การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างสำหรับรถสูตรนักศึกษา

NUMERICAL STUDY AND DESIGN OF SIDE-DIFFUSERS FOR FSAE CAR

กายธัศ บรรพพงศ์

โชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ

เมธัส สหัสธาราชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างสำหรับรถสูตรนักศึกษา

NUMERICAL STUDY AND DESIGN OF SIDE-DIFFUSERS FOR FSAE CAR

กายธัศ บรรพพงศ์

โชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ

เมธัส สหัสธาราชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY AND DESIGN OF SIDE-DIFFUSERS FOR FSAE CAR

KAYTHAS BUNPAPONG
CHOTIRAWEE CHATPATTANASIRI
MAYTHUS SAHASTHARACHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABUNG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างสำหรับรถสูตรนักศึกษา
NUMERICAL STUDY AND DESIGN OF SIDE-DIFFUSERS FOR FSAE CAR

ผู้จัดทำ

1. นายกายธัศ บรรพพงศ์ รหัสประจำตัว 58010085
2. นายโชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ รหัสประจำตัว 58010305
3. นายเมธัส สหัสธาราชัย รหัสประจำตัว 58011020

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.บำรุง พ่วงเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างสำหรับรถสูตรนักศึกษา

นายกายธัศ บรรพพงศ์ 58010085
นายโชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ 58010305
นายเมธัส สหัสธาราชัย 58011020
ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางอากาศพลศาสตร์ที่เพิ่มแรงกดสำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา (Formula student) มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดเวลาต่อรอบหรือเพิ่มเร็วในการแข่งขันในรูปแบบวิ่งวนเป็นวงกลม (Skidpad) ทำการวิเคราะห์คำนวณเชิงตัวเลขสามมิติรูปทรงต่าง ๆ ของดิฟฟิวเซอร์เพื่อได้รูปทรงที่เหมาะสม โดยใช้โปรแกรมการคำนวณทางพลศาสตร์จากเซิร์ฟเวอร์ โปรแกรม SimScale โดยการแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด SST k-omega ควบคู่ไปกับสมมติฐานว่าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้และอุณหภูมิคงที่ ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขถูกยืนยันค่าแรงกดและแรงต้านผ่านผลการทดลองชิ้นงานด้วยอุโมงค์ลม ผลลัพธ์ที่ได้คือมุมฝั่งขาออกที่ให้ค่าแรงกดมากที่สุดคือ 32 องศา และพบว่าอัตราส่วนความสูงขาออกต่อความสูงขาเข้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงกดมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NUMERICAL STUDY AND DESIGN OF SIDE-DIFFUSERS FOR FSAE CAR

Kaythas	Bunpapong	58010085
Chotirawee	Chatpattanasiri	58010305
Maythus	Sahastharachai	58011020
Dr. Bumroong	Puangkird	Advisor

Year 2561

ABSTRACT

This research focuses on designing a diffuser for Formula Student race car. Our aim is to reduce the lap time in circular track called Skid-pad event by mean of increasing down force generated by the diffuser, a ground effect aerodynamic device. Utilizing three-dimensional CFD simulation via cloud computing to obtain the most optimal design among the studied parameters. The study employs SST k-omega turbulence model with an incompressible flow and isothermal assumptions and the CFD model is validated via wind tunnel testing. Finally, the results are the optimal outlet angle of 32 degrees and the higher the outlet to inlet height, the lesser downforce.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์สามารถทำงานให้สำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับคำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการตรวจสอบแก้ไขจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.บำรุง พ่วงเกิด คณะผู้จัดทำตระหนักถึงความกรุณาที่ได้รับ และขอขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณชมรมยานยนต์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณการสนับสนุนจากร้านขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติ Winnlabb เพื่อใช้ในการทำการทดลองอุโมงค์ลม ขอขอบคุณคำแนะนำการใช้งานชุดทดลองอุโมงค์ลมจาก รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ขอขอบคุณ SimScale สำหรับการสนับสนุนทรัพยากรการคำนวณเชิงตัวเลข CFD Simulation ทำให้การคำนวณเป็นไปอย่างราบรื่นและเพียงพอต่อการใช้งาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จลุล่วงลงได้หากปราศจาคการสนับสนุนอันใดอันหนึ่งดังที่กล่าวข้างต้น คณะผู้จัดทำปริญญานิพนธ์ต่างก็ซาบซึ้งในความกรุณาของพวกท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

นายกายธัศ บรรพพงศ์
นายโชติรวี ฉัตรพัฒนศิริ
นายเมธัส สหัสธาราชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 แผนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 อากาศพลศาสตร์ในรถสูตรนักศึกษา	5
2.1 คุณสมบัติของของไหล	5
2.2 สมการควบคุม (Governing Equation)	8
2.3 สภาพความคล้ายและการวิเคราะห์เชิงมิติ (Similarity and Dimensional Analysis)	12
2.4 Computational Fluid Dynamics	15
2.5 ซอฟต์แวร์ SimScale	24
บทที่ 3 การแข่งขัน	32
3.1 รายละเอียดการแข่งขัน	32
3.2 การกำหนดค่าแรงที่ต้องการ	34
3.3 ขั้นตอนการออกแบบเพื่อบรรลุเป้าหมาย	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 Validation 37

4.1 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านทรงกระบอก 37

4.2 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ 44

4.3 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านรถแข่ง 55

บทที่ 5 การดำเนินการ 62

5.1 สมมติฐานการออกแบบดิฟฟิวเซอร์แยกจากรถ 62

5.2 การออกแบบดิฟฟิวเซอร์ 64

5.3 การแสดงผลและวิเคราะห์ลักษณะการไหล 71

บทที่ 6 สรุปผล 75

เอกสารอ้างอิง 77

ภาคผนวก 79

ภาคผนวก ก. กติกาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ 80

ภาคผนวก ข. กติกาที่เกี่ยวข้องกับการแข่งขัน 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1	3
1.2 แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2	4
2.1 ตารางข้อมูลเปรียบเทียบ K-omega Model กับ K-epsilon Model	24
2.2 ตารางสมการควบคุมในรูป Differential form และ Integral form ภายใต้สมติฐานข้างต้น	26
3.1 สถิติการแข่งขัน Skidpad ประเทศไทย	33
3.2 สถิติการแข่งขัน Skidpad ประเทศญี่ปุ่น	33
3.3 คุณสมบัติของรถ	35
3.4 ค่าคำนวณหาแรงกด	35
3.5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการวิเคราะห์ทั้งสองแบบ	36
4.1 ผลการทดลองแรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ	38
4.2 ผล CFD Simulation แรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ คำนวณโดยใช้ Laminar flow model	41
4.3 ผล CFD Simulation แรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ คำนวณโดยใช้ K-omega SST turbulence model	42
4.4 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดอยู่กึ่งกลางอุโมงค์ลม	45
4.5 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดใกล้พื้น	45
4.6 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดใกล้พื้น	50
4.7 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดอยู่กึ่งกลาง	50
4.8 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถแข่ง ณ ความเร็วต่าง ๆ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงยกที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถแข่ง ณ ความเร็วต่างๆ	58
5.1 แรงกดที่กระทำของแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation	65
5.2 แรงกดที่กระทำเมื่อเปลี่ยนมุมขาออกในแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation	67
5.3 แรงกดที่กระทำเมื่อเปลี่ยนมุมขาออกในแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation	70
6.1 ผลการ Simulation แบบแยกจากรถ ของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้จริง	75
6.2 ผลการ Simulation แบบติดกับรถ ของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้จริง	76

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การไหลภายแบบนิวโตเนียน ในการทดลองแผ่นเลื่อน	6
2.2 ตัวอย่างแผนภาพแสดงความเค้นในแนวแกน x ที่กระทำกับอนุภาคของไหล	10
2.3 ตัวอย่างชิ้นทดสอบรถสูตรซึ่งมีความคล้ายทางเรขาคณิต	12
2.4 ความแตกต่างของการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและการไหลมีความเป็นระเบียบ	13
2.5 แรงกระทำอันเกิดจากความดันและความเค้นบนพื้นที่ที่ถูกแบ่งขนาดเล็ก	14
2.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนเบื้องต้นของ CFD Simulation	16
2.7 การแกว่งของตัวแปรการไหลเมื่อไหลแบบปั่นป่วน จากกรณีศึกษาอากาศไหลผ่านทรงกระบอก	19
2.8 Kármán Vortex Street ตัวอย่างลักษณะหนึ่งของการไหลวน เมื่อไหลผ่านวัตถุ	20
2.9 แนวคิดการพิจารณาค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลาของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อลดการแกว่งไปมาของค่าตัวแปร	21
2.10 กรณีศึกษาของไหลไหลผ่านแผ่นราบ เพื่อทำความเข้าใจ Finite Volume Method	25
2.11 รูปแสดงเงื่อนไขที่ขอบและการกำหนกแกนอ้างอิง ในกรณีศึกษาของไหลไหลผ่านแผ่นราบ	26
2.12 รูปแสดงการแบ่ง Element และ Element point ของโดเมนการไหล	27
2.13 ตัวอย่างการพิจรณาความเร็วระหว่าง Element เพื่อหาการอัตราการไหลที่ผ่าน Element (1,1)	27
2.14 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาผลลัพธ์โดย Iterative method	30
3.1 เส้นทางการแข่งขัน Skidpad	34
4.1 รูปการติดตั้งท่อ PVC ทรงกระบอกในอุโมงค์ลม	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์จากการทดลองอากาศไหลผ่านทรงกระบอก เทียบกับค่ามาตรฐาน	38
4.3 ความสัมพันธ์ของผล CFD Simulation กับความละเอียดของ Mesh ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์จาก CFD Simulation ที่คำนวณโดยใช้ Laminar flow model, K-omega SST turbulence model เทียบกับค่ามาตรฐาน	43
4.5 การจับยึดชิ้นทดสอบ ณ กึ่งกลางอุโมงค์ลม	44
4.6 การจับยึดชิ้นทดสอบ ณ ตำแหน่งใกล้พื้น	44
4.7 แสดงความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของการจับยึด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางอุโมงค์ลม	46
4.8 แสดงความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของการจับยึด ณ ตำแหน่งใกล้พื้น	46
4.9 จุดยึดแบบจำลองดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่งใกล้พื้น (Ground effect)	47
4.10 จุดยึดและดิฟฟิวเซอร์ ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง (Free stream)	47
4.11 แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์จาก CFD Simulation กับจำนวน Node ที่ความเร็ว 11.1 เมตรต่อวินาที	48
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Ground effect)	51
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Ground effect)	51
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงกดและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Ground effect)	52
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Ground effect)	52
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Free stream)	53
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Free stream)	53
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงยกและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Free stream)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและCFD Simulation (Free stream)	54
4.20 แสดงการจับยึดของตัวรถภายในอุโมงค์ลม	55
4.21 แบบจำลองของรถแข่งและจุดยึดในซอฟต์แวร์ SimScale	56
4.22 แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์จาก CFD Simulation กับจำนวน Node ที่ความเร็ว 11.1 เมตรต่อวินาที	57
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation	59
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation	59
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงยกและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation	60
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation	60
4.27 แสดงถึงตำแหน่งที่ถูกขยายขึ้นเป็น 2 มิลลิเมตร	61
5.1 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ A	62
5.2 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ B	62
5.3 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ C	63
5.4 แผนภาพการเปรียบเทียบ CFD Simulation ดิฟฟิวเซอร์ A, B และ C แบบแยกจากรถ	63
5.5 แผนภาพการเปรียบเทียบ CFD Simulation ดิฟฟิวเซอร์ A, B และ C แบบติดกับรถ	64
5.6 ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ	65
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูง	65
5.8 ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบและมีระยะขาเข้า (Entry)	66
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป	66
5.10 ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง (Spline)	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป	69
5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป	69
5.13 การแสดงผลลักษณะการไหลตามมุมมองที่ 1 (ซ้าย) และมุมมองที่ 2 (ขวา)	72
5.14 ลักษณะการไหลของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบในมุมมองที่ 1	72
5.15 ภาพขยายเพื่อแสดงการหมุนวนขนาดเล็กที่เกิดด้านบนดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ	73
5.16 ลักษณะการไหลของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบในมุมมองที่ 2	74
5.17 ความดันที่พื้นผิวของรถ และ Velocity Streamline จานวณ 40 เส้น	74
6.1 ดิฟฟิวเซอร์ที่ให้แรงกดสูงสุด จากการออกแบบในหัวข้อ 5.2	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

F_L	คือ	แรงยก (N)
F_D	คือ	แรงต้าน (N)
p	คือ	ความดัน (Pa)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
μ	คือ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล $(N \cdot s/m^2)$
T	คือ	อุณหภูมิ (k)
A	คือ	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
V	คือ	ปริมาตร (m^3)
m	คือ	มวล (kg)
t	คือ	เวลา (s)
τ	คือ	ความเค้นเฉือน (N/m^2)
C_L	คือ	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
M	คือ	Mach Number
R	คือ	รัศมีโค้งของถนน (m)
μ_T	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางรถกับพื้นถนน
L_C	คือ	Characteristic length (m)
c	คือ	ความเร็วเสียง (m/s)
u	คือ	ความเร็วในแนวแกน X (m/s)
v	คือ	ความเร็วในแนวแกน Y (m/s)
w	คือ	ความเร็วในแนวแกน Z (m/s)
g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

นวัตกรรมที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีจำนวนไม่น้อยที่ถูกพัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากนวัตกรรมที่ใช้ในวงการรถแข่งจึงถือได้ว่าวงการรถแข่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้รถยนต์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รายการแข่งขันมีหลากหลายรายการ หนึ่งในนั้นคือรถแข่งรูปแบบนักศึกษา (Formula Student) รู้จักในชื่อรถสูตรนักศึกษา ซึ่งก่อตั้งโดยสมาคมวิศวรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineering) [1] เพื่อให้นักศึกษาได้นำความรู้ทางวิศวกรรมที่ได้เรียนมาใช้ในสถานการณ์จริงผ่านการแข่งขัน ซึ่งการแข่งขันดังกล่าวได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและได้รับความสนใจจากนักศึกษาวิศวกรรมทั่วโลก และเปรียบเสมือนเป็นหนึ่งในเสาหลักของวงการรถแข่งที่ทำการป้อนความรู้และนวัตกรรมให้กับอุตสาหกรรมยานยนต์

การแข่งขันรถสูตรนักศึกษาแบ่งเป็น 2 หมวด

1. Dynamic Event คือการแข่งขันมุ่งเน้นไปที่การทดสอบสมรรถนะของรถในรูปแบบต่าง ๆ ตามกติกาที่กำหนด เช่น การวิ่งทางตรง การวิ่งเป็นวงกลม หรือการวิ่งทางใกล
2. Static Event เป็นการแข่งขันการนำเสนอตัวรถ นำเสนอวิธีทางวิศวกรรมที่ถูกนำมาใช้ และนำเสนอความคุ้มค่าของรถโดยการประเมินราคาที่ใช้ในการผลิต

การแข่งขัน กติกาและข้อจำกัดเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้นวัตกรรมต่าง ๆ ในรถยนต์ถูกพัฒนาไปในทิศทางที่เหมาะสม

สมรรถภาพของรถแข่งมีหลากหลายด้าน หนึ่งในนั้นคือความเร็วในการเข้าโค้ง และเป็นที่ทราบกันดีว่าความเร็วในการเข้าโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อแรงกดของรถเพิ่มขึ้น การพัฒนาพลศาสตร์รถแข่งในยุคแรกนั้นมุ่งเน้นให้ตัวรถมีรูปทรงที่ลู่ลมเพื่อควบคุมแรงต้านให้มีค่าน้อย ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่มีผลต่อความเร็วเข้าโค้ง หลังจากนั้นตั้งแต่กลางทศวรรต 1960s เป็นต้นมา การติดตั้งอุปกรณ์ทางอากาศพลศาสตร์ประเภทปีกหน้าและปีกหลังเพื่อเพิ่มแรงกดเป็นวิธีการที่แพร่หลายและได้รับความสนใจจากนักวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง เช่น การและออกแบบปีกหน้าและปีกหลังสำหรับรถสูตรนักศึกษา [2-3] และในต่างประเทศมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวข้องกับการศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรถ [4-7] กระทั่งในปี 1970 รถแข่ง Chaparral 2J [8] สามารถสร้างแรงกดได้มากถึง 1.5 เท่าของแรงโน้มถ่วง โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งพัดลมขนาดใหญ่เพื่อดูดอากาศใต้ท้องรถประกอบกับการสร้างอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นดักอากาศด้านข้างท้องรถเรียกว่า Skirts เพื่อใช้ Ground effect ในการสร้างแรงกดให้กับตัวรถแข่งในการแข่งขันรถ Can-Am [9] ในสหรัฐอเมริกาวิธีการดังกล่าวถูกตัดสินว่าผิดกติกาเนื่องจากเป็นการใช้งาน Active Aerodynamics Part คืออุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ที่ต้องการพลังงานจากแหล่งภายนอก

จากนั้นในปี 1978 มีการกลับมาใช้งานอุปกรณ์ Skirts ประกอบกับการออกแบบลักษณะของรูปทรงใต้ท้องรถให้มีลักษณะคล้ายดิฟฟิวเซอร์ที่มีพื้นถนนเป็นส่วนประกอบเพื่อใช้ประโยชน์จาก Ground effect [10] การออกแบบดังกล่าวสร้างแรงกดมหาสารทำให้ความเร็วในการเข้าโค้งเพิ่มขึ้นและระยะเบรกลดลงอย่างมาก แต่เนื่องจากอุปกรณ์ Skirts เป็นแผ่นติดถนนทำให้ขูดกับพื้นถนนตลอดเวลาที่รถวิ่ง อุปกรณ์ดังกล่าวจึงถูกทำให้ผิดกติกาในปี 1983 ถึงแม้จะอยู่ภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าวอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ยังคงเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจจากผู้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง [11-14]

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นในการออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีความมีความสามารถในการเพิ่มแรงกดที่สูงและยังมีอัตราส่วนแรงกดต่อแรงต้านที่สูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น [15] อย่างไรก็ตามการออกแบบดิฟฟิวเซอร์มีความซับซ้อนและมีความเฉพาะทาง กล่าวคือรูปทรงของดิฟฟิวเซอร์ที่เหมาะสมมีความแตกต่างกันอย่างมากตามลักษณะรถแข่งแต่ละคัน ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบโดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลขหรือที่เรียกว่า Computational Fluid Dynamics ด้วยซอฟต์แวร์ SimScale

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างเพื่อควบคุมแรงกดและความเร็วการเข้าโค้ง ให้กับรถสูตรนักศึกษาที่ใช้ในการแข่งขันจริง
2. เพื่อศึกษา CFD Simulation สำหรับปัญหาอากาศพลศาสตร์การไหลภายนอกของรถสูตรนักศึกษา
3. เพื่อศึกษาวิธีทำการทดลองทางอากาศพลศาสตร์ของชิ้นงานแบบจำลองต่าง ๆ โดยใช้ชุดทดลองอุโมงค์ลม
4. เพื่อเป็นแหล่งศึกษาและอ้างอิงสำหรับชมรมยานยนต์พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการพัฒนารถแข่งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างชิ้นทดสอบของรถสูตรนักศึกษาที่จะใช้จริงในการแข่งขัน TSAE2019 และนำแบบจำลองดังกล่าวเข้าทำการทดลองในอุโมงค์ลม เพื่อวัดค่าแรงกด แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงกดและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

2. ทำแบบจำลอง CFD Simulation สำหรับชิ้นทดสอบรถสูตรนักศึกษาโดยใช้โปรแกรม SimScale เพื่อคำนวณแรงกด แรงต้าน รวมทั้งสัมประสิทธิ์แรงกดและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

3. เปรียบเทียบผลลัพธ์กับค่าที่ได้รับจากการทดลองในอุโมงค์ลม เพื่อหาการตั้งค่าแบบจำลอง CFD ที่ทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด

4. ทำการออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ด้านข้างรถเพื่อเพิ่มแรงกดและลดเวลาเข้าโค้งให้กับรถสูตรนักศึกษา จากการทำแบบจำลอง CFD Simulation ผ่านโปรแกรม SimScale เป็นเครื่องมือในการออกแบบ

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่1.1 แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1

รายการ	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ศึกษากติกาการแข่งขันรถสูตรนักศึกษา TSAE2019 และรวบรวมข้อมูลสถิติการแข่งขันรถสูตรนักศึกษาทั้งในประเทศและต่างประเทศ	←	→			
ทบทวนวรรณกรรม และศึกษาการทำ CFD Simulation โดยใช้โปรแกรม SimScale	←	→			
กำหนดวัตถุประสงค์ ขอบเขตการศึกษา และเป้าหมายที่ต้องการ		←	→		
สร้างแบบจำลองอย่างง่ายของรถสูตรนักศึกษา และทำ CFD Simulation แบบจำลอง ด้วยโปรแกรม SimScale		←	→		
ทำการทดสอบชิ้นงานแบบจำลอง ด้วยชุดทดลองอุโมงค์ลม		←	→		
วิเคราะห์และเปรียบเทียบผล Simulation กับการทดลอง				←	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่1.2 แผนการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2

รายการ	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ทดสอบสมมติฐานการออกแบบดิฟฟิวเซอร์แยกจากตัวรถ	←→				
ออกแบบดิฟฟิวเซอร์โดยใช้ CFD Simulation	←→				
เก็บค่าและวิเคราะห์ผลการนำไปใช้				←→	
สรุป				←→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ สามารถเพิ่มแรงกดและลดเวลาการเข้าโค้งเพื่อทำคะแนนในการแข่งขัน Skidpad
2. ได้นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ เพื่อเก็บคะแนนในการแข่งขันการนำเสนอภายใน Static Event
3. ได้รับรู้ข้อมูลและทดสอบความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ชุดทดสอบอุโมงค์ลมของภาควิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ในการอ้างอิงในงานวิจัยอื่น ๆ
4. ได้ประสบการณ์การทำ CFD Simulation ตลอดจนการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์
5. ได้แบบแผนแนวทางวิธีการทำ CFD Simulation ควบคู่กับการทดลอง เพื่อบุคคลที่ต้องการต่อยอดสามารถเรียนรู้และนำไปอ้างอิงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
อากาศพลศาสตร์ในรถสูตรนักศึกษา

อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) คือแขนงหนึ่งของวิชาวิทยาศาสตร์ที่อธิบายการพฤติกรรมของของไหลเมื่อเกิดการไหลภายนอกผ่านวัตถุรูปทรงใด ๆ เช่น ทรงกระบอก ทรงกลม อาคารบ้านเรือน ปีกของเครื่องบิน หรือรถยนต์เป็นต้น พฤติกรรมดังกล่าวมักส่งผลให้เกิดแรงกระทำต่อวัตถุซึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุนั้นและคุณสมบัติของของไหล ในทางวิศวกรรม แรงเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ที่หลากหลาย เช่น ทำให้เครื่องบินลอยอยู่ในอากาศ หรือทำให้เรือใบเคลื่อนที่ตามแรงลมเป็นต้น

โดยทั่วไปเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ แรงที่เกิดจากหลักอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อวัตถุมักถูกมองเป็นแรง 2 แรง แบ่งตามแนวแกนคือ แรงยก (Lift Force) และแรงต้าน (Drag Force) การออกแบบรถแข่งมีจุดประสงค์เพื่อให้แรงยกมีทิศทางติดลบ เรียกว่าแรงกด (Down Force) เพื่อช่วยให้รถติดถนน ซึ่งทำให้ความเร็วในการเข้าโค้งเพิ่มมากขึ้นตามแรงกดที่สร้างได้ และมีจุดประสงค์ให้แรงต้านมีค่าน้อยเพื่อเพิ่มความเร็วสูงสุดของรถ

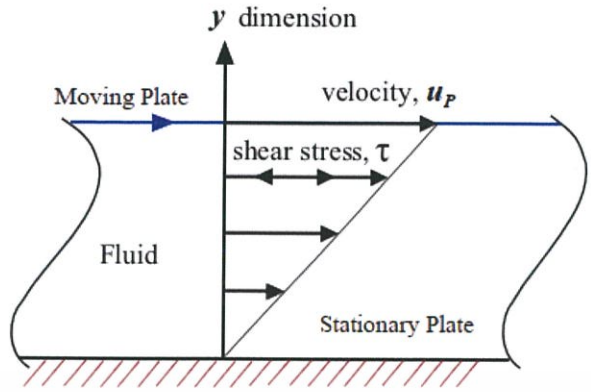
2.1 คุณสมบัติของของไหล

ของไหลคือสารที่มีการเรียงตัวของโมเลกุลที่ห่างกัน ทำให้รูปร่างเปลี่ยนไปตามภาชนะที่บรรจุ การเสียรูปของของไหลเกิดจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละอนุภาคของไหลที่อยู่ติดกัน สมบัติของของไหลมีจำนวนมาก ในที่นี้กล่าวถึงเฉพาะสมบัติที่สำคัญได้แก่

2.1.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดคือสมบัติของของไหลที่แสดงถึงการต้านการไหลในแนวเฉือน อันมาจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของชั้นของของไหลที่อยู่ติดกัน โดยการต้านนี้สามารถถูกแสดงในรูปของความเค้นเฉือนและแรงเฉือน เมื่อพิจารณาของไหลนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) ตามการทดลองการไหลผ่านแผ่นกว้างอนันต์สองแผ่นโดยมีแผ่นหนึ่งหยุดนิ่งและอีกแผ่นเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูป 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การไหลภายแบบนิวโตเนียน ในการทดลองแผ่นเลื่อน

จากรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าของไหลในระดับชั้นที่ติดกับแผ่นเรียบทั้งสองมีความเร็วที่เท่ากับความเร็วของแผ่นเรียบนั้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าการไหลแบบไม่มีการลื่นไถล(No-slip Condition) ซึ่งเกิดขึ้นจากสมบัติความหนืดของของไหลนั่นเอง นอกจากนั้นความเค้นเฉือนสามารถถูกแสดงดังสมการดังนี้

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \qquad (2.1)$$

เมื่อ μ คือความหนืดของของไหล

u คือความเร็วในแนวการไหล

y คือความระยะตั้งฉากกับแผ่นเรียบ

τ คือความเค้นเฉือนที่เกิดภายในแต่ละชั้นของของไหล

2.1.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นสมบัตรที่แสดงถึงการอัดตัวของของไหล มักใช้สัญลักษณ์ ρ นิยามคืออัตราส่วนระหว่างมวลและปริมาตรของของไหล ตามสมการที่ 2.2

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาของไหลเป็นอากาศอุดมคติ ความหนาแน่นแปรผกผันกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2.3

$$\rho = \frac{p}{RT} \tag{2.3}$$

เมื่อ m คือมวลของของไหล

V คือปริมาตรของของไหล

p คือความดัน

R คือค่าคงที่ของก๊าซ

T คืออุณหภูมิ

ความสามารถในการอัดตัว (Compressibility) เมื่อของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ความหนาแน่นของไหลมีค่าไม่คงที่เรียกว่า การไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow) และในทางกลับกันเมื่อของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ความหนาแน่นของไหลมีค่าคงที่เรียกว่า การไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) การเทียบความเร็วมักเทียบจากเลขมัค โดยมีค่าวิกฤตที่เลขัคเท่ากับ 0.3

2.1.3 ความเฉื่อย (Inertia)

ความเฉื่อย (Inertia) คือสมบัติการต้านการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของวัตถุใด ๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ การต้านการเปลี่ยนแปลงนี้คือทั้งขนาดความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยวัตถุใด ๆ ที่กำลังเคลื่อนที่มีแนวโน้มที่จะรักษาสภาพเดิมของการเคลื่อนที่เอาไว้ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 1 และ 2 ของนิวตัน

ในงานวิจัยนี้ความเฉื่อยที่พิจารณาคือความเฉื่อยของแต่ละอนุภาคของไหลซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหลโดยรวมอย่างมาก ทั้งยังเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow Regime) หรือการไหลมีความเป็นระเบียบ (Laminar Flow Regime) โดยสมการที่อธิบายคุณสมบัติความเฉื่อยความคือสมการการเคลื่อนที่ซึ่งถูกอธิบายในหัวข้อย่อยถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมการควบคุม (Governing Equation)

การไหลของของไหลเป็นไปตามกฎพื้นฐานในธรรมชาติ 4 ข้อ

1. กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)
2. กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum)
3. กฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)
4. สมการความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด (Constitutive Relation)

เนื่องจากการไหลที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ อีกทั้งยังเป็นการไหลในสภาวะอุณหภูมิคงที่ กฎการอนุรักษ์พลังงานจึงไม่ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้

