

ระยะปลอดภัยสำหรับนักปั่นบริเวณด้านข้างรถบรรทุก
Safe distance for the cyclist beside a faster truck



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

Safe distance for the cyclist beside a faster truck



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 INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABUNG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระยะปลอดภัยสำหรับนักปั่นบริเวณด้านข้างรถบรรทุก

Safe distance for the cyclist beside a faster truck

ผู้จัดทำ

1. นายณัฐกิตติ์ ผู้ศรีทธาธรรม รหัสประจำตัว 56010372
2. นายเพชร พุ่มพันธ์ รหัสประจำตัว 56010796
3. นายพีรณัฐ ติरणะประกิจ รหัสประจำตัว 56010877



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.บำรุง พวงเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะปลอดภัยสำหรับนักปั่นบริเวณด้านข้างรถบรรทุก

นายณัฐกิตติ์ ผู้ศรีทธาธรรม 56010372

นายพชร พุ่มพันธ์ 56010796

นายพีรณัฐ ติरणะประกิจ 56010877

ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีนักปั่นจักรยานบนท้องถนนจำนวนมากเพิ่มขึ้นและอุบัติเหตุก็มามากขึ้นด้วยเช่นกัน การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อให้นักปั่นจักรยานที่ปั่นบริเวณใกล้กับรถที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลที่เกิดขึ้นจากอากาศพลศาสตร์ โดย งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้าง (Side Drag Coefficient) สำหรับจักรยานขณะปั่นอยู่ใกล้รถบรรทุกที่ขับด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากับจักรยาน โดยดูค่าผลลัพธ์ที่เปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนตำแหน่งของจักรยาน เพื่อหาระยะห่างที่ผู้ปั่นสามารถขับขี่ได้อย่างปลอดภัยบนท้องถนนในขณะผู้ปั่นจักรยานใกล้กับรถขนาดใหญ่ ซึ่งในงานวิจัยเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนักปั่นจักรยานได้ระมัดระวัง และลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุสำหรับการปั่นบนท้องถนนนี้ถูกคำนวณโดยใช้ Computational Fluid Dynamics (CFD) software แบบจำลองในการคำนวณคือ $k-\omega$ SST มีความเหมาะสมในการคำนวณมากที่สุดเมื่อเทียบกับ $k-\epsilon$ จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้คือ 3×10^6 ถึง 5×10^6 จากการทดสอบจากแบบจำลองพบว่าแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของจักรยานนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นถ้ารถจักรยานอยู่ใกล้รถบรรทุกมากขึ้น และจากการศึกษาในหนังสือของ Easton Cycling [8] พบว่าได้มีการศึกษาถึงความเร็วของลมที่เคลื่อนที่ผ่านจักรยานด้วยความเร็ว 16.1 กิโลเมตร/ชั่วโมง และจักรยานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 48.3 กิโลเมตร/ชั่วโมง มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างเท่ากับ 0.298 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถทำให้จักรยานล้มได้ และในการศึกษานี้ได้ให้รถจักรยานมีความเร็วที่ 27 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยปั่นอยู่ข้างรถบรรทุกที่มีความเร็วเท่ากับ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง พบว่าระยะที่สัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างมีมากกว่า 0.298 คือระยะน้อยกว่า 60 เซนติเมตร

Safe distance for the cyclist beside a faster truck

Nuttakit	Phusattatam	56010372
Pachara	Pumpan	56010796
Peeranat	Tiranaprakij	56010877
Dr.Bumroong	Puangkird	Advisor
Year 2559		

ABSTRACT

Nowadays, there are many more cyclists on the road. Accordingly, accidents have been increasing as well. This study is aiming for safety of cyclists who ride near a large and faster car. Effects of aerodynamics from forces, speed and other factors that formed by the pressure difference while the bike near a large car are investigated by employing mathematical models. More specifically, this is the study about a side drag coefficient of the cyclist while riding near the truck that has a different velocity in different positions and estimating a safe distance between the cyclist and truck. Meanwhile, this research, which has been made to be information for the cyclists and reduce risks on the road, has used Computational Fluid Dynamics (CFD) software to simulate by using $k-\omega$ SST which is more appropriate than $k-\epsilon$ as a model to calculate. The number of elements that has been used is 3×10^6 to 5×10^6 . As a result, the side drag coefficient will increase when the cyclist gets closer to the truck. And with the enough high side drag coefficient, accident can occur for the cyclist. From the previous research, Easton Cycling [8], which is the study of a wind passes through the cyclist with the velocity of 16.1 km/h and the cyclist who ride at the velocity of 48.3 km/h, found that the cyclist will have the side drag coefficient of 0.298, which is the value that make the cyclist cannot remain to control a bicycle. Thus, this research has specified the velocity of the cyclist and the truck to be 27 km/h and 80 km/h respectively. In the conclusion, the safe distance for the cyclist was found to be 60 centimeters.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความช่วยเหลือ ในด้านคำแนะนำ และการเอาใจใส่อย่างสม่ำเสมอตลอดการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.บำรุง พ่วงเกิด ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างมากในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ในภาควิชาเครื่องกลที่ให้ความรู้ คำแนะนำ อาจารย์ณัฏวิภา เจียรระโนวชิระ ที่ให้ใช้สถานที่ในการทำโครงงานนี้ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ผศ.มณฑล ใจกุศล และผศ.พงษ์ศักดิ์ คำมูล ที่ช่วยให้คำแนะนำเพิ่มเติมในการทำปริญญาานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ผู้จัดทำมีวันนี้ ข้าพเจ้า นายณัฐกิตติ ผู้ศรัทธาธรรม นายเพชร พุ่มพันธ์ และนายพีรณัฐ ติรณะประกิจ ขอมอบความกตัญญูทเวทิตาคุณแด่ นายธานินทร์ และนางอรรวรรณ ผู้ศรัทธาธรรม นายพิเชฐ และนางพรรณิ พุ่มพันธ์ นายธวัชชัย และนางศิริพร ติรณะประกิจ ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้จัดทำมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณนี้ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวนาม ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ทีมงานวิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่ช่วยเหลือมาโดยตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยเรื่องนี้

