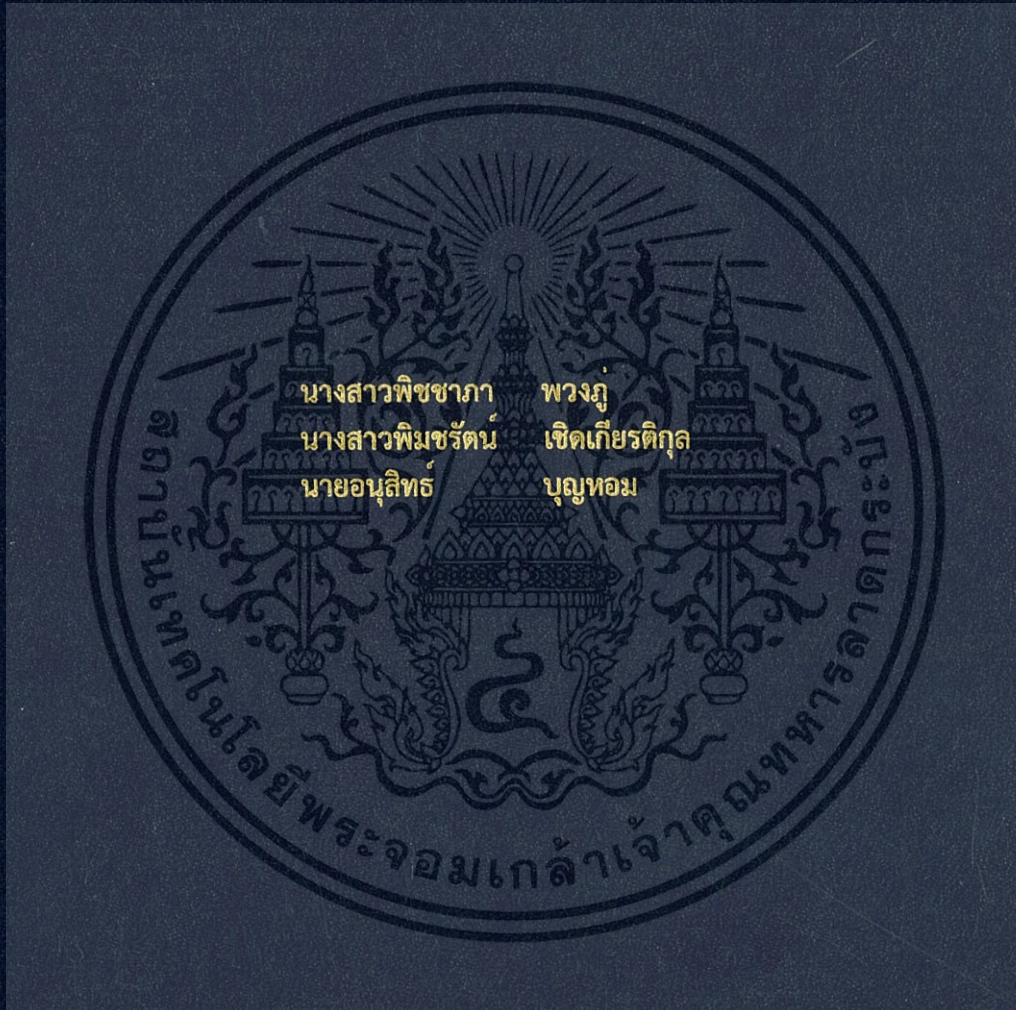


การวิเคราะห์แรงต้านอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้า
ด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

AERODYNAMIC DRAG FORCE ANALYSIS OF A FREIGHT TRAIN USING
COMPUTATIONAL METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

การวิเคราะห์แรงต้านอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้า

ด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

AERODYNAMIC DRAG FORCE ANALYSIS OF A FREIGHT TRAIN USING
COMPUTATIONAL METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง

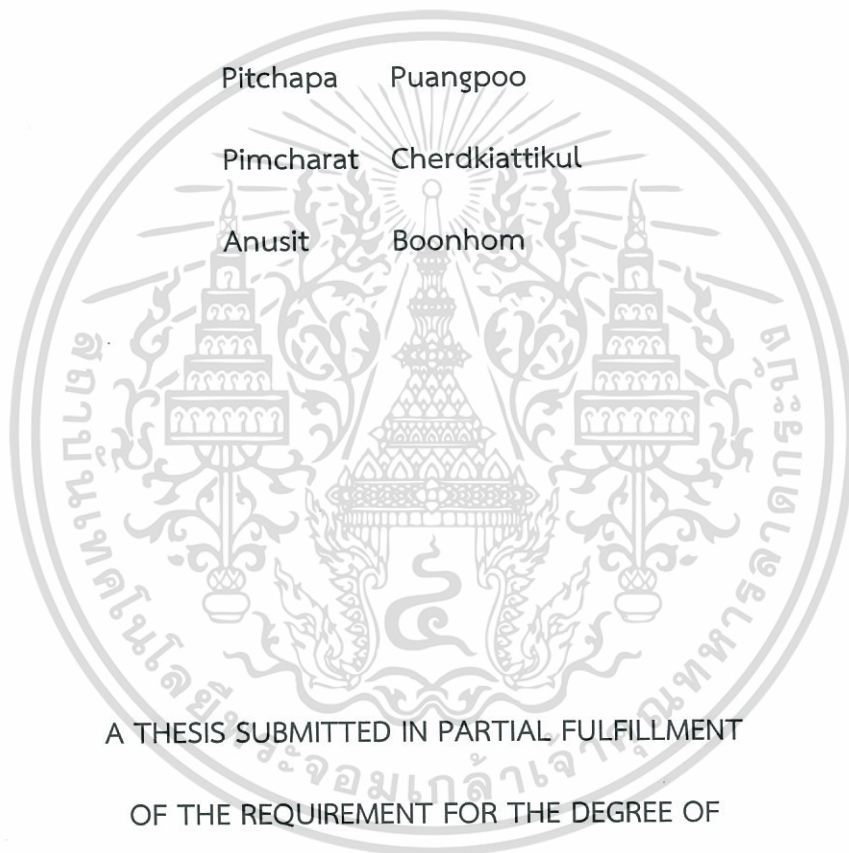
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AERODYNAMIC DRAG FORCE ANALYSIS OF A FREIGHT TRAIN USING
COMPUTATIONAL METHOD



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN RAIL TRANSPORTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์แรงต้านอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้าด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

AERODYNAMIC DRAG FORCE ANALYSIS OF A FREIGHT TRAIN USING COMPUTATIONAL METHOD

ผู้จัดทำ

1. นางสาวพิชชาภา พวงภู 57010889
2. นางสาวพิมพ์รัตน์ เชิดเกียรติกุล 57010904
3. นายอนุสิทธิ์ บุญหอม 57011472

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์แรงต้านอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้า ด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข

นางสาวพิชชาภา พวงภู 57010889

นางสาวพิมพ์รัตน์ เชิดเกียรติกุล 57010904

นายอนุสิทธิ์ บุญหอม 57011472

ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

การขนส่งสินค้าทางรถไฟสามารถขนส่งได้ปริมาณที่มากกว่าและประหยัดค่าใช้จ่ายต่อหน่วยต่ำกว่าการขนส่งสินค้าในรูปแบบอื่นยกเว้นการขนส่งทางเรือ ในการขนส่งสินค้าทางรถไฟต้องมีการขนถ่ายตู้สินค้าระหว่างทางในแต่ละสถานี ทำให้การจัดเรียงตู้สินค้าไม่เหมาะสม เช่น เกิดช่องว่างระหว่างตู้สินค้า เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้แรงต้านอากาศของรถไฟขนส่งสินค้าเปลี่ยนแปลง ดังนั้น โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์แรงต้านอากาศที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนของรถไฟ โดยใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์การจัดวางตู้สินค้าทั้งหมด 32 แบบ (5 ตู้สินค้า) ในขั้นต้นได้มีการเปรียบเทียบค่าแรงต้านอากาศกับการทดสอบโมเดลจำลองในอุโมงค์ลมจำนวน 3 โมเดล คือ 1. ทรงกลม 2. ลูกบาศก์ 3. หัวรถจักร SDA3 จากผลการทดลองพบว่า ค่าที่จากวิธีการจำลองเชิงตัวเลข กับค่าจากการทดลองในอุโมงค์ลมมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นกับการจัดเรียงตู้สินค้าทั้ง 32 แบบ ผลการวิเคราะห์พบว่า การนำตู้สินค้าออกทางด้านท้ายขบวนเป็นรูปแบบที่ช่วยลดแรงต้านอากาศได้ดีกว่าการนำตู้สินค้าออกทางด้านที่ติดกับหัวรถจักร และได้เพิ่มการเปรียบเทียบผลของความเร็วรถไฟ ที่ความเร็ว 10-120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อรถไฟวิ่งด้วยความเร็วต่ำกว่า 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านอากาศมีผลกระทบน้อยกับการเคลื่อนที่ของรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AERODYNAMIC DRAG FORCE ANALYSIS OF A FREIGHT TRAIN USING COMPUTATIONAL METHOD

Pitchapa Puangpoo 57010889

Pimcharat Chedkiattikul 57010904

Anusit Boonhom 570101472

Advisor Asst.Prof. Dr.Monsak Pimsarn

Year 2017

ABSTRACT

Rail transportation can be used to transport goods in greater quantities with lower cost per unit than other types of transportation, except vessel shipment. In rail freight transportation, containers must be unloaded at each station, resulting in improper arrangement of containers, such as, gaps between containers. This results in a change in the air resistance of freight train. This project aims to analyse the air resistance that affects the power consumption of the train using numerical simulation to analyse all 32 container arrangements (5 containers). Initially, there was a comparison of the air resistance with the three models in the wind tunnel; 1. sphere 2. cube 3. SDA3 locomotive. The results showed that the drag coefficients obtained from the simulation and experiment tend to be in the same direction. Then, the numerical model was used to calculate the air resistance of the 32 arrangements of containers. The simulation results showed that removing the container at the rear of the train was a form that reduced the air resistance more than removing the container at the front of the train. Additionally, by comparing the effect of the train speed at speeds of 10 - 120 km / h, it was found that when the train ran at speeds below 50 km / h air resistance has little impact on the movement of the train.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่ เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นางสาวพิชชาภา พวงภู

นางสาวพิมชรัตน์ เชิดเกียรติกุล

นายอนุสิทธิ์ บุญหอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และวิธีดำเนินการวิจัย.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (LITERATURE REVIEW).....	4
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3.1 ประเภทของรถไฟ.....	6
2.3.2 ประเภทของแรงต้านอากาศที่มีผลต่อการขับเคลื่อนรถไฟ.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การคำนวณหาแรงต้านอากาศ (Drag force).....	17
2.3.4 ทฤษฎี Buckingham PI Theory.....	18
2.3.4.1 ขั้นตอนในการใช้วิธี Buckingham PI Theory.....	19
2.3.5 การจำลองแบบและความคล้ายคลึงกันของตัวแปร (Similitude and Similarity Variables).....	22
2.4 สมการควบคุมของการไหล (Governing Equations).....	23
2.4.1 สมการอนุรักษ์มวลในปัญหา 3 มิติ.....	23
2.4.2 สมการโมเมนตัมในปัญหา 3 มิติ.....	25
2.5 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ.....	29
2.5.1 การกำหนดปัญหาที่ใช้ในการทดลอง.....	29
2.6 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation).....	30
2.7 การวัดความเร็วของของไหล.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน และชุดการทดลอง.....	35
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	35
3.2 การเลือกรุ่นของรถไฟและการสร้างแบบจำลองย่อส่วน.....	35
3.3 การสร้างแบบจำลองย่อส่วนการไหลของอากาศผ่านวัตถุ.....	36
3.3.1 สมมติฐานสำหรับการจำลองสถานการณ์ (Simulation).....	36
3.3.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions).....	36
3.4 การออกแบบการทดลองการวัดแรงต้านอากาศพลศาสตร์.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Vong Aung Ing ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอุโมงค์ลม.....	43
3.4.2 ชนิดของอุโมงค์ลม.....	43
3.4.3 ลักษณะโดยทั่วไปของอุโมงค์ลม.....	44
3.4.4 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม.....	44
3.4.4.1 ท่อปีโตต์.....	46
3.4.4.2 โหลดเซลล์.....	47
3.4.5 ขั้นตอนในการทดสอบ.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	54
4.1 ผลของการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม.....	54
4.2 การพิสูจน์ความถูกต้องของการจำลองสถานการณ์.....	57
4.2.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของทรงกลม.....	57
4.2.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของลูกบาศก์.....	59
4.2.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของหัวรถจักร.....	60
4.3 ผลของแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถไฟ ที่การจัดเรียงตู้แบบต่าง ๆ.....	61
4.4 ผลการศึกษาการจัดเรียงตู้.....	71
4.5 การวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางตู้สินค้า.....	73
4.6 สรุปผลการทดลอง.....	80
4.7 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	83
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
ภาคผนวก.....	85
บรรณานุกรม.....	97



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 หน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องทราบ.....	18
3.1 แสดงสมมติฐานสำหรับการจำลองการไหล.....	36
4.1 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบเอาตู้ออกจากด้านหน้า และเอาตู้ออกจากด้านหลังตามลำดับ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	61
4.2 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 1 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	62
4.3 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 2 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	63
4.3 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 3 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	63
4.3 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 4 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ.....	63
4.6 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบเอาตู้ออกจากด้านหน้า และเอาตู้ออกจากด้านหลังตามลำดับ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ.....	66
4.7 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 1 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ.....	67
4.8 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 2 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ.....	68
4.9 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 3 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ.....	69
4.10 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 4 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เล VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงขบวนรถด่วนพิเศษ (Special express).....	6
2.2 แสดงขบวนรถด่วน (Express).....	6
2.3 แสดงขบวนรถเร็ว (Rapid).....	7
2.4 แสดงขบวนรถธรรมดา (Ordinary).....	7
2.5 แสดงขบวนรถชานเมือง (Bangkok commuter).....	8
2.6 แสดงขบวนรถท้องถิ่น (Rural commuter).....	8
2.7 แสดงขบวนรถท่องเที่ยว (Excursion).....	9
2.8 แสดงขบวนรถสินค้าทั่วไป.....	10
2.9 แสดงขบวนรถสินค้าปูนซีเมนต์.....	11
2.10 แสดงขบวนรถสินค้าผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป.....	12
2.11 แสดงขบวนรถสินค้าน้ำมันดิบ.....	13
2.12 แสดงขบวนรถสินค้าแก๊สแอลพีจี.....	14
2.13 แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง (Running resistance, R_r).....	15
2.14 แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้ง (Curves resistance, R_c).....	15
2.15 แรงต้านทานขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นไปบนทางลาดชัน (Grade resistance, R_g).....	16
2.16 แรงต้านทานที่เกิดขึ้นขณะที่เร่งความเร็ว (Inertia resistance, R_{in}).....	16
2.17 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนย่อยของไหล.....	24
2.18 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนย่อยของไหล.....	26

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x	27
2.20 แสดงเส้นสายธารการไหลของอนุภาค.....	30
2.20 แสดงหัวตรวจความดันนิ่ง.....	34
3.1 แสดงตำแหน่งของผนังทิศทางการไหลของอากาศ.....	37
3.2 แสดงตำแหน่งของผนังทิศทางการไหลของอากาศ.....	38
3.3 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลม ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS.....	39
3.4 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนรูปลูกบาศก์ ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS.....	40
3.5 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนรูปหั่วรถจักร SDA3 ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS.....	41
3.6 แสดงการกำหนดชื่อของขอบเขต.....	41
3.7 แสดงการเลือกรูปแบบการคำนวณ.....	42
3.8 แสดงการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต.....	42
3.9 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล.....	43
3.10 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุโมงค์ลม.....	45
3.11 แสดงส่วนการวัดความเร็วอากาศภายในอุโมงค์ลม.....	46
3.12 แสดงลิ่งปีโตต์ชนิดต่าง ๆ.....	46
3.13 แสดงลักษณะของโพลดเซลล์.....	47

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ภายในอุโมงค์ลม โดยต่อเข้ากับโพลดเซลล์.....	49
3.15 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ภายในอุโมงค์ลม โดยต่อเข้ากับโพลดเซลล์.....	50
3.16 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักร SDA3 ไว้ภายในอุโมงค์ลมโดยต่อเข้ากับโพลดเซลล์.....	50
3.17 แสดงวาล์วปีกผีเสื้อคู่ที่ติดตั้งอยู่ที่ทางออกของพัดลม และปุ่มเปิดเครื่องทดสอบอุโมงค์ลม.....	51
3.18 แสดงระดับความสูงของน้ำในมานอมิเตอร์ ท่อที่ 1 และท่อที่ 3 (นับจากทางขวามือ).....	51
3.19 แสดงการต่อโพลดเซลล์เข้ากับเครื่องวัดค่าอุโมงค์ลม.....	52
3.20 แสดงหน้าจอการตั้งค่าโพลดเซลล์ให้น้ำหนักเริ่มต้นเป็น 0.....	52
3.21 แสดงหน้าจอแสดงผลสำหรับการอ่านค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน)ของโมเดลจำลองที่ความเร็วนั้น ๆ.....	53
4.1 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) สำหรับทรงกลม.....	54
4.2 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation)สำหรับลูกบาศก์.....	55
4.3 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation)สำหรับหัวรถจักร SDA3.....	56
4.4 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) และกราฟสำหรับ Smooth sphere สำหรับโมเดลทรงกลม.....	57
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ drag coefficient อ้างอิงจาก fundamentals of fluid mechanics	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ **X**้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) สำหรับโมเดลลูกบาศก์.....	59
4.7 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) สำหรับโมเดลหัวรถจักร.....	60
4.8 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกทางด้านที่ติดกับหัวรถจักร.....	71
4.9 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกทางด้านท้ายขบวน.....	72
4.10 เส้นคอนทัวร์ของความดันของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด.....	76
4.11 เส้นคอนทัวร์ของความดันของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แย่ที่สุด.....	77
4.12 เส้นคอนทัวร์ของความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด.....	78
4.13 เส้นคอนทัวร์ของความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แย่ที่สุด.....	78
4.14 เวกเตอร์ความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด.....	79
4.15 เวกเตอร์ความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แย่ที่สุด.....	80

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

F_D	แรงต้านอากาศ (นิวตัน)
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ
A_f	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (ตารางเมตร)
Re	เลขเรย์โนลด์
Eu	เลขออยเลอร์
R_L	แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง (นิวตัน)
R_C	แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้ง (นิวตัน)
R_G	แรงต้านทานขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นไปบนทางลาดชัน (นิวตัน)
R_{in}	แรงต้านทานที่เกิดขึ้นขณะที่เร่งความเร็ว (นิวตัน)
A	ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของตลับลูกปืน
B	ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของบังใบล้อ
C	ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของอากาศ
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
V	ความเร็วของอากาศ (เมตร/วินาที)
M	มวล (กิโลกรัม)
L	ความยาว (เมตร)
t	เวลา (วินาที)
F	แรง (นิวตัน)
μ	ความหนืดจลน์ของอากาศ (นิวตันวินาที/ตารางเมตร)
τ	แรงเฉือน (นิวตัน/ตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เลข XIII นี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p_0	ความดันอ้างอิง (นิวตัน/ตารางเมตร)
k	พลังงานจลน์
ϵ	อัตราการกระจายตัว
μ_t	ความหนืดปั่นป่วนแบบไหลวน
C_t	ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$
$C_{\epsilon 1}$	ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$
$C_{\epsilon 2}$	ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$
σ_k	ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$
σ_ϵ	ค่าคงที่ที่ใช้ในแบบจำลอง $k-\epsilon$
\bar{t}	ความเค้นตามแนวแกน (ปาสคาล)
\vec{F}	เวกเตอร์แรงกระทำกับวัตถุ (นิวตัน)
I	หนึ่งหน่วยเวกเตอร์
f_i	โมเมนต์ดัดของแรงภายนอก (กิโลกรัมเมตร/วินาที)
G_k	พลังงานจลน์ของการไหลปั่นป่วน จากเกรเดียนต์ของความเร็วเฉลี่ย (จูล)
G_b	พลังงานจลน์ของการไหลปั่นป่วน จากแรงลอยตัว (จูล)
Y_M	การเพิ่มความแปรปรวนในอัตราการแพร่รวมแบบปั่นป่วน
P	ความดัน (นิวตัน/ตารางเมตร)
U	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
τ_{xy}	ความเค้นเฉือนในทิศ xy (ปาสคาล)
τ_{yz}	ความเค้นเฉือนในทิศ yz (ปาสคาล)
τ_{xx}	ความเค้นเฉือนในทิศ xx (ปาสคาล)
S_{Mx}	อัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนต์ดัดในทิศทาง x (กิโลกรัมเมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เลขXIVของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S_{My} อัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง y (กิโลกรัมเมตร/วินาที)

S_{Mz} อัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง z (กิโลกรัมเมตร/วินาที)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แล **xv**ของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การให้บริการขนส่งสินค้าทางรถไฟมีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งการขนส่งทางรถไฟทำให้สามารถขนส่งสินค้าได้ครั้งละจำนวนมากจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วยต่ำกว่าการขนส่งในรูปแบบอื่น อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลภาวะน้อยกว่าทางถนนด้วย แต่เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการเดินทางนาน บรรจุภัณฑ์ของสินค้าจะต้องสามารถทนต่อแรงกระแทกสูงได้ เพราะต้องมีการขนถ่ายเข้าจากสถานีรถไฟไปยังสถานีปลายทาง และเหนือสิ่งอื่นใด ข้อจำกัดทางด้านรางรถไฟซึ่งก็คือเส้นทางที่มีอยู่จำกัด ทำให้การขนส่งทางรถไฟมีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าการขนส่งแบบอื่น ดังนั้น จึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการขนส่งสินค้าทางรถไฟประเภทรถบรรทุกตู้สินค้า (Container Flat Wagon) โดยการลดแรงต้านอากาศ (Drag Force, F_D) จากการจัดเรียงตู้สินค้าให้เหมาะสม เพื่อประหยัดพลังงาน

โครงการนี้จึงวิเคราะห์การลดแรงต้านอากาศ โดยจะพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient, C_D) เป็นหลัก ซึ่งการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆด้วยกัน ส่วนแรกคือ ทำการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเพื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี ส่วนที่สองคือ ทำการจำลองสถานการณ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเพื่อเทียบกับการทดลองจริง ซึ่งผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางหนึ่งในการออกแบบและจัดเรียงตู้สินค้าเพื่อให้การขนส่งสินค้าทางรถไฟมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

สำหรับวัตถุประสงค์เบื้องต้นในโครงการนี้เพื่อศึกษารูปแบบการจัดเรียงตู้สินค้าให้เหมาะสมที่สุด เพื่อลดต้นทุนในการขนส่งจากการประหยัดพลังงาน โดยโครงการนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS [7] และการนำแบบจำลองย่อยส่วนไปทดสอบในอุโมงค์ลม ซึ่งเป็นที่นิยมและเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ โดยวัตถุประสงค์หลักของโครงการนี้ประกอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient, C_D) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) จากโปรแกรม ANSYS กับค่าที่ได้จากการทดสอบจากอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) ซึ่งประกอบด้วยรูปร่างอย่างง่าย เช่น ทรงกลม ลูกบาศก์ และหัวรถจักร SDA3
2. เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย อิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re), อิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient, C_D) และอิทธิพลของรูปแบบในการจัดเรียงตู้สินค้า ว่าที่มีผลต่อการลดแรงต้านอากาศอย่างไร
3. เพื่อศึกษาถึงการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าโดยการนำตู้สินค้าออกทางด้านท้ายขบวน เทียบกับการนำตู้สินค้าออกทางด้านที่ติดกับหัวรถจักร ว่าการจัดเรียงแบบไหนมีประสิทธิภาพในการลดแรงต้านอากาศมากกว่า

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1. หากช่องว่างระหว่างตู้สินค้ากับตู้สินค้า หรือช่องว่างระหว่างหัวรถจักรกับตู้สินค้าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ค่าแรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนรถจะเพิ่มมากขึ้นด้วย
2. หากความเร็วในการเคลื่อนที่ของขบวนรถเพิ่มมากขึ้น ค่าแรงต้านอากาศของขบวนรถจะเพิ่มขึ้นด้วย
3. หากจัดเรียงตู้สินค้าโดยการนำตู้สินค้าออกจากท้ายขบวนก่อนแล้วเหลือตู้สินค้าที่ติดกับหัวรถจักรเป็นตู้สุดท้าย จะทำให้ลดแรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนรถได้มากกว่าการจัดเรียงตู้รูปแบบอื่น
4. การจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม จะสามารถวัดค่าแรงต้านอากาศและสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ได้ค่าที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าจากการทดลองโดยอุโมงค์ลมโดยแบบจำลองอย่างง่าย เช่น ทรงกลมและลูกบาศก์และหัวรถจักรจำลอง

