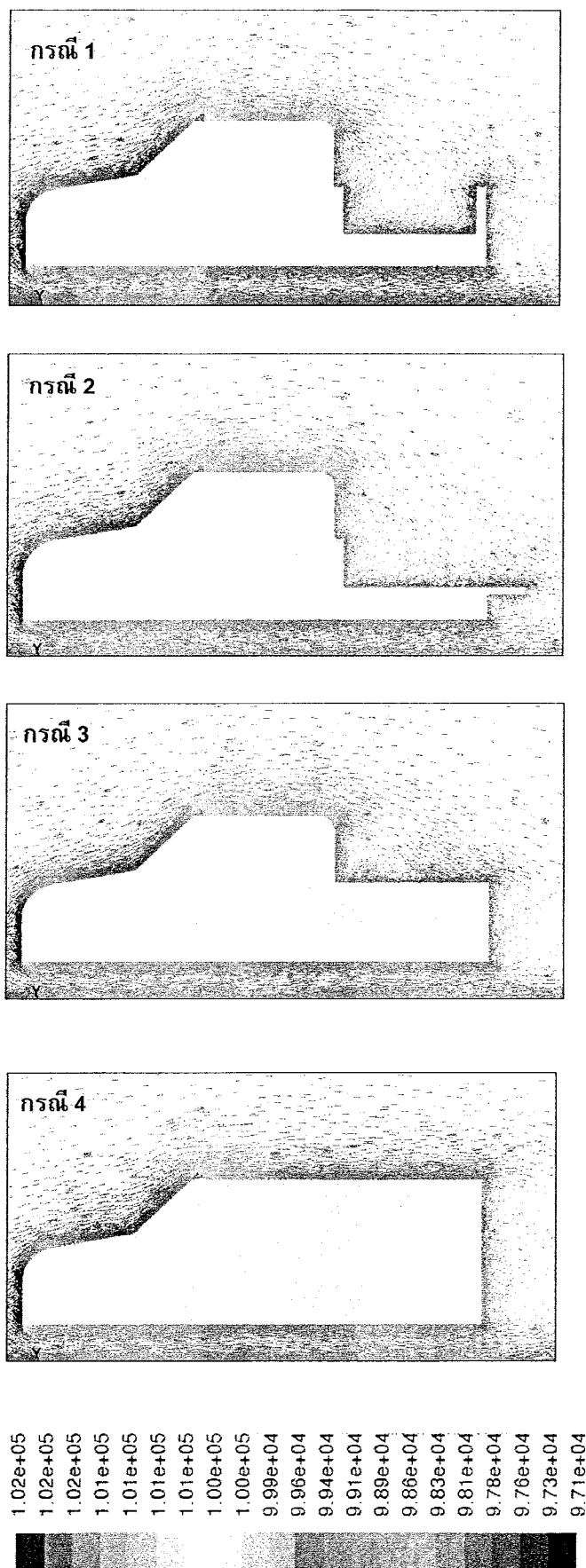
รูปที่ 4 แสดงการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถใน  
กรณีต่าง ๆ กับค่า Reynolds number

| ความเร็ว<br>(m/s)/(Km/h) | Drag Force, $F_D$ (N) / Drag Coefficient, $C_D$ |                     |                  |                  |
|--------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|------------------|------------------|
|                          | เปิดท้าย<br>กระบะปกติ                           | เปิดฝาท้าย<br>กระบะ | ปิดท้าย<br>กระบะ | ครอบส่วน<br>หลัง |
| 10/36                    | 112/0.682                                       | 113/0.689           | 102/0.620        | 114/0.692        |
| 15/54                    | 230/0.642                                       | 237/0.638           | 223/0.601        | 250/0.673        |
| 20/72                    | 401/0.611                                       | 397/0.605           | 385/0.587        | 415/0.632        |
| 25/90                    | 606/0.587                                       | 581/0.563           | 559/0.541        | 631/0.611        |
| 30/108                   | 812/0.546                                       | 767/0.516           | 751/0.505        | 892/0.600        |
| 35/126                   | 1038/0.513                                      | 1028/0.508          | 1003/0.496       | 1176/0.581       |

ตารางที่ 1 แสดงค่าแรงต้าน ( $F_D$ ) และสัมประสิทธิ์แรง  
ต้าน ( $C_D$ ) กับความเร็วที่ใช้ในการวิเคราะห์

จากผลการจำลองนั้น สัมประสิทธิ์แรงต้านจะลดลงและเพิ่มขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความดันด้านหน้าและด้านท้ายกระบะของรถ โดยปัจจัยหลักของการออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการปรับปรุงกระบะของรถโดยที่ทำให้การไหลราบเรียบมากขึ้น จะช่วยให้แรงต้านลดลง และเมื่อพิจารณาจะการไหลผ่านรูปทรงของรถ