นายณัฐกิตติ	ผู้ศรัทธาธรรม
นายเพชร	พุ่มพันธ์
นายพีรณัฐ	ติรณะประกิจ

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สัญลักษณ์.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 สมการแบร์นูลลี.....	5
2.2 อากาศพลศาสตร์.....	5
2.3 แรงต้าน (Drag Force).....	5
2.4 สมการนาเวียสโตกส์ (Navier-Stoke Equations).....	6
2.5 การแบ่งชนิดของไหลตามความเร็วของของไหล.....	9
2.6 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล.....	10
2.7 รูปแบบเชิงอนุพันธ์และการอินทิเกรตสำหรับสมการการเคลื่อนย้ายแบบปกติ.....	10
2.8 Upwind Differencing Scheme for Convective.....	12
2.9 The SIMPLE Algorithm.....	14
2.10 แบบจำลองของโมเดลแบบปั่นป่วน (Turbulence Models).....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	18
3.1 การออกแบบชุดการศึกษาเพื่อหาระยะปลอดภัยของจักรยาน	18
3.1.1 การกำหนดเป้าหมาย.....	18
3.1.2 ศึกษาหาสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างที่ทำให้จักรยานไม่ได้รับผลกระทบ.....	18
3.2 ทดสอบแบบจำลองโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข.....	18
3.2.1 การสร้างรูปทรงที่ใช้ศึกษา (Geometry).....	18
3.2.2 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นงานย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณหาคำตอบ	20
3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลอง	21
3.2.4 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณหาคำตอบ	21
3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และสมภาวะการแก้ปัญหา	22
3.3 กรณีศึกษา	23
3.3.1 รูปทรงอย่างง่ายแบ่งแยกย่อยออกเป็น 2 รูปทรงคือ ทรงกระบอก และ ทรงกลม	23
3.3.2 รูปทรงที่ซับซ้อน (Ahmed Body).....	24
3.3.3 รูปทรงจริง (รถจักรยานกับนักปั่น และรถบรรทุก)	25
บทที่ 4 ผลการศึกษาแบบจำลองตั้งต้น	27
4.1 การไหลภายในของรูปทรงกระบอก	28
4.1.1 การไหลแบบราบเรียบของรูปทรงกระบอก	28
4.1.2 การไหลแบบปั่นป่วนของรูปทรงกระบอก	31
4.2 การไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกและทรงกลม	33
4.2.1 การไหลภายนอกรูปทรงกระบอกโดยการไหลแบบราบเรียบ	33
4.2.2 การไหลภายนอกรูปทรงกระบอกโดยการไหลแบบปั่นป่วน	33
4.3 การไหลภายนอกของรูปทรง Ahmed Body	40
บทที่ 5 ผลการศึกษา	42
5.1 ผลการศึกษาของรูปทรงจักรยานกับรถบรรทุก	42

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 6 สรุปผลการศึกษา	50
6.1 วิจัยรณและสรุปผลการศึกษา	50
6.2 ข้อเสนอแนะ	51
บรรณานุกรม	IX



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4-1 แสดงผลลัพธ์ของความดันลดแบบการไหลภายในทรงระบอเป็นการไหลแบบราบเรียบของรูปทรง 2 และ 3 มิติ ที่ค่า Re ต่างกัน.....	29
ตารางที่ 4-2 แสดงผลลัพธ์ของความดันลดแบบการไหลภายในทรงระบอเป็นการไหลแบบปั่นป่วนของรูปทรง 2 และ 3 มิติ ที่ค่า Re ต่างกัน.....	31
ตารางที่ 4-3 ผลคำตอบการไหลภายนอกของรูปทรงระบอแบบ 2 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ตรวจสอบเทียบกับงานวิจัยของ M. Schafer [10].....	34
ตารางที่ 4-4 ผลคำตอบการไหลภายนอกของรูปทรงระบอแบบ 3 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ตรวจสอบเทียบกับงานวิจัยของ M. Schafer [10].....	36
ตารางที่ 4-5 ผลคำตอบการไหลภายนอกของรูปทรงกลมแบบ 3 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ตรวจสอบเทียบกับงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5] ที่เคยศึกษา.....	38
ตารางที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรง Ahmed body.....	40
ตารางที่ 5-1 ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรถจักรยานจากการหาค่าตอบด้วยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	43
ตารางที่ 5-2 แสดงผลลัพธ์ของผลการจำลองของรูปทรงจักรยานและรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ.....	46