1.4 แนวความคิดที่ใช้ในโครงการ

1. นำวิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS จากแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่สามารถเชื่อถือได้ มาใช้เป็นแนวทางในการจำลองสถานการณ์ (Simulation)
2. นำขนาดสเกลจริงของหัวรถจักร SDA3 (SDA3 Locomotive) มาทำการออกแบบหัวรถจักร SDA3 ขนาดจำลองย่อส่วน โดยนำเอาหลักการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงกัน (Similarity Analysis) มาอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient , C_D) ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์จากโปรแกรม ANSYS เทียบกับค่าที่ได้จากการนำโมเดลจำลองไปทดสอบภายในอุโมงค์ลม

1.5 ขอบเขตการศึกษา

1.5.1 ศึกษาตัวแปรที่ผลต่อการลดแรงต้านอากาศของรถไฟขนส่งสินค้า ประกอบด้วย

- สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient , C_D)
- เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re)
- รูปแบบในการจัดเรียงตู้สินค้าขนาด 40 ฟุต

1.5.2 สามารถทำการหาค่าแรงต้านอากาศที่ได้จากการทดสอบของแบบจำลองย่อส่วนภายในอุโมงค์ลมได้ ซึ่งแบบจำลองย่อส่วนประกอบด้วย ทรงกลม ลูกบาศก์ และหัวรถจักร SDA3 ขนาดจำลอง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูล ทำการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดแรงต้านอากาศ โดยพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient , C_D) เป็นหลัก
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของพลศาสตร์ของไหล (ANSYS, FLUENT)
3. กำหนดลักษณะรูปร่างจากรูปทรงอย่างง่ายไปจนถึงรูปทรงที่ต้องการจะทำการวิเคราะห์ และสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมออกแบบทางพลศาสตร์ของไหล
4. ทำการออกแบบหัวรถจักรขนาดจำลองจากสัดส่วนจริงของหัวรถจักร SDA3 ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปติดตั้งภายในอุโมงค์ลม โดยใช้หลักการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงกัน (Similarity Analysis) มาใช้ในการคำนวณหาขนาดสเกลที่เหมาะสมและถูกต้อง
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง เทียบกับผลการทดสอบจากอุโมงค์ลม
7. สรุปผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์พร้อมข้อเสนอแนะในการทำการวิจัยต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 บทนำ

การที่อากาศเกิดการเคลื่อนที่จากบริเวณหนึ่ง ไปยังบริเวณหนึ่ง เกิดจากความดันที่แตกต่างกันในบริเวณสองบริเวณ ความแตกต่างของความดันนั้นเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ และการสะสมความร้อนของผิวโลก ทำให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงลอยตัวขึ้นสูง และอากาศบริเวณใกล้เคียงที่อุณหภูมิต่ำกว่าเข้ามาแทนที่อากาศเป็นของไหลที่มีความหนืดและความเสียดทาน ดังนั้นเวลาที่อากาศไหลผ่านพื้นผิวที่มีความขรุขระ จะเกิดแรงเสียดทานมีผลทำให้ความเร็วลดลง และเกิดการไหลวน แต่แรงเสียดทานนี้จะสามารถลดลงได้ เมื่อเราก่อแบบรูปร่างของวัตถุที่อากาศไหลผ่านให้เหมาะสม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (LITERATURE REVIEW)

คมเดช แยมสุคนธ์ และคณะ [1] ศึกษาผลการทดลองภายในอุโมงค์ลมเพื่อหาค่า Drag force และ Drag coefficient ของรูปทรงกลม และศึกษาชนิดของอุโมงค์ลม เพื่อที่จะสามารถเลือกชนิดของอุโมงค์ลมที่เหมาะสมกับโมเดลจำลองของโครงการ วิธีการนำโมเดลจำลองมาทดสอบภายในอุโมงค์ลม และวิธีในการเก็บค่าแรงต้านอากาศที่ได้จากอุโมงค์ลม

จารุวัฒน์ มัดจูปะ และคณะ [2] ศึกษาขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม ANSYS เบื้องต้น เพื่อนำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ในปัญหาการไหลทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ สำหรับรูปทรงอย่างง่าย เช่น ทรงกลม ลูกบาศก์ หัวรถจักร SAD3 และการจัดเรียงขนดคู่สินค้าแบบที่สามารถลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุด

ปราโมทย์ เดชะอำไพ [3] ศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ซึ่งประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์มวล, สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม, สมการเชิงอนุรักษ์พลังงาน, ระบบสมการนาเวียร์ - สโตกส์ และเงื่อนไขขอบเขต เพื่อที่จะนำมาใช้พิจารณาปัญหาการไหลใน 2 มิติ และ 3 มิติ ที่จะใช้ในการจำลองสถานการณ์ (Simulation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล [4] ศึกษาการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวได้ ซึ่งประกอบด้วยสมการพื้นฐาน และวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เพื่อที่จะนำมาใช้พิจารณาปัญหาการไหลใน 2 มิติ และ 3 มิติ ที่จะใช้ในการจำลองสถานการณ์ (Simulation)

Barlow et al. [5] ศึกษาขั้นตอนในการทำงานใช้งานอุโมงค์ลม โดยเริ่มตั้งแต่ขนาดของโมเดลจำลองที่จะนำมาใช้ทดสอบภายในอุโมงค์ลม วิธีการเลือกขนาดของ load cell ที่เหมาะสมกับโมเดลจำลอง ไปจนถึงการติดตั้งโมเดลจำลองภายในอุโมงค์ลม และวิธีในการเก็บการเก็บค่าแรงต้านอากาศที่ได้จากอุโมงค์ลม

Paul et al. [6] ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้าด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย โดยศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่เกิดจากรูปขบวนของรถไฟ ได้แก่ รูปร่างของขบวน และระยะห่างระหว่างตู้สินค้า พบว่า ขบวนรถที่มีผิวสัมผัสเรียบจะมีค่าแรงต้านอากาศน้อยกว่าที่มีผิวขรุขระ และการลดระยะห่างระหว่างตู้ให้น้อย ๆ จะทำให้แรงต้านอากาศลดลง ซึ่งการลดแรงต้านอากาศจะส่งผลให้ประหยัดพลังงานในการเคลื่อนที่ด้วย

Kinghorn [7] ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถไฟขนส่งสินค้า เพื่อการประหยัดพลังงาน โดยการสร้างแบบจำลองรถไฟ แล้วนำไปทดสอบในอุโมงค์ลม วัดค่าแรงต้านที่กระทำกับแบบจำลอง โดยปรับขนาดตู้สินค้าขนาดต่าง ๆ และลำดับการจัดวางตู้ เพื่อที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าน้อยที่สุด พบว่าการใช้ตู้สินค้าที่มีความยาวมากกว่า ทำให้ระยะห่างของแต่ละตู้แคบลง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศลดลงตามกัน

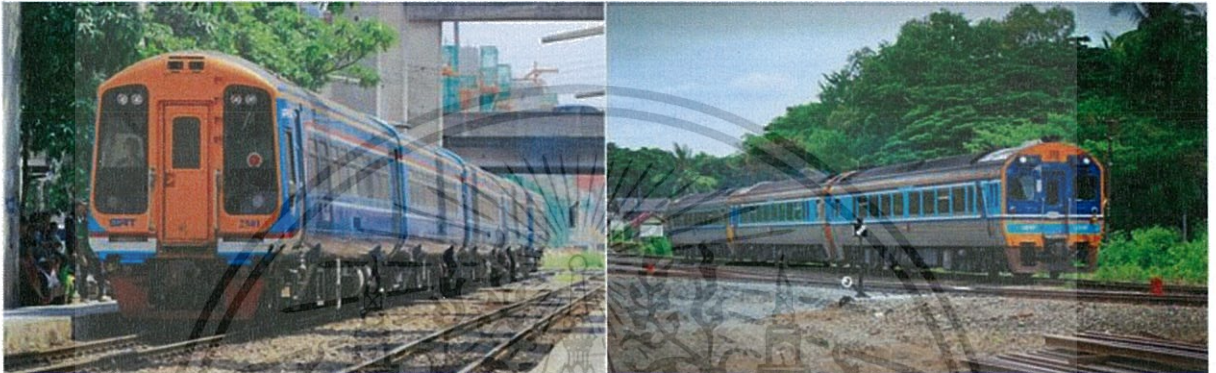
Garcia et al. [8] ศึกษาอากาศพลศาสตร์ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์เชิงตัวเลขของรถไฟที่มีผิวสัมผัสเรียบ และขรุขระ โดยใช้โปรแกรม ANSYS-Fluent เก็บค่าที่ได้จากการจำลองในรูปแบบของแรง และโมเมนต์ และนำค่าไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองในอุโมงค์ลม โดยใช้โมเดลรถไฟจำลองอัตราส่วน 1:10 พบว่าผลการจำลองสถานการณ์โดยใช้โปรแกรม กับผลการทดลองในอุโมงค์ลมมีทิศทางไปในทางเดียวกัน คือพื้นผิวที่เรียบกว่าจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศลดลง

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ประเภทของรถไฟ

ในประเทศไทยจะแบ่งรถไฟออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

1. รถไฟสำหรับโดยสาร มีทั้งหมด 7 ชนิด ประกอบด้วย



รูปที่ 2.1 แสดงขบวนรถด่วนพิเศษ (Special express)

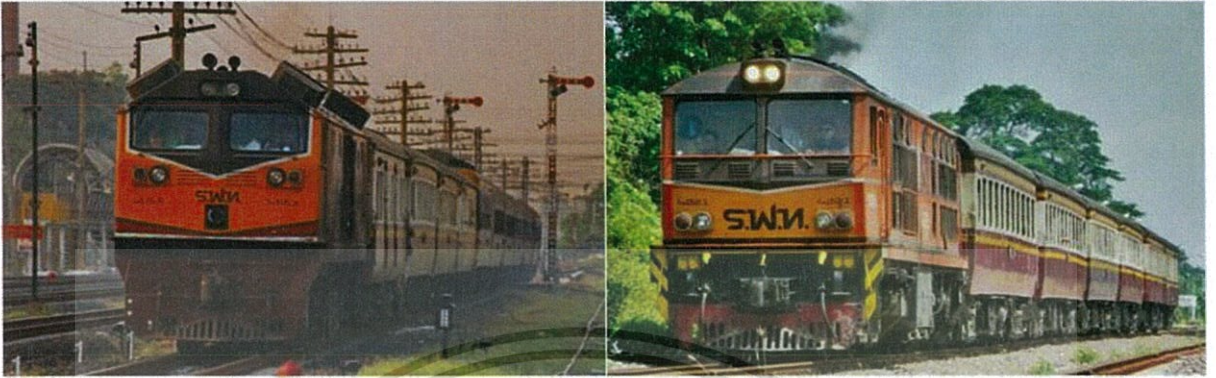
ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>



รูปที่ 2.2 แสดงขบวนรถด่วน (Express)

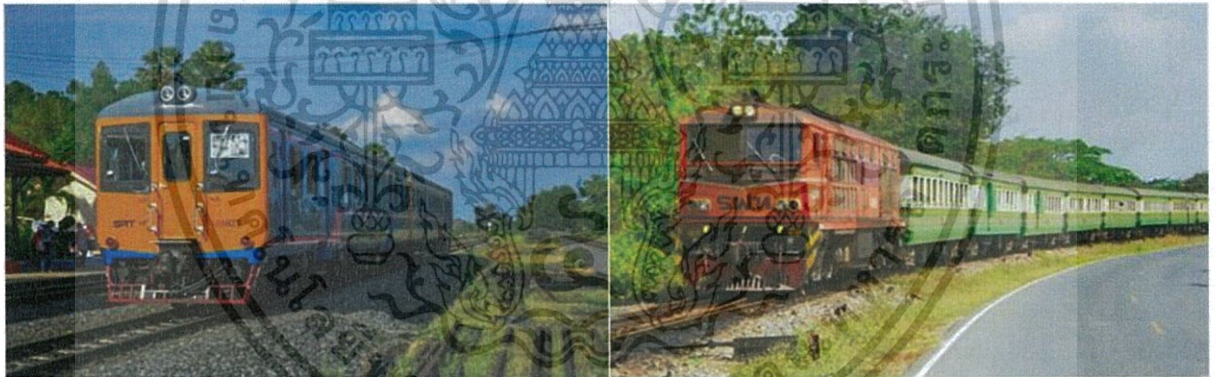
ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงขบวนรถเร็ว (Rapid)

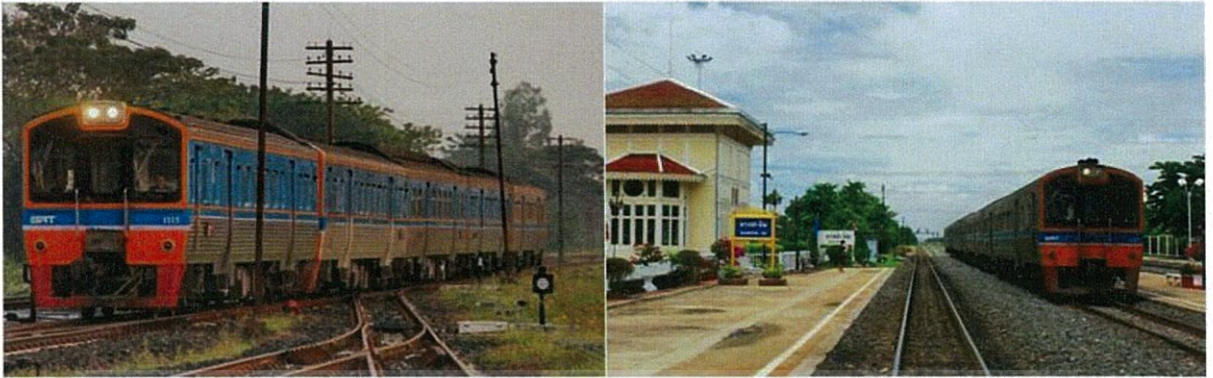
ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>



รูปที่ 2.4 แสดงขบวนรถธรรมดา (Ordinary)

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงขบวนรถชานเมือง (Bangkok commuter)

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>



รูปที่ 2.6 แสดงขบวนรถท้องถิ่น (Rural commuter)

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงขบวนรถท่องเที่ยว (Excursion)

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. รถไฟสำหรับขนส่งสินค้า มีทั้งหมด 5 ชนิด ประกอบด้วย



รูปที่ 2.8 แสดงขบวนรถสินค้าทั่วไป

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงขบวนรถสินค้าปูนซีเมนต์

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงขบวนรถสินค้าผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูป

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงขบวนรถสินค้าน้ำมันดิบ

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



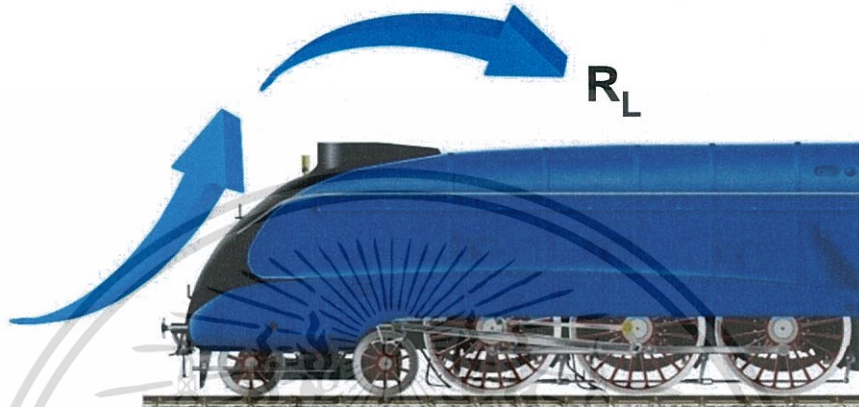
รูปที่ 2.12 แสดงขบวนรถสินค้าแก๊สแอลพีจี

ที่มา <http://www.railway.co.th/main/service/passenger/type.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ประเภทของแรงต้านอากาศที่มีผลต่อการขับเคลื่อนรถไฟ

แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง คือแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยจะเพิ่มมากขึ้นตามความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ



รูปที่ 2.13 แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง (Running resistance, R_L)

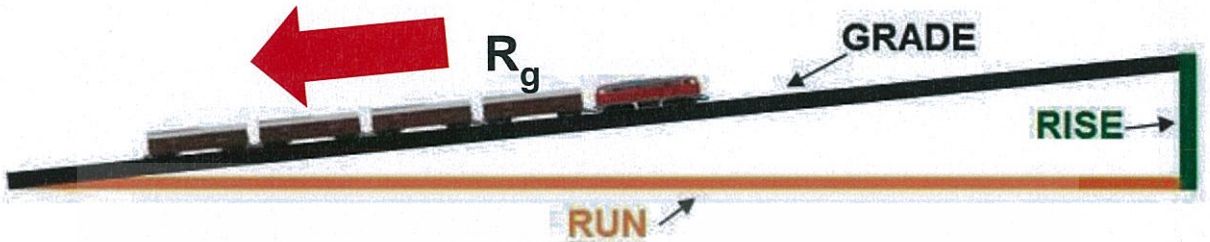
แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้ง คือแรงที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุมีการเคลื่อนที่เข้าโค้ง โดยจะแปรผันตามกับรัศมีของโค้งและการยกโค้ง โดยจะมีความเร็วที่เหมาะสมที่ทำให้แรงที่กระทำต่อวัตถุที่ค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 2.14 แรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังเคลื่อนที่เข้าทางโค้ง (Curves resistance, R_C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงต้านทานขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นไปบนทางลาดชัน คือแรงต้านที่จะเกิดขึ้นเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ขึ้นทางชัน เป็นผลมาจากความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก



รูปที่ 2.15 แรงต้านทานขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นไปบนทางลาดชัน (Grade resistance, R_g)

แรงต้านทานที่เกิดขึ้นขณะที่เร่งความเร็ว คือแรงต้านที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทาง การเคลื่อนที่ หรือก็คือแรงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ 2.16 แรงต้านทานที่เกิดขึ้นขณะที่เร่งความเร็ว (Inertia resistance, R_{in})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการของแรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่ง (Running resistance, R_L) คือ

$$R_L = A + BV + CV^2 \quad (2.1)$$

โดยที่ A คือ ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของล้อ

B คือ ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของบังใบล้อ

C คือ ค่าคงที่เนื่องมาจากแรงต้านของอากาศ

โดยที่เทอม CV^2 คือเทอมที่มีผลมาจากแรงต้านอากาศ (Air resistance) ดังนั้น จึงพิจารณาผลจากแรงต้านทานขณะที่รถไฟกำลังวิ่งเป็นหลัก

2.3.3 การคำนวณหาแรงต้านอากาศ (Drag force)

แรงต้านอากาศ คือ แรงที่เกิดขึ้นบนผิวของวัตถุที่เราสนใจ อันเนื่องมาจากแรงดันและแรงเสียดทานของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุนั้น ๆ โดยที่สมการของแรงต้านอากาศ คือ

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A_f \quad (2.2)$$

โดยที่ F_D คือ แรงต้านอากาศที่กระทำกับวัตถุ

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

V คือ ความเร็วของอากาศ

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

2.3.4 ทฤษฎี Buckingham Pi (The Buckingham PI Theory)

ทฤษฎี Buckingham Pi เป็นทฤษฎี [9] ที่แสดงถึงการลดจำนวนตัวแปรในการวิเคราะห์ของไหลในอุโมงค์ลมให้อยู่ในรูปตัวแปรต่าง ๆ อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Variables) และจะนำทอมตัวแปรไร้มิตินี้มาช่วยวิเคราะห์ผลการทดลองและช่วยทำนายตัวแปร (Variables) ที่มีผลกระทบต่อการไหล โดยการที่เราจัดทอมต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิตินั้นนอกจากจะช่วยทำนายตัวแปรที่มีผลต่อการไหลแล้วยังช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองอีกด้วย ก่อนที่เราจะทำการเปลี่ยนตัวแปรที่มีมิติหรือตัวแปรที่มีหน่วย ให้เป็นตัวแปรไร้มิติหรือตัวแปรที่ไม่มีหน่วย เราจะต้องรู้หน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

ในกรณีนี้เราจะพิจารณามิติหรือหน่วยพื้นฐานของกลุ่ม M, L, T

โดยที่ M คือ มวล (Mass)

L คือ ความยาว (Length)

T คือ เวลา (Time)

ตารางที่ 2.1 หน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องทราบ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย M,L,T
F	แรง	$M \cdot L / T^2$
ρ	ความหนาแน่น	M / L^3
V	ความเร็ว	L / T
D	ความยาว	L
μ	ความหนืดจลน์	$M / L \cdot T$

เมื่อเข้าใจมิติพื้นฐานของกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้นแล้วจะทำการเปลี่ยนตัวแปรที่มีมิติให้เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเราจะใช้วิธีทฤษฎี Buckingham Pi ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในการพิจารณาซึ่งโครงการนี้จะพิจารณารูปทรงอากาศพลศาสตร์ที่มุมปะทะอันหนึ่ง ของหัวรถจักร SDA3 โดยที่แรง F ที่กระทำกับ หัวรถจักร SAD3 นี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความหนาแน่นของของไหล ρ
2. ความเร็วของของไหล V
3. ความหนืดของของไหล μ

โดยแรง F ที่กระทำบนวัตถุเป็นผลมาจากแรงปะทะของของไหลกับวัตถุ ซึ่งเป็นผลมาจากมวลและความเร็วของของไหล ดังนั้นเราจึงนำอิทธิพลของ ความหนาแน่นของของไหล ρ (มาจากสูตร $\rho = \frac{m}{V}$) และความเร็วของของไหล V มาพิจารณา ส่วนความหนืดของของไหล μ เป็นผลมาจาก แรงเฉือน (Shear Force) τ (มาจากสูตร $\tau = \mu \frac{du}{dy}$) ที่ผิวของวัตถุซึ่งเป็นผลมาจากความหนืดของของไหล ดังนั้นเราจึงนำอิทธิพลของความหนืดของของไหล μ มาพิจารณา

2.3.4.1 ขั้นตอนในการใช้วิธีทฤษฎี Buckingham- π

1. หาจำนวนตัวแปรทั้งหมดของปัญหา โดยกำหนดให้เป็นค่า k

ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ $R = f(D, \rho, \mu, V)$ โดยที่ R คือ แรง

ดังนั้น $k = 5$
2. เลือกมิติหรือหน่วยพื้นฐานของกลุ่มตัวแปรที่ใช้ โดยในที่นี้จะเลือกพิจารณาของกลุ่ม M, L, T
3. เลือกตัวแปรซ้ำ (Repeating Variables) โดยตัวแปรที่เราเลือก คือ
 - 3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวกับลักษณะของไหล คือ ความหนาแน่นของของไหล ρ
 - 3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ คือ ความเร็ว V
 - 3.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับขนาดของความยาว คือ ความยาว D
4. หาจำนวนตัวแปรซ้ำทั้งหมด โดยกำหนดให้เป็นค่า r

ซึ่งมีตัวแปรซ้ำทั้งหมด 3 ตัวแปร ดังนั้น $r = 3$
5. หาจำนวน PI (Π) จากสมการ

$PI = k - r$ แทนค่าที่ $k = 5, r = 3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า $PI = 5 - 3$

$$= 2$$

ดังนั้น สมการ PI จึงมีทั้งหมด 2 สมการ (Π_1, Π_2)

โดยที่ $\Pi_1 = f(R, D, V, \rho)$

$$\Pi_2 = f(\mu, D, V, \rho)$$

6. นำสมการแต่ละตัวมายกกำลังด้วยค่าคงที่

$$\text{จะได้ว่า } \Pi_1 = R^{a_1} D^{b_1} V^{c_1} \rho^{d_1} \quad (2.3)$$

$$\Pi_2 = \mu^{a_2} D^{b_2} V^{c_2} \rho^{d_2} \quad (2.4)$$

7. ใส่มิติพื้นฐานของกลุ่มตัวแปรลงในสมการ $PI(\Pi_1, \Pi_2)$

$$\text{จะได้ว่า } \Pi_1 = \left(\frac{M \cdot L}{T^2}\right)^{a_1} (L)^{b_1} \left(\frac{L}{T}\right)^{c_1} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{d_1}$$

$$\Pi_2 = \left(\frac{M}{L \cdot T}\right)^{a_2} (L)^{b_2} \left(\frac{L}{T}\right)^{c_2} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{d_2}$$