2.2.1 กฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

กฎการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง อธิบายว่าผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลเข้าสู่ระบบใด ๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลที่ออกจากระบบนั้น รวมกับอัตราการกักเก็บมวลภายในระบบ คำอธิบายดังกล่าวสามารถเขียนในรูปเชิงอนุพันธ์ได้ว่า

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \qquad (2.4)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของของไหล

t คือเวลา

$\vec{u}$ คือเวกเตอร์ความเร็ว

ในสมการที่ 2.4 พจน์อนุพันธ์ย่อยเทียบกับเวลาแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในระบบ ขณะที่พจน์ไดเวอร์เจนต์แสดงถึงอัตราการไหลสุทธิของมวลออกจากระบบ และหากพิจารณาสมการ 2.4 เมื่อการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ได้สมการ

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \qquad (2.5)$$

สมการที่ 2.5 มีความหมายทางกายภาพคือ ผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลเข้าสู่ระบบใด ๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลเชิงมวลที่ออกจากระบบนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum)

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม แท้จริงแล้วก็คือก็คือกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law of Motion) ซึ่งกล่าวว่า "อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคของไหลนั้น" ดังสมการ

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum \vec{F} \tag{2.6}$$

เมื่อ $\vec{P}$ คือเวกเตอร์โมเมนตัม

t คือเวลา

$\vec{F}$ คือแรงที่กระทำบนอนุภาคของไหล

สมการที่ 2.6 พจน์อนุพันธ์ของโมเมนตัมของของไหล สามารถถูกพิจารณาโดยใช้การอ้างอิงแบบออยเลอร์ (Eulerian Reference Frame) และการอ้างอิงแบบลากรางค์ (Lagrangian Reference Frame) ตามลำดับ ได้เป็น

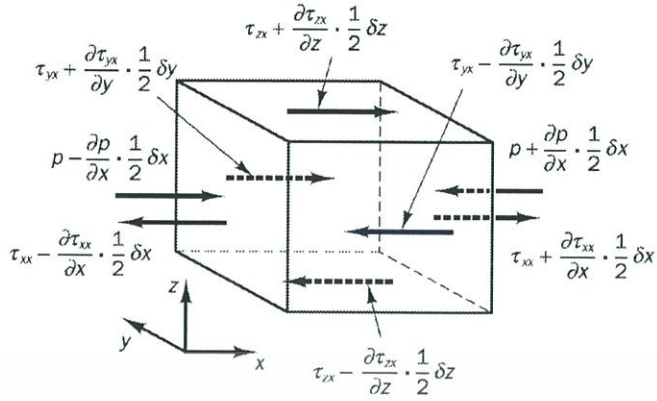
$$\frac{d\vec{P}}{dt} = m\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right) = m\frac{D\vec{u}}{Dt} \tag{2.7}$$

ส่วนพจน์ขวาในสมการที่ 2.6 คือผลรวมของแรงที่กระทำบนอนุภาคของไหล ซึ่งแยกได้ 2 ประเภทคือ

1. แรงที่กระทำบนผิว (Surface Forces) เช่น แรงหนืด (Viscous Force) แรงดัน (Pressure Force)
2. แรงที่กระทำบนตัว (Body Forces) เช่น แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

ทำการวิเคราะห์โดยเขียนแผนภาพวัตถุอิสระของอนุภาคของไหล โดยในที่นี้มักพิจารณาเฉพาะแรงที่กระทำบนผิวก่อนแล้วจึงพิจารณาแรงที่กระทำบนตัวในภายหลัง และใช้การเขียนแผนภาพความเค้นในการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแผนภาพแสดงความเค้นในแนวแกน x ที่กระทำกับอนุภาคของไหล [16]

หลังจากทำการวิเคราะห์ความเค้นในแต่ละทิศทางแล้ว ทำการแทนสมการที่ 2.7 เข้าไปในสมการที่ 2.6 พร้อมทั้งจัดให้อยู่ในรูปต่อหนึ่งหนึ่งหน่วยปริมาตร ได้สมการอนุรักษ์โมเมนตัม 3 สมการ ซึ่งแสดงถึงการไหลใน 3 ทิศทาง สามารถนำมาเขียนในรูปสมการเวกเตอร์ 1 สมการ ได้ดังนี้

$$\rho\left(\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}+\vec{u}\cdot\nabla\vec{u}\right)=-\nabla p+\rho\vec{g}+\nabla\cdot\vec{\vec{\tau}} \qquad (2.8)$$

เมื่อ g คือสนามเวกเตอร์ความเร่งโน้มถ่วง

τ คือความเค้น

ในสมการที่ 2.8 พจน์ขวาสุดคือไดเวอร์เจนต์ของความเค้นซึ่งเป็นปริมาณเทนเซอร์ (Tensor) อันดับ 2 ที่แทนด้วยขนาด 3×3 ซึ่งเกิดจากสมบัติความหนืดของของไหล เมื่อปริมาณนี้ถูกกระทำด้วยไดเวอร์เจนต์ทำให้เปลี่ยนเป็นปริมาณเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สมการความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด (Constitutive Relation)

สมการความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด เมื่อพิจารณาของไหลนิวโตเนียนสมการที่แสดงความเค้นเฉือนก็คือสมการที่ 2.1 ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.1 นั่นเอง

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2.1}$$

นอกจากความเค้นเฉือนแล้ว ความเค้นอีกลักษณะหนึ่งที่เกิดขึ้นบนของไหลคือความเค้นตั้งฉากซึ่งถูกแสดงในสมการดังนี้

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \tag{2.9a}$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \tag{2.9b}$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \tag{2.9c}$$

ในสมการที่ 2.9 ทั้ง 3 สมการ พจน์ซ้ายของสมการเรียกว่าความหนืดแรก (First Viscosity) ขณะที่พจน์ขวาของสมการเรียกว่าความหนืดที่สอง (Second Viscosity) เป็นหัวข้อที่ยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติมอยู่มากเนื่องจากค่า λ มักมีค่าน้อยจึงทำการศึกษาได้ยาก เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ทำให้ $\nabla \cdot \vec{u} = 0$ พจน์ความหนืดที่สองจึงเป็นศูนย์ไปโดยปริยาย

เมื่อเราแทนค่าสมการความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด หรือสมการที่ 2.1 2.9a-c ลงในพจน์ไดเวอร์เจนต์ของความเค้นของกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม หรือสมการ 2.7 ได้สมการเวกเตอร์ดังนี้

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \tag{2.10}$$

สมการที่ 2.10 นี้เป็นรูปหนึ่งของสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes Equations) ภายใต้สมมติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตเนียน การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ ความหนืดและความหนาแน่นมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 สภาพความคล้ายและการวิเคราะห์เชิงมิติ (Similarity and Dimensional Analysis)

ถึงแม้ว่ามีสมการควบคุมสำหรับอธิบายการไหลของของไหลที่เป็นนิวโตเนียนแต่เนื่องจากความซับซ้อนของสมการทำให้การหาคำตอบเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ การทำการทดลองจึงยังคงเป็นวิธีการศึกษาที่สำคัญ ในการทำการทดลองทางอากาศพลศาสตร์ สำหรับการศึกษาสิ่งที่มีขนาดใหญ่มักทำการทดสอบในชิ้นงานที่ถูกลดขนาดลงมา เช่น การศึกษารูปแบบปีกเครื่องบิน การลดขนาดนี้อยู่บนพื้นฐานของสภาพความคล้าย 3 รูปแบบ คือ

1. ความคล้ายทางเรขาคณิต คือ อัตราส่วนของขนาดความยาวในแต่ละด้านมีค่าเท่ากับอัตราส่วนในของจริง ดังตัวอย่างในรูป 2.3
2. ความคล้ายทางจลศาสตร์ คือ การไหลของอากาศในชิ้นทดสอบเป็นแบบเดียวกับการไหลในของจริง
3. ความคล้ายทางพลวัต คือ อัตราส่วนแรงกระทำของชิ้นทดสอบมีค่าเท่ากับอัตราส่วนแรงกระทำในของจริง

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างชิ้นทดสอบรถสูตรซึ่งมีความคล้ายทางเรขาคณิต

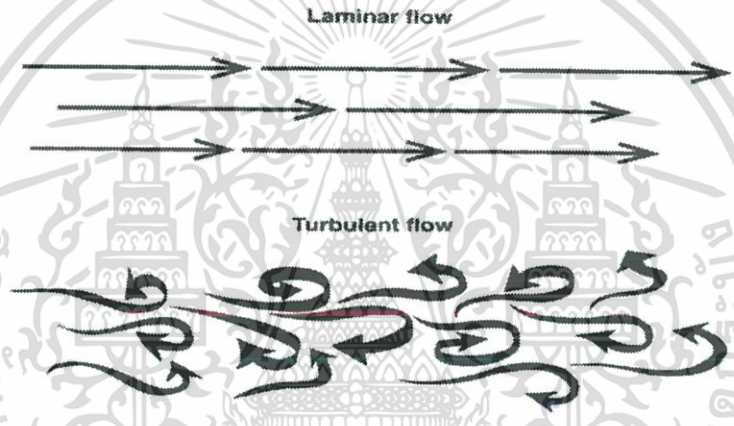
การวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional Analysis) เป็นเครื่องมือในการศึกษาผลการทดลองของชิ้นทดสอบเทียบกับของจริง การวิเคราะห์ดังกล่าวใช้หลักการที่เรียกว่า ทฤษฎีบทบัคกิงแฮมไพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Buckingham π Theorem) ทำให้ทราบอัตราส่วนการเปลี่ยนขนาดและความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อกันและกันในการไหลของของไหล ซึ่งนำเสนอในรูปตัวแปรไร้มิติดังแสดงต่อไปนี้

2.3.1 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

เลขเรย์โนลด์เป็นตัวแปรไร้มิติที่สำคัญที่สุดตัวหนึ่งในการไหลของของไหล เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการไหลทุกรูปแบบ เลขเรย์โนลด์แสดงถึงอัตราส่วนของแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดที่เกิดขึ้นในการไหล เมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงถึงระดับหนึ่งการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow regime) และในทางกลับกันเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวมีค่าต่ำถึงระดับหนึ่งการไหลมีความเป็นระเบียบ (Laminar flow regime) ดังแสดงในภาพ 2.4



รูปที่ 2.4 ความแตกต่างของการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและการไหลมีความเป็นระเบียบ [17]

สมการทั่วไปของเลขเรย์โนลด์คือสมการ 2.11

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U L_c}{\mu} \qquad (2.11)$$

เมื่อ U คือขนาดความเร็วที่จุดห่างใกล (Free stream velocity)

L_c คือความยาวเฉพาะ (Characteristic length) ผู้ทดลองกำหนดแยกกันตามแต่ละกรณี

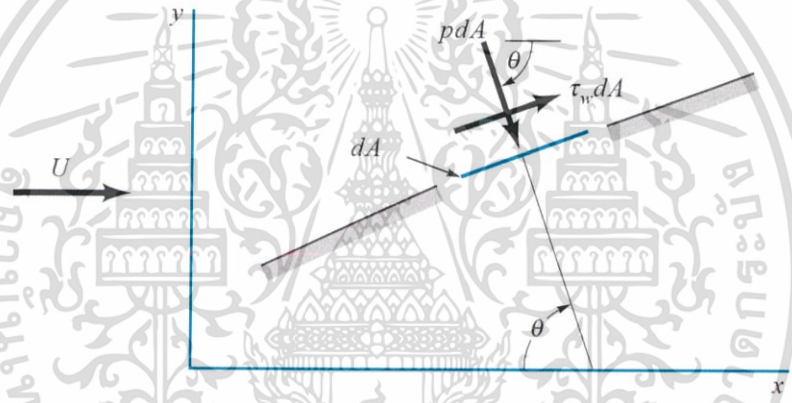
ในการไหลแต่ละรูปแบบ เลขเรย์โนลด์ที่การไหลเปลี่ยนจากไหลอย่างเป็นระเบียบเป็นแบบปั่นป่วนมีค่าต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความยาวเฉพาะที่ผู้ทดลองกำหนด และยังขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหล เช่น การไหลภายในท่อมักใช้เส้นผ่านศูนย์กลางเป็นความยาวเฉพาะและมีเลขเรย์โนลด์ประมาณ 2100 เป็นจุดเปลี่ยน

2.3.2 สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Coefficient of Lift and Coefficient of Drag)

เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของไหล ทำให้เกิดการกระจายความดันและความเค้นเฉือนที่ไม่สมดุลบนพื้นผิววัตถุนั้น ความไม่สมดุลดังกล่าวทำให้เกิดแรงกระทำในแนวดิ่งและแนวราบเรียกว่าแรงยกและแรงต้านตามลำดับ เราสามารถหาขนาดของแรงทั้งสองได้ โดยแบ่งพิจารณาแรงกระทำที่เกิดบนพื้นที่ผิวขนาดเล็ก



รูปที่ 2.5 แรงกระทำอันเกิดจากความดันและความเค้นบนพื้นที่ที่ถูกแบ่งขนาดเล็ก [18]

ได้สมการของแรงยกและแรงกดดังสมการที่ 2.12a และ 2.12b

$$\text{Lift Force} = \int_A dF_L = \int_A (-P\sin\theta + \tau_w \cos\theta)dA \qquad (2.12a)$$

$$\text{Drag Force} = \int_A dF_D = \int_A (P\cos\theta + \tau_w \sin\theta)dA \qquad (2.12b)$$

เมื่อ F_L คือขนาดแรงกระทำในแนวดิ่งหรือแรงยก

F_D คือขนาดแรงกระทำในแนวราบหรือแรงต้าน

A คือพื้นที่ผิวที่พิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปในการศึกษาที่ต้องการเปรียบเทียบแรงยกและแรงต้าน เพื่อกำจัดปัจจัยอัตราส่วนขนาดของวัตถุที่กำลังศึกษา เรามักจัดรูปแรงดังกล่าวให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ซึ่งก็คือสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ดังแสดงในสมการ 2.13a และ 2.13b

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_{Front}} \tag{2.13a}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_{Front}} \tag{2.13b}$$

เมื่อ A_{Front} คือพื้นที่ผิวที่ภาพฉายของในทิศด้านหน้าวัตถุ

2.4 Computational Fluid Dynamics

ดังที่ทราบแล้วว่าสมการควบคุมทางอากาศพลศาสตร์มีความซับซ้อนอย่างยิ่ง ในปัจจุบันสามารถหาผลเฉลยของสมการดังกล่าวได้เฉพาะกรณีศึกษาพื้นฐานเพียงไม่กี่กรณีเท่านั้น จึงกล่าวได้ว่าความรู้ทางคณิตศาสตร์ที่มีในปัจจุบันยังไม่เพียงพอ การศึกษาอากาศพลศาสตร์จึงเป็นเรื่องท้าทายอย่างมาก

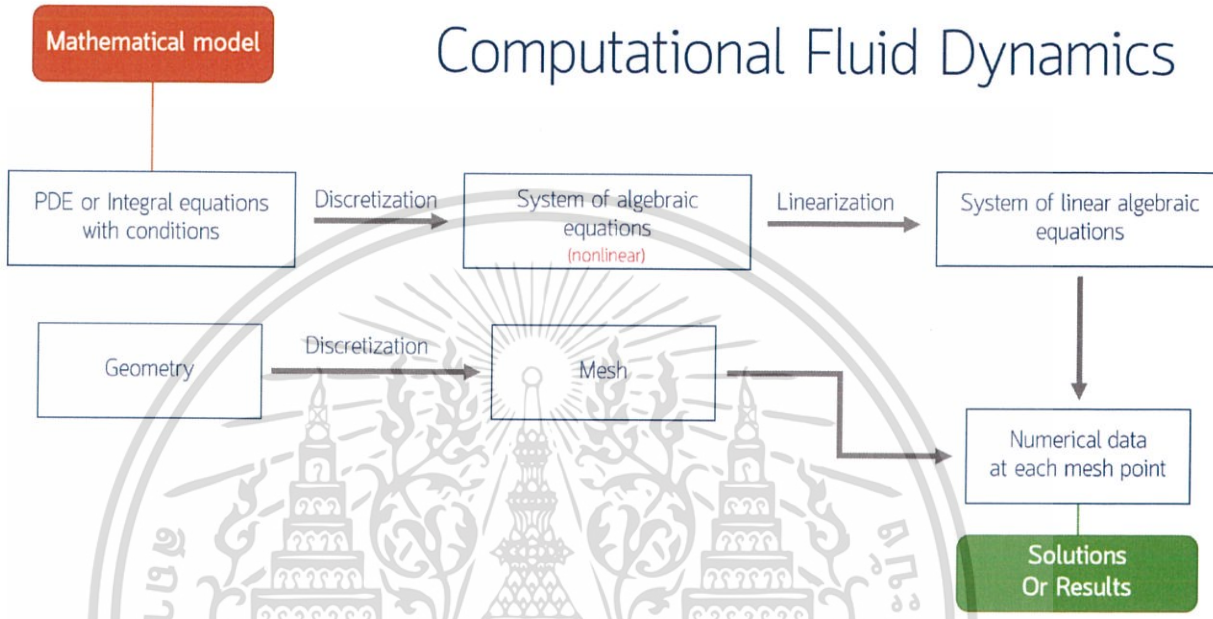
นอกจากการทำการทดลองผ่านชิ้นทดสอบโดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 2.3 แล้ว อีกวิธีหนึ่งที่สำคัญในการศึกษาคือการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข หรือที่เรียกว่า Computational Fluid Dynamics (CFD Simulation) คือการหาคำตอบของสมการควบคุมทางอากาศพลศาสตร์โดยการประมาณค่าเชิงตัวเลข ผลลัพธ์ที่ได้ไม่ใช่คำตอบที่แท้จริงของสถานการณ์การไหลนั้น ๆ แต่เป็นเพียงค่าประมาณซึ่งย่อมมีความคลาดเคลื่อน ปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนมีหลายปัจจัยมักเกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีการคำนวณ ความสมจริงของสมการที่ใช้ และความละเอียดของการคำนวณ

หัวข้อนี้กล่าวถึงขั้นตอนวิธีการเบื้องต้นของ CFD Simulation รวมถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากประเภทของ CFD Simulation ความแตกต่างของแต่ละประเภทและเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทการประยุกต์ใช้ CFD Simulation เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และแนวคิดของ Turbulence model ต่าง ๆ โดยทั้งหมดที่กล่าวในหัวข้อนี้เน้นแนวคิดพื้นฐานเท่านั้น

2.4.1 ขั้นตอนเบื้องต้นของ CFD Simulation



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงขั้นตอนเบื้องต้นของ CFD Simulation

ขั้นตอนเบื้องต้นถูกแสดงเป็นแผนผังในรูป 2.6 โดยขั้นตอนการทำ CFD Simulation ในเบื้องต้นคือ

1. Discretization Process

ประกอบด้วย 2 อย่างคือ

1. การแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็น Element ย่อย ๆ หรืออาจเรียกว่า Grid หรือ Mesh
2. การแบ่งสมการควบคุมให้เป็นระบบสมการที่เหมาะสมเพื่อใช้คำนวณใน Element ย่อยนั้น ๆ

2. Linearization Process

คือการเปลี่ยนระบบสมการควบคุมที่ถูกแบ่งให้เป็นระบบสมการพีชคณิตเชิงเส้น เพื่อทำการหาผลลัพธ์เชิงตัวเลขในขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Calculation Process

คือขั้นตอนการหาผลลัพธ์ของระบบสมการพีชคณิต เพื่อระบุค่าตัวแปรการไหลที่สนใจในแต่ละ Element ของ Mesh โดยใช้การหาผลลัพธ์ด้วยวิธีประมาณค่า เช่น วิธี Jacobi

4. Post Processing

คือกระบวนการแสดงผลลัพธ์หลังจากที่ทำการคำนวณแล้ว ค่าตัวแปรการไหลที่สนใจบางตัวนำมาคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปรการไหลที่สนใจตัวอื่น ๆ ได้ เช่น ใช้ค่าความเร็วแล้วย้อนกลับมาคำนวณความเค้น ใช้ค่าความดันและความเค้นในการหาแรงรวมที่กระทำบนพื้นผิว เป็นต้น

เห็นได้ว่าเกือบทุกขั้นตอนของการทำ CFD Simulation ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน คือ

1. **Discretization Process** ทำให้เกิด Discretization Error คือความคลาดเคลื่อนจากความไม่ต่อเนื่อง
2. **Linearization Process** ทำให้เกิด Linearization Error คือความคลาดเคลื่อนจากการการ Simplify
3. **Calculation Process** ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากวิธีแก้สมการ เช่น การใช้วิธี Jacobi หรือ Gauss-Seidel
4. **Post Processing** สามารถทำให้เกิดการถ่ายทอดความความคลาดเคลื่อน ถ้ามีการนำตัวแปรการไหลไปคำนวณตัวแปรการไหลอื่นต่อไป

ที่กล่าวมาข้างต้นคือความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลข ในความเป็นจริงยังมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวสมการควบคุมที่นำมาใช้ เนื่องจากสมการเหล่านี้ล้วนตั้งอยู่บนสมมติฐานต่าง ๆ ซึ่งก็ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ประเภทของ CFD Simulation

ในเบื้องต้น CFD Simulation แบ่งประเภทโดยใช้วิธีคำนวณหลักเป็นเกณฑ์ ได้ดังนี้

1. Finite Difference Method (FDM)

   ใช้สมการควบคุมแบบ Differential form และมักใช้ Forward Euler scheme, Backward Euler scheme หรือ Central Difference scheme ในการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์เป็นสมการพีชคณิต แล้วจึงทำการแก้สมการเพื่อระบุค่าที่ Grid Point ต่าง ๆ

2. Finite Element Method (FEM)

   เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในงานเกี่ยวกับความเค้นและความเครียดของโครงสร้างของแข็ง และยังสามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานอากาศพลศาสตร์ ใช้หลักการ Linear Interpolation ในการสร้างผลลัพธ์เบื้องต้นก่อน แล้วจึงใช้ Galerkin Method เพื่อหาค่าที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของแต่ละ Grid Point

3. Finite Volume Method (FVM)

   ใช้สมการควบคุมแบบ Integral form และทำการคำนวณกฎอนุรักษ์ผ่านแต่ละ Element หลังจากสร้าง Mesh วิธีที่เรียบง่ายวิธีหนึ่งคือการระบุตัวแปรต่าง ๆ ที่กึ่งกลาง Element แล้วจึงใช้ Interpolation ในการระบุตัวแปรการไหลที่ขอบเพื่อการคำนวณต่อ ๆ ไป

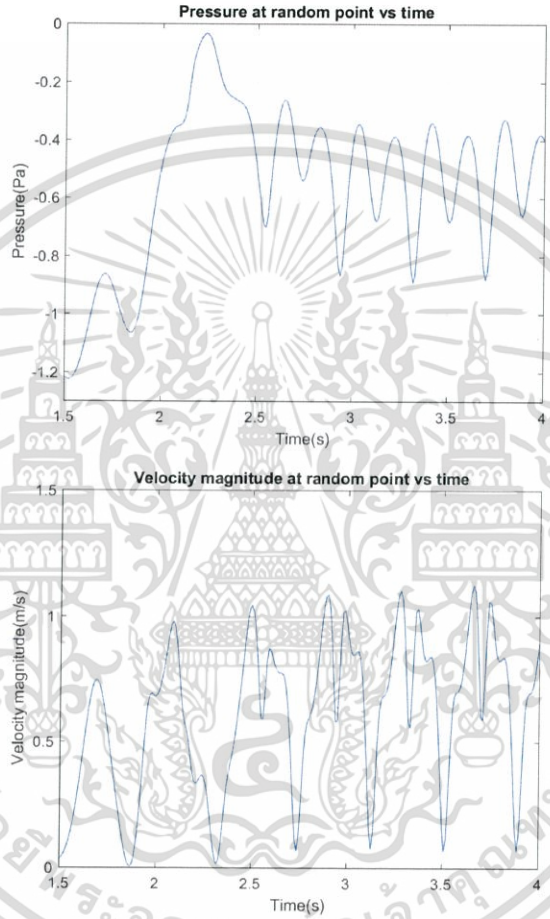
นอกจากนี้ หากใช้วิธีการ Model เป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งประเภทได้ดังนี้

1. Direct Numerical Simulation (DNS)
2. Large Eddy Simulation (LES)
3. Reynolds Average Navier–Stokes Equations (RANS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 CFD Simulation ในการไหลแบบปั่นป่วน

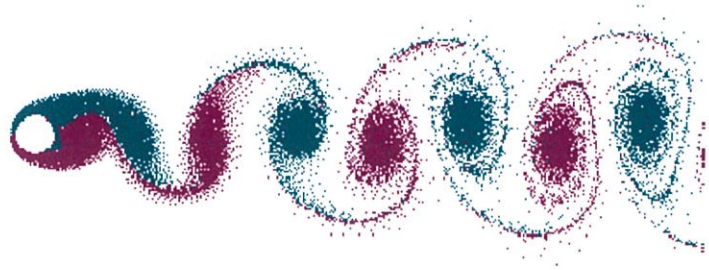
ด้วยขั้นตอนที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.4.1 CFD Simulation สามารถหาผลลัพธ์ของการไหลได้ทุกรูปแบบ แต่ปัญหาที่ตามมาคือ เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (การไหลในชีวิตประจำวันมักเป็นแบบปั่นป่วน) ตัวแปรการไหลต่าง ๆ มักมีค่าแกว่งไปมา (Fluctuation) ดังตัวอย่างในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 การแกว่งของตัวแปรการไหลเมื่อไหลแบบปั่นป่วน จากกรณีศึกษาอากาศไหลผ่านทรงกระบอก

การแกว่งไปมาของค่าตัวแปรการไหลเกิดจากความปันป่วนและการไหลวน (Eddy หรือ Vorticity) ที่เกิดขึ้นดังตัวอย่างที่แสดงในภาพ 2.8 ซึ่งลักษณะการหมุนวนไปมาเหล่านี้ถูกใช้เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการระบุว่าการไหลเป็นแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



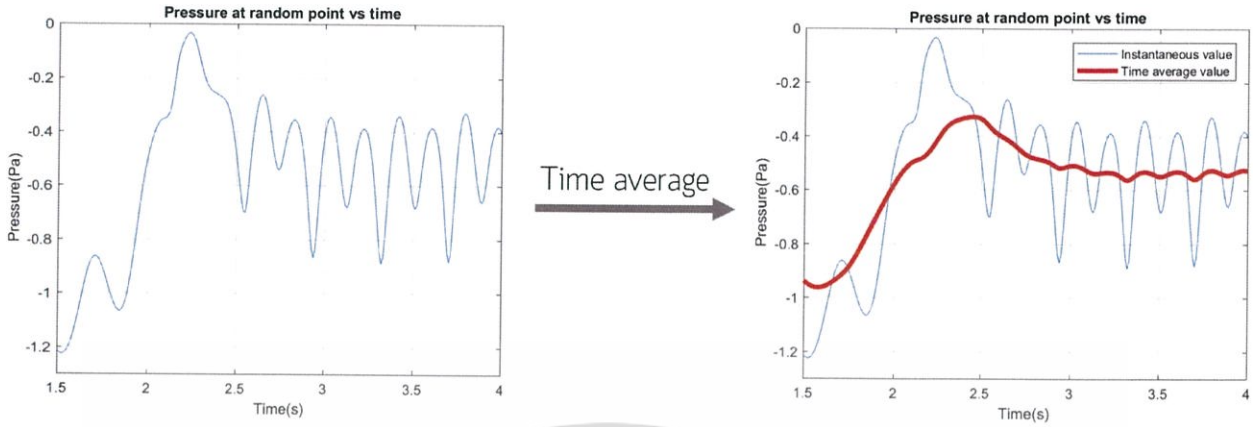
รูปที่ 2.8 Kármán Vortex Street ตัวอย่างลักษณะหนึ่งของการไหลวน เมื่อไหลผ่านวัตถุ

การแกว่งของตัวแปรเหล่านี้ทำให้การคำนวณใช้ทรัพยากรณ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก มีการคาดการณ์ว่าทรัพยากรณ์ที่เพิ่มขึ้นมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนของ Mesh point จำนวนของ Time step และยังแปรผันตรงกับ เลขเรย์โนลด์ยกกำลัง 3 [19]