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	กราฟแสดงสถิติการเสียชีวิตของคนเดินเท้าและขี่จักรยาน	2
รูปที่ 2.1	เอลิเมนต์ของของไหล.....	6
รูปที่ 2.2	Upwind Scheme สำหรับทิศทางการไหลแบบบวก	13
รูปที่ 2.3	Upwind Scheme สำหรับทิศทางการไหลแบบลบ	13
รูปที่ 3.1	เครื่องมือวาดรูปทรงในโปรแกรม ANSYS	19
รูปที่ 3.2	วิธีการนำรูปทรงจากโปรแกรมอื่นเข้าไปในโปรแกรม ANSYS.....	19
รูปที่ 3.3	แสดงการเลือกลักษณะของเอลิเมนต์.....	20
รูปที่ 3.4	แสดงการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์.....	20
รูปที่ 3.5	การตั้งชื่อของขอบเขตของตัวรูปทรง	21
รูปที่ 3.6	การตั้งค่าการคำนวณหาคำตอบ	21
รูปที่ 3.7	การกำหนดตัวเลือกในการหาคำตอบ.....	22
รูปที่ 3.8	การกำหนดแบบจำลองการไหลเพื่อใช้ในการหาคำตอบ.....	23
รูปที่ 3.9	ขนาดของทรงกระบอกที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบแบบ 2 มิติ.....	24
รูปที่ 3.10	ขนาดของทรงกระบอกที่ใช้ในการคำนวณหาคำตอบแบบ 3 มิติ.....	24
รูปที่ 3.11	ขนาดของรูปทรงกลมทั้ง 2 และ 3 มิติ	24
รูปที่ 3.12	ขนาดของรูปทรง Ahmed Body	25
รูปที่ 3.13	ขนาดของรถจักรยานที่ใช้ในการศึกษา	26
รูปที่ 3.14	รูปทรง 3 มิติของรถจักรยานที่ใช้ในการศึกษา.....	26
รูปที่ 3.15	รูปทรง 3 มิติของรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษา	27
รูปที่ 4.1	กราฟแสดงหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายในของรูปทรงกระบอกที่ $Re = 0.1$..	29
รูปที่ 4.2	แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบราบเรียบรูปทรง 2 มิติ.....	30
รูปที่ 4.3	แสดงความเร็วการไหลภายในท่อของการไหลแบบราบเรียบรูปทรง 3 มิติ.....	30
รูปที่ 4.4	แสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายในท่อแบบปั่นป่วนที่ $Re = 5000$	31
รูปที่ 4.5	แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติ	32
รูปที่ 4.6	แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติ ($k - \epsilon$)	32
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายนอกรูปทรงกระบอกของการไหลแบบราบเรียบ $Re = 20$	33
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายนอกรูปทรงกระบอกของการไหลแบบปั่นป่วน.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบราบเรียบที่ $Re = 20$	34
รูปที่ 4.10 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re = 1000000$ โดยโมเดล ($k - \varepsilon$ Model)	35
รูปที่ 4.11 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re = 1000000$ โดยโมเดล ($k - \omega$ SST Model)	35
รูปที่ 4.12 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 20$	36
รูปที่ 4.13 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 1000000$ ($k - \varepsilon$)	37
รูปที่ 4.14 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 1000000$	37
รูปที่ 4.15 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 16000$	39
รูปที่ 4.16 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 600000$	39
รูปที่ 4.17 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 1000000$	40
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของผลการจำลองจากงานวิจัยของ	41
รูปที่ 4.19 แสดงผลลัพธ์ของพื้นที่รูปร่างความเร็วรูปทรง Ahmed Body	41
รูปที่ 5.1 แสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ของรูปทรงจักรยานกับรถบรรทุก	42
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนหน้าของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ	44
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนกลางของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ	44
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนหลังของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ	44

สัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่ (ตารางเมตร)
C_d	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_{d_s}	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้าง
D	คือ	Diffusion Conductance
g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที ²)
g_x	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในแนวแกน x (เมตร/วินาที ²)
g_y	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในแนวแกน y (เมตร/วินาที ²)
g_z	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงในแนวแกน z (เมตร/วินาที ²)
F	คือ	Convection Mass Flux
P	คือ	ความดัน (นิวตัน/เมตร ²)
V	คือ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
σ	คือ	ความเค้นในทิศทางตั้งฉากกับระนาบพื้นผิว (นิวตัน/ตารางเมตร)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
μ	คือ	Dynamic Viscosity (ปาสคาล/วินาที)
ϕ, φ	คือ	คุณสมบัติใดๆของของไหล

