หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา
AERODYNAMICS FOR FORMULA STUDENT

จักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ
ณัฐพล มั่งคั่ง
ปณต พิละกันทา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

AERODYNAMICS FOR FORMULA STUDENT

จักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ

ณัฐพล มั่งคั่ง

ปณต พิละกันทา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AERODYNAMICS FOR FORMULA STUDENT

JUKARIN TRIKAEWCHAROEN
NATTHAPON MUNGKHUNG
PANOD PILAKANTA

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 LADKRABANG
2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

AERODYNAMICS FOR FORMULA STUDENT

ผู้จัดทำ

1. นาย จักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ รหัสประจำตัว 57010165
2. นาย ณัฐพล มั่งคั่ง รหัสประจำตัว 57010446
3. นาย ปณต พิละกันทา รหัสประจำตัว 57010728

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.บำรุง พ่วงเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา

นายจักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ 57010165
นายณัฐพล มั่งคั่ง 57010446
นายปณต พิละกันทา 57010728
ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ในการแข่งขัน Formula SAE (Society of Automotive Engineers) ซึ่งนักศึกษาจากมหาวิทยาลัยทั่วโลกได้สร้างรถแข่งเพื่อเข้าร่วมการแข่งขัน และทีม Initial จากชมรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้สร้างและพัฒนารถแข่งเข้าร่วมการแข่งขัน Thailand Formula SAE มากกว่าทศวรรษ ในฐานะที่ผู้วิจัยรับผิดชอบหน้าที่ในแผนกอากาศพลศาสตร์ จึงได้นำเอาความรู้จากหลักอากาศพลศาสตร์เข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ของรถแข่ง โดยทำการทดสอบอุโมงค์ลมและทดสอบ CFD ด้วยโปรแกรม SIMSCALE เพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์แรงยกเป็น -2 และสัมประสิทธิ์แรงต้านไม่เกิน 1.78 จากการติดตั้ง ปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect ทั้งนี้เป้าหมายสูงสุดคือการสามารถเพิ่มความเร็วในการเข้าโค้งได้อย่างปลอดภัยซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการเอาชนะเหนือคู่แข่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AERODYNAMICS FOR FORMULA STUDENT

Jukarin Trikaewcharoen 57010165
Natthapon Mungkhung 57010446
Panod Pilakanta 57010728
Dr. Bumroong Puangkird Advisor
Year 2560

ABSTRACT

Formula SAE (Society of Automotive Engineers) is the competition for university students around the world since 1980. Initial team from automotive club KMITL has been creating and developing the racing car for Thailand Formula SAE over a decade. As a member of Aerodynamics department of the team, we have decided to apply Aerodynamics principles for developing aerodynamics packages for the racing car by employing wind tunnel and CFD simulation by SIMSCALE. Our archived goal is the lift coefficients of -2 and drag coefficient not over 1.78 from installing rear wings, front wings and ground effect devices to increase cornering velocity within safety zone which is a crucial point for defeating over the competition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือในด้านคำแนะนำ การตรวจแก้ไข การติดตามความก้าวหน้าในการทำปริญญานิพนธ์ การดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีและสม่ำเสมอตลอดการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.บำรุง พ่วงเกิด ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้ความรู้ คำแนะนำในเรื่องของการใช้อุโมงค์ลมและให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์การใช้อุโมงค์ลม ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.จำลอง ปราบแก้ว ที่ให้ใช้สถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์ ขอขอบคุณนายภูริศ ขุนภักดี นายกายธัศ บรรพพงศ์ รวมไปถึงศิษย์เก่าและศิษย์ปัจจุบันชมรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นที่ปรึกษาเฉพาะด้าน รวมไปถึงให้ความอนุเคราะห์ในการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงานนี้

นายจักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ
นายณัฐพล มั่งคั่ง
นายปณต พิละกันทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 แผนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ	3
บทที่ 2 สถิติและข้อมูลการแข่งขัน	4
2.1 การกำหนดแรงกดที่ต้องการ	6
2.2 การกำหนดและควบคุมแรงต้านอากาศ	8
บทที่ 3 พลศาสตร์ของอากาศของรถแข่ง	10
3.1 คุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)	10
3.2 แรงต้าน (Drag force)	13
3.3 แรงยกและแรงกด (Lift force and Down force)	15
3.4 แพนอากาศ (Aerofoil)	17
3.5 อุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic devices)	21
3.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)	24
3.7 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีการทดสอบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม SIMSCALE	28
4.1 Preprocessing-meshing	29
4.2 Processing-simulation	36
4.3 Post-processing	49
บทที่ 5 วิธีดำเนินการ	51
5.1 การเลือกแบบปีก	51
5.2 การทดลองด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง	51
5.3 การทดลอง CFD simulation ของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง	59
5.4 การออกแบบอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์	63
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	70
6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	70
6.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก. กติกาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดแอโรไดนามิกส์ที่ใช้กับรถสูตรนักศึกษา	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
2.1 สถิติการแข่งขันในต่างประเทศ	5
2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของรถแข่ง	7
2.3 แสดงการคำนวณเปรียบเทียบความเร็วที่สามารถเข้าโค้งได้ที่รัศมีโค้งต่างๆ	7
5.1 แสดงผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation ที่มุมปะทะ 10 องศา ที่ความเร็วต่างกัน	56
5.2 ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าโดยติดตั้ง Endplates	58
5.3 ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าโดยไม่ติดตั้ง Endplates	58
5.4 ผลการทดลองจากการ CFD simulation โดยติดตั้ง Endplates	59
5.5 ผลการทดลองจากการ CFD simulation โดยไม่ติดตั้ง Endplates	59
5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่า	61
5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน ที่ได้จากการ CFD simulationของปีกขนาด 0.15 เท่า	61
5.8 แสดงผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์	63
5.9 ผลการทดสอบปีกหลังด้วย CFD simulation	65
5.10 แสดงแรงกดจากการทดสอบด้วย CFD simulation	66
5.11 แสดงแรงต้านจากการทดสอบด้วย CFD simulation	67
5.12 แสดงแรงกดหลังจากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect	68
5.13 แสดงแรงต้านหลังจากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นทางการแข่งขันในรายการ Skid pad	4
2.2 แผนภาพวัตถุแสดงการเข้าโค้งของรถแข่ง	6
3.1 การไหลภายใต้ความเค้นเฉือนแบบไม่มีการลื่นไถล	11
3.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน	12
3.3 แรงดันด้านหน้าของตัวรถที่เกิดจากแรงต้านของอากาศ	13
3.4 บริเวณด้านท้ายของรถที่เป็นสุญญากาศ	14
3.5 การไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ต่างๆของรถ	14
3.6 การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านรูปทรงต่างๆที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน	15
3.7 การเกิดแรงยก แรงกด และแรงต้านบนตัวรถ	16
3.8 ปีก (Wing) และ Aerofoil (A), มุมปะทะ (α) ของ Aerofoil (B)	17
3.9 Streamline ของ Aerofoil (A),การกระจายความดันของ Aerofoil (B)	18
3.10 การกระจายตัวของแรงดันบน Aerofoil	18
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_L กับมุมของการปะทะ (α) และการเพิ่ม Camber	19
3.12 Boundary layer ที่เกิดขึ้นบน Aerofoil	20
3.13 Multi-element aerofoil	20
3.14 การเปรียบระหว่างปีกที่ติด Endplates กับปีกที่ไม่ได้ติด Endplates	21
3.15 Scoops/Positive pressure intakes	22
3.16 NACA duct (National Advisory Committee for Aeronautics duct)	22
3.17 Spoiler	22
3.18 Diffuser	23
3.19 Venturi effect	23
3.20 อุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel)	27
3.21 อุโมงค์ลมแบบปิด (Close wind tunnel)	27
4.1 Geometry ของ Front wing	28
4.2 แสดงขั้นตอนการอัพโหลด Geometry (CAD)	29
4.3 แสดงการกำหนด Operation ในการตี Mesh	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงการกำหนดค่า Background mesh box	30
4.5 แสดงการกำหนดค่า Material point	30
4.6 แสดงการสร้าง Cartesian box	31
4.7 แสดงการกำหนดขนาดของ Cartesian box	31
4.8 แสดงการสร้าง Cartesian box ขนาดเล็กและกำหนดขนาดเพื่อความละเอียด	32
4.9 แสดงการกำหนดความละเอียดของ Mesh โดยเมนู Mesh refinement	32
4.10 แสดงการกำหนดค่า Surface refinement	33
4.11 แสดงการกำหนดค่า Feature refinement	33
4.12 แสดงการกำหนดค่า Region refinement ในส่วน Inner cartesian box	34
4.13 แสดงการกำหนดค่า Region refinement ในส่วน Outer cartesian box	34
4.14 แสดงการกำหนดค่า Inflate boundary layers	35
4.15 แสดงการกำหนดค่า Bounding box layers addition	35
4.16 แสดงการ Start mesh operation	36
4.17 แสดงการกำหนดค่าในส่วนของ Simulation designer	36
4.18 กำหนดชื่อในการ Simulation	37
4.19 แสดงการเลือกประเภทในการวิเคราะห์	37
4.20 แสดงการกำหนด Mesh ที่ใช้ในการ Simulation	38
4.21 แสดงการเลือกประเภท Materials	38
4.22 แสดงการเลือก Material จาก Library	39
4.23 กำหนด Air เป็น Material ของของไหล	39
4.24 แสดงการเลือกบริเวณที่ต้องการให้ของไหลไหลผ่าน	40
4.25แสดงการกำหนดค่า K (Turbulent kinetic energy value)	40
4.26 แสดงการกำหนดค่า omega (Specific turbulence dissipation rate)	41
4.27 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions	41
4.28 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Inlet	42
4.29 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Outlet	42
4.30 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Slip wall	43
4.31 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Symmetry	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Floor	44
4.33 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Front wing	44
4.34 แสดงการกำหนดค่า Numeric method	45
4.35 แสดงการกำหนดค่า Simulation control	45
4.36 แสดงกำหนดค่า Result control	46
4.37 แสดงการกำหนด Forces and moment ของ Main wing	46
4.38 แสดงการกำหนด Forces and moment ของ Flap	47
4.39 แสดงการกำหนดค่า Field calculations	47
4.40 แสดงการกำหนดค่า Field calculations ที่ 1	48
4.41 แสดงการกำหนดค่า Field calculations ที่ 2	48
4.42 แสดงการตรวจเช็คความผิดพลาด และ Start simulation	49
4.43 กราฟแสดงผล Force plot ของ Main wing	49
4.44 กราฟแสดงผล Force plot ของ Flap wing	50
4.45 แสดง Pressure gradient บนพื้นผิวของ Front wing	50
5.1 แพนอากาศ S1210 (Aerofoil S1210)	51
5.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอุโมงค์ลม	52
5.3 อุโมงค์ลมภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	52
5.4 ชุดโหลดเซลล์ที่ใช้อ่านค่า	53
5.5 ข้อมูลทางเทคนิคของโหลดเซลล์	53
5.6 ตัวอย่างการอ่านค่าที่ได้จากอุโมงค์ลม	53
5.7 Pitot tube ที่ใช้ในการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ลม	54
5.8 ระดับน้ำขณะที่ไม่มีความเร็ว	54
5.9 ชิ้นทดลอง 3 มิติ โดยติดตั้ง Endplates	55
5.10 ชิ้นทดลอง 3 มิติ โดยไม่ติดตั้ง Endplates	55
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับ Reynolds number	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับ Reynolds number	57
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับแรงที่เกิดขึ้นของปีกขนาด 0.15 เท่า ของขนาดจริงที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม	58
5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับแรงที่เกิดขึ้นที่ได้จากการ CFD simulation	60
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับมุมปะทะ	62
5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับมุมปะทะ	62
5.17 ผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์	63
5.18 แบบจำลองของปีกหลังพร้อมติดตั้ง Endplates	64
5.19 แบบจำลองของปีกหน้าพร้อมติดตั้ง Endplates	65
5.20 แบบจำลองการติดตั้งปีกหน้าและปีกหลังเข้ากับรถแข่ง	66
5.21 ภาพ ขนาดและรูปร่างของอุปกรณ์ Ground effect	67
5.22 ภาพ แบบจำลองอุปกรณ์ Ground effect ถูกติดตั้งไว้ใต้ท้องรถด้านข้างรถแข่ง	68
5.23 ผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งหลังติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

F_L	คือ	แรงยก (N)
F_D	คือ	แรงต้าน (N)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
v	คือ	อัตราเร็วของของไหล (m/s)
A	คือ	พื้นที่ที่วัตถุปะทะกับของไหล (m^2)
m	คือ	มวล (kg)
τ	คือ	ความเค้นเฉือน (N/m^2)
C_L	คือ	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
R	คือ	รัศมีโค้งของถนน (m)
μ_T	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของยางรถกับพื้นถนน
L_C	คือ	Characteristic length (m)
M	คือ	Mach Number
c	คือ	ความเร็วเสียง (m/s)
μ	คือ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล $(N \cdot s/m^2)$
u	คือ	ความเร็วในแนวแกน x (m/s)
v	คือ	ความเร็วในแนวแกน y (m/s)
w	คือ	ความเร็วในแนวแกน z (m/s)
F_x	คือ	แรงตามแนวแนวแกน x (N)
F_y	คือ	แรงตามแนวแนวแกน y (N)
F_z	คือ	แรงตามแนวแนวแกน z (N)
g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
g_x	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตามแนวแกน x (m/s^2)
g_y	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตามแนวแกน y (m/s^2)
g_z	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตามแนวแกน z (m/s^2)
P_s	คือ	ความดันสถิต (N/m^2)
P_d	คือ	ความดันจลน์ (N/m^2)
P_t	คือ	ความดันรวม (N/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การแข่งขันรถ Formula SAE (Society of Automotive Engineers) ถูกก่อตั้งขึ้นในปี 1981 โดยสมาคมวิศวกรยานยนต์ Society of Automotive Engineers (SAE) ในประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาพัฒนาความรู้และทักษะพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ในระดับมหาวิทยาลัย ในการแข่งขันกำหนดให้แต่ละทีมจากมหาวิทยาลัยออกแบบ สร้าง และทดสอบรถแข่งขนาดเล็ก แบบล้อเปิด 1 ที่นั่งภายใต้กฎกติกาการแข่งขันจาก Formula SAE การแข่งขันแบ่งออกเป็น 4 ประเภทคือ Acceleration Skid pad Autocross และ Endurance ในภายหลังการแข่งขัน Formula SAE ได้ถูกแพร่หลายไปยัง ยุโรป เอเชีย อเมริกาใต้ และออสเตรเลีย รวมไปถึงในประเทศไทย ซึ่งการแข่งขัน Formula SAE ในประเทศไทยหรือ TSAE จัดขึ้นโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งประเทศไทย โดยมีทีมเข้าร่วมการแข่งขันมากกว่า 20 ทีมในแต่ละปี

ชมรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ทำการออกแบบ และสร้างรถเข้าร่วมในการแข่งขันทุกปี โดยมีการพัฒนาต่อยอดประสิทธิภาพของตัวรถเพื่อให้สามารถทำคะแนน และเป็นทีมชั้นนำของประเทศ โดยในการสร้างรถเพื่อเข้าร่วมการแข่งขันนั้น ชมรมยานยนต์ได้แบ่งนักศึกษาออกเป็นแผนกต่างๆ เช่น

- ระบบช่วงล่าง (Suspension)
- ระบบเบรค (Brake system)
- ระบบเครื่องยนต์ (Engine system)
- ระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics system)
- เฟรม (Frame)
- อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics)

ซึ่งเป้าหมายในการค้นคว้าและพัฒนาของแต่ละแผนกคือ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนตัวรถและเพิ่มความเร็วให้กับรถที่สามารถเอาชนะคู่แข่งได้ ในฐานะผู้ทำการวิจัยได้รับผิดชอบในแผนกอากาศพลศาสตร์ จึงได้เล็งเห็นถึงการใช้ประโยชน์จากหลักอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) ที่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเร็วให้แก่รถแข่ง โดยประยุกต์ความรู้ที่ได้นำมาทำการทดสอบ และสร้างแบบจำลอง (Simulation) โดยใช้โปรแกรม SIMSCALE ในการจำลอง Computational Fluid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dynamics (CFD) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ให้ลิขสิทธิ์โดยไม่มีค่าธรรมเนียมแก่นักศึกษาในการทำวิจัยและหลังการทดสอบนำผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุดไปติดตั้งกับตัวรถจริง

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักพลศาสตร์ของอากาศที่สามารถสร้างแรงกดและเพิ่มความเร็วให้กับรถแข่ง
2. เพื่อศึกษาการออกแบบและพัฒนาแบบจำลอง ที่ใช้ในการทดสอบในสภาวะใกล้เคียงสภาวะแข่งขันจริง
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลอง ไปปรับใช้กับรถแข่งจริงได้
4. เพื่อเป็นแหล่งค้นคว้าและอ้างอิงให้กับสมาชิกชมรมยานยนต์และผู้ที่สนใจต่อไป

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาแบบจำลองรถแข่งจริงที่ใช้ในการแข่งขัน TSAE 2018 โดยมี 2 แบบคือ รถแข่งที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ Aerodynamics และ รถแข่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ Aerodynamics โดยอ้างอิงจากกติกาของการแข่งขัน Formula SAE ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบบนคอมพิวเตอร์ (CAD)
2. ใช้ CFD software เพื่อคำนวณ ค่า Drag coefficient และ Lift coefficient ที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ Aerodynamics รวมไปถึงผลที่ได้เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยใช้โปรแกรม SIMSCALE
3. เปรียบเทียบผล Simulation จาก CFD software นำมาวิเคราะห์และสรุป
4. นำผลทดสอบที่ได้ไปติดตั้งกับรถแข่งจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ศึกษาเนื้อหา Aerodynamics ในรถแข่ง และกฎกติกาในการแข่งขัน Formula SAE	←	→			
ศึกษาสถิติจากการแข่งขันที่ผ่านมา และกำหนดเป้าหมายที่ต้องการ		←	→		
ศึกษา CFD Simulation ด้วยโปรแกรม SIMSCALE		←	→		
ทำการ CFD Simulation ตัวอย่างชิ้นทดสอบ			←	→	
สร้างแบบจำลองสามมิติชิ้นทดสอบ และทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและเปรียบเทียบแนวโน้มกับผลที่ได้จาก CFD Simulation				←	→
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค
ทำการ CFD Simulation แบบจำลองที่ออกแบบเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ในแบบต่างๆ	←	→	→		
เปรียบเทียบผลที่ได้จากการ CFD Simulation ในแต่ละแบบ		←	→	→	
สรุปผลการ CFD Simulation				←	→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ

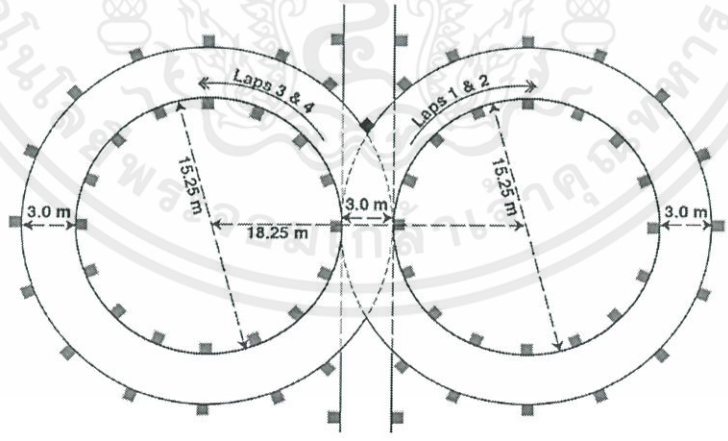
1. สามารถนำผลที่ได้จากการทดสอบ CFD simulation ที่สามารถเพิ่มแรงกด และความเร็วในการเข้าโค้ง ให้กับรถที่ใช้ในการแข่งขัน Formula SAE ได้
2. ได้รู้วิธีการใช้ CFD simulation พร้อมกับได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ
3. สามารถนำการวิจัยครั้งนี้ไปต่อยอดและประยุกต์ใช้กับรถในปีถัดๆไปของชมรมยานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
สถิติและข้อมูลการแข่งขัน

ในการกำหนดเป้าหมายของการค้นคว้า ได้เริ่มจากการรวบรวมสถิติการแข่งขันย้อนหลัง และนำเป้าหมายที่ตั้งไว้หาปัจจัยที่สามารถทำให้บรรลุเป้าหมายได้ โดยคำนวณจากคุณสมบัติพื้นฐานของตัวรถแข่งคันปัจจุบัน จากการแข่งขัน Formula SAE ประกอบไปด้วยการทดสอบทั้งหมด 4 ประเภท คือ

1. Acceleration เป็นการทดสอบอัตราเร่งในระยะ 75 เมตรในทางตรง
2. Autocross นักขับของแต่ละทีมต้องขับรถในสนามระยะทาง 1 กิโลเมตร ซึ่งมีทั้งทางตรง ทางโค้ง วิ่งซิกแซก และทางซิกแซก การแข่งขันนี้ประเมินประสิทธิภาพของการขับขี่ การควบคุมรถ ความสามารถในการเร่งและเบรกของรถ ทีมที่ได้คะแนนสูงสุดคือทีมที่ใช้เวลาในการวิ่งน้อยที่สุด
3. Endurance ใช้สนามเดียวกับการแข่ง Autocross แต่วิ่งเป็นระยะทางรวม 22 กิโลเมตร และเมื่อวิ่งไปถึงครึ่งทางต้องมีการเปลี่ยนนักขับ ระหว่างเปลี่ยนนักขับห้ามไม่ให้มีการเติมน้ำมันและการปรับแต่งต่างๆบนตัวรถ การแข่งขันนี้ใช้ประเมินความทนทานของตัวรถ
4. Skid pad เป็นการทดสอบการเข้าโค้ง ในรัศมีเฉลี่ย 8.5 เมตร โดยต้องวนรอบวงกลมฝั่งขวา 2 รอบ และวนฝั่งซ้าย 2 รอบรวมทั้งสิ้น 4 รอบ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางการแข่งขันในรายการSkid pad

เนื่องจากในการแข่งขัน Skid pad เป็นรายการที่มีรัศมีการเข้าโค้งน้อยที่สุด ทางทีมผู้ศึกษางานวิจัย จึงตัดสินใจใช้สถิติการแข่งขันนี้เป็นเป้าหมายหลักในการวิจัย เพื่อเพิ่มความเร็วในการเข้าโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สถิติการแข่งขันในต่างประเทศ

ประเทศที่แข่งขัน	เวลา (s)
England	4.627
Michigan	5.138
Germany	5.607
Japan	5.033

จากตารางที่ 2.1 เป็นสถิติสูงสุดในการแข่งขัน Skidpan จากทีมต่างประเทศ ที่รัศมีความโค้ง 8.5 เมตร สถิติจากทีมอันดับที่ 1 ในการแข่งขัน TSAE Auto Challenge 2017 ทำเวลา 22.85 วินาที หรือ 5.71 วินาทีต่อ 1 รอบ ทีม Initial จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำเวลา 24.04 วินาที หรือ 6.01 วินาทีต่อ 1 รอบ

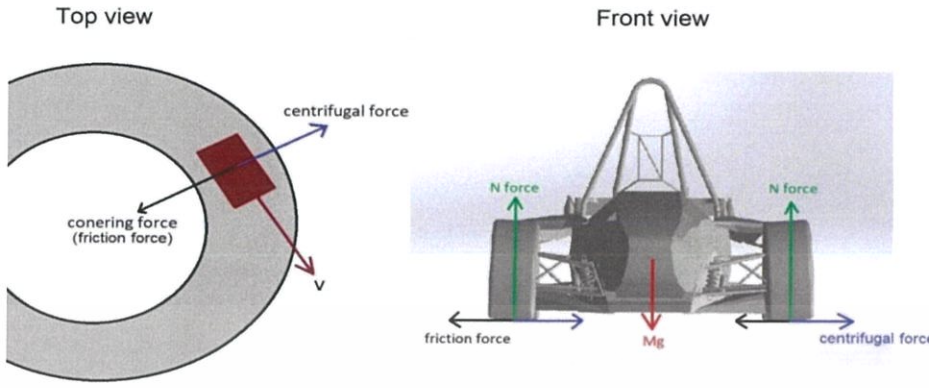
จากตารางที่ 2.1 ทางทีม Initial จากชมรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้พยายามหาวิธีการที่เพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการแข่งขันมาโดยตลอด โดยมีการร่วมพัฒนาจากหลายแผนก เช่นระบบช่วงล่าง (Suspension) ระบบเครื่องยนต์ (Engine) ระบบเบรค (Brake System) รวมไปถึงแผนกแอโรไดนามิคส์ (Aerodynamics) ที่ผู้ทำการวิจัยกำลังศึกษาอยู่ โดยมุ่งหวังนำหลักอากาศพลศาสตร์เข้ามามีส่วนช่วยเพิ่มให้มีความเร็วมากยิ่งขึ้น และเป้าหมายของการออกแบบในครั้งนี้คือใช้เวลาในการเข้าโค้ง ในรัศมี 8.5 เมตรในเวลาไม่เกิน 5.05 วินาที

จากการทดสอบสมรรถนะด้วยไดโน (Dyno Test) รถแข่งคันปัจจุบัน

- เครื่องยนต์ SUZUKI LTR 1 ความจุกระบอกสูบ 450 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- Break Horse Power 65 แรงม้า หรือ 48.5 กิโลวัตต์
- น้ำหนักตัวรถ 197 กิโลกรัม
- น้ำหนักรวมคนขับ (60 กิโลกรัม) 257 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 การกำหนดแรงกดที่ต้องการ



รูปที่ 2.2 แผนภาพวัตถุแสดงการเข้าโค้งของรถแข่ง

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงแผนภาพวัตถุการเข้าโค้งของรถแข่ง โดยกำหนดแรงเข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลมมีค่าเท่ากับแรงหนีศูนย์กลางของวงกลม สมการการเข้าโค้งจากทฤษฎีหาได้จากสมการที่ 2.1

$$\frac{mv^2}{R} = \mu_T mg \tag{2.1}$$

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระของรถระหว่างทำการเข้าโค้งในกรณีที่ไม่ได้มีการติดตั้งวิง จากทฤษฎี ความเร็วในการเข้าโค้งหาได้จาก

$$v = \sqrt{\mu_T gR} \tag{2.2}$$

และในกรณีที่มีการติดตั้งวิง N force มีขนาดเพิ่มมากขึ้นจาก Down force ทำให้สามารถเพิ่มความเร็วเข้าโค้งมากขึ้น จากทฤษฎี ความเร็วในการเข้าโค้งหาได้จากสมการที่ 2.3

$$v = \sqrt{\frac{mg}{\frac{m}{\mu_T R} - \frac{1}{2}\rho C_L A}} \tag{2.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลโดยทั่วไปของรถแข่ง

Car's specification	no wing	wing
Mass with (60 driver) (kg)	257	266
Tire friction coefficient (μ_T)	1.3	1.3
C_L	0	-2
Air density (kg/m^3)	1.164	1.164
g (m/s^2)	9.81	9.81
Frontal Area (m^2)	0.634	1

จากตารางที่ 2.2 ข้อมูลและคุณสมบัติของรถคันปัจจุบัน เมื่อนำข้อมูลจากกรณีไม่ติดตั้งวิงและติดตั้งวิงมาคำนวณด้วยสมการที่ (2.2) และ (2.3) โดยเลือก Lift coefficient C_L เท่ากับ -2 ทำให้ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการคำนวณเปรียบเทียบความเร็วที่สามารถเข้าโค้งได้ที่รัศมีโค้งต่างๆ

Curve radius (m)	V w/o wing (m)	V with wing (m)	V w/o wing (km/hr)	V with wing (km/hr)	time w/o wing (s)	time with wing (s)
5.00	7.99	8.10	28.75	29.17	3.94	3.88
5.50	8.38	8.51	30.15	30.64	4.13	4.06
6.00	8.75	8.90	31.49	32.06	4.31	4.24
6.50	9.10	9.28	32.78	33.41	4.49	4.40
7.00	9.45	9.65	34.01	34.73	4.66	4.56
7.50	9.78	10.00	35.21	36.00	4.82	4.71
8.00	10.10	10.34	36.36	37.24	4.98	4.86
8.50	10.41	10.69	37.48	38.44	5.13	5.00
9.00	10.71	11.01	38.57	39.62	5.28	5.14
9.50	11.01	11.32	39.63	40.77	5.43	5.27
10.00	11.29	11.64	40.65	41.89	5.57	5.40

จากตารางที่ 2.3 ที่รัศมี 8.5 เมตร สามารถทำความเร็วสูงสุดจากการไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ 10.41 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาวิ่ง 5.13 วินาทีต่อ 1 รอบ และสามารถทำความเร็วสูงสุดจากการติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ 10.69 เมตรต่อวินาที ใช้เวลาวิ่ง 5 วินาทีต่อ 1 รอบ จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณตามตารางพบว่า Lift coefficient เท่ากับ -2 ทำให้สามารถใช้เวลาในการเข้าโค้งต่ำกว่า 5.05 วินาทีได้

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \tag{2.4}$$

จากสมการที่ 2.4 พบว่าแรงกดที่ต้องการทั้งหมดคือ 133 นิวตัน และจากงานวิจัยของ Scott Wordley [1] พบว่าแรงที่ได้มีการสูญเสียในการแข่งขันจริง เนื่องจากอุปกรณ์อื่นๆในตัวรถจึงตั้งเป้าหมายไว้ที่ 160 นิวตัน

2.2 การกำหนดและควบคุมแรงต้านอากาศ

ในการออกแบบอุปกรณ์ทางอากาศพลศาสตร์ในรถแข่งนั้น นอกจากเพื่อให้มีผลลัพธ์แรงกดแล้วยังมีอีกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงคือแรงต้าน ซึ่งเป็นผลเสียที่ตามมาในการติดตั้งอุปกรณ์ทางอากาศพลศาสตร์ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการควบคุมแรงต้านให้อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้

- กำลังของรถแข่ง (P) คันปัจจุบัน 65 แรงม้า หรือ 48.5 กิโลวัตต์
- พื้นที่หน้าตัดของรถแข่ง (A) ขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์เฉลี่ย 0.634 ตารางเมตร
- ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถแข่ง (C_D) ขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์ 0.74

$$P = \frac{1}{2}\rho C_D v^3 A \tag{2.5}$$

สมการที่ 2.5 แสดงถึงกำลังที่รถแข่งใช้ในการปะทะแรงต้าน จากสถิติการแข่งขันซึ่งมีความเร็วสูงสุดเฉลี่ย 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หมายถึงรถแข่งต้องใช้กำลัง 10.12 กิโลวัตต์เพื่อขับเคลื่อนรถแข่งให้มีความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงมีกำลัง 38.38 กิโลวัตต์ที่เหลือในการที่รองรับแรงต้านจากอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

2.2.1 การกำหนดสัมประสิทธิ์แรงต้านจากการติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

- กำลังที่ใช้ได้ 38.38 กิโลวัตต์
- พื้นที่หน้าตัดรถแข่งหลังติดตั้งอุปกรณ์เฉลี่ย 1 ตารางเมตร
- พื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์เฉลี่ย 0.37 ตารางเมตร
- ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ที่ยอมรับได้จากการติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์คือไม่เกิน 1.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อากาศพลศาสตร์ของรถแข่ง

อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamics) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอากาศที่เคลื่อนที่อยู่ด้านในหรือรอบนอกวัตถุ ตัวอย่างเช่น ปีกของเครื่องบิน โดยทั่วไปเรียกว่า พลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) เพราะเนื่องจากอากาศก็เป็นของไหลชนิดหนึ่ง ในความเป็นจริงขณะที่รถวิ่งผ่านอากาศ เปรียบสเมือนอากาศหยุดนิ่งแล้วรถเคลื่อนที่ผ่านอากาศที่หยุดนิ่ง แต่สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษานั้นเป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ไหลผ่านของอากาศกับตัวรถแข่ง ซึ่งขณะที่อากาศไหลผ่านตัวรถนั้นเกิดแรงที่อากาศกระทำกับรถแข่งขึ้น 2 แรง คือ แรงต้าน (Drag force) และแรงยก (Lift force) โดยแรง 2 ชนิดนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถแข่งในด้านการเร่ง การทำความเร็วสูงสุด ประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิง และการบังคับควบคุมตัวรถในการขับขี่

โดยที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นสามารถเพิ่มได้ด้วยการลดแรงต้านของอากาศ การลดแรงต้านของอากาศไม่เพียงแต่พิจารณาเฉพาะอากาศพลศาสตร์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่การไหลของอากาศยังมีผลต่อแรงยกของอากาศและตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของความดันที่กระทำกับรถ ทั้งสองประการนี้มีผลกระทบอย่างมากในการควบคุมและทรงตัวรถ ระยะห่างจากพื้นรถถึงพื้นถนนมีผลกระทบเล็กน้อยกับแรงต้านแต่มีผลกระทบอย่างมากต่อแรงยกของอากาศ

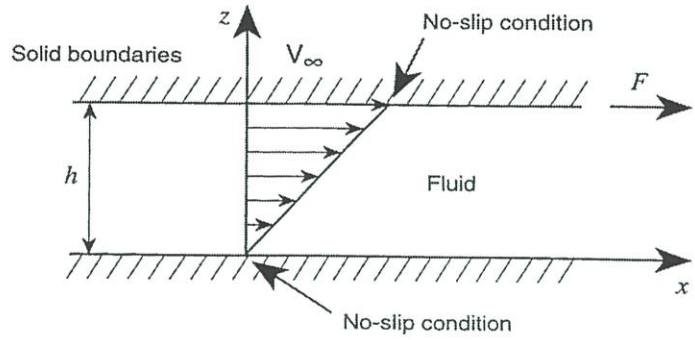
3.1 คุณสมบัติของของไหล (Fluid properties)

ของไหลคือสสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างด้วยความเค้นเฉือน หรือสสารที่ไม่สามารถต้านทานแรงเฉือน (Shear force) ได้หากของไหลอยู่นิ่งกับที่ในตอนแรก แต่เมื่อมีแรงเฉือนมากระทำ ของไหลต้องมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับของแรงเฉือน แต่ถ้าหากของไหลมีการเคลื่อนที่อยู่แล้ว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของของไหลต้องเปลี่ยนไป ซึ่งเปลี่ยนไปอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของแรงเฉือน

3.1.1 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดคือค่าที่บอกถึงคุณสมบัติการต้านการไหลในตัวของไหล ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการกระทำโดยแรงเฉือน ยิ่งมีความหนืดมากก็ยิ่งมีแรงต้านการไหลมาก แรงต้านนี้เกิดจากความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับการไหล ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหลใช้สัญลักษณ์แทนด้วย μ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การไหลภายใต้ความเค้นเฉือนแบบไม่มีการลื่นไถล

ผลที่เกิดจากความหนืดของของไหลในรูปที่ 3.1 เมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นราบสองแผ่นวางขนานกัน โดยแผ่นราบด้านล่างอยู่นิ่ง แต่แผ่นราบด้านบนเคลื่อนที่ด้วยแรงเฉือน F ที่ความเร็ว V_∞ เห็นได้ว่าลักษณะความเร็วของของไหลนั้นมีค่าเท่ากับความเร็วของแผ่นราบที่ของไหลสัมผัสอยู่ เรียกสภาพการไหลแบบนี้ว่า "การไหลแบบไม่มีการลื่นไถล (No-slip condition)" จากเหตุผลข้างต้น ขนาดของแรงเฉือน F ที่กระทำกับแผ่นราบด้านบนและความสัมพันธ์ของความหนืดของของไหลเป็นไปดังสมการที่ 3.1 โดยที่ A คือ พื้นที่ผิวของแผ่นราบด้านบนและ h คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นราบด้านบนกับแผ่นราบด้านล่าง

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{V_\infty}{h} \tag{3.1}$$

3.1.2 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นเป็นสมบัติเฉพาะสสาร โดยทั่วไปหมายถึงปริมาณมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย ρ ในการศึกษาเกี่ยวกับของไหลสามารถกำหนดให้ความหนาแน่นของของไหลเป็นค่าคงที่ เพื่อที่ง่ายต่อการคำนวณ

การที่ของไหลมีความเร็วต่ำ ความหนาแน่นของของไหลเปลี่ยนแปลงน้อยจนสามารถประมาณให้เป็นค่าคงที่ได้ เรียกการไหลแบบนี้ว่า "การไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible flow)" ส่วนการไหลที่ของไหลมีความเร็วสูงจนต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น เรียกการไหลแบบนี้ว่า"การไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible flow)"ซึ่งสามารถจำแนกได้โดยใช้ค่าเลขมัค (Mach number) ซึ่งค่าเลขมัคหาได้จากสมการ

$$M = \frac{v}{c} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย M คือ เลขมัค

v คือ ความเร็วของของไหล

c คือ ความเร็วเสียง (343 เมตรต่อวินาที)

โดยทั่วไปกำหนดให้ของไหลที่มีค่าเลขมัคตั้งแต่ 0.3 ขึ้นไปเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ ส่วนของไหลที่มีค่าเลขมัคน้อยกว่า 0.3 ถือว่าเป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้

3.1.3 ค่าเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number)

ค่าเลขเรย์โนลด์สเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia force) กับแรงหนืด (Viscous force) ซึ่งเป็นเป็นตัวแปรไร้หน่วย ค่าเลขเรย์โนลด์สนั้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L_C}{\mu} \tag{3.3}$$

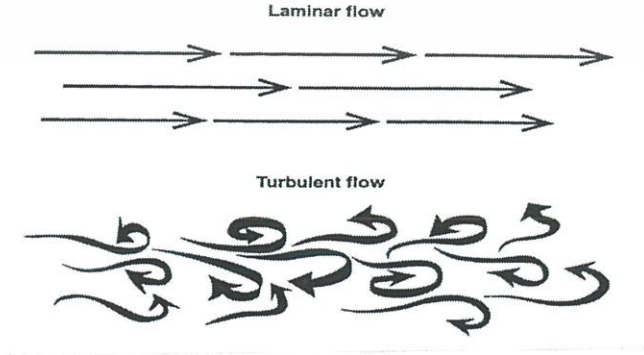
โดย ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

V คือ ความเร็วของของไหล

μ คือ ความหนืดของของไหล

L_C คือ ค่าความยาววิกฤต

การไหลที่มีค่าความหนืดสูงก็แสดงว่ามีค่าความต้านการไหลสูง ซึ่งหมายความว่าถ้าการไหลเปลี่ยนขนาดหรือทิศทาง การไหลถูกหน่วงหรือต้านทานด้วยแรงเสียดทานที่สูง ทำให้การไหลกลับมาอยู่ในลู่ทางดังเดิมหรือเปลี่ยนไปได้เพียงเล็กน้อย เรียกการไหลแบบนี้ว่า “การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)”แต่ถ้าหากมีค่าความหนืดที่ต่ำ แรงฉุดการไหลและแรงต้านทานการออกนอกลู่นอกทางการไหลก็มีน้อย ของไหลจึงสามารถออกนอกลู่นอกทางได้ง่ายขึ้น เรียกการไหลแบบนี้ว่า “การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)”



รูปที่ 3.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แรงต้าน (Drag force)

เป็นแรงที่กระทำตรงข้ามกับแรงที่ขับเคลื่อนวัตถุไปข้างหน้าโดยเป็นแรงที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศมีทิศทางตรงข้ามกับวัตถุที่เคลื่อนที่แรงต้านนี้เกิดจากความเค้นเฉือนของผิววัตถุกับของไหลที่ไหลผ่านวัตถุการเสียดทานของพื้นผิววัตถุและแรงดูดเนื่องจากอากาศโดยสมการแรงต้านมีดังนี้

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D v^2 A \tag{3.4}$$

โดย F_D คือ แรงต้าน

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

v คือ ความเร็วของวัตถุที่เทียบกับของไหล

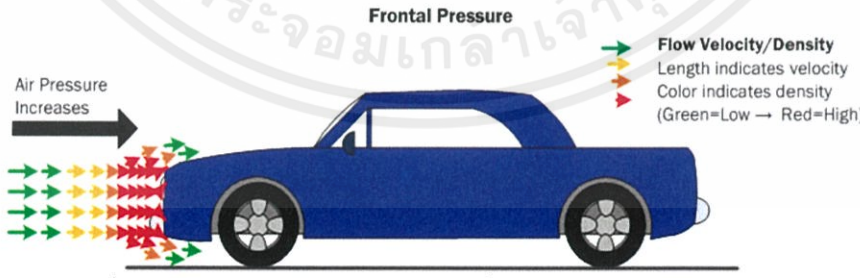
A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน

โดยแรงต้านที่เกิดขึ้นกับอากาศพลศาสตร์ของรถแข่งนั้น ประกอบด้วย 3 สิ่งหลัก คือ

1. แรงดันด้านหน้าของรถหรือผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างของรถแข่งที่พยายามผลักอากาศออกไป
2. บริเวณท้ายของรถที่เป็นสุญญากาศหรือผลกระทบที่ทำให้อากาศไม่เติมเต็มตามรูปร่างของรถ
3. ชั้นขอบเขต (Boundary layer) หรือผลกระทบของแรงเสียดทานที่เกิดจากไหลของอากาศที่ผิวของรถ

ทั้ง 3 สิ่งหลักนี้ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของอากาศกับรูปร่างของรถได้

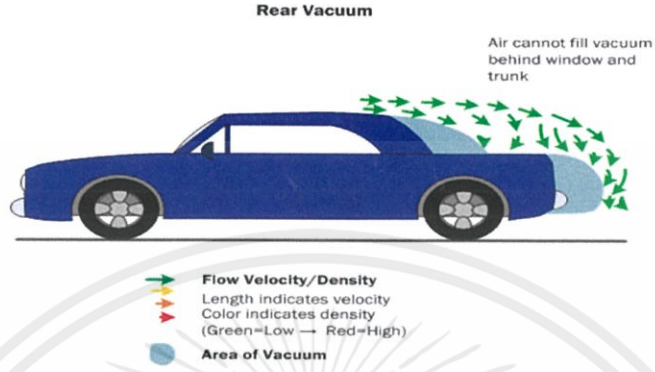


รูปที่ 3.3 แรงดันด้านหน้าของตัวรถที่เกิดจากแรงต้านของอากาศ

โดยขณะที่รถเคลื่อนที่อยู่นั้น อากาศที่อยู่ห่างด้านข้างของตัวรถออกไปนั้นมีแรงดันอากาศเท่ากับความดันบรรยากาศ ณ ตอนนั้นแต่อากาศจำนวนมากที่ไหลผ่านมาปะทะที่ด้านหน้าของตัวรถ

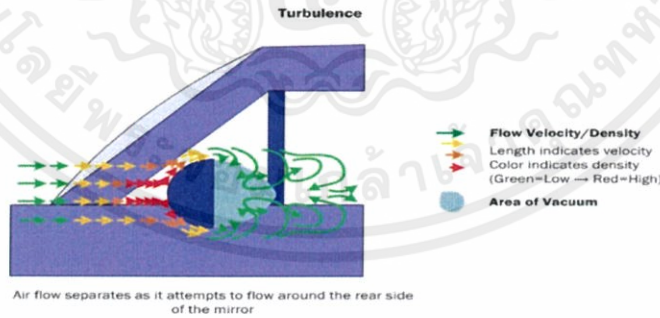
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการอัดตัวของอากาศและทำให้ความเร็วของอากาศทางด้านหน้าของตัวรถมีค่าน้อยลง แรงดันอากาศที่อยู่ด้านหน้าของตัวรถมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ ณ ขณะนั้น เนื่องจากอากาศที่อยู่รอบตัวรถมีค่าแรงดันอากาศน้อยกว่าทางด้านหน้าของตัวรถ จึงทำให้อากาศทางด้านหน้าพยายามไหลผ่านด้านข้าง ด้านบน และด้านล่างของตัวรถ แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 บริเวณด้านท้ายของรถที่เป็นสุญญากาศ

สุญญากาศบริเวณท้ายรถนั้นเป็นผลมาจากอากาศไม่สามารถเติมเต็มบริเวณพื้นที่ท้ายรถ ยิ่งที่ความเร็วรถสูงขึ้นทำให้เกิดสุญญากาศได้มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.4 สุญญากาศด้านหลังเป็นรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านอากาศที่วัตถุหรือยานพาหนะไม่สามารถเติมเต็มพื้นที่นี้ได้ ซึ่งมีผลกระทบมากขึ้นเมื่อความเร็วของรถเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถมากขึ้น ดังนั้นเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น การออกแบบรูปร่างของรถจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อกำจัดบริเวณที่เป็นสุญญากาศด้านท้ายของรถ



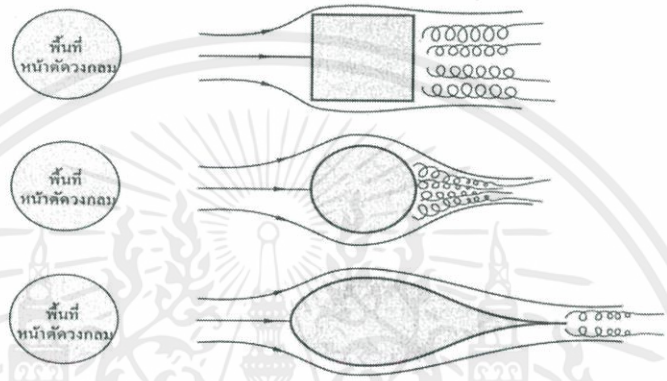
รูปที่ 3.5 การไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ของรถ

กระแสอากาศที่ไหลผ่านวัตถุต่างกันนั้นมีแรงต้านที่ไม่เท่ากัน แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่นั่นส่วนมากมาจากความแตงต่างระหว่างความดันอากาศด้านหน้าและด้านหลังของรถ การไหลของอากาศผ่านรถในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่นั้น บริเวณที่เป็นอุปกรณ์ต่างๆของรถ เช่น กระจกข้าง หรือบริเวณด้านท้ายของรถเกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสูงกว่าอากาศบริเวณด้านหน้าของรถ จึงทำให้ความดันบริเวณด้านหลังกระจกข้างหรือบริเวณด้านท้ายรถมีค่าต่ำกว่าอากาศที่บริเวณด้านหน้า ซึ่งเกิดเป็นแรงต้านอากาศขึ้น

การออกแบบรูปร่างของรถหรืออุปกรณ์ต่างๆของรถเพื่อลดแรงต้านอากาศต้องพยายามลดสูญญากาศบริเวณด้านท้ายของรถและลดการไหลแบบปั่นป่วนนของอากาศ จากรูปที่ 3.6 วัตถุรูปทรงคล้ายหยดน้ำเป็นรูปทรงที่ให้แรงต้านอากาศที่ต่ำ และลดการเกิดการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศได้ดีที่สุด



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านรูปทรงต่างๆที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ในการที่เปรียบเทียบแรงต้านที่เกิดขึ้นของรถแต่ละคันนั้น ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag coefficient) เข้ามาเกี่ยวข้อง ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย C_D ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวรถและลักษณะการไหลของอากาศรอบๆตัวรถ รถแต่ละคันสามารถวัดค่า C_D ได้จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์และการทดลองโดยใช้อุโมงค์ลม

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \tag{3.5}$$

3.3 แรงยกและแรงกด (Lift force and Down force)

สมการแบร์นูลลีเป็นสมการที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับความดันในของไหล ซึ่งความดันในของไหลที่เคลื่อนที่มีค่าน้อยกว่าความดันในของไหลที่อยู่นิ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของของไหลด้วย สมการของแบร์นูลลี ดังสมการที่ 3.6 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของความดัน ความเร็ว และตำแหน่งตามความสูง โดยอยู่ในสมมติฐานที่ว่าเป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด (Inviscid flow) เป็นการไหลแบบคงที่และเป็นของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible fluid)

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{g} + z = \text{constant on a steamline} \tag{3.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการแบร์นูลลีนั้น เราสามารถอธิบายการเกิดแรงยกได้ว่าอากาศที่ไหลผ่านผิวด้านบนของตัวรถนั้นมีความเร็วของอากาศที่สูงกว่าพื้นผิวด้านล่างของตัวรถ ทำให้แรงดันอากาศที่พื้นผิวด้านล่างของตัวรถมีค่ามากกว่าแรงดันอากาศที่พื้นผิวด้านบนของตัวรถ จึงเกิดเป็นแรงยก (Lift force) และในทางกลับกันถ้าอากาศที่ไหลผ่านผิวด้านบนของตัวรถมีความเร็วของอากาศที่น้อยกว่าพื้นผิวด้านล่างของตัวรถ ทำให้แรงดันอากาศที่พื้นที่ผิวด้านล่างมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวด้านบน จึงเกิดเป็นแรงกด (Down force) โดยค่าของแรงยกหรือแรงกดหาได้จากสมการ

$$F_L = \frac{1}{2}\rho C_L v^2 A \tag{3.7}$$

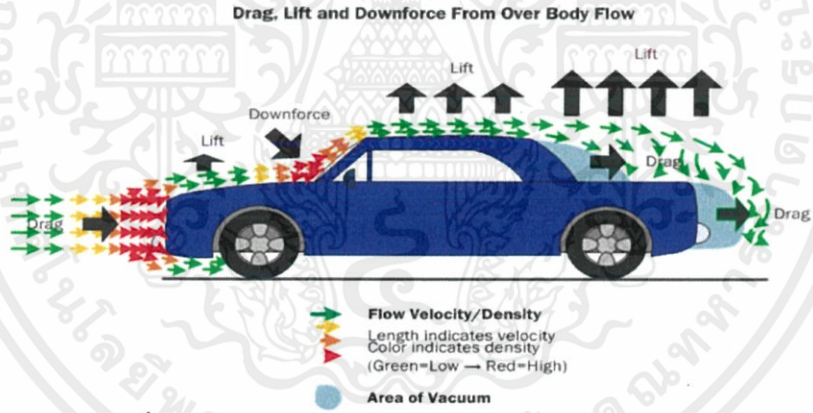
โดย F_L คือ แรงยก

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

v คือ ความเร็วของวัตถุที่เทียบกับของไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

C_L คือ สัมประสิทธิ์แรงยก



รูปที่ 3.7 การเกิดแรงยก แรงกด และแรงต้านบนตัวรถ

โดยแรงยกของอากาศนั้นมีผลทำให้ความสามารถในการยึดเกาะถนนของล้อลดลง ทำให้รถเกิดการทรงตัวที่ไม่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะเลี้ยวโค้งด้วยความเร็วสูง รถอาจเกิดการลื่นไถลและเสียหลักได้ การเพิ่มแรงกดให้แก่รถนั้นสามารถทำได้ เช่น การติดตั้งแพนอากาศ (Aerofoil) เพื่อเพิ่มแรงกดที่ล้อหลัง

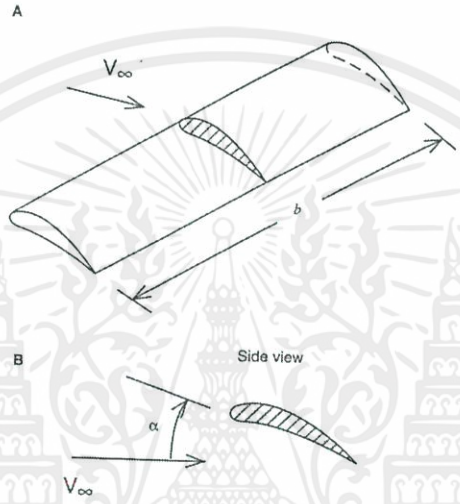
ในการเปรียบเทียบแรงยกที่เกิดขึ้นของรถแต่ละคันนั้น ใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของอากาศ (Lift coefficient) เข้ามาเกี่ยวข้อง ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย C_L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \tag{3.8}$$

3.4 แพนอากาศ (Aerofoil)

Aerofoil คือรูปแบบของปีกในแบบตัดขวาง แสดงดังรูปที่ 3.8 เมื่อมีของอากาศไหลผ่านเกิดแรงเนื่องจากอากาศกระทำในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อน เรียกว่า"แรงยก" และเกิดแรงที่กระทำในทิศทางขนานไปกับทิศทางของการเคลื่อนที่ เรียกว่า"แรงต้าน"

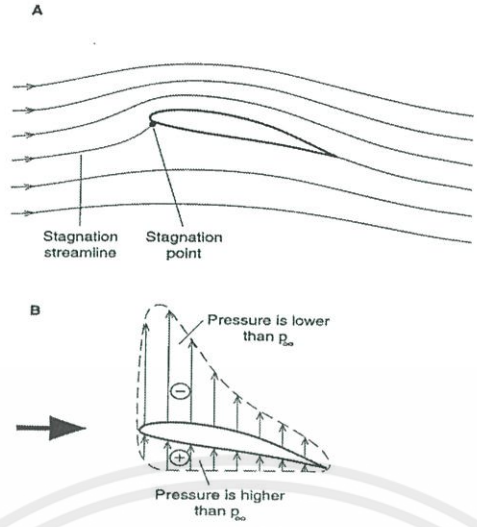


รูปที่ 3.8 ปีก (Wing) และ Aerofoil (A), มุมปะทะ (α) ของ Aerofoil (B)

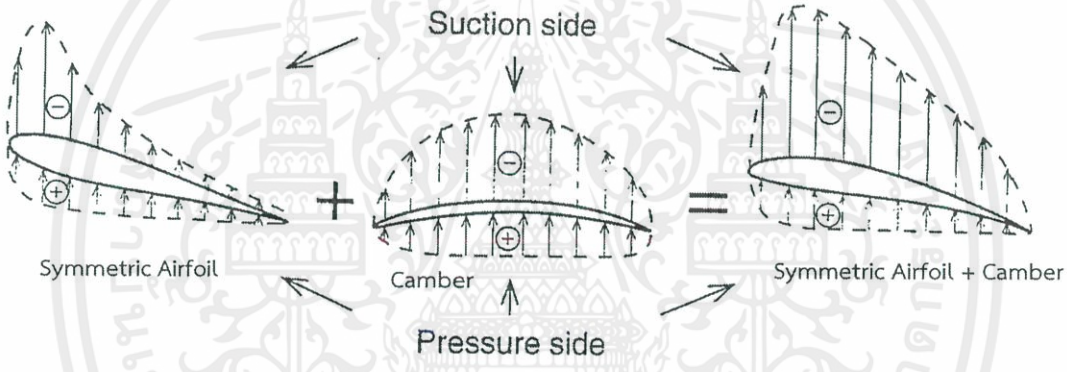
3.4.1 Aerofoil lift

จากรูปที่ 3.9 การไหลของอากาศใต้เส้น Stagnation streamline นั้น ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางมากนัก และค่อยๆไหลช้าลงบริเวณด้านใต้ของปีก ซึ่งทำให้ความดันด้านใต้ของปีกมีค่าสูงขึ้น ในรูปที่ 3.9 (B) ด้านเครื่องหมาย (+) หมายถึงบริเวณที่ความดันมีค่าสูงกว่าความดันสถิตของการไหลอิสระ ส่วนด้านเครื่องหมาย (-) นั้นหมายถึงบริเวณที่ความดันมีค่าต่ำกว่าความดันสถิตของการไหลอิสระซึ่งการกระจายตัวของความดันของ Aerofoil นั้น มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของการปะทะ (α) กับรูปร่างและความหนาของ Camber แสดงดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



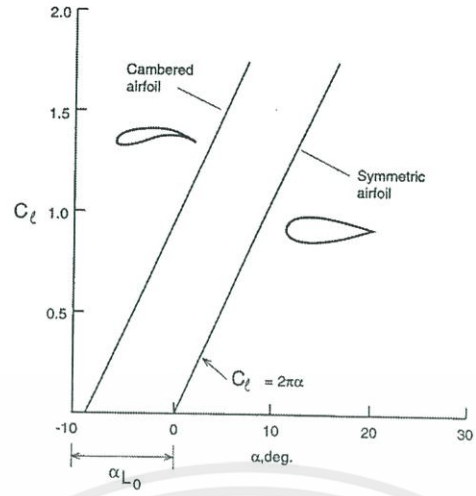
รูปที่ 3.9 Streamline ของ Aerofoil (A), การกระจายความดันของ Aerofoil (B)



รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของแรงดันบน Aerofoil

สำหรับการไหลของอากาศที่ประชิดผิวและ Aerofoil มีขนาดบางมาก ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของ Aerofoil แปรผันตรงกับมุมของการปะทะ (α) เป็นสมการเส้นตรง โดยมีความชันเท่ากับ 2π แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งจากรูปการที่เพิ่ม Camber นั้นไม่ส่งผลต่อความชัน แต่ส่งผลโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์ของ Aerofoil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_L กับมุมของการปะทะ(α)และการเพิ่ม Camber

เนื่องจาก Aerofoil เป็นภาพตัดขวางที่มองจากด้านข้างด้วยความกว้างของปีกที่มีค่าอนันต์ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของ Aerofoil จึงเป็นการคำนวณต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง ดังสมการที่ 3.9

$$C_L = \frac{l}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 c} \tag{3.9}$$

โดย l คือแรงยกต่อหนึ่งหน่วยความกว้างและ c คือพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของ Symmetric Aerofoil เมื่อมุมของการปะทะ (α) มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.10

$$C_L = 2\pi\alpha \tag{3.10}$$

สำหรับ Cambered Aerofoil การที่เพิ่มในส่วนของ Camber มานั้น ถึงแม้ว่าไม่มีผลต่อค่าความชัน(2π) แต่มีผลกระต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงยก จึงกำหนดให้ว่าการเพิ่ม Camber ขึ้นมานั้นเป็นการเพิ่มมุมของการปะทะ (α_{L0}) เนื่องจากที่มุมของการปะทะเท่ากับ0 ดังรูปที่ 3.11 Symmetric Aerofoil มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าเท่ากับ0 แต่ Cambered Aerofoil นั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเท่ากับ $C_L = 2\pi\alpha_{L0}$ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของ Cambered Aerofoil สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11

$$C_L = 2\pi(\alpha + \alpha_{L0}) \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงยกนั้นต้องคำนึงถึงการสูญเสียเนื่องจากแรงยก (Stall) ด้วย Stall เกิดจากการแตกสลายของการไหลของอากาศที่เป็นระเบียบบนผิวของปีก (Wing) เมื่อมุมปะทะของปีกเข้าใกล้ค่าๆหนึ่ง ซึ่งเรียกค่าของมุมนี้ว่า “มุมวิกฤตของการปะทะ (Critical angle of attack)”

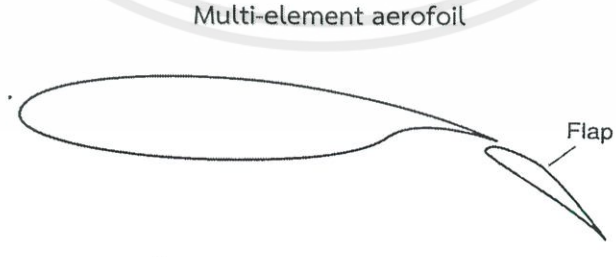
3.4.2 Aerofoil drag

แรงต้านที่เกิดขึ้นกับ Aerofoil ที่มีการไหลของอากาศแบบประชิดผิวนั้น เป็นผลมาจากแรงเสียดทานจาก Viscous boundary layer จากรูปที่ 3.12 ยิ่ง Boundary layer ที่หนาขึ้น ทำให้อากาศไหลได้ช้าลงและมีแรงต้านมากขึ้น โดยความหนาของ Aerofoil มุมของการปะทะ (α) และ Camber ของ Aerofoil มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Boundary layer

รูปที่ 3.12 Boundary layer ที่เกิดขึ้นบน Aerofoil

3.4.3 Multi-element Aerofoil

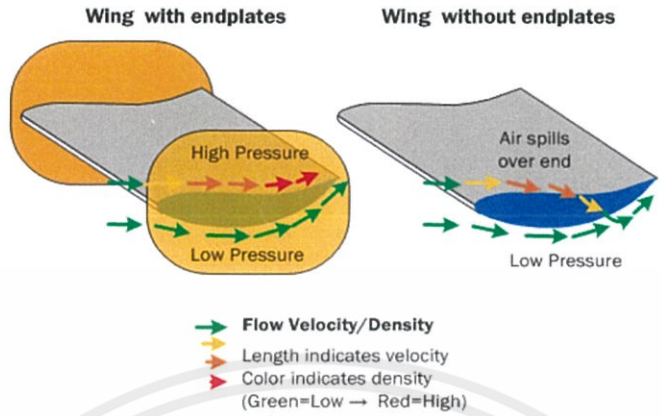
ในการคำนวณและออกแบบปีกเพื่อให้ได้แรงยกที่มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ (หรือแรงกดในกรณีที่เป็นรถแข่ง) สามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่ของปีก เพิ่มส่วนของ Camber หรือเพิ่มจำนวนชั้นของปีก ซึ่งการเพิ่มจำนวนชั้นของปีกนั้นเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ของปีกและเพิ่มส่วนของ Camber ไปพร้อมๆกัน



รูปที่ 3.13 Multi-element aerofoil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.4 ผลจากการติด Endplates



รูปที่ 3.14 การเปรียบระหว่างปีกที่ติด Endplates กับปีกที่ไม่ได้ติด Endplates

จากรูปที่ 3.14 อากาศที่ไหลผ่านด้านบนของปีกมีความดันที่สูงกว่าอากาศที่ไหลผ่านด้านล่างของปีก ซึ่งโดยปกตินั้นอากาศไหลจากที่ที่มีความดันสูงไปยังที่ที่มีความดันต่ำ การที่ไม่ได้ติด Endplates นั้นทำให้เกิดการสูญเสียความดันด้านบนของปีกไหลออกไปด้านข้างเนื่องจากด้านข้างนั้นมีความดันที่ต่ำกว่า การติด Endplates นั้นช่วยลดการสูญเสียความดันด้านบนของปีก ซึ่งมีผลต่อแรงกดที่ขึ้นเป็นอย่างมาก

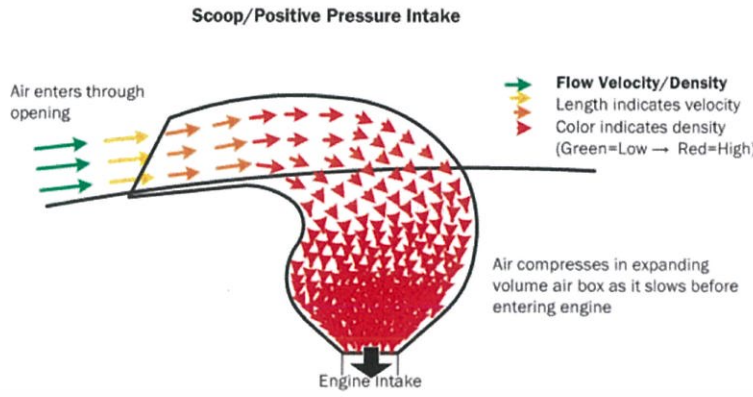
3.5 อุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic devices)

อุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic devices) เป็นตัวช่วยในการไหลเวียนของอากาศรอบๆ ให้ดีขึ้น อุปกรณ์บางชนิดยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการไหลเวียนของอากาศภายในตัวรถ เช่น ช่วยป้อนอากาศเข้าหม้อน้ำหรือเครื่องยนต์ หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่สร้างแรงกดเพื่อเพิ่มแรงฉุดระหว่างล้อกับพื้น

3.5.1 Hood scoop/Positive pressure intakes

Hood scoop หรือการเพิ่มแรงดันไอดี (Positive pressure intakes) เข้ามาเป็นประโยชน์ให้แก่ท่อดักอากาศ (Ram air) หรือ Supercharging ซึ่งมีผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยใช้หลักการทำงานที่ว่าการไหลของอากาศบีบอัดภายในกล่องอากาศ (Air box) เมื่ออยู่ภายใต้การไหลคงที่ ช่องอากาศมีช่องเปิดเพื่อให้สามารถป้อนอากาศได้เพียงพอและกล่องอากาศขยายตัวทำให้การไหลของอากาศช้าลงเพื่อเพิ่มความดันภายในกล่องยิ่งความเร็วรถมากขึ้นยิ่งทำให้ความดันและปริมาตรอากาศผ่านช่องอากาศเพิ่มมากขึ้น

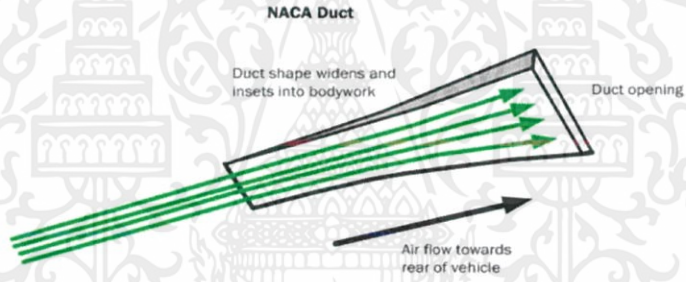
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.15 Scoops/Positive pressure intakes

3.5.2 NACA duct

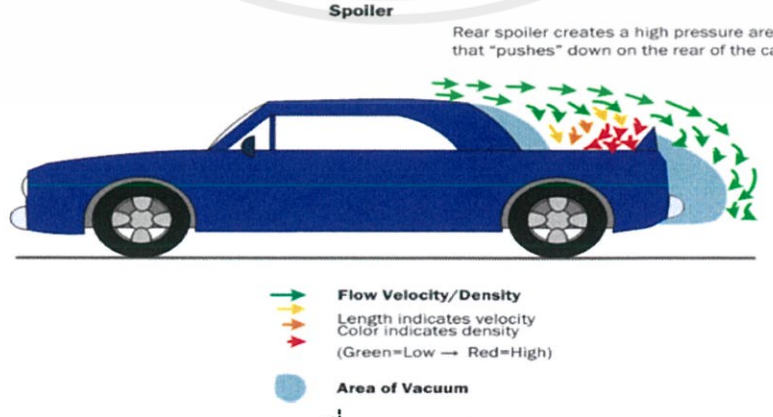
ช่องรับลม (NACA duct) ถูกออกแบบมาให้มีผลกระทบกับการไหลของอากาศน้อยที่สุดใช้เมื่อมีความจำเป็นต้องดึงอากาศเข้าไปในบริเวณที่ไม่ได้สัมผัสกับการไหลของอากาศ โดยใช้ประโยชน์จากBoundary layerซึ่งเป็นชั้นของอากาศที่เคลื่อนที่ช้าๆ



รูปที่3.16 NACA duct (National Advisory Committee for Aeronautics duct)

3.5.3 Spoiler

Spoiler ทำหน้าคล้ายสิ่งกีดขวางต่อการไหลของอากาศเพื่อสร้างแรงดันอากาศที่ด้านหน้าของ Spoiler ให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มแรงกดที่ส่วนท้ายของรถ ทำให้ล้อของรถสามารถยึดเกาะถนนได้ดีขึ้น

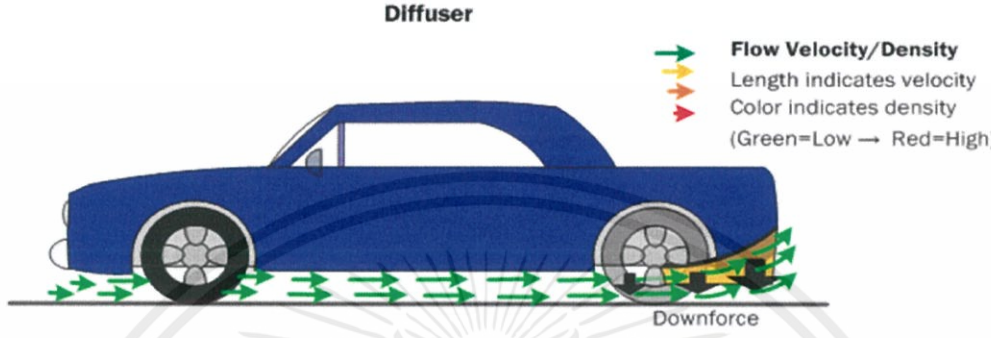


รูปที่3.17 Spoiler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 Diffuser

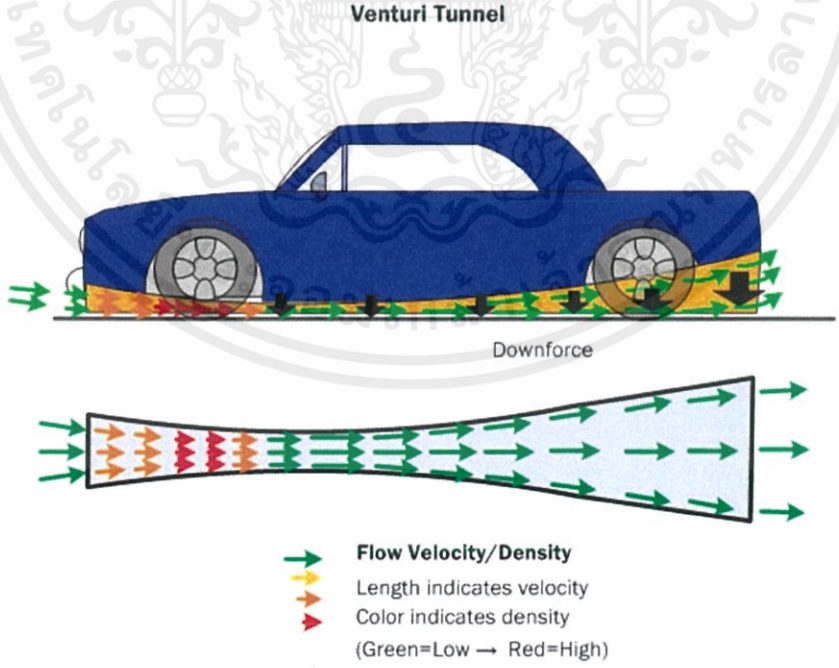
Diffuser คือช่องระบายอากาศขนาดใหญ่ด้านท้ายของใต้รถ มีหน้าที่ช่วยในการเพิ่มความเร็วมนการเคลื่อนที่ของอากาศใต้ท้องรถ ความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้แรงดันอากาศต่ำลง จึงทำให้เกิดแรงกดที่มากระทำกับตัวรถมากขึ้น โดยส่วนมากที่ Diffuser มีครีบที่ตั้งเป็นแนวฉากกับพื้น มีหน้าที่ลดการปั่นป่วนของอากาศที่ออกมาจากท้องรถ



รูปที่3.18 Diffuser

3.5.5 Venturi effect (Ground effect)

ปรากฏการณ์เวนจูรี่ (Venturi effect) ถูกประยุกต์มาจาก Venturi tube ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหลโดยอาศัยทฤษฎีของแบร์นูลลี (Bernoulli's theorem) หรือหลักการวัดความดันแตกต่าง (Differential pressure) หลักการนี้ทำให้เกิดความต่างของความดันด้านบนและด้านล่างของรถ โดยด้านล่างของตัวรถมีความดันน้อยกว่าด้านบน จึงเกิดเป็นแรงกดขึ้น



รูปที่3.19 Venturi effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือCFD (Computational Fluid Dynamics) คือการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในคอมพิวเตอร์ (Numerical method) มาวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวกับพลศาสตร์ของของไหล ซึ่งมีทั้งการแก้สมการของการเคลื่อนที่ สมการออยเลอร์ (Euler's equation) สำหรับการไหลแบบไม่มีความหนืด (Inviscid flow) สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สำหรับการไหลแบบมีความหนืด (Viscid flow) การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) และอื่นๆ โดยขั้นตอนของ CFD มีดังนี้

1) ขั้นก่อนการประมวลผล (Pre-processing) คือขั้นตอนแรกที่ใช้ในการกำหนดปัญหา กำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และรายละเอียดของปัญหา หลังจากนั้นจึงพิจารณาแบ่งช่วงของโดเมนเป็นกริดเล็กๆ แบ่งชิ้นงานเป็นขอบเขตย่อย สุดท้ายจึงกำหนดเงื่อนไขค่าขอบ (Boundary conditions) และค่าเริ่มต้น (Initial conditions) ซึ่งเป็นการกำหนดรูปแบบของปัญหา ยกตัวอย่างเช่น ความเร็วขาเข้าของของไหล ความดันขาออกของของไหล เป็นต้น
2) ขั้นประมวลผล (Processing) เป็นขั้นตอนที่จัดรูปแบบสมการให้เหมาะสมกับปัญหา และใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อแก้ปัญหา ซึ่งระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่นิยมใช้แก้สมการ คือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบทำซ้ำ (Iterative methods)
3) ขั้นหลังประมวลผล (Post-processing) เป็นขั้นที่นำเสนอข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมาแสดงในรูปแบบต่างๆ เช่น กราฟ แถบสี ภาพ เป็นต้น

โดยปกติแล้วสามารถใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ในการแก้สมการของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนได้โดยตรง แต่ในบางกรณี เช่น การจำลองแบบของการไหลอาจจำเป็นต้องใช้แบบจำลองของโมเดลแบบปั่นป่วน (Turbulence model) เป็นต้น ซึ่งในหลายๆสถานการณ์อาจจำเป็นต้องใช้สมการอื่นๆในการแก้ปัญหาไปพร้อมๆกับสมการนาเวียร์-สโตกส์ จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขั้นสูงที่สามารถสร้างแบบจำลองของระบบที่มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้

3.6.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) เป็นสมการที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งถูกประยุกต์มาจากสมการกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล สมการอนุรักษ์มวล และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม ดังสมการที่ (3.12) (3.13) และ (3.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวแกน x ;

$$\rho\left[\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right]=-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g_x+\mu\left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right] \quad (3.12)$$

แนวแกน y ;

$$\rho\left[\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right]=-\frac{\partial p}{\partial y}+\rho g_y+\mu\left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right] \quad (3.13)$$

แนวแกน z ;

$$\rho\left[\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right]=-\frac{\partial p}{\partial z}+\rho g_z+\mu\left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right] \quad (3.14)$$

โดย u v และ w คืออัตราเร็วของของไหลในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ มีหน่วยเป็น(m/s) ค่า ρ คือความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) ค่า g_x , g_y และ g_z คือค่าความถ่วงจำเพาะของของไหลในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ และ t คือ เวลา (s)

สมการนาเวียร์-สโตกส์นั้น เป็นกรณีเฉพาะของสมการการไหลซึ่งสมมุติฐานที่ใช้ในที่นี้คือ ของไหลเป็นของไหลแบบนิวตัน (Newtonian fluid) ค่าความหนืดคงที่ และค่าความหนาแน่นคงที่ ในการไหลแบบอุณหภูมิไม่คงที่ ค่าความหนืดและความหนาแน่นไม่คงที่ เพราะค่าสองค่านี้เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ นั่นคือสมการนาเวียร์-สโตกส์ใช้ไม่ได้ในกรณีนี้ ในกรณีที่ความหนาแน่นมีการเปลี่ยนแปลงมาก จึงต้องนำค่าแรงลอยตัว (Buoyant forces) มาคำนวณด้วย

3.6.2 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence models)

การไหลส่วนใหญ่มักเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งต้องพิจารณาความปั่นป่วนในแบบจำลองเชิงคำนวณ โดยความเป็นไปได้สำหรับการเกิดความปั่นป่วนมักใช้ตัวเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds number) ในการพิจารณาเพื่อใช้จำแนกระหว่างการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence flow) ดังสมการที่ 3.3 สำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนประกอบไปด้วย

1. Discretization methods

เสถียรภาพของการเลือกใช้ Discretization methods มักเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) มากกว่าที่เกิดขึ้นกับการแก้สมการโดยอาศัยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical methods) ดังนั้นการเลือกใช้ Discretization methods

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงจำเป็นต้องระวังเรื่องเสถียรภาพเพื่อให้ได้ผลเฉลย สำหรับวิธีที่มักใช้ในการแบ่งช่วงในปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีดังต่อไปนี้

1.1 Finite volume method

Finite volume method เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับใช้ในการพัฒนาซอฟท์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย สมการควบคุม (Governing equation) ทางด้านของไหลถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete control volumes) และอาศัยการอินทิกรัลเพื่อให้ได้ปริมาณที่มีการอนุรักษ์

1.2 Finite element method

Finite element method เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็ง แต่ก็สามารถใช้ได้กับของไหลเช่นเดียวกัน

1.3 Finite difference method

Finite difference method มีความง่ายในการเขียนโปรแกรม โดยปัจจุบันระเบียบวิธนี้ถูกใช้ในการเขียนโปรแกรมเฉพาะทางในบางโปรแกรมเท่านั้น แต่ระเบียบวิธีแบบนี้มีข้อด้อยคือต้องการ Structured mesh และต้องการการแปลงระบบพิกัดสำหรับรูปทรงหรือเรขาคณิตที่มีความสลับซับซ้อนสูง

1.4 Boundary element method

Boundary element method พิจารณาขอบเขตของของไหลโดยแบ่งออกเป็นโครงตาข่ายพื้นผิว (Surface mesh)

2. Reynolds-Average Navier-Stokes equations (RANS)

Reynolds-Average Navier-Stokes equations (RANS) เป็นวิธีการที่โบราณที่สุดสำหรับการจำลองแบบปั่นป่วน โดยการแก้สมการควบคุมและมีการเพิ่มเทอมของ Apparent stresses เข้าไป หรือที่รู้จักกันในนามของแรงเค้นเรย์โนลด์ส (Reynolds stress) โดยเป็นการเพิ่มเทนเซอร์อันดับสอง (Second order tensor) เข้าไปสำหรับแต่ละแบบจำลองที่มีลักษณะของปริมาตรปิด (Closure) ที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปมักเข้าใจผิดกันว่าสมการ RANS ใช้ไม่ได้สำหรับการไหลเทียบกับเวลา เนื่องจากสมการดังกล่าวเป็นการพิจารณา ณ เวลาเฉลี่ย แต่ในความเป็นจริงการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady flow) ก็สามารถพิจารณาให้เป็นกรณีดังกล่าวได้หรือในบางครั้งอาจเรียกว่า Unsteady Reynolds-Average Navier-Stokes equations (URANS)

3. Large Eddy Simulation (LES)

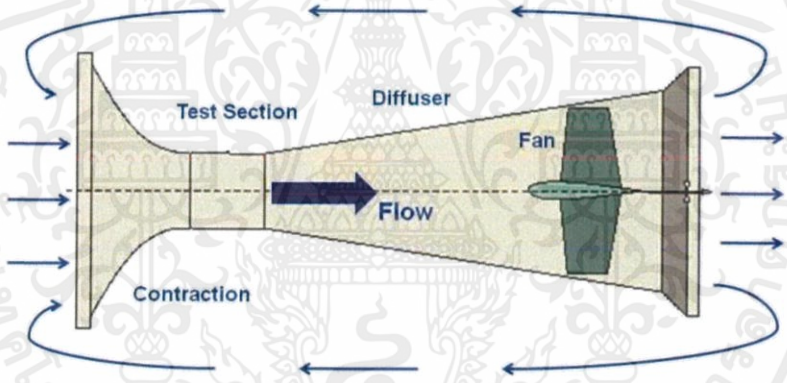
Large Eddy Simulations (LES) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในกรณีที่การหมุนวนมีขนาดเล็กกว่าและถูกทำให้มีขนาดน้อยลงโดยการใช้แบบจำลอง Sub-grid scale model ในขณะเดียวกันทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

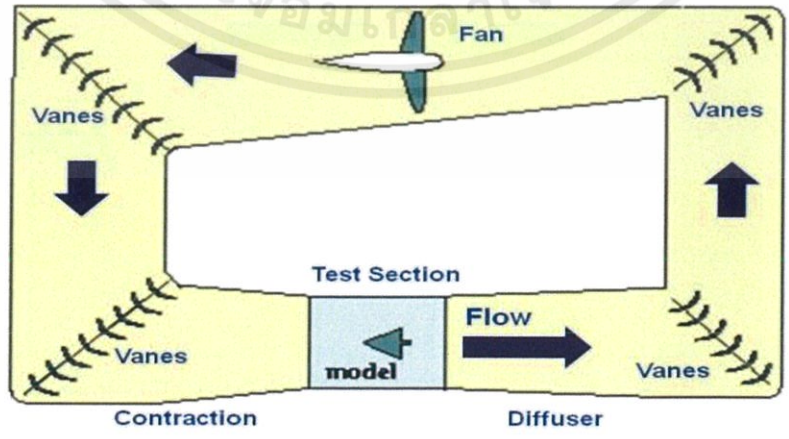
จำลองแบบระบบพลังงานขนาดใหญ่ด้วยแบบจำลองหมุนวน โดยปกติวิธีการนี้ต้องการโครงตาข่ายที่มีความละเอียดสูงมากกกว่าแบบจำลอง RANS

3.7 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและศึกษาการไหลของอากาศผ่านวัตถุแข็งรูปทรงต่างๆ โดยอากาศถูกเป่า หรือถูกดูดผ่านท่อนำลมไหลผ่านวัตถุแข็ง เพื่อทดสอบแรงยก แรงต้าน แรงบิด มุมปะทะ ฯลฯ โดยใช้พัดลมที่สามารถปรับความเร็วได้ ลมที่ผ่านไปยังจุดทดสอบต้องมีความสม่ำเสมอของลมตลอดพื้นที่หน้าตัด อุโมงค์ลมที่มีประสิทธิภาพต้องทำให้ลมผ่านมายังวัตถุโดยพุ่งผ่านเป็นเส้นตรง โดยอุโมงค์ลมสำหรับทดสอบวัตถุแข็งที่อากาศไหลผ่านที่ความเร็วน้อย (เลขมัคต่ำ) แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ อุโมงค์ลมแบบเปิด (รูปที่ 3.20) และอุโมงค์ลมแบบปิด (รูปที่ 3.21) ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบอุโมงค์สามารถดูเพิ่มเติมได้ในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.2



รูปที่ 3.20 อุโมงค์ลมแบบเปิด (Open wind tunnel)



รูปที่ 3.21 อุโมงค์ลมแบบปิด (Close wind tunnel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

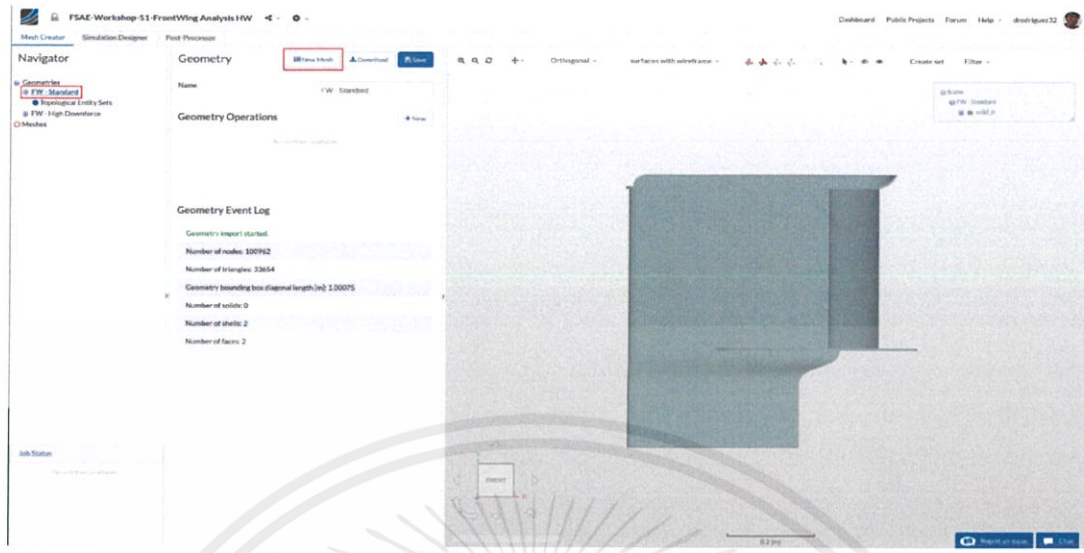
บทที่ 4
วิธีการทดสอบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ด้วยโปรแกรม SIMSCALE

การ Simulation front wing ของรถ Formula student เป็นการทดสอบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ของอากาศที่มากระทบกับ Front wing โดย Front wing ที่นำมาทดสอบนั้นเป็น Front wing แบบ 2 ชั้น ซึ่งมุมปะทะของ Main wing และ Flap wing เท่ากับ 0 ทำการทดสอบที่ความเร็ว 20 m/s เพื่อหาผลลัพธ์ Down force และ Drag force ที่ได้จากการ CFD simulation

รูปที่ 4.1 Geometry ของ Front wing

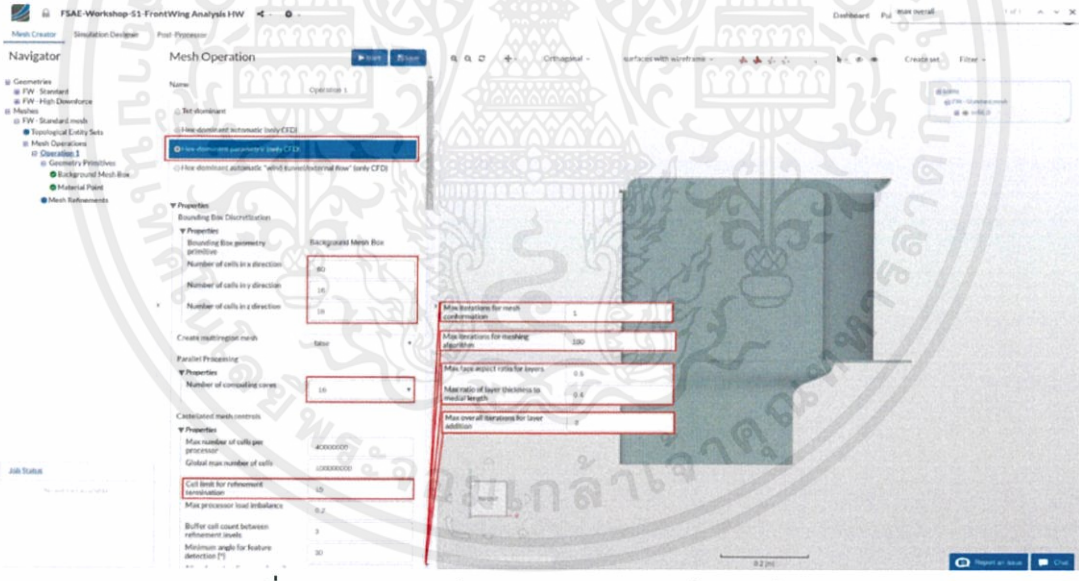
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 Preprocessing-meshing



รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการอัพโหลด Geometry (CAD)

1.หลังจากทำการอัพโหลด Geometry (CAD) ของชิ้นทดสอบแล้ว (ซึ่งสามารถสร้างโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบทั่วไป) ให้กดเลือก New mesh เพื่อทำการสร้าง Mesh ใหม่



รูปที่ 4.3 แสดงการกำหนด Operation ในการตี Mesh

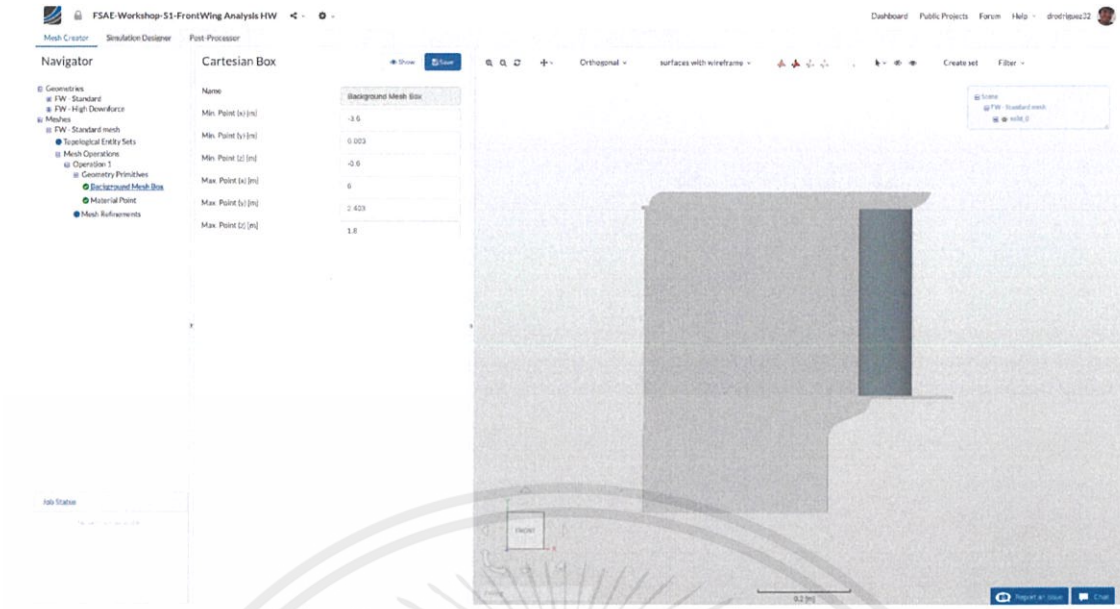
2.กำหนด Operation ในการตี Mesh ซึ่งมีให้เลือกอยู่ 3 แบบ คือ

1) Tet dominant สำหรับการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับ Solid mechanics และ Fluid mechanics

2) Hex dominant automatic (only CFD) สำหรับการคำนวณแบบ Internal flow ซึ่งวิธีนี้เป็นการสร้าง Mesh อัตโนมัติ เหมาะสำหรับ Geometry ที่มีความซับซ้อนน้อย

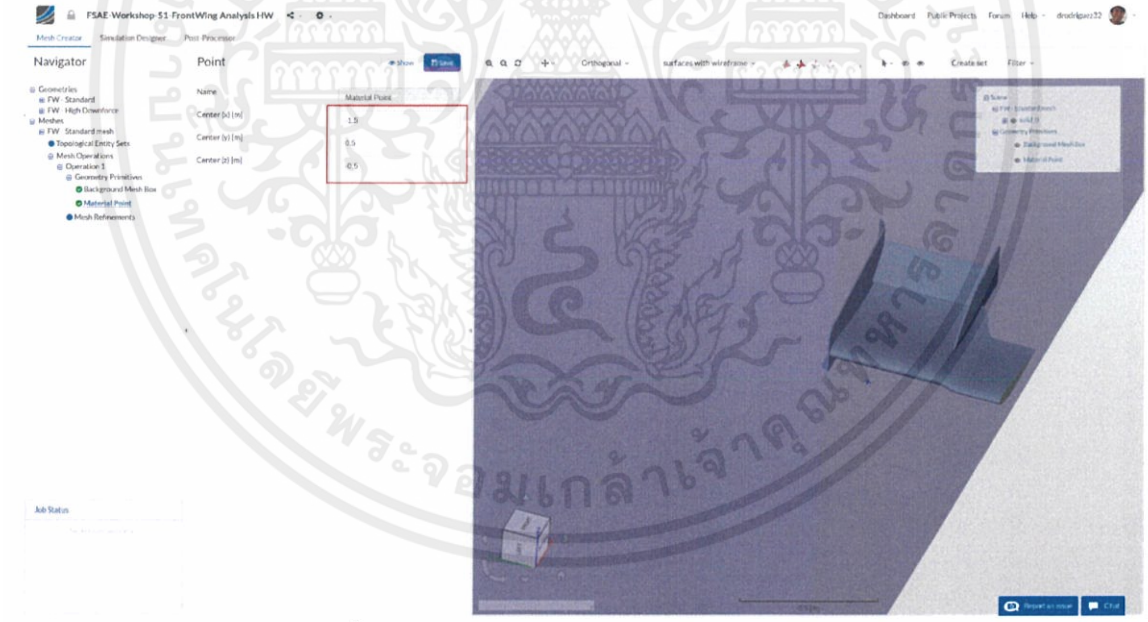
3) Hex dominant parametric (only CFD) สำหรับการคำนวณแบบ Internal flow และ External flow ซึ่งวิธีนี้สามารถกำหนดจำนวนของ Mesh เองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงการกำหนดค่า Background mesh box

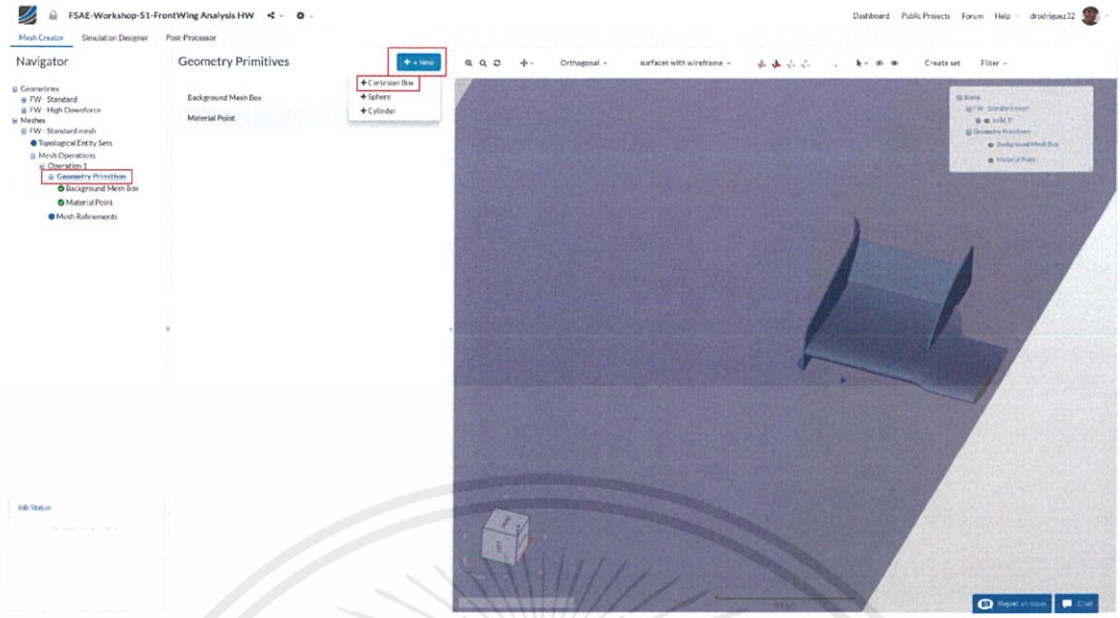
3.สร้างกรอบสี่เหลี่ยมที่ให้อากาศไหลผ่านชิ้นทดสอบ โดยใส่ค่าขนาดของกล่องสี่เหลี่ยมในเมนู Background mesh box ตามพิกัด x y และ z