หากยังคงดันทุรังทำ CFD Simulation ในการไหลแบบปั่นป่วนต่อไปโดยใช้ขั้นตอนเดิม เราเรียกว่า Direct Numerical Simulation (DNS) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ Mesh ที่มีความละเอียดสูงมาก เพื่อให้การคำนวณครอบครุมการไหลวนซึ่งอาจมีขนาดเล็กมากๆ DNS เป็นการคำนวณที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือสูงสุด เนื่องจากไม่ได้มีการดัดแปลงใด ๆ ในสมการควบคุม บางครั้งถือว่าความน่าเชื่อถือสูงกว่าการทำการทดลอง เนื่องจากบางครั้งการทำการทดลองมีขั้นตอนที่ไม่สามารถตั้งค่าได้สมบูรณ์แบบ หรือบางครั้งเทคโนโลยีการวัดค่าบางอย่างยังคงมีข้อจำกัด อย่างไรก็ตาม DNS ใช้ทรัพยากรณ์การคำนวณมากเกินความเหมาะสม และในกรณีศึกษาที่การไหลมีความซับซ้อน ข้อจำกัดด้านทรัพยากรณ์มักทำให้ DNS ไม่สามารถใช้ได้ในทางปฏิบัติ

เพื่อกำจัดความยุ่งยากที่เกิดจากการแกว่งไปมาของตัวแปรการไหลต่าง ๆ เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน แนวคิดหนึ่งที่สำคัญคือการพิจารณาค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลาของตัวแปรต่าง ๆ แทนการพิจารณาตัวแปรตรง ๆ เรียกวิธีนี้ว่า Reynolds Average Navier–Stokes Equations (RANS) โดยมีตัวอย่างดังแสดงในภาพ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แนวคิดการพิจารณาค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลาของตัวแปรต่างๆ เพื่อลดการแกว่งไปมาของค่าตัวแปร

การพิจารณาค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลาของตัวแปรการไหลต่าง ๆ มีสมการดังนี้

$$B = \overline{B} + B' \tag{2.14}$$

เมื่อ B คือตัวแปรการไหลใด ๆ ที่สนใจ

$\overline{B}$ คือค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลาของตัวแปรที่สนใจ

B' คือค่าการแกว่งของตัวแปรที่สนใจ

สมการที่ 2.14 มีชื่อเรียกว่า Reynolds Decomposition คือการแยกส่วนตัวแปรการไหลใด ๆ ที่สนใจ ให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยตามช่วงเวลา และค่าที่ขาดเกินจากค่าเฉลี่ยเรียกว่าการแกว่ง

ทำการแทนแยกส่วนตัวแปรการไหลต่าง ๆ เพื่อจัดรูปสมการ Navier–Stokes Equations ให้อยู่ในรูป Reynolds Average Navier–Stokes Equations และเพื่อความสะดวกจึงเปลี่ยนมาใช้ Einstein notation ในการเขียนสมการเวกเตอร์ เพื่อพิจารณาสมการในทุกทิศทางพร้อมกัน โดยเบื้องต้น Reynolds Decomposition กับตัวแปรการไหลที่สนใจทุกตัวในสมการ

$$u = \overline{u} + u' \tag{2.15a}$$
$$v = \overline{v} + v' \tag{2.15b}$$
$$w = \overline{w} + w' \tag{2.15c}$$
$$p = \overline{p} + p' \tag{2.15d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.15a 2.15b และ 2.15c สามารถเขียนในรูป Einstein notation ได้เป็น

$$u_i = \overline{u}_i + u_i' \tag{2.16}$$

หลังจากนั้นพิจารณา Navier–Stokes Equations ที่อยู่ในรูป Einstein notation

$$\rho\left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}\right) \tag{2.17}$$

แทนสมการ 2.16 และ 2.13a-d ลงในสมการ 2.17 จากนั้นทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยทั้งสองด้านของสมการ แล้วใช้สมบัติ $\overline{\overline{u}_i} = \overline{u}_i$ และ $\overline{u_i'} = 0$ ทำให้พจน์การแกว่งหักล้างไปบางส่วนดังสมการ

$$\rho\left[\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_i\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}\right] = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \rho\overline{u_i}'\overline{u}_j'\right) \tag{2.18}$$

จากสมการที่ 2.18 พจน์ขวาสุดมักถูกองเป็นความเค้นเพิ่มเติมที่เกิดจากการแกว่งของค่าตัวแปร การไหลวน และความปั่นป่วน เรียกว่า Reynolds Stress หากพิจารณาจำนวนตัวแปร พบว่าตัวแปรมีจำนวนมากขึ้นจากการทำ Reynolds Decomposition จึงต้องการสมการเพิ่มเติมมาให้สัมพันธ์กับจำนวนตัวแปรที่เพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปเพื่อความสะดวก พจน์ Reynolds Stress มักถูกสมมติให้มีค่าแปรผันตรงกับความเค้นที่เกิดจากความเร็วเฉลี่ย เพื่อให้พจน์ขวาสามารถดึงตัวร่วมได้ ดังนี้

$$\mu\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} - \rho\overline{u_i}'\overline{u}_j' = (\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}\right) \tag{2.19}$$

เมื่อแทนค่าการดึงตัวร่วมตามสมการ 2.19 ได้

$$\rho\left[\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_i\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}\right] = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + (\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial^2 \overline{u}_i}{\partial x_i \partial x_j}\right) \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ 2.20 และ 2.19 ตัวแปร μ_t เพิ่มเติมถูกตั้งขึ้นเพื่อเป็นค่าคงที่การแปรผันตรงของสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อดึงตัวร่วม Reynolds Stress ค่าคงที่นี้มักถูกมองเป็นอีกชนิดนึ่งของความหนืด เรียกว่า Turbulence viscosity

ข้อสังเกตุสำคัญคือ Turbulence viscosity ไม่ใช่ตัวแปรการไหลที่มาจากหลักการทางวิทยาศาสตร์หรือสมบัติใด ๆ ของของไหล หากแต่เป็นตัวแปรที่ถูกตั้งขึ้นเพียงเพื่อความสะดวกในการแก้สมการ การระบุค่า Turbulence viscosity จึงต้องอาศัยสมการเพิ่มเติม ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานแบบต่าง ๆ เรียกว่า Turbulence model ซึ่งมีให้เลือกใช้อย่างหลากหลาย เช่น Mixing Length Model, Model, Baldwin Lomax Model, SST k-omega Model, Spalart - Allmaras Model ทุก Model มีจุดร่วมคือถูกสร้างมาเพื่อหาค่า Turbulence viscosity ในที่นี้กล่าวถึง Model ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ SST k-omega Model เท่านั้น

SST k-omega Model เป็น Model ที่เกิดจากการนำข้อดีของ 2 Model ที่ได้รับความนิยมมารวมกันคือ K-epsilon Model และ K-omega Model ทั้งสองแบบจำลองถูกพัฒนาจากสมมติฐานข้อเดียวกันคือความปั่นป่วนของการไหลขึ้นอยู่กับพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนและอัตราการสลายไปของพลังงานจลน์นั้น ตารางต่อไปนี้แสดงข้อมูลสำคัญโดยสรุปของทั้งสอง Model

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางข้อมูลเปรียบเทียบ K-omega Model กับ K-epsilon Model

	K-omega Model	K-epsilon Model
สมการ Turbulence viscosity	$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$	$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$
จำนวนตัวแปรเสริม	2 (k , ω)	2 (k , ε)
ข้อดี	มีความสามารถในการจำลองและคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนโดยจำลองการไหลวนรูปแบบและขนาดต่าง ๆ ได้แม่นยำมาก	ผลลัพธ์ไม่ sensitive กับค่าเริ่มต้นและค่าที่ขอบของ k และ ε ซึ่งค่าทั้งสองเป็นเพียงปริมาณที่สมมติขึ้น การไม่ sensitive ทำให้ผลลัพธ์มีความคงเส้นคงวา
ข้อเสีย	ผลลัพธ์ sensitive กับค่าเริ่มต้นและค่าที่ขอบของ k และ ω ซึ่งค่าทั้งสองเป็นปริมาณที่สมมติขึ้น ไม่ใช่สมบัติหรือตัวแปรที่มีอยู่จริง ทำให้ยากต่อการหาค่าเริ่มต้น	ความสามารถในการจำลองและคำนวณไม่สูงเท่า K-omega Model ทำให้ความคลาดเคลื่อนสูง

Model ทั้งสองถูพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง กระทั่งปี 1994 F. R. Menter [20] เสนอวิธีรวมข้อได้เปรียบของทั้งสอง Model เข้าร่วมกันโดยใช้ K-epsilon Model ในบริเวณใกล้เงื่อนไขที่ขอบเพื่อใช้ประโยชน์จากข้อดีของ K-epsilon Model และค่อย ๆ ปรับรูปสมการมาเป็น K-omega Model ในช่วงการคำนวณที่ห่างออกไปจากขอบ เพื่อใช้ประโยชน์จากข้อดีของ K-omega Model ผลที่ได้คือ Model ที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่ sensitive กับค่าเริ่มต้นและค่าที่ขอบและยังคงความแม่นยำได้ในระดับหนึ่ง SST k-omega Model จึงถูกใช้ในงานวิจัยนี้จึง

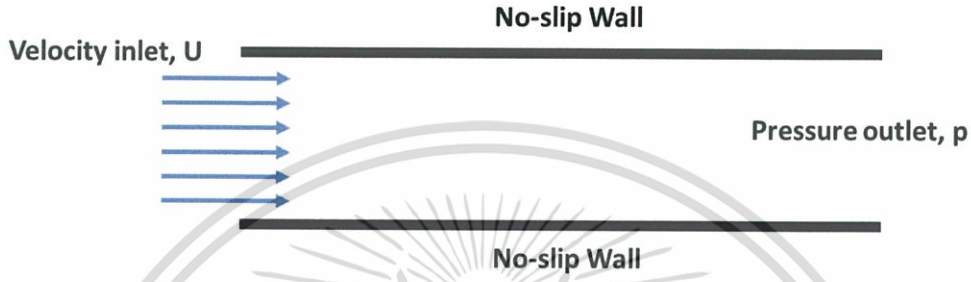
2.5 ซอฟต์แวร์ SimScale

SimScale เป็นซอฟต์แวร์ Computer-Aided Engineering (CAE) ที่เปิดให้นักศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่าย โดยการทำงานทั้งหมดถูกส่งไปคำนวณบนเซิร์ฟเวอร์หลัก ทำให้ผู้ใช้งานเข้าถึงทรัพยากรณ์การคำนวณได้ในจำนวณมากกว่าซอฟต์แวร์อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การทำงานของซอฟต์แวร์ SimScale

ซอฟต์แวร์ SimScale ทำ CFD Simulation ด้วยวิธี Finite Volume Method (FVM) ดังนั้น หัวข้อนี้กล่าวถึงตัวอย่างการทำงานของ Finite Volume Method (FVM) สำหรับกรณีศึกษาเบื้องต้น ใน 2 มิติ โดยพิจารณาการไหลของของไหลดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 กรณีศึกษาของไหลไหลผ่านแผ่นราบ เพื่อทำความเข้าใจ Finite Volume Method

กรณีศึกษานี้ต้องการทำ CFD Simulation ด้วยการ Finite Volume Method (FVM) โดยมีผลลัพธ์ที่ต้องการคือการกระจายความดันและความเร็วภายในช่องระหว่างแผ่นราบ

ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

1. การไหลเป็นแบบมีระเบียบ (Laminar flow)
2. การไหลอยู่ในสภาวะสมดุล (Steady state)
3. การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)

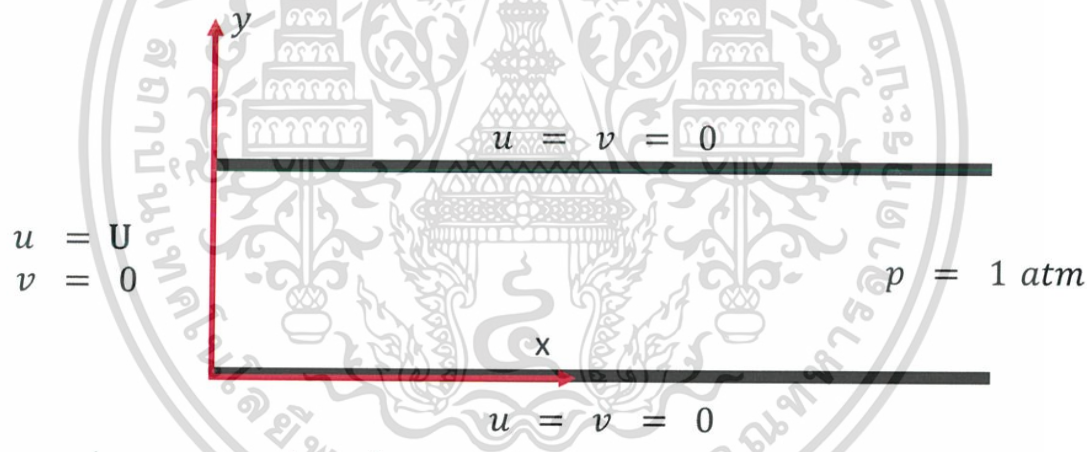
เริ่มต้นโดยพิจารณาสมการควบคุมสำหรับกรณีศึกษาภายใต้สมมติฐานข้างต้น คือสมการ 2.5 และ 2.9 จากหัวข้อที่ผ่านมา นำสมการทั้งมาจัดให้อยู่ในรูปของ Integral form ดังตาราง 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางสมการควบคุมในรูป Differential form และ Integral form ภายใต้สมติฐานข้างต้น

	Differential form	Integral form
Mass Equation	$\nabla \cdot \vec{u} = 0$	$\int_S \vec{u} \cdot \hat{n}\, dS = 0$
Momentum Equation	$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u}$	$\int_S \rho \vec{u} (\vec{u} \cdot \hat{n})\, dS = -\int_S p\, \hat{n}\, dS + \vec{F}_{viscous}$

จากนั้นพิจารณาเงื่อนไขที่ขอบและแกนอ้างอิง เลือกใช้ระบบพิกัดฉากดังรูป 2.11

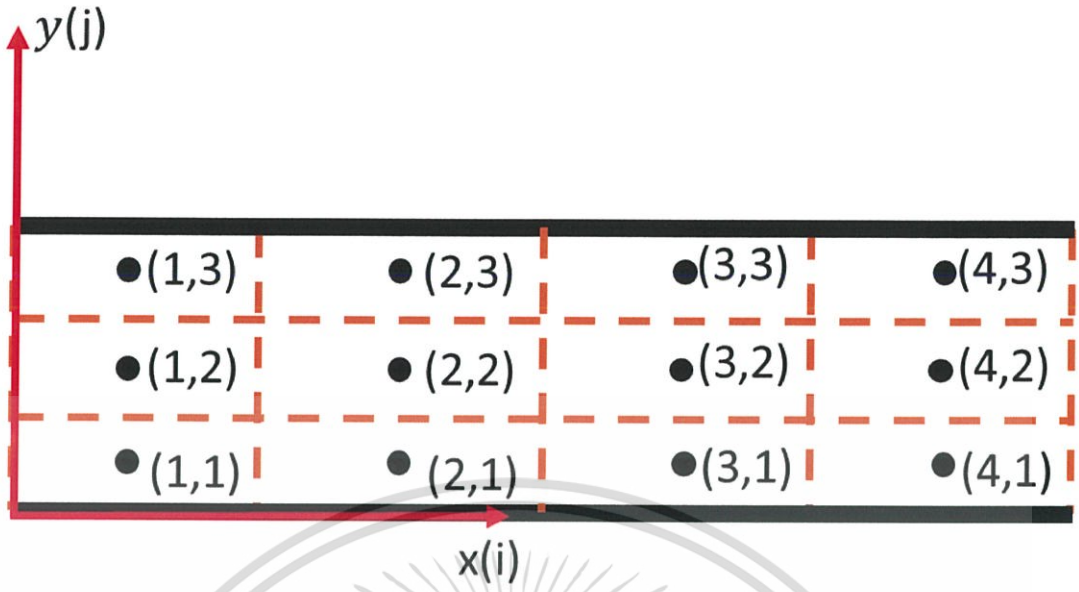


รูปที่ 2.11 รูปแสดงเงื่อนไขที่ขอบและการกำหนดแกนอ้างอิง ในกรณีศึกษาการไหลผ่านแผ่นราบ

$$\vec{u} = u\hat{i} + v\hat{j} \qquad (2.21)$$

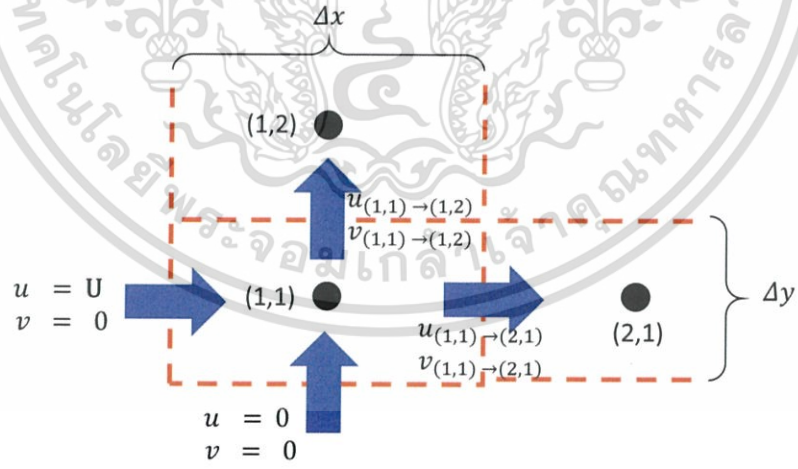
จากนั้นทำกระบวนการ Discretization Process โดยแบ่งโดเมนการคำนวณออกเป็นส่วน ๆ เรียกว่า Element และ Element point ดังรูป 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รูปแสดงการแบ่ง Element และ Element point ของโดเมนการไหล

เริ่มพิจารณาสมการ Mass Equation ก่อนเนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยกว่า เริ่มจาก Element (1,1) ทำการพิจารณาอัตราการไหลที่ผ่านแต่ละด้านที่ติดกับ Element (1,1) คือ Element (1,2) และ Element (2,1) ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการพิจรณาความเร็วระหว่าง Element เพื่อหาการอัตราการไหลที่ผ่าน Element (1,1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประมาณความเร็วที่แต่ละขอบของ ด้วย Linear interpolation

$$u_{(1,1)\to(1,2)} = \frac{u_{(1,1)} + u_{(1,2)}}{2} + Error \quad (2.22a)$$

$$v_{(1,1)\to(1,2)} = \frac{v_{(1,1)} + v_{(1,2)}}{2} + Error \quad (2.22b)$$

$$u_{(1,1)\to(2,1)} = \frac{u_{(1,1)} + u_{(2,1)}}{2} + Error \quad (2.22c)$$

$$v_{(1,1)\to(2,1)} = \frac{v_{(1,1)} + v_{(2,1)}}{2} + Error \quad (2.22d)$$

Error ที่เกิดขึ้นจากการทำ Interpolation เรียกว่า Discretization Error ทำการพิจารณาสมการ Mass Equation สำหรับ Element (1,1) (โดยละเลยค่า Error ที่เกิดขึ้น)

$$\int_S \vec{u} \cdot \hat{n}\, dS = 0$$

$$U(\Delta y) - \left(\frac{u_{(1,1)} + u_{(2,1)}}{2}\right)(\Delta y) + 0(\Delta x) + \left(\frac{v_{(1,1)} + v_{(1,2)}}{2}\right)(\Delta x) = 0 \quad (2.23)$$

เมื่อทำการพิจารณาการเดียวกันนี้สำหรับทุก Element ได้ระบบสมการเชิงเส้น 24 ตัวแปร 12 สมการ ยังไม่สามารถหาคำตอบได้ทันที

ทำพิจารณาต่อไป โดยใช้สมการ Momentum Equation เริ่มจากที่ Element (1,1) โดยใช้รูปที่ 2.13 ในการพิจารณาความเร็ว และหาความดันที่ขอบ Element ด้วยวิธี Linear interpolation เช่นเดิม

$$p_{(1,1)\to(1,2)} = \frac{p_{(1,1)} + p_{(1,2)}}{2} + Error \quad (2.24a)$$

$$p_{(1,1)\to(2,1)} = \frac{p_{(1,1)} + p_{(2,1)}}{2} + Error \quad (2.24b)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา Momentum Equation บนขอบ Element (1,1) ที่ติดกับ Element (2,1) ในแนวแกน x

$$\int_S \rho u_{(1,1)\to(2,1)} \left(u_{(1,1)\to(2,1)} \cdot \hat{i}\right) dS = -\int_S p\hat{i}\, dS + \vec{F}_{viscous} \tag{2.25}$$

พิจารณาพจน์ซ้ายของสมการ ได้

$$\begin{aligned}\int_S \rho u_{(1,1)\to(2,1)} \left(u_{(1,1)\to(2,1)} \cdot \hat{i}\right) dS &= \rho u^2_{(1,1)\to(2,1)} \Delta y \\ &= \rho\left(\frac{u_{(1,1)} + u_{(2,1)}}{2}\right)^2 \Delta y \\ &= \rho\left(\frac{u^2_{(1,1)} + 2u_{(1,1)}u_{(2,1)} + u^2_{(2,1)}}{4}\right)\Delta y \end{aligned} \tag{2.26}$$

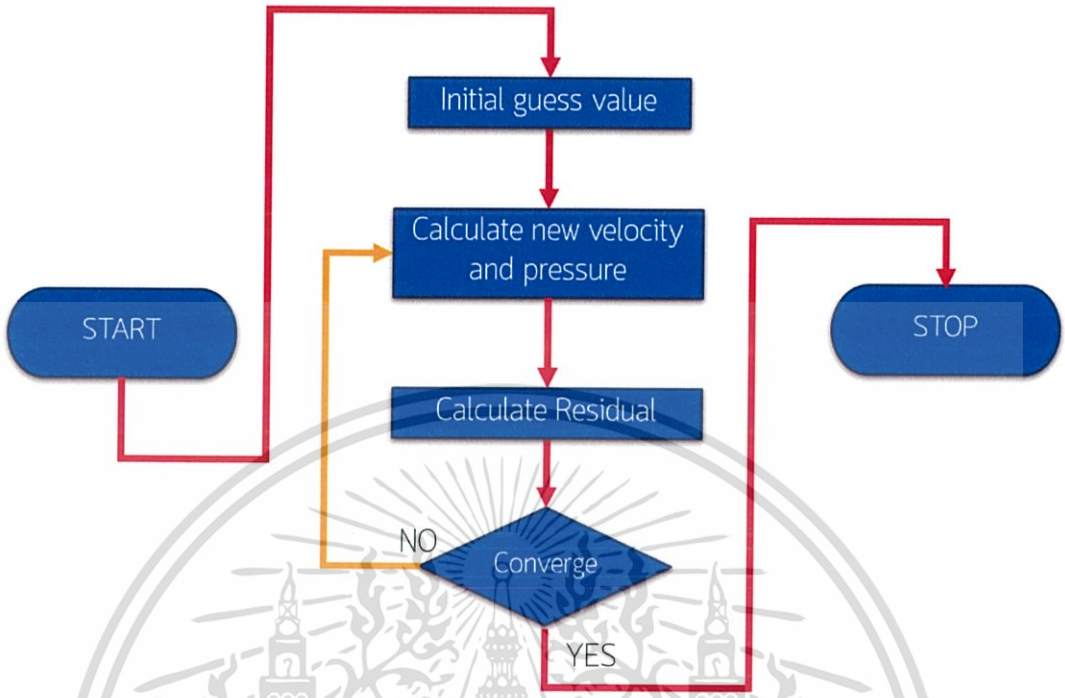
เห็นได้ชัดเจนว่าสมการข้างต้นไม่ใช่สมการเชิงเส้น เนื่องพจน์กำลังสองของตัวแปรไม่ทราบค่า คือความเร็ว $u_{(1,1)}$ และ $u_{(2,1)}$ จึงต้องทำ Linearization Process เพื่อหาผลลัพธ์เชิงตัวเลข โดยใช้ Taylor series expansion ดังนี้

$$\begin{aligned} f(u) &= f(u_g) + (u_{new} - u_g) f'(u_g) + Higher\ order\ terms \\ u^2 &= u_g^2 + (u_{new} - u_g)(2u_g) \end{aligned} \tag{2.27}$$

ขั้นตอนข้างต้นสามารถถูกมองเป็น Newton Raphson Method ระหว่างดำเนินการมีการละเลยพจน์อันดับต่อ ๆ ไปใน Taylor series expansion ซึ่งทำให้เกิด Linearization Error

ทำการพิจารณาแบบเดียวกันนี้กับทุก Element ได้สมการ 24 สมการ 36 ตัวแปร นำไปรวมกับสมการ Mass Equation ได้ทั้งหมด 36 สมการ 36 ตัวแปรเท่ากัน จึงสามารถหาคำตอบได้ แต่เนื่องจากสมการ Momentum Equation ของทุก Element เป็นไม่เป็นเชิงเส้นและถูกทำ Linearization ด้วย Newton Raphson Method ทำให้ต้องใช้ Iterative method ในการหาผลลัพธ์ ดังรูป 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงขั้นตอนการหาผลลัพธ์โดย Iterative method

จากแผนภาพข้างต้น มีการใช้งานตัวแปร Residual เพื่อทดสอบการลู่เข้าของผลลัพธ์ ตัวแปรดังกล่าวถูกนิยามดังนี้

$$Residual_1 = \int_S \vec{u}_n \cdot \hat{n}\, dS \tag{2.28}$$

$$Residual_2 = \int_S \rho \vec{u}_n (\vec{u}_n \cdot \hat{n})\, dS + \int_S p\, \hat{n}\, dS - \vec{F}_{viscous} \tag{2.29}$$

$$Residual = Max(Residual_1, Residual_2) \tag{2.30}$$

ตัวแปร Residual ก็คือการวัดปริมาณความคลาดเคลื่อนจากสมการ Mass Equation และสมการ Momentum Equation นั่นเอง การทดสอบการลู่เข้าของตัวแปร Residual ทำได้โดยเปรียบเทียบค่า Residual กับค่า Tolerance ที่ตั้งไว้ว่าน้อยเพียงพอ ดังนั้นเมื่อผลลัพธ์ลู่เข้า ตัวแปรทั้งหมดจึงสอดคล้องกับสมการควบคุมทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การใช้งานซอฟต์แวร์ SimScale

ซอฟต์แวร์ SimScale แบ่งขั้นตอนการทำ CFD Simulation เป็น 3 ขั้นตอนเทียบ ซึ่งเทียบเท่ากับขั้นตอนการทำ CFD Simulation ในเบื้องต้นทั้ง 4 ดังนี้

1. Pre-processing

ขั้นตอน Pre-processing เทียบเท่ากับ Discretization Process เป็นขั้นตอนที่ผู้ใช้ทำการสร้างโดเมนการคำนวณหรือที่เรียกกันว่าสร้าง Mesh จากรูปทรงเรขาคณิตของปัญหาการไหลที่กำลังศึกษา ผู้ใช้สามารถใช้ได้ทั้งไฟล์ CAD ที่มีนามสกุลเป็น .stl และ .stp โดยผู้ใช้สามารถปรับความละเอียดของ Mesh ได้ และยังสามารถเลือกใช้การ Refinement แบบต่าง ๆ ได้ตามต้องการ

2. Simulation

ขั้นตอน Simulation เทียบเท่ากับ Linearization Process และ Calculation Process คือขั้นตอนที่ผู้ใช้เลือกกำหนดสมการควบคุมที่ใช้ในการศึกษา กำหนดคุณสมบัติของของไหล ระบุเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขที่ขอบ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถปรับวิธีการเชิงตัวเลขที่ซอฟต์แวร์ SimScale ใช้ในการคำนวณ และกำหนดค่าที่ต้องการจากการ Simulation เช่น แรงต้านและแรงยก เป็นต้น

3. Post-processing

ขั้นตอน Post-processing เป็นขั้นตอนการแสดงผลลัพธ์ที่ได้คำนวณในรูปของกราฟ ตาราง หรือแผนภาพ ผู้ใช้สามารถเลือกทำการแสดงผลลัพธ์ในซอฟต์แวร์ SimScale หรือสามารถทำการดาวน์โหลดผลลัพธ์จากเซิร์ฟเวอร์ส่วนกลางเข้ามาในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเพื่อแสดงผลด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะทางอื่นก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การแข่งขัน

3.1 รายละเอียดการแข่งขัน

การแข่งขันในรายการ Formula SAE มีการแข่งขันแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ static event และ dynamic event ซึ่งการแข่งขัน static event จะเป็นการแข่งขันที่ไม่มีการขับเคลื่อนของรถ และ dynamic event เป็นการแข่งขันในสมรรถนะด้านต่าง ๆ ของของรถแข่งแบ่งย่อยออกเป็น 5 การแข่งขัน

1. Acceleration การแข่งขันอัตราเร่งของรถในระยะ 75 เมตร

2. Skidpad การแข่งขันความสามารถในการเข้าโค้งของรถ
โดยวิ่งในทางโค้งรัศมีคงที่รอบวงกลมฝั่งขวา 2 รอบและรอบวงกลมฝั่งซ้าย 2 รอบ