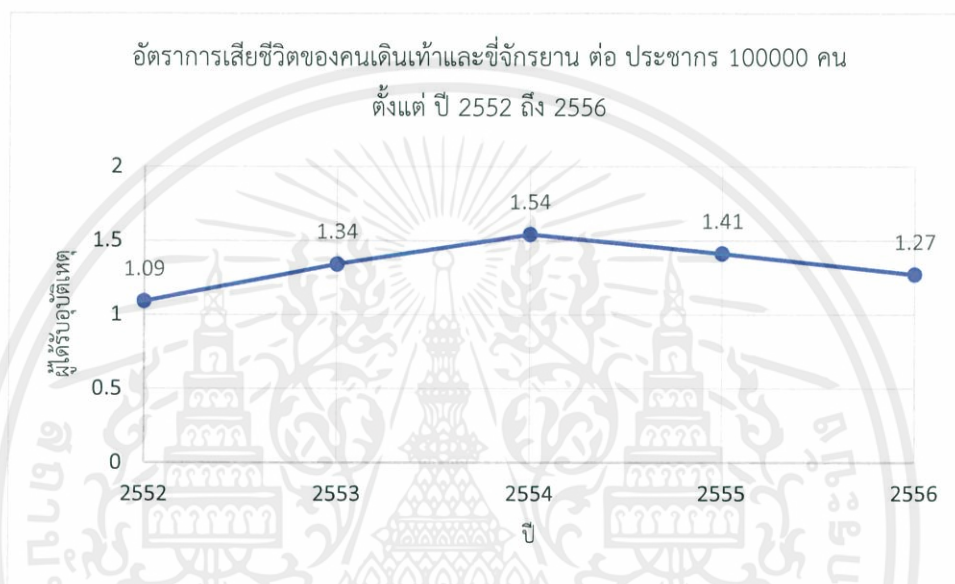
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันคนสนใจปั่นจักรยานกันอย่างแพร่หลาย และมีจำนวนมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นการปั่นในสนาม เส้นทางจักรยาน หรือบนถนน โดยสิ่งที่เกิดตามมาคืออุบัติเหตุ ซึ่งอาจเกิดจากความประมาทของตัวผู้ขับขี่เอง หรืออาจเกิดจากการปัจจัยภายนอกอื่น ๆ เช่น สภาพถนน ความประมาทของผู้ร่วมใช้ทาง หรือการออกแบบถนนสำหรับการปั่นจักรยาน เป็นต้น ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผู้ปั่นจักรยานสูญเสียความสามารถในการควบคุมจักรยานคือ การปั่นจักรยานขณะที่รถบรรทุกขนาดใหญ่ที่มีความเร็วสูงขับผ่าน ซึ่งผลของความเร็วนี้อาจเป็นปัญหาที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุได้ โดยอาจเกิดจากความตกใจหรือผลของอากาศที่กระทำกับจักรยานและผู้ปั่นจักรยาน เพราะเหตุนี้ขนาดของรถไฟ รถไฟฟ้า และรถไฟความเร็วสูง จึงได้มีเส้นที่กำหนดระยะห่างระหว่างการยื่นกับตัวรถไฟที่เข้าเทียบชานชาลาอยู่ ซึ่งระยะดังกล่าว วิศวกรผู้ออกแบบได้มีการคำนวณผลของอากาศที่เกิดจากเคลื่อนที่ของรถซึ่งเป็นไปตามสมการของแบร์นูลลี โดยเมื่อผู้โดยสารยืนอยู่ขณะที่รถไฟวิ่งผ่าน ความเร็วของอากาศที่ด้านหน้ากับหลังของผู้โดยสารนั้นมีความต่างกัน จึงส่งผลให้เกิดความดันที่ต่างกัน ทำให้ผู้โดยสารสูญเสียการทรงตัวและถูกดูดเข้าไปยังตัวรถไฟ จากการเริ่มต้นการศึกษามีความเห็นว่าการนำผลจากอากาศนี้ สามารถนำมาประยุกต์เข้ากับความปลอดภัยของการปั่นจักรยานบนท้องถนนได้ เนื่องจากอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นนี้อาจส่งผลต่อตัวผู้ปั่นจักรยานทำให้ได้รับบาดเจ็บหรือกระทั่งสูญเสียชีวิตได้ ดังนั้นหากสามารถทำการหาระยะปลอดภัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบเส้นทางสำหรับจักรยานที่อยู่ข้างถนน การปั่นจักรยานบนถนน หรือไหล่ทาง การออกกฎหมายสำหรับการปั่นจักรยานบนถนน และความรู้สำหรับนักปั่นจักรยานและผู้ขับขี่รถคันอื่นๆบนท้องถนนได้นั้น ก็สามารถช่วยลดอุบัติเหตุและการสูญเสียที่เกิดจากปัจจัยนี้ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่เกิดจากการที่วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วด้านข้างที่ต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ความดันไม่เท่ากัน กล่าวคือจักรยานถูกแรงกระทำจากอากาศของการเคลื่อนที่ผ่านของรถบรรทุกที่มีความเร็วสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้จักรยานที่ปั่นอยู่บริเวณด้านข้างถูกผลึกหรือดูดเข้าไปยังตัวรถบรรทุก โดยผู้ศึกษาได้ทำการหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างการปั่นจักรยานกับรถบรรทุกบนท้องถนน เพื่อหาความปลอดภัยของผู้ขับขี่ ทางผู้ศึกษามีความหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งในการช่วยลดอุบัติเหตุของนักปั่นจักรยานที่เกิดขึ้นบนท้องถนน และสามารถนำผลการศึกษาไปช่วยในการออกแบบและเป็นระเบียบข้อบังคับในการสร้างถนนของนักปั่นบริเวณข้างทางถนนที่มีรถสัญจร รวมถึงเป็นความรู้สำหรับผู้ขับขี่ทุกท่านในการใช้รถใช้ถนน เพื่อความระมัดระวัง และลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งผู้ศึกษาหวังว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในภายภาคหน้าสืบไป

จากการศึกษาข้อมูล อัตราการเสียชีวิตของคนเดินเท้าและขี่จักรยานต่อประชากร 100,000 คน (สัดส่วนระหว่างจำนวนผู้เสียชีวิตจากอุบัติเหตุจากรถที่เป็นคนเดินเท้าและปั่นจักรยาน ที่แยกบัญชีตารางโรคพื้นฐานของบัญชีจำแนกโรคระหว่างประเทศฉบับแก้ไข ครั้งที่ 10 ต่อจำนวนประชากรทั้งประเทศ 100,000 คน) อ้างอิงจาก สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุขและกรมการปกครอง กระทรวงมหาดไทย พบว่า ในช่วงระยะเวลา 5 ปีล่าสุด (ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 ถึง พ.ศ. 2556) มีค่าเฉลี่ยอัตราการเสียชีวิตของคนเดินเท้าและขี่จักรยานต่อประชากร 100,000 คน เท่ากับ 1.33 ซึ่งเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับจำนวนประชากรทั้งหมดของประเทศ