รูปที่ 4.5 แสดงการกำหนดค่า Material point

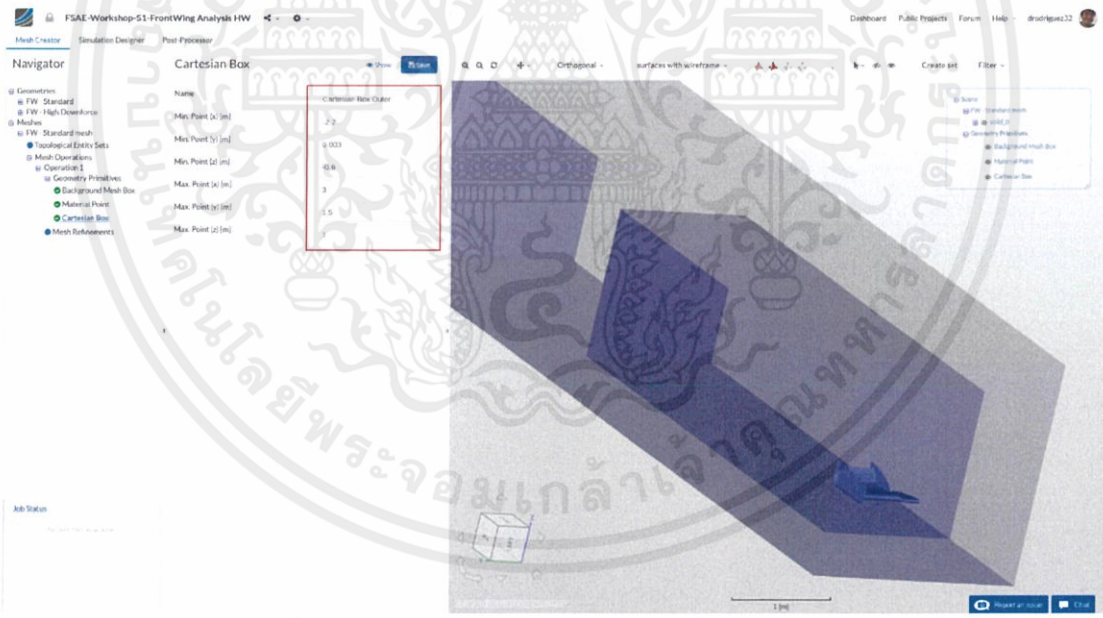
4. กำหนดจุด Center ของ Material point ซึ่งเป็นจุดที่บอกถึงบริเวณที่สร้าง Mesh หรือเป็นจุดที่ใช้บอกว่าของไหลไหลผ่านส่วนไหน ในที่นี้ คือ อากาศไหลผ่าน Front wing จึงกำหนด Material point ให้อยู่ในช่วงของกรอบสี่เหลี่ยม Background mesh box

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงการสร้าง Cartesian box

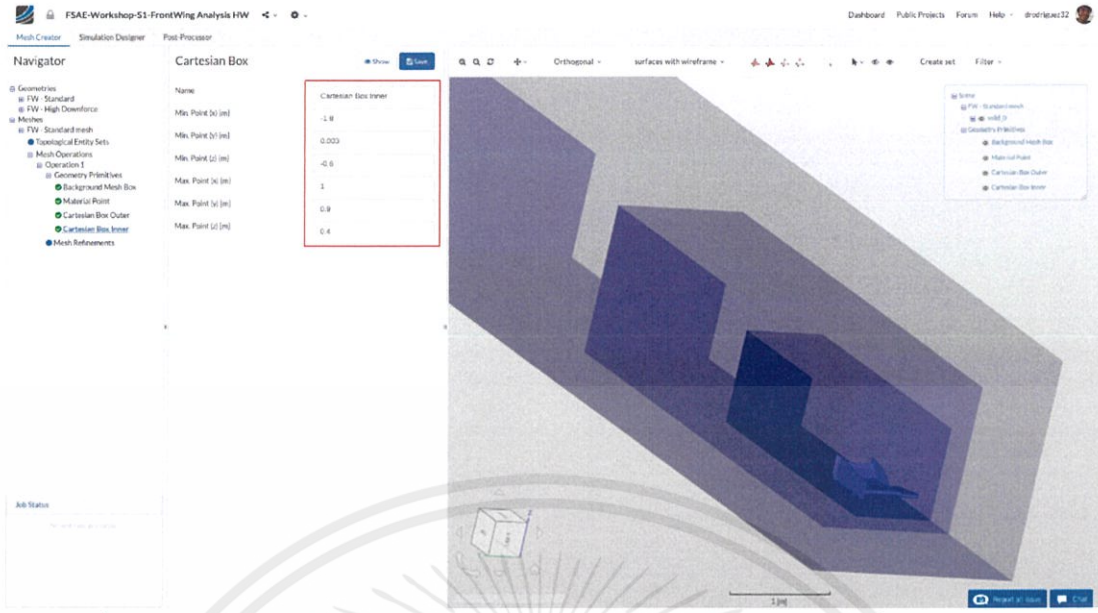
5.สร้างกรอบสี่เหลี่ยมเพิ่มเติมเพื่อความละเอียดของ Mesh ในบริเวณใกล้ๆ Geometry โดยการสร้างเป็น Cartesian box



รูปที่ 4.7 แสดงการกำหนดขนาดของ Cartesian box

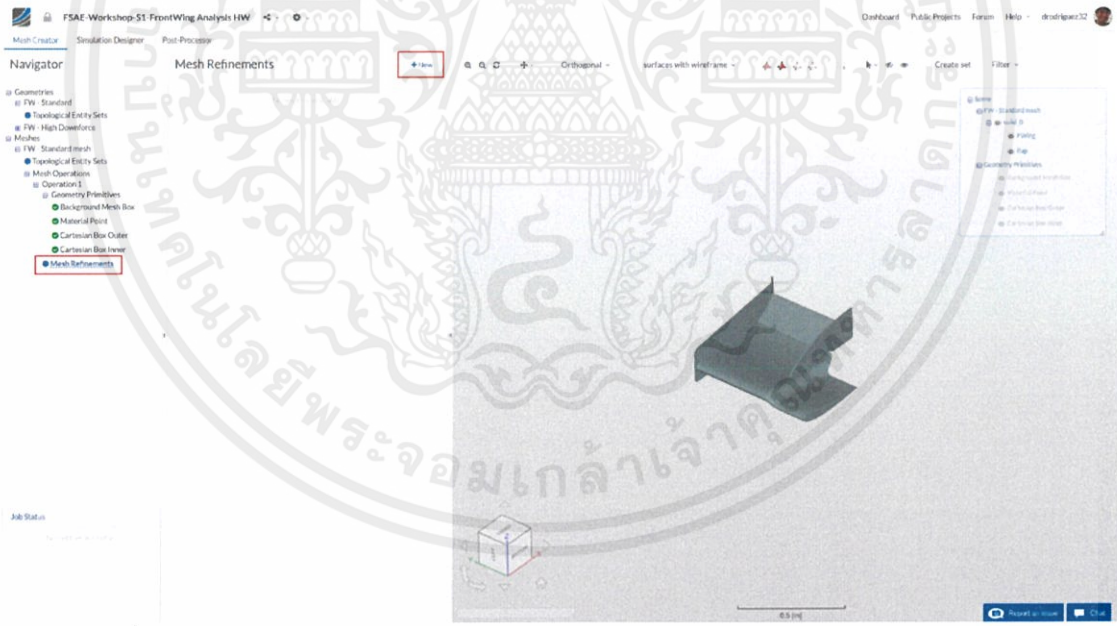
6.กำหนดขนาดของ Cartesian box ในพิกัด x y และ z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงการสร้าง Cartesian box ขนาดเล็กและกำหนดขนาดเพื่อความละเอียด

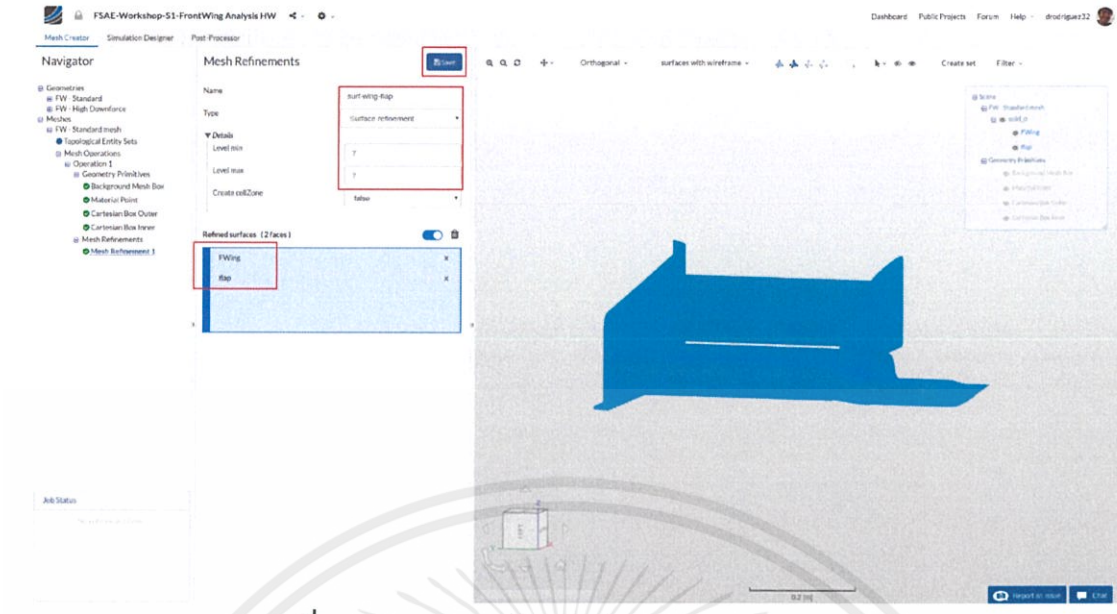
7. สร้าง Cartesian box เพิ่ม โดยทำให้มีขนาดเล็กเพื่อความละเอียดของการสร้าง Mesh ในบริเวณใกล้ๆกับ Geometry (ขั้นตอนนี้สามารถข้ามได้ ขึ้นอยู่กับความละเอียดของ Mesh ที่ต้องการ)



รูปที่ 4.9 แสดงการกำหนดความละเอียดของ Mesh โดยเมนู Mesh refinement

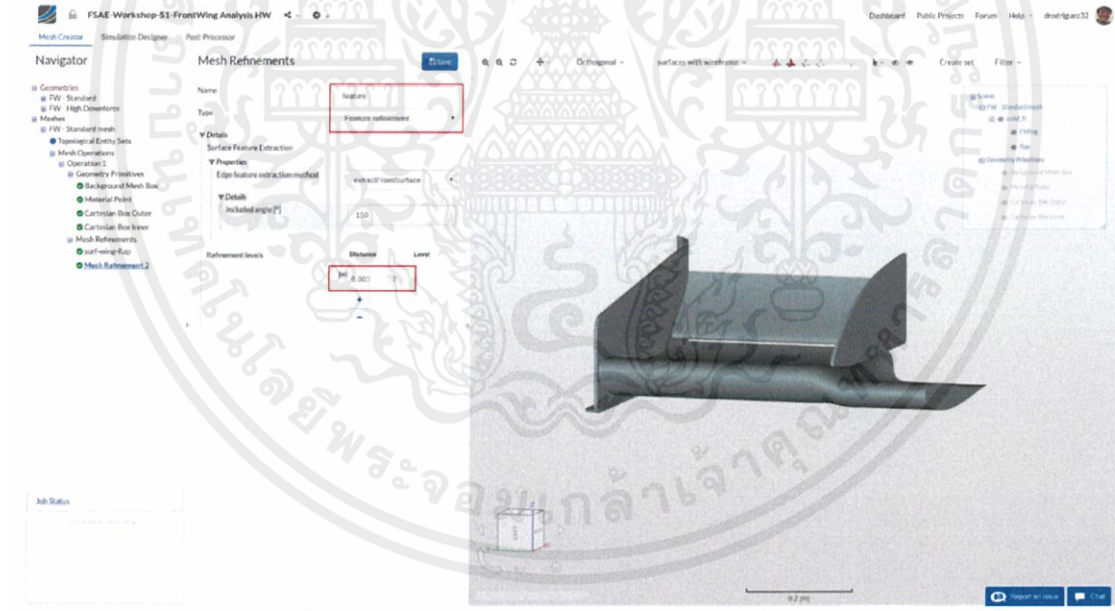
8.กำหนดความละเอียดของ Mesh โดยเลือกเมนู Mesh refinement โดยวิธีนี้สามารถปรับแต่งความละเอียดของ Mesh ให้ได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงการกำหนดค่า Surface refinement

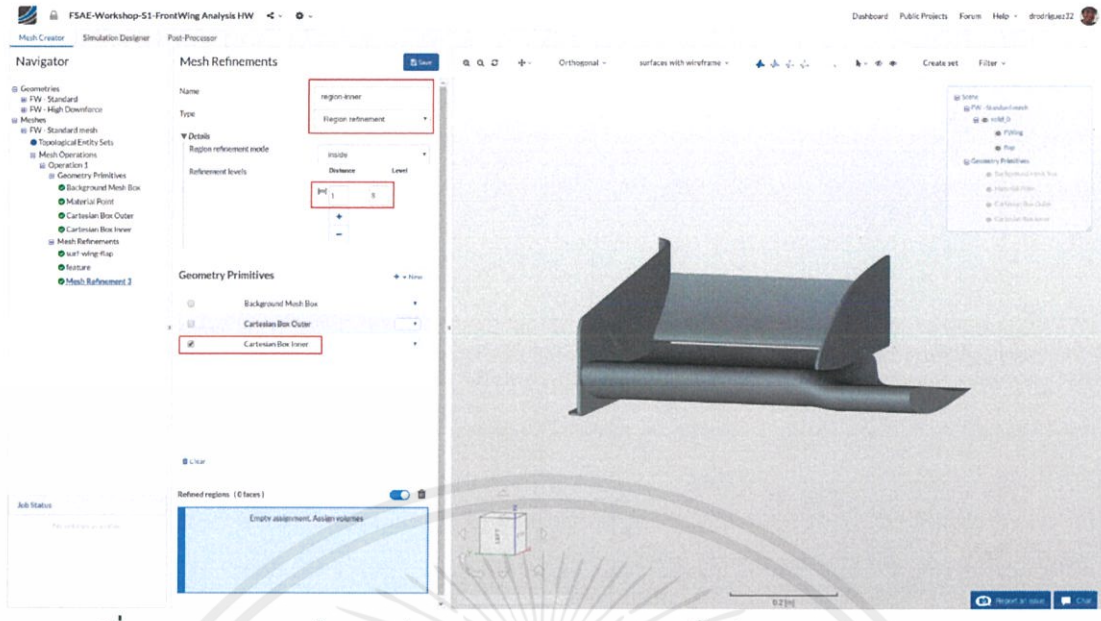
9.กำหนด Mesh refinement ที่ 1 โดยเลือก Surface refinement type เพื่อที่กำหนดความละเอียดของพื้นผิวชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.11 แสดงการกำหนดค่า Feature refinement

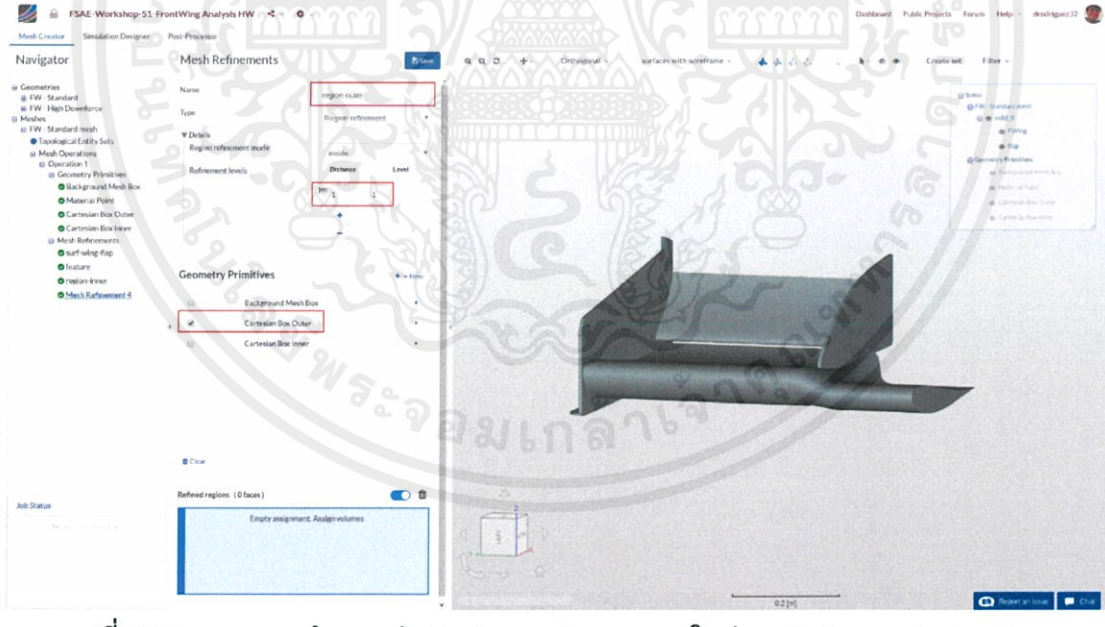
10.กำหนด Mesh refinement ที่ 2 โดยเลือก Feature refinement type เพื่อกำหนดระยะห่างและความละเอียดของแต่ละ Mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงการกำหนดค่า Region refinement ในส่วน Inner cartesian box

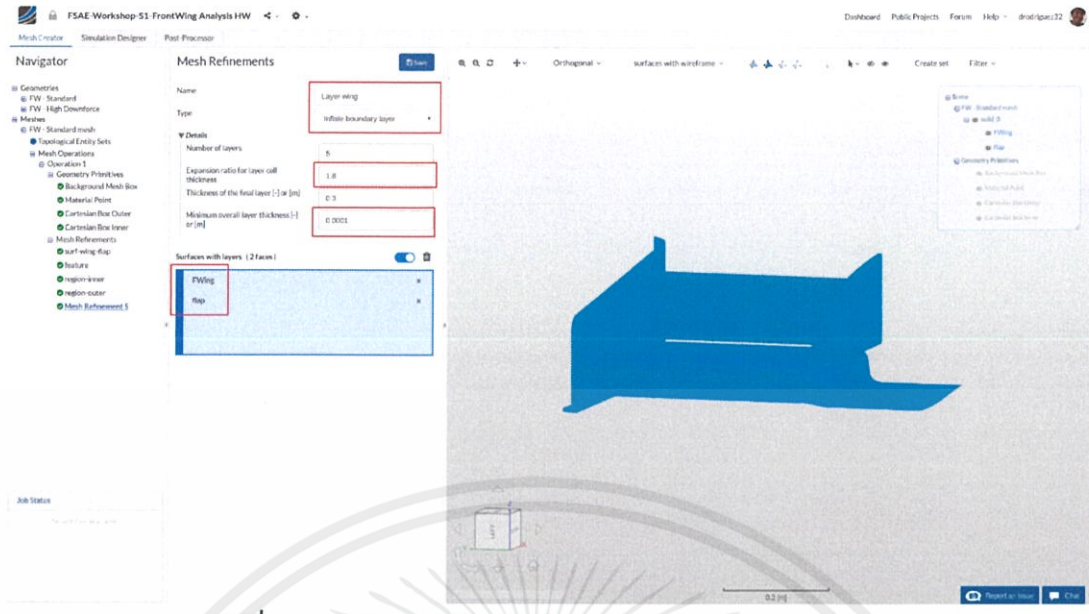
11.กำหนด Mesh refinement ที่ 3 โดยเลือก Region refinement type เพื่อเพิ่มความละเอียดของ Mesh โดยเฉพาะใน Inner cartesian box ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้ชิ้นทดสอบมากที่สุด โดยกำหนด Mesh ที่ level 3



รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดค่า Region refinement ในส่วน Outer cartesian box

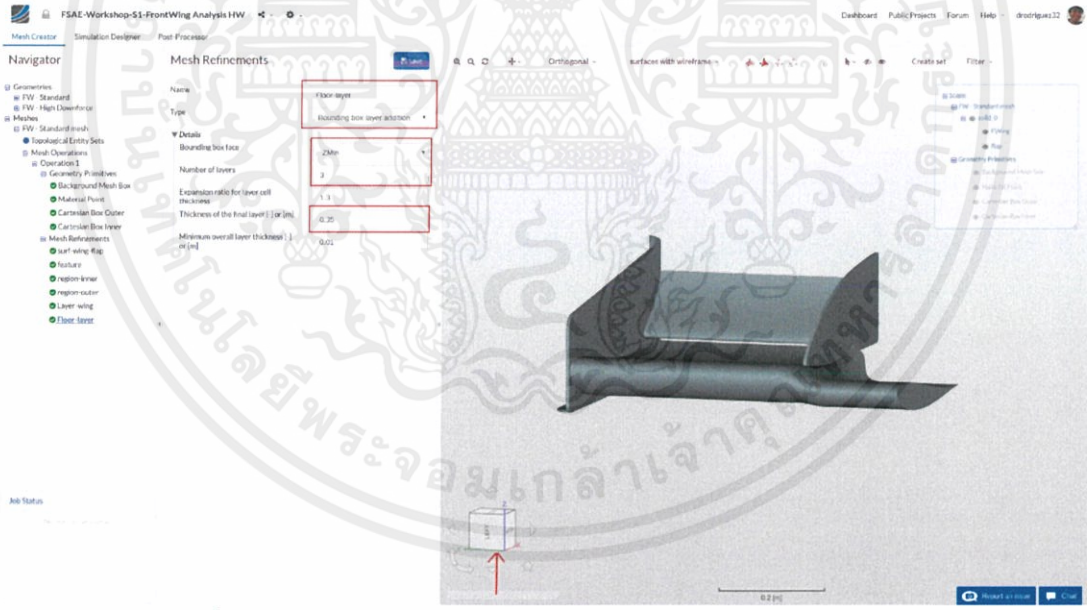
12.กำหนด Mesh refinement ที่ 4 โดยเลือก Region refinement type เพื่อเพิ่มความละเอียดของ Mesh ใน Outer cartesian box ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ถัดออกจาก Inner cartesian box โดยกำหนด Mesh ที่ level 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงการกำหนดค่า Inflate boundary layers

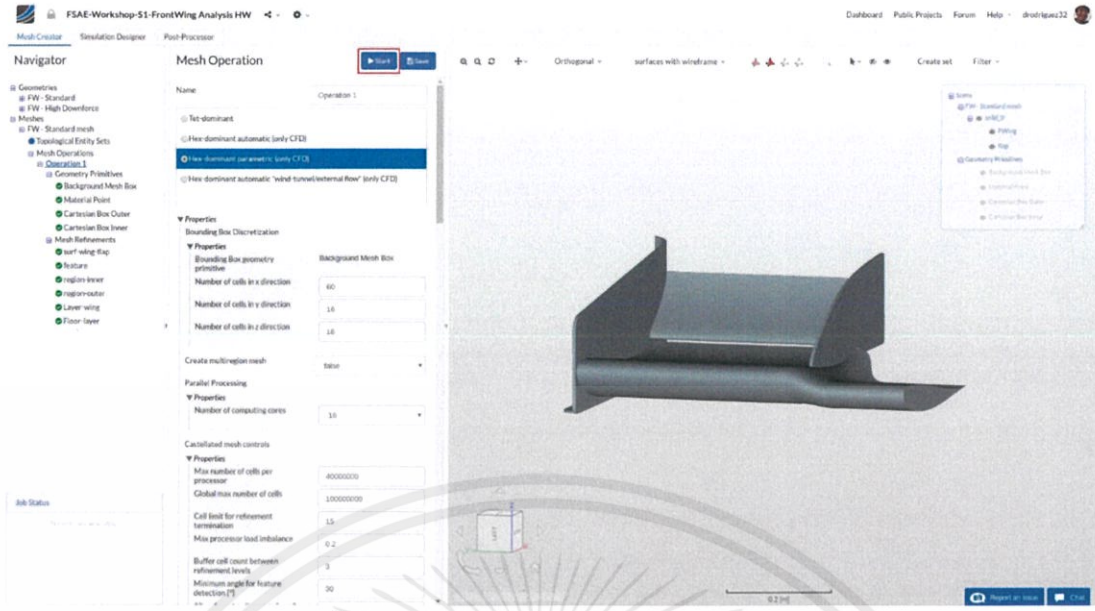
13.กำหนด Mesh Refinement ที่ 5 โดยเลือก Inflate boundary layers type เพื่อที่เพิ่มชั้น Mesh layers บริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบ เพื่อความละเอียดที่มากขึ้นบริเวณพื้นผิว



รูปที่ 4.15 แสดงการกำหนดค่า Bounding box layers addition

14.กำหนด Mesh refinement ที่ 6 โดยเลือก Bounding box layers addition เนื่องจากชิ้นทดสอบในการติดตั้งจริงอยู่ใกล้กับพื้น จึงเป็นการสร้าง Floor layer

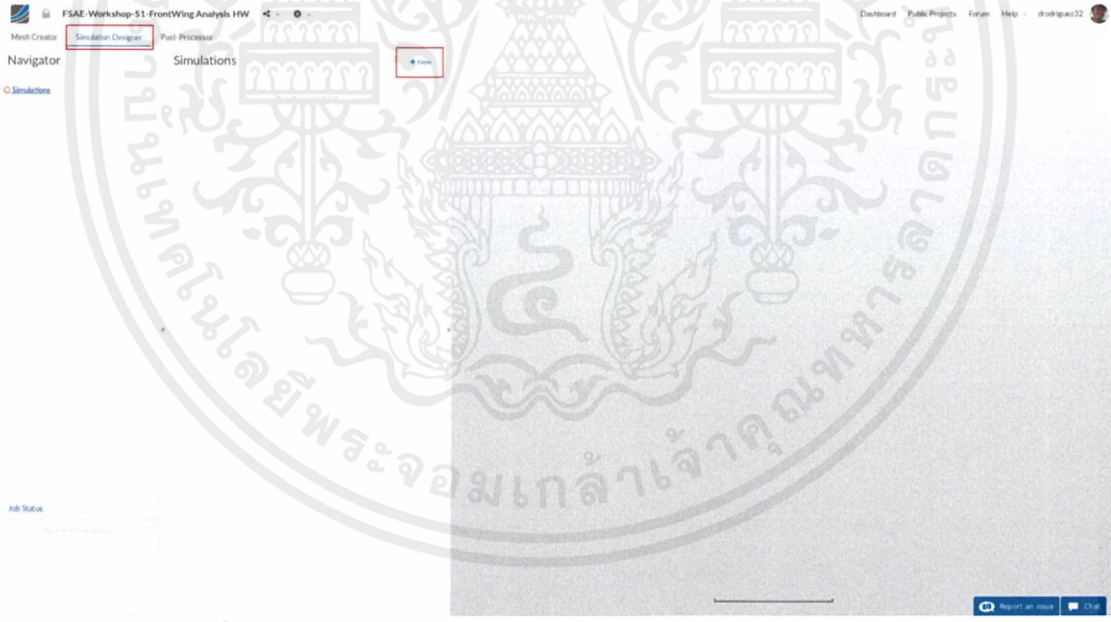
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงการ Start mesh operation

15.ทำการ Start mesh operation เพื่อสร้าง Mesh

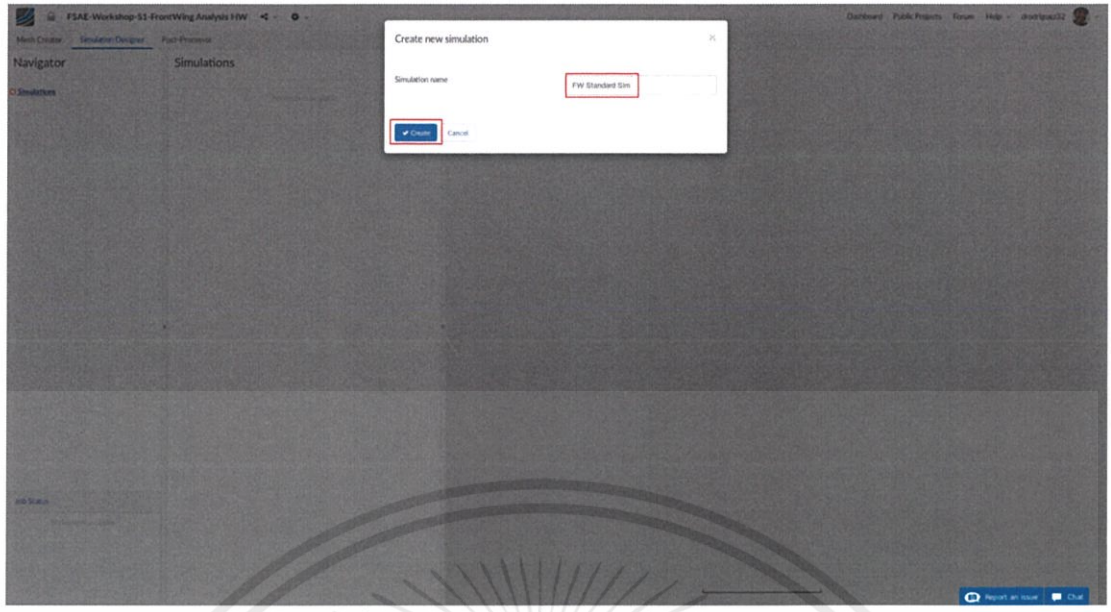
4.2 Processing-simulation



รูปที่4.17 แสดงการกำหนดค่าในส่วนของ Simulation designer

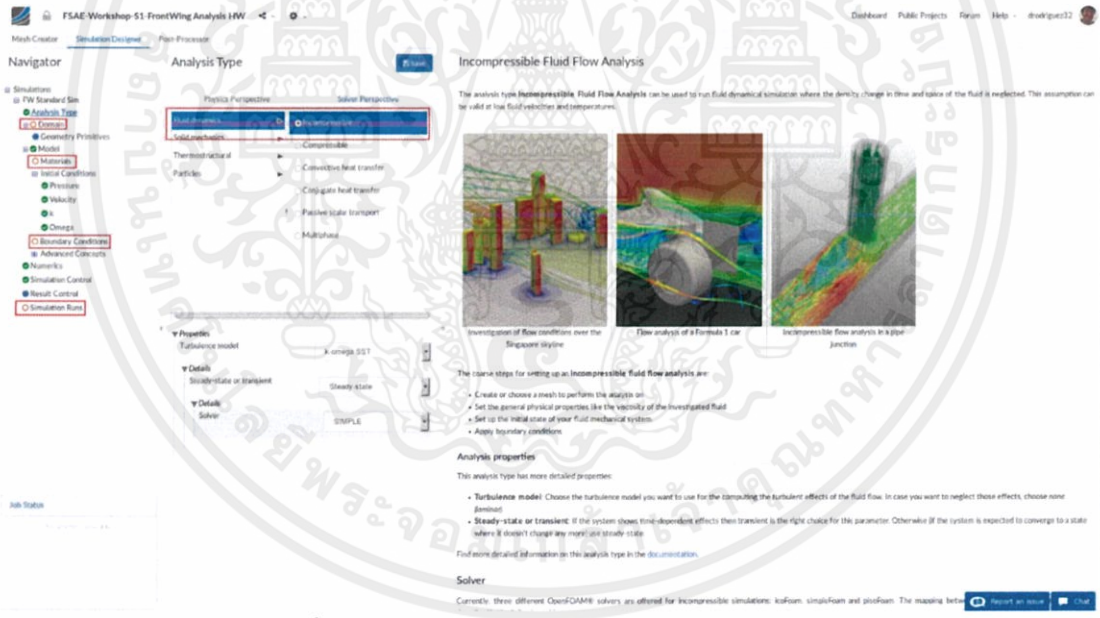
16.หลังจากได้ Mesh เรียบร้อยให้เริ่มทำการ Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กำหนดชื่อในการ Simulation