3. Autocross เป็นการแข่งขันโดยวิ่งในสนามที่ประกอบด้วยทางตรงและโค้งในรัศมีที่ต่างกันให้ครบระยะทาง 1 กิโลเมตร ผู้ชนะคือรถคันที่ใช้เวลาในการวิ่งน้อยที่สุด การแขงขันรายการนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของรถโดยรวม

4. Endurance เป็นการแข่งขันในสนามเดียวกันกับ Autocross
โดยให้มีการวิ่งอย่างต่อเนื่องเป็นระยะทาง 22 กิโลเมตรและจะมีการสับเปลี่ยนนักขับในระยะครึ่งทาง ในระหว่างการแข่งขันจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนของรถหรือเติมน้ำมันเชื้อเพลิงได้

5. Efficiency เป็นการทดสอบความประหยัดน้ำมันของรถโดยจะวัดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ระหว่างการแข่งขัน Endurance

เนื่องจากงานวิจัยเน้นถึงความสามารถในการเข้าโค้งของรถแข่ง จึงได้ตัดสินใจให้รายการ Skidpad เป็นเป้าหมายหลักในการศึกษาและตั้งเป้าหมายของค่าแรงกดที่ต้องการเมื่อเทียบกับสถิติของการแข่งขันที่ผ่าน ๆ มา ดังตาราง 3.1 และ ตาราง 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สถิติการแข่งขัน Skidpad ประเทศไทย

Ranking	University/Institution	Average time
1	KU	5.713
2	SIAM	5.733
3	KMUTT	5.898
	KMITL	6.020

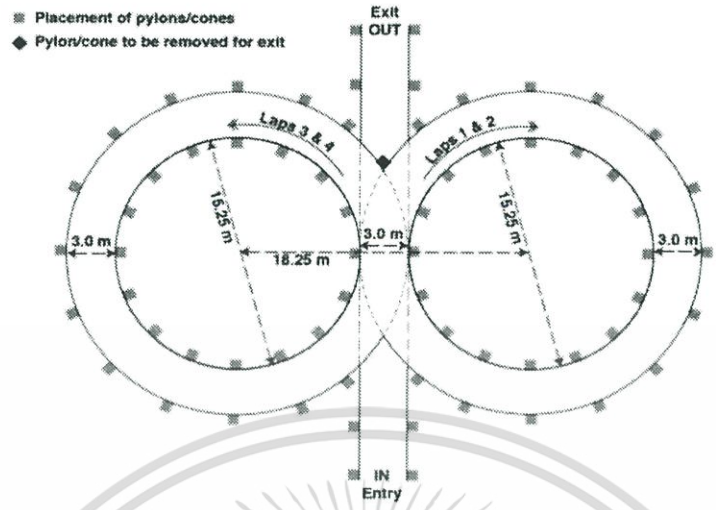
ตารางที่ 3.2 สถิติการแข่งขัน Skidpad ประเทศญี่ปุ่น

Ranking	University/Institution	Average time
1	Shibaura Institute of Technology	4.951
2	Nagoya Institute of Technology	5.045
3	Kyoto Institute of Technology	5.052
	KMUTT	5.665

จากการเทียบจากสถิติของเวลาในการแข่งขัน Skidpad ทีมจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจะต้องสามารถทำเวลาได้ไม่เกิน 4.90 วินาทีในการแข่งขันเพื่อที่จะชนะในการแข่งขัน Skidpad ครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำหนดค่าแรงกดที่ต้องการ



รูปที่ 3.1 เส้นทางการแข่งขัน Skidpad [22]

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่ารถแข่งจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมในรัศมี 8.325 เมตร ดังนั้นเมื่อรถเคลื่อนที่วงกลมด้วยความเร็วคงที่จะมีแรงเข้าสู่ศูนย์กลางเท่ากับแรงหนีศูนย์กลางของวงกลม สมการของการเข้าโค้งจะเป็นไปตามสมการ 3.1

$$\mu(mg + F_{down}) = m\frac{v^2}{R} \tag{3.1}$$

จากสมการ 3.1 สามารถจัดรูปหาแรงกดที่ต้องการในการเข้าโค้งตามสมการ 3.2

$$F_{down} = m\left(\frac{v^2}{\mu R} - g\right) \tag{3.2}$$

จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติของรถจากตารางที่ 3.3 มาใช้ในการคำนวณเพื่อทำการคำนวณแรงกดที่เราต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของรถ

ค่าคุณสมบัติของรถ	ไม่มีอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์	มีอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์
มวล (kg)	266	268
สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_T)	1.30	1.30
พื้นที่หน้าตัด (m^2)	1.00	1.00
กำลัง (kW)	42.5	42.5

ตารางที่ 3.4 ค่าคำนวณหาแรงกด

Target Time	4.90	s
R (minimum)	8.33	m
density	1.22	kg/m^3
mass	268	kg
speed	10.7	m/s

จากผลการคำนวณพบว่าแรงกดที่ต้องการคือ 196 นิวตัน เพื่อให้ทำเวลาได้ 4.90 วินาทีตามที่ต้องการจากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกตามสมการ 2.13a ได้ค่าเท่ากับ 2.81

พิจารณาแรงต้านสูงสุดที่ยอมรับได้ ในการออกแบบนอกจากการหาแรงกดแล้วยังต้องหาแรงต้านซึ่งเป็นผลตามมาจากการสร้างแรงกด ซึ่งส่งผลเสียต่ออัตราเร่งและความเร็วสูงสุดของรถแข่ง ดังนั้นจึงต้องควบคุมแรงต้านของรถแข่ง

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.3 คำนวณหาแรงขับที่ความเร็วสูงสุดของรถที่ 120 km/h หรือ 33.3 m/s ได้แรงขับเท่ากับ 1.23 kN ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงต้าน จากนั้นนำแรงต้านไปหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้วยสมการ 2.13b ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 1.81

3.3 ขั้นตอนการออกแบบเพื่อบรรลุเป้าหมาย

หลังจากที่ได้เป้าหมายแล้ว การบรรลุเป้าหมายนั้นสามารถเริ่มต้นจากการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองอุโมงค์ลม จากนั้นหาการตั้งค่าที่เหมาะสมในซอฟต์แวร์ SimScale ที่สอดคล้องกับการทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อใช้ในการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ต่อไป

การออกแบบดิฟฟิวเซอร์ด้วยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้นสามารถทำได้สองวิธี

1. การวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์ที่ติดไปกับด้านข้างตัวรถ
2. การวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์แยกออกจากตัวรถ

การออกแบบทั้งสองวิธีนั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังที่แสดงในตารางที่ 3.5 การเลือกวิธีที่เหมาะสมนั้นจะช่วยให้การออกแบบไม่ประสบปัญหากับความถูกต้อง

หลังจากที่ได้ตั้งการค่าและรุปแบบการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแล้ว สามารถเริ่มต้นการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ด้วยการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากตัวแปลต่าง ๆ เช่น ขนาดความสูง ความยาว และความกว้าง เพื่อหาดิฟฟิวเซอร์ที่สามารถบรรลุเป้าหมาย

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการวิเคราะห์ทั้งสองแบบ

	ข้อดี	ข้อเสีย
การวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์ที่ติดไปกับด้านข้างตัวรถ	ตรงกับความเป็นจริง	ใช้ทรัพยากรณ์มาก
การวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์แยกออกจากตัวรถ	ใช้ทรัพยากรณ์น้อย	ไม่ตรงกับความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

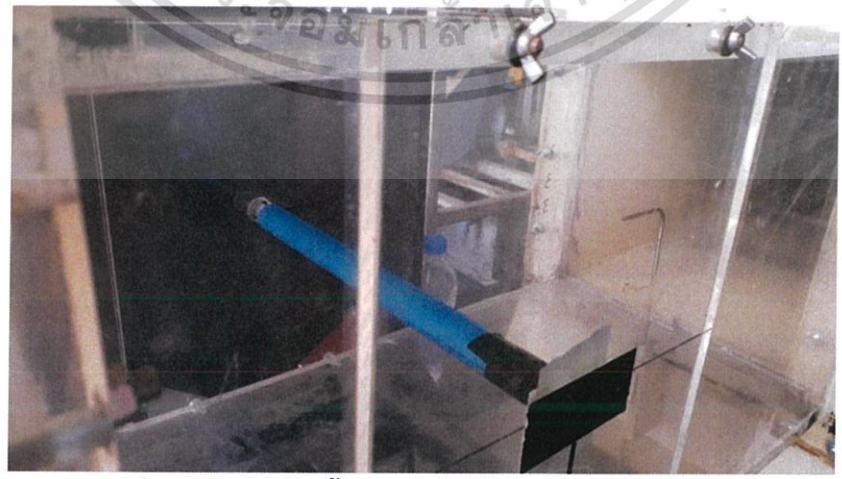
บทที่ 4
Validation

บทนี้กล่าวถึงแนวโน้มของผลลัพธ์จากการทำ Computational Fluid Dynamics (CFD) เปรียบเทียบกับการทดลองอุโมงค์ลมเพื่อหาการตั้งค่ารูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจำนวน Node ที่เหมาะสมโดยเริ่มศึกษาจากการทดลองอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับการทดลองที่เกี่ยวข้องเพื่อทดสอบความแม่นยำของเครื่องมือวัดที่ใช้ จากนั้นทำ CFD Simulation ของรูปทรงดิฟฟิวเซอร์และตัวรถแข่ง เปรียบเทียบผลลัพธ์ต่าง ๆ กับแบบทดสอบในอุโมงค์ลม เพื่อหาการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ในซอฟต์แวร์ SimScale

4.1 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านทรงกระบอก

4.1.1 การทดลองอากาศไหลผ่านทรงกระบอก

เริ่มต้นจากกรณีศึกษาพื้นฐานเพื่อทดสอบความแม่นยำของชุดทดลองอุโมงค์ลมที่ใช้ และเพื่อทดสอบความถูกต้องของแนวโน้มผลลัพธ์จากการทำ CFD Simulation โดยใช้ท่อ PVC ทรงกระบอก 2 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 22.2 มิลลิเมตร และ 33.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยท่อทั้งสองมีความยาวเท่ากันคือ 280 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองครั้งละ 1 ขนาด ลักษณะการติดตั้งท่อทรงกระบอกเป็นดัง รูปที่ 4.1 และผลลัพธ์ที่ได้แสดงใน ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับความเร็วลมของทรงกระบอกแต่ละขนาด



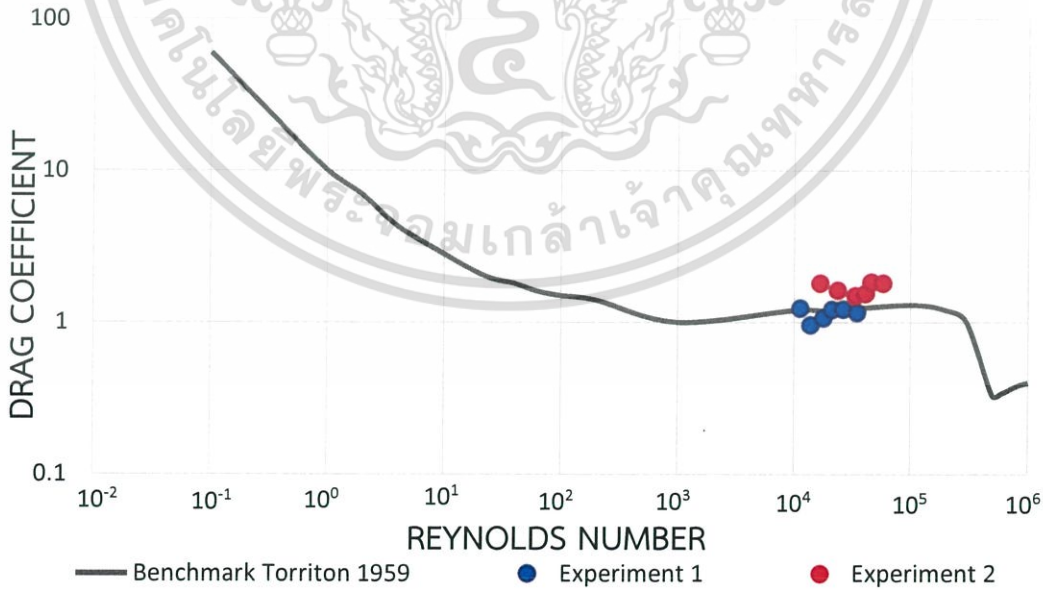
รูปที่ 4.1 รูปการติดตั้งท่อ PVC ทรงกระบอกในอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ

Cylinder of 22.2 mm (Di)		Cylinder of 33.0 mm (Di)	
Velocity (m/s)	Drag force (N)	Velocity (m/s)	Drag force (N)
8.10	0.292	8.10	0.427
9.90	0.340	11.4	0.766
12.8	0.631	16.2	1.41
15.1	1.00	19.8	2.20
19.0	1.58	22.1	3.25
24.9	2.61	28.0	5.12

นำผลการทดลองทั้งของท่อทั้งสองขนาดมาจัดให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์แสดงผลใน รูปที่ 4.2 เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานซึ่งอ้างอิงจากการทดลองของ Torriton [21] ทดลองการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกยาวเป็นระยะอนันต์แสดงด้วยเส้นสีดำ การทดลองที่ 1 และ 2 แสดงด้วยจุดสีน้ำเงินและสีแดง ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์จากการทดลองอากาศไหลผ่านทรงกระบอก เทียบกับค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 Experiment 1 หมายถึงการทดลองโดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.2 มิลลิเมตร และ Experiment 2 หมายถึงการทดลองโดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33.0 มิลลิเมตร เห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทำให้ผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐาน เนื่องจากค่ามาตรฐานซึ่งอ้างอิงจากการทดลองของ Torriton เป็นการทดลองที่พิจารณาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านกับเลขเรย์โนลด์ เมื่ออากาศไหลผ่านทรงกระบอกซึ่งมีความยาวเข้าใกล้อนันต์ หรือก็คืออัตราส่วนความยาวท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีเข้าใกล้อนันต์ เนื่องจากชุดทดลองอุโมงค์ลมที่มีในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังมีขนาดความยาวจำกัด ท่อที่ใช้ทำการทดลองมีความยาว 280 มิลลิเมตร ดังนั้นท่อที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าจึงมีอัตราส่วนความยาวท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงอนันต์มากกว่า ผลลัพธ์จาก Experiment 1 จึงใกล้เคียงค่ามาตรฐานกว่า Experiment 2

4.1.2 CFD Simulation อากาศไหลผ่านทรงกระบอก

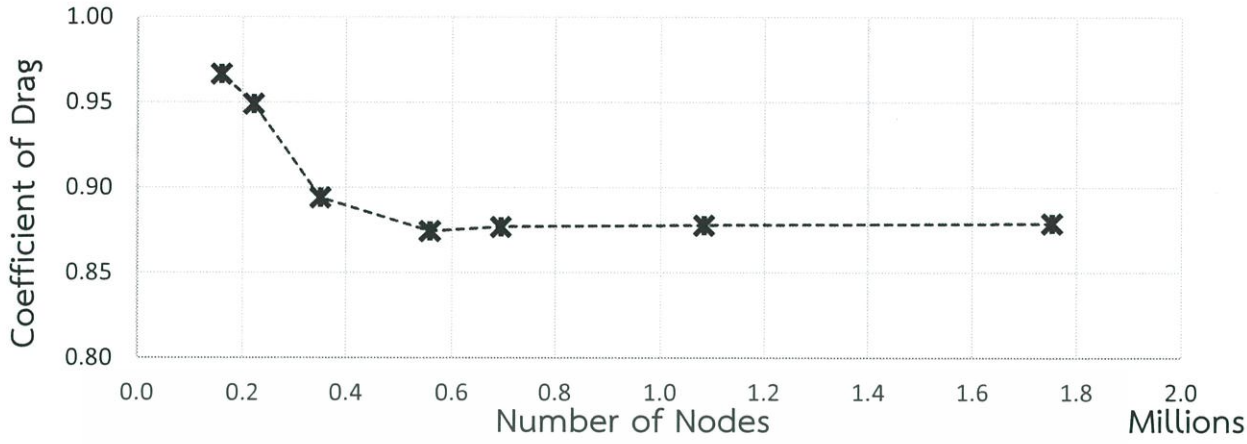
นอกจากการทำการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของชุดทดลองอุโมงค์ลมแล้ว กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านทรงกระบอกยังสามารถนำมาใช้ในการทดสอบความแม่นยำของ CFD Simulation ในที่นี้ได้ทำ CFD Simulation สำหรับกรณีศึกษาดังกล่าวโดยใช้ แบบจำลองทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมีความยาว 200 มิลลิเมตร ทำให้มีอัตราส่วนความยาวท่อต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มากกว่าการทดลองทั้งสอง

Pre-processing

ใช้ Mesh Refinement เป็น Surface Refinement level 3 (min) ถึง 4 (max) และ Region Refinement level 1 กำหนดความกว้าง ความสูง ระยะด้านหน้า และ ระยะด้านหลัง เป็น 1 2 1 2 เท่าของความยาวชิ้นทดลอง ตามลำดับ

ทำการคำนวณเบื้องต้นเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของผลลัพธ์จากความละเอียด Mesh (Mesh independence) โดยใช้เงื่อนไขความเร็วอากาศอิสระทางเข้า 2 เมตรต่อวินาที และใช้สมการการไหลแบบ SST k-omega turbulence model ในการคำนวณ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผล CFD Simulation กับความละเอียดของ Mesh ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของผล CFD Simulation กับความละเอียดของ Mesh ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.3 เห็นได้ว่าผล CFD Simulation ไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดเมื่อ Mesh ที่ใช้มีความละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับประมาณ 800,000 Nodes หรือก็คือ 800,000 Nodes ขึ้นไป เป็นความละเอียดที่เพียงพอในการทำ CFD Simulation สำหรับกรณีศึกษานี้

Simulation

ทำการคำนวณ 2 รูปแบบคือ Laminar flow model และ K-omega SST turbulence model เพื่อทดสอบการทำงานของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้ภายในโปรแกรม SimScale ใช้ Time step ขนาด 1 วินาที ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม Simscale โดยมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Conditions) ดังนี้

1. ความเร็วเริ่มต้นทางเข้า (ความเร็วอากาศที่ทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.2 และ 4.3)
2. ความดันทางออก 0 กิโลปาสคาล
3. ผิวขอบของ Boundary Box เป็นแบบ Slip Wall
4. พื้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับอากาศทางเข้า
5. พื้นผิลทรงกระบอกเป็นแบบ Non-slip Wall

ใช้เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions) และการตั้งค่าอื่น ๆ เช่นคุณสมบัติของอากาศ ตามค่าเริ่มต้นของซอฟต์แวร์ SimScale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Post-processing

หลังจากทำ CFD Simulation จนผลลัพธ์ของแต่ละการคำนวณลู่เข้าค่าหนึ่งแล้ว ได้ค่าแรงต้าน ณ ความเร็วต่าง ๆ แสดงใน ตารางที่ 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผล CFD Simulation แรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ คำนวณโดยใช้ Laminar flow model

Velocity (m/s)	Drag force (N)
0.00200	0.0000000423
0.0100	0.000000354
0.0500	0.00000407
0.100	0.0000133
0.230	0.0000658
0.460	0.000240
0.760	0.000638
2.00	0.00435
10.0	0.110
15.5	0.262
92	9.10
184	36.7

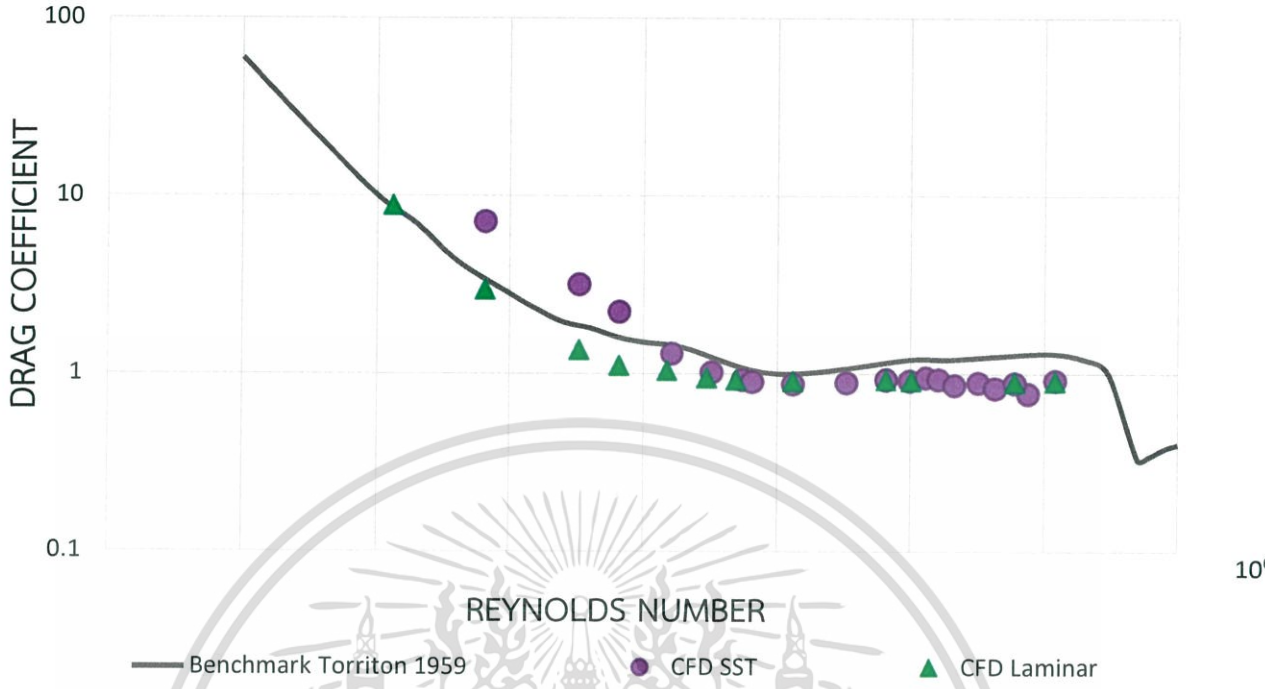
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผล CFD Simulation แรงต้านที่เกิดจากอากาศไหลผ่านทรงกระบอกที่ความเร็วต่าง ๆ คำนวณโดยใช้ K-omega SST turbulence model

Velocity (m/s)	Drag force (N)
0.0100	0.000000860
0.0500	0.00000953
0.100	0.0000268
0.250	0.0000972
0.500	0.000305
0.850	0.000800
1.00	0.00108
2.00	0.00420
5.00	0.0267
10.0	0.111
15.0	0.247
20.0	0.458
25.0	0.697
33.0	1.13
49.5	2.62
66.0	4.34
92.0	9.02
116	12.4
184	37.2

เช่นเดียวกับการทดลอง นำผลลัพธ์ที่ได้จาก CFD Simulation มาจัดให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์ และแสดงผลในรูปของกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในรูปที่ 4.4 โดยเส้นสีดำแสดงถึงค่ามาตรฐาน สัญลักษณ์วงกลมและสามเหลี่ยมแสดงถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ K-omega SST turbulence model และ Laminar flow model ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านและเลขเรย์โนลด์จาก CFD Simulation ที่คำนวณโดยใช้ Laminar flow model, K-omega SST turbulence model เทียบกับค่ามาตรฐาน

จากรูปที่ 4.4 ผลลัพธ์จาก CFD Simulation ทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน โดยสมการ Laminar flow model ให้ค่าที่แม่นยำมากกว่าอย่างเมื่อเลขเรย์โนลด์มีค่าต่ำ คือเลขเรย์โนลด์ประมาณ 1 ถึง 30 ซึ่งเกิดจากการที่การไหลมีความปั่นป่วนที่ต่ำ การใช้ Turbulence model ในการคำนวณจึงเป็นการประเมิณค่า Turbulence viscosity มากเกินความจริง ทำให้ผลลัพธ์ที่มาจาก K-omega SST Turbulence model คลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานในช่วงดังกล่าวและในช่วงหลังจากนั้น การคำนวณทั้งสองแบบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าไม่ตรงกับค่ามาตรฐาน ซึ่งอาจเป็นเพราะสมมติฐานต่าง ๆ ที่อยู่ภายในสมการควบคุม หรือความคลาดเคลื่อนจาก Mesh (Discretization error) อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของผลลัพธ์ทั้งสองต่างก็อยู่ในทิศทางเดียวกันกับค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

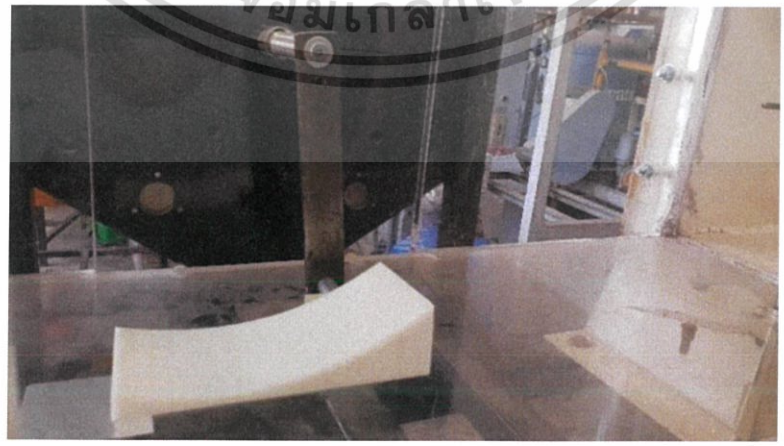
4.2 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์

4.2.1 การทดลองอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์

ภายหลังจากที่ทำการทดลองอากาศไหลผ่านท่อและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการทดสอบ CFD simulation ของดิฟฟิวเซอร์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในอุโมงค์ลม วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือเรซินที่ผ่านกระบวนการ 3D printing เนื่องจากมีความแข็งแรงและความเรียบของพื้นผิว สามารถทนต่อความเร็วของลมในอุโมงค์ลม ในส่วนของจุดยึดนั้นทำจากอลูมีเนียมเพื่อความมั่นคงในการจับยึดชิ้นทดสอบ โดยมีรายละเอียดลักษณะชิ้นทดสอบและจุดยึดดังนี้

- การจับยึดให้ชิ้นทดลองอยู่ให้อยู่กึ่งกลางอุโมงค์ลม (Free stream) ดังรูปที่ 4.5
- การจับยึดชิ้นทดลองให้ฐานของชิ้นทดลองอยู่ใกล้พื้น 4 มิลลิเมตร (Ground effect) ดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.5 การจับยึดชิ้นทดสอบ ณ กึ่งกลางอุโมงค์ลม



รูปที่ 4.6 การจับยึดชิ้นทดสอบ ณ ตำแหน่งใกล้พื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองอุโมงค์ลมโดยเพิ่มความเร็วลมและอ่านค่าจากพิโต ทูป จากนั้นอ่านค่าแรงกดและแรงต้านที่ได้จากโหลดเซลล์ แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 เป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการจับยึดชิ้นงาน ณ ตำแหน่งกึ่งกลางอุโมงค์ลม และ ณ ตำแหน่งใกล้พื้นที่ความเร็วต่าง ๆ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงกดคำนวณจากการกำหนด Characteristic length เป็นความยาวแนวตามยาวของตัวดิฟฟิวเซอร์

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดอยู่กึ่งกลางอุโมงค์ลม

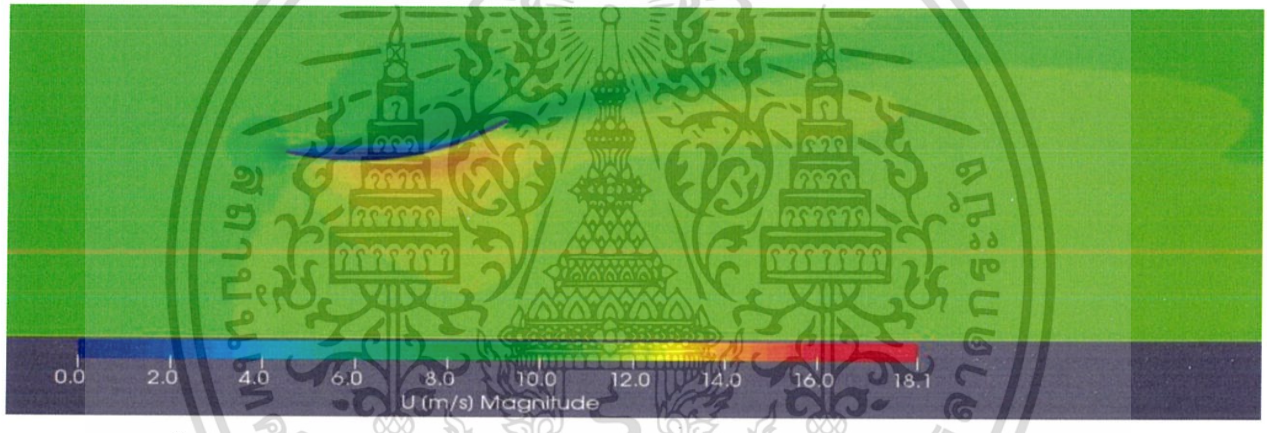
Velocity (m/s)	Down force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
8.10	0.250	0.180	1.48	1.07
9.90	0.320	0.250	1.27	0.99
14.0	0.600	0.470	1.20	0.93
17.6	1.27	0.82	1.59	1.03
21.4	1.95	1.24	1.66	1.05
24.9	2.47	1.75	1.54	1.10