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงสถิติการเสียชีวิตของคนเดินเท้าและขี่จักรยาน

โดยจากการศึกษาจากสถิติพบว่าอุบัติเหตุนี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดความสูญเสียกับประชากรมากพอสมควร ดังนั้นการศึกษาเรื่องแรงจากอากาศพลศาสตร์นี้อาจเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ช่วยให้ลดการเกิดอุบัติเหตุลงได้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาผลกระทบต่างๆที่กระทำต่อตำแหน่งด้านข้างของรถจักรยานเมื่อปั่นใกล้รถบรรทุก โดยมีผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของตัวรถจักรยาน
- 1.2.2 เพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมของรถจักรยานกับรถบรรทุก ที่ทำให้จักรยานไม่ได้รับผลกระทบของแรงทางกายภาพ ซึ่งช่วยให้นักปั่นขับขี่อย่างปลอดภัยมากขึ้น
- 1.2.3 ช่วยลดอุบัติเหตุจากการใช้งานจักรยานบนท้องถนน โดยการศึกษาหาระยะห่างที่เหมาะสม สามารถนำมาใช้เป็นออกแบบความกว้างของช่องทางสำหรับจักรยานบนถนน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากอากาศพลศาสตร์ เมื่อรถขนาดใหญ่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ทำให้อากาศบริเวณด้านข้างของตัวรถมีความเร็วสูงด้วย ซึ่งส่งผลให้ความดันของอากาศบริเวณนั้นเปลี่ยนไปตามสมการของ Navier-Stokes และส่งผลกับจักรยานที่ปั่นอยู่บริเวณนั้นด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงของอากาศพลศาสตร์ขึ้นอยู่กับ ความเร็วของอากาศ การต่างกันของความดัน และระยะห่างของจักรยานกับรถขนาดใหญ่

ขณะขับขี่จักรยานใกล้บริเวณรถบรรทุก ทำให้มีแรงเนื่องจากความดันที่ต่างกันของสองวัตถุเกิดขึ้น ซึ่งอาจส่งผลต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้าง และเป็นผลสามารถทำให้รถจักรยานล้มได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาตำแหน่งของจักรยานขณะปั่น ณ บริเวณด้านข้างของรถบรรทุกที่มีความเร็วมากกว่า เพื่อหาระยะห่างที่สัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างไม่มีผลต่อนักปั่น ซึ่งแนวคิดนี้ได้รับมาจากงานวิจัยของ Bert Blocken [4] ซึ่งเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมสำหรับนักปั่นที่ปั่นตามรถจักรยานยนต์ ในการศึกษานี้ได้ศึกษาหาระยะห่างของนักปั่นและรถจักรยานยนต์ โดยได้ทำการศึกษาทางการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์และการทำการทดลองในอุโมงค์ลม ซึ่งในตำแหน่งที่ต่างกันั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ต่างกันออกไป และจากงานวิจัยของ Adelya Khayrullina [1] ซึ่งได้ทำการศึกษาผลกระทบของอากาศพลศาสตร์บนสถานีรถไฟความเร็วสูงเพื่อหาระยะปลอดภัยของผู้ที่อยู่บนสถานี

เพื่อที่เป็นการสนับสนุนความน่าเชื่อถือของงานวิจัย ผู้จัดทำได้มีการทำตัวต้นแบบสำหรับการจำลองหาค่าตอบโดยทำการสอบเทียบค่ากับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งได้เริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยของ M. Schäfer และ S. Turek [10] ที่ทำการจำลองของไหลไหลผ่านทรงกระบอกแบบลามิน่า 2 และ 3 มิติ งานวิจัยของ Meng Wang และ Pietro Catalano [11] ที่ทำการจำลองของไหลไหลผ่านทรงกระบอกแบบปั่นป่วน 2 มิติ และงานวิจัยของ W. Bai [13] ซึ่งเป็นการจำลองของไหลไหลผ่านทรงกระบอกแบบปั่นป่วน 3 มิติ จากนั้นศึกษางานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5] ที่ได้ทำการจำลองของไหลไหลผ่านทรงกลมแบบปั่นป่วน 3 มิติ และสุดท้ายงานวิจัยของ Ahmed, S.R. [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาผลของสัมประสิทธิ์แรงต้านของตัว รูปทรง Ahmed Body โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงมุมลาดเอียงของรูปทรงรถอย่างง่าย และ จากหนังสือของ Easton Cycling [8] ทำการศึกษาผลกระทบของทิศทางลมและความเร็วของลมที่ทำให้จักรยานล้มได้ การศึกษาของงานวิจัยนี้ทั้งหมดช่วยสนับสนุนแนวคิดในการศึกษาของผู้ทำการศึกษา ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรถจักรยานขณะมีผู้ขับขี่ โดยมีข้อกำหนดตำแหน่งของรถจักรยานโดยแบ่งเป็นวางด้านหน้า กลาง และหลังของด้านข้างรถบรรทุก และเปลี่ยนระยะออกไปทางด้านข้าง รวมเป็นจำนวน 33 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่ใช้เริ่มตั้งแต่ระยะ 10 เซนติเมตร จนถึงระยะ 200 เซนติเมตร โดยได้ทำการเพิ่มระยะทีละ 10 เซนติเมตร จนกระทั่งถึงระยะ 100 เซนติเมตร จากนั้นผู้ศึกษาได้เพิ่มไปเป็นระยะที่ 200 เซนติเมตร
- 1.5.2 จักรยานใช้ความเร็วที่ 27 กิโลเมตร/ชั่วโมง เนื่องจากเป็นความเร็วเฉลี่ยที่นักปั่นใช้ และรถบรรทุกใช้ความเร็วที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยเลือกจากความเร็วสูงสุดที่รถบรรทุกสามารถใช้ได้บนถนนภายใต้กฎการจราจร
- 1.5.3 รูปแบบการศึกษาที่ได้ มาจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลมในการศึกษาต่อจากนี้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิเคราะห์ปัญหาของงานวิจัยเพื่อกำหนดขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย โดยเริ่มจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องอากาศพลศาสตร์ จากนั้นจึงวางแผนลงมือปฏิบัติ โดยในส่วนของการศึกษาของงานวิจัยมีการใช้งานทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นหลักที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งได้เริ่มต้นจากการศึกษารูปทรงอย่างง่ายคือ การไหลภายในท่อทรงกระบอก การไหลภายนอกของรูปทรงกลม ทรงกระบอก ทั้งแบบ 2 และ 3 มิติ และจึงเริ่มทำการศึกษาในรูปทรงที่ซับซ้อนมากขึ้น จากนั้นรวบรวมผลลัพธ์ข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อทำการสรุปผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ว่าเป็นตามอย่างที่ตั้งสมมติฐานไว้หรือไม่