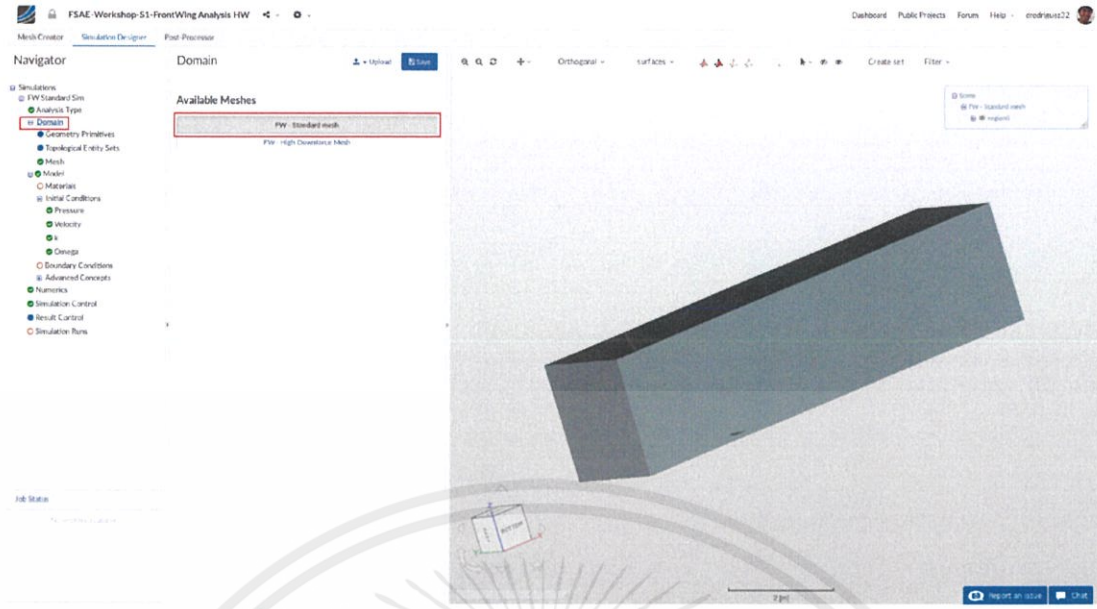
17.ตั้งชื่อการ Simulation



รูปที่ 4.19 แสดงการเลือกประเภทในการวิเคราะห์

18.เลือกรูปแบบการทดสอบ โดยเลือกการวิเคราะห์แบบ Fluid dynamics เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ความเร็วต่ำ (เลขมัคน้อยกว่า 0.3) จึงเลือกเป็นการไหลแบบ Incompressible และใช้ Turbulence model เป็น k-omega SST ในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



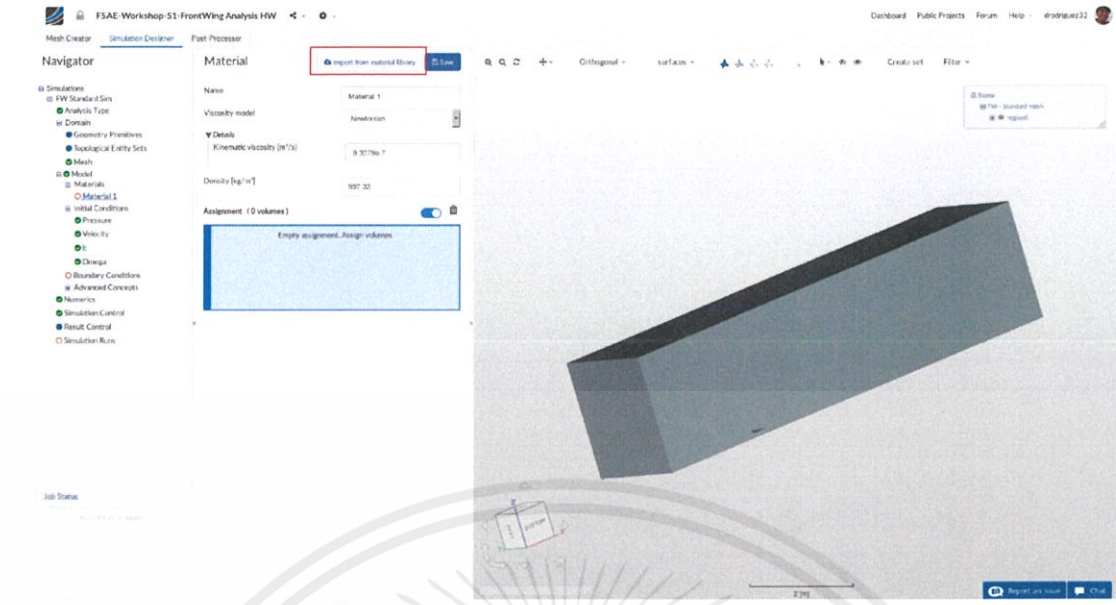
รูปที่ 4.20 แสดงการกำหนด Mesh ที่ใช้ในการ Simulation

19.กดเมนู Domain โดยเลือก Mesh ที่สร้างไว้ก่อนหน้านั้นในการทดสอบ

รูปที่ 4.21 แสดงการเลือกประเภท Materials

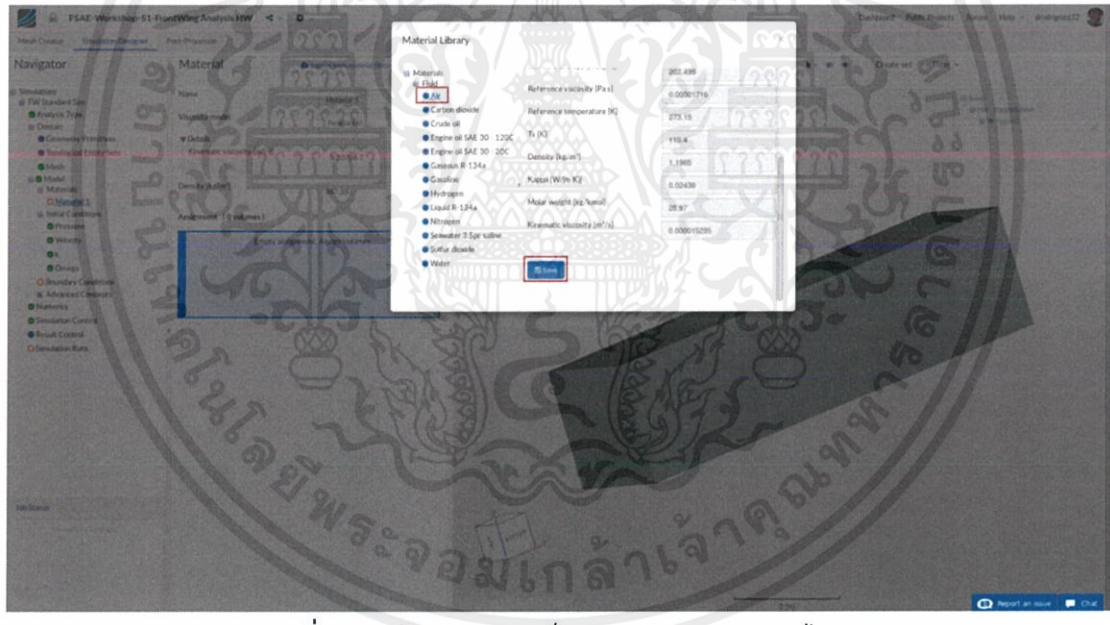
20.เลือก Material

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงการเลือก Material จาก Library

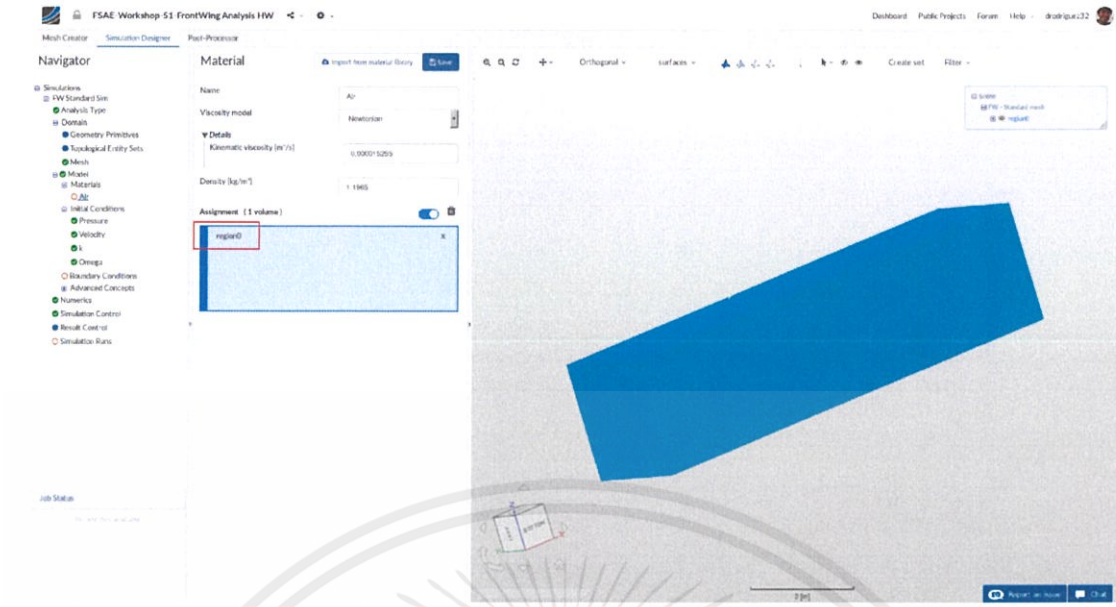
21.เลือก Material จาก Library



รูปที่ 4.23 กำหนด Air เป็น Material ของของไหล

22.ใช้ Air เป็น Material ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



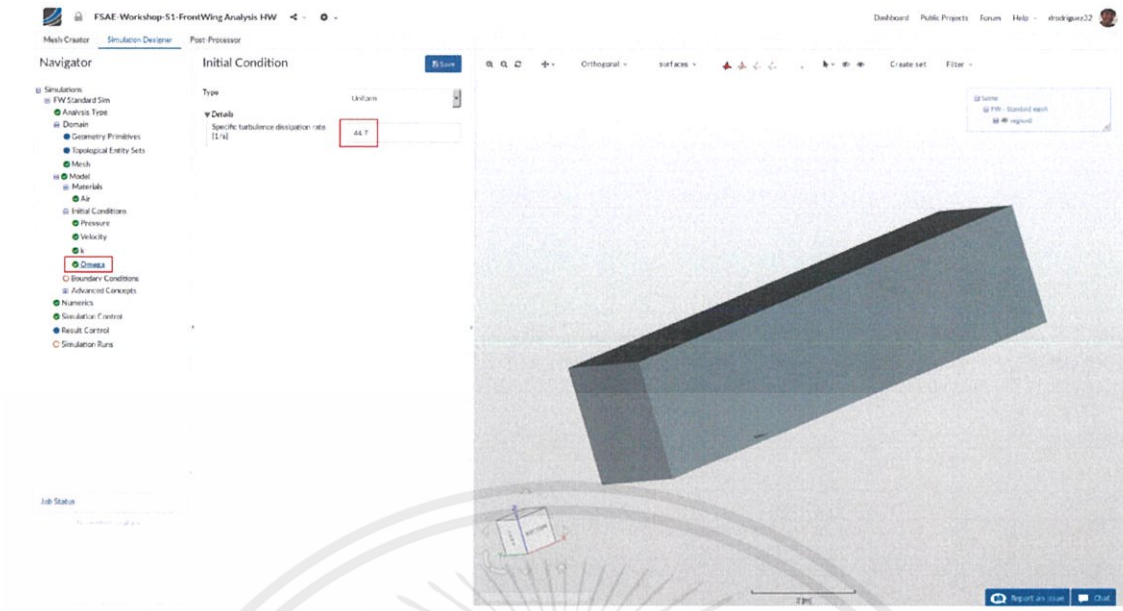
รูปที่ 4.24 แสดงการเลือกบริเวณที่ต้องการให้ของไหลไหลผ่าน

23.เลือก region0 ซึ่งเป็นบริเวณทั้งหมดของกรอบ Mesh

รูปที่ 4.25 แสดงการกำหนดค่า K (Turbulent kinetic energy value)

24. กำหนดค่า K (Turbulent kinetic energy value) 0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



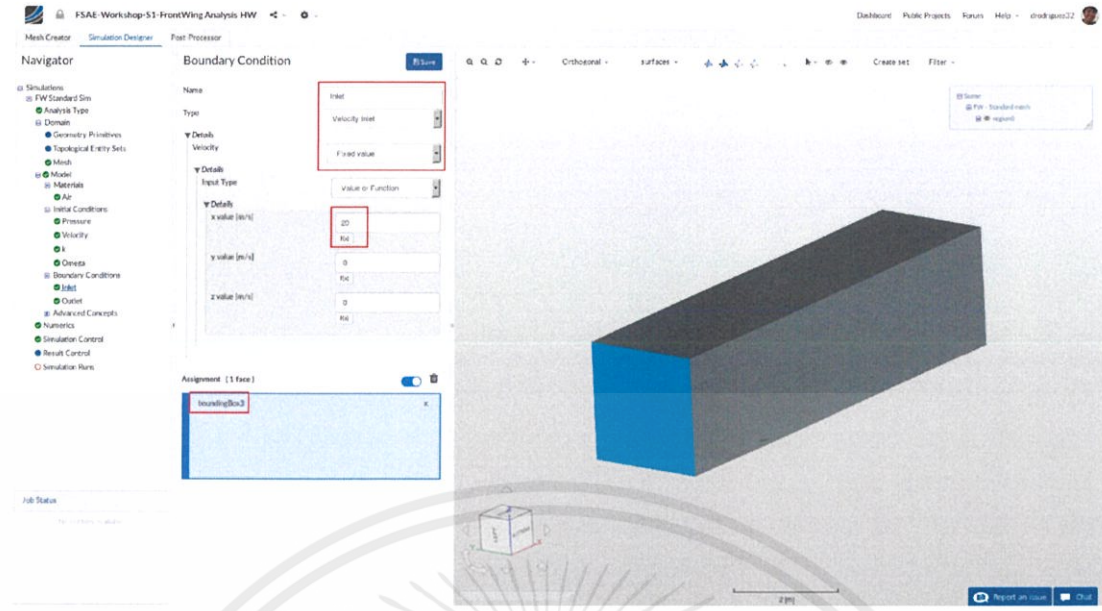
รูปที่ 4.26 แสดงการกำหนดค่า omega (Specific turbulence dissipation rate)

25.กำหนดค่า omega (Specific turbulence dissipation rate) 44.7

รูปที่ 4.27 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions

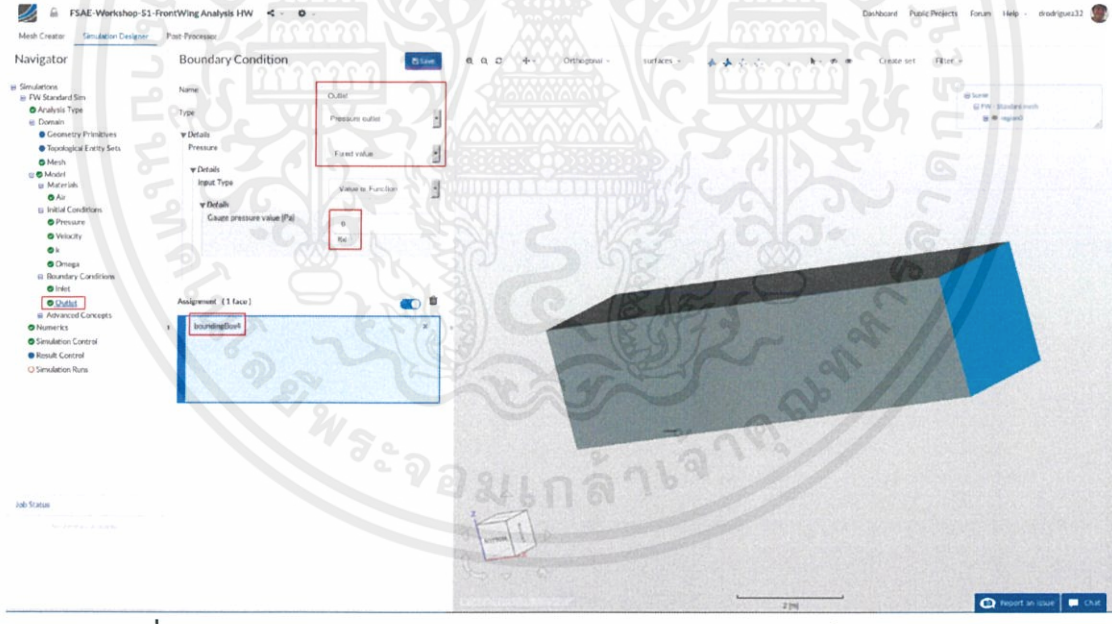
26.กำหนดขอบเขต Boundary conditions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Inlet

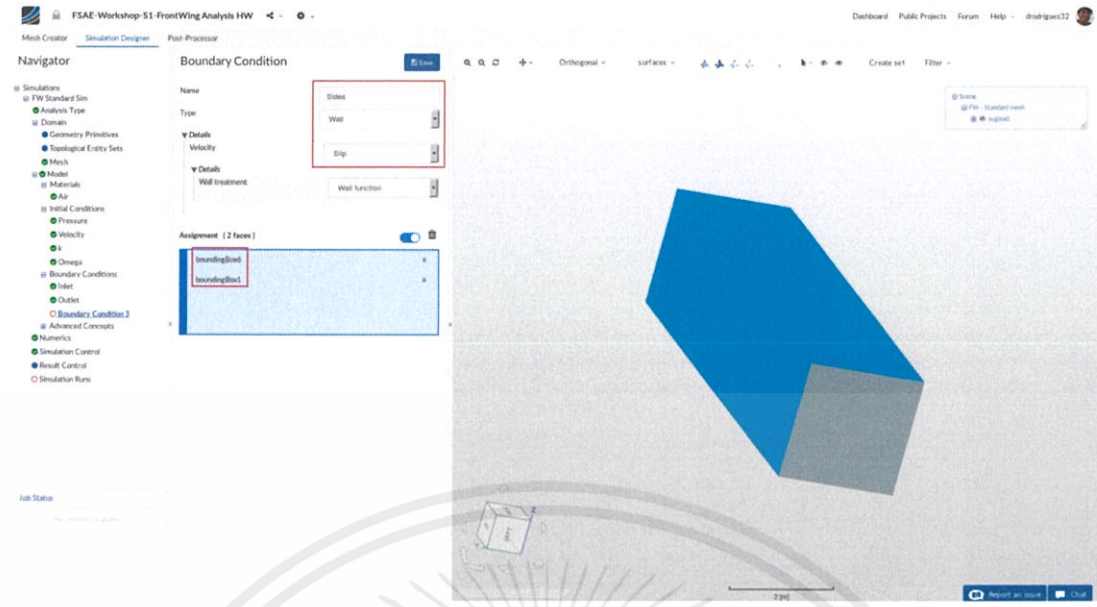
27.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 1 โดยใช้พื้นผิวด้านหน้าของกล่องเป็น Inlet และเลือก ความเร็วของอากาศในพิกัด x = 20 m/s



รูปที่ 4.29 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Outlet

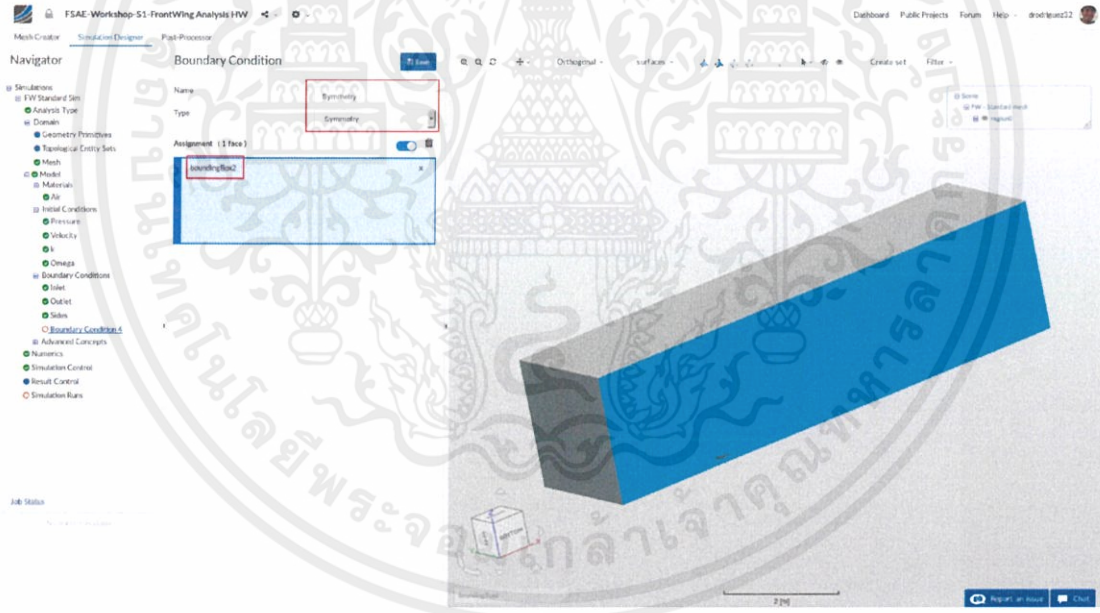
28.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 2 ให้พื้นผิวกล่องด้านหลัง เป็น Outlet โดยมี Gauge pressure value 0 Pa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Slip wall

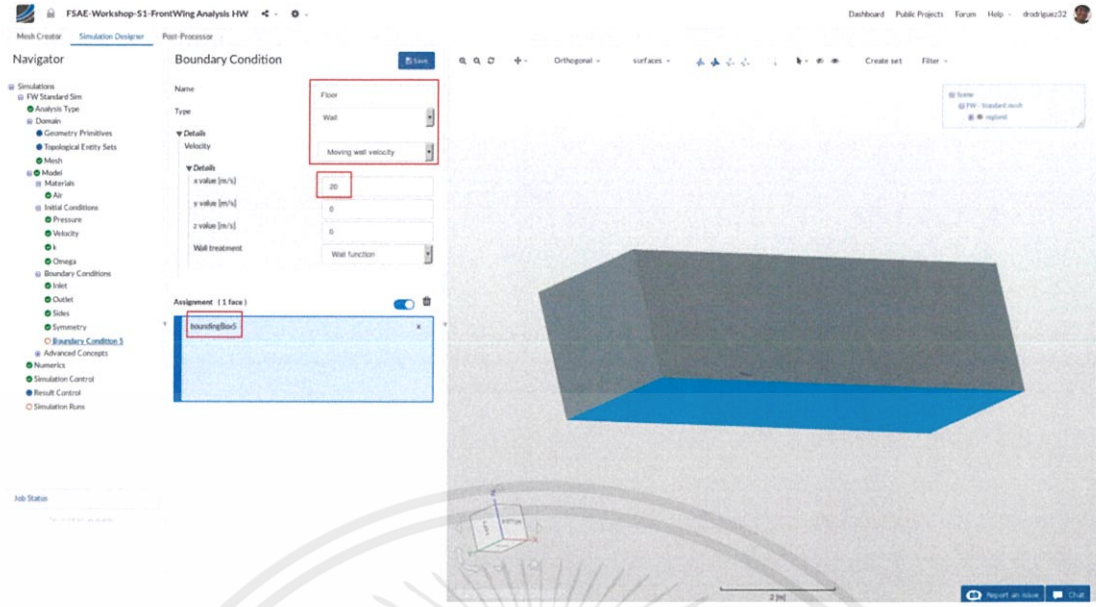
29.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 3 ให้พื้นผิวด้านข้างและด้านบน เป็น Slip wall



รูปที่ 4.31 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Symmetry

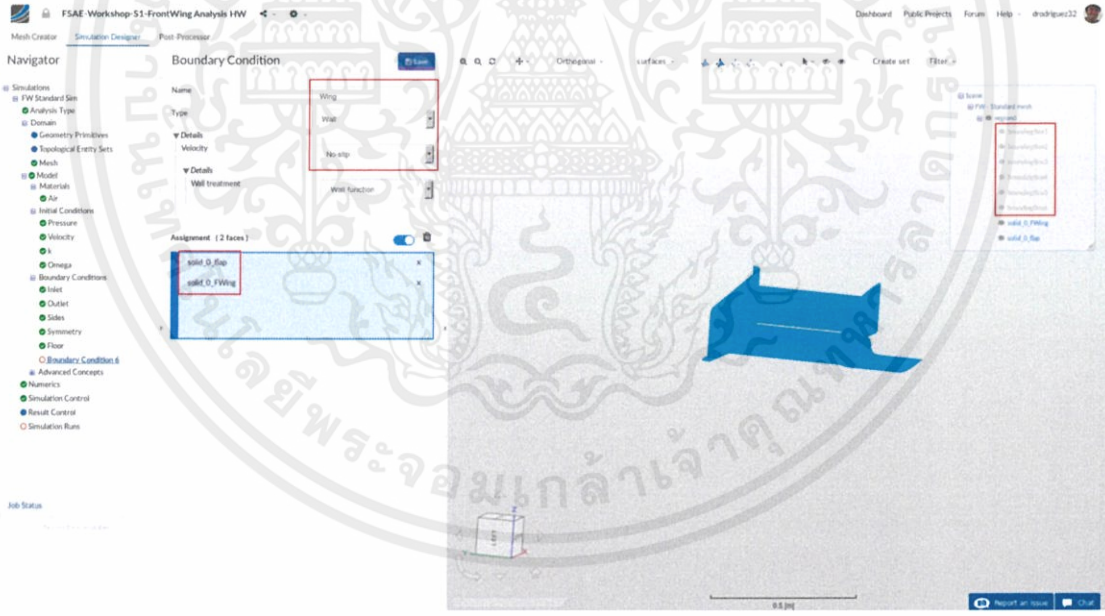
30.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 4 ให้ด้านข้างที่ชิดขอบชิ้นทดสอบ เป็น Symmetry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Floor

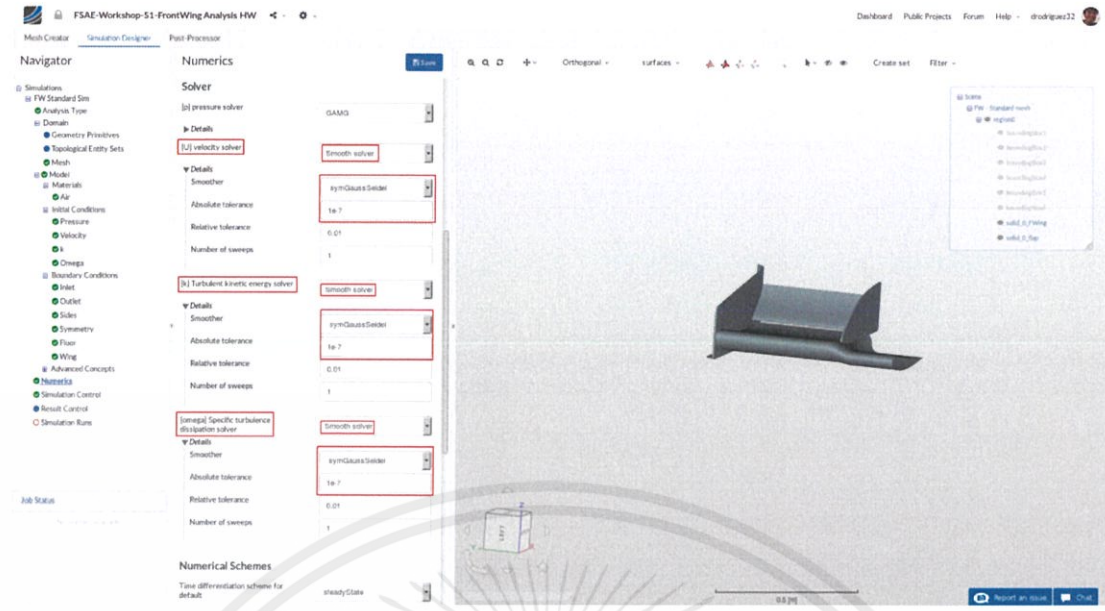
31.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 5 ให้พื้นผิวกล่องด้านล่างเป็น Moving wall velocity ในทิศ x =20m/s



รูปที่ 4.33 แสดงการกำหนดขอบเขต Boundary conditions ในส่วน Front wing

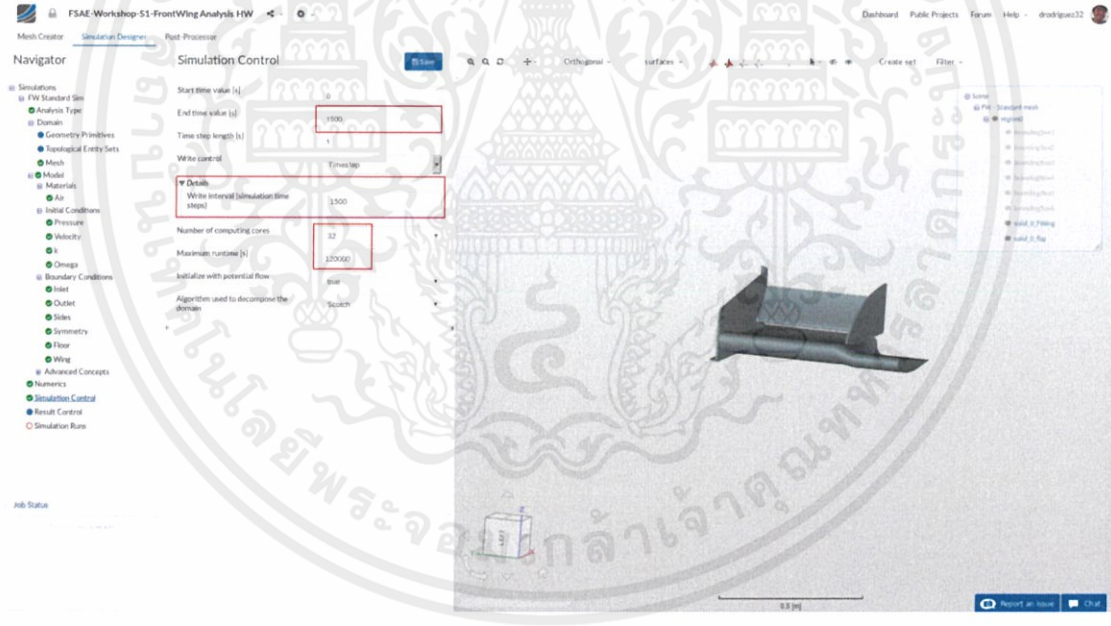
32.กำหนดขอบเขต Boundary conditions ที่ 6 โดยให้ชิ้นทดสอบทั้งหมดเป็น No-slip wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงการกำหนดค่า Numeric method