8. นำสมการ (Π_1, Π_2) ที่ได้มาเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ

$$\text{จะได้ว่า } \Pi_1 = \left(\frac{M \cdot L}{T^2}\right)^{a_1} (L)^{b_1} \left(\frac{L}{T}\right)^{c_1} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{d_1} = M^0 L^0 T^0$$

$$\Pi_2 = \left(\frac{M}{L \cdot T}\right)^{a_2} (L)^{b_2} \left(\frac{L}{T}\right)^{c_2} \left(\frac{M}{L^3}\right)^{d_2} = M^0 L^0 T^0$$

9. หาค่าคงที่ a, ค่าคงที่ b, ค่าคงที่ c และค่าคงที่ d

$$\text{พิจารณา } \Pi_1: \text{ ตัวแปร } M \text{ จะได้สมการ } a_1 + d_1 = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{ตัวแปร } L \text{ จะได้สมการ } a_1 + b_1 + c_1 - 3d_1 = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{ตัวแปร } T \text{ จะได้สมการ } -2a_1 - c_1 = 0 \quad (2.7)$$

$$\text{จากสมการที่ (5) ; } d_1 = -a_1 \quad (2.8)$$

$$\text{จากสมการที่ (7) ; } c_1 = -2a_1 \quad (2.9)$$

$$\text{แทนสมการที่ (2.8), (2.9) ลงในสมการที่ (2.6) ; } a_1 + b_1 - 2a_1 + 3a_1 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2a_1 + b_1 = 0$$

$$b_1 = -2a_1 \quad (2.10)$$

พิจารณากลุ่ม Π_2 : ตัวแปร M จะได้สมการ

$$a_2 + d_2 = 0 \quad (2.11)$$

ตัวแปร L จะได้สมการ

$$-a_2 + b_2 + c_2 - 3d_2 = 0 \quad (2.12)$$

ตัวแปร T จะได้สมการ

$$-a_2 - c_2 = 0 \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (11) ; $d_2 = -a_2$

$$(2.14)$$

จากสมการที่ (13) ; $c_2 = -2a_2$

$$(2.15)$$

แทนสมการที่ (2.11), (2.13) ลงในสมการที่ (2.10) ; $-a_2 + b_2 - a_2 + 3a_2 = 0$

$$a_2 + b_2 = 0$$

$$b_2 = -a_2$$

$$(2.16)$$

นำค่าคงที่ a, ค่าคงที่ b, ค่าคงที่ c และค่าคงที่ d แทนลงในสมการที่ (2.3), สมการที่ (2.4)

จะได้ว่า

$$\Pi_1 = R^{a_1} D^{-2a_1} V^{-2a_1} \rho^{-a_1}$$

จัดรูปใหม่

$$\Pi_1 = \left(\frac{R}{\rho V^2 D^2} \right)^{a_1}$$

$$(2.17)$$

$$\Pi_2 = \mu^{a_2} D^{-a_2} V^{-a_2} \rho^{-a_2}$$

จัดรูปใหม่

$$\Pi_2 = \left(\frac{\mu}{\rho V D} \right)^{a_2}$$

$$(2.18)$$

10. จัดกลุ่ม PI ที่ได้ให้อยู่ในรูปของ $\Pi_1 = \phi(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_{k-r})$

จะได้ว่า

$$\Pi_1 = \phi \Pi_2$$

$$\left(\frac{R}{\rho V^2 D^2} \right) = \phi \left(\frac{1}{\rho V D / \mu} \right)$$

$$(2.19)$$

จากสมการที่ (2.17), สมการที่ (2.18) จะได้ตัวแปรไร้มิติจำนวน 2 ตัว คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Reynolds number} = \text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.20)$$

$$\text{Euler Number} = \text{Eu} = \frac{R}{\rho V^2 D^2} \quad (2.21)$$

2.3.5 การจำลองแบบและความคล้ายคลึงกันของตัวแปร (Similitude and Similarity Variables)

ความคล้ายคลึงกัน (Similarity) นั้น เราสามารถนำความสัมพันธ์ที่เราหาได้จากทฤษฎี Buckingham Pi Theory มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองและจะช่วยทำนายตัวแปร (Variables) ที่มีผลกระทบต่อการไหล

ความคล้ายคลึงกัน (Similarity) นั้น เราสามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ประเด็น

1. ความคล้ายคลึงกันทางรูปร่างของวัตถุ (Geometric Similarity) คือ ความยาว, พื้นที่, ปริมาตร
หมายเหตุ ความคล้ายคลึงกันทางรูปร่างนั้นจะมีรูปร่างของวัตถุจำลอง (Model) กับวัตถุจริง (Prototype)
2. ความคล้ายคลึงกันทางการเคลื่อนที่ (Kinematic Similarity) คือ ความเร็ว, ความเร่ง, อัตราการไหล, เวลา
3. ความคล้ายคลึงกันทางไดนามิก (Dynamic Similarity) คือ มวล, แรง, ความดัน, โมเมนตัม, งาน, พลังงาน, กำลังงาน

2.4 สมการควบคุมของการไหล (Governing Equations)

พิจารณาการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow) ใน 3 มิติ ถูกครอบคลุมด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-stokes equations) ซึ่งประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์มวล, สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมในทิศทาง x , y และ z

2.4.1 สมการอนุพันธ์มวลในปัญหา 3 มิติ

ขั้นตอนแรกของการหาสมการอนุพันธ์มวล คือ การพิจารณาถึงสมมูลมวลของชิ้นส่วนของไหลดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนของไหล = อัตราการไหลสุทธิของมวลที่เข้าไปในชิ้นส่วนของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในชิ้นส่วนย่อยของไหลคือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial p}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (2.22)$$

โดยที่ δx คือ ความยาวของเอลิเมนต์ในทิศทางแกน x

δy คือ ความยาวของเอลิเมนต์ในทิศทางแกน y

δz คือ ความยาวของเอลิเมนต์ในทิศทางแกน z

ต่อไปหาอัตราการไหลโดยมวลผ่านพื้นผิว และชิ้นส่วนย่อย ซึ่งถูกแทนโดยผลคูณของความหนาแน่นพื้นที่และความเร็ว ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น จากรูปที่ 2.17 พบว่าการไหลสุทธิของมวลเข้าสู่ชิ้นส่วนย่อยพื้นผิวสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2.23)$$

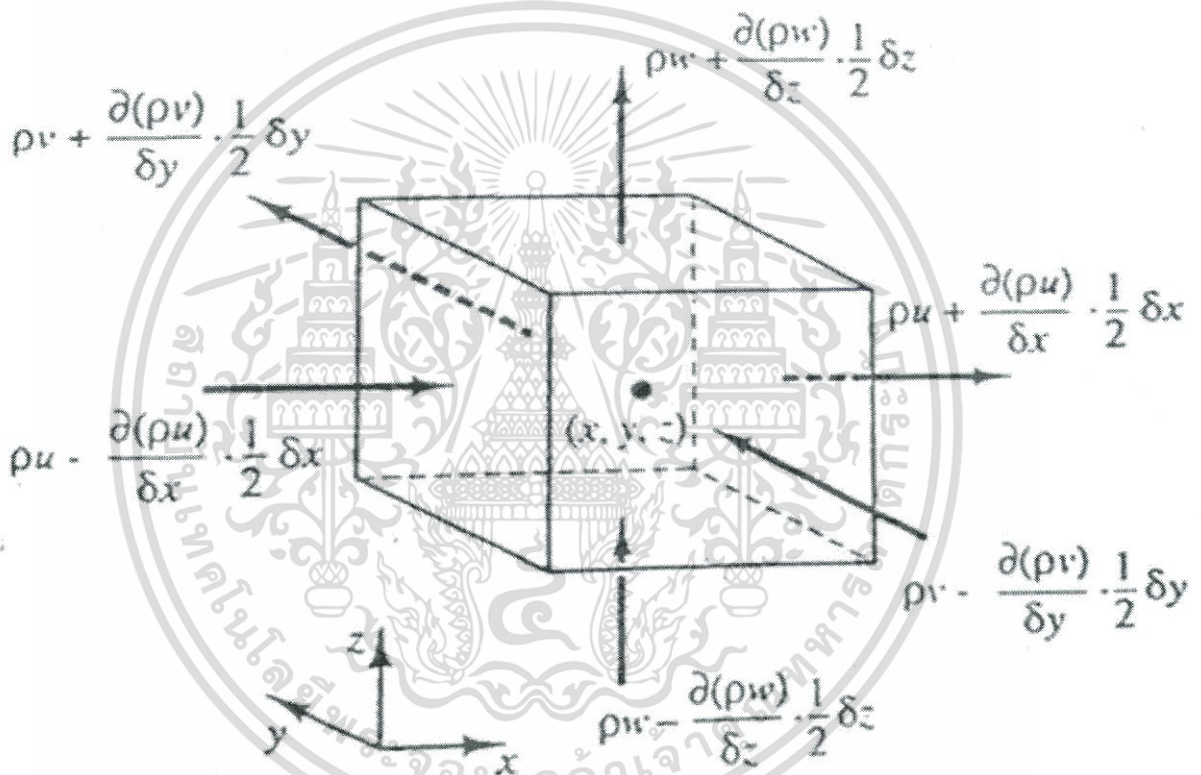
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ u คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

w คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

โดยการไหลเข้าสู่ชิ้นส่วนที่ทำให้มวลของชิ้นส่วนย่อยเพิ่มขึ้นถูกกำหนดให้เป็นบวก และมีค่าเป็นลบเมื่อมีการไหลออกจากชิ้นส่วนย่อย



รูปที่ 2.17 การไหลของมวลเข้าและออกชิ้นส่วนย่อยของไหล

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลภายในชิ้นส่วนย่อยนั้น เท่ากับอัตราของมวลสุทธิจากการไหลออกผ่านพื้นผิวของชิ้นส่วนย่อย ซึ่งเมื่อย้ายข้างให้อยู่ในฝั่งเดียวกัน เมื่อรวมกันแล้วจะหักล้างกันหมด เทอมทั้งหมดได้ถูกเรียบเรียงทางซ้ายของสมการและถูกหารด้วยปริมาตรของชิ้นส่วนย่อย $\delta x \delta y \delta z$ ซึ่งจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.24)$$

หรือในรูปแบบของเวกเตอร์

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{U}) = \bar{0} \quad (2.25)$$

สมการ 2.23 นี้ คือสมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง 3 มิติ แบบการไหลไม่คงตัว และอัดตัวได้ เทอมแรกทางซ้ายมือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น (มวลต่อปริมาตร) ต่อเวลา เทอมที่สองอธิบายถึงการไหลสุทธิของมวลข้ามผ่านขอบเขตของปริมาตรเล็ก ๆ นั้น ซึ่งเรียกว่าเทอมของการพา

2.4.2 สมการโมเมนตัมในปัญหา 3 มิติ

กฎข้อที่ 2 ของนิวตันกล่าวไว้ว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหล เท่ากับ ผลรวมของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล” โดยที่

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมของอนุภาคของไหล = ผลรวมแรงที่กระทำต่ออนุภาคของไหล

อัตราการเพิ่มโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของของไหลในทิศ x , y และ z กำหนดโดย

$$\rho \frac{Du}{Dt} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (2.26)$$

การแบ่งประเภทของแรงที่กระทำต่ออนุภาคของของไหล สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

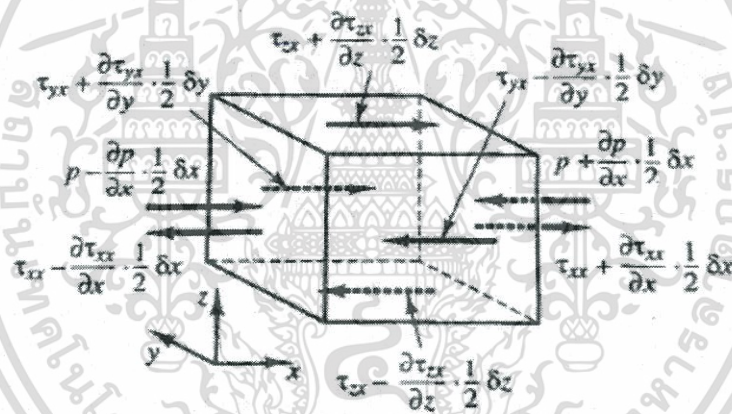
1. แรงกระทำที่ผิว (Surface forces) ได้แก่ แรงเนื่องจากความดัน แรงเนื่องจากความเค้นเฉือน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แรงกระทำในปริมาตร (Body forces) ของชิ้นส่วนย่อยของของไหล ได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงหมุนเหวี่ยง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงโคริโอลิส เป็นต้น

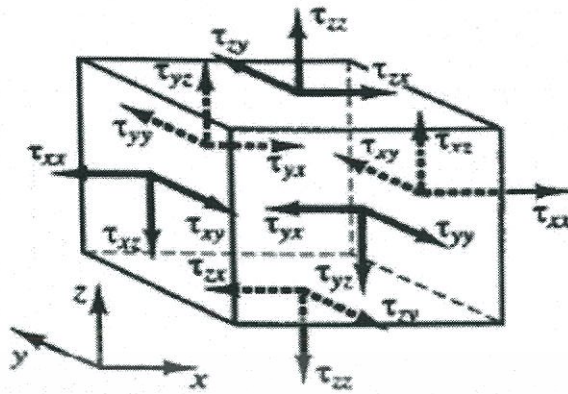
โดยทั่วไปเทอมของแรงกระทำที่ผิวจะถูกจัดกลุ่มแยกออกต่างหาก และเทอมของแรงกระทำภายในปริมาตรจะถูกพิจารณาเป็นเทอมของการเพิ่ม และลดโมเมนตัมแยกออกมาอีกเทอมหนึ่ง

ความเค้นที่กระทำต่อชิ้นส่วนย่อยของการไหล สามารถนิยามได้ด้วยเทอมของความดัน และเทอมความเค้นย่อยเนื่องจากความหนืด μ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ความดันซึ่งมองว่าเป็นความเค้นตั้งฉาก ถูกแทนด้วย p ส่วนความเค้นเฉือนเนื่องจากความหนืดแทนโดย τ สัญลักษณ์ τ_{ij} ถูกประยุกต์ใช้เพื่อชี้ให้เห็นถึงทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืด ตัวห้อย i และ j ใน τ_{ij} ชี้ให้เห็นถึงความเค้นย่อยที่กระทำในทิศทาง j บนพื้นที่ที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง i นั่นเอง



รูปที่ 2.18 องค์ประกอบของความเค้นบนผิวหน้าทั้งสามทิศทางของชิ้นส่วนย่อยของไหล

เริ่มแรกพิจารณาแรงกระทำในทิศทาง x เนื่องจากความดันและความเค้นย่อย τ_{xy} , τ_{yz} และ τ_{xx} ดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 ขนาดของแรงที่กระทำบนพื้นผิวเกิดจากผลคูณของความเค้นและพื้นที่ที่มีทิศทางเดียวกับแกนอ้างอิงโดยมีเครื่องหมายบวก และมีค่าเป็นเครื่องหมายลบเมื่อทิศทางตรงข้าม แรงสุทธิในทิศทาง x คือ ผลรวมของแรงย่อยที่กระทำบนชิ้นส่วนย่อยของของไหลในทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 2.19 องค์ประกอบของความเค้นในทิศทาง x

เมื่อพิจารณาผิวหน้าที่แผ่นด้านซ้ายและด้านขวา จะได้ว่า

$$\left[\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left(\tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[- \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (2.27)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้าที่แผ่นด้านหน้าและด้านหลัง จะได้ว่า

$$- \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (2.28)$$

แรงสุทธิในทิศทาง x บนผิวหน้าที่แผ่นด้านบนและด้านล่าง จะได้ว่า

$$- \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (2.29)$$

ผลรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรทั้งหมดเนื่องจากความเค้นที่ผิวหน้า จะเท่ากับผลรวมของสมการที่ (2.27), (2.28) และ (2.29) ที่หารด้วยปริมาตรสุทธิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.30)$$

เทอมที่ปรากฏในสมการที่ (2.30) นี้ ยังไม่รวมการพิจารณาแรงกระทำภายในชิ้นส่วนของของไหล ซึ่งสามารถรวมได้โดยการพิจารณาเป็นแหล่งสร้างหรือทำลายโมเมนตัม ในหน่วยของโมเมนตัมต่อปริมาตรต่อเวลาในทิศทาง x

ขั้นตอนี้สมการโมเมนตัมในทิศทาง x หาได้โดยการกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนโมเมนตัมในทิศทาง x และอนุภาคการไหลในสมการที่ (2.26) เท่ากับผลรวมของแรงในทิศทาง x ที่กระทำต่อชิ้นส่วนของของไหลโดยความเค้นที่ผิว บวกกับอัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x เนื่องจากแรงภายในชิ้นส่วนของของไหลนั้นตามแนวแกน x

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.31)$$

S_{Mx} คืออัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง x

ในทำนองเดียวกัน โมเมนตัมในทิศทาง y จะเขียนได้ว่า

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.32)$$

S_{My} คืออัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง y

และโมเมนตัมในทิศทาง z คือ

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.33)$$

S_{Mz} คืออัตราการสร้างหรือสูญสลายของโมเมนตัมในทิศทาง z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันมีลักษณะเป็นความเค้นอัดตั้งฉาก (Compressive normal stress) ซึ่งโดยทั่วไปมีเครื่องหมายเป็นลบ ในกรณีที่ความเค้นตั้งฉากเนื่องจากความหนืดมีลักษณะเป็นความเค้นดึง (Tensile normal stress) จะมีเครื่องหมายเป็นบวก

เทอมของการสร้างหรือสูญหายของโมเมนตัม $S_{M_x} = 0$, $S_{M_y} = 0$ และ $S_{M_z} = 0$ สมการที่ (2.31, 2.32, 2.33) คือ แรงกระทำภายในของแต่ละทิศทาง ตัวอย่างเช่น แรงกระทำภายในเนื่องจากปรองโหมถ่วง จะถูกกำหนดให้มีค่า

สำหรับการไหลที่เป็นการไหลแบบปั่นป่วน จะกำหนดเทอมของการสร้างหรือสูญหายของโมเมนตัม ดังนี้

$$S_{M_x} = 0, S_{M_y} = 0 \text{ และ } S_{M_z} = -\rho g$$

2.5 การสร้างแบบจำลองการไหลของอากาศ

2.5.1 การกำหนดปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ในการกำหนดปัญหาของแบบจำลอง เริ่มจากการกำหนดปัญหาพื้นฐาน คือ สเกลในแบบจำลอง ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้เป็นหน่วยมิลลิเมตร จากนั้นกำหนดรูปทรงแบบการคำนวณ Time เป็นแบบ Steady และ Models ที่ใช้ในการคำนวณ คือ Standard k - ϵ Model ซึ่งมีการใช้ในการคำนวณการไหลในงานวิศวกรรม เนื่องจากแบบจำลองนี้มีความเสถียร ประหยัด และมีความแม่นยำในช่วงการไหลที่กว้าง แบบจำลอง Standard k - ϵ Model เป็นแบบจำลอง semi-empirical อยู่บนพื้นฐานแบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับพลังงานจลน์ (k) และอัตราการกระจายตัว (ϵ) แบบจำลองสมการการถ่ายเทสำหรับ k ได้มาจากสมการแม่นยำตรง ขณะที่สมการการถ่ายเทสำหรับ ϵ ได้มาจากการใช้เหตุผลทางกายภาพบางประการ ซึ่งสมการ Standard k - ϵ Model ที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon + Y_M + S_k \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.36)$$

โดยที่ μ_t คือ ความหนืดปั่นป่วน (ไหลวน)

C_μ คือ ค่าคงที่

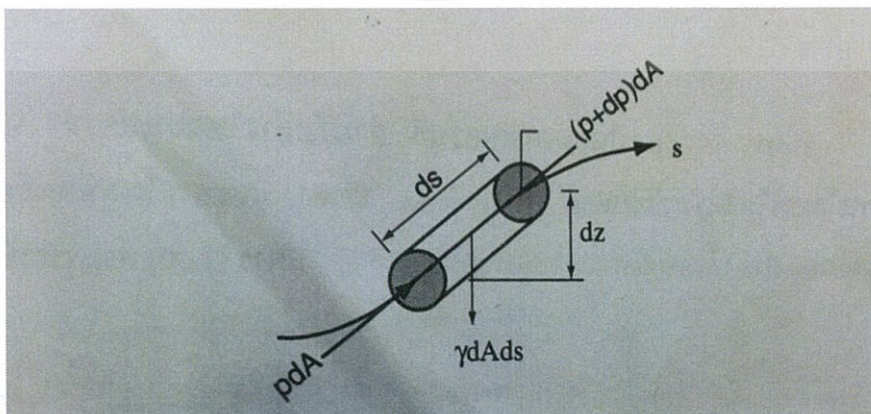
$c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ คือ ค่าคงที่แบบจำลอง

$$c_\mu=0.09 \quad c_{\varepsilon 1}=1.44 \quad c_{\varepsilon 2}=1.92 \quad \sigma_k=1.0 \quad \sigma_\varepsilon=1.3 \quad (2.37)$$

ค่าคงที่ตามสมการที่ (2.37) กำหนดจากการทดลองกับอากาศและน้ำสำหรับพื้นฐานการไหลเฉือนปั่นป่วน รวมถึงการไหลเฉือนเอกพันธ์ และการสลายตัวแบบไอโซโทรปิกของสนามความปั่นป่วน โดยพบจากการทดลองในช่วงขอบเขตผนังที่กว้างและการไหลแบบที่ไม่มีแรงเฉือน

2.6 สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli Equation)

สมการเบอร์นูลลีการสร้างสมการเบอร์นูลลีโดยการอินทิเกรตสมการออยเลอร์ในแนวสัมผัสกับเส้นสายธาร จะทำให้เห็นสมมติฐานสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ คงตัว และปราศจากความเสียดทานนั้น สำหรับการนำเสนอสมการเบอร์นูลลีไปประยุกต์ใช้ที่ชัดเจนมากขึ้น รายละเอียดการอินทิเกรตมีดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 แสดงเส้นสายธารการไหลของอนุภาค

จากสมการออยเลอร์ในแนวสัมผัสกับเส้นสายธาร

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.38)$$

เมื่อพิจารณาถึงอนุภาคของไหลที่เคลื่อนที่ไปบนเส้นสายธารเป็นระยะ ds จะได้ว่า

$$\frac{\partial p}{\partial s} ds = dp \quad \text{ความดันที่เปลี่ยนแปลงรวมตามเส้นสายธาร}$$

$$\frac{\partial z}{\partial s} ds = dz \quad \text{ระดับที่เปลี่ยนแปลงรวมตามเส้นสายธาร}$$

$$\frac{\partial V}{\partial s} ds = dV \quad \text{ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงรวมตามเส้นสายธาร}$$

ดังนั้น ถ้าเราคูณสมการ (2.38) ด้วยระยะ ds ตามแนวเส้นสายธารจะได้

$$-\frac{dp}{\rho} - g dz = V dV + \frac{\partial V}{\partial t} ds$$

หรือ

$$\frac{dp}{\rho} + V dV + g dz + \frac{\partial V}{\partial t} ds = 0$$

ทำการอินทิเกรตจะได้

$$\int \frac{dp}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz + \int \frac{\partial V}{\partial t} ds = \text{constant}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะอินทิเกรต $\int \frac{dp}{\rho}$ เราต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความหนาแน่น ซึ่งเราพิจารณาของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ดังนั้น ρ จึงมีค่าคงที่ทำให้ได้ผลลัพธ์จากการอินทิเกรตคือ

$$\frac{1}{\rho} \int dp + \frac{V^2}{2} + gz + \int \frac{\partial V}{\partial t} ds = \text{constant}$$

หรือ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz + \int \frac{\partial V}{\partial t} ds = \text{constant} \quad (2.39)$$

สมการ 2.39 ข้างต้นที่ได้นี้ก็คือ “สมการเบอร์นูลลี” ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้สำหรับการไหลแบบไม่คงตัว ซึ่งเราต้องทราบความสัมพันธ์ของ $\frac{\partial V}{\partial t}$ กับระยะในแนวสัมผัสเส้นสายธาร หากเรานำสมการเบอร์นูลลีข้างต้นไปใช้กับการไหลแบบคงตัวจะทำให้เทอม $\frac{\partial V}{\partial t}$ มีค่าเท่ากับศูนย์และสมการลดรูปเหลือสมการดังนี้