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD) คือ การรวมกันของสามศาสตร์จาก พลศาสตร์ของไหล (Fluid) คณิตศาสตร์ (Mathematics) และวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ (Computer Science) เพื่ออธิบายพฤติกรรมของของไหลในแต่ละปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลส่วนใหญ่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยวิธีแก้สมการ (Analytical Solution) ดังนั้น วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Solution) จึงถูกนำมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาทางการไหลของของไหล

2.1 สมการแบร์นูลลี

สมการแบร์นูลลีเกี่ยวข้องกับความดันในของไหล ซึ่งพบว่าความดันในของไหลที่เคลื่อนที่มีค่าน้อยกว่าความดันในของไหลที่อยู่นิ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของของไหล ซึ่งจากสมการ (2.1) เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรความดัน ความเร็ว และตำแหน่งตามความสูง โดยการอยู่บนสมมติฐานที่ว่า เป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด การไหลแบบคงที่ และไม่สามารถอัดตัวได้ สมการแบร์นูลลีคือตัวช่วยที่ดีในการช่วยแก้ปัญหาทางการไหลของการไหล

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constant on a streamline} \quad (2.1)$$

2.2 อากาศพลศาสตร์

อากาศพลศาสตร์เป็นสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยมีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่เป็นของแข็ง เช่น เครื่องบิน รถยนต์ หรือเรือ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และสถาปนิก ได้ศึกษาเกี่ยวกับแรงดังกล่าว เพื่อนำความรู้ออกแบบและสร้างสิ่งต่างๆที่มีแรงจากอากาศเข้ามากระทำ อากาศพลศาสตร์เกี่ยวข้องกับแรงที่อากาศกระทำต่อวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่โดยแบ่งเป็น 2 แรง คือ แรงยก (Lift Force) และแรงต้านอากาศ (Drag Force)

2.3 แรงต้าน (Drag Force)

เป็นแรงที่กระทำตรงข้ามกับแรงที่ขับเคลื่อนรถยนต์ไปข้างหน้า หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นแรงที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศ มีทิศทางขนานกับวัตถุที่เคลื่อนที่ แรงต้านเกิดจากการกระทบของอากาศ การเสียดทานของพื้นผิวรถยนต์ และแรงดูดเนื่องจากอากาศ โดยสมการแรงต้านคำนวณได้จาก

$$\text{drag} = \int dF_x = \int p \cos \theta dA = \int \tau_w \sin \theta dA \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

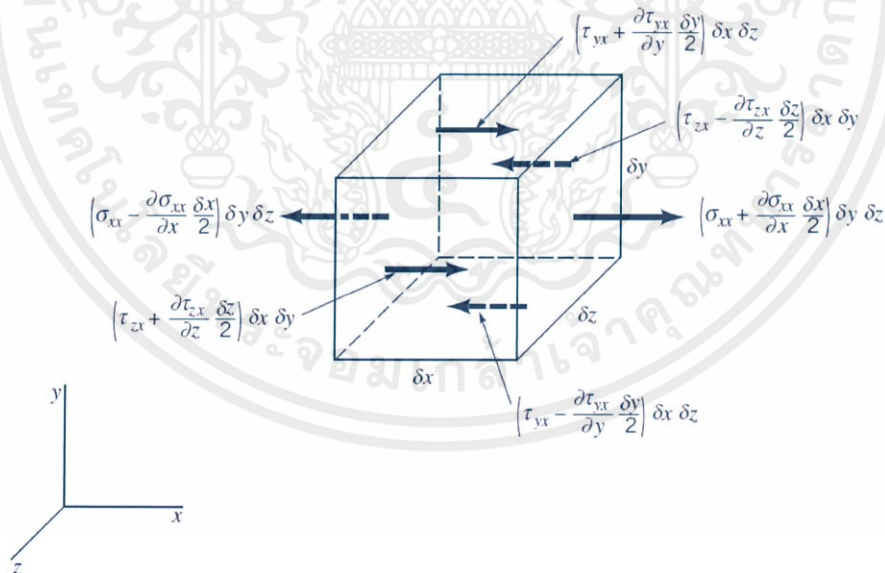
ค่าแรงต้านของรูปทรงส่วนใหญ่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient) เข้ามาเกี่ยวข้อง ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย C_D ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุและลักษณะการไหลรอบวัตถุ โดยส่วนมาก ค่านี้ได้จากการทดลองและการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ หรือสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.2) ถ้าทราบพื้นที่ด้านหน้าแรง ความเร็ว และความหนาแน่นของของไหล