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดใกล้พื้น

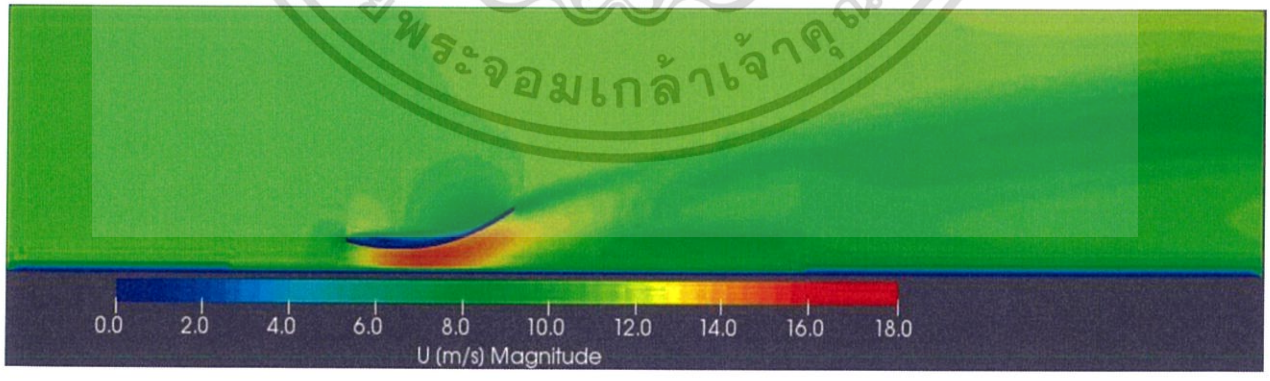
Velocity (m/s)	Down force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
8.10	0.290	0.150	1.73	0.89
9.90	0.430	0.250	1.71	0.98
14.0	0.950	0.530	1.88	1.05
16.7	1.36	0.830	1.90	1.16
21.4	2.25	1.26	1.91	1.07
23.6	2.60	1.50	1.82	1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าเมื่อจับยึดชิ้นทดลองใกล้พื้น แรงกดที่ได้มีแนวโน้มที่มากกว่าการจับยึดชิ้นทดลอง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางอุโมงค์ลมในทุก ๆ ช่วงความเร็วอันเนื่องมากจาก Ground effect ที่ส่งผลให้การ Develop ของ Boundary layer ภายในช่องของดิฟฟิวเซอร์แตกต่างจากดิฟฟิวเซอร์ที่ถูกจับยึดอย่างอิสระ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของอุโมงค์ลม รูปที่ 4.7 และ 4.8 คือภาพตัดด้านข้างของดิฟฟิวเซอร์ที่ทดสอบด้วยความเร็วอากาศ 11.1 เมตรต่อวินาที แสดงถึงความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ แบบจับยึด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางอุโมงค์ลม (Free stream) และแบบจับยึด ณ ตำแหน่งใกล้พื้น (Ground effect) พบว่าในกรณีการจับยึดใกล้พื้น อากาศที่ไหลผ่านช่องของดิฟฟิวเซอร์จะมีความเร็วที่สูงกว่าแบบจับยึด ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง ความเร็วอากาศที่มากกว่านี้ส่งผลให้ผลต่างของความเร็วอากาศที่ไหลผ่านด้านบนดิฟฟิวเซอร์ (สีน้ำเงิน) และผ่านช่องของดิฟฟิวเซอร์ (สีแดง) มีค่ามาก มีผลให้แรงกดมีค่าที่มากกว่า



รูปที่ 4.7 แสดงความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของการจับยึด ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง



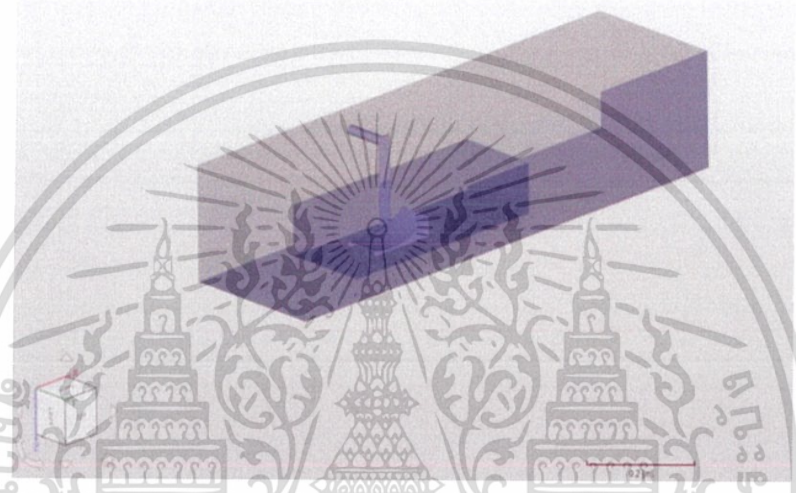
รูปที่ 4.8 แสดงความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของการจับยึด ณ ตำแหน่งใกล้พื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

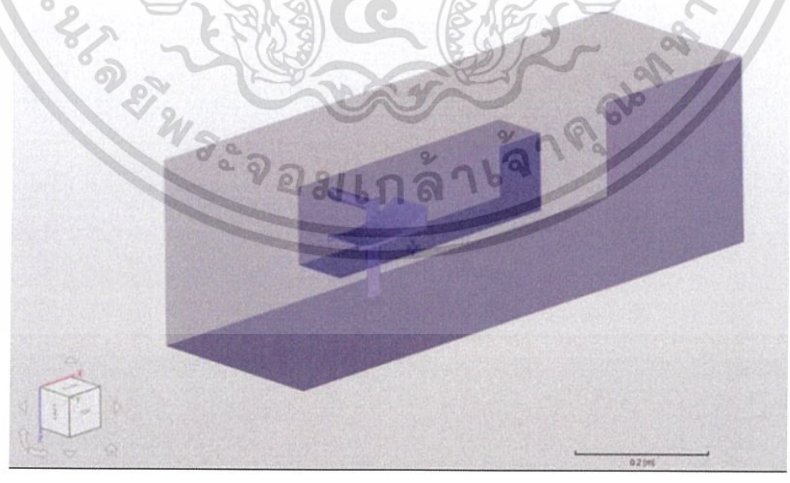
4.2.2 CFD simulation อากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์

หลังจากทำการทดลองในอุโมงค์ลมแล้ว ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการทำ CFD Simulation เพื่อหาการตั้งค่าต่าง ๆ ในซอฟต์แวร์ SimScale ที่ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อความแม่นยำในการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ในครั้งต่อ ๆ ไป แบ่งกรณีการศึกษาดังนี้

- การจับยึดแบบจำลองให้ฐานของชิ้นทดลองอยู่ใกล้พื้น 4 มิลลิเมตร (Ground effect) ดังรูปที่ 4.9
- การจับยึดแบบจำลองอยู่ ณ กึ่งกลางอุโมงค์ลม (Free stream) ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 จุดยึดแบบจำลองดิฟฟิวเซอร์ที่ตำแหน่งใกล้พื้น (Ground effect)



รูปที่ 4.10 จุดยึดและดิฟฟิวเซอร์ ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง (Free stream)

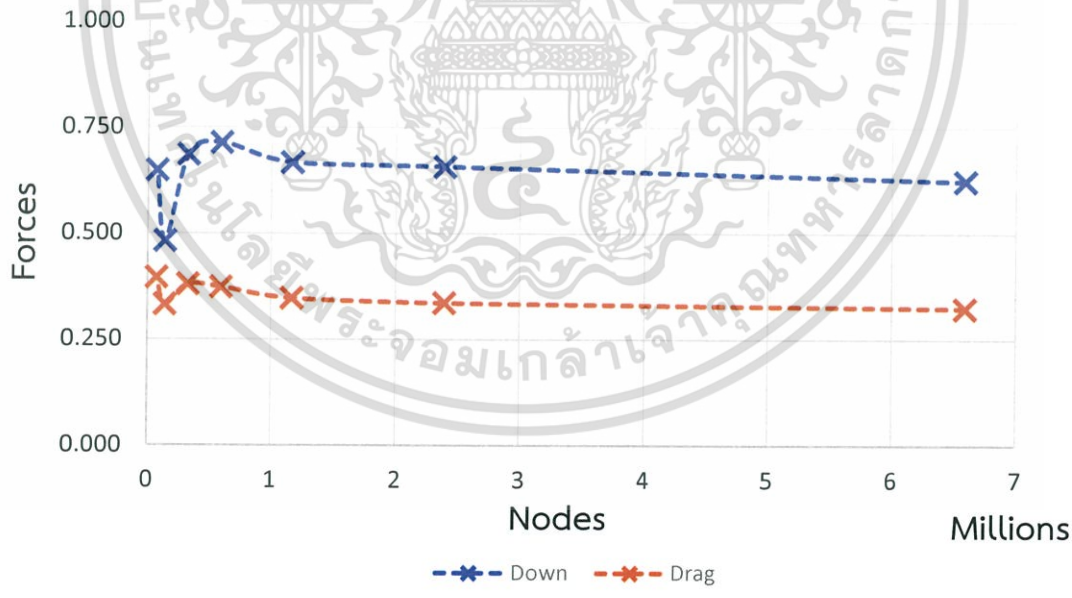
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pre-processing

เลือกใช้ Mesh Refinement เป็น Surface Refinement level 4 (min) ถึง 5 (max) และ Region Refinement level 2 กำหนดความกว้าง ความสูง ระยะด้านหน้า และ ระยะด้านหลัง เป็น 2 2 3 5 เท่าของความยาวชิ้นทดลอง ตามลำดับ โดยแบบทดสอบที่นำมาศึกษานั้นประกอบไปด้วยจุดยึดและชิ้นทดสอบเพื่อความคล้ายคลึงกับการทดลองในอุโมงค์ลม

ทำการคำนวณเบื้องต้นเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของผลลัพธ์จากความละเอียด Mesh (Mesh independence) โดยใช้เงื่อนไขความเร็วอากาศอิสระทางเข้า 11.1 เมตรต่อวินาที ใช้สมการการไหลแบบ Turbulence flow โดยใช้ SST k-omega model ในการคำนวณ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผล CFD Simulation ดังรูปที่ 4.11 เส้นสีส้มแสดงถึงแรงต้านและเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงแรงกดที่กระทำต่อแบบจำลอง

พบว่า CFD Simulation ไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดเมื่อ Mesh ที่ใช้มีความละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับประมาณ 2,500,000 Nodes หรือก็คือ 2,500,000 Nodes ขึ้นไป เป็นความละเอียดที่เพียงพอในการทำ CFD Simulation สำหรับกรณีศึกษานี้



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์จาก CFD Simulation กับจำนวน Node ที่ความเร็ว 11.1 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simulation

ทำการคำนวณด้วย K-omega SST turbulence model เพื่อทดสอบการทำงานของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้ภายในโปรแกรม SimScale ใช้ Time step ขนาด 1 วินาที ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม SimScale โดยมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Conditions) ดังนี้

1. ความเร็วอากาศ ณ ทางเข้า 30 – 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
2. ความดันทางออก 0 กิโลปาสคาล
3. ผิวขอบของ Boundary Box เป็นแบบ Slip Wall ในกรณี ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง
4. ผิวขอบของ Boundary Box ที่พื้นเป็นแบบ non - Slip Wall ณ ตำแหน่งใกล้พื้น (พื้นไม่เคลื่อนที่)
5. พื้นผิวชิ้นทดสอบเป็นแบบ Non-slip Wall

กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) และคุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่าน รวมถึงการตั้งค่าอื่น ๆ ตามการตั้งค่าเริ่มต้นของซอฟต์แวร์ SimScale

Post-processing

หลังจากที่ CFD Simulation ให้ค่าผลลัพธ์ที่ลู่เข้าค่า ๆ หนึ่งแล้วสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงถึง แรงกด แรงต้าน และค่าสัมประสิธิ์ของแรงกดและแรงต้าน ณ ความเร็ว 30 ถึง 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

นำผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ CFD Simulation มาเปรียบเทียบค่าแรงกด แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงกดและแรงต้าน ของการจับยึดแบบใกล้พื้นตามรูปที่ 4.12 4.13 4.14 4.15 และการจับยึด ณ ตำแหน่งกึ่งกลาง ตามรูปที่ 4.16 4.17 4.18 4.19 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

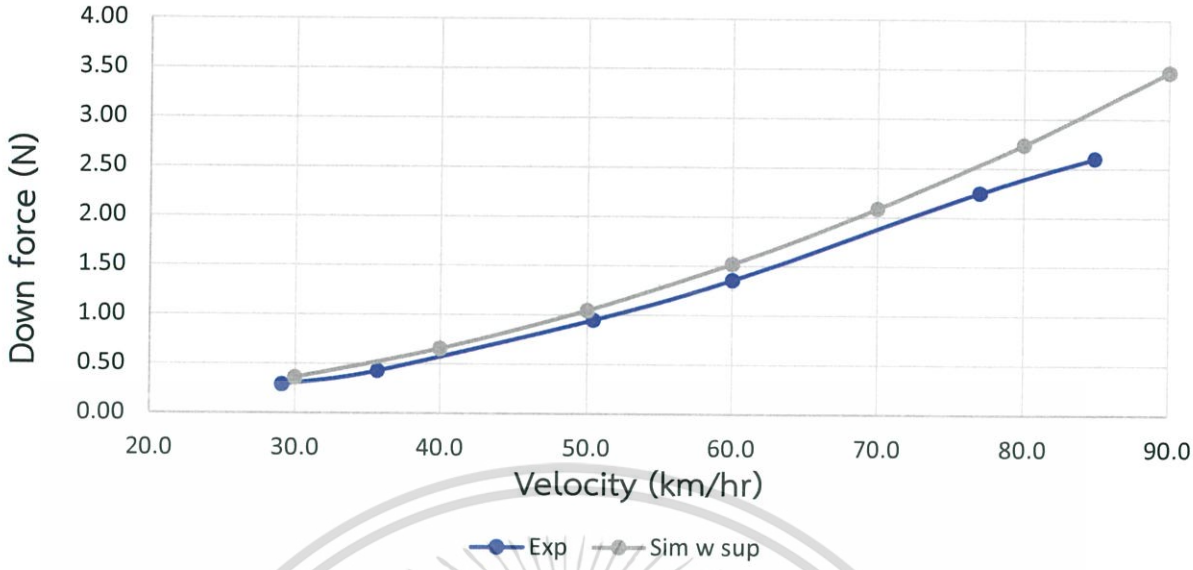
ตารางที่ 4.6 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดใกล้พื้น

Velocity (km/hr.)	Velocity (m/s)	Down force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
30.0	8.33	0.256	0.172	1.40	0.940
40.0	11.1	0.466	0.306	1.43	0.941
50.0	13.9	0.733	0.482	1.44	0.948
60.0	16.7	1.09	0.719	1.49	0.982
70.0	19.4	1.47	0.956	1.47	0.960
80.0	22.2	1.93	1.26	1.48	0.967
90.0	25.0	2.45	1.59	1.49	0.968

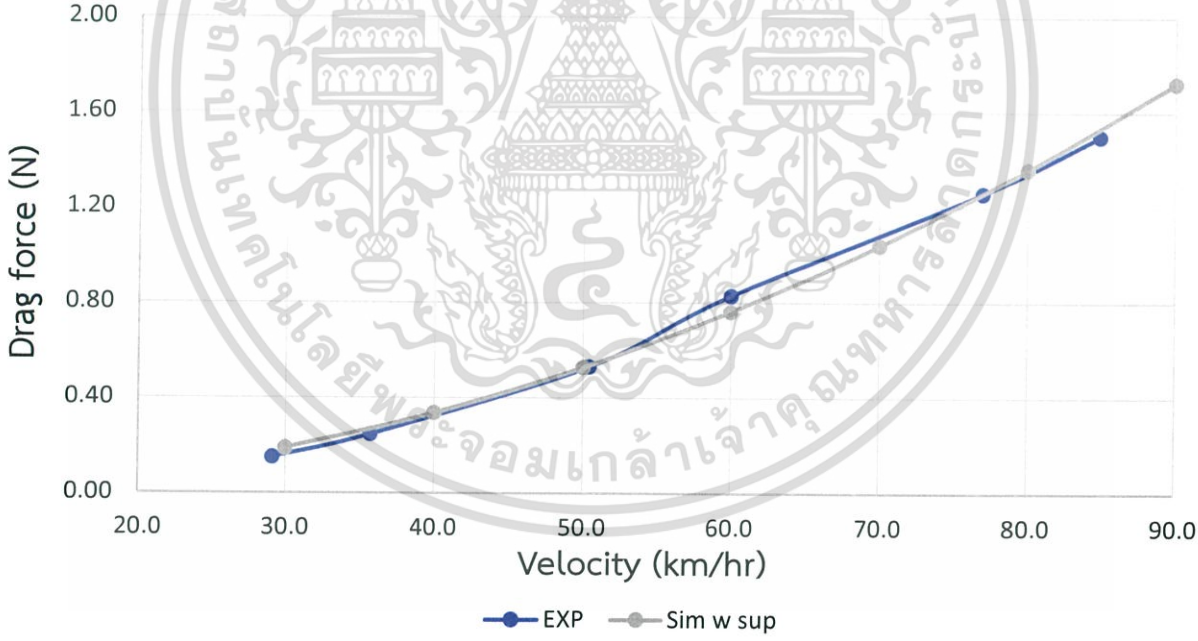
ตารางที่ 4.7 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ที่จับยึดอยู่กึ่งกลาง

Velocity (km/hr.)	Velocity (m/s)	Down force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
30.0	8.33	0.360	0.188	1.96	1.03
40.0	11.1	0.657	0.336	2.02	1.03
50.0	13.9	1.05	0.528	2.06	1.04
60.0	16.7	1.52	0.763	2.08	1.04
70.0	19.4	2.09	1.04	2.09	1.04
80.0	22.2	2.74	1.36	2.10	1.04
90.0	25.0	3.47	1.72	2.11	1.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

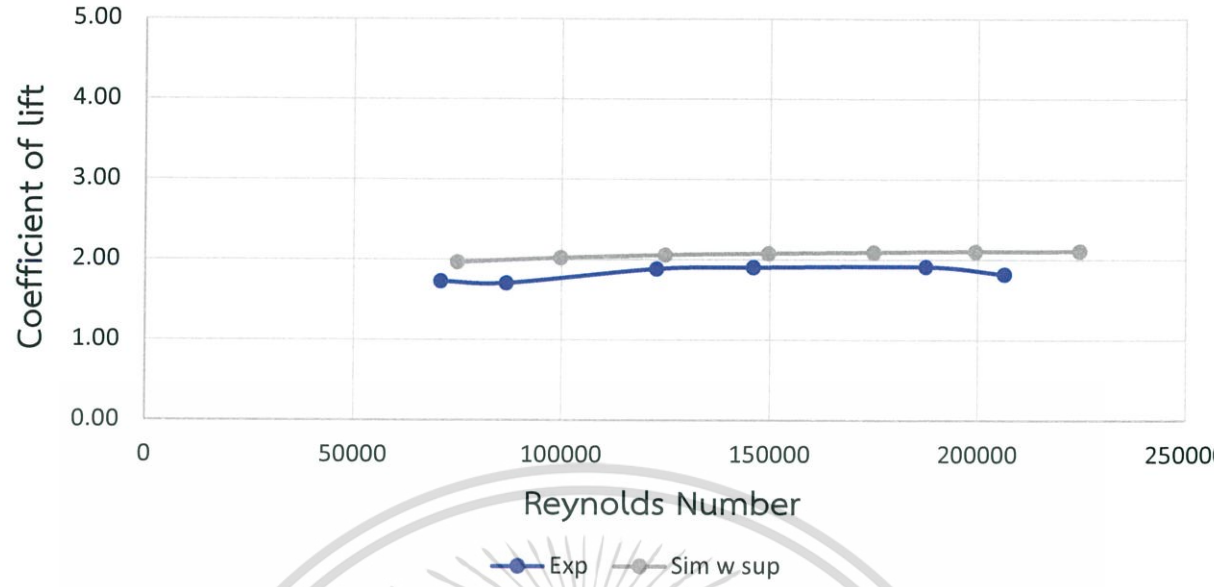


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Ground effect)

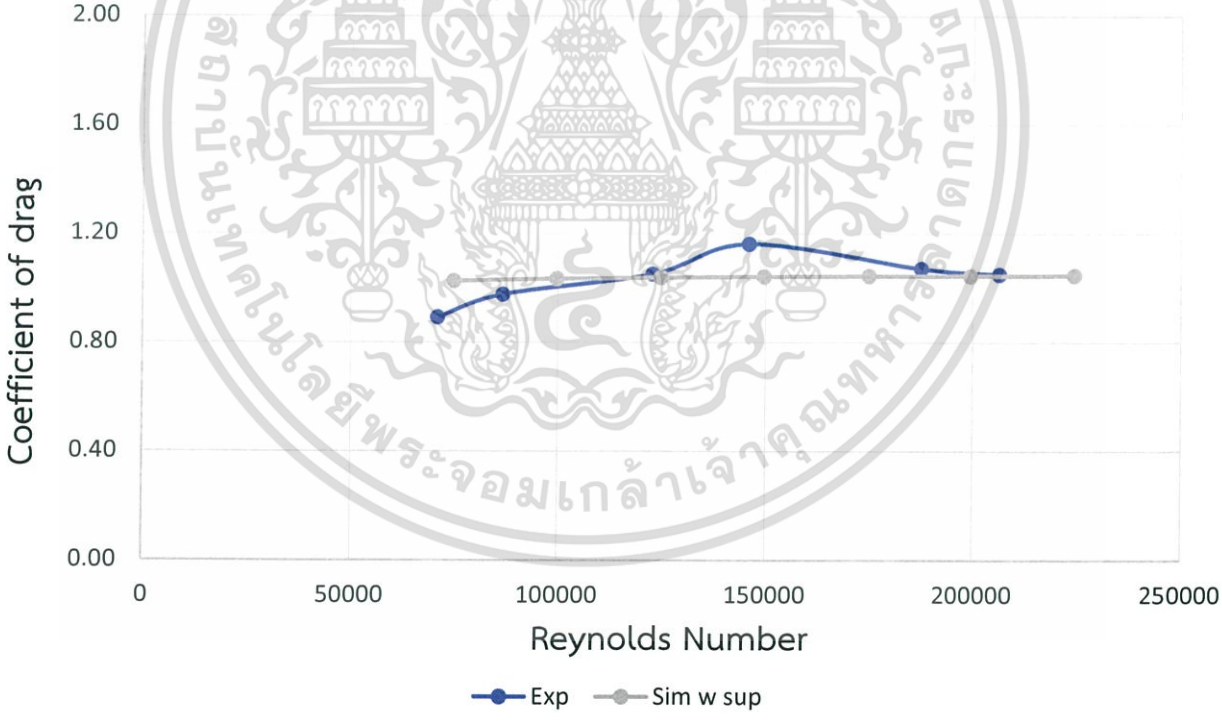


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Ground effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

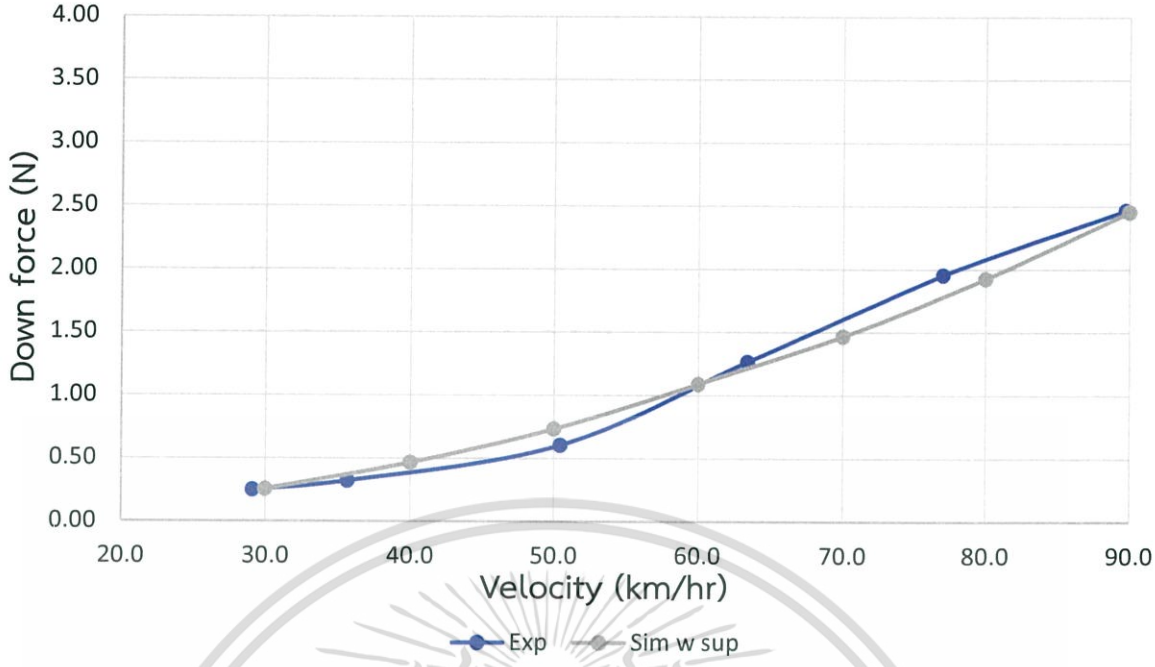


รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงกดและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Ground effect)

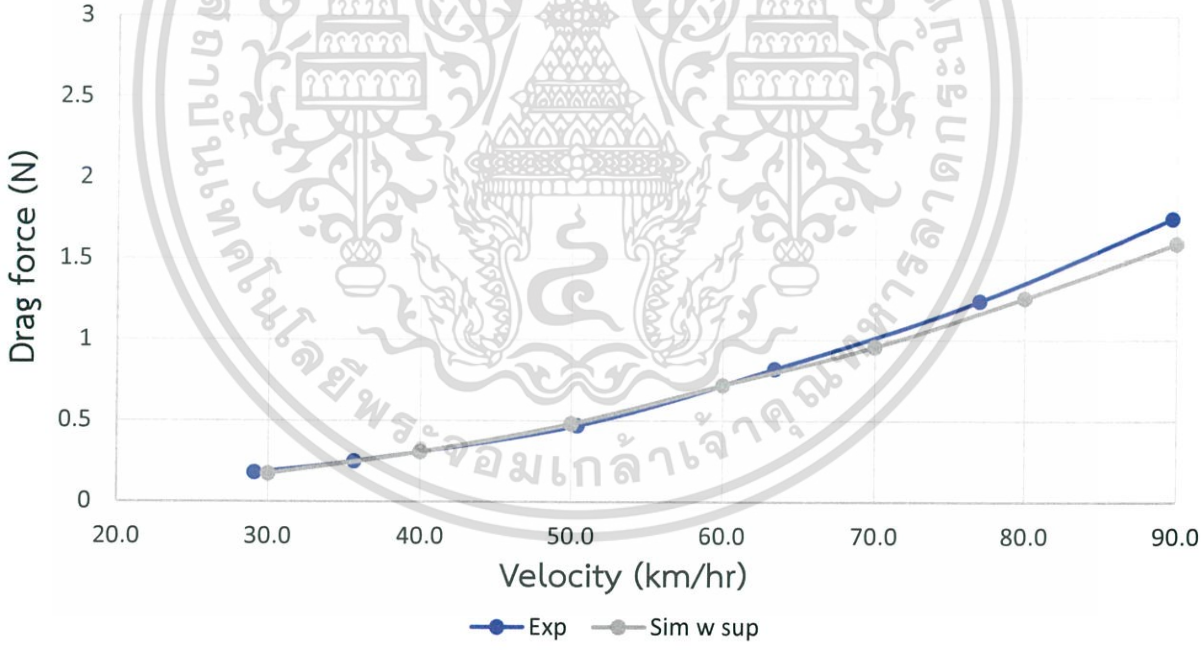


รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Ground effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