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constant}$$

2.7 การวัดความเร็วของของไหล

ความเร็วของการไหลที่จุดหนึ่ง ๆ ไม่จำเป็นต้องวัดโดยตรงเนื่องจาก ความเร็ว ความดัน และระดับของการไหลมีความสัมพันธ์กันโดยสมการเบอร์นูลลี ดังนั้น หากเราทราบข้อมูลที่เพียงพอของความเร็ว ความดันและระดับของการไหล เราก็จะสามารถคำนวณหาความเร็วของการไหลจากสมการเบอร์นูลลีได้

ซึ่งที่จุดใด ๆ ในสนามการไหล หากพิจารณาความเร็ว ความดันและระดับของการไหลที่สัมพันธ์กัน 2 คู่ จะเขียนสมการเบอร์นูลลีสำหรับการไหลแบบคงตัวได้ดังนี้

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constant}$$

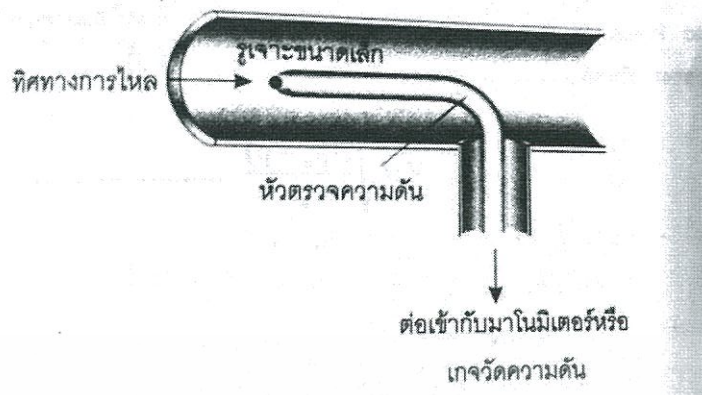
หรือ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0$$

ถ้าหากเราพิจารณาที่จุด 2 จุดที่มีระดับเดียวกันจะทำให้ $Z=Z_0$ ดังนั้น สมการเบอร์นูลลีข้างต้นลดรูปเหลือ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} \quad (2.40)$$

ที่จุด ๆ หนึ่งหากเราหน่วงอนุภาคของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ให้มีความเร็วลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ตามกระบวนการการแบบไม่มีแรงเสียดทาน เราเรียกความดันที่จุดซึ่งอนุภาคของไหลมีความเร็วเท่ากับศูนย์ว่า “ความดันนิ่ง หรือ p_0 (Stagnation Pressure)” ซึ่งที่จุดนี้จะมีความเร็วของการไหลหรือ V_0 เท่ากับศูนย์ การวัดความดันนิ่งทำได้โดยการใช้หัวตรวจความดันนิ่ง (Stagnation Pressure Probe) ที่มีรูเจาะเล็ก ๆ ที่ปลายของหัวตรวจซึ่งรูเจาะนี้จะอยู่ในแนวเดียวกับการไหลหรือขนานกับเส้นสายธารดังรูปที่ 2.4 และอนุภาคของไหลที่หน้าตัดรูเจาะนี้มีความเร็วเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ความดันที่วัดได้จึงเป็นความดันนิ่งนั่นเอง



รูปที่ 2.20 แสดงหัวตรวจความดันนิ่ง

จากสมการ (2.20) เมื่อเราใช้ค่าความดัน p_0 ทำให้ค่าความเร็ว V_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_0}{\rho}$$

หรือ

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.41) เมื่อทราบความดันสถิตและความดันนิ่งจะหาความเร็วของการไหลสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นเท่ากับ ρ ได้ดังนี้

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานและชุดการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

สำหรับโครงงานนี้จะแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1.1 การทดสอบแบบจำลองย่อส่วนภายในอุโมงค์ลม

เป็นการนำแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งประกอบด้วย รูปทรงกลม รูปลูกบาศก์ และหัวรถจักร SDA 3 มาทดสอบภายในอุโมงค์ลม เพื่อหาค่าแรงต้านอากาศที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนนั้น ๆ

3.1.2 การจำลองสถานการณ์ (Simulation)

เป็นการจำลองสถานการณ์ในปัญหา 2 มิติ และ 3 มิติ สำหรับแบบจำลองย่อส่วน ซึ่งประกอบด้วย รูปทรงกลม รูปลูกบาศก์ และหัวรถจักร SDA 3 เพื่อหาค่าแรงต้านอากาศ และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ และรูปแบบในการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าขนาด 40 ฟุต ทั้งหมด 5 ตู้ เพื่อหารูปแบบการจัดเรียงที่สามารถลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุด และสามารถช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนได้อีกด้วย

3.2 การเลือกรุ่นของรถไฟและการสร้างแบบจำลองย่อส่วน

เนื่องจากโครงงานนี้วิเคราะห์แรงต้านอากาศที่เกิดกับรถไฟขนส่งสินค้า จึงได้เลือกรุ่นของรถไฟขนส่งสินค้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบันคือ หัวรถจักร SDA 3 และทำการจำลองหัวจักรจากขนาดจริงให้มีขนาดเล็กลงเพื่อใช้ในการทดลองในอุโมงค์ลม โดยขนาดของแบบจำลองย่อส่วนจะถูกจำกัดด้วยพื้นที่ที่ใช้งานในอุโมงค์ลม ซึ่งพื้นที่ที่สามารถใช้งานได้คือ 5% ของพื้นที่ทั้งหมดในอุโมงค์ลม ดังนั้นเราจึงใช้การย่อส่วนแบบ HO (1:80) สเกล เพื่อให้ได้ขนาดตามพื้นที่ใช้งานที่เหมาะสม

3.3 การสร้างแบบจำลองย่อส่วนการไหลของอากาศผ่านวัตถุ

3.3.1 สมมติฐานสำหรับการจำลองสถานการณ์ (Simulation)

ตารางที่ 3.1 แสดงสมมติฐานสำหรับการจำลองการไหล

ประเภทของของไหล	อากาศ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ความดัน	ที่ 1 บรรยากาศ
ลักษณะของของไหล	ของไหลแบบต่อเนื่อง
การถ่ายเทความร้อน	ไอโซเทอร์มอล
สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน	สมการ k - epsilon
เงื่อนไขสำหรับผนัง	- No - slip wall condition Smooth wall condition
คุณสมบัติของวัสดุ	- ความหนาแน่น 1.185 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนืดพลวัต 1.831×10^{-5} kg/(m·s)
เวลา	สถานะคงตัว

3.3.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

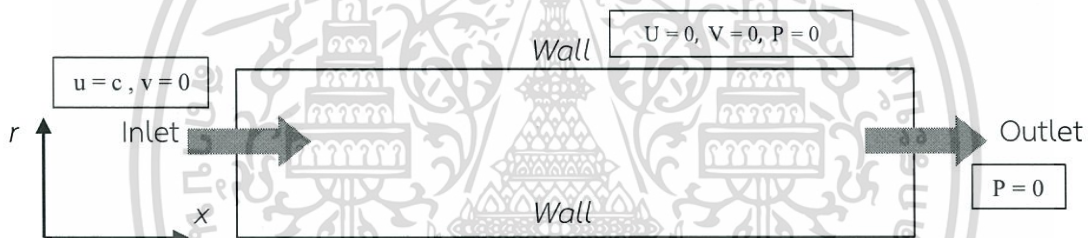
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหาของการไหลนั้น หากมองเพียงผิวเผินอาจเห็นว่าไม่มีความซับซ้อนใด ๆ และสามารถกำหนดได้โดยง่าย แต่ในความเป็นจริง ไม่ว่าจะใช้ระเบียบวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลแบบใด ๆ จะพบว่า การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้นอาจไม่สามารถทำได้โดยง่าย ในบางกรณีอาจมีผลต่อการสร้างขนาดของโดเมนเพื่อใช้ในการคำนวณ เช่น โดเมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องกว้างมากพอที่ทำให้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดตลอดขอบของโดเมนนั้นใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ไม่เหมาะสมหรือไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง อาจก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเป็นจริงได้เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขขอบเขตพื้นฐานที่เกิดขึ้นในปัญหาทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมีเพียงไม่กี่ชนิด ชนิดแรกคือ เงื่อนไขขอบเขตจากความจริงที่ว่า ความเร็วของของไหลที่ติดกับผนังนั้นต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ (no - slip condition) ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตที่เราพิจารณาในการจำลองจากโปรแกรม CFD นั้น ประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ

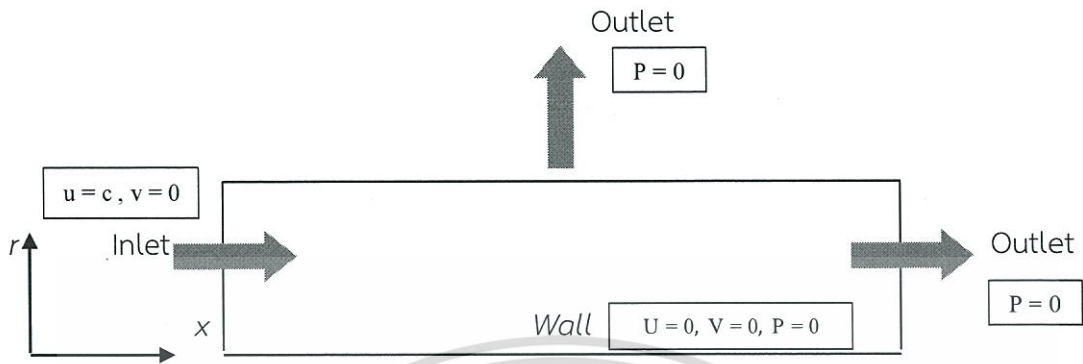
1. สำหรับแบบจำลองย่อยส่วนของ ทรงกลม และลูกบาศก์



รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของผนังทิศทางการไหลของอากาศ

โดยที่ c เริ่มจาก 15 – 30 m/s

2. สำหรับโมเดลหัวรถจักร SDA3 (SDA3 Locomotive) จำลอง



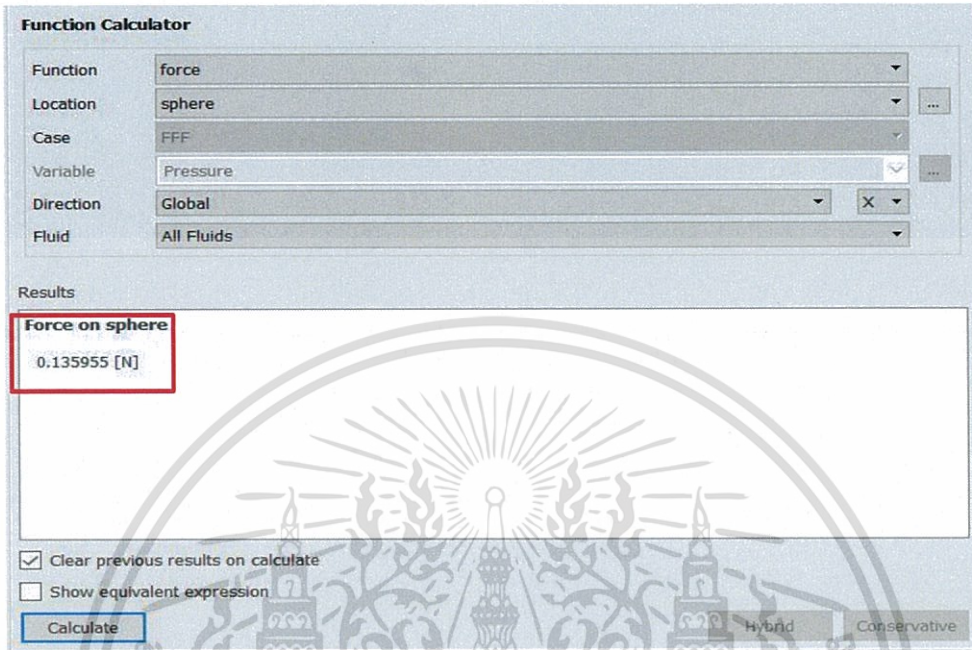
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของผนังทิศทางการไหลของอากาศ

โดยที่ c เริ่มจาก 15 – 30 m/s

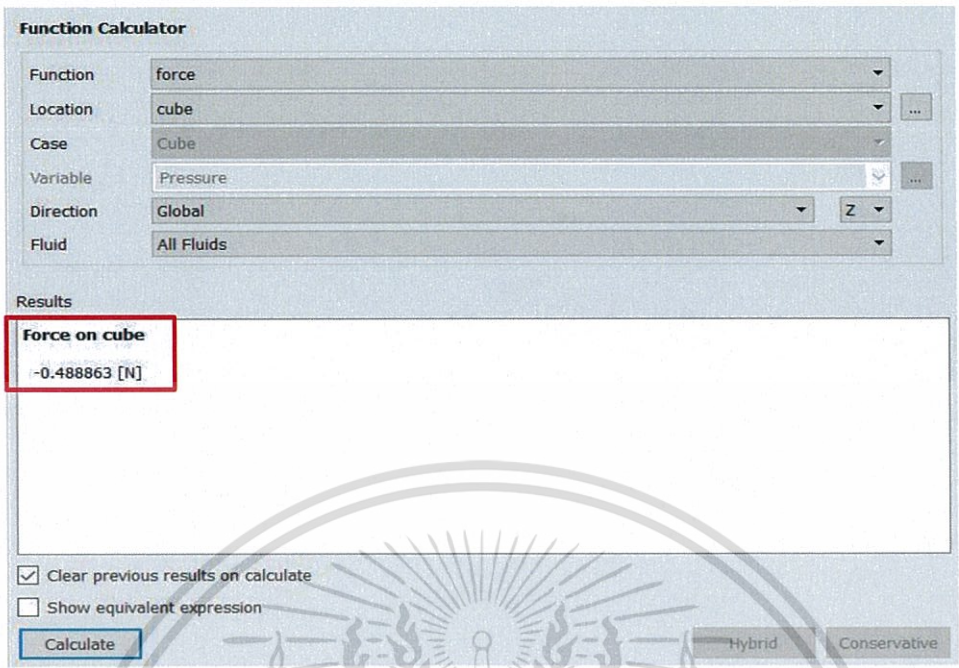


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

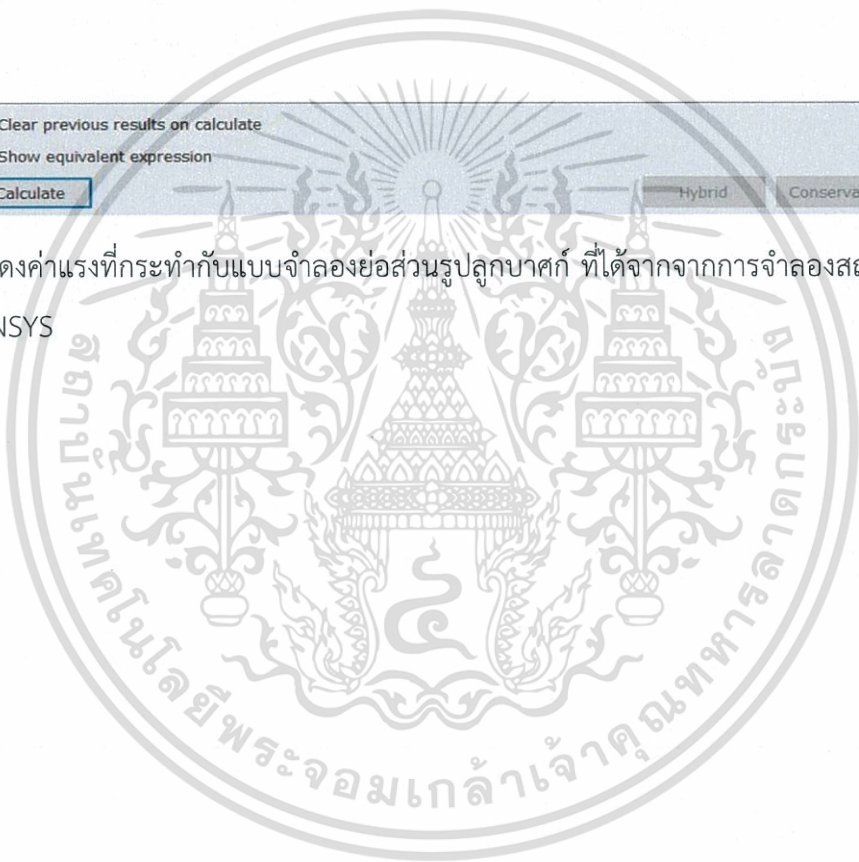
ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขในโปรแกรม เริ่มจากการสร้าง Mesh กำหนดชื่อของขอบเขต เลือก รูปแบบการคำนวณ กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต และค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล



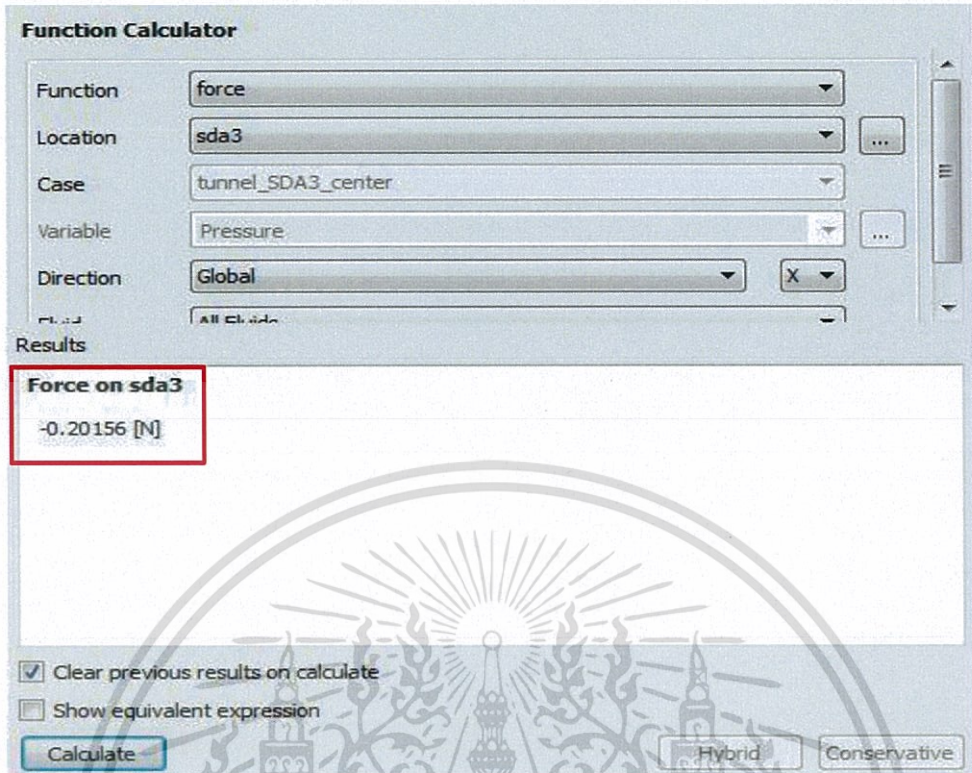
รูปที่ 3.3 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลม ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS



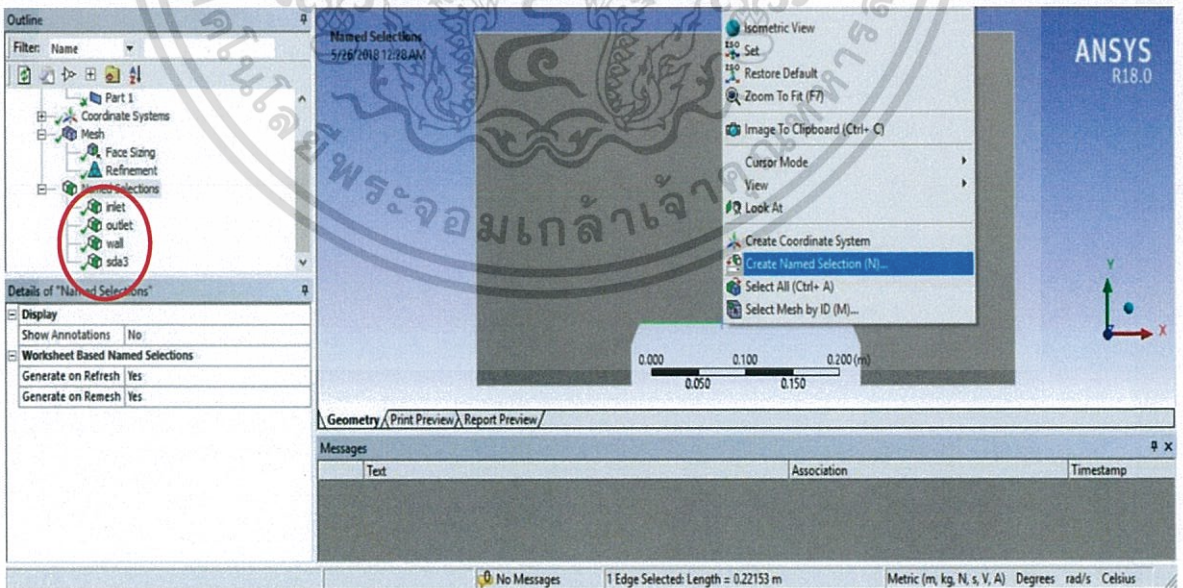
รูปที่ 3.4 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อส่วนรูปลูกบาศก์ ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

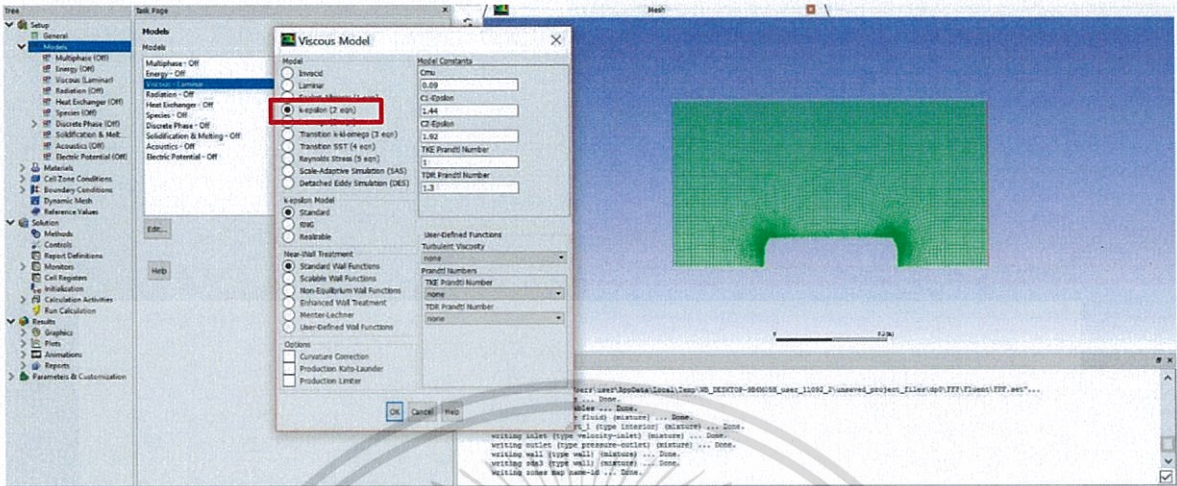


รูปที่ 3.5 แสดงค่าแรงที่กระทำกับแบบจำลองย่อยส่วนรูปหัวรถจักร SDA3 ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม ANSYS

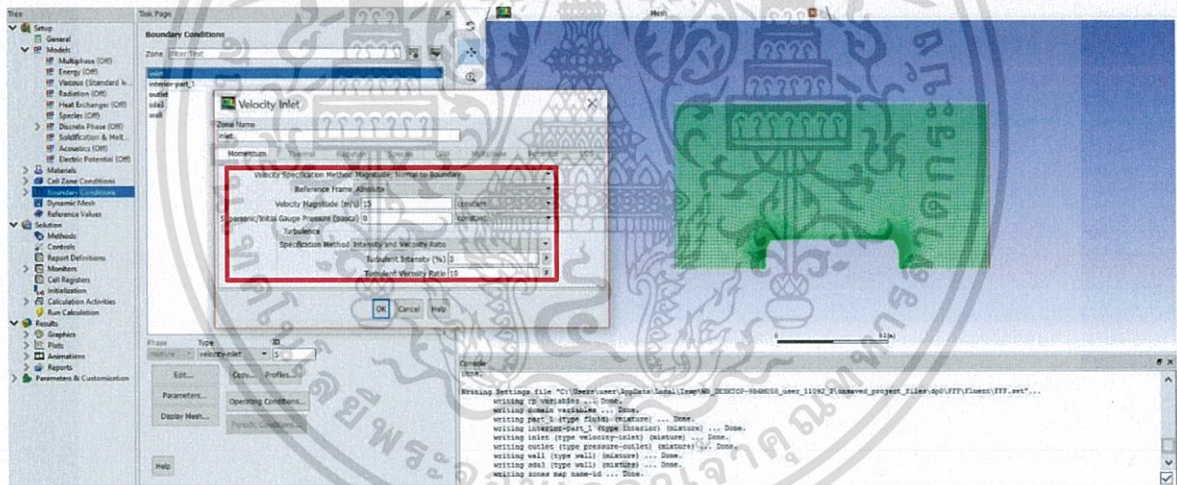


รูปที่ 3.6 แสดงการกำหนดชื่อของขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