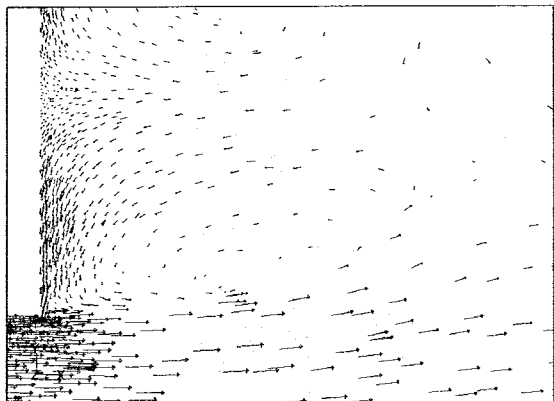


รูปที่ 5 Velocity vector colored by static pressure  
(pascal)

กรณีที่ 1 ซึ่งเป็นกรณีที่มีการเปิดกระบอกปิดนั้น ขนาดของแรงต้านนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันระหว่างด้านหน้าและด้านหลังของรถ โดยแบ่งความแตกต่างออกได้เป็น 3 บริเวณความดันคือ บริเวณที่ 1 บริเวณห้องโดยสาร, 2 บริเวณกระเบ, 3 บริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่าง

ซึ่งทั้ง 3 บริเวณ มีความแตกต่างกันของความดัน ซึ่งบริเวณห้องโดยสารนั้นจะมีความดันสูงเนื่องจาก โมเมนตัมของอากาศ และลดลงเมื่อเข้าสู่ตำแหน่งบริเวณกระเบ ซึ่งหากพิจารณาจากรูปที่ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งระหว่างห้องผู้โดยสารกับบริเวณกระเบ จะเกิดการไหลย้อนกลับเรียกว่าเกิดการแยกตัว (separation) และภายในส่วนนี้จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วนที่เรียกว่าอากาศหมุนวน (wake) ซึ่งก็คือการเกิด การสูญเสีย (loss) ในทางของไหลพลศาสตร์ อากาศที่หมุนวนนี้เมื่อปะทะกับกระเบท้าย จะทำให้เกิดแรงต้านในระดับหนึ่ง ซึ่งการเกิดการแยกตัวนั้น เมื่อนำสมการเบอร์นูลลีมาวิเคราะห์ จะพบว่า การไหลของชั้นนอกมีความเร็วกว่าการไหลของชั้นใน เพราะของไหลที่อยู่ชั้นในได้รับอิทธิพลของความหนืด (viscosity,  $\mu$ ) เกิดแรงเฉือนต้านการไหลข้างและ ความดันที่กดทับจากภายนอก ซึ่งทำให้การไหลของชั้นในมีโมเมนตัมน้อย จึงทำให้ไหลผ่านความดันสูง ๆ ได้ยาก จึงทำให้เกิดการหมุนวน ทำให้ความดันบริเวณกระเบลดลง ส่วนในบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและด้านล่างนั้น ความเร็วของอากาศด้านล่างของรถสูงกว่าด้านบน (พิจารณาจากสมการเบอร์นูลลี) เนื่องจากพลังงานจลน์จากภายนอก ส่งถ่ายเข้าสู่ยานภายในมากขึ้น ทำให้เพิ่มโมเมนตัมในการเอาชนะความหนืดได้สูงขึ้น ทำให้เกิดความดันท้ายรถด้านบนและด้านหลัง มีความแตกต่างกัน จึงเกิดการหมุนวนของ

อากาศและความดันจะลดลงจากบริเวณกระบะ ดังนั้น แรงดันทั้ง 3 บริเวณมีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรงต้าน ดังสมการที่ (5) ดังที่กล่าวมา



รูปที่ 6 การหมุนวนของอากาศ (wake) ที่เกิดจากการแยกตัว (separation)

กรณีที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยมีลักษณะเปิดฝาท้ายกระบะนั้น ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงต้านมีการลดลงอย่างมาก โดยใกล้เคียงกันกับในกรณีที่ 1 ซึ่งในกรณีที่ 2 นั้นการปะทะของอากาศกับฝาท้ายกระบะจะลดลง เนื่องจากเปลี่ยนแนวการติดตั้งฝาท้ายกระบะไปทิศทางขนานกับการไหล ซึ่งเปรียบเสมือนกันยกกระดานของพื้นท้ายรถสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงเช่นกัน (แรงกดเพิ่มขึ้น) แต่จะมีผลกระทบกับการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงยก มากกว่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งการยกกระดานพื้นท้ายรถจะมีผลต่อการกระจายตัวความดันที่ผิวบนของรถน้อยมาก แต่ความดันพื้นรถในกรณีที่ 1 จะสูงกว่าในกรณีที่ 2 เนื่องจากการเปิดฝาท้ายกระบะบังคับให้เกิดการหักตัวของอากาศ ซึ่งต้องใช้แรง (โมเมนตัม) เป็นอย่างมาก ทำให้ความดันต่ำกว่าและเป็นเหตุให้แรงต้านและแรงยกลดลงในระดับหนึ่ง