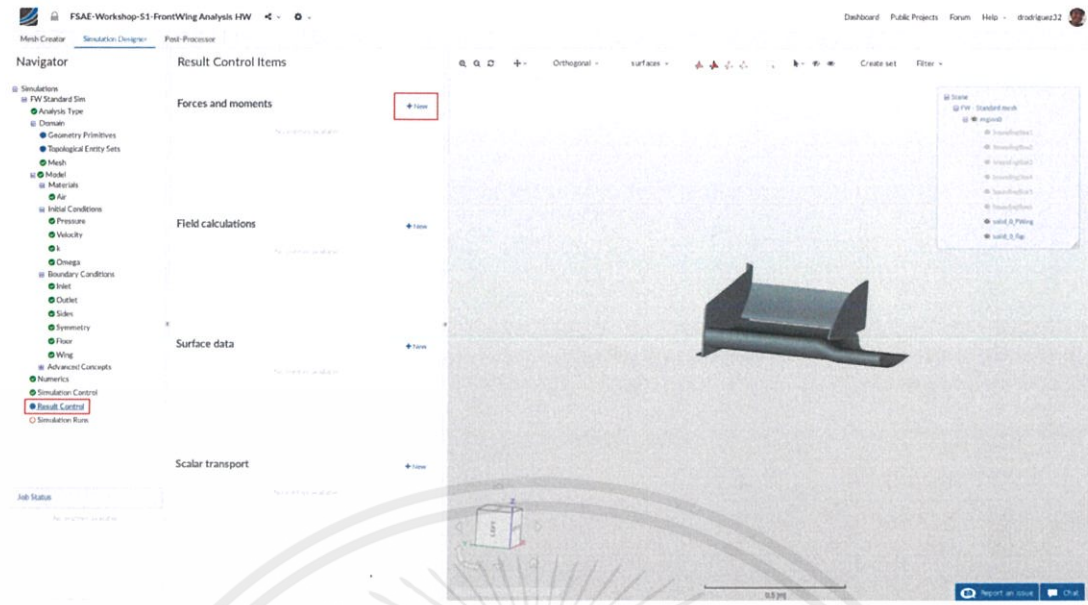
33.กำหนด Numeric method



รูปที่ 4.35 แสดงการกำหนดค่า Simulation control

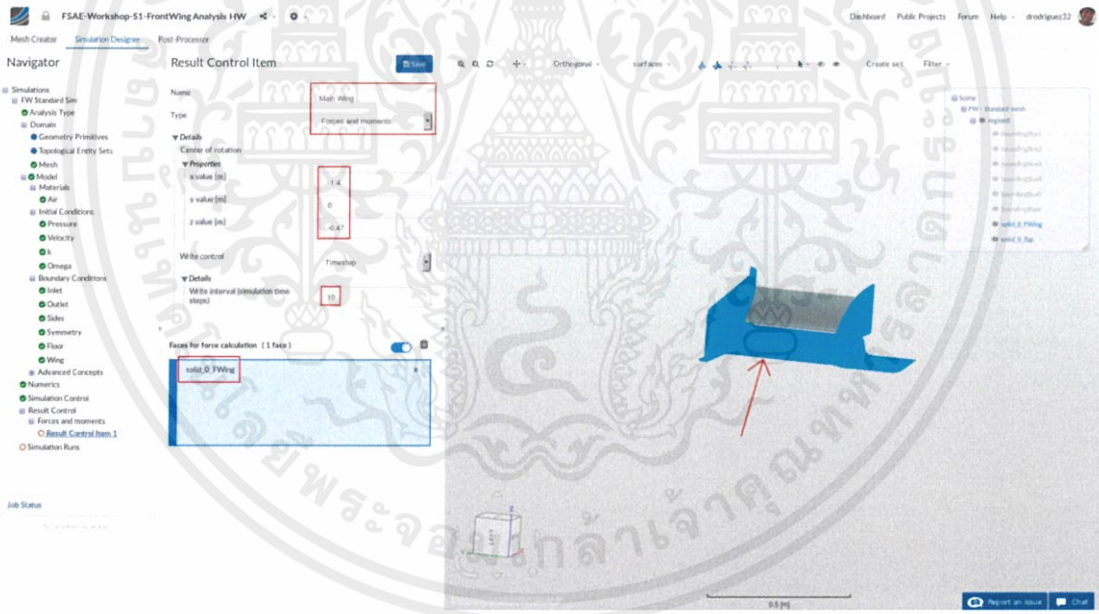
34.กำหนด Simulation control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดงกำหนดค่า Result control

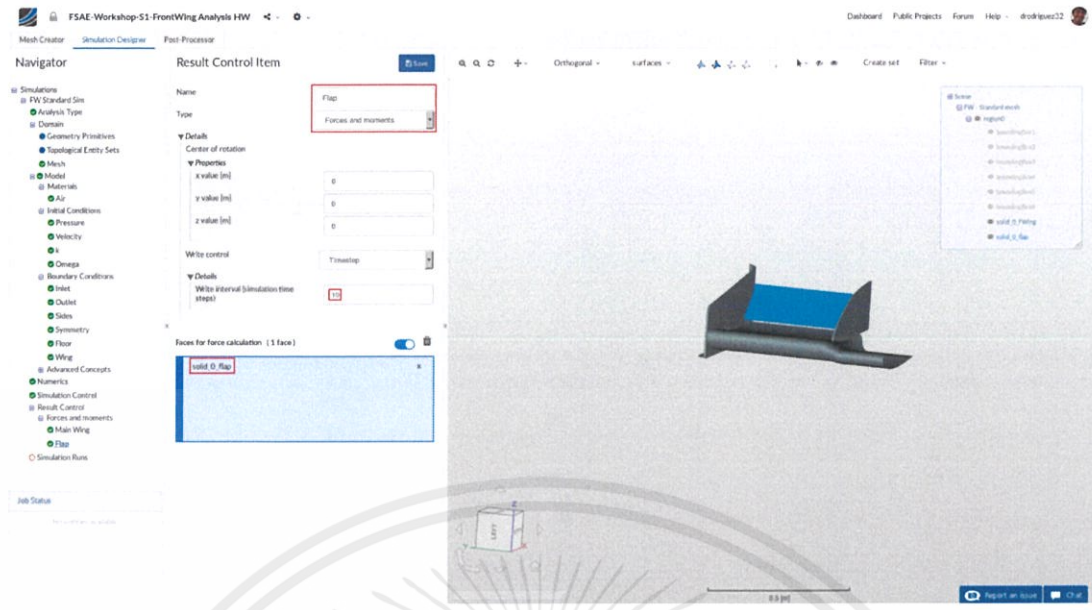
35.กำหนด Result control



รูปที่ 4.37 แสดงการกำหนด Forces and moment ของ Main wing

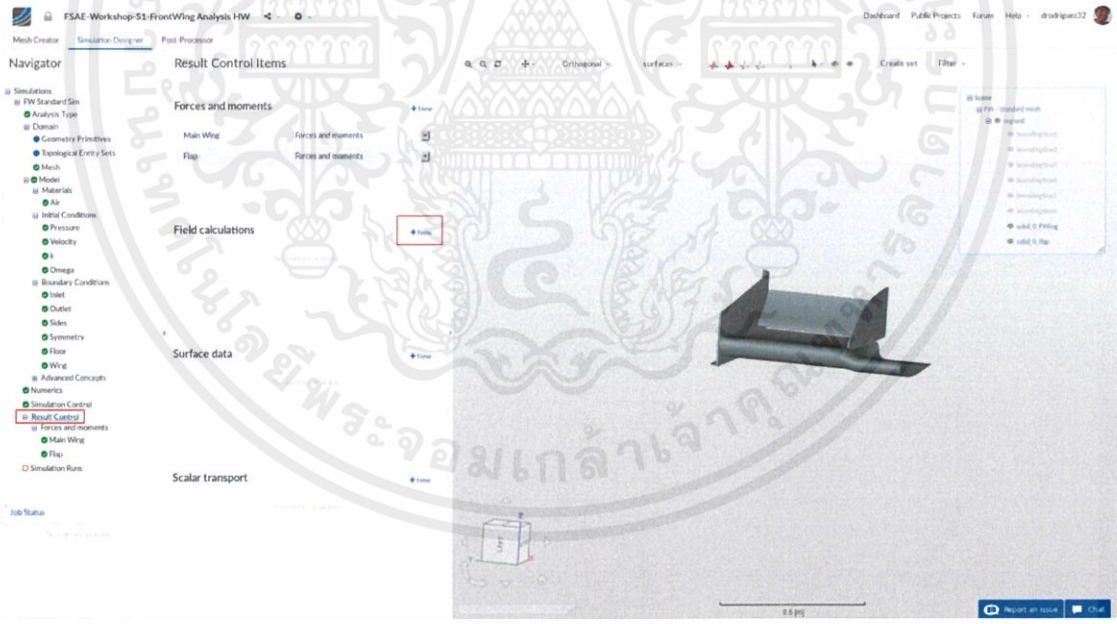
36.กำหนด Forces and moment ของ Main wing เพื่อให้แสดงผลลัพธ์ของแรงเฉพาะในส่วนของ Main wing ที่ได้หลังจากการ Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 แสดงการกำหนด Forces and moment ของ Flap

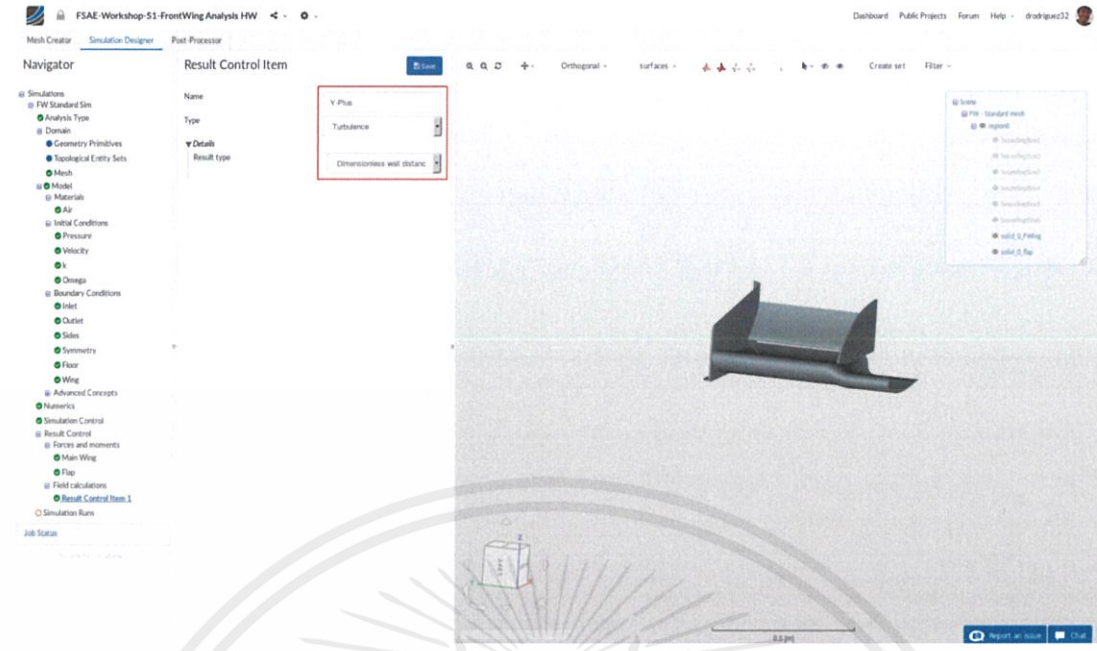
37.กำหนด Forces and moment ของ Flap เพื่อให้แสดงผลลัพธ์ของแรงเฉพาะในส่วนของ Flap ที่ได้หลังจากการ Simulation



รูปที่ 4.39 แสดงการกำหนดค่า Field calculations

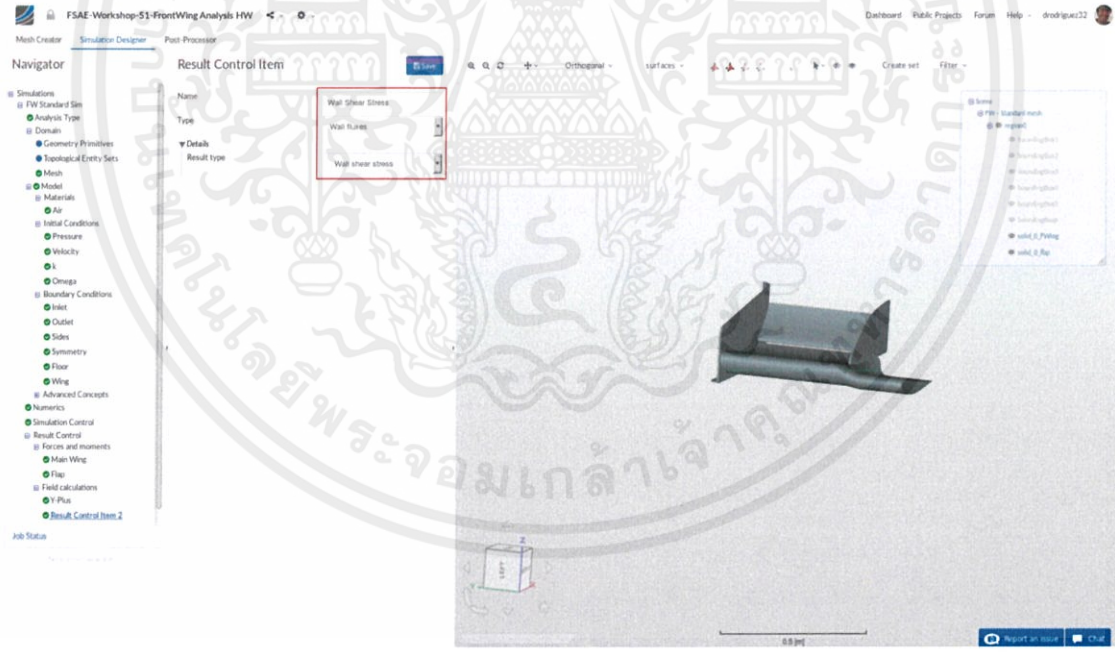
38.กำหนด Field calculations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงการกำหนดค่า Field calculations ที่ 1

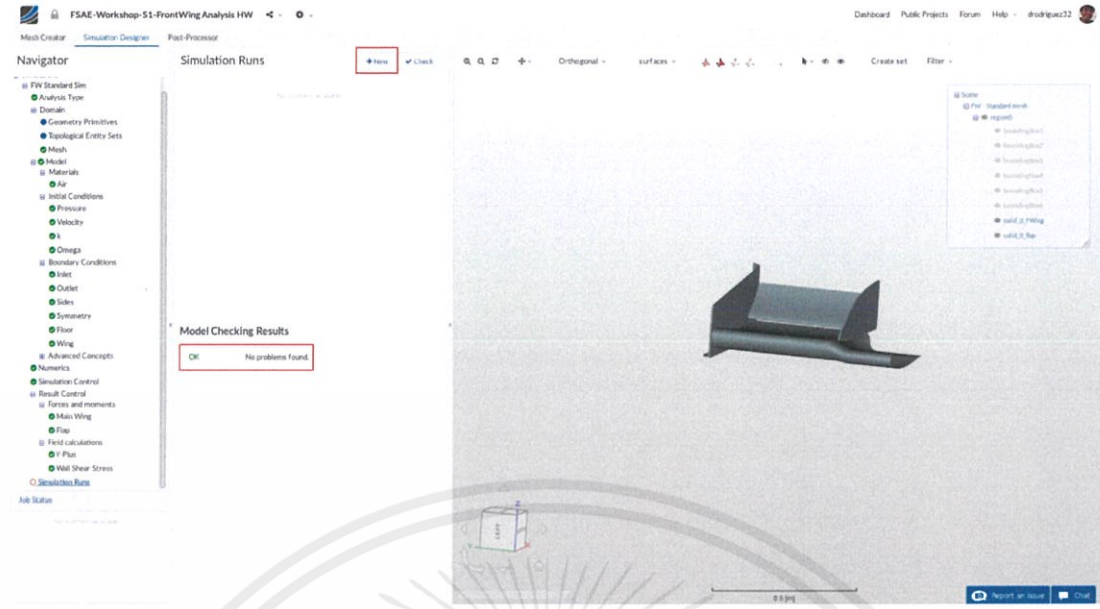
39.กำหนด Field calculations ที่ 1 โดยเลือก Turbulence type



รูปที่ 4.41 แสดงการกำหนดค่า Field calculations ที่ 2

40.กำหนด Field calculations ที่ 2 โดยเลือก Wall fluxes type

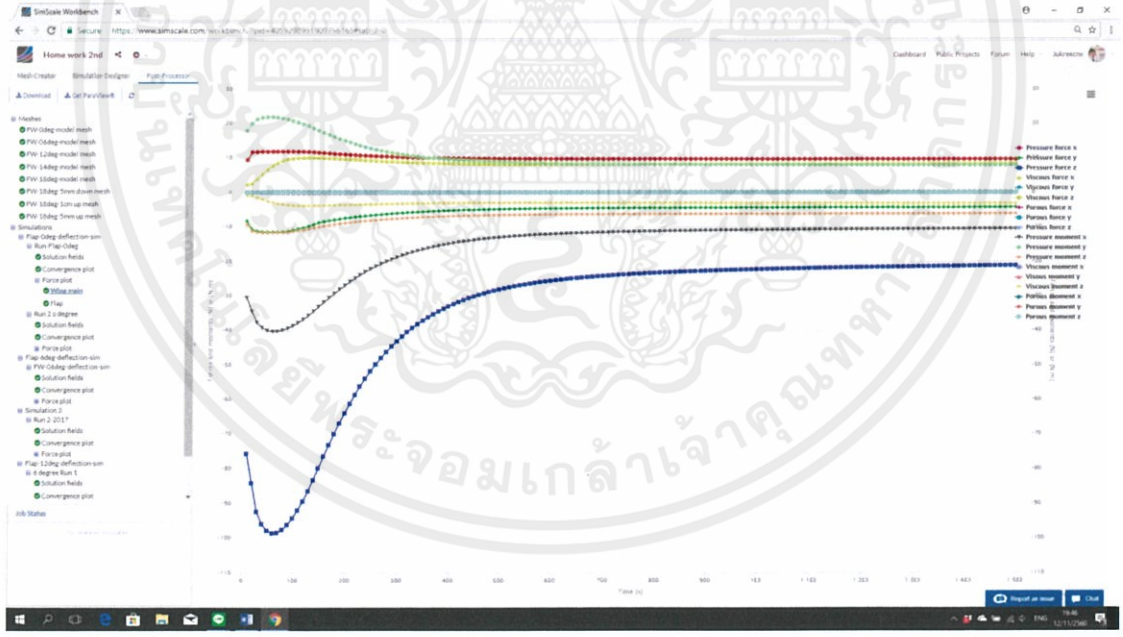
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 แสดงการตรวจเช็คความผิดพลาด และ Start simulation

41.ตรวจเช็คความผิดพลาด และ Start simulation

4.3 Post-processing

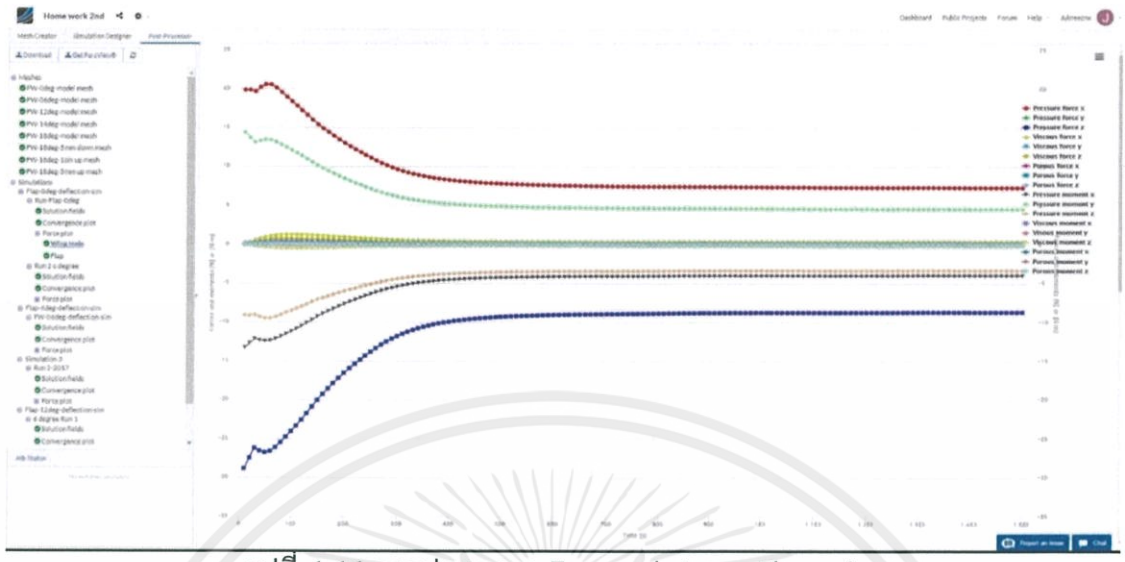


รูปที่ 4.43 กราฟแสดงผล Force plot ของ Main wing

42. Force plot ของ Main wing (วิงล่าง) ผลลัพธ์ที่ได้คือ

- Pressure force ในแนวแกน z ซึ่งแสดงถึง Lift force มีค่า -21.44 นิวตัน
- Pressure force ในแนวแกน x ซึ่งแสดงถึง Drag force มีค่า 9.66 นิวตัน

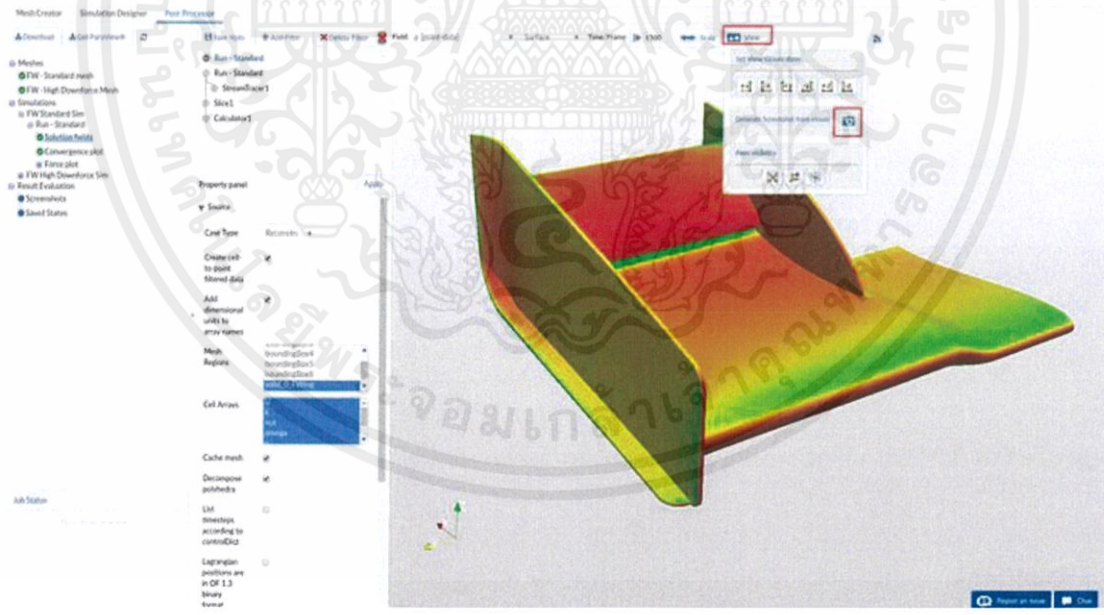
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงผล Force plot ของ Flap wing

43. Force plot ของ Flap wing (วิงบน) ผลลัพธ์ที่ได้คือ

- Pressure force ในแนวแกน z ซึ่งแสดงถึง Lift force มีค่า -8.91 นิวตัน
- Pressure force ในแนวแกน x ซึ่งแสดงถึง Drag force มีค่า 7.42 นิวตัน



รูปที่ 4.45 แสดง Pressure gradient บนพื้นผิวของ Front wing

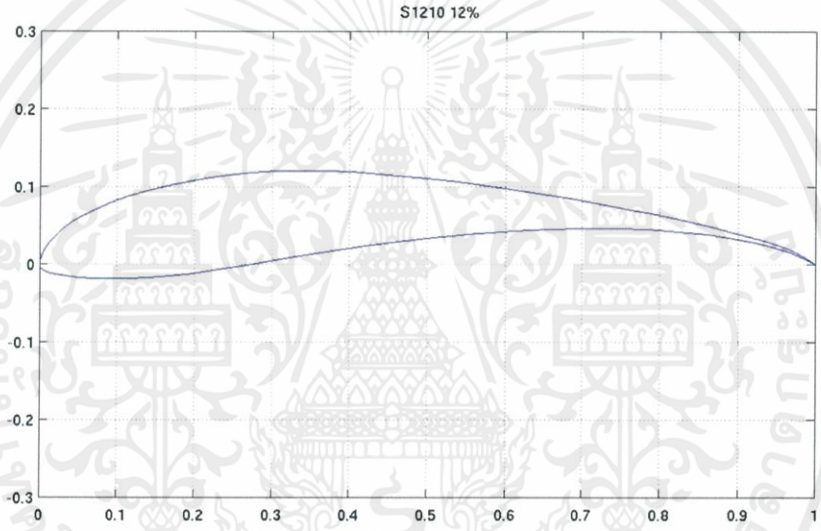
44. แสดง Pressure gradient บนพื้นผิวของ Front wing ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวด้านบนของ Flap (สีแดง) มี Pressure สูง ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Lift force มีค่าติดลบ (เกิดแรงกด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วิธีดำเนินการ

ในการดำเนินการประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบอุโมงค์ลมและ CFD simulation ในการทดสอบชิ้นทดสอบปีกชั้นเดียวและต่อไปทดสอบด้วย CFD simulationในรถเต็มคันที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

5.1 การเลือกแบบปีก



รูปที่ 5.1 Aerofoil S1210

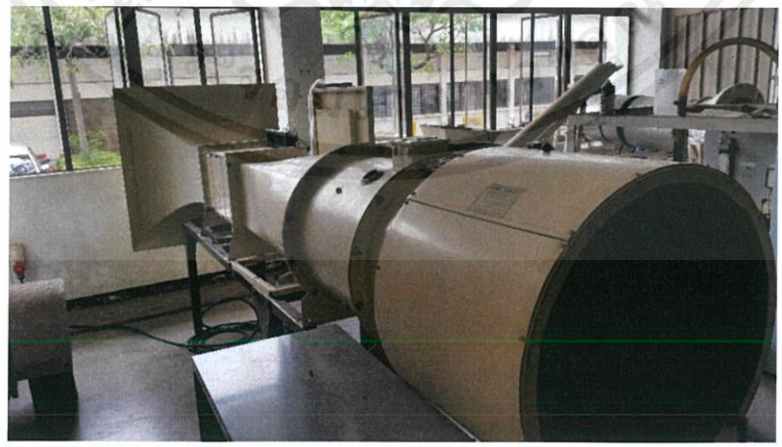
เนื่องจากการแข่งขัน Formula SAE ความเร็วในการเข้าโค้งที่ใช้ในการแข่งขันอยู่ที่ประมาน 40-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และมีค่า Reynolds number ไม่เกิน 500,000 ถือว่าต่ำเมื่อเทียบความเร็วของเครื่องบิน จึงเลือกใช้ Aerofoil รหัส s1210 แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่ม High lift low reynolds number Aerofoil ซึ่งมีคุณสมบัติในการสร้างแรงยกได้สูง ในสภาวะที่มีค่า Reynold ต่ำ และ $\frac{C_L}{C_D}$ มีค่าสูง ซึ่ง Aerofoil ที่เหมาะสมกับรถแข่งที่ Reynolds number มีค่าเป็น 290,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง

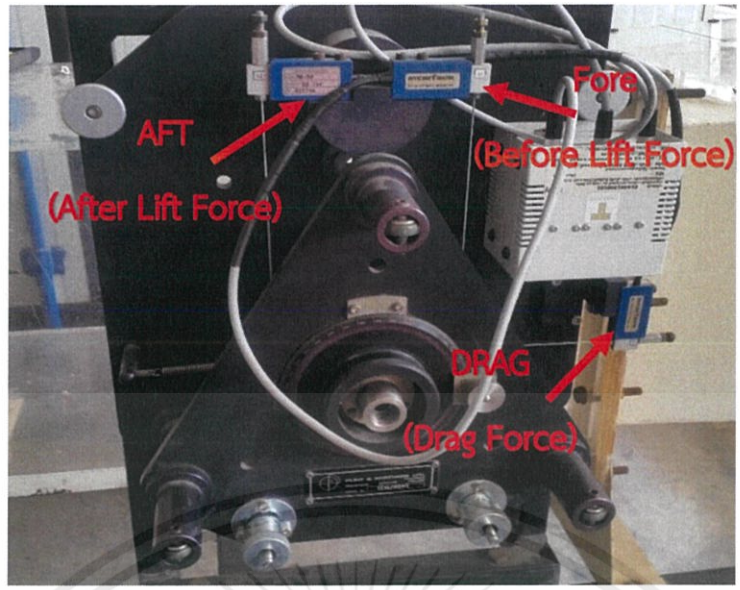
การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมนั้น ทำเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งใช้โมเดลขนาดเล็กและไม่ซับซ้อนจนเกินไป โดยวัตถุที่นำมาทดสอบนั้นเป็น Aerofoil ขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริงที่ใช้ติดรถแข่ง เนื่องจากเหมาะสมกับขนาดของอุโมงค์ลมและทดลองวัดค่าแรงต้านและแรงยก (แรงกด) เปรียบเทียบกับค่าที่ได้ใน CFD ข้อมูลของอุโมงค์ลมแสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 รูปที่ 5.4 แสดงชุดโหลดเซลล์ที่ใช้อ่านค่า ประกอบไปด้วยโหลดเซลล์ที่ใช้อ่านค่าแรงยกหรือแรงกด 2 ตัวและโหลดเซลล์ที่ใช้อ่านค่าแรงต้าน 1 ตัว ส่วนรูปที่ 5.5 แสดงข้อมูลทางเทคนิคของโหลดเซลล์ ซึ่งโหลดเซลล์ที่ใช้นั้นสามารถรับแรงได้ไม่เกิน 50 lbf (ประมาณ 220 N.)