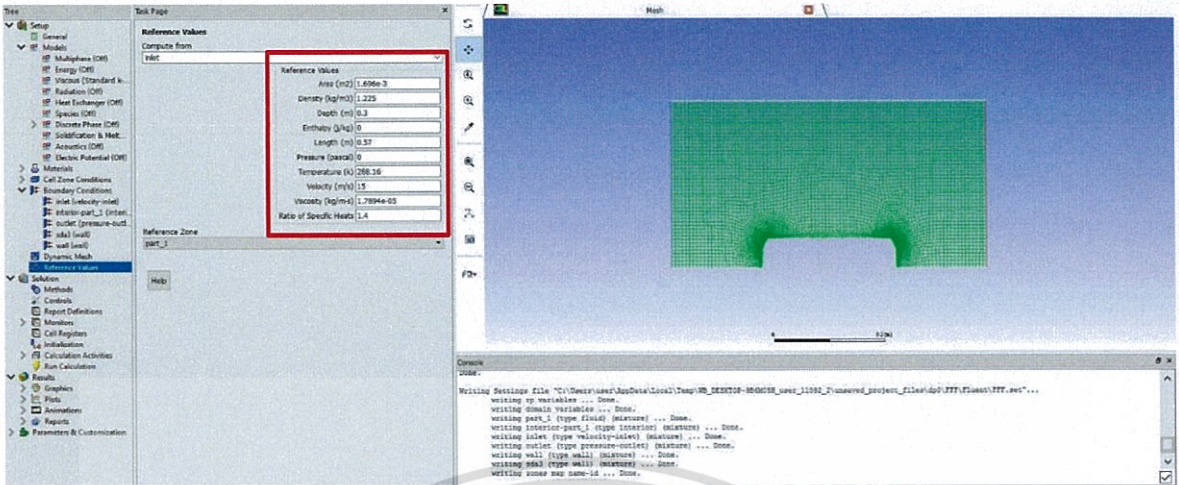


รูปที่ 3.7 แสดงการเลือกรูปแบบการคำนวณ



รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล

3.4 การออกแบบการทดลองการวัดแรงต้านอากาศพลศาสตร์

3.4.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับอุโมงค์ลม

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาปัญหาทางอากาศพลศาสตร์ เป็นการทดสอบด้วยความเร็วลมสม่ำเสมอ โดยอากาศจะถูกเป่า หรือสูบลมผ่านท่อนำลมที่มีวัดถูกภายใต้การทดสอบอยู่ และมีช่องสำหรับสังเกตการณ์หรือมีอุปกรณ์วัดติดตั้งอยู่ ส่วนมากนิยมวัดการสิ้นไหวของอาคาร การทดลองการบิน การทดสอบการตก รวมถึงการทดสอบแรงต้านอากาศของวัตถุ โดยวัตถุทดสอบจะมีอุปกรณ์ที่มีความไวต่อความสมดุลในการวัดแรงที่สร้างโดยกระแสอากาศ หรือกระแสอากาศอาจจะมีควันหรือสารอื่น ๆ ที่ถูกฉีดเพื่อให้เส้นการไหลสามารถมองเห็นได้รอบ ๆ วัตถุ

3.4.2 ชนิดของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมโดยทั่วไปสามารถแบ่งตามองค์ประกอบได้เป็น 2 ระบบ

1. อุโมงค์ลมแบบระบบเปิด

มีบริเวณส่วนทางเข้าและทางออกของลมเปิดสู่สภาพแวดล้อมภายนอกมีข้อดีคือ ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างและถ้าทดสอบแบบจำลองเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือการฉีดควัน จะ

สามารถช่วยระบายอากาศได้ดี แต่ที่ข้อเสียคือ ต้องมีพื้นที่ยาวมากและบริเวณรอบ ๆ จะต้องไม่มีลมกระทบมายังทางเข้าและทางออกขณะทดสอบเพราะอุณหภูมิภายนอกอุโมงค์จะส่งผลต่อการทดสอบทันที เนื่องจากเป็นระบบเปิด นอกจากนี้ยังมีเสียงดังรบกวน

2. อุโมงค์ลมแบบระบบปิด

เป็นอุโมงค์ลมที่นำเอาลมพัดผ่านแบบจำลองในส่วนทดสอบไปแล้ววนกลับมาบริเวณทางเข้าโดยใช้พัดลมตัวเดียว ทำให้ไม่ต้องรับอากาศจากภายนอกเข้ามา กระแสอากาศที่ได้จึงมีความราบเรียบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดค่าต่าง ๆ สูงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิดเนื่องจากสามารถควบคุมการไหลของลมที่ไหลกลับมาใหม่ได้ และไม่ได้รับผลกระทบจากอากาศบริเวณรอบ ๆ อุโมงค์ลมชนิดนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดสอบได้ แต่การสร้างต้องใช้งบประมาณสูง

3.4.3 ลักษณะโดยทั่วไปของอุโมงค์ลม

เป็นอุโมงค์ลมของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตัวอุโมงค์ลมเป็นแบบวงจรเปิด โครงสร้างส่วนใหญ่ทำจากอลูมิเนียม โดยที่อากาศจะเข้าทางด้านทางเข้า ซึ่งมีรูปร่างเหมาะสม และมีแผ่นตะแกรงป้องกัน บริเวณที่ทำการทดสอบสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน สำหรับกระแสการไหลทางด้านบนที่บริเวณทดสอบจะมีการติดตั้ง Static Tapping และท่อเฮดรวม ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ถึงจุดสูงสุดของบริเวณที่ทำการทดสอบ ส่วนกระแสการไหลทางด้านล่างจะมีท่อ Pitot – Static ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้เช่นกัน

ทางด้านหลังของบริเวณทดสอบจะมีดีฟิวเซอร์ซึ่งเป็นช่องไปสู่พัดลมดูดอากาศแบบ Axial Flow และความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดโดยวาล์วปีกผีเสื้อคู่ที่ติดตั้งอยู่ที่ทางออกของพัดลม ความเร็วสูงสุดของอากาศสามารถหาได้จากผลต่างของความดันที่ 300 มิลลิเมตรน้ำ และสามารถอ่านได้จากमानอมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้

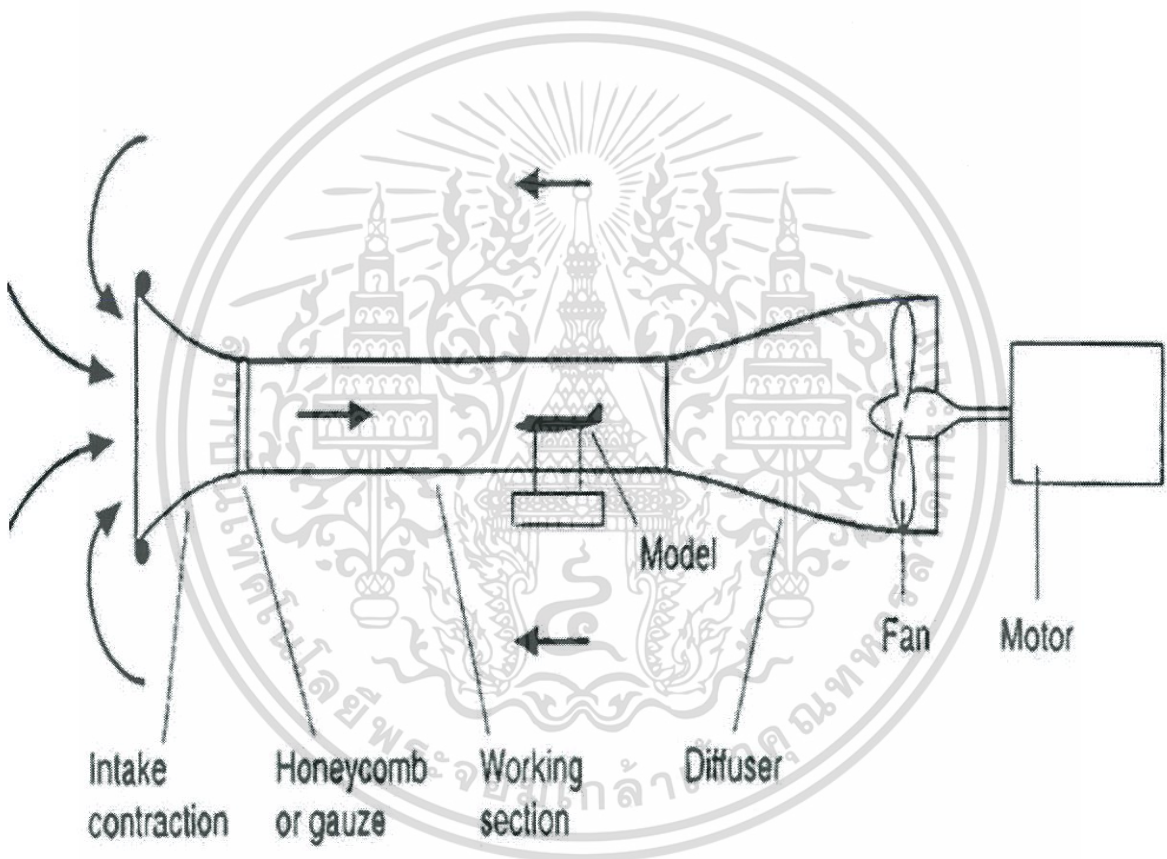
3.4.4 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมประกอบด้วย

1. ท่อเฮดรวม ที่ใช้วัดความดันสัมบูรณ์ โดยค่าที่วัดได้จะถูกแสดงที่மானอมิเตอร์

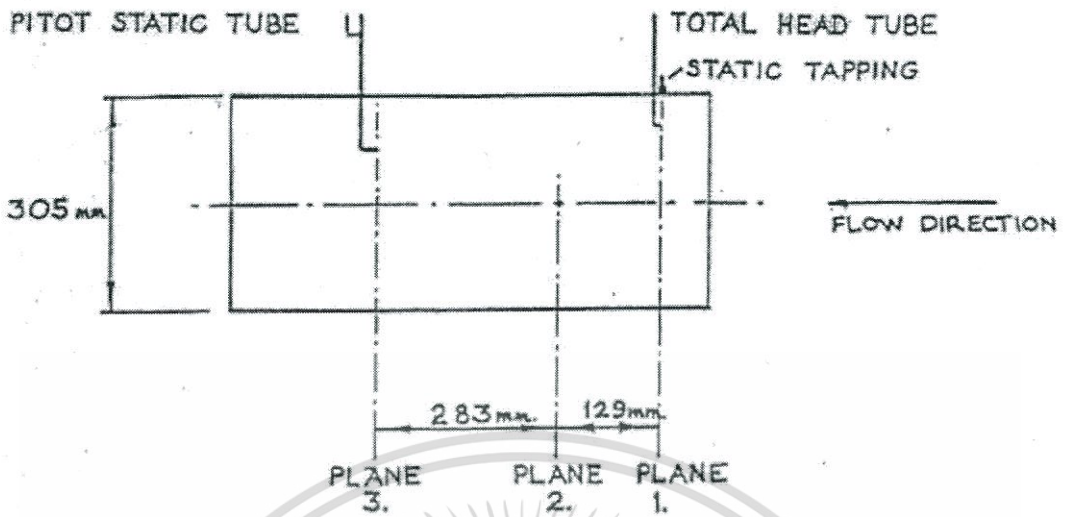
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ท่อ Pitot – Static
3. มานอมิเตอร์ทั้งหมด 24 ท่อ ภายในบรรจุน้ำเพื่อใช้แสดงค่าความดันที่วัดได้ มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
4. ท่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 มิลลิเมตร ประกอบไปด้วย Pressure Tapping
5. โพลดเซลล์ 3 ตัว วัดแรงในแต่ละจุด



รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของอุโมงค์ลม

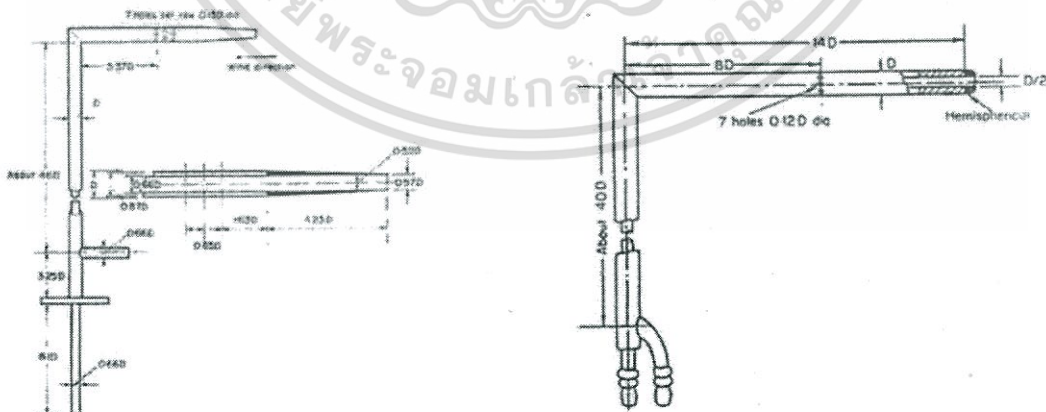
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงส่วนการวัดความเร็วอากาศภายในอุโมงค์ลม

3.4.4.1 ท่อปีโตต์

ท่อปีโตต์ เป็นอุปกรณ์ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการวัดความดันสถิต ที่ปลายด้านที่สัมผัสกับกระแสการไหลของอากาศ จะมีลักษณะงอและจะมีทิศทางขนานกับทิศทางของการไหล โดยที่ส่วนปลายจะมีลักษณะเป็นรูปกรวยลาดเอียง ที่ปลายสุดจะมีการเจาะรูเพื่อให้อากาศสามารถผ่านไปได้ ด้วยลักษณะนี้เองที่ทำให้มีแรงดันจากการปะทะน้อยมาก และส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะต่อไปยังม้านอมิเตอร์

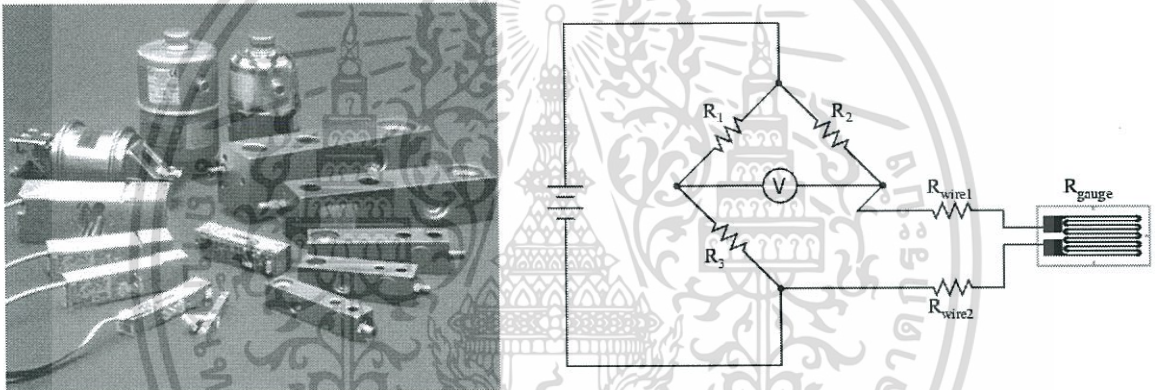


รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะท่อปีโตต์ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4.2 โหลดเซลล์

โหลดเซลล์ เป็นระบบเซนเซอร์ที่แปลงค่าน้ำหนักทางกลของสิ่งของ (กรัม, กิโลกรัม) ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้า (แรงดัน, V) ซึ่งประกอบด้วยสเตรนเกจเป็นส่วนตัวจับ ซึ่งจะคอยเปลี่ยนค่าความเครียดทางกลอันเนื่องมาจากน้ำหนักของวัตถุ เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อนำค่าความต้านทานที่ได้จากสเตรนเกจ มาต่อเข้ากับวงจรดิเฟอเรนเชียลบรिดจ์ ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง (DC Voltage) ก็จะสามารถหาค่าเอาต์พุตของน้ำหนักวัตถุที่เป็นเปลี่ยนแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ไปต่อกับวงจร 7 ส่วนเพื่อแสดงผลค่าน้ำหนักออกมาเป็นตัวเลขได้



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของโหลดเซลล์

3.4.5 ขั้นตอนในการทดสอบ

1. เตรียมแบบจำลองย่อส่วนสำหรับการทดสอบหาค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน) ในอุโมงค์ลม โดยที่พื้นที่ของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 30.5×30.5 เซนติเมตร และขนาดของแบบจำลองย่อส่วนสามารถมีขนาดได้ไม่เกิน 5% ของพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้น จึงทำการเลือกรูปทรงและขนาดของแบบจำลองย่อส่วนดังนี้

- แบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร
- แบบจำลองย่อส่วนรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 6×6 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักร SDA3 (HO Scale, 1:80)

2. ทำการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนภายในอุโมงค์ลม โดยต่อเข้ากับโพลดเซลล์เพื่อทำการวัดค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน) ของแบบจำลองย่อส่วนที่ความเร็วต่าง ๆ

3. ทำการปรับค่าความเร็วที่ต้องการ โดยความเร็วของอากาศจะถูกกำหนดโดยวาล์วปีกผีเสื้อคู่ที่ติดตั้งอยู่ที่ทางออกของพัดลม โดยจะเทียบกับระดับความสูงของน้ำในमानมิเตอร์ท่อที่ 1 และ ท่อที่ 3 (นับจากทางขวามือ) ซึ่งการแปลงค่าจากระดับความสูงของน้ำในमानมิเตอร์ท่อที่ 3 (เทียบกับระดับดัดน้ำในท่อที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิง) เป็นความเร็วของอากาศในอุโมงค์ลมสามารถแปลงได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$V = \sqrt{\frac{2\rho_w g h}{\rho_a}} \quad (3.1)$$

ดังนั้น

$$h = \frac{V^2 \rho_a}{2\rho_w g} \quad (3.2)$$

โดยที่ $\rho_w = 995.65 \text{ kg/m}^3$

$\rho_a = 1.177 \text{ kg/m}^3$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

หมายเหตุ ต้องรอให้ความสูงของระดับน้ำในमानมิเตอร์ท่อที่ 3 นิ่งก่อนจึงทำการอ่านค่าระดับความสูงได้

4. เมื่อทำการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนและปรับค่าความเร็วให้ได้ตามที่กำหนดแล้วนั้น ให้ทำการเปิดเครื่องทดสอบอุโมงค์ลม และรอจนกว่าระดับน้ำในमानมิเตอร์ในท่อที่ 3 นิ่งจึงทำการอ่านค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน) โดยหน้าจอแสดงผลของเครื่องวัดค่าอุโมงค์ลมมีรายละเอียด ดังนี้

- ปุ่มเปิด/ปิดเครื่อง

- ปุ่ม HOLD ใช้ค่าคงการแสดงผล ระบบจะคงค่าการแสดงผลและหยุดอ่านค่าจากโพลดเซลล์

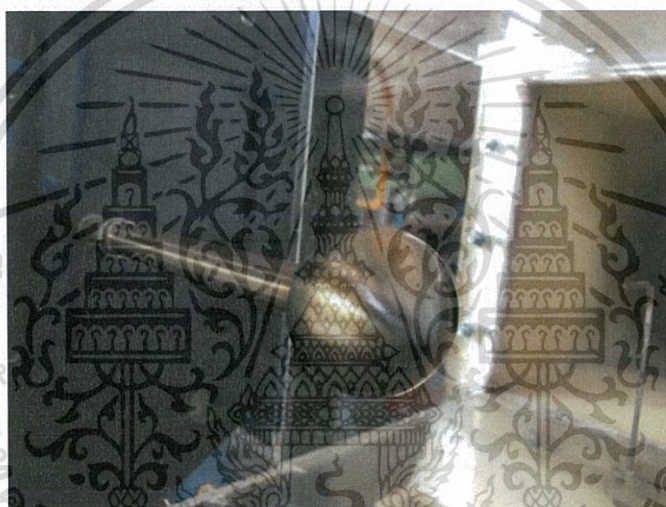
- ปุ่ม TARE ใช้ตั้งค่า โพลดเซลล์ ให้น้ำหนักเริ่มต้นเป็น 0 เมื่อต้องการใช้งานให้กดปุ่มค้างจนกว่าหน้าจอจะขึ้นคำว่า "Tare System"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- k.g(N) ใช้เปลี่ยนหน่วยการแสดงผลที่จะแสดง โดยโปรแกรมเริ่มต้นจะแสดงหน่วยเป็นนิวตัน N. และสามารถเปลี่ยนหน่วยเป็นกิโลกรัมได้

- ปุ่ม AVG ใช้ปรับค่าการเก็บผล โดยจะอ่านค่าจากโหนดเซลล์แล้วมาหาค่าเฉลี่ยตามค่าที่ตั้ง แล้วจึงแสดงผล สามารถตั้งได้ 1-5 ค่า โดยค่าเริ่มต้นจะอยู่ที่ 2

หมายเหตุ เครื่องอ่านค่าอุโมงค์ลมจะไม่แสดงค่าติดลบจากการอ่าน โดยค่าที่ต่ำที่สุดที่แสดงได้ คือ 0 ทำการบันทึกค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน) ที่อ่านได้จากหน้าจอแสดงผลที่ค่าความเร็วต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองย่อส่วนทั้ง 3 รูปแบบ



รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ภายในอุโมงค์ลมโดยต่อเข้ากับโหนดเซลล์

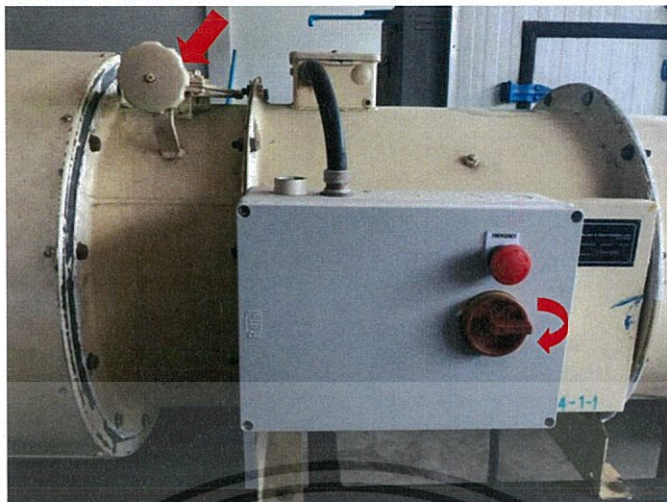


3.15 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ไว้ภายในอุโมงค์ลมโดยต่อเข้ากับโหลตเซลล์

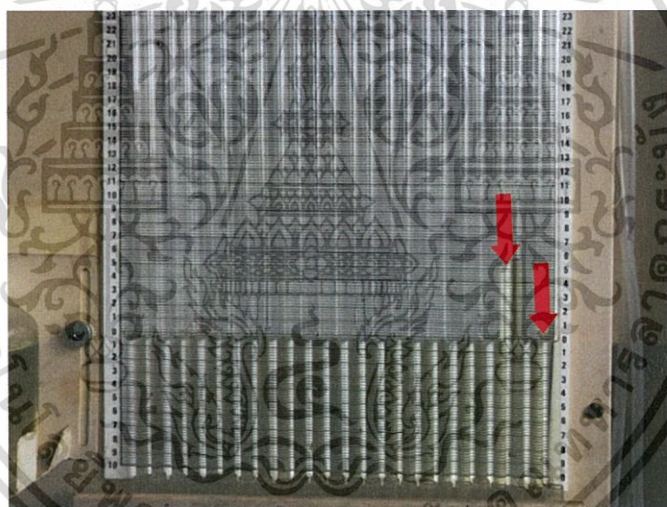


รูปที่ 3.16 แสดงการติดตั้งแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักร SDA3 ไว้ภายในอุโมงค์ลมโดยต่อเข้ากับโหลตเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