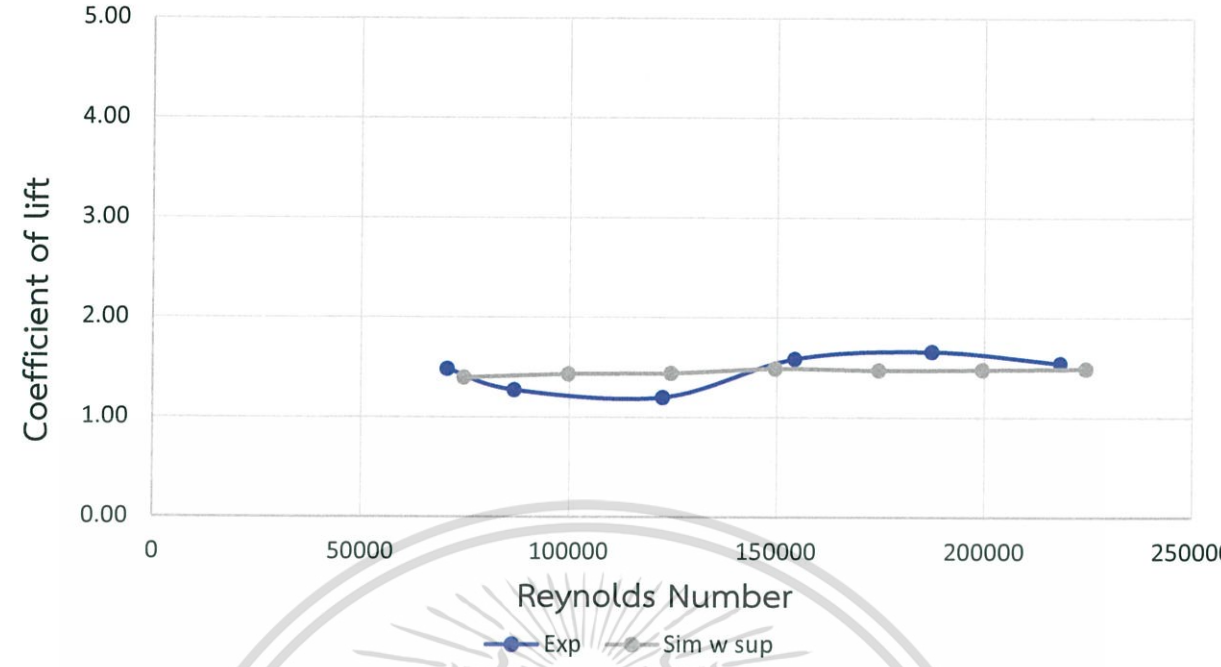


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Free stream)

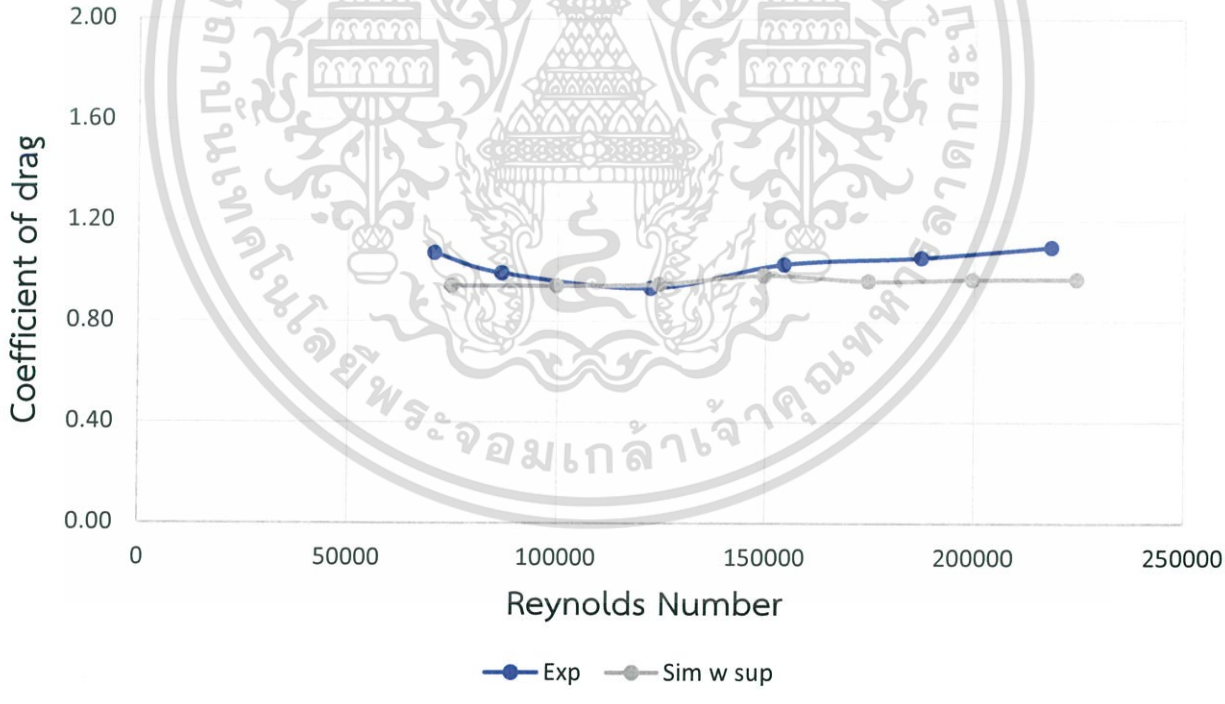


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation (Free stream)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงยกและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Free stream)



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของ การทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation (Free stream)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทำ CFD Simulation แบบ Ground effect และแบบ Free stream พบว่าผลลัพธ์ต่าง ๆ เช่น แรงกด แรงต้าน และสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและแรงกด มีความสอดคล้องกันในทุกช่วงความเร็วที่ทำการทดสอบเมื่อเทียบกับการทดลองอุโมงค์ลม หมายความว่าวิธีการตั้งค่าของซอฟต์แวร์ SimScale ที่ได้เลือกมานั้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลอง

4.3 กรณีศึกษาอากาศไหลผ่านรถแข่ง

4.3.1 การทดลองอากาศไหลผ่านรถแข่ง

การทดลองนี้ทำเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการทำ CFD Simulation ของตัวรถเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากอุโมงค์ลม วัสดุที่ใช้ทำมากจากพลาสติกโดยผ่านกระบวนการ 3D printing ซึ่งความแข็งแรงเพียงพอต่อการทดสอบและค่าใช้จ่ายน้อยกว่าแบบเรซิน จุดยึดที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกับการทดลองดิฟฟิวเซอร์และจับยึดชิ้นทดสอบให้สูงจากพื้น 5 มิลลิเมตร (ใกล้พื้น) เพียงความสูงเดียวเนื่องจากในสถาณการณ์จริงล้อและถนนจะสัมผัสกัน แต่ในการทดลองนี้ไม่สามารถทำให้ชุดทดสอบติดกับพื้นได้เนื่องจากไม่สามารถอ่านค่าความตึงลวดจากโหลดเซลล์ของอุโมงลมได้จึงต้องมีช่องว่างอยู่บ้างดังรูป 4.20 โดยที่ขนาดแบบจำลองมีอัตราส่วน 10 : 1300 ของรถขนาดจริง ได้ผลของแรงยกและแรงต้านดังแสดงในตารางที่ 4.8 โดย กำหนด Characteristic length เป็นห่างระหว่างล้อซ้ายและล้อขวา วัดจากด้านนอกของล้อทั้งสอง

รูปที่ 4.20 แสดงการจับยึดของตัวรถภายในอุโมงค์ลม

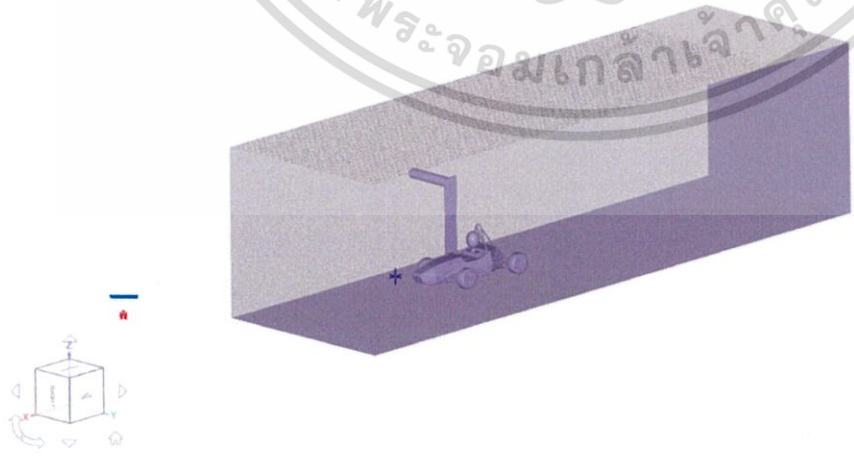
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองแรงต้านและแรงกดที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถแข่ง ณ ความเร็วต่าง ๆ

Velocity (m/s)	Lift force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
8.09	0.0180	0.164	0.080	0.760
9.90	0.300	0.29	0.090	0.890
14.0	0.0500	0.51	0.080	0.790
17.2	0.0854	0.791	0.090	0.810
22.9	0.145	1.303	0.080	0.750
28.6	0.270	2.045	0.100	0.760

4.3.2 CFD Simulation อากาศไหลผ่านรถแข่ง

เนื่องจากความซับซ้อนที่เพิ่มมากขึ้นของชิ้นทดสอบและจำเป็นที่จะต้องทดสอบดิฟฟิวเซอร์เข้ากับตัวรถ จึงทดสอบ CFD Simulation ของตัวรถเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากอุโมงค์ลมเพื่อหาการตั้งค่าต่าง ๆ ในซอฟต์แวร์ SimScale ที่ให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับอุโมงค์ลมเพื่อความน่าเชื่อถือในการออกแบบโดยที่ขนาดของแบบจำลองมีอัตราส่วน 10 : 1300 ของรถขนาดจริง



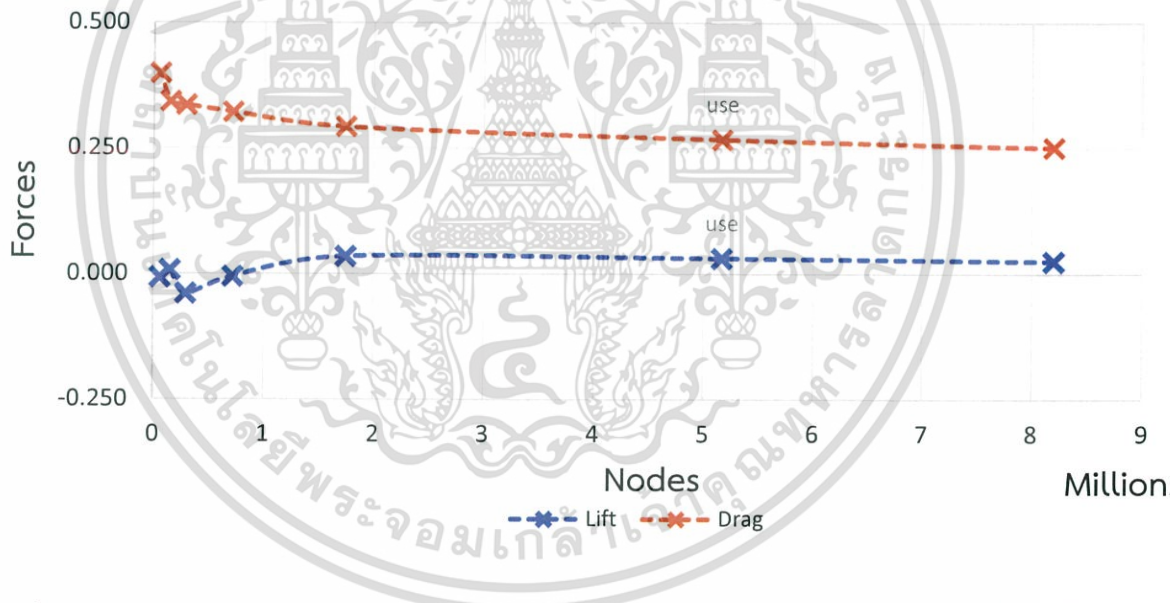
รูปที่ 4.21 แบบจำลองของรถแข่งและจุดยึดในซอฟต์แวร์ SimScale

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pre-processing

เลือกใช้ Mesh Refinement เป็น Surface Refinement level 4 (min) ถึง 5 (max) สำหรับตัวรถและจุดยึด กำหนด Region Refinement level 2 และ Feature Refinement dist. 0.5 m. level 2 ความกว้าง ความสูง ระยะด้านหน้า และ ระยะด้านหลัง เป็น 2 2 3 5 เท่าของความยาวชิ้นทดลอง ตามลำดับ โดยแบบทดสอบที่นำมาศึกษานั้นประกอบไปด้วยจุดยึดและชิ้นทดสอบเพื่อความคล้ายคลึงกับการทดลองในอุโมงค์ลม ดังรูป 4.21

ทำการคำนวณเบื้องต้นเพื่อทดสอบความเป็นอิสระของผลลัพธ์จากความละเอียด Mesh (Mesh independence) โดยใช้เงื่อนไขความเร็วอากาศอิสระทางเข้า 11.1 เมตรต่อวินาที ใช้สมการการไหลแบบ Turbulence flow โดยใช้ SST k-omega model ในการคำนวณ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างผล CFD Simulation กับความละเอียดของ Mesh ดังนี้รูปที่ 4.22 โดยเส้นสีส้มแสดงถึงแรงต้านและเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงแรงยกที่กระทำต่อตัวรถ



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของผลลัพธ์จาก CFD Simulation กับจำนวน Node ที่ความเร็ว 11.1 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.22 พบว่า CFD Simulation ไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดเมื่อ Mesh ที่ใช้มีความละเอียดมากกว่าหรือเท่ากับประมาณ 5,000,000 Nodes หรือก็คือ 5,000,000 Nodes ขึ้นไป เป็นความละเอียดที่เพียงพอในการทำ CFD Simulation สำหรับกรณีศึกษานี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Simulation

ทำการคำนวณด้วย K-omega SST turbulence model เพื่อทดสอบการทำงานของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้ภายในโปรแกรม SimScale ใช้ Time step ขนาด 1 วินาที ตามค่าเริ่มต้นของโปรแกรม SimScale โดยมีเงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Conditions) ดังนี้

1. ความเร็วอากาศ ณ ทางเข้า 30 – 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
2. ความดันทางออก 0 กิโลปาสคาล
3. ผิวขอบของ Boundary Box ที่พื้นเป็นแบบ Slip Wall
4. ผิวขอบของ Boundary Box ที่พื้นเป็นแบบ non - Slip Wall ที่ตำแหน่งพื้น
5. พื้นผิวชิ้นทดสอบเป็นแบบ Non-slip Wall

กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) และคุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่าน รวมถึงการตั้งค่าอื่น ๆ ตามการตั้งค่าเริ่มต้นของซอฟต์แวร์ SimScale

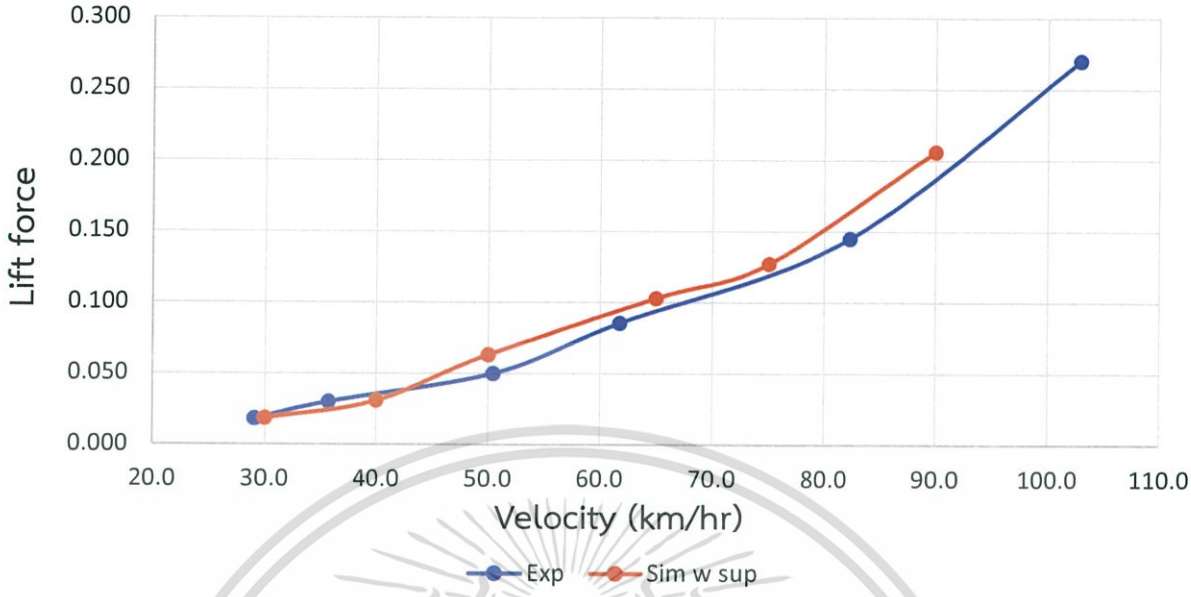
Post-processing

เมื่อการทำ CFD Simulation ให้ค่าผลลัพธ์ที่ลู่เข้าค่า ๆ หนึ่งแล้วสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังตารางที่ 4.9 แสดงถึง แรงยก แรงต้าน และค่าสัมประสิธิ์ของแรงยกและแรงต้าน ณ ความเร็ว 30 ถึง 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นทำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองอุโมงค์ลม โดยเปรียบเทียบ แรงยก แรงต้าน สัมประสิทธิ์ของแรงยกและแรงต้าน ดังรูปที่ 4.26 4.24 4.25 4.26 ตามลำดับ

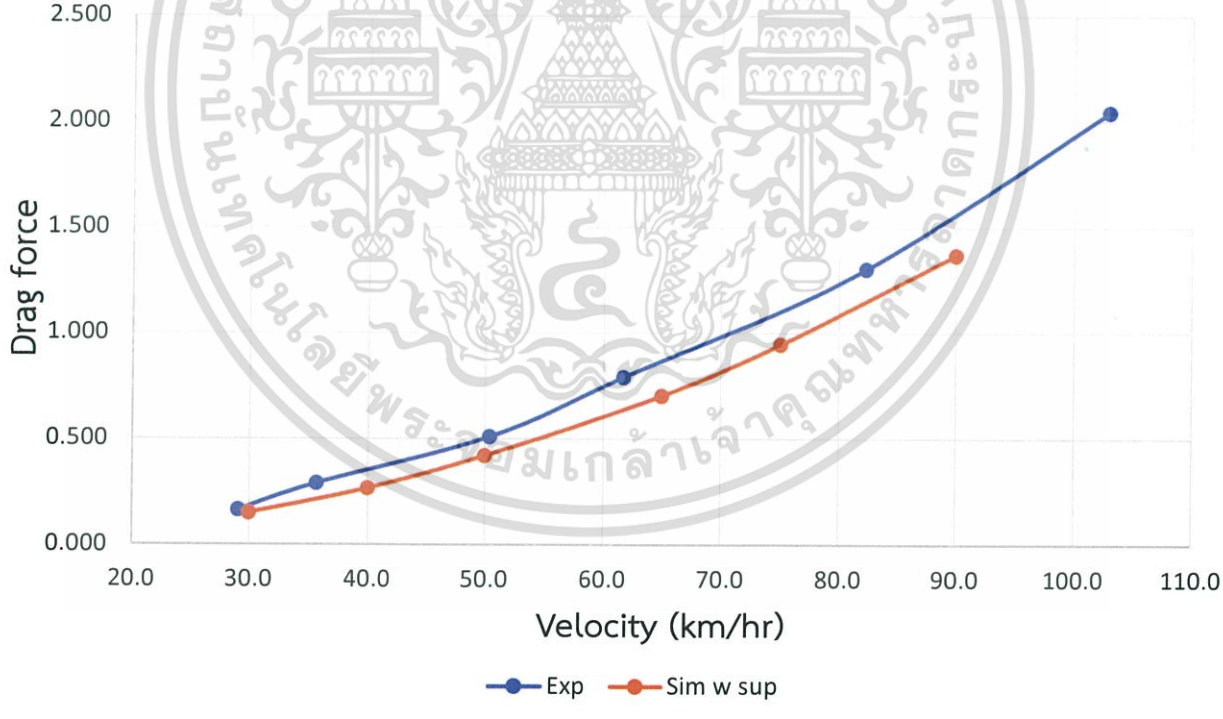
ตารางที่ 4.9 ผล CFD Simulation แรงต้านและแรงยกที่เกิดจากอากาศไหลผ่านรถแข่ง ณ ความเร็วต่าง ๆ

Velocity (km/h)	Velocity (m/s)	Lift force (N)	Drag force (N)	Cl	Cd
30	8.3	0.0185	0.151	0.0804	0.655
40	11.1	0.0309	0.268	0.0756	0.655
50	13.9	0.0632	0.423	0.0990	0.662
65	18.1	0.103	0.705	0.0955	0.653
75	20.8	0.127	0.947	0.0886	0.659
90	25.0	0.206	1.37	0.0996	0.662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

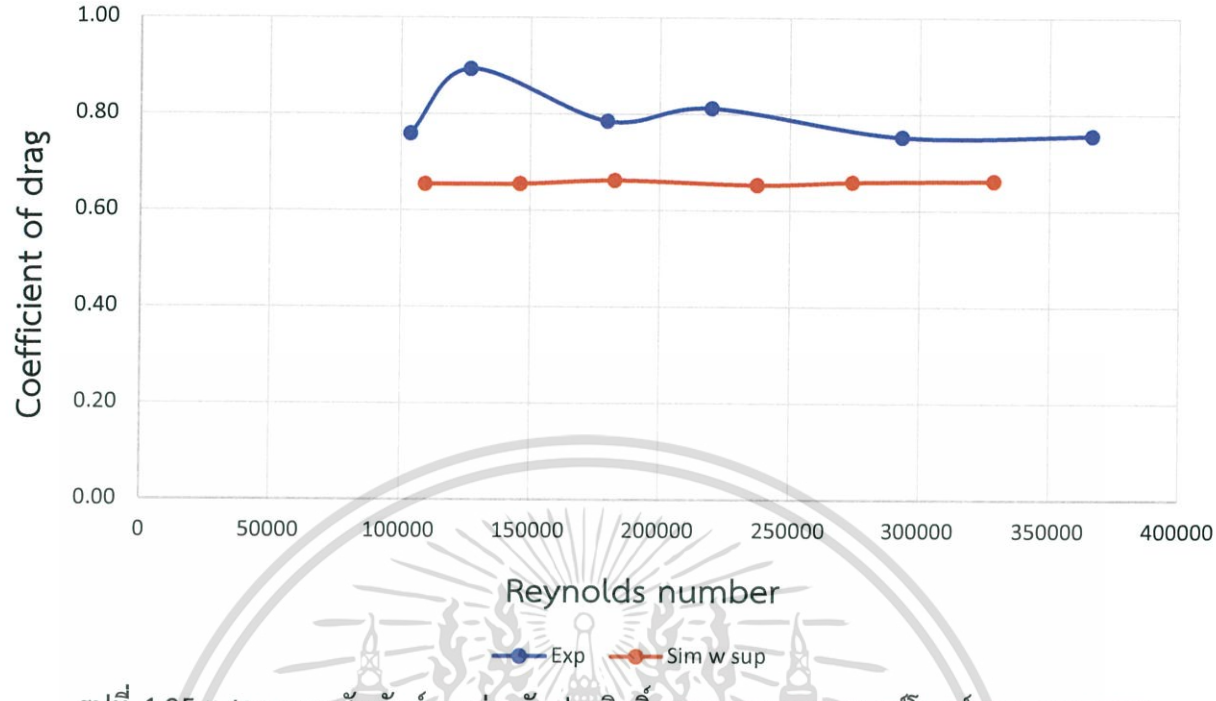


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation

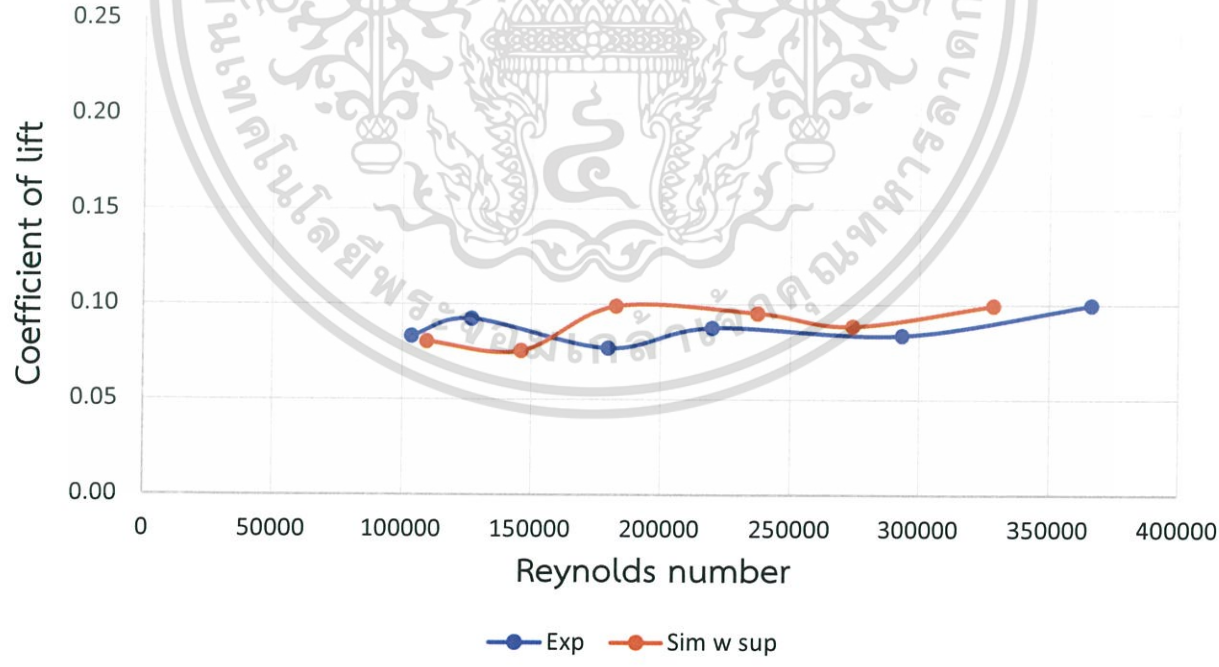


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและความเร็วของการทดลองอุโมงค์ลม และ CFD Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



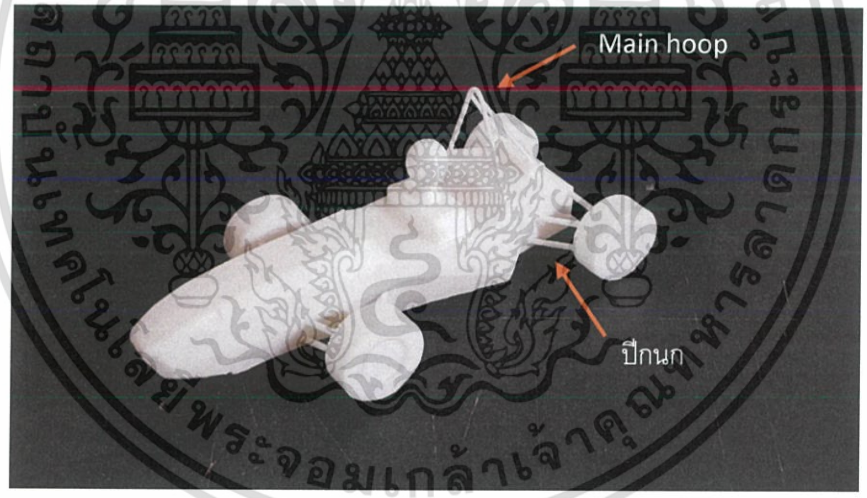
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงยกและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านและเลขเรย์โนลด์ของการทดลองอุโมงค์ลมและ CFD Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลของการทำ CFD Simulation เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของอุโมงค์ลม พบว่าผลลัพธ์ต่าง ๆ เช่น แรงยก แรงต้าน และสัมประสิทธิ์ของแรงยกและแรงต้านมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สังเกตุได้ว่าค่าของแรงต้านจากการทดลองในอุโมงค์ลมมีค่าที่มากกว่าการทำ CFD Simulation ในทุกช่วงความเร็ว สาเหตุมาจากการย่ออัตราส่วนรถลงมาที่ 10 : 1300 เท่าของขนาดเดิมส่งผลให้เครื่อง 3D printing ไม่สามารถสร้างชิ้นงานบางส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตรได้ ผู้ทดลองจึงแก้ไขโดยการเพิ่มความหนาของจุดยึดบางส่วนยกตัวอย่างเช่น ปีกนก และ Main hoop ดังที่แสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นลักษณะของทรงกระบอกเพื่อให้สามารถสร้างชิ้นงานสำหรับการทดสอบได้ ขนาดที่เพิ่มมานั้นเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดให้แก่ชิ้นงานโดยรวมจึงส่งผลให้แรงต้านมีแนวโน้มที่สูงกว่าการทำ CFD Simulation ทว่าการเพิ่มความหนาของจุดยึดที่เป็นทรงกระบอกนั้นไม่ส่งผลมากกับค่าแรงยกเนื่องจากในทางทฤษฎีแล้วการไหลของของไหลผ่านทรงกระบอกได้ผลลัพธ์เพียงแรงต้านเท่านั้น