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.3)$$

2.4 สมการนาเวียสโตกส์ (Navier-Stokes Equations)

สมการนาเวียสโตกส์ (Navier-Stokes Equations) เป็นสมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล สมการนี้ถูกสร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้สมการกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันบนของไหล และประกอบเข้ากับสมมติฐานว่าความเค้นบนของไหลคือผลรวมของเทอมของความหนืดของการกระจายตัว และเทอมของความดัน ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

เมื่อพิจารณาของไหลให้มีขนาดที่เล็กมาก พบว่าแรงที่เกิดขึ้นมีสองลักษณะ คือ แรงที่เกิดบนระนาบของพื้นผิว (Surface Forces) และแรงที่เกิดบนตัวของวัตถุ (Body Forces)



รูปที่ 2.1 เอลิเมนต์ของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นบนตัววัตถุนั้นคือแรงที่เกิดจากน้ำหนักที่เราพิจารณาอยู่ซึ่งหาได้จาก มวล คูณกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แรงที่เกิดบนระนาบของพื้นผิว คือแรงที่กระทำต่อพื้นผิวของเอลิเมนต์มีทั้งที่เป็นความเค้นในแนวตั้งฉากกับระนาบของพื้นผิวของเอลิเมนต์ (Normal Stress) และความเค้นเฉือนคือแรงที่กระทำในทิศขนานของพื้นผิวเอลิเมนต์ (Shear Stress) ซึ่งแรงนี้สามารถพิจารณาตามแนวแกนบนพิกัดคาร์ทีเซียน

แรงตามแนวแกน x บน Element คือ

$$\delta F_{sx} = (\delta \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}) \delta x \delta y \delta z \quad (2.4)$$

แรงตามแนวแกน y บน Element คือ

$$\delta F_{sy} = (\delta \rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}) \delta x \delta y \delta z \quad (2.5)$$

แรงตามแนวแกน z บน Element คือ

$$\delta F_{sz} = (\delta \rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}) \delta x \delta y \delta z \quad (2.6)$$

สมการการเคลื่อนที่ $\delta F = \delta ma$ ซึ่งพิจารณาแรงเป็น 3 แกนคือ x y และ z แนวแกน x คือ

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

แนวแกน y คือ

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

แนวแกน z คือ

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

ถ้าพิจารณาให้เป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด ทำให้ไม่มีการพิจารณาความเค้นเฉือน (Shear Stress)

และกำหนดให้ $-p = \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$

ดังนั้นเมื่อจัดรูปของสมการใหม่ได้

แนวแกน x

$$\rho g_x + \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

แนวแกน y

$$\rho g_y + \frac{\partial p}{\partial y} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

แนวแกน z

$$\rho g_z + \frac{\partial p}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.12)$$

หรือ เขียนในรูปของ Euler's Equations of Motion ได้ดังนี้

$$\rho \bar{g} - \nabla p = \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) \quad (2.13)$$

แต่พิจารณากรณีที่เป็นของไหลแบบมีความหนืด (Viscous Flow) ดังนั้นความเค้นทั้งในแนวตั้งฉากและขนาน ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเร็ว ตามสมการดังต่อไปนี้

ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress)

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.16)$$

ความเค้นเฉือน (Shear Stress)

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.19)$$

เขียนในรูปของสมการที่เรียกว่า Navier-Stokes Equations

แนวแกน x

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{dp}{dx} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.20)$$

แนวแกน y

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{dp}{dy} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.21)$$

แนวแกน z

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{dp}{dz} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.22)$$

2.5 การแบ่งชนิดของไหลตามความเร็วของของไหล

ของไหลสามารถจำแนกได้ตามความเร็วของของไหลซึ่งแบ่งตามค่าของ Mach Number ซึ่ง

สามารถหาได้จากสมการ $M = \frac{V}{c}$ โดยที่ M คือ Mach Number V คือ ความเร็วของของไหล และ

c คือ ความเร็วของเสียง ณ ขณะนั้น ถ้าค่าของ Mach Number มีค่ามากกว่า 0.3 การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ (Compressible Flow) แต่ถ้าค่าน้อยกว่า 0.3 การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)

2.6 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขทางคอมพิวเตอร์ (CFD) คือการใช้โครงสร้างของการคำนวณทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์ปัญหาที่สามารถนำไปสู่การจำลองสถานะการไหลได้ด้วยโปรแกรม โดยผู้ใช้งานทำการใส่ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์ลงไป จากนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้ปัญหา โดยหลักการทำงานของการทำงานหาคำตอบของการศึกษามีขั้นตอนหลักอยู่ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 2.6.1 ขั้นก่อนประมวลผล (Pre-Processing) คือ ขั้นตอนแรกที่ใช้กำหนดรายละเอียดของการกำหนดปัญหาและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปทรง จำนวนเอลิเมนต์ การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น และคุณสมบัติของของไหล
- 2.6.2 ขั้นประมวลผล (Processing) เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหา
- 2.6.3 ขั้นแสดงผล (Post-Processing) คือ การแสดงผลเฉลยของปัญหาในการจำลองด้วยโปรแกรม