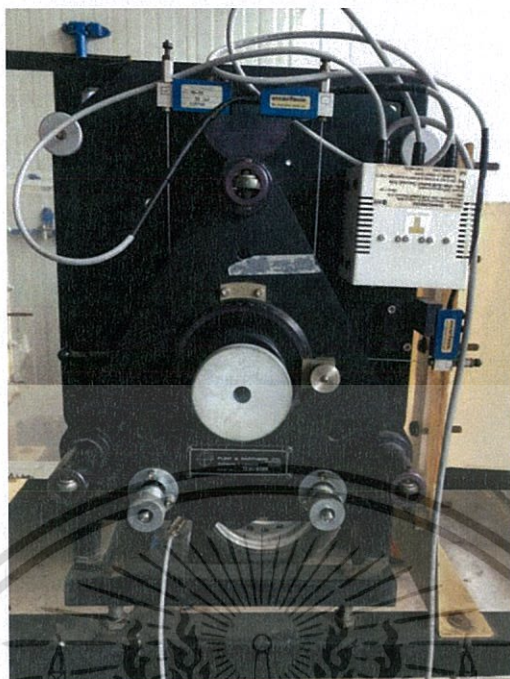


รูปที่ 3.17 แสดงวาล์วปีกผีเสื้อคู่ที่ติดตั้งอยู่ที่ทางออกของพัดลม และปุ่มเปิดเครื่องทดสอบอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.18 แสดงระดับความสูงของน้ำในमानอมิเตอร์ ท่อที่ 1 และท่อที่ 3 (นับจากทางขวามือ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 แสดงการต่อโพลดเซลล์เข้ากับเครื่องวัดค่าอิมพีแดนซ์



รูปที่ 3.20 แสดงหน้าจอการตั้งค่าโพลดเซลล์ให้น้ำหนักเริ่มต้นเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงหน้าจอแสดงผลสำหรับการอ่านค่าแรงต้านอากาศ (นิวตัน) ของโมเดลจำลองที่ความเร็ว
นั้น ๆ

และนำค่าแรงต้านอากาศที่อ่านได้จากหน้าจอแสดงผลมาแทนในสมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
อากาศ

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_f}$$

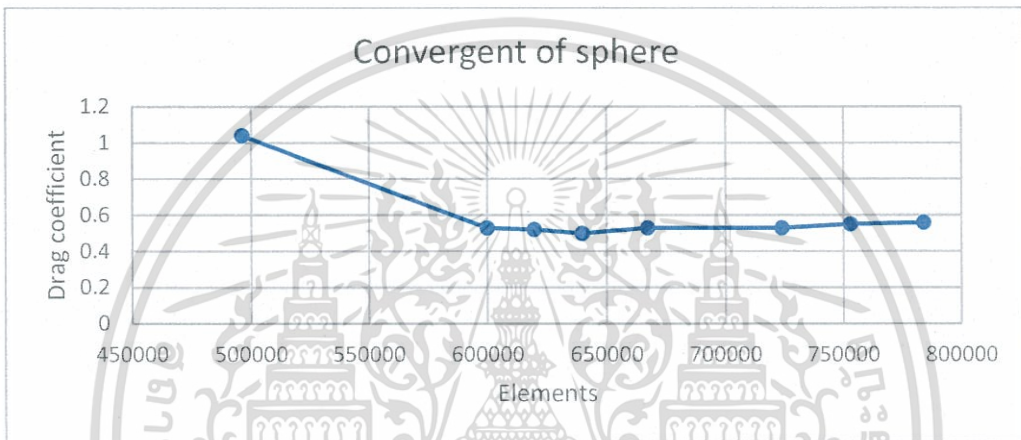
(3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

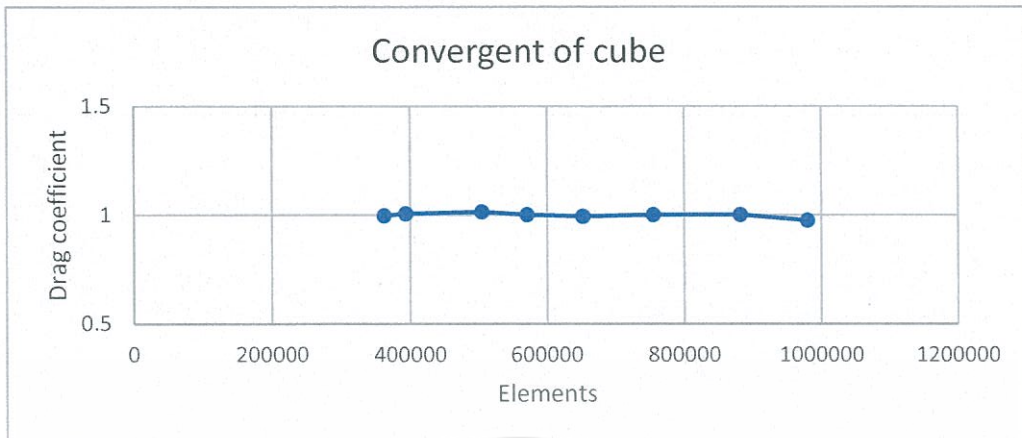
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลของการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.1 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) สำหรับทรงกลม

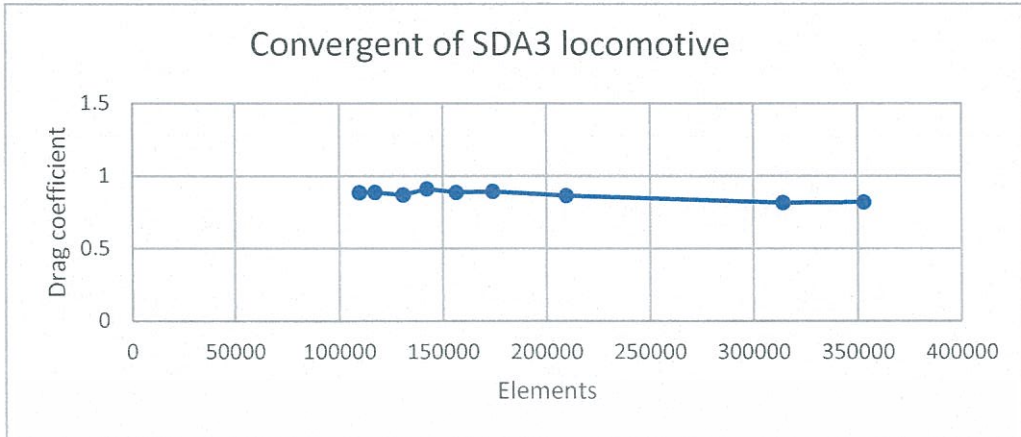
จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการปรับค่าจำนวนเอลิเมนต์จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมของวัตถุทรงกลมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง แต่เมื่อปรับจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 639744 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ได้แสดงไว้ในหนังสือ Fluid Mechanics มากที่สุดและเมื่อมีการเพิ่มหรือลดจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นหรือน้อยลงมากกว่านี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 639744 ในการจำลองสถานการณ์เพื่อวัดค่าแรงต้านอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกับค่าเรย์โนลด์ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 4.2 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) สำหรับปลุกบาศก์

จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการปรับค่าจำนวนเอลิเมนต์จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมของวัตถุปลุกบาศก์ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง แต่เมื่อปรับจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 504931 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ได้แสดงไว้ในหนังสือ Junkers Wind-Tunnel Result on Angle Profile มากที่สุดและเมื่อมีการเพิ่มหรือลดจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นหรือน้อยลงมากกว่านี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 504931 ในการจำลองสถานการณ์เพื่อวัดค่าแรงต้านอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกับค่าเรย์โนลด์ที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



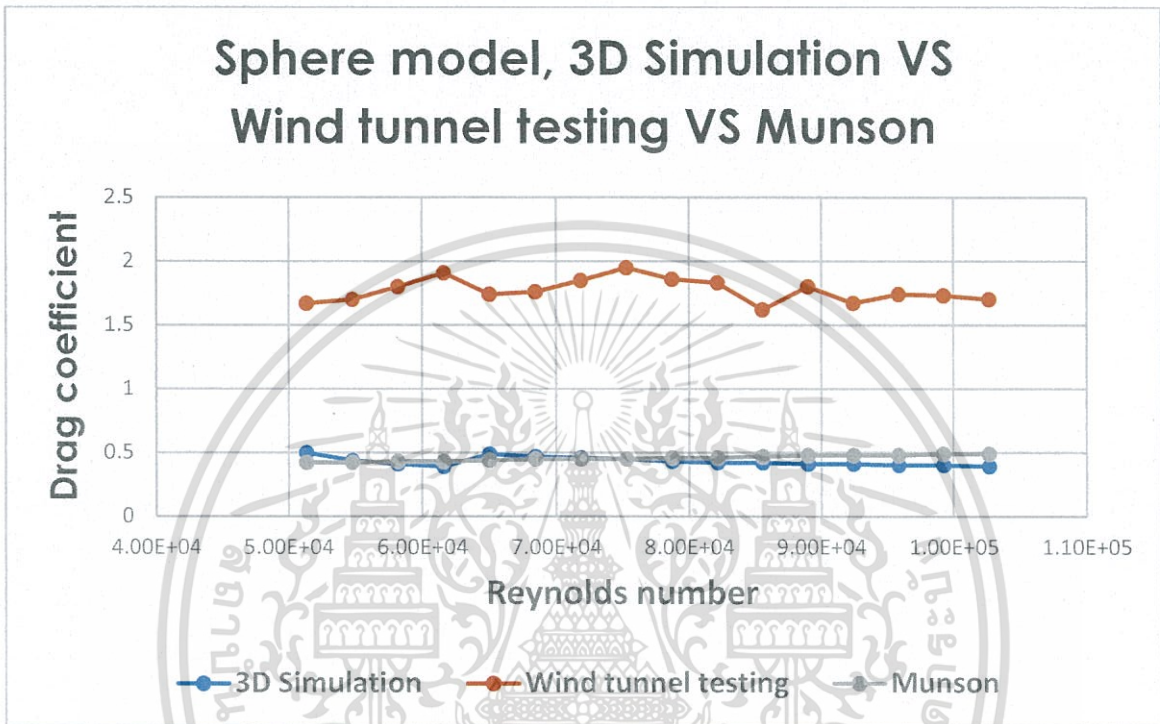
รูปที่ 4.3 แสดงการลู่เข้าของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ค่าเอลิเมนต์ต่าง ๆ จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) สำหรับหัวรถจักร SDA3

จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการปรับค่าจำนวนเอลิเมนต์จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมของโมเดลหัวรถจักร SDA3 ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลง แต่เมื่อปรับจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 142113 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่วัดได้จากการทดลองโดยอุโมงค์ลมมากที่สุดและเมื่อมีการเพิ่มหรือลดจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นหรือน้อยลงมากกว่านี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 142113 ในการจำลองสถานการณ์เพื่อวัดค่าแรงต้านอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกับค่าเรย์โนลด์ที่เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

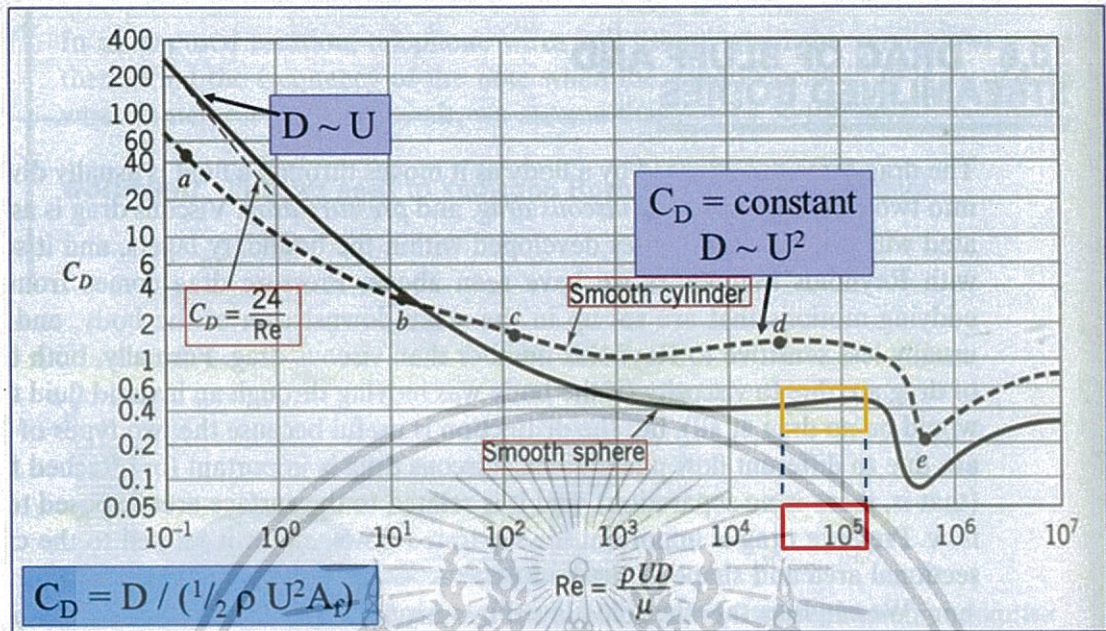
4.2 การพิสูจน์ความถูกต้องของการจำลองสถานการณ์

4.2.1 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของทรงกลม



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) และกราฟสำหรับ Smooth sphere สำหรับโมเดลทรงกลม

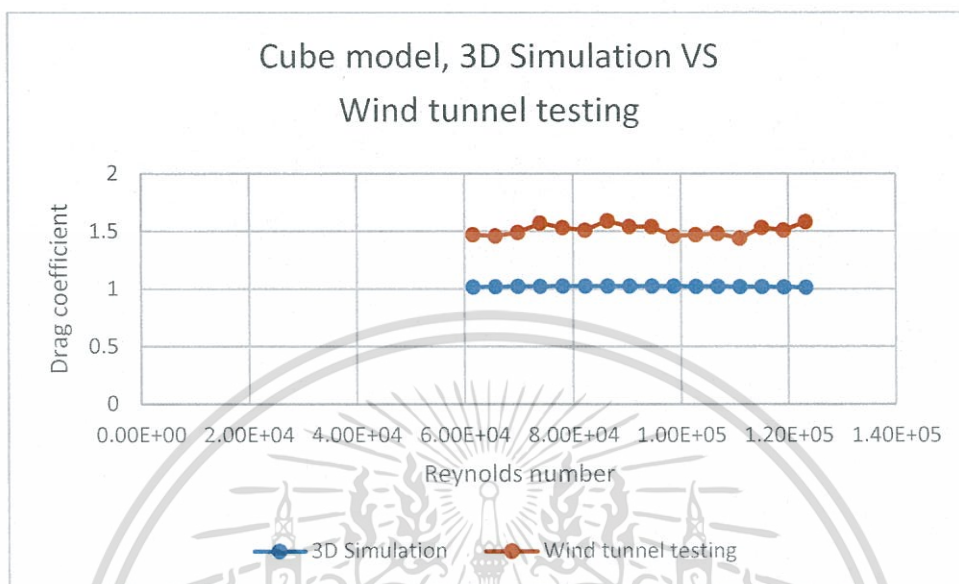
จากรูปแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่วัดได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมของวัตถุทรงกลมมีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่แสดงไว้ในหนังสือ Fluid Mechanics ส่วนค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยอุโมงค์ลมมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงเกินไป



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Reynolds number กับ drag coefficient อ้างอิงจาก fundamentals of fluid mechanics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

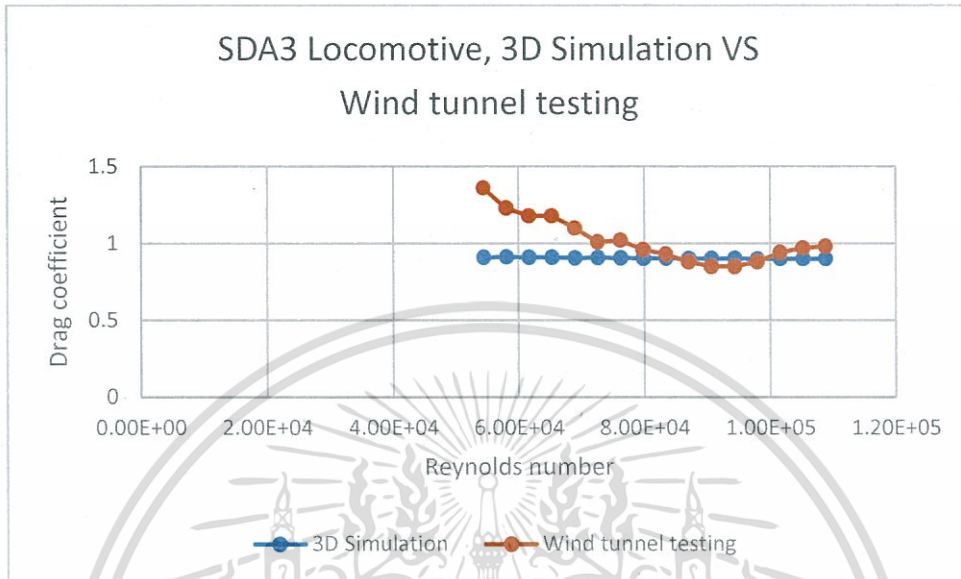
4.2.2 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของลูกบาศก์



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) สำหรับโมเดลลูกบาศก์

จากรูปแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่วัดได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมของวัดลูกบาศก์มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่แสดงไว้ในหนังสือ Junkers Wind-Tunnel Result on Angle Profile ส่วนค่าที่วัดได้จากการทดลองโดยอุโมงค์ลมมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่ามาก











4.2.3 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับอุโมงค์ลมของหัวรถจักร













รูปที่ 4.7 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลอง (Simulation) กับผลที่ได้จากการทดสอบในอุโมงค์ลม (Wind tunnel testing) สำหรับโมเดลหัวรถจักร

4.3 ผลของแรงต้านอากาศที่กระทำกับรถไฟ ที่การจัดเรียงตู้แบบต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบเอาต์ออกจากด้านหน้า และเอาต์ออกจากด้านหลัง ตามลำดับ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ











รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	25.38	101.21	232.78	415.54	646.86	927.33	1253.75	1648.14	2106.67	2564.76	3149.51	3692.33
	24.49	98.37	219.17	394.64	603.62	885.08	1217.48	1574.49	1999.28	2468.15	2990.43	3579.11
	24.86	99.05	221.65	394.59	618.46	888.41	1237.47	1595.38	2045.69	2520.84	3077.55	3624.89
	24.70	98.12	221.85	394.21	617.93	874.07	1226.73	1589.21	2003.97	2468.49	3020.91	3588.73
	24.47	97.30	218.81	390.96	610.88	876.08	1199.84	1571.44	1982.12	2439.90	2939.53	3545.30
	24.52	98.70	226.50	404.88	631.95	916.30	1239.52	1635.28	2057.24	2527.45	3081.23	3659.89
	25.05	98.51	224.38	400.01	632.70	909.22	1246.33	1623.08	2044.20	2536.81	3059.48	3658.68
	25.19	103.42	230.10	410.22	638.91	921.37	1244.04	1610.49	2065.78	2517.54	3106.15	3706.54
	24.89	100.43	230.59	403.01	625.89	913.28	1237.11	1601.91	2034.17	2531.96	3061.09	3625.53
	25.38	101.21	232.78	415.54	646.86	927.33	1253.75	1648.14	2106.67	2564.76	3149.51	3692.33

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 1 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ





































รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
 	24.47	97.30	218.81	390.96	610.88	876.08	1199.84	1571.44	1982.12	2439.90	2939.53	3545.30
 	24.52	98.70	226.50	404.88	631.95	916.30	1239.52	1635.28	2057.24	2527.45	3081.23	3659.89
 	24.80	99.63	228.62	407.40	626.19	896.47	1225.51	1617.57	2008.47	2531.87	3036.86	3642.46
 	25.31	101.24	221.91	403.75	628.90	909.45	1236.59	1609.84	2092.90	2483.40	3031.49	3618.36
 	24.81	99.84	220.48	400.78	620.20	898.53	1222.46	1588.41	2016.90	2499.11	3039.05	3642.54








ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 2 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ

รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	24.70	98.12	221.85	394.21	617.93	874.07	1226.73	1589.21	2003.97	2468.49	3020.91	3588.73
	25.05	98.51	224.38	400.01	632.70	909.22	1246.33	1623.08	2044.20	2536.81	3059.48	3658.68
	25.38	99.95	228.40	405.07	631.43	903.35	1237.17	1587.73	2014.16	2501.45	3040.36	3622.61
	24.64	98.60	224.16	399.54	614.67	887.99	1222.41	1581.68	2012.51	2516.59	3029.70	3582.85
	25.16	101.61	228.88	403.56	635.80	904.85	1255.25	1617.72	2053.03	2572.46	3105.33	3662.31
	25.30	102.29	226.10	406.64	630.81	915.66	1239.24	1626.35	2052.65	2527.37	3079.17	3615.68
	24.97	100.79	221.67	403.19	623.21	905.66	1230.90	1604.56	2016.56	2496.70	3052.41	3612.68
	26.66	104.88	238.68	422.83	661.67	957.04	1304.39	1696.55	2113.64	2631.51	3178.61	3831.01
	26.66	104.88	238.68	422.83	661.67	957.04	1304.39	1696.55	2113.64	2631.51	3178.61	3831.01
	25.20	100.97	227.27	400.99	628.47	910.05	1269.34	1615.33	2074.04	2592.95	3132.99	3705.87

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 3 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ




















รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
  	24.86	99.05	221.65	394.59	618.46	888.41	1237.47	1595.38	2045.69	2520.84	3077.55	3624.89
  	25.19	103.42	230.10	410.22	638.91	921.37	1244.04	1610.49	2065.78	2517.54	3106.15	3706.54
  	24.88	100.12	223.31	403.57	616.24	895.88	1209.36	1628.28	2015.22	2487.12	3008.37	3605.49
   	25.52	100.84	229.36	407.80	629.13	935.74	1257.67	1658.06	2089.99	2558.69	3115.30	3682.75
   	25.39	103.83	232.41	408.44	636.74	928.86	1243.75	1648.22	2079.47	2555.01	3124.03	3682.03
  	25.15	100.86	224.08	404.73	629.17	893.89	1213.19	1604.97	2002.19	2482.01	3030.12	3620.86
   	24.95	100.46	227.34	401.03	627.90	907.21	1240.29	1617.88	2030.17	2497.28	3033.86	3639.76
   	25.62	102.49	225.59	409.82	645.34	922.76	1268.62	1616.90	2048.46	2537.58	3095.88	3701.37
   	25.06	100.82	225.68	401.66	633.65	900.27	1264.32	1651.94	2119.55	2599.51	3160.65	3725.08
   	25.03	100.29	227.95	403.60	627.11	896.60	1241.62	1613.21	2056.62	2552.77	3078.45	3663.40

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 4 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ











รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	24.49	98.37	219.17	394.64	603.62	885.08	1217.48	1574.49	1999.28	2468.15	2990.43	3579.11
	24.89	100.43	230.59	403.01	625.89	913.28	1237.11	1601.91	2034.17	2531.96	3061.09	3625.53
	24.61	99.69	221.23	401.07	623.48	916.00	1230.49	1607.42	2036.32	2530.29	3047.60	3633.30
	24.69	98.56	224.28	399.37	627.44	902.24	1239.44	1602.15	2035.85	2483.15	3041.31	3643.91
	25.14	99.18	226.04	394.05	629.64	906.80	1235.65	1604.38	2031.86	2515.23	3040.36	3584.26



ตารางที่ 4.6 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบเอาตู้ออกจากด้านหน้า และเอาตู้ออกจากด้านหลัง ตามลำดับ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ











รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
 	78.17	313.32	705.82	1255.80	1963.35	2828.52	3851.67	5032.49	6371.01	7867.77	9522.13	11334.40
 	62.02	247.60	556.93	989.85	1546.96	2225.89	3029.59	3956.89	5008.27	6182.78	7180.52	8902.16
 	57.63	229.89	516.37	918.95	1435.88	2067.63	2814.66	3681.31	4659.63	5753.18	6961.61	8285.71
 	58.60	233.62	524.99	932.84	1457.10	2098.03	2855.58	3730.54	4722.27	5830.38	7054.69	8396.21
 	55.18	219.97	494.26	878.07	1371.51	1974.85	2688.16	3511.50	4444.92	5488.28	6641.69	7905.32
 	62.47	249.84	561.17	996.77	1556.41	2240.15	3048.21	3980.55	5036.88	6217.40	7522.01	8950.39
 	65.43	261.10	586.85	1042.60	1628.33	2344.57	3190.67	4166.60	5272.77	6508.90	7876.97	9373.31
 	65.62	262.19	589.75	1048.21	1637.64	2357.86	3209.21	4191.76	5305.27	6549.76	7925.23	9431.77
 	70.01	280.48	631.40	1122.96	1797.62	2588.8	3524.11	4603.25	5826.25	7193.04	8703.50	10357.60
	51.97	207.00	464.88	825.62	1289.11	1855.62	2525.14	3297.74	4173.46	5152.52	6234.48	7419.43