รูปที่ 5.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอุโมงค์ลม



รูปที่ 5.3 อุโมงค์ลมภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



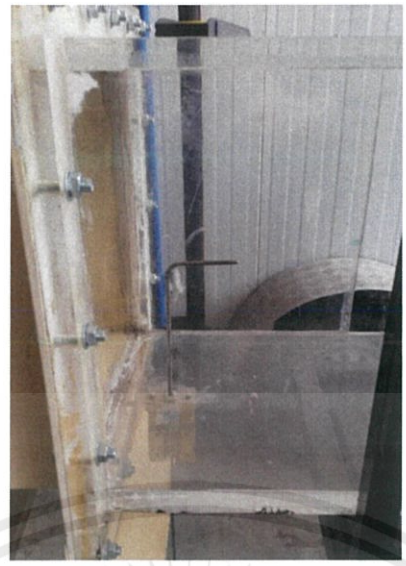
รูปที่ 5.4 ชุดโหลดเซลล์ที่ใช้อ่านค่า

รูปที่ 5.5 ข้อมูลทางเทคนิคของโหลดเซลล์

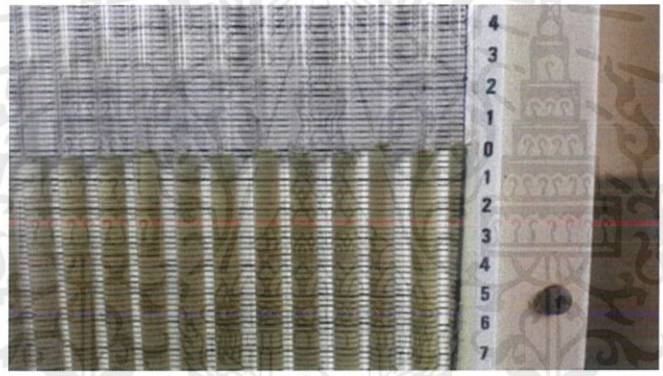
การอ่านค่าโหลดเซลล์ ค่าของโหลดเซลล์ที่อ่านได้มานั้นแสดงบนหน้าจอมอนิเตอร์ตัวอย่างแสดงดังรูปที่5.6 โดยค่าของแรงกดกระทำกับวัตถุ คือ ค่าที่ได้มาจากโหลดเซลล์ Fore รวมกับค่าที่ได้มาจาโหลดเซลล์ AFT ส่วนค่าของแรงต้าน คือ ค่าที่ได้มาจากโหลดเซลล์ DRAG

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างการอ่านค่าที่ได้จากอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 Pitot Tube ที่ใช้ในการวัดความเร็วลมในอุโมงค์ลม



รูปที่ 5.8 ระดับน้ำขณะที่ไม่มีความเร็ว

การหาความเร็วของอากาศจาก Pitot tube สามารถคำนวณได้จากสมการ Bernoulli's equation แสดงดังสมการที่ 5.1 ซึ่งรูปที่ 5.7 แสดงถึง Pitot tube ที่ใช้ในการวัดความเร็วลมในอุโองค์ลมของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และรูปที่ 5.8 แสดงถึงระดับน้ำขณะที่ไม่มีความเร็วลม โดยมีระดับน้ำเท่ากับทุกหลอด

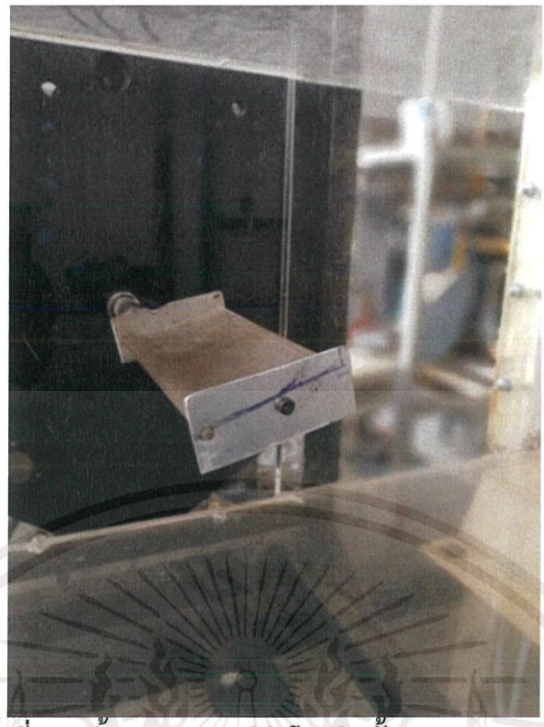
Static pressure + Dynamic pressure = Total pressure

$$P_s + (\frac{\rho_{air} v_{air}^2}{2}) = P_t$$

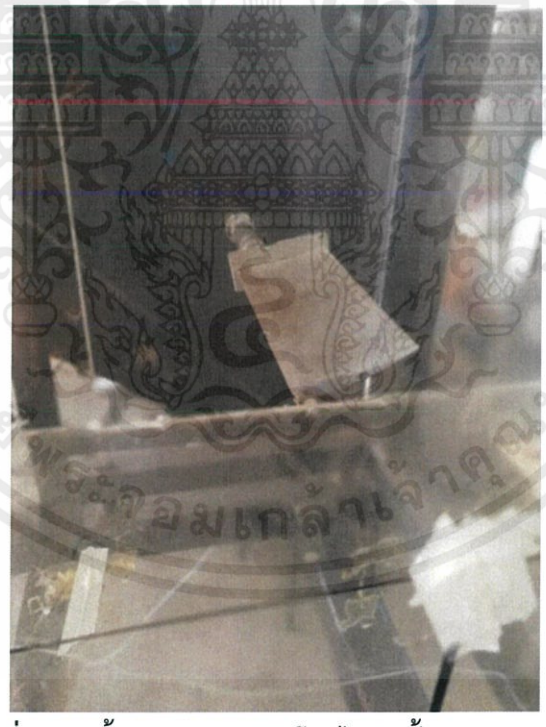
$$v_{air} = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho_{air}}}$$

$$v_{air} = \sqrt{\frac{2\rho_{water} g \Delta h_{water}}{\rho_{air}}} \quad (5.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ชิ้นทดลอง 3 มิติ โดยติดตั้ง Endplates



รูปที่ 5.10 ชิ้นทดลอง 3 มิติ โดยไม่ติดตั้ง Endplates

ชิ้นทดลองแสดงดังรูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 ใช้ทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลของแรงที่กระทำต่อชิ้นทดลองทั้งแบบมี Endplates และไม่มี Endplates

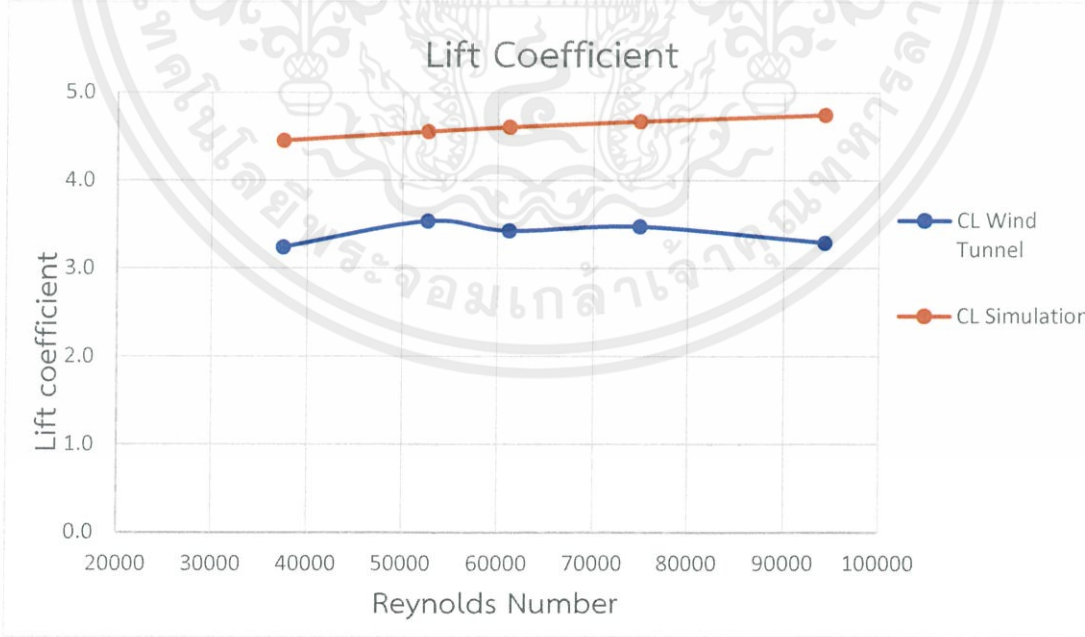
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD Simulation ที่มุมปะทะคงที่

การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation ที่มุมปะทะคงที่เป็นการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันว่าการทำ CFD simulation มีความถูกต้องแม่นยำ โดยใช้ปีกชั้นเดียวพร้อมติดตั้ง Endplates ขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง ทดสอบที่มุมปะทะ 10 องศาที่ความเร็วต่างกัน

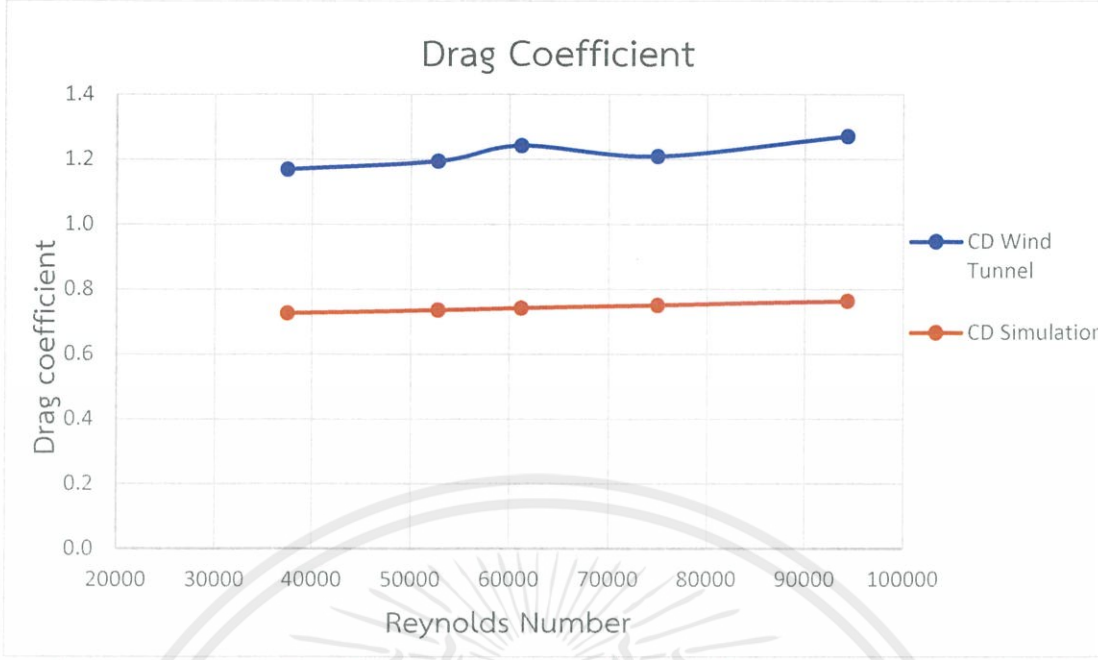
ตารางที่5.1 แสดงผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation ที่มุมปะทะ 10 องศา ที่ความเร็วต่างกัน

	Velocity (m/s)	10.0376	14.122	16.3913	20.0751	25.2607
	Area (m^2)	0.00199	0.00199	0.00199	0.00199	0.00199
	Reynolds Number	37480.14	52731.19	61204.69	74959.91	94322.81
Wind Tunnel (with Endplate)	Down Force (N)	0.3782	0.8167	1.0661	1.6095	2.4305
	Drag Force (N)	0.1364	0.2758	0.3863	0.5644	0.9388
	C_L	-3.2414	-3.5362	-3.4264	-3.4743	-3.2889
	C_D	1.1689	1.1941	1.2415	1.2092	1.2703
Simulation (with Endplate)	Down Force (N)	0.5196	1.0526	1.4333	2.1809	3.508
	Drag Force (N)	0.0847	0.1699	0.2309	0.3507	0.5641
	C_L	-4.4496	-4.5539	-4.6028	-4.6691	-4.7433
	C_D	0.7253	0.7350	0.7415	0.7508	0.7627



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับ Reynolds number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและ CFD simulation กับ Reynolds number

จากตารางที่ 5.1 สามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟแสดงดังรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.2 จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้าน โดยคงมุมปะทะไว้ที่ 10 องศาและปรับความเร็วทั้ง 5 ระดับดังกล่าวข้างต้นพบว่า

1.จากรูปที่ 5.11 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกจาก CFD simulation และอุโมงค์ลม มีค่าค่อนข้างคงที่และสูงขึ้นเล็กน้อยจาก Reynolds number ที่มากขึ้น โดย CFD simulation มีผลลัพธ์ที่เป็นเส้นตรงมากกว่าผลการทดสอบจากอุโมงค์ลม เนื่องจากอุโมงค์ลมมีโอกาสคลาดเคลื่อนจากประสิทธิภาพและการสั่นของเครื่องมือมากกว่า CFD simulation โดยผลลัพธ์ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จาก CFD Simulation มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากอุโมงค์ลม

2.จากรูปที่ 5.12 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจาก CFD simulation และอุโมงค์ลม มีค่าค่อนข้างคงที่และปรับขึ้นเล็กน้อยเมื่อ Reynolds Number มากขึ้นจากการปรับความเร็วที่สูงขึ้นคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์แรงยก โดยผลจากอุโมงค์ลมมีค่าที่มากกว่าผลจาก CFD simulation เนื่องจากมีแรงต้านที่เพิ่มขึ้นมาจากแท่งยึดชิ้นทดลองและการสั่นจากเครื่องมือ

5.2.2 การทดสอบด้วยอุโมงค์ลมที่มุมปะทะต่างๆ

ผู้ทดลองได้ทำการทดสอบโดยมีการปรับมุมปะทะของปีก 1 ชั้น ขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง คือ 0 10 15 20 25 30 และ 40 องศาตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่ 1 ทดสอบปีกโดยติดตั้ง Endplates ด้านข้างของปีก

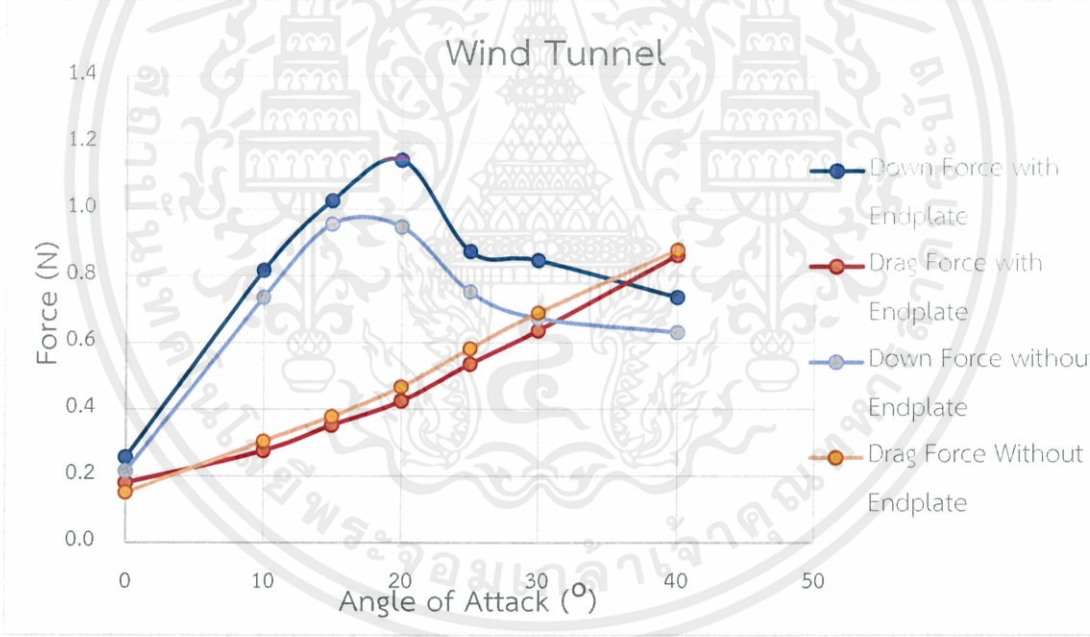
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าโดยติดตั้ง Endplate

AOA ($^{\circ}$)	0	10	15	20	25	30	40
Down Force (N)	0.2567	0.8167	1.0266	1.1481	0.8740	0.8468	0.7361
Drag Force (N)	0.1256	0.2758	0.3518	0.4245	0.5356	0.6356	0.8621

กรณีที่ 2 ทดสอบปีกโดยไม่ติดตั้ง Endplates ด้านข้างของปีก

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่าโดยไม่ติดตั้ง Endplate

AOA ($^{\circ}$)	0	10	15	20	25	30	40
Down Force (N)	0.2154	0.7362	0.9553	0.9474	0.7519	0.6729	0.6310
Drag Force (N)	0.1505	0.3042	0.3781	0.4664	0.5817	0.6883	0.8775



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับแรงที่เกิดขึ้นของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริงที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม

จากตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 สามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนเป็นกราฟแสดงดังรูปที่ 5.13 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและแรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของชิ้นทดสอบ 3 มิติ ทั้ง 2 กรณี (ติดตั้ง Endplates และไม่ติดตั้ง Endplates) พบว่าผลลัพธ์ของแรงกดจากทั้ง 2 กรณี มุม 20 องศาเป็นมุมที่ให้แรงกดมากที่สุด และมุมปะทะที่มากขึ้นหลังจากนั้นมีค่ากดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำลง ส่วนแรงต้านมีค่าเพิ่มมากขึ้นในการปรับมุมองศาที่มากขึ้นและหากเปรียบเทียบการทดสอบที่มุมเดียวกันของทั้ง 2 กรณี พบว่าชิ้นทดลองที่ติดตั้ง Endplates ให้ผลลัพธ์ของแรงกดมากกว่าและให้แรงต้านน้อยกว่าแบบไม่ติดตั้ง Endplates เนื่องจาก Endplates ช่วยลดการเกิด Vortex ของอากาศที่ด้านข้างของปีก

5.3 การทดลอง CFD simulation ของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง

ในการทดลองได้กำหนด Initial conditions เพื่อให้มีสถานะใกล้เคียงกับการทดลองอุโมงค์ลม ดังนี้

- ความเร็วอากาศ 14.122 เมตรต่อวินาที (50.839 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)
- อุณหภูมิของอากาศ 30 องศาเซลเซียส
- ความหนาแน่นอากาศ 1.164 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืดคิเนมาติคส์ 0.00001608 ตารางเมตรต่อวินาที

5.3.1 ผลการสอบจาก CFD simulation ของปีกขนาด 0.15 ของขนาดจริง

กรณีที่ 1 ทดสอบปีกโดยติดตั้ง Endplates ด้านข้างของปีก

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบจากการ CFD simulation โดยติดตั้ง Endplates

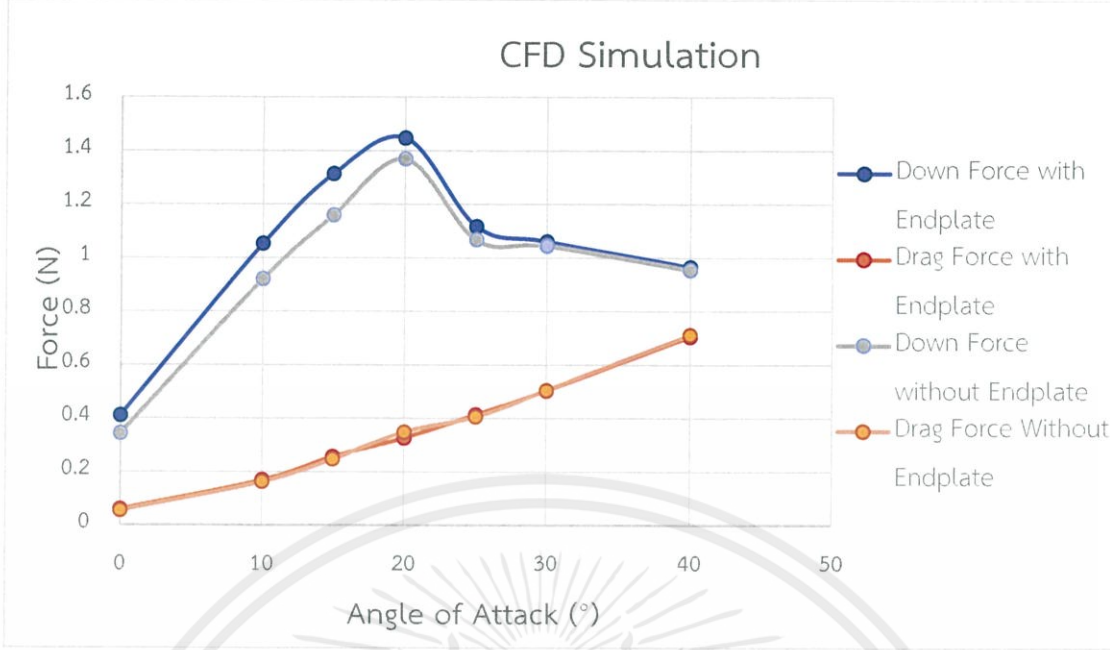
AOA (°)	0	10	15	20	25	30	40
Down Force (N)	0.4095	1.0531	1.3129	1.4465	1.1161	1.0597	0.9653
Drag Force (N)	0.0581	0.1681	0.2552	0.3255	0.4128	0.5023	0.7075

กรณีที่ 2 ทดสอบปีกโดยไม่ติดตั้ง Endplates ด้านข้างของปีก

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบจากการ CFD simulation โดยไม่ติดตั้ง Endplates

AOA (°)	0	10	15	20	25	30	40
Down Force (N)	0.3429	0.9201	1.1581	1.3684	1.0667	1.0442	0.9541
Drag Force (N)	0.0541	0.1627	0.2467	0.348	0.4058	0.5041	0.711

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับแรงที่เกิดขึ้นของปีกขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริงที่ได้จากการ CFD simulation

จากตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 สามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนเป็นกราฟแสดงดังรูปที่ 5.14 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและแรงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ CFD simulation ของชิ้นทดสอบแบบจำลอง ทั้ง2กรณี (ติดตั้ง Endplates และถอด Endplates) พบว่าผลลัพธ์ของแรงกดจากทั้ง 2 กรณี มีมุม20 องศา เป็นมุมที่ให้แรงกดมากสุดและมุมปะทะที่มากขึ้นหลังจากนั้นมีค่ากดที่ต่ำลง ส่วนแรงต้านมีค่าเพิ่มมากขึ้นในการปรับมุมองศาที่มากขึ้น และหากเปรียบเทียบการทดลองที่มุมเดียวกันของทั้ง 2 กรณี พบว่าชิ้นทดลองที่ติดตั้ง Endplates ให้ผลลัพธ์ของแรงกดมากกว่าและให้แรงต้านน้อยกว่าแบบไม่ติดตั้ง Endplates เล็กน้อยซึ่งต่างจากผลการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมที่มีความแตกต่างของแรงต้านอย่างเห็นได้ชัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมของปีกขนาด 0.15 เท่า

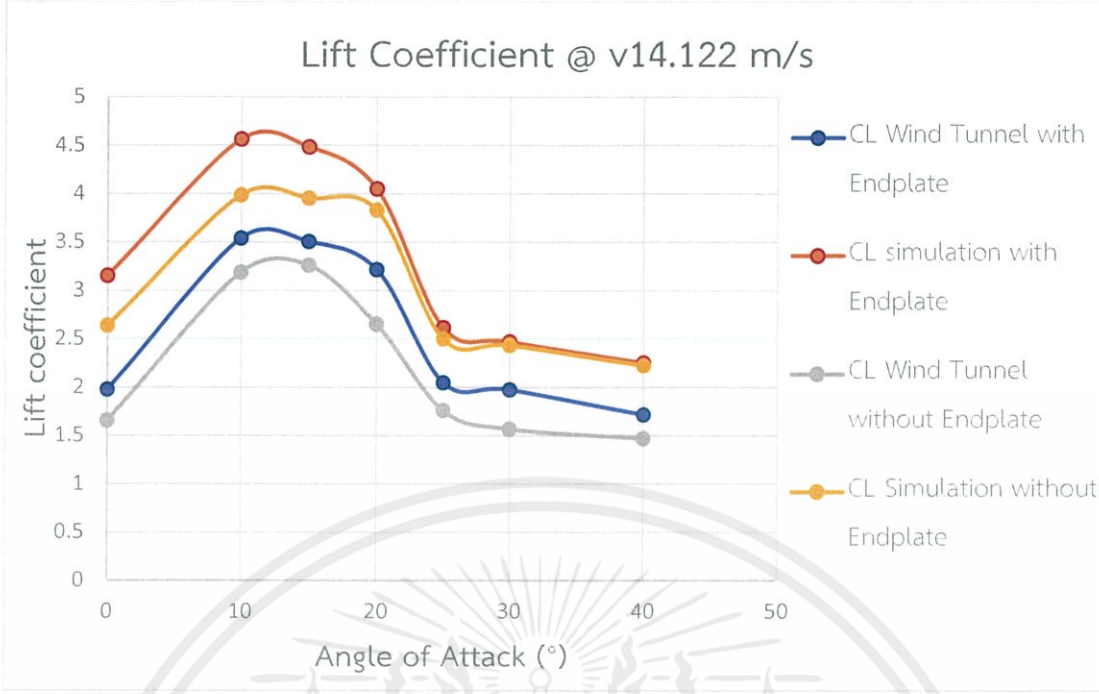
	AOA $(^{\circ})$	0	10	15	20	25	30	40
	Area (m^2)	0.0011	0.0020	0.0025	0.0031	0.0037	0.0037	0.0037
With Endplate	Down Force (N)	0.2567	0.8167	1.0266	1.1481	0.8740	0.8468	0.7361
	Drag Force (N)	0.1793	0.2758	0.3518	0.4245	0.5356	0.6356	0.8621
	C_L	-1.9744	-3.5362	-3.5043	-3.2136	-2.0462	-1.9719	-1.7140
	C_D	0.9662	1.1941	1.2010	1.1882	1.2539	1.4799	2.0074
Without Endplate	Down Force (N)	0.2154	0.7362	0.9553	0.9474	0.7519	0.6729	0.6310
	Drag Force (N)	0.1505	0.3042	0.3781	0.4664	0.5817	0.6883	0.8775
	C_L	-1.6570	-3.1873	-3.2610	-2.6519	-1.7604	-1.5669	-1.4692
	C_D	1.6195	1.3172	1.2907	1.3056	1.3619	1.6027	2.0433

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการ CFD simulation ของปีกขนาด 0.15 เท่า

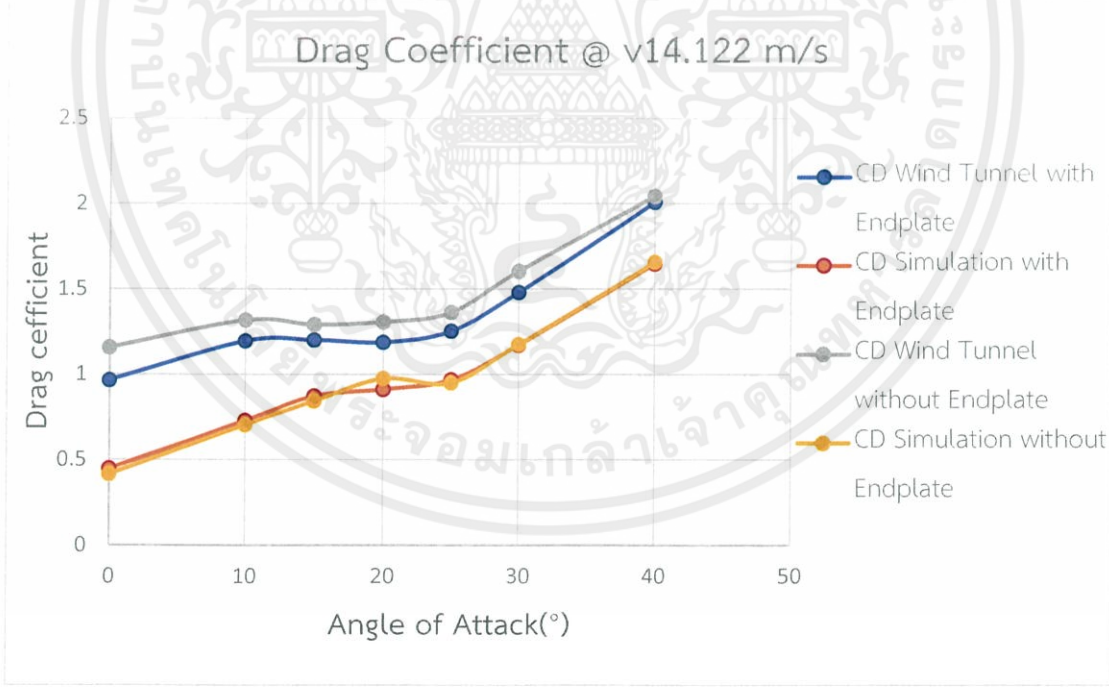
	AOA $(^{\circ})$	0	10	15	20	25	30	40
	Area (m^2)	0.0011	0.002	0.0025	0.0031	0.0037	0.0037	0.0037
With Endplate	Down Force (N)	0.4095	1.0531	1.3129	1.4465	1.1161	1.0597	0.9653
	Drag Force (N)	0.0581	0.1681	0.2552	0.3255	0.4128	0.5023	0.7075
	C_L	-3.1501	-4.5596	-4.4815	-4.0489	-2.6130	-2.4675	-2.2477
	C_D	0.4469	0.7278	0.8711	0.9111	0.9664	1.1696	1.6474
Without Endplate	Down Force (N)	0.3429	0.9201	1.1581	1.3684	1.0667	1.0442	0.9541
	Drag Force (N)	0.0541	0.1627	0.2467	0.348	0.4058	0.5041	0.7110
	C_L	-2.6378	-3.9837	-3.9531	-3.8303	-2.4973	-2.4315	-2.2217
	C_D	0.4162	0.7044	0.8421	0.9741	0.9501	1.1738	1.6556

จากตารางที่ 5.6 และตารางที่ 5.7 สามารถนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเขียนเป็นกราฟสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ดังรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ซึ่งจากรูปที่ 5.15 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดอยู่ที่มุมปะทะเท่ากับ 10 องศา เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าแปรผันตรงกับแรงยกที่กระทำและแปรผกผันกับพื้นที่ปะทะด้านหน้า ซึ่งพื้นที่ปะทะด้านหน้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมปะทะ จึงทำให้สัดส่วนของแรงยกกับพื้นที่ปะทะด้านหน้ามีค่าสูงสุดดังสมการที่ 3.2 ส่วนสัมประสิทธิ์แรงต้านแสดงดังรูปที่ 5.16 มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแปรผันตามมุมปะทะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม และ CFD simulation กับมุมปะทะ



รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม และ CFD simulation กับมุมปะทะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การออกแบบอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

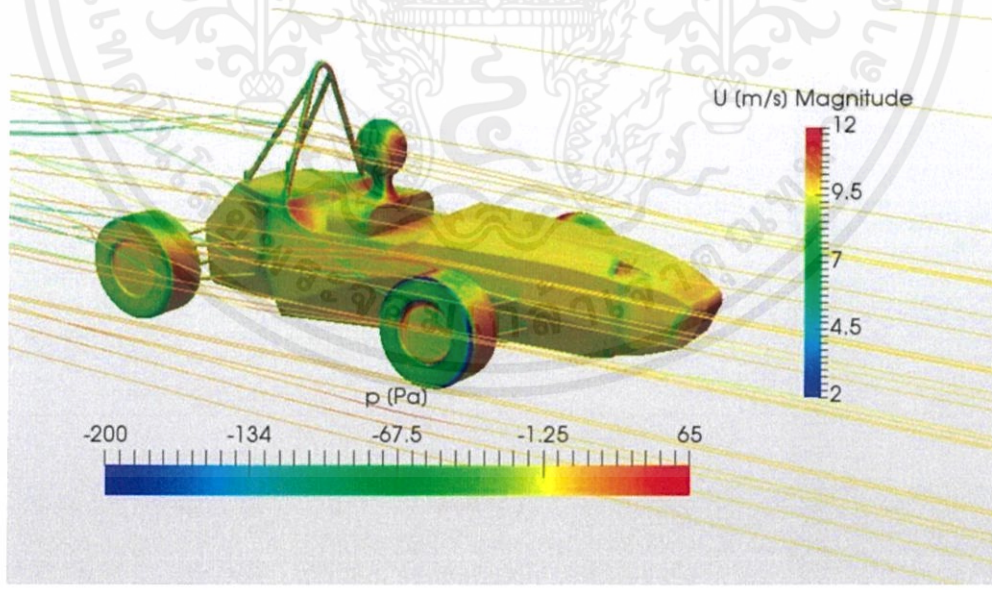
5.4.1 รถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