รูปที่ 4.27 แสดงถึงตำแหน่งที่ถูกขยายขึ้นเป็น 2 มิลลิเมตร

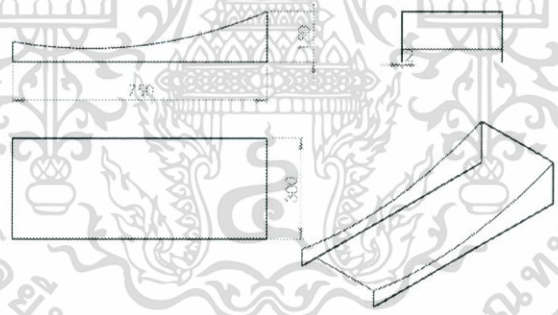
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การดำเนินการ

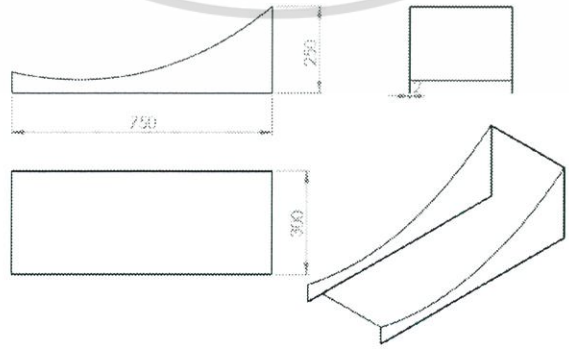
5.1 สมมติฐานการออกแบบดิฟฟิวเซอร์แยกจากรถ

อย่างที่ได้กล่าวในบทที่ 3 การออกแบบดิฟฟิวเซอร์โดยทำการวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์ติดไปกับตัวรถเป็นการวิเคราะห์ซึ่งใกล้เคียงความจริงแต่เป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากต้องทำการคำนวณบนรถแข่งทั้งคันมีรูปทรงที่ซับซ้อน ผู้ทำการวิจัยจึงตั้งสมมติฐานว่า “การวิเคราะห์เชิงตัวเลขดิฟฟิวเซอร์แยกจากตัวรถให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับการวิเคราะห์ดิฟฟิวเซอร์ติดกับตัวรถ” ซึ่งการคำนวณเชิงตัวเลขเพียงดิฟฟิวเซอร์ทำให้ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าเนื่องจากไม่ต้องประสบกับการคำนวณตัวรถที่มีความซับซ้อน อย่างที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 3.5

สมมติฐานดังกล่าวถูกพิสูจน์โดยทำการออกแบบรูปทรงพื้นฐานของดิฟฟิวเซอร์จำนวน 3 ชิ้น ให้ชื่อว่า A, B และ C มีขนาดดังรูป 5.1, 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกับดิฟฟิวเซอร์ทั้งสาม ทั้งแบบแยกจากรถและติดกับตัวรถเพื่อเปรียบเทียบกัน

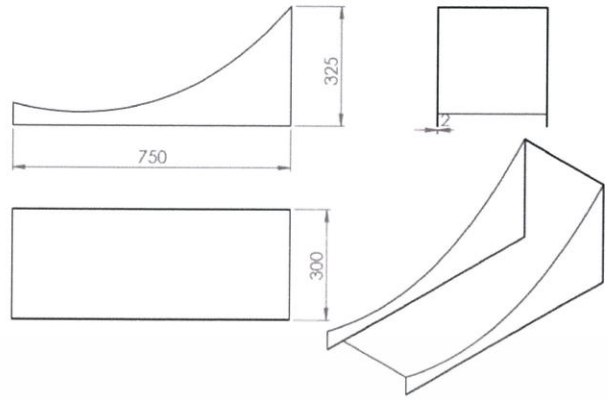


รูปที่ 5.1 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ A



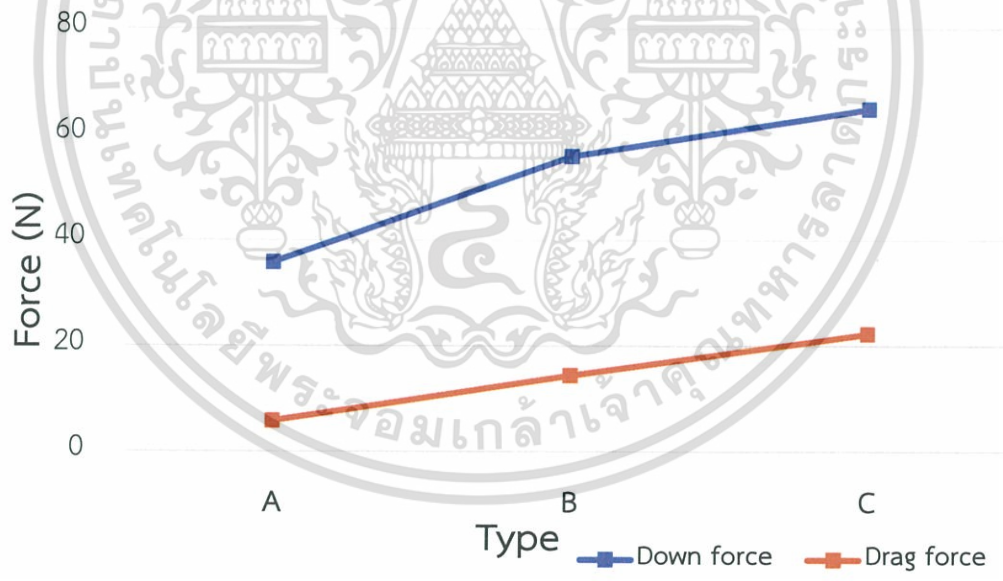
รูปที่ 5.2 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



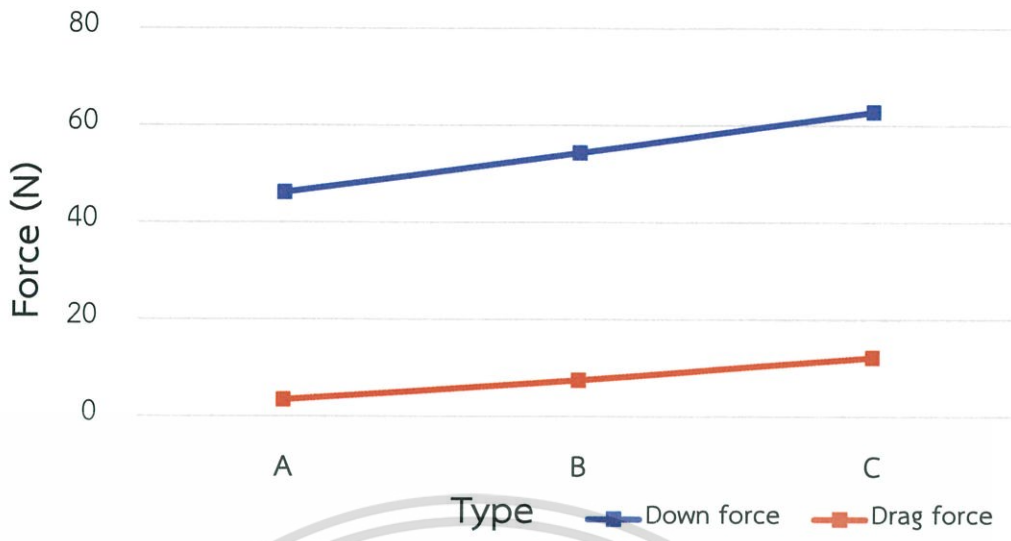
รูปที่ 5.3 ขนาดของดิฟฟิวเซอร์ C

ในการคำนวณกำหนดความเร็ว 11.1 เมตรต่อวินาที ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.4 เส้นสีส้มและสีน้ำเงินแสดงแรงต้านและแรงยกตามลำดับโดยดิฟฟิวเซอร์แยกจากรถ และผลลัพธ์ดังรูปที่ 5.5 เส้นสีส้มและสีน้ำเงินแสดงแรงต้านและแรงยกตามลำดับโดยดิฟฟิวเซอร์ติดอยู่กับตัวรถ



รูปที่ 5.4 แผนภาพการเปรียบเทียบ CFD Simulation ดิฟฟิวเซอร์ A, B และ C แบบแยกจากรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 แผนภาพการเปรียบเทียบ CFD Simulation ดิฟฟิวเซอร์ A, B และ C แบบติดกับรถ

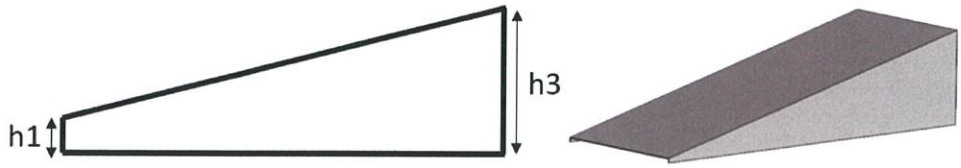
ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองแบบมีค่าแตกต่างกัน แต่เห็นได้ว่าการคำนวณทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน เพื่อประหยัดทรัพยากรการคำนวณจึงเลือกใช้การคำนวณแบบแยกจากรถในการออกแบบดิฟฟิวเซอร์ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อไป

5.2 การออกแบบดิฟฟิวเซอร์

5.2.1 ขั้นตอนที่หนึ่ง

ขั้นตอนที่หนึ่งนี้เริ่มต้นการออกแบบด้วยรูปทรงดิฟฟิวเซอร์ที่พื้นฐานที่สุดซึ่งเป็นลักษณะแผ่นเรียบดังรูปที่ 5.6 ตัวแปร **h1** และ **h3** บอกความสูงฝั่งขาเข้าและขาออกของดิฟฟิวเซอร์ กำหนดค่า **h1** เท่ากับ 10 มิลลิเมตร กำหนดความกว้างและความยาวเป็นค่าสูงสุดตามที่กติกากำหนดเท่ากับ 300 มิลลิเมตร และ 750 มิลลิเมตร เริ่มศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นโดยผู้ทดลองเพิ่มความสูงฝั่งขาออกเป็นสัดส่วนต่อความสูงฝั่งขาเข้าจนกระทั่งความสูงฝั่งขาออกถึงค่าที่กติกากำหนดคือ 350 มิลลิเมตร กำหนดให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว 10.68 เมตรต่อวินาที ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ CFD simulation ถูกบันทึกในตารางที่ 5.1 แสดงถึงแรงกดที่กระทำของแต่ละอัตราส่วนความสูง จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงดังรูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกด (เส้นสีน้ำเงิน) และสัดส่วนความสูงขาออกต่อความสูงขาเข้า ขั้นตอนนี้สรุปได้ว่าเมื่อความสูงขาออกของดิฟฟิวเซอร์มากขึ้นแรงกดมีค่ามากขึ้น

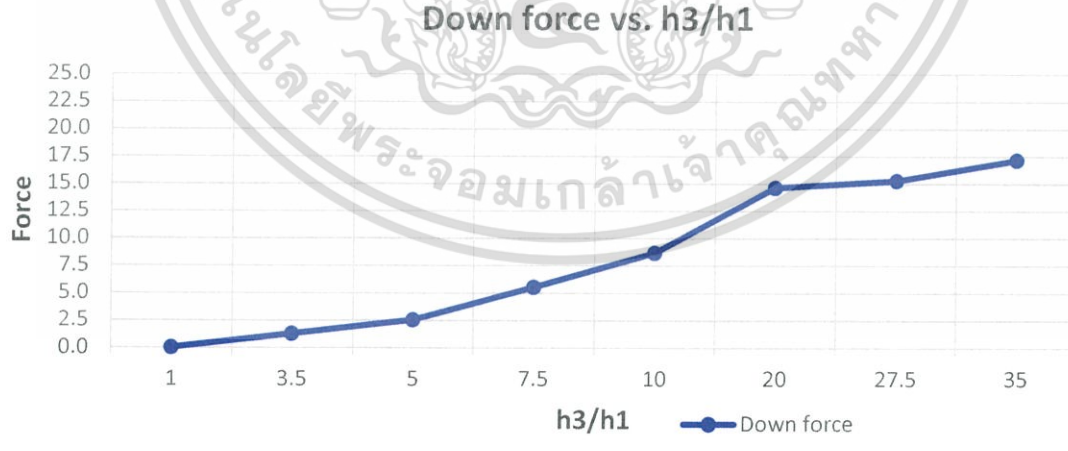
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ

ตารางที่ 5.1 แรงกดที่กระทำของแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation

h1 (mm)	h3/h1	Down force (N)
10	1	0.017
	3.5	1.28
	5	2.54
	7.5	5.55
	10	8.69
	20	14.6
	27.5	15.3
	35	17.2

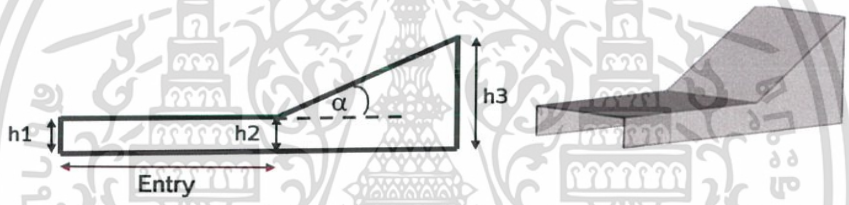


รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูง

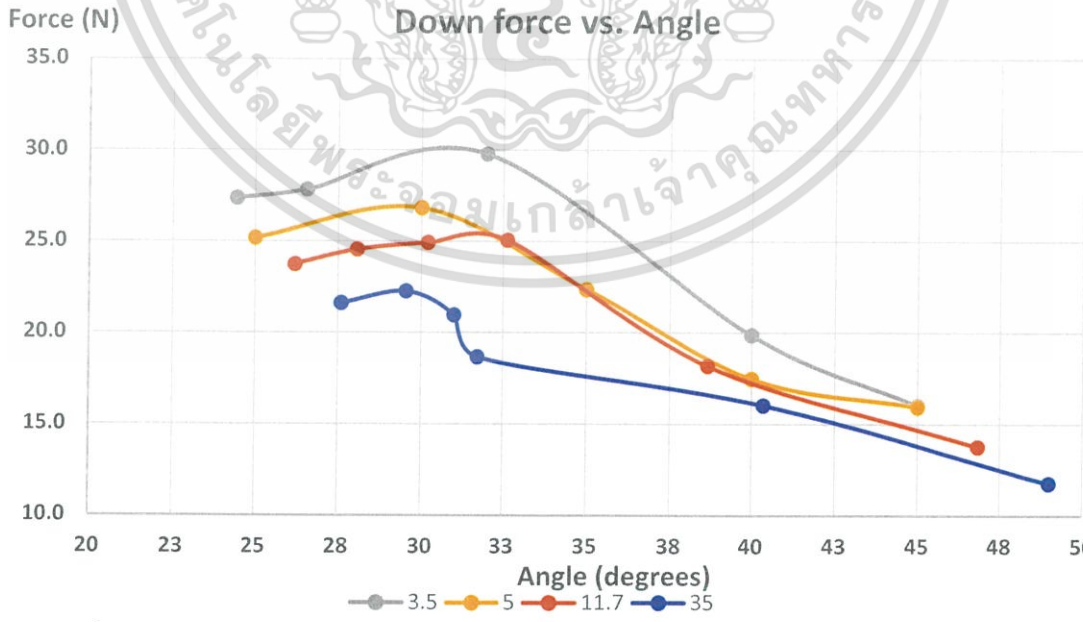
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ขั้นตอนที่สอง

หลังจากพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของฝั่งขาออกขึ้นแรงกดเพิ่มขึ้น ขั้นตอนที่สองนี้ได้ทำการดัดแปลงรูปทรงดิฟฟิวเซอร์จากขั้นตอนที่หนึ่งด้วยการเพิ่มระยะขาเข้า (Entry) กำหนดให้ความสูงทั้งระยะนี้เท่ากับความสูงของฝั่งขาเข้าดังแสดงในรูปที่ 5.8 ตัวแปรคือ h2 ความสูงของระยะขาเข้ากำหนดให้มีค่าเท่ากับความสูงขาเข้า มุมฝั่งขาออกกำหนดด้วยตัวแปร α ให้ความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 300, 750 และ 350 มิลลิเมตร ตามลำดับ กำหนดให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว 10.68 เมตรต่อวินาที ทำการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นที่สัดส่วนความสูง 3.5 5 11.7 และ 35 โดยการเปลี่ยนมุมขาออกจากนั้นบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ CFD Simulation ลงในตารางที่ 5.2 จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟ ดังรูปที่ 5.9 เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ของแต่ละสัดส่วนความสูงเมื่อทำการเปลี่ยนมุมขาออก จากการศึกษาขั้นตอนที่สองนี้พบว่าแรงกดที่กระทำลดลงตามสัดส่วนความสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่มุมขาออกเท่ากันและมุมขาออกที่ทำให้เกิดแรงกดมากที่สุดอยู่ในช่วง 28 ถึง 32 องศา



รูปที่ 5.8 ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบและมีระยะขาเข้า (Entry)



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

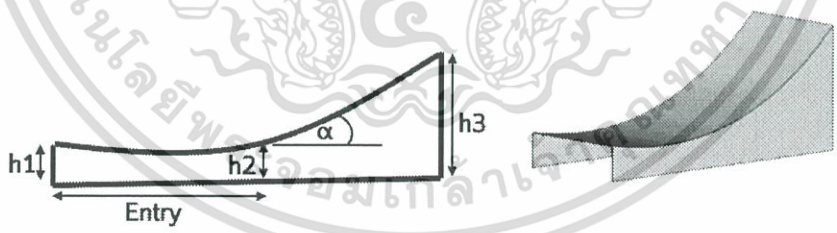
ตารางที่ 5.2 แรงกดที่กระทำเมื่อเปลี่ยนมุมขาออกในแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation

h3/h1	Outlet angle (degrees)	Down force (N)
3.5	24	27.4
	27	27.8
	32	29.8
	40	19.9
	45	16.0
5.0	25	25.2
	30	26.8
	35	22.4
	40	17.5
	45	16.0
11.7	26	23.8
	28	24.6
	30	24.9
	33	25.1
	39	18.2
	47	13.8
35	28	21.6
	30	22.3
	31	21.0
	32	18.7
	40	16.0
	49	11.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ขั้นตอนที่สาม

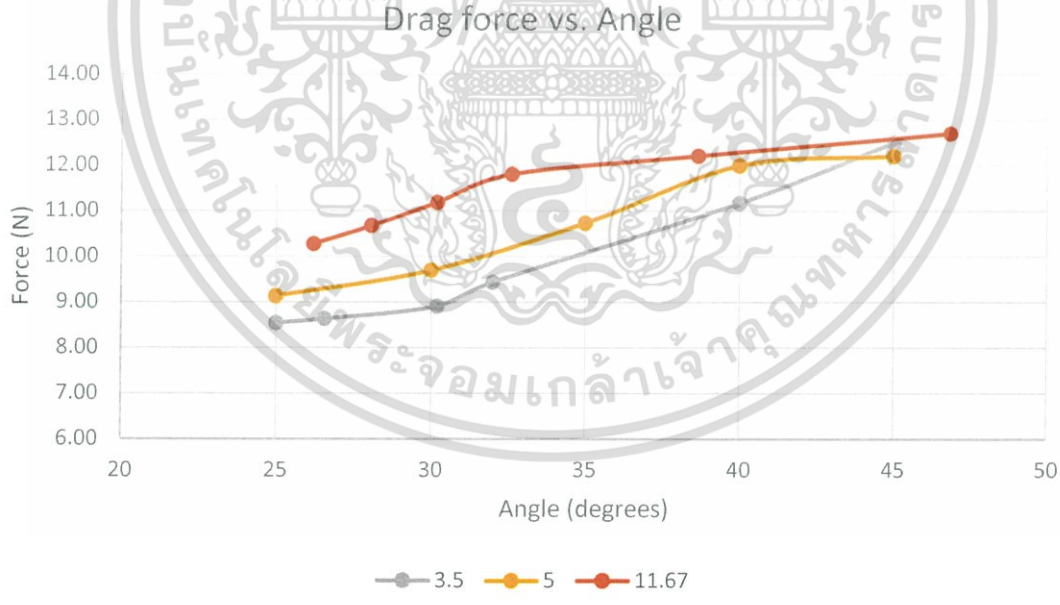
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการศึกษาเพื่อหารูปทรงที่ให้แรงกดมากที่สุด โดยขั้นตอนนี้ได้นำรูปทรงจากขั้นตอนที่สองมาต่อยอดด้วยการเปลี่ยนลักษณะผนังด้านบนจากแบบเรียบมาเป็นแบบส่วนโค้ง (Spline) ดังรูปที่ 5.10 ลักษณะการออกแบบนั้นอ้างอิงจากขั้นตอนที่สองทั้งหมดแต่ปรับเปลี่ยนวิธีการสร้างผนังด้านบนด้วยวิธีการสร้างเส้นโค้งที่ผ่านจุดยอดสามจุดคือ 1.ที่ความสูงฝั่งขาเข้า 2.ที่ระยะขาเข้า (entry) 3.ที่ความสูงฝั่งขาออก และกำหนดมุมฝั่งขาออกแบบเดียวกับขั้นตอนที่สอง ให้อากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว 10.68 เมตรต่อวินาที ทำ CFD Simulation ลักษณะเดียวกับขั้นตอนที่สอง จากนั้นบันทึกผลลัพธ์ที่ได้ดังตารางที่ 5.3 นำผลลัพธ์ที่ได้ไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลดังรูปที่ 5.11 แสดงถึงแรงกดที่กระทำเมื่อเปลี่ยนมุมขาออกของแต่ละสัดส่วนความสูง พฤติกรรมของดิฟฟิเซอร์ในขั้นตอนที่สามนี้มีแนวโน้มแบบเดียวกับในขั้นตอนที่สองคือ เมื่อสัดส่วนความสูงมากขึ้นแรงกดที่กระทำน้อยลง จากการเปรียบเทียบแรงกดกับขั้นตอนที่สองพบว่าการสร้างดิฟฟิวเซอร์ที่มีลักษณะผนังด้านบนเป็นส่วนโค้ง (Spline) ให้แรงกดที่มากกว่าแบบเรียบถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงมุมขาออก 28-32 องศา ผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกดิฟฟิวเซอร์ที่มีสัดส่วนความสูงขาออกต่อความสูงขาเข้าเท่ากับ 3.5 และมุมขาออกเท่ากับ 32 องศา ซึ่งให้ค่าแรงกดที่มากที่สุดเท่ากับ 34.4 N นอกจากนั้นแล้วสัดส่วนความสูงนี้ยังให้ผลของแรงต้านที่น้อยที่สุดเท่ากับ 8.67 N ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.10 ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง (Spline)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและสัดส่วนความสูงเมื่อมุมขาออกเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แรงกดที่กระทำเมื่อเปลี่ยนมุมขาออกในแต่ละสัดส่วนความสูงจาก CFD Simulation

h3/h1	Outlet angle (degrees)	Down force (N)	Drag force (N)
3.5	25	33.1	8.54
	27	33.5	8.63
	30	34.0	8.91
	32	34.4	9.43
	40	32.8	11.2
	45	28.6	12.5
5.0	25	32.9	9.14
	30	33.2	9.70
	35	32.5	10.7
	40	30.0	12.0
	45	24.5	12.2
11.7	26	30.8	10.3
	28	30.8	10.7
	30	30.5	11.2
	33	29.8	11.8
	39	27.9	12.2
	47	23.8	12.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การแสดงผลและวิเคราะห์ลักษณะการไหล

ผลลัพธ์จากการ Simulation ในหัวข้อ 5.2 สนใจแรงกดโดยรวมของทั้งดิฟฟิวเซอร์ที่แยกจากตัวรถและแรงกดโดยรวมของรถทั้งคันที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์ดิฟฟิวเซอร์ หัวข้อ 5.3 สนใจลักษณะการไหล รวมทั้งการวิเคราะห์ผลเพื่ออธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงกดและแรงต้าน โดยลักษณะการไหลที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้คือความเร็วและความดันของอากาศที่ไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์

ตามหลักการของ Bernoulli บริเวณที่มีความเร็วสูงมีความดันต่ำ และในทางกลับกันบริเวณที่ความเร็วต่ำมีความดันสูง หลักการดังกล่าวอยู่ภายใต้สมมติที่ว่าการไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้และเป็นการไหลมีความเป็นระเบียบ (Laminar flow) ทั้งความเร็วและความดันมักมีค่าต่ำในบริเวณที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

เพื่อความสะดวก งานวิจัยนี้เลือกสนใจดิฟฟิวเซอร์เพื่อแสดงผลและวิเคราะห์ลักษณะการไหลเพียง 3 รูปแบบเท่านั้น คือ

1. **ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ มุม 32 องศา** ให้แรงกดข้างละ 26.8 นิวตัน
2. **ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 45 องศา** ให้แรงกดข้างละ 28.6 นิวตัน
3. **ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา** ให้แรงกดข้างละ 34.4 นิวตัน

ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา เป็น ดิฟฟิวเซอร์ที่ให้แรงกดสูงสุด (จากหัวข้อ 5.2) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ มุม 32 องศา ทำให้ทราบความแตกต่างระหว่างการไหลผ่านแผ่นโค้งกับแผ่นเรียบ และเมื่อนำดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา มาเปรียบเทียบกับดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 45 องศา ทำให้ทราบว่าลักษณะการไหลเปลี่ยนแปลงอย่างไรจากการเปลี่ยนมุมของดิฟฟิวเซอร์

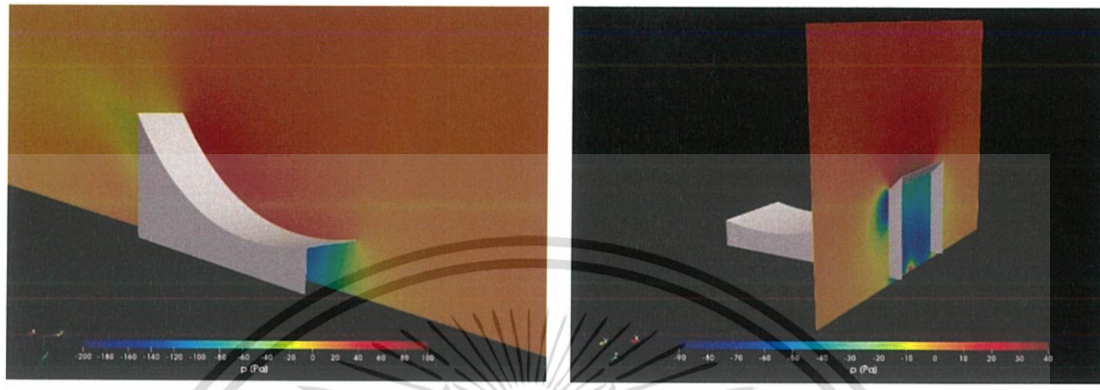
5.3.1 การแสดงผลลักษณะการไหลด้วยซอฟต์แวร์ ParaView

ParaView เป็นฟรีแวร์ ที่ใช้ลักษณะการไหลในการแสดงผลลัพธ์จากการ Simulation ที่มาจากซอฟต์แวร์ที่มีพื้นฐานจาก OpenFoam เช่น SimScale โดยทำการดาวน์โหลดผลลัพธ์จากการ Simulation จาก SimScale มาทำการแสดงผลด้วย ParaView ในคอมพิวเตอร์บุคคล

งานวิจัยนี้สนใจลักษณะการไหลภายในดิฟฟิวเซอร์ที่แยกจากตัวรถเป็นหลักตามที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 5.1 โดยทำการแสดงผล 2 มุมมอง ดังรูปที่ 5.13 คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