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 1 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ




































รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
 	55.18	219.97	494.26	878.07	1371.51	1974.85	2688.16	3511.50	4444.92	5488.28	6641.69	7905.32
 	62.47	249.84	561.17	996.77	1556.41	2240.15	3048.21	3980.55	5036.88	6217.40	7522.01	8950.39
 	59.89	238.87	537.10	954.42	1489.78	2145.53	2918.16	3812.47	4826.56	5960.17	7213.50	8587.31
 	60.56	241.20	541.82	962.08	1501.77	2161.56	2943.09	3841.43	4864.08	6002.77	7266.24	8642.43
 	61.10	243.17	545.36	967.96	1512.02	2177.92	2964.61	3872.70	4897.56	6047.49	7320.61	8705.27








ตารางที่ 4.8 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 2 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ

รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	58.60	233.62	524.99	932.84	1457.10	2098.03	2855.58	3730.54	4722.27	5830.38	7054.69	8396.21
	65.43	261.10	586.85	1042.60	1628.33	2344.57	3190.67	4166.60	5272.77	6508.90	7876.97	9373.31
	60.81	244.55	550.37	976.64	1525.94	2194.54	2987.30	3901.54	4938.60	6097.32	7368.04	8505.27
	62.85	250.76	563.38	1000.77	1563.38	2250.34	3062.05	4000.73	5065.25	6251.34	7565.63	9005.62
	70.28	280.44	630.35	1119.98	1749.29	2518.15	3430.88	4479.26	5667.64	7002.83	8475.52	10083.10
	63.99	255.28	573.76	1019.30	1592.27	2292.57	3120.32	4075.25	5158.40	6368.89	7706.79	9172.66
	62.84	250.82	563.77	1002.12	1564.51	2254.03	3068.74	4013.21	5080.69	6268.43	7586.48	9022.91
	69.91	279.04	626.74	1113.89	1738.40	2503.60	3408.45	4448.33	5631.54	6954.54	8417.09	10020.50
	72.86	290.61	652.80	1160.02	1810.90	2607.91	3547.34	4634.06	5866.82	7244.58	8761.35	10421.70
	71.22	284.08	638.39	1134.13	1771.38	2550.29	3470.96	4533.22	5737.22	7083.00	8570.09	10199.60

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดกับการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 3 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ

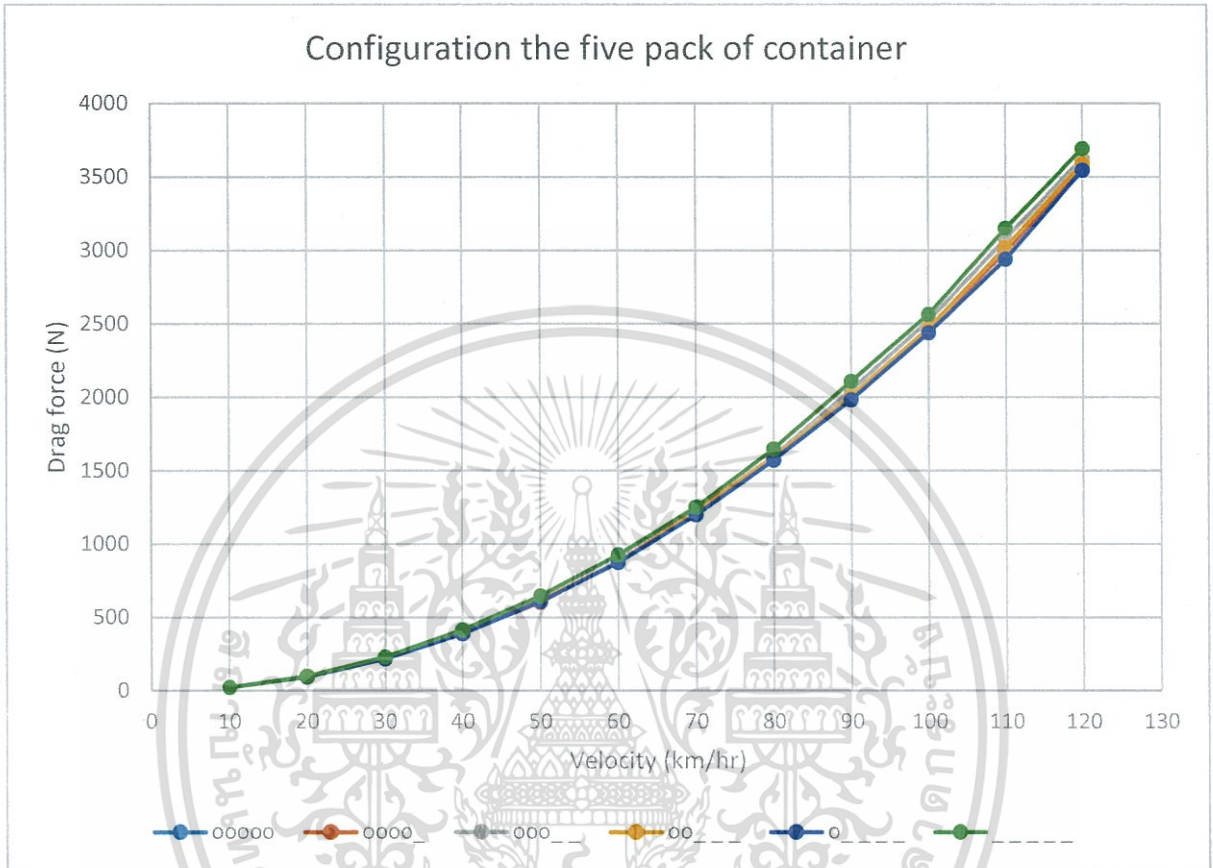
รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
  	57.63	229.89	516.37	918.95	1435.88	2067.63	2814.66	3681.31	4659.63	5753.18	6961.61	8285.71
  	65.62	262.19	589.75	1048.21	1637.64	2357.86	3209.21	4191.76	5305.27	6549.76	7925.23	9431.77
  	66.76	266.91	600.39	980.30	1667.80	2401.53	3268.51	4270.68	5407.34	6678.17	8082.76	9621.93
   	71.53	286.77	645.79	1148.57	1794.05	2585.83	3520.33	4598.51	5820.69	7186.60	8701.98	10356.90
   	66.14	264.23	593.67	1055.10	1648.50	2374.00	3231.68	4221.48	5343.82	6598.63	7979.19	9497.58
  	65.27	260.80	586.15	1041.49	1626.39	2340.69	3186.29	4176.30	5285.82	6526.37	7895.02	9395.53
  	64.16	256.18	575.63	1023.34	1597.17	2300.23	3127.74	4081.35	5166.76	6387.76	7710.56	9177.42
   	72.24	288.79	649.50	1154.25	1803.01	2597.04	3534.10	4616.97	5843.03	7214.35	8731.35	10393.30
   	67.23	268.67	604.20	1074.68	1679.00	2417.65	3290.86	4298.17	5440.55	6717.29	8128.49	9674.79
   	71.96	287.92	648.01	1152.77	1802.39	2598.60	3536.12	4619.65	5847.85	7221.60	8739.41	10403.20

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เกิดจากการจัดวางตู้แบบมีตู้สินค้า 4 ตู้ โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ

รูปแบบการจัดวางตู้	$F_D(N)$											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
	62.02	247.60	556.93	989.85	1546.96	2225.89	3029.59	3956.89	5008.27	6182.78	7180.52	8902.16
	70.01	280.48	631.40	1122.96	1797.62	2588.8	3524.11	4603.25	5826.25	7193.04	8703.50	10357.60
	67.91	272.16	613.07	1090.29	1704.44	2455.22	3342.74	4365.28	5525.54	6822.07	8254.75	9823.71
	68.62	274.61	618.37	1099.91	1719.45	2476.80	3370.40	4405.55	5573.86	6886.49	8328.15	9912.51
	68.42	274.06	617.58	1098.52	1716.92	2472.63	3366.41	4397.28	5565.50	6870.27	8312.61	9892.46

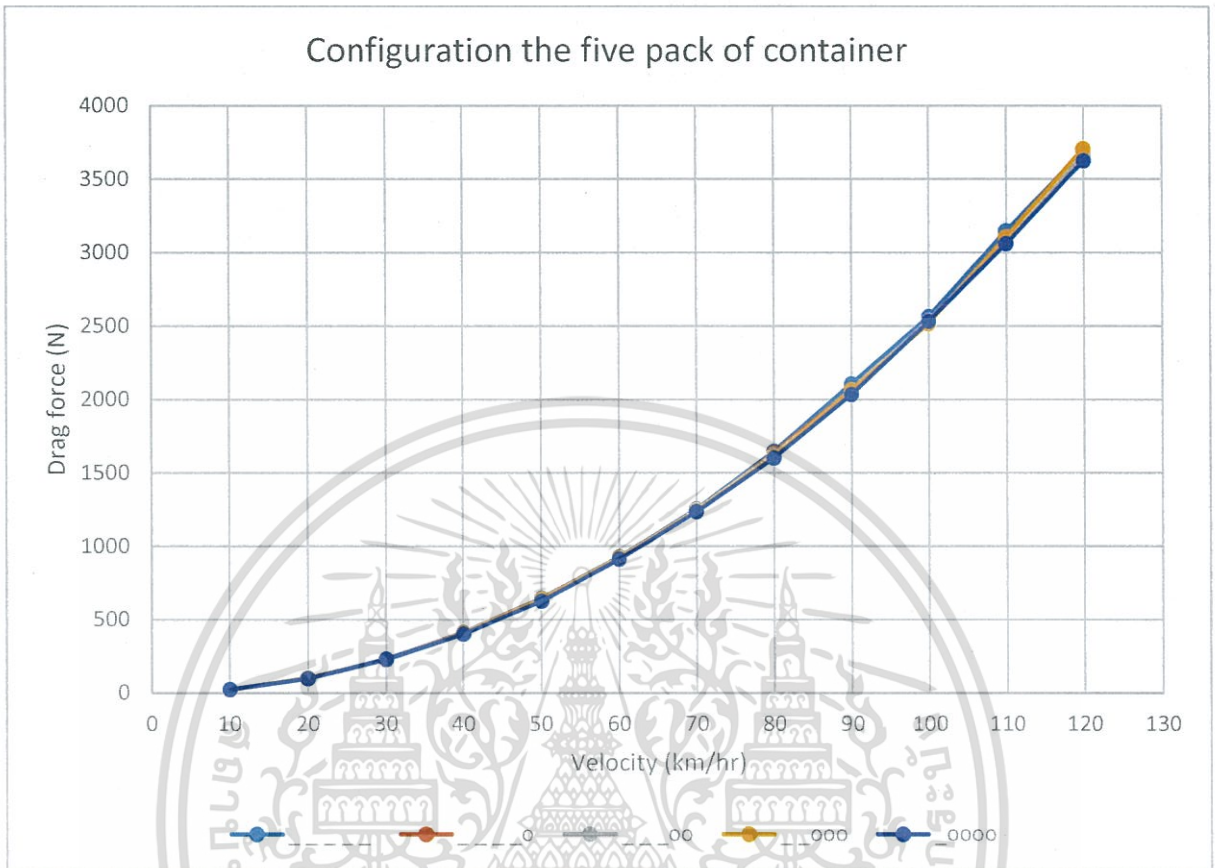


4.4 ผลการศึกษาการจัดเรียงตู้



รูปที่ 4.8 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกจากด้านที่ติดกับหัวรถจักร

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านอากาศและความเร็วสำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกจากด้านที่ติดกับหัวรถจักร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่ ที่ความเร็วสูง ๆ นั้นแรงต้านอากาศจะส่งผลมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วต่ำ ๆ เมื่อเอาตู้สินค้าออกมากขึ้น แนวโน้มจะทำให้แรงต้านอากาศมากขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็วสูง



รูปที่ 4.9 แสดงค่าแรงต้านอากาศที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น สำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกทางด้านท้ายขบวน

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านอากาศและความเร็วสำหรับการจัดเรียงตู้ขนส่งสินค้าทั้งหมด 5 ตู้ โดยการนำตู้สินค้าออกทางด้านท้ายขบวน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นกราฟที่มีการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยที่ ที่ความเร็วสูง ๆ นั้นแรงต้านอากาศจะส่งผลมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วต่ำ ๆ เมื่อเอาตู้สินค้าออกมากขึ้น แนวโน้มแรงต้านอากาศมีสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย

































4.5 การวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางตู้สินค้า

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองว่าโปรแกรมมีความน่าเชื่อถือและถูกต้องแล้ว ก็จะนำโปรแกรมมาใช้จำลองการจัดวางตู้สินค้าในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อวัดค่าแรงต้านอากาศที่เกิดขึ้น แล้ววิเคราะห์ผลว่ารูปแบบไหนที่ลดแรงต้านอากาศได้มากที่สุด



































เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบแรงต้านอากาศที่ความเร็ว 80 กม/ชม. โดยการคำนวณแบบ 2 มิติ

รูปแบบการจัดวางตู้	เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น-ลดลง
	Baseline
	4.47% decrease
	3.2% decrease
	3.58% decrease
	4.65% decrease
	0.78% decrease
	1.52% decrease
	2.28% decrease
	2.08% decrease
	4.75% decrease
	1.85% decrease
	2.32% decrease
	3.62% decrease
	3.67% decrease
	4.03% decrease
	1.85% decrease
	1.32% decrease
	2.64% decrease
	2.94% increase
	2.94% increase
	1.99% decrease
	1.2% decrease
	0.6% increase
	0.004% increase
	2.62% decrease
	1.84% decrease
	1.9% decrease
	0.23% increase
	2.12% decrease
	2.47% decrease
	2.79% decrease
	2.66% decrease

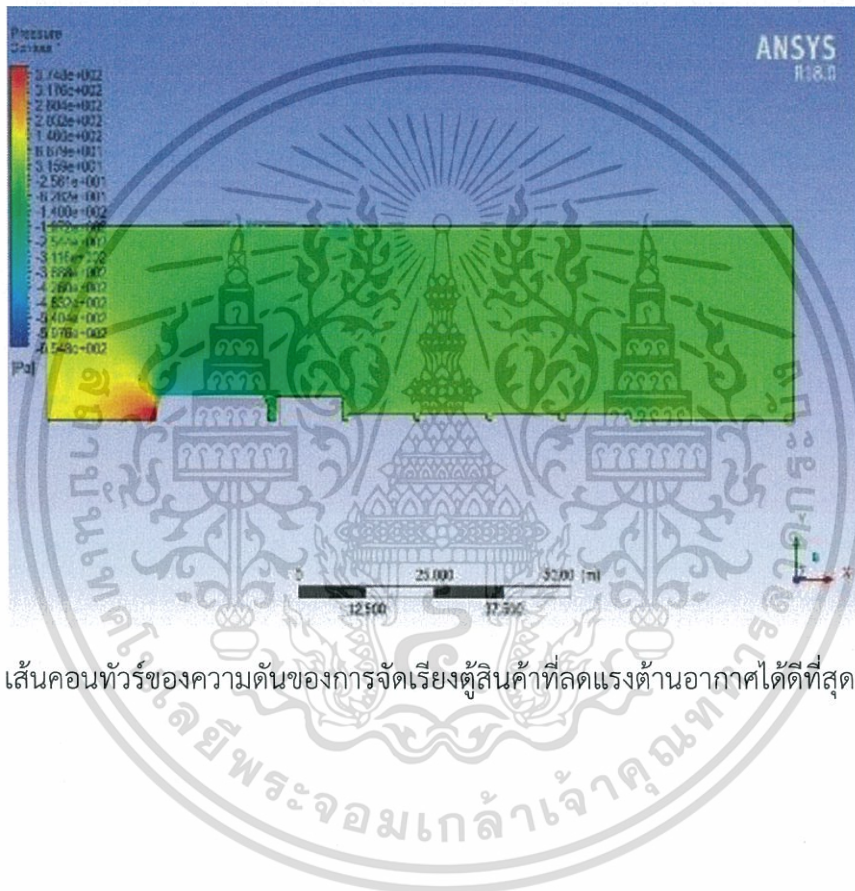
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปอร์เซนต์เปรียบเทียบแรงต้านอากาศที่ความเร็ว 80 กม/ชม. โดยการคำนวณแบบ 3 มิติ

รูปแบบการจัดวางตู้	เปอร์เซนต์เพิ่มขึ้น-ลดลง
	Baseline
	21.37% decrease
	26.85% decrease
	25.87% decrease
	30.22% decrease
	20.9% decrease
	17.21% decrease
	16.71% decrease
	8.53% decrease
	34.47% decrease
	24.24% decrease
	23.67% decrease
	23.05% decrease
	22.47% decrease
	20.5% decrease
	10.99% decrease
	19.02% decrease
	20.25% decrease
	11.61% decrease
	7.92% decrease
	9.92% decrease
	15.14% decrease
	8.62% decrease
	16.12% decrease
	17.01% decrease
	18.89% decrease
	8.26% decrease
	14.59% decrease
	8.2% decrease
	13.26% decrease
	12.46% decrease
	12.62% decrease

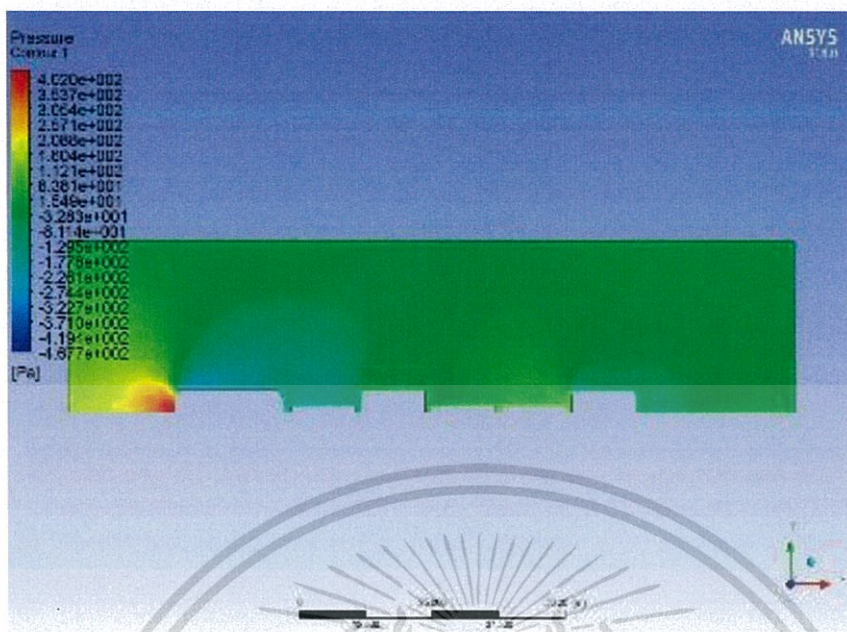
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นคอนทัวร์ของความดัน จากรูป ในกรณีของการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่ดีที่สุดนั้น จะเกิดความดันที่สูงเพียงจุดเดียวที่บริเวณด้านหน้าของขบวนหรือบริเวณด้านหน้าของหัวรถจักร SDA3 แต่ในกรณีการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่แย่มากที่สุด จะเกิดความดันที่สูงสองจุด ทั้งบริเวณด้านหน้าขบวนและบริเวณด้านหน้าของตู้สินค้าท้ายขบวน เนื่องมาจากการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่ดีที่สุดนั้น มีพื้นที่ปะทะระหว่างอากาศกับขบวนรถไฟน้อยกว่าการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่แย่มากที่สุด



รูปที่ 4.10 เส้นคอนทัวร์ของความดันของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด

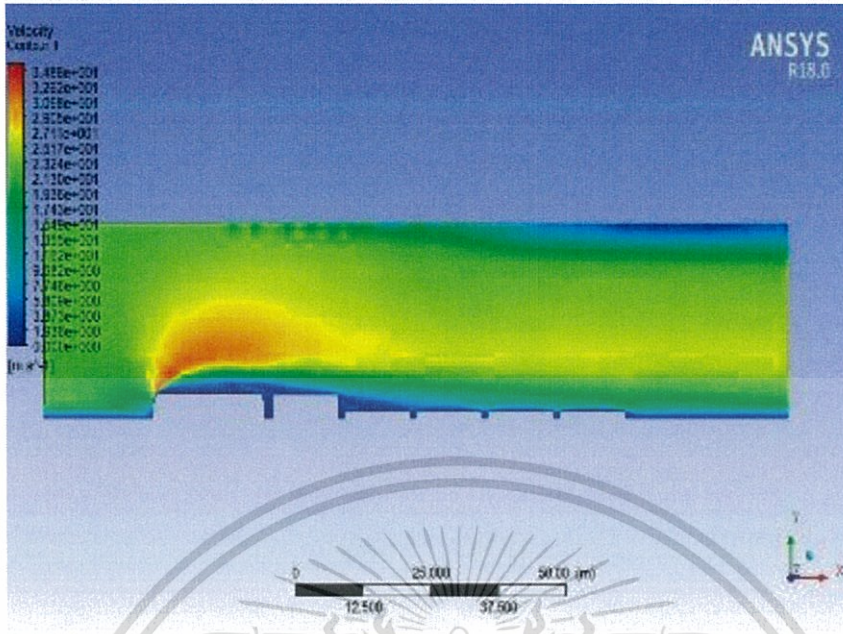
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



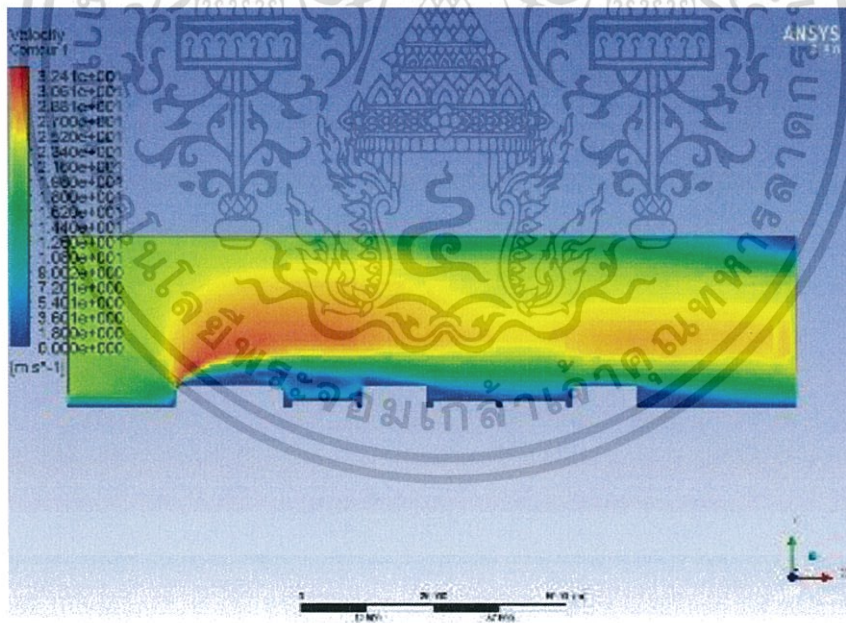
รูปที่ 4.11 เส้นคอนทัวร์ของความดันของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แก่ที่สุด

เส้นคอนทัวร์ของความเร็ว จากรูป ในกรณีของการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่ดีที่สุดนั้น จะเกิดพื้นที่ที่มีความเร็วสูงของการไหลของอากาศเหนือขบวนรถไฟน้อยกว่ากรณีการจัดเรียงตู้สินค้าแบบที่แย่ที่สุด เนื่องจากอากาศจะไหลปะทะเข้ากับขบวนรถไฟเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นจะไม่ได้ปะทะเข้ากับตู้สินค้าอีก แต่ในกรณีแบบที่แย่ที่สุดนั้น อากาศจะไหลลงมาปะทะกับตู้สินค้าอีกครั้งหนึ่งจึงทำให้อากาศเกิดการอัดตัวและเพิ่มพื้นที่ที่มีความเร็วสูงมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