กรณีที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยปิดครอบกระบะรถ โดยการกระจายของความดันจากรูปที่ 5

กรณีที่ 3 เป็นการลดลงของการหมุนวนของอากาศ เนื่องจากไม่มีการปะทะของฝาท้าย ช่วงการหมุนวนของอากาศก็ลดน้อยลง เนื่องจากความหนาของบริเวณห้องโดยสารค่อย ๆ ลดลงมาบริเวณกระบะ จนมาถึงบริเวณท้ายกระบะ จึงมีความดันย้อนกลับน้อย ดังนั้นจุดแยกตัวจะเกิดขึ้นน้อยเช่นเดียวกัน ทำให้ความดันด้านหลังของรถมีค่าที่สูงขึ้น และสัมประสิทธิ์แรงต้านก็ลดลงกว่ากรณีที่ 1 และ 2

กรณีที่ 4 มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยครอบหลังของกระบะทั้งหมด วิเคราะห์จากรูปที่ 5 กรณีที่ 4 ความหนาของบริเวณห้องโดยสารและบริเวณกระบะจะเท่ากัน แต่ส่วนบริเวณท้ายรถทั้งด้านบนและล่างมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมตัดตรง ซึ่งเป็นรูปทรงด้านท้ายที่ก่อให้เกิดแรงต้านมากที่สุด และเรียกรูปทรงนี้ว่า รูปทรงท้ายวิกฤต (Critical Afterbody Geometry) โดยจากรูป พบว่ารูปทรงด้านท้ายได้มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งถึงรูปทรงท้ายวิกฤต จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลอย่างฉับพลัน มีความดันย้อนกลับสูง จึงทำให้เกิดแรงต้านสูงกว่าทุกกรณี

## 5. สรุปผลและเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (จากการจำลองรถบรรทุกขนาดเล็ก 3 มิติ) ที่ความเร็วต่าง ๆ ของทั้ง 4 กรณีนั้น ซึ่งจากการปรับปรุง สามารถตรวจสอบการลดลงและเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงต้านได้จากการเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 เปิดท้ายกระบะ ซึ่งเป็นกรณีที่มีการใช้งานของรถโดยปกติ ในกรณีที่ 2 เปิดฝาท้ายกระบะสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ย 1.73%, กรณีที่ 3 ปิดครอบกระบะ สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ย 6.45%, กรณีที่ 4 โดยครอบท้ายกระบะทั้งหมด กรณีนี้จากการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของกระบะทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 5.60%

สำหรับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการขาดแคลนข้อมูลที่ใช้ได้ถูกต้องด้วยกันดังนี้ คือ ความไม่ถูกต้องของแบบจำลองของความปั่นป่วน ความผิดพลาดของการแสดงเค้าโครงรถ จำนวนกริดที่น้อยเกินไป และการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขต

จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้าน กรณีปิดท้าย กระบะจะให้ค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด เพราะฉะนั้นการพยายามที่จะลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่กระทำกับรถบรรทุกขนาดเล็กให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับปรุงทรงให้มีลักษณะเพรียวลม นอกจากนี้การลดขนาดของแรงต้านก็ต้องพิจารณาถึงการลดพื้นที่ทาบในแนวทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ (frontal area) หรือกล่าวคือ ออกแบบเพื่อลดความดันในด้านหน้าหรือเพิ่มความดันในด้านหลังของรถ โดยจะมีการปรับปรุงและศึกษาต่อไป ซึ่งจะทำให้เกิดการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้าน สามารถช่วยให้การขับเคลื่อนรถด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลดลง

### เอกสารอ้างอิง

1. C.P. van Dam. Recent experience with different methods of drag prediction. Progress in Aerospace Sciences, 35 (1999) ,751-798
2. S N Singh, L Rai, P Puri, and A Bhatnagar. Effect of moving surface on the aerodynamic drag of road vehicles Proc. KMechE. Automobile Engineering, 219(2000), 98-114
3. F.R. Grosche, G.E.A. Meier. Research at DLR Gottingen on bluff body aerodynamics drag reduction by wake ventilation and active flow control. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (2001), 1201-1218

4. H. Fukuda, K. Yanaginoto, H. China, and K. Nakagawa. Improvenent of vehicle aerodynamics by wake control. SAE Review, 16 (1995), 151-155
5. M.Tomiyama, K. maeda, and F. Nakamura. The development of a method to obtain the optimum lift coefficient using the vehicle dynamic analysis. JSAE Review, 23 (2002), 69-74
6. อาทิตย์ ฤทธิ์เลื่อน และ อุดมเกียรติ นนท์แก้ว. การวิเคราะห์การไหลของอากาศรอบรถยนต์นั่ง วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. ปีที่ 13, ฉบับที่ 2 เม.ย.-มิ.ย 2546