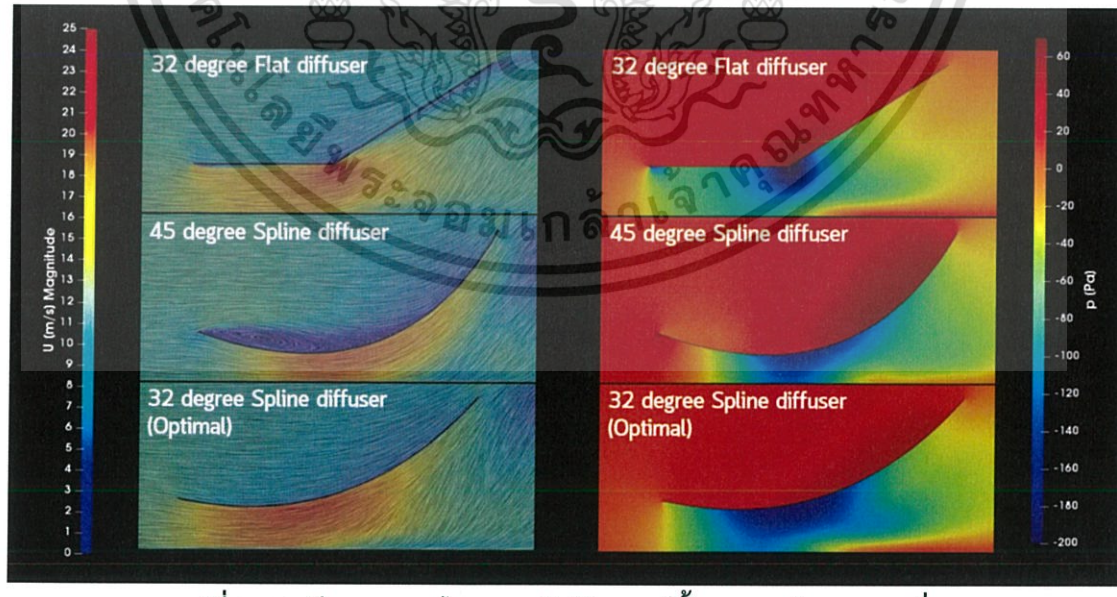
1. **มุมมองที่ 1** มองจากด้างข้างตัวรถ แสดงผลข้อมูลการไหลที่กึ่งกลางดิฟฟิวเซอร์
2. **มุมมองที่ 2** มองจากด้างหลังตัวรถ แสดงผลข้อมูลการไหลที่ 10 มิลลิเมตรจากทางออก



รูปที่ 5.13 การแสดงผลลักษณะการไหลตามมุมมองที่ 1 (ซ้าย) และมุมมองที่ 2 (ขวา)

5.3.2 การแสดงผลและวิเคราะห์ลักษณะการไหลในมุมมองที่ 1

ผลลัพธ์การ Simulation ลักษณะการไหลในมุมมองที่ 1 ของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ ถูกแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ลักษณะการไหลของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบในมุมมองที่ 1

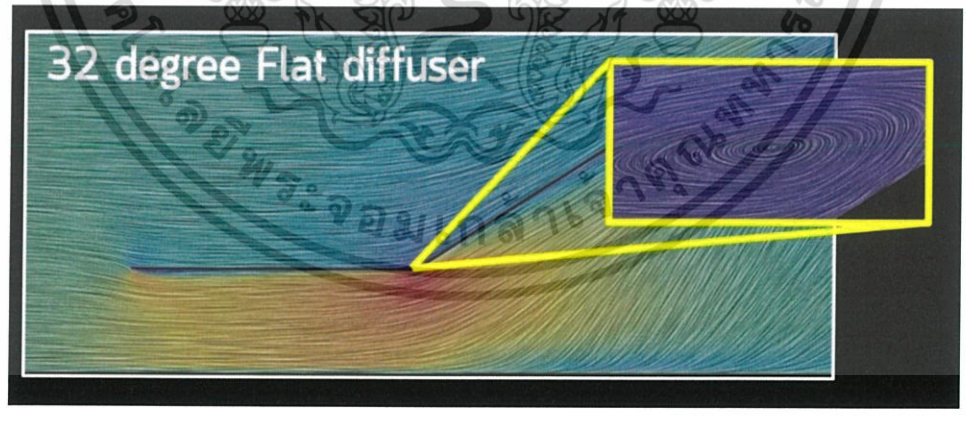
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาความดัน แรงกดของดิฟฟิวเซอร์มีค่ามากก็ต่อเมื่อผลต่างความดันบริเวณด้านบนและด้านล่างดิฟฟิวเซอร์มีค่ามาก กล่าวคือด้านบนมีความดันสูงและด้านล่างมีความดันต่ำ ซึ่งเกิดจากการที่ด้านบนมีความเร็วต่ำกว่าด้านล่างเมื่อไม่มีความปั่นป่วนหรือ Vortex เนื่องจาก Vortex ทำให้ทั้งความดันและความเร็วมีค่าต่ำ ดังนั้นการเกิด Vortex ด้านบนดิฟฟิวเซอร์จึงเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยง

ดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ มีเร็วด้านล่างสูงกว่าความเร็วด้านบน แต่ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา ให้ค่าแรงกดสูงกว่าอีก 2 แบบ เนื่องจากไม่มี Vortex บริเวณด้านบน ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่กล่าวมาข้างต้น

เปรียบเทียบดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา กับดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 45 องศา เห็นชัดเจนได้ว่าดิฟฟิวเซอร์มุม 45 องศา มี Vortex เกิดขึ้นที่ด้านบนซ้ายส่งผลให้ความดันลดลง เทียบกับดิฟฟิวเซอร์มุม 32 องศา ทำให้แรงกดของดิฟฟิวเซอร์มุม 32 องศา มีค่าสูงกว่า

เปรียบเทียบดิฟฟิวเซอร์แบบโค้ง มุม 32 องศา กับดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ มุม 32 องศา เห็นได้ว่าสำหรับด้านล่างดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบบริเวณความเร็วสูงมีขนาดเล็กกว่าและกระจุกรวมกันใกล้จุดที่มีการหักมุม ทำให้บริเวณความดันต่ำมีขนาดเล็กกว่า เปรียบเทียบกับด้านล่างดิฟฟิวเซอร์แบบโค้งที่บริเวณความเร็วสูงมีขนาดกว้างกว่า ทำให้มีบริเวณความดันต่ำที่กว้างกว่า ส่งผลให้ดิฟฟิวเซอร์แบบโค้งมีแรงกดมากกว่า นอกจากนี้ดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบมี Vortex ขนาดเล็กเกิดขึ้นด้านบนจุดที่มีการหักมุม ดังรูปที่ 5.15 ทำให้สูญเสียความดันด้านบนดิฟฟิวเซอร์ เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ทำให้แรงกดของดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบน้อยกว่าแบบโค้ง

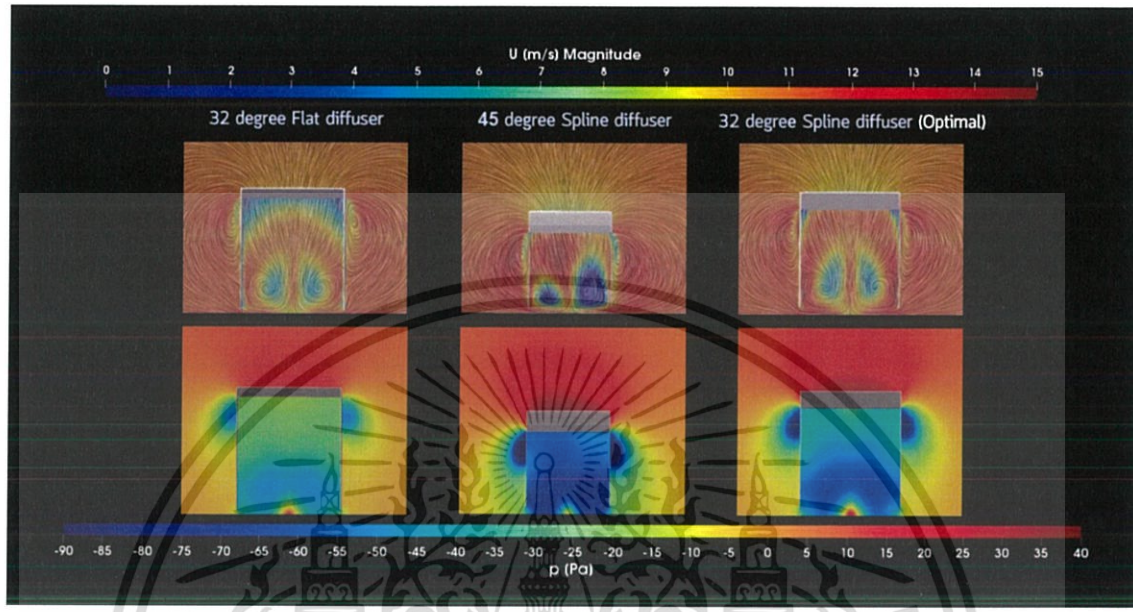


รูปที่ 5.15 ภาพขยายเพื่อแสดงการหมุนวนขนาดเล็กที่เกิดด้านบนดิฟฟิวเซอร์แบบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 การแสดงผลและวิเคราะห์ลักษณะการไหลในมุมมองที่ 2

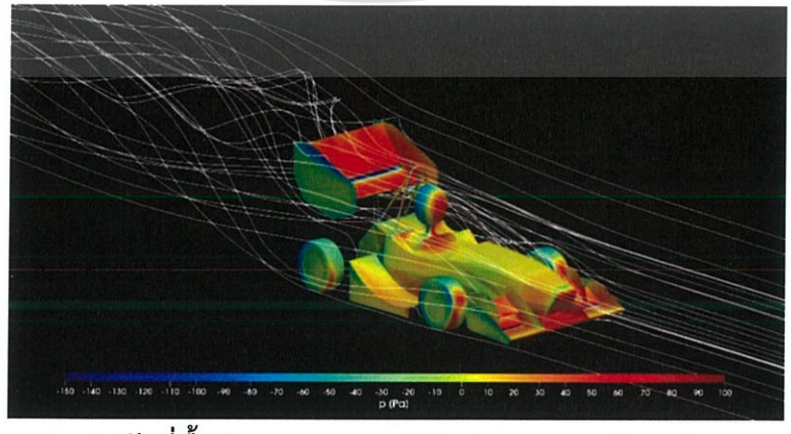
ผลลัพธ์การ Simulation ลักษณะการไหลในมุมมองที่ 2 ของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ ถูกแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ลักษณะการไหลของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบในมุมมองที่ 2

พิจารณาความเร็วและความดันของดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ เห็นได้ว่าดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 มี Vortex เกิดขึ้นด้านล่างดิฟฟิวเซอร์ทั้ง 3 แบบ Vortex เหล่านี้ส่งผลให้ความดันด้านล่างดิฟฟิวเซอร์มีค่าต่ำทำให้เกิดแรงกด ในขณะที่ Vortex ที่เกิดด้านข้างส่งผลต่อแรงแนวข้างจึงไม่ส่งผลต่อแรงกด

นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ ParaView ยังสามารถแสดงผลความดันที่พื้นผิวของรถทั้งคันพร้อมแสดงทั้ง Velocity Streamline ใน 3 มิติ ดังรูป 5.17 โดยเลือกแสดง Velocity Streamline แบบสุ่มจำนวณ 40 เส้น



รูปที่ 5.17 ความดันที่พื้นผิวของรถ และ Velocity Streamline จำนวณ 40 เส้น

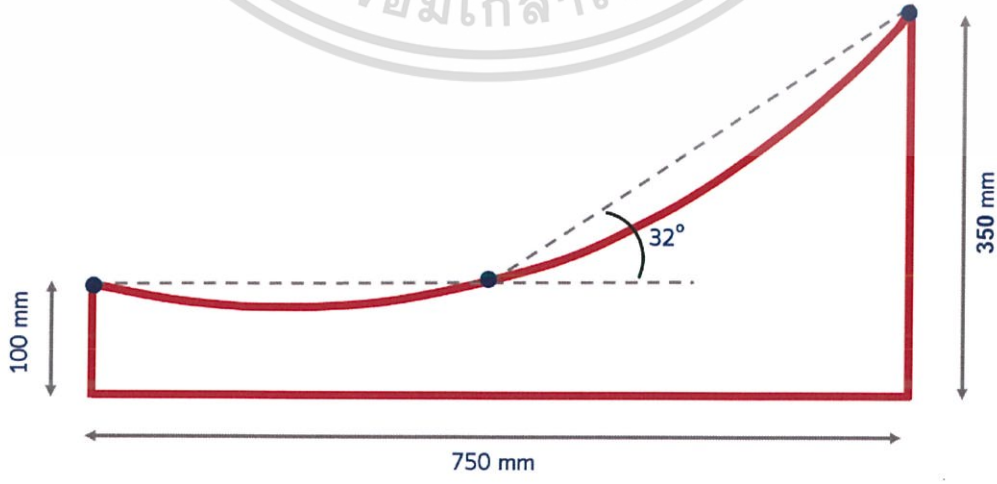
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผล

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการเพิ่มความสามารถในการเข้าโค้งของรถแข่งโดยใช้การแข่งขัน Formula SAE รายการ Skidpad เป็นตัวอ้างอิง โดยบทที่ 3 กล่าวถึงการตั้งเวลาเป้าหมายเป็น 4.90 วินาทีต่อรอบ ซึ่งสามารถคำนวณแรงกดเป้าหมายได้เป็น 196 N หรือสัมประสิทธิ์แรงยก 2.81

บทที่ 4 กล่าวถึง Validation โดยหัวข้อ 4.1 เป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของอุโมงค์ลม เพื่อที่จะใช้การทดลองอุโมงค์ลมยืนยันความน่าเชื่อถือของผล Simulation ต่อไป ได้ข้อสรุปว่าชุดทดลองอุโมงค์ลมที่มีในภาควิชาเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มที่ถูกต้อง หัวข้อ 4.2 และ 4.3 เป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของผล Simulation ของดิฟฟิวเซอร์และรถตามลำดับ ได้ข้อสรุปว่าผล Simulation ให้ค่าแรงกดและแรงต้านที่มีแนวโน้มสอดคล้องและมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจากอุโมงค์ลม

การดำเนินการออกแบบดิฟฟิวเซอร์กล่าวถึงในบทที่ 5 โดยหัวข้อ 5.1 กล่าวถึงตัวเลือกการออกกแบบดิฟฟิวเซอร์ระหว่างแบบแยกจากรถและแบบติดกับตัวรถซึ่งได้ข้อสรุปว่าการผล Simulation ทั้งสองแบบให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน เจึงเลือกใช้แบบแยกจากตัวรถในการออกแบบต่อไปเพื่อประหยัดเวลาและทรัพยากรณ์การคำนวณ การออกแบบดิฟฟิวเซอร์ในหัวข้อ 5.2 โดยใช้การ Simulation ที่ถูกรับรองจากบทที่ 4 Validation ได้รูปแบบของดิฟฟิวเซอร์ที่ให้แรงกดสูงสุดดังรูปที่ 6.1 โดยความกว้าง ความยาว ความสูงด้านหน้า และความสูงด้านหลังมีค่า 300, 750, 100 และ 350 มิลลิเมตร ตามลำดับ และค่าดังกล่าวทำให้มุมมีค่า 32 องศา



รูปที่ 6.1 ดิฟฟิวเซอร์ที่ให้แรงกดสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใต้กติการของการออกแบบของ Formula Society of Automotive Engineers ได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มความสูงด้านหลังส่งผลให้แรงกดมีค่ามากขึ้น แต่ความสูงดังกล่าวถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์ด้านข้างของตัวรถได้แก่กล่อง ECU และหม้อน้ำ การวิเคราะห์ลักษณะการไหลหัวข้อ 5.3 ทำให้ทราบว่า มุมของดิฟฟิวเซอร์ควรมีค่าประมาณ 32 องศา เพื่อให้ได้แรงกดสูง เนื่องจากเป็นมุมที่ไม่เกิด Vortex บริเวณด้านบนของดิฟฟิวเซอร์ทำให้ความดันด้านบนสูงกว่าดิฟฟิวเซอร์มุมอื่น ผิวด้านบนที่เป็นแผ่นเรียบทำให้เกิด Vortex ส่งผลให้แรงกดลดลงเช่นกัน จึงควรเลือกใช้แผ่นโค้ง และการเพิ่มอัตราส่วนความสูงด้านหลังต่อความสูงด้านหน้าส่งผลให้แรงกดลดลง

ทำ Simulation ดิฟฟิวเซอร์ดังกล่าวแบบแยกจากตัวรถทำให้ได้ผลแรงกด แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงต้าน ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการ Simulation แบบแยกจากรถ ของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้จริง

แรงกด (นิวตัน)	68.8
แรงต้าน (นิวตัน)	18.9
สัมประสิทธิ์แรงยก	4.89
สัมประสิทธิ์แรงต้าน	1.34

ทำ Simulation รถแข่งทั้งคันที่ถูกติดตั้งดิฟฟิวเซอร์ดังกล่าว ทำให้ได้ได้ผลแรงกด แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงต้านดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการ Simulation แบบติดกับรถ ของดิฟฟิวเซอร์ที่ใช้จริง

	เฉพาะดิฟฟิวเซอร์	รถทั้งคัน
แรงกด (นิวตัน)	67.8	207
แรงต้าน (นิวตัน)	8.67	101
สัมประสิทธิ์แรงยก	4.82	2.98
สัมประสิทธิ์แรงต้าน	0.617	1.45

จากตารางที่ 6.2 แรงกดของรถทั้งคันมีค่า 207 นิวตัน หรือสัมประสิทธิ์แรงยก 2.98 ซึ่งสูงกว่าเป้าหมาย 196 นิวตัน หรือสัมประสิทธิ์แรงยก 2.81 ที่ได้จากบทที่ 3 จึงถือว่าการออกแบบประสบความสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] https://www.sae.org/

[2] Trikaewcharoen, J., Mungkhung, M., Pilakanta, P. 2017. **Applying Aerodynamics for Formula Student**. KMITL.

[3] Khunphakdee, P., Saowara, W., 2015. **Development of Front and Rear Wings for Formula-SAE Car Racing**. KMITL.

[4] Rastogi, N., Shetty, S. and B Ashok. 2017. **Analysing the effects of air flow on a formula prototype vehicle to optimize its performance**. doi:10.1088/1757899X/263/6/062033.

[5] Alsaway, T., Gawad, A. 2017. **Computational Investigation of the Aerodynamics of "Formula One" Car Model**. IUGRC July 24-27, 2017.

[6] Gutierrez, J., Nuñez, A., Quintero, D. 2013. **Development of a Formula SAE Body 100% Report**. FIU April 12, 2013.

[7] Wordley, S. and Saunders, J. 2006. **Aerodynamics for Formula SAE: Initial Design and Performance Prediction**. SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2006-01-0806

[8] Hulett, B. Hulett, B. **Sports Car Graphic No. 5 "Chevrolet's Ground-Effects Car"**

[9] Lyons, P. 1995. **Can-Am**. Motorbooks International.

[10] Jones, B., 1996. **The Ultimate Encyclopaedia of Formula One**, Book People.

[11] Jowsey, L. 2013. **An experimental study of automotive underbody diffusers.** Loughborough University.

[12] Buljac, A. 2016. **Aerodynamic Performance of The Underbody and Wings of an Open-Wheel Race Car**. Doi;10.21278/TOF.40202.

[13] Amal Seba Thomas, T. **Effect of Diffuser Height and Angle on Performance of FSAE Car**. ISSN No: 2309-4893.

[14] Biswal, S. 2016. **Design and Optimization of the Diffuser for the Formula SAE Car for Improved Performance**. WCE2016_pp1161-1164.

[15] Wright, P., **Formula 1 Technology**, SAE International, 2001

[16] Versteeg, H. K., Malalasekera, W. 2007. **An Introduction to Computational**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fluid Dynamics THE FINITE VOLUME METHOD Second Edition. Pearson Education Limited 1995, 2007

[17] Katz, J. 1996. **Race Car Aerodynamics Designing for Speed**. Bentley Publishers

[18] Munson, B., Young, D., Okiishi, T., Huebsch, W. 2009. **Fundamental of Fluid Mechanics 6th edition.** John Wiley & Sons

[19] Steven A.,Orszag. 1970. **Analytical theories of turbulence** DOI: 10.1017/S0022112070000642

[20] Menter, F. R. (1994), **"Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications"**, AIAA Journal, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.

[21] D. Tritton. **Experiments on the flow past a circular cylinder at low Reynolds numbers**. Journal of Fluid Mechanics, 6547-567, 1959.

[22] FSAE Rules 2019 version 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

กติกาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ

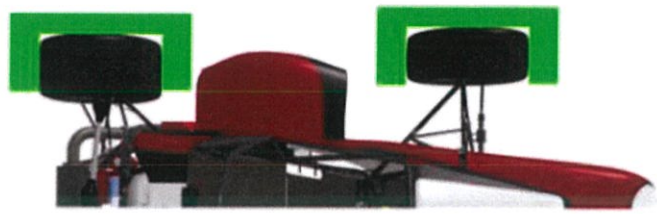
1. การออกแบบทั่วไป

1.1 โครงสร้างรถ

ตัวรถต้องเป็นแบบล้อเปิด และ ห้องคนขับเปิด (คล้ายกับรถสูตร) และมี 4 ล้อที่ไม่ได้เรียงเป็นแนวเดียวกัน

รถที่เป็นแบบล้อเปิดต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนดังนี้

1. ครึ่งบนของล้อรถจะต้องไม่ถูกบดบังเมื่อมองจากด้านบนของตัวรถ
2. ล้อและยางของรถจะต้องไม่ถูกบดบังเมื่อมองจากด้านข้างของตัวรถ
3. ห้ามมิให้มีชิ้นส่านใด ๆ ของรถเข้ามาอยู่ในบริเวณ keep out zone แสดงด้วยพื้นที่สีเขียว บริเวณถูกกำหนดด้วยเส้นตรงที่ลากเป็นแนวตั้งอยู่ห่าง 75 มิลลิเมตรจากหน้ายางด้านหน้า และ 75 มิลลิเมตรจากหน้ายางด้านหลัง บริเวณมี้มีความกว้างจากขอบนอกของล้อไปจนถึงขอบในของล้อ



รูปที่ 1 รูปแสดง keep out zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ฐานล้อ

รถจะต้องมีระยะฐานล้ออย่างน้อย 1525 มิลลิเมตร ฐานล้อวัดจากจุดศูนย์กลางของพื้นหน้าสัมผัสของยางหน้าและล้อหลังโดยมีล้อที่ชี้ตรงไปข้างหน้า

1.3 ระยะห่างล้อซ้าย-ขวา

ระยะห่างล้อซ้าย-ขวาและจุดศูนย์ถ่วงเมื่อรวมกันแล้วต้องมีเสถียรภาพเพียงพอเพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ และ ระยะห่างล้อซ้าย-ขวาที่แคบกว่า(หน้า หรือ หลัง)จะต้องกว้างไม่น้อยกว่า 75% ของระยะห่างของคู่ที่กว้างกว่า

1.4 ความสูงจากพื้น

ความสูงจากพื้นจะต้องเพียงพอเพื่อป้องกันส่วนหนึ่งส่วนใดของรถยกเว้นยางจากการสัมผัสพื้นในระหว่างแข่งขัน dynamic event

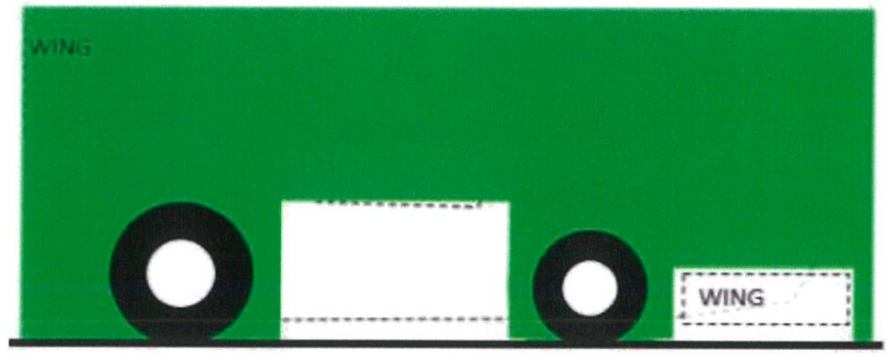
2. อุปกรณ์แอโรไดนามิก

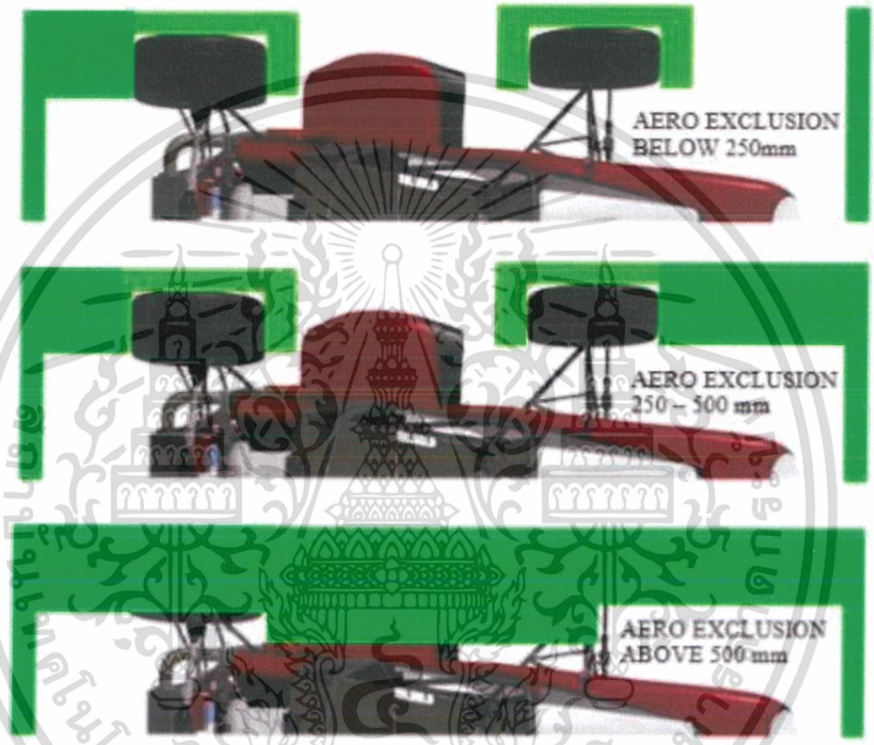
1. เป็นชิ้นส่วนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแนวทางในการไหลของอากาศสำหรับการสร้างแรงกดและการลดแรงต้าน ตัวอย่างเช่นปีก, undertray , splitter, endplates, vanes
2. ห้ามใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในการเคลื่อนย้ายอากาศออกจากใต้ท้องรถยกเว้นพัดลมที่ออกแบบมาเพื่อระบายความร้อนโดยเฉพาะ ห้ามใช้กำลังในการสร้าง ground effect
3. อุปกรณ์แอโรไดนามิกทั้งหมดต้องได้รับการออกแบบเพื่อให้ระบบติดตั้งมีความแข็งแรงเพียงพอในสภาวะคงที่และอุปกรณ์แอโรไดนามิกไม่สั่นหรือเคลื่อนที่มากเกินไปเมื่อรถกำลังเคลื่อนที่
4. ข้อจำกัดสำหรับอุปกรณ์แอโรไดนามิกทั้งหมดวัดโดยที่ล้อที่ชี้ไปในตำแหน่งตรงไปข้างหน้า

2.1 การติดตั้งระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง

1. ในพื้นที่ระหว่างเส้นกึ่งกลางของเพลาล้อหน้าและล้อหลังอุปกรณ์แอโรไดนามิกอาจขยายด้านข้างจนถึงเส้นที่ลากเชื่อมต่อกับพื้นผิวด้านนอกของล้อหน้าและล้อหลังที่ความสูงของศูนย์กลางล้อ
2. อุปกรณ์แอโรไดนามิกใด ๆ หรือชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ตั้งอยู่ระหว่างแกนกลางเพลาด้านหน้าและเพลาด้านหลังจะต้องมีความสูงไม่เกิน 500 มิลลิเมตร เหนือพื้นดิน เมื่อวัดโดยไม่มีคนขับในยานพาหนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 2 พื้นที่อนุญาตสำหรับอุปกรณ์แอโรไดนามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

กติกาที่เกี่ยวข้องกับการแข่งขัน

1. การแข่งขัน Skidpad

1.1 ลักษณะสนาม Skidpad

1. วงกลมศูนย์กลางสองคู่ในรูปเลขแปด
2. ระยะห่างระหว่างวงกลมสองวง 18.25 เมตร
3. เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมด้านใน 15.25 เมตร
4. เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมด้านใน 21.25 เมตร
5. ความกว้างของเส้นทางสนาม 3 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้