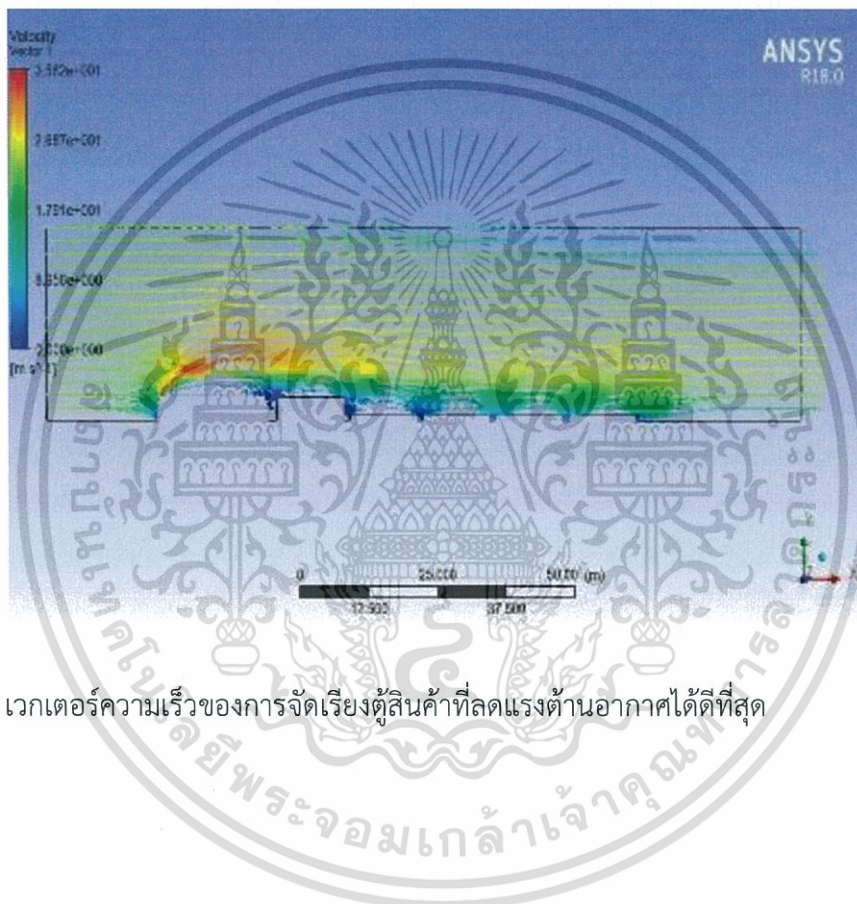
รูปที่ 4.12 เส้นคอนทัวร์ของความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.13 เส้นคอนทัวร์ของความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แย่มากที่สุด

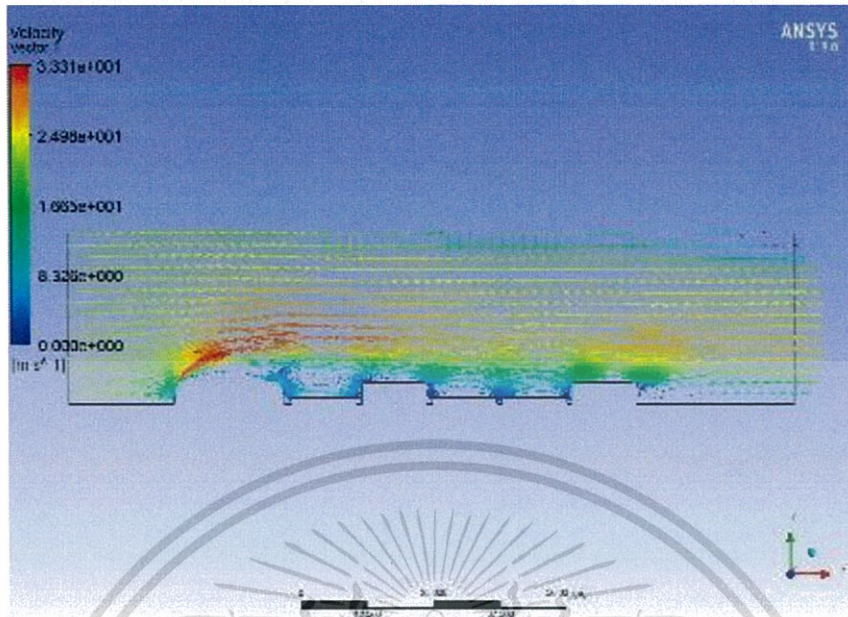
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวกเตอร์ความเร็ว จากรูป จะเห็นว่าบริเวณช่องว่างระหว่างหั่วรถจักร SDA3 กับตู้สินค้า หรือ ช่องว่างระหว่างตู้สินค้ากับตู้สินค้า ความเร็วการไหลของอากาศลดลงจนถึงศูนย์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากอากาศ ได้ไหลลงไปในช่วงว่างเหล่านั้นและเกิดปรากฏการณ์การหมุนวนของอากาศ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในกรณี การจัดเรียงตู้สินค้าที่แบบแย่มากที่สุด เนื่องจากมีช่องว่างที่กว้างมากพอที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้



รูปที่ 4.14 เวกเตอร์ความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เวกเตอร์ความเร็วของการจัดเรียงตู้สินค้าที่ลดแรงต้านอากาศได้แก่ที่สุด

4.6 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์แรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนรถไฟขนส่งสินค้าโดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 32 รูปแบบสำหรับการจัดวางตู้สินค้าภายในขบวนรถไฟซึ่งประกอบไปด้วย 1 หัวรถจักร(SDA3) และ 5 ตู้สินค้าโดยวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ทั้งหมด 12 ค่า จาก 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ถึง 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการวิเคราะห์แรงต้านอากาศด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข(Simulation) ได้ผลว่าอากาศไหลเข้าปะทะกับหัวรถจักร แล้วเกิดการกระจายตัวของอากาศบริเวณรอบ ๆ ของจุดปะทะ ทำให้อากาศมีความเร็วที่มากขึ้น แล้วพุ่งขึ้นไปยังบริเวณหลังคาของหัวรถจักรแต่ก็มีลมบางส่วนที่ไหลวนกลับมายังบริเวณหลังจุดปะทะแล้วไหลเคลื่อนที่ไปในทิศทางเคลื่อนที่เดียวกันกับทิศการเคลื่อนที่ของรถไฟ และอากาศบางส่วนก็ไหลเข้าไปปะทะกับบริเวณตู้สินค้าทำให้บริเวณด้านหลังตู้สินค้าและด้านหลังของหัวรถจักรอากาศมีความเร็วเท่ากับศูนย์ เมื่อมาดู Pressure Contour จึงเห็นว่าบริเวณจุดที่ลมปะทะกับพื้นที่หน้าตัดของหัวรถจักรมีค่าความดันสูงที่สุด ส่งผลให้อากาศไหลไปในทิศทางพุ่งขึ้นด้านบนของหัวรถจักรด้วยความเร็วสูง และบริเวณด้านหลังจุดที่อากาศไหลไปปะทะกับหัวรถจักรนั้นมีค่าความดันต่ำที่สุดจนความดันมีค่าติดลบ จึงส่งผลให้ทิศทางการไหลของอากาศเปลี่ยนกลับไปเป็นทิศตรงกันข้าม เกิดเป็นลมหมุนขนาดเล็กขึ้น ทั้งนี้เมื่อมีการนำตู้สินค้าออกระหว่างทางหรือจุดขนส่งสินค้า จำทำให้เกิดช่องว่าง

ระหว่างห้วงจักรกับตู้สินค้าหรือระหว่างตู้สินค้ากับตู้สินค้าด้วยกันเอง การเกิดช่องว่างระหว่างตู้หรือห้วงจักรที่มากขึ้นทำให้ค่าของแรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนรถไฟขนส่งสินค้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อมาวิเคราะห์จาก Contour ชนิดต่าง ๆ ทำให้ทราบว่าเมื่อเกิดช่องว่างในขบวนรถไฟตรงตำแหน่งไหน ก็จะมีการปะทะระหว่างอากาศกับขบวนรถไฟตรงตำแหน่งนั้นด้วย อีกทั้งยังเกิดลมหมุนขนาดเล็ก เมื่อวิเคราะห์รูปแบบทั้ง 32 รูปแบบ จึงทราบว่าหากนำตู้สินค้าออกเมื่อส่งสินค้าในรูปแบบใด จะทำให้ค่าแรงต้านอากาศลดลงมากน้อยอย่างไร

สำหรับการทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าการไหลของอากาศมีความสอดคล้องกันหรือไม่ ทำโดยการเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าแรงต้านอากาศ ระหว่างการวิเคราะห์แรงต้านอากาศด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขกับการหาค่าโดยอุโมงค์ลม(Wind Tunnel) พบว่าแนวโน้มของค่าแรงต้านอากาศมีแนวโน้มสูงขึ้นแบบฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลทั้งสองรูปแบบ ทั้งการหาโดยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขและการหาค่าโดยเครื่องมือวัดจากการทดลองโดยอุโมงค์ลม ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบโดยใช้โมเดล ลูกบาศก์, ทรงกลม และห้วงจักร จึงสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมจำลองฟลูเอินท์มีความเชื่อถือได้

ในการนำตู้สินค้าออกในรูปแบบที่ 1 โดยค่อยๆนำตู้สินค้าออกจากท้ายขบวนก่อนจนเหลือตู้สุดท้ายที่อยู่ตำแหน่งติดกับห้วงจักร ค่าแรงต้านอากาศมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่ตู้สินค้าตู้แรกออก โดยสามารถลดค่าแรงต้านอากาศลงไปถึง 21% และค่อยๆลดลงมากยิ่งขึ้นจนลดลงไปสูงสุดถึง 30%

ในการนำตู้สินค้าออกในรูปแบบที่ 2 โดยค่อยๆนำตู้ที่ตำแหน่งตรงกลางขบวนออกก่อนและค่อยๆนำออกไปเรื่อย ๆ จากบริเวณตรงกลาง พบว่าค่าแรงต้านอากาศมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่เมื่อนำตู้แรกออกค่าของแรงต้านอากาศลดลงเพียง 13% แต่เมื่อนำตู้สินค้าออกต่อไปเรื่อย ๆ พบว่าแรงต้านอากาศไม่ได้มีแนวโน้มลดลงมากขึ้น แต่กลับมีค่าแรงต้านอากาศลดลงเหลือเพียง 10% เท่านั้น

ในการนำตู้สินค้าออกในรูปแบบที่ 3 โดยการนำตู้ที่อยู่ติดกับตำแหน่งห้วงจักรออกก่อนและค่อยๆนำออกไปเรื่อย ๆ จนเหลือตู้สุดท้ายบริเวณท้ายขบวนแรงต้านอากาศมีแนวโน้มลดลง เมื่อนำตู้แรกออกค่าแรงต้านอากาศมีค่าลดลงเพียง 9% เท่านั้นและเมื่อนำตู้สินค้าออกไปเรื่อย ๆจนเหลือตู้สุดท้ายที่ท้ายขบวน ค่าแรงต้านอากาศลดลงมากที่สุดประมาณ 21%

ดังนั้นในการจัดรูปแบบการตู้สินค้าออกจากขบวนรถไฟ ก็ควรจะทำตามการยกออกในรูปแบบที่ 1 เพื่อให้ขบวนรถไฟประหยัดแรงในการเคลื่อนที่ตั้งแต่ขนส่งตู้สินค้าในครั้งแรกดีกว่าการนำตู้สินค้าออกโดยไม่มีลำดับขั้นตอนในการขนส่ง ยิ่งหากขนส่งในระยะทางที่ไกลขึ้น แม้จะประหยัดแรงในการเคลื่อนที่ที่

ต่างกันเพียง 10% เท่านั้น แต่หากคิดเป็นปริมาณการสูญเสียเชื้อเพลิงในการขนส่ง ก็จะสามารถประหยัดไปได้มาก

4.7 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลขแล้ว มีความคลาดเคลื่อนอยู่ เนื่องจากในการเขียนแบบสำหรับใช้ในโปรแกรมจำลองพลูเอนท์นั้น มีความละเอียดไม่เท่ากับรายละเอียดของโมเดลห้วงจักรจำลองที่ใช้ในอุโมงค์ลม อีกทั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าแรงต้านอากาศจากการทดลองในอุโมงค์ลม มีค่าความละเอียดในการวัดหยากกว่าที่ต้องการ ทั้งค่าที่วัดออกมาได้นั้นมีค่าที่ไม่คงที่ จึงต้องใช้โปรแกรมในการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงต้านอากาศจากอุโมงค์ลมอีกครั้ง จึงส่งผลให้ค่าที่ได้อาจไม่แม่นยำเท่าที่ควร ในส่วนของโมเดลห้วงจักรจำลองนั้น ติดตั้งในตำแหน่งที่ความเร็วลมที่ไหลมาปะทะอาจจะไม่คงที่ เนื่องจากมีแรงเสียดทานของผนังอุโมงค์ จึงอาจส่งผลกับค่าแรงต้านอากาศที่กระทำต่อโมเดลห้วงจักรจำลองด้วย สุดท้ายในการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต ที่เกี่ยวข้องในโปรแกรม ผู้ทดลองยังไม่ได้กำหนดให้ฟังก์ชันมีความละเอียดมากนัก ค่าที่วัดได้จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ค่าแรงต้านอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่วัดได้จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงต้านอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่วัดได้จากการทดลองโดยอุโมงค์ลม ในส่วนของความคลาดเคลื่อน แบบจำลองทรงกลมมีค่าความคลาดเคลื่อน 79.58% แบบจำลองลูกบาศก์มีค่าความคลาดเคลื่อน 49.31% และแบบจำลองหัวรถจักร SDA3 มีค่าความคลาดเคลื่อน 20.48%
2. จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรมทำให้รู้ว่าเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าเรย์โนลด์ แรงต้านอากาศที่กระทำต่อแบบจำลองจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศน้อย แรงต้านอากาศก็จะน้อย ส่วนแบบจำลองที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมากแรงต้านอากาศที่กระทำก็จะมากกว่า ในส่วนของการจัดเรียงตู้สินค้า พบว่ารูปแบบการจัดเรียงตู้สินค้าที่มีช่องว่างระหว่างตู้สินค้า หรือระหว่างหัวรถจักรกับตู้สินค้ามากกว่า จะเกิดแรงต้านอากาศที่กระทำขบวนรถมากกว่าด้วย โดยช่องว่างที่เกิดขึ้นทำให้เกิดลมหมุนภายในช่องว่าง
3. จากการจำลองสถานการณ์โดยโปรแกรม พบว่าการนำตู้สินค้าออกจากด้านหลังแล้วเหลือตู้ด้านหน้าที่ติดกับหัวรถจักรเป็นตู้สุดท้ายจะสามารถลดแรงต้านอากาศที่กระทำต่อขบวนได้มากกว่า การนำตู้ออกจากด้านหลังแล้วเหลือตู้ท้ายขบวนเป็นตู้สุดท้าย 3.35% และมากกว่าการนำตู้ออกจากตรงกลางขบวน 3 ตู้ถึง 4.72%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองในอุโมงค์ลมควรจัดวางโมเดลอยู่ในตำแหน่งที่ความเร็วลมนั้นคงที่ที่สุด
2. ตัวแบบที่ใช้วิเคราะห์ภายในโปรแกรมควรมีความละเอียดใกล้เคียงกับโมเดลจำลอง
3. ควรใช้เครื่องมือวัดที่มีช่วงค่าในการวัดครอบคลุมกับค่าแรงต้านอากาศที่ต้องการวัด
4. ควรมีการเทียบค่าความเร็วในอุโมงค์ลมในจุดที่ต้องการจะติดตั้งโมเดลจำลอง
5. ในการตั้งค่าโปรแกรมควรมีการศึกษาและค้นคว้ารายละเอียดของฟังก์ชันต่าง ๆ ให้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ผลจากการเปรียบเทียบจำลองโดยโปรแกรมกับทดลองในอุโมงค์ลมความเร็วลม 15-30 เมตรต่อวินาที

จากการวัดค่าแรงต้านอากาศโดยใช้โปรแกรมคำนวณ และการทดลองในอุโมงค์ลม ทำให้ได้ผลการทดลองทั้งหมดดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าแรงต้านอากาศของทรงกลมที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ

ความเร็ว (m/s)	Reynold number	F_D (N)	C_D
15	5.13×10^4	0.45	0.50
16	5.48×10^4	0.50	0.49
17	5.82×10^4	0.55	0.47
18	6.16×10^4	0.60	0.46
19	6.50×10^4	0.65	0.45
20	6.85×10^4	0.71	0.44
21	7.19×10^4	0.79	0.43
22	7.53×10^4	0.85	0.42
23	7.87×10^4	0.91	0.42
24	8.13×10^4	0.98	0.41
25	8.56×10^4	1.12	0.41
26	8.90×10^4	1.27	0.41
27	9.24×10^4	1.35	0.40
28	9.58×10^4	0.95	0.40
29	9.93×10^4	1.03	0.39
30	1.03×10^5	1.10	0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ค่าแรงต้านอากาศของลูกบาศก์ที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ

ความเร็ว (m/s)	Reynold number	$F_D(N)$	C_D
15	6.16×10^4	0.489	1.016
16	6.57×10^4	0.558	1.020
17	6.98×10^4	0.630	1.022
18	7.39×10^4	0.706	1.023
19	7.80×10^4	0.788	1.024
20	8.22×10^4	0.874	1.025
21	8.63×10^4	0.964	1.025
22	9.04×10^4	1.058	1.025
23	9.45×10^4	1.156	1.025
24	9.86×10^4	1.258	1.024
25	1.03×10^5	1.363	1.023
26	1.07×10^5	1.473	1.022
27	1.11×10^5	1.584	1.019
28	1.15×10^5	1.702	1.018
29	1.19×10^5	1.822	1.016
30	1.23×10^5	1.946	1.014

ตารางที่ 3 ค่าแรงต้านอากาศของหัวรถจักรที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ

ความเร็ว (m/s)	Reynold number	$F_D(N)$	C_D
15	5.44×10^4	0.200	0.910
16	5.81×10^4	0.228	0.911
17	6.17×10^4	0.257	0.909
18	6.53×10^4	0.289	0.909
19	6.89×10^4	0.320	0.906
20	7.26×10^4	0.356	0.907
21	7.62×10^4	0.391	0.905
22	7.98×10^4	0.428	0.903
23	8.35×10^4	0.468	0.903
24	8.71×10^4	0.509	0.902

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3(ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของหัวรถจักรที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ

ความเร็ว (m/s)	Reynold number	F_D (N)	C_D
25	9.07×10^4	0.552	0.901
26	9.43×10^4	0.597	0.901
27	9.80×10^4	0.643	0.900
28	1.02×10^5	0.691	0.899
29	1.05×10^5	0.741	0.899
30	1.09×10^5	0.793	0.899

ตารางที่ 4 ค่าแรงต้านอากาศของทรงกลมที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
15	0.44	0.452	1.67
	0.46		
	0.46		
	0.46		
	0.44		
16	0.52	0.526	1.70
	0.54		
	0.53		
	0.51		
	0.53		
17	0.62	0.626	1.80
	0.63		
	0.63		
	0.64		
	0.61		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของทรงกลมที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
18	0.75	0.744	1.91
	0.75		
	0.73		
	0.74		
	0.75		
19	0.75	0.754	1.74
	0.76		
	0.72		
	0.76		
	0.78		
20	0.86	0.848	1.76
	0.86		
	0.84		
	0.84		
	0.84		
21	0.99	0.982	1.85
	0.98		
	1.01		
	0.96		
	0.97		
22	1.12	1.136	1.95
	1.16		
	1.12		
	1.13		
	1.15		
23	1.21	1.186	1.86
	1.19		
	1.19		
	1.17		
	1.17		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของทรงกลมที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
24	1.27	1.270	1.83
	1.25		
	1.24		
	1.29		
	1.30		
25	1.21	1.216	1.62
	1.23		
	1.26		
	1.20		
	1.18		
26	1.47	1.466	1.80
	1.47		
	1.46		
	1.44		
	1.49		
27	1.42	1.464	1.67
	1.48		
	1.49		
	1.48		
	1.45		
28	1.65	1.644	1.74
	1.66		
	1.67		
	1.57		
	1.67		
29	1.70	1.748	1.73
	1.75		
	1.68		
	1.81		
	1.8		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของทรงกลมที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
30	1.83	1.838	1.70
	1.83		
	1.83		
	1.85		
	1.85		

ตารางที่ 5 ค่าแรงต้านอากาศของลูกบาศก์ที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
15	0.71	0.728	1.47
	0.74		
	0.71		
	0.74		
	0.74		
16	0.83	0.822	1.46
	0.84		
	0.82		
	0.83		
	0.79		
17	0.96	0.954	1.49
	0.96		
	0.93		
	0.98		
	0.94		
18	1.16	1.128	1.57
	1.09		
	1.09		
	1.16		
	1.14		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของลูกบาศก์ที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N) เฉลี่ย	C_D
19	1.21	1.218	1.53
	1.23		
	1.19		
	1.25		
	1.21		
20	1.30	1.336	1.51
	1.38		
	1.35		
	1.34		
	1.31		
21	1.50	1.554	1.59
	1.55		
	1.58		
	1.52		
	1.62		
22	1.64	1.642	1.54
	1.65		
	1.62		
	1.63		
	1.67		
23	1.86	1.792	1.54
	1.83		
	1.80		
	1.76		
	1.71		
24	1.86	1.848	1.46
	1.90		
	1.89		
	1.77		
	1.82		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของลูกบาศก์ที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	$F_D(N)$	$F_D(N)$ เฉลี่ย	C_D
25	2.00	2.02	1.47
	1.98		
	2.00		
	2.09		
	2.03		
26	2.24	2.202	1.48
	2.18		
	2.22		
	2.18		
	2.19		
27	2.25	2.318	1.44
	2.34		
	2.36		
	2.34		
	2.30		
28	2.66	2.65	1.53
	2.60		
	2.57		
	2.70		
	2.72		
29	2.65	2.792	1.51
	2.82		
	2.82		
	2.80		
	2.87		
30	3.05	3.144	1.58
	3.13		
	3.19		
	3.16		
	3.19		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ค่าแรงต้านอากาศของหัวรถจักรที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N)เฉลี่ย	C_D
15	0.34	0.318	1.36
	0.32		
	0.31		
	0.30		
	0.32		
16	0.33	0.328	1.23
	0.36		
	0.29		
	0.31		
	0.35		
17	0.27	0.353	1.18
	0.38		
	0.36		
	0.45		
	0.29		
18	0.38	0.396	1.18
	0.41		
	0.39		
	0.41		
	0.39		
19	0.38	0.412	1.10
	0.38		
	0.47		
	0.41		
	0.42		
20	0.38	0.42	1.01
	0.43		
	0.40		
	0.45		
	0.44		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของหัวรถจักรที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	F_D (N)	F_D (N)เฉลี่ย	C_D
21	0.45	0.466	1.02
	0.48		
	0.48		
	0.50		
	0.42		
22	0.44	0.484	0.96
	0.51		
	0.49		
	0.47		
	0.55		
23	0.58	0.512	0.93
	0.47		
	0.51		
	0.50		
	0.50		
24	0.64	0.526	0.88
	0.53		
	0.44		
	0.52		
	0.50		
25	0.55	0.554	0.85
	0.49		
	0.58		
	0.57		
	0.58		
26	0.56	0.596	0.85
	0.57		
	0.55		
	0.63		
	0.67		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 (ต่อ) ค่าแรงต้านอากาศของหัวรถจักรที่ได้จากอุโมงค์ลม

ความเร็ว (m/s)	$F_D(N)$	$F_D(N)$ เฉลี่ย	C_D
27	0.64	0.666	0.88
	0.73		
	0.61		
	0.65		
	0.70		
28	0.78	0.766	0.94
	0.81		
	0.69		
	0.76		
	0.79		
29	0.96	0.85	0.97
	0.85		
	0.75		
	0.89		
	0.80		
30	1.08	0.918	0.98
	0.89		
	0.83		
	0.93		
	0.86		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] คมเดช แยม์สุคนธ์, ณัฐนันท์ ศรีอนันต์, อรรถพร ศุภมาตร. การปรับปรุงอุโมงค์ลมแบบวงจรถัดเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับห้องปฏิบัติการอากาศพลศาสตร์. 2553.
- [2] จารุวัฒน์ มัดจุปะ, นภนต์ สิทธิเสรีประทีป, ปรีชาพล โพธิ์ศิริ. การจำลองการไหลของอากาศภายในเตาอบไฟฟ้า. 2553.
- [3] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลลูม. 2559.
- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, เสฏฐวรธร สุจริตภักดีสกุล. การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโต๊ะช่างแอนซีเอส. 2560.
- [5] Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. Alan Pope. Low - speed wind tunnel testing. 1999.
- [6] James C. Paul, Richard W. Johnson, and Robert G. Yates. Application of CFD to Rail Car and Locomotive Aerodynamics. 2009.
- [7] Philip Donovan Kinghorn. Aerodynamic Drag On Intermodal Rail Cars. 2017.
- [8] J. Garcia, J. Monoz-Paniagua, A. Crespo. Numerical study of aerodynamics of a full scale train under turbulent wind condition, including surface roughness effect. 2017.
- [9] Munson, Young, Okiishi. Fundamentals of Fluid Mechanics. 1998