เมื่อทำการทดสอบ CFD simulation รถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ที่ Initial conditions ดังนี้

- ความเร็วอากาศและความเร็วการเคลื่อนของพื้น 10.69 เมตรต่อวินาที (38.44 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งเป็นความเร็วเป้าหมาย
- อุณหภูมิของอากาศ 30 องศาเซลเซียส
- ความหนาแน่นอากาศ 1.164 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- ความหนืดคิเนมาติคส์ 0.00001608 ตารางเมตรต่อวินาที
- ความดันอากาศขาออก 0 นิวตันต่อตารางเมตร

ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์

แบบจำลอง	Down Force (N)	Drag Force (N)
รถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์	-25.9112	31.0882



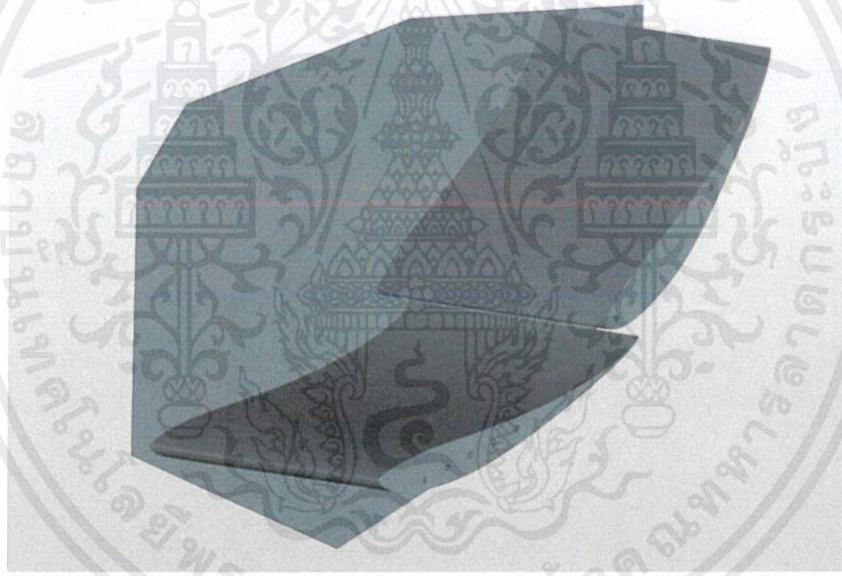
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งขณะไม่ติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบแรงกดมีผลลัพธ์เป็นลบแสดงให้เห็นว่ามีแรงยกขณะทดสอบรถแข่งที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ โดยความเร็วของอากาศและการกระจายของแรงดันที่กระทำบนตัวรถแสดงดังรูปที่ 5.17 ดังนั้นเพื่อเป็นการหาแนวทางในการบรรลุเป้าหมายที่ต้องการ ผู้ค้นคว้าจึงได้ออกแบบอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ให้มีส่วนช่วยในการสร้างแรงกดอย่างน้อย 160 นิวตันที่ความเร็ว 10.69 เมตรต่อวินาที หรือมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกอย่างน้อย -2 และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านไม่เกิน 1.78

5.4.2 การออกแบบปีกหลัง

ปีกหลังสำหรับรถแข่งถูกติดตั้งไว้บริเวณเหนือศีรษะนักขับด้านท้ายของตัวรถ โดยตามกติกาตำแหน่งสูงสุดของปีกหลังห้ามมีความสูงเกิน 120 เซนติเมตร และความกว้างของปีกห้ามเกินระยะห่างของขอบด้านในล้อหลังหรือประมาน 90 เซนติเมตร โดยรูปที่ 5.18 แสดงถึงปีกหลังพร้อมติดตั้ง Endplates ที่ถูกออกแบบมาใช้กับรถแข่ง



รูปที่ 5.18 แบบจำลองของปีกหลังพร้อมติดตั้ง Endplates

ปีกหลังนั้นประกอบไปด้วยปีกจาก Aerofoil S1210 2 ชิ้นขนาดเท่ากัน โดยปีกชิ้นล่างเป็นปีกที่คงองศาไว้ที่ 20 องศาตามผลการทดลองปีกชิ้นเดียวซึ่งเป็นมุมที่ให้แรงกดมากที่สุด และปีกชิ้นบนทำหน้าที่เป็น Flap ถูกทดสอบปรับมุมที่แตกต่างกันไปเพื่อหาผลลัพธ์ที่ได้ค่าแรงกดมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบด้วยชิ้นทดสอบขนาด 0.15 เท่าของขนาดจริง ที่ความเร็ว 14.122 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบปีกหลังด้วย CFD simulation

AOA ($^{\circ}$)	20	25	30	40	45	50
Down Force (N)	2.0217	2.1612	2.2744	2.3858	2.6011	2.1625
Drag Force (N)	0.8992	1.0358	1.1835	1.4606	1.5984	1.7161

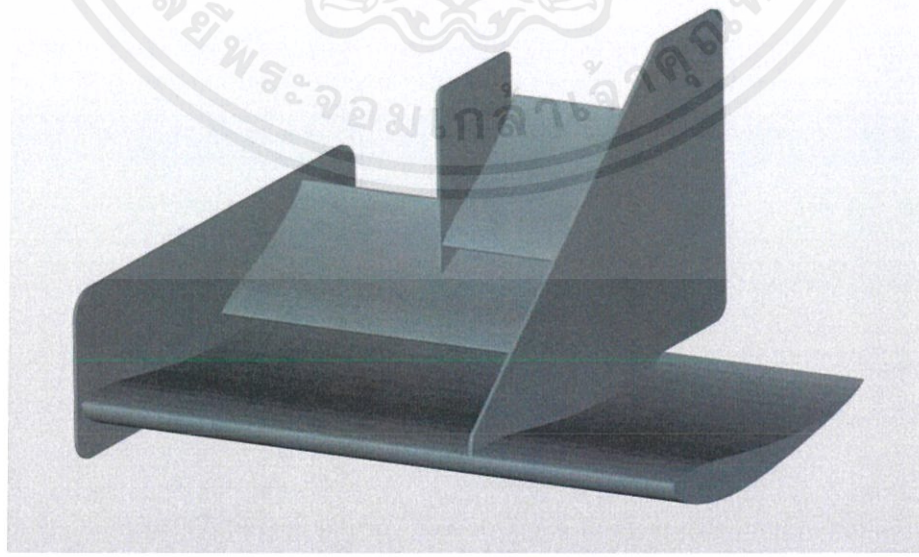
จากตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบมุมปะทะของ Flap ที่มุม 45 องศาให้ผลแรงกดมากที่สุดคือ ได้เลือกมุม 45 องศาสำหรับการติดตั้งปีกหลัง

5.4.3 การออกแบบปีกหน้า

ปีกหน้าของรถแข่งถูกติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้าเฟรมของรถเพื่อเพิ่มแรงกดบริเวณด้านหน้า ส่วนปีกหน้าประกอบไปด้วยปีกหลักซึ่งมีขนาดยาว 130 เซนติเมตร Flap ชั้นล่างยาว 43 เซนติเมตร Flap ชั้นบนยาว 23 เซนติเมตร และ แผ่น Endplates โดยรูปที่ 5.19 แสดงถึงปีกหลังพร้อมติดตั้ง Endplates ที่ถูกออกแบบมาใช้กับรถแข่ง

โดยกติกาของการแข่งขันปีกหน้า

1) ห้ามมีความกว้างเกินขอบนอกของล้อหน้า หรือประมาน 130 เซนติเมตร
2) เมื่อมองจากด้านหน้ารถ ห้ามติดตั้งปีกหน้าสูงเกิน 25 เซนติเมตรบังหน้าล้อ
3) ปลายด้านหน้าสุดของปีกหน้า ห้ามมีระยะห่างจากหน้าล้อหน้าเกิน 75 เซนติเมตร
4) ปลายด้านท้ายสุดของปีกหน้า ห้ามมีระยะห่างจากหน้าล้อหน้าต่ำกว่า 7.5 เซนติเมตร



รูปที่ 5.19 แบบจำลองของปีกหน้าพร้อมติดตั้ง Endplates

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบการติดตั้งปีกหน้าทำการทดสอบด้วย CFD simulation โดยติดตั้งใส่รถแข่งพร้อมด้วยปีกหลัง แสดงดังรูปที่ 5.20 ทดสอบที่ความเร็ว 10.69 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วเข้าโค้งเป้าหมาย

1. ปีกหลักตั้งมุมปะทะ 10 องศา
2. Flap ชั้นล่างทำมุม 35 องศา ซึ่งเป็นมุมสูงสุดที่ทำให้ปลายปีกสูงบังหน้าล้อไม่เกิน 25 เซนติเมตร ตามกติกา
3. Flap ชั้นบนทำการปรับมุม 35 และ 45 องศาเพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์

รูปที่ 5.20 แบบจำลองการติดตั้งปีกหน้าและปีกหลังเข้ากับรถแข่ง

ผลการทดสอบ CFD simulation จากการติดตั้งปีกหน้าที่ความเร็ว 10.69 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 5.10 แสดงแรงกดจากการทดสอบด้วย CFD Simulation

แบบจำลอง	แรงกด (N)			
	ปีกหลัง	ปีกหน้า	ตัวรถ	รวมทั้งคัน
Flap ชั้นบน 35องศา	63.5381	89.0068	-21.1228	131.5021
Flap ชั้นบน 45องศา	62.1896	93.9906	-21.5082	134.1886

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดงแรงต้านจากการทดสอบด้วย CFD simulation

แบบจำลอง	แรงต้าน (N)			
	ปีกหลัง	ปีกหน้า	ตัวรถ	รวมทั้งคัน
Flap ชั้นบน 35องศา	35.9476	22.2774	30.3078	88.8418
Flap ชั้นบน 45องศา	35.1018	24.0836	30.3126	89.8104

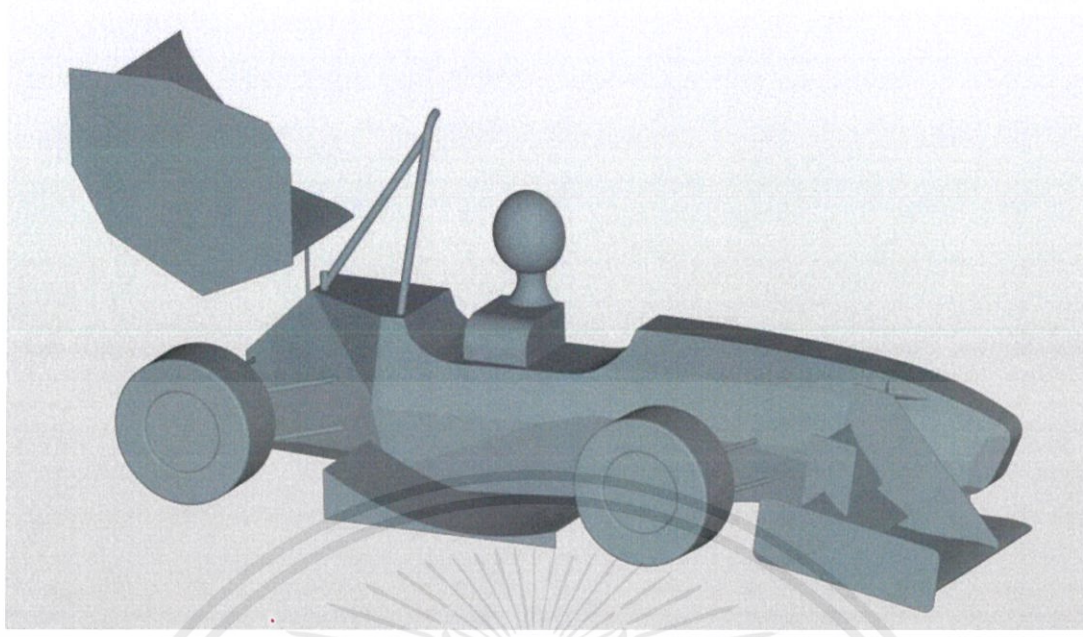
จากตารางที่ 5.10 และตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบพบว่าแรงกดที่ได้จากการติดตั้งปีกหน้าและหลังยังไม่เพียงพอต่อเป้าหมายที่ต้องการขั้นต่ำ 160 นิวตัน ผู้ค้นคว้าจึงได้หาอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์เพิ่มเติมเพื่อให้ได้แรงกดตามเป้าหมายคืออุปกรณ์ Ground effect

5.4.4 การออกแบบอุปกรณ์ Venturi effect (Ground effect)

เนื่องจากมีพื้นที่เหลือบริเวณด้านล่างทั้งสองข้างของตัวรถบริเวณใต้ตำแหน่งของหม้อน้ำระบายความร้อนและท่อไอเสีย ผู้ค้นคว้าได้ออกแบบอุปกรณ์ Ground effect ในพื้นที่จำกัดที่มีอยู่เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและถูกต้องตามกติกาการแข่งขัน โดยรูปที่ 5.21 แสดงถึงอุปกรณ์ Ground effect ที่ถูกใช้กับรถแข่ง และรูปที่ 5.22 แสดงถึงตำแหน่งของอุปกรณ์ Ground effect หลังติดตั้งกับตัวรถแข่ง

รูปที่ 5.21 ภาพ ขนาดและรูปร่างของอุปกรณ์ Ground Effect

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 ภาพ แบบจำลองอุปกรณ์ Ground Effect ถูกติดตั้งไว้ใต้ท้องรถด้านข้างรถแข่ง

ผลการทดลอง CFD simulation หลังจากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect ที่ความเร็ว 10.69 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 5.12 แสดงแรงกดหลังจากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect

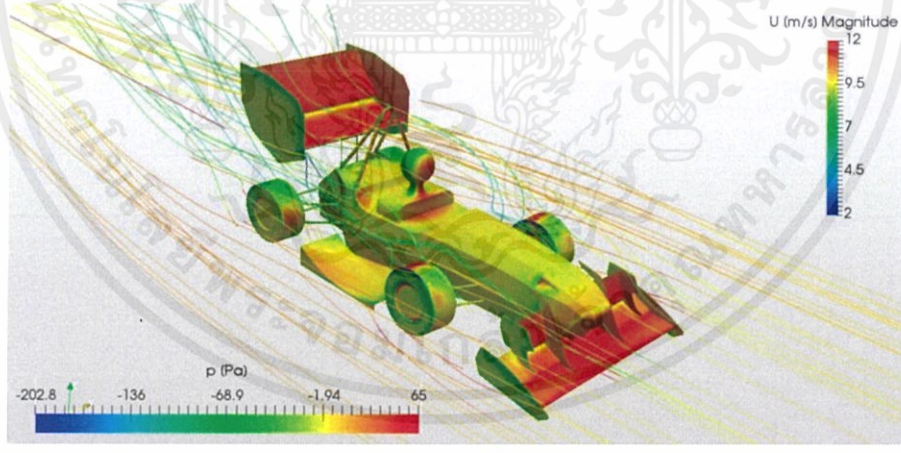
แบบจำลอง	แรงกด (N)					C_L
	ปีกหลัง	ปีกหน้า	Ground Eff	ตัวรถ	รวมทั้งคัน	
Ground Eff. ขาออก สูง 10 ซม.	61.6688	93.5328	25.8914	-17.9644	163.1286	-2.45
Ground Eff. ขาออก สูง 12.5 ซม.	61.2958	92.7158	28.3171	-18.005	164.3236	-2.47
Ground Eff. ขาออก สูง 15 ซม.	61.0162	93.6912	31.9854	-20.7394	165.9534	-2.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.13 แสดงแรงต้านหลังจากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect

แบบจำลอง	แรงต้าน (N)					C_D
	ปีกหลัง	ปีกหน้า	Ground Eff	ตัวรถ	รวมทั้งคัน	
Ground Eff ขาออก สูง 10 ซม.	35.8752	24.3262	1.7072	28.0622	89.9708	1.35
Ground Eff ขาออก สูง 12.5 ซม.	35.9492	24.2244	2.5012	27.2964	89.9712	1.35
Ground Eff ขาออก สูง 15 ซม.	36.0276	24.3262	3.4528	26.4812	90.2878	1.36

จากผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 5.12 และ 5.13 ซึ่งเป็นผลจากการทดสอบ CFD simulation จากการติดตั้งปีกหลัง ปีกหน้าและอุปกรณ์ Ground effect พบว่าแบบจำลอง Ground effect ที่มีความสูงขาออก 15 เซนติเมตร ให้ผลลัพท์แรงกดที่มากที่สุดคือ 165.953 นิวตัน และผลลัพท์สัมประสิทธิ์แรงต้าน 1.36 ซึ่งตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ โดยความเร็วของอากาศและการกระจายของแรงดันที่กระทำบนตัวรถหลังติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์แสดงดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ผลการทดสอบ CFD simulation ของรถแข่งหลังติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

6.1.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบปีกชั้นเดียว (Aerofoil S1210) ในอุโมงค์ลมพบว่า เมื่อมุมปะทะของปีกเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเพิ่มขึ้น ซึ่งมุมปะทะที่ 10 องศา คือมุมที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่มากที่สุด และมุมให้ค่าแรงกดมากที่สุดคือมุมปะทะที่ 20 องศา ส่วนการทดสอบ CFD simulation โดยใช้ SIMSCALE ผลการทดสอบปีกชั้นเดียว พบว่ามุมปะทะที่ทำให้เกิดแรงกดมากที่สุดคือมุม 20 องศาและมุมปะทะที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมากที่สุดคือมุม 10 องศา โดยทั้งสองกรณีนี้แรงต้านนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ทำให้การทดสอบด้วย CFD simulation นี้มีความน่าเชื่อถือ

สำหรับการทดสอบ CFD simulation โดยใช้ SIMSCALE ผลการทดลองของปีกหลัง พบว่ามุมที่ให้ค่าแรงกดที่มากที่สุดคือมุมของปีกชั้นล่าง (Main) 20 องศา กับมุมของปีกชั้นบน (Flap) 45 องศา

ผลการทดสอบ CFD simulation ของปีกหน้า พบว่ามุมที่ให้ค่าแรงกดที่มากที่สุดคือมุมของปีกชั้นล่าง (Main) 10 องศา มุมของปีกชั้นที่ 2 (Flap ชั้นล่าง) 35 องศา และมุมของปีกชั้นที่ 3 (Flap ชั้นบน) 45 องศา

ผลการทดสอบ CFD simulation ของ Venturi effect (Ground effect) พบว่าแบบจำลองที่ให้ค่าแรงกดที่มากที่สุดคือแบบจำลอง Ground effect ที่ขาออกสูงจากพื้น 15 เซนติเมตร

จากผลการทดสอบ CFD simulation ของรถทั้งคัน พบว่าหลังการติดตั้งอุปกรณ์อากาศพลศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วย ปีกหลัง ปีกหน้า และ อุปกรณ์ Ground effect ที่มุมปะทะและตำแหน่งที่ให้แรงกดมากที่สุด ทำให้สามารถมีแรงกด 165.9534 นิวตัน หรือมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยก -2.49 ซึ่งมากกว่าเป้าหมายที่ตั้งเอาไว้ที่แรงกดขั้นต่ำ 160 นิวตัน หรือมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกอย่างน้อย -2 และนอกจากนี้ยังสามารถควบคุมค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านไว้ที่ 1.35 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ไม่เกิน 1.78 ซึ่งผลการทดสอบทั้งหมดพบว่าทำให้รถแข่งสามารถใช้เวลาในการเข้าโค้งเหลือ 5 วินาทีต่อรอบตามเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษานี้ ทางผู้จัดทำได้กำหนดการทดสอบ CFD simulation โดยสนใจการแข่งขัน Skid pad เป็นหลัก ซึ่งมีความเร็วการเข้าโค้งของรถอยู่ที่ประมาณ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังนั้น ผลลัพธ์ที่ได้นี้จึงอาจยังไม่ครอบคลุมการแข่งขันในแบบอื่นๆ ซึ่งด้วยระยะเวลาที่จำกัดของการศึกษานั้นทำให้ไม่เพียงพอต่อการศึกษา เนื่องด้วยแต่ละการศึกษานี้ ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานใน การได้ผลลัพธ์ โดยทางผู้จัดทำเองได้หวังว่าการศึกษานี้สามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้งานมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้ส่วนใหญ่เป็นเพียงการจำลองการคำนวณทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งในการทำการทดลองนั้นมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองได้ เช่น การปรับเทียบโหลดเซลล์ การวัดความเร็วลม การปรับระดับความเร็วลม จึงควรมีการเทียบวัด (Calibration) อุปกรณ์เพื่อที่ให้การทดลองนั้นมีความแม่นยำมากขึ้น

ในการศึกษานี้สามารถนำแนวคิดนี้ต่างๆไปใช้หาคำตอบของการศึกษาอื่นต่อเพิ่มเติม เช่น การออกแบบ Endplates ของปีก การออกแบบปีกที่สามารถปรับมุมปะทะได้อัตโนมัติ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wordley, S.J., and Saunders, J.W., *Aerodynamics for Formula SAE: Initial Design and Performance Prediction*, SAE Paper 2006-01-0806, 2006.

[2] Joseph Katz. (1995). *Race car aerodynamics: Design for speed*, 1st edition, Robert Bentley,Inc., Cambridge.

[3] buildyourownracecar. *Aerodynamics*, URL: http://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design. access on 20/09/2017

[4] รศ.ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. (2559). *วิศวกรรมยานยนต์*, วิทยาพัฒน์, กรุงเทพฯ.

[5] ดร.จอมภพ แววศักดิ์. (2549). *พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Computational Fluid Dynamics*, วารสารวิทยาศาสตร์ทักษิณ, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, ศูนย์วิจัยและสาธิตระบบพลังงานทดแทน. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ, กรุงเทพฯ.

[6] Munson, B.R. and Young, D.F. (2010). *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 6th edition, Wiley, West Virginia.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

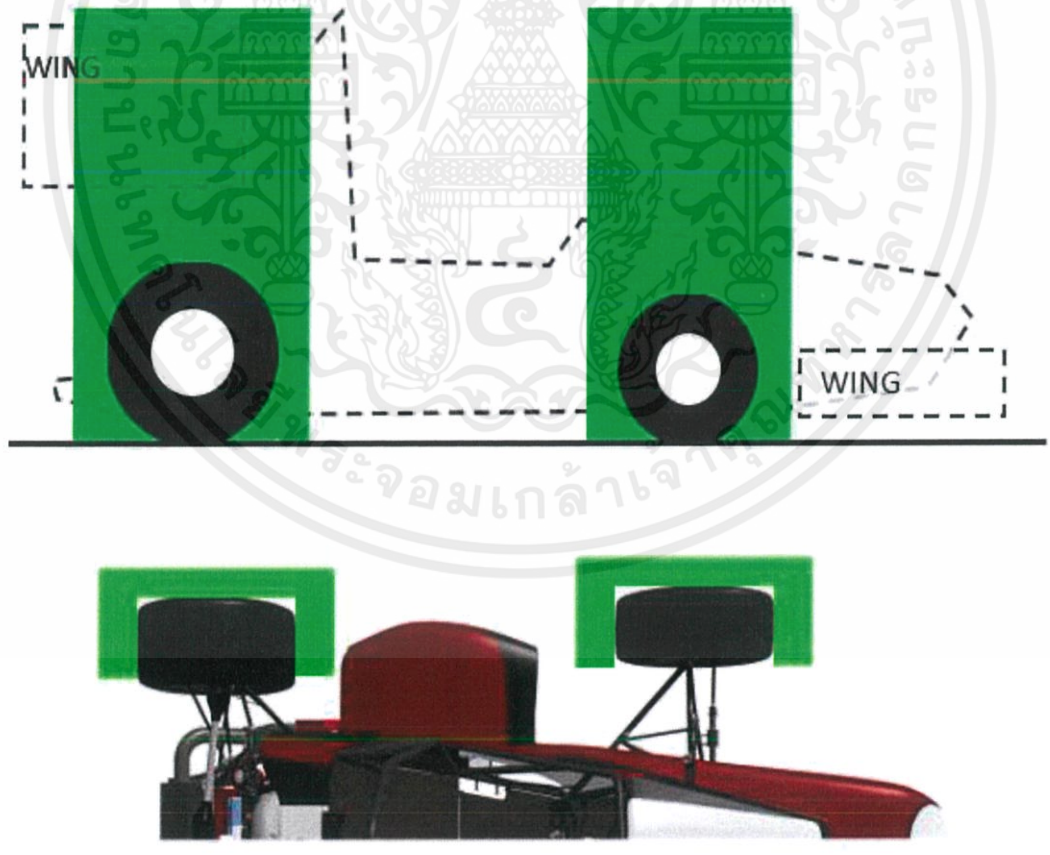
ภาคผนวก ก.

กติกาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบชุดแอโรไดนามิกส์ที่ใช้กับรถสูตรนักศึกษา

1. รูปทรงรถ

ต้องเป็นแบบล้อเปิดและ open cockpit (คล้ายกับรถสูตร) และมี 4 ล้อที่ไม่ได้เรียงเป็นเส้นตรงเดียวกัน รถที่เป็นแบบล้อเปิดต้องมีคุณสมบัติครบถ้วนดังนี้

1. ต้องไม่มีอะไรบังล้อและยางเมื่อมองจากด้านบนของตัวรถ
2. ล้อและยางต้องไม่มีอะไรกีดขวางเมื่อมองจากด้านข้างของตัวรถ
3. ห้ามไม่ให้มีอะไรอยู่ใน Keep-out zone (เส้นตรงสองเส้นที่ลากเป็นแนวตั้งจากตำแหน่ง 75 มิลลิเมตร จากหน้ายางด้านหน้าและด้านหลังของล้อทั้ง 4 มีความหนาตั้งแต่ขอบนอกและขอบในของล้อและยาง)



รูปที่ 1 keep-out zone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดแอโรไดนามิกส์

2.1 ตำแหน่งการติดตั้งชุดแอโรไดนามิกส์ที่ด้านหน้า

1.ห้ามไม่ให้มีอุปกรณ์ใดๆ ยื่นออกมาเกินระยะ 700 มิลลิเมตร นับจากหน้ายางด้านหน้าของล้อหน้าที่ความสูงกลางล้อและกว้างเกินกว่าขอบนอกของยางล้อหน้าซ้ายและขวาที่ความสูงของกลางล้อ เมื่อมองจากด้านบนของตัวรถ

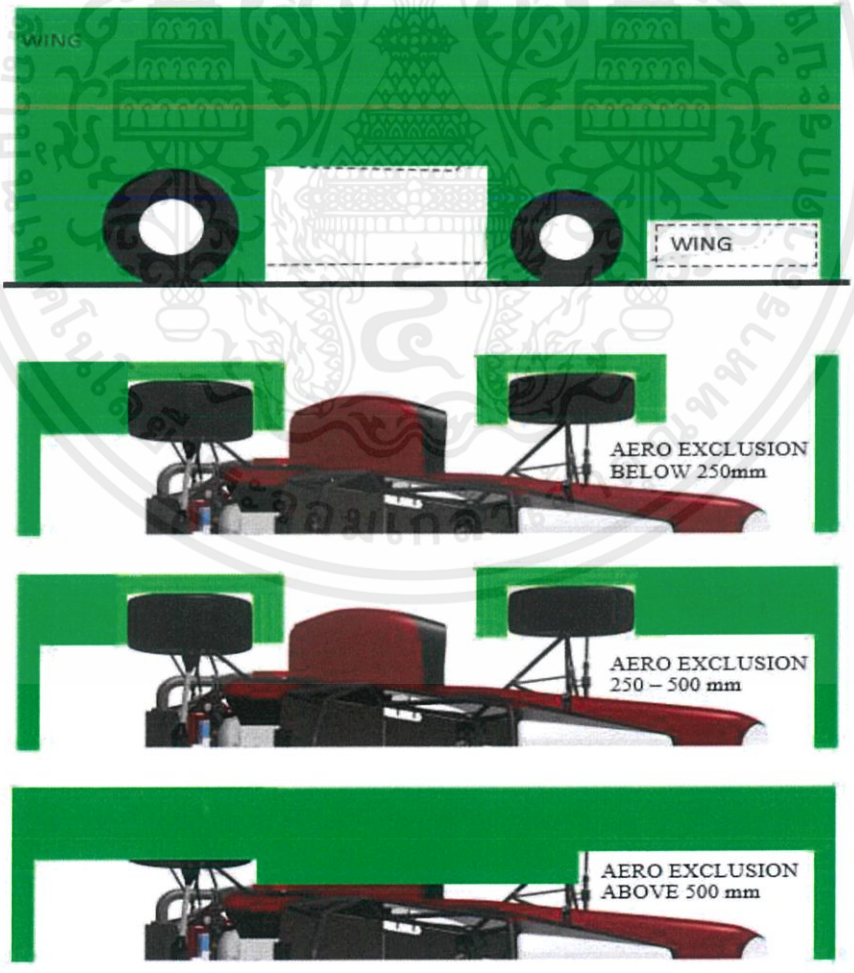
2. ห้ามไม่ให้มีอุปกรณ์ใดๆสูงเกิน 250 มิลลิเมตรจากพื้น ตรงส่วนของยางหน้ายกเว้นผิวแนวตั้งที่บางกว่า 25 มิลลิเมตร เมื่อมองจากด้านหน้าของตัวรถ

3. ข้อ 1. และ 2. ล้อหน้าต้องตั้งตรง

2.2 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ด้านหลัง

1. ห้ามไม่ให้มีอุปกรณ์ใดๆ อยู่หลังมากกว่า 250 มิลลิเมตร ของขอบยางด้านหลังของล้อหลังที่ความสูงกลางล้อ ห้ามให้มีอุปกรณ์ใดๆ ล้ำหน้าผิวแนวตั้งที่อยู่หลังสุดของ Head Restraint และห้ามไม่ให้มีอุปกรณ์ใดๆกว้างกว่าขอบด้านในของล้อหลังด้านซ้ายและขวาเมื่อมองจากด้านบนของตัวรถ

2. เมื่อมองจากด้านข้าง ห้ามไม่ให้มีอุปกรณ์ใดๆสูงเกินกว่า 1.2 เมตรนับจากพื้น



รูปที่ 2 Aerodynamic devices' rules

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ground Effect Devices

1. ห้ามไม่ให้ใช้อุปกรณ์ที่มีกาลังใดๆมาสร้าง Ground Effect

3. ลักษณะสนามของ Autocross และ Endurance

1. สำหรับทางตรงที่มีโค้งแบบ Hair Pin ที่ปลายทั้งสอง มีระยะมากที่สุด 60 เมตร สำหรับทางตรงที่มีโค้งกว้างที่ปลายทั้งสอง มีระยะทางมากที่ได้ 45 เมตร
2. โค้งที่มีรัศมีคงที่ มีเส้นผ่านศูนย์กลางโค้งอยู่ระหว่าง 23 และ 45 เมตร
3. โค้งแบบ Hair Pin มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 9 เมตร
4. สลาลอมมีช่องว่างระหว่าง 7.62 และ 12.19 เมตร
5. อื่นๆ เช่น ทางซิกแซก โค้งติดต่อกัน โค้งแบบรัศมีไม่คงที่
6. ความกว้างของสนามอย่างน้อย 3.5 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้