2.7 รูปแบบเชิงอนุพันธ์และการอินทิเกรตสำหรับสมการการเคลื่อนย้ายแบบปกติ

จากสมการควบคุมการไหลมีรูปแบบสมการที่คล้ายกัน ถ้าหากพิจารณาให้ φ เป็นตัวแปรแสดงคุณสมบัติใด ๆ ของการไหลแล้ว ดังนั้นสามารถเขียนในรูปแบบได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi\bar{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S_\varphi \quad (2.23)$$

สมการที่ 2.22 เรียกว่าสมการการเคลื่อนย้ายของคุณสมบัติจำเพาะ φ ซึ่งสามารถอธิบายการเคลื่อนย้ายของปริมาณทางฟิสิกส์จำเพาะของมวลของไหลได้ โดยที่เทอมที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลาและเทอมของการพา อยู่ด้านซ้ายมือของสมการ ส่วนเทอมของ Source และเทอมของการแพร่ (Γ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่)

สมการ (2.22) ถูกใช้เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับขั้นตอนการคำนวณในวิธีปริมาตรจำกัดโดยกำหนด φ เท่ากับ 1, u , v , w และเลือกค่าที่เหมาะสมสำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ Γ และ Source terms เราได้สมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ทั้ง 5 ชุด ซึ่งประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัมและพลังงาน ทั้งนี้ขั้นตอนหลักของวิธีปริมาตรสับเนื่อง คือการอินทิเกรตสมการ (2.22) เหนือปริมาตรควบคุม 3 มิติซึ่งทำได้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{cv} \text{div}(\rho\phi\vec{u}) dV = \int_{cv} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.24)$$

การอินทิเกรตเชิงปริมาตรในเทอมที่สองด้านซ้ายมือ คือ เทอมการพาและในเทอมแรกทางขวามือคือเทอมของการแพร่ ถูกเขียนใหม่เป็นการอินทิเกรตเชิงพื้นผิวของปริมาตรควบคุมโดยใช้ทฤษฎี Gauss' Divergence สำหรับเวกเตอร์ \vec{a} ใดๆ ทฤษฎีนี้กล่าวว่า

$$\int_{cv} \text{div}\vec{a} dV = \int_{cv} \vec{n} \cdot \vec{a} dA \quad (2.25)$$

ความหมายทางฟิสิกส์ของ $\vec{n} \cdot \vec{a}$ คือ องค์ประกอบย่อยของเวกเตอร์ \vec{a} ในทิศทางของเวกเตอร์ \vec{n} ตั้งฉากต่อพื้นผิวของชิ้นส่วน dA ฉะนั้นการอินทิเกรตของ divergence ของเวกเตอร์ \vec{a} เหนือปริมาตรเท่ากับองค์ประกอบย่อยของเวกเตอร์ \vec{a} ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวตลอดทั้งขอบเขตของปริมาตรรวม (Integrated) ซึ่งก็คืออาณาบริเวณของพื้นผิว A ทั้งหมด การประยุกต์ทฤษฎี Gauss' Divergence (สมการที่ 2.23) ทำให้สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} \rho\phi dV \right) + \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.26)$$

ฟลักซ์การแพร่มีค่าเป็นเป็นบวกในทิศทางของการเปลี่ยนแปลงต่อหน่วยความยาวของคุณสมบัติของไหล ϕ ที่มีค่าลบ เช่น ตลอดแนวทิศทาง $-\text{grad}(\phi)$ ดังนั้นผลคูณของ $\vec{n} \cdot (\text{grad}(\phi))$ คือ องค์ประกอบของฟลักซ์การแพร่ในทิศทางของเวกเตอร์ตั้งฉากที่ทิศพุ่งออกไปจากพื้นผิวของชิ้นส่วนของไหล ในทำนองเดียวกันกับผลคูณ $\vec{n} \cdot (\text{grad}(\phi))$ ซึ่งเท่ากับ $-\vec{n} \cdot (\text{grad}(\phi))$ ซึ่งก็คือ ฟลักซ์การแพร่ที่มีค่าบวก มีทิศตรงกันข้ามกับเวกเตอร์ตั้งฉาก หรือก็คือการเข้าไปในชิ้นส่วนย่อยเทอมแรกทางขวามือของสมการ (2.24) คือเทอมการแพร่ ดังนั้นสอดคล้องกับฟลักซ์ที่ไหลเข้าไปในชิ้นส่วนและแทนอัตราการเพิ่มสุทธิของคุณสมบัติ ϕ ของชิ้นส่วนของไหลเนื่องจากการแพร่ เทอมสุดท้ายทางขวามือของสมการนี้ได้ให้อัตราการเพิ่มของคุณสมบัติ ϕ ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ Sources ภายในชิ้นส่วนไหล

การอธิบายนี้ยืนยันได้ว่าการอินทิเกรตของสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ยังคงสภาพของการอนุรักษ์ปริมาณทางฟิสิกส์ของของไหล แม้ในระดับปริมาตรควบคุมที่มีขนาดจำกัดชัดเจน (Finite Volume)

ในการไหลสถานะคงที่ (Steady State) อัตราของเทอมที่การเปลี่ยนแปลงของ (2.24) เท่ากับศูนย์ สิ่งนี้นำไปสู่รูปแบบอินทิเกรตของสมการการเคลื่อนที่แบบสถานะคงที่ ดังนี้

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho\phi\vec{u}) dA = \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.27)$$

ในปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเวลา จำเป็นต้องอินทิเกรตเทียบเวลา t ในช่วงเวลาน้อยๆ Δt จาก t จนกระทั่งถึง $t + \Delta t$ ทำให้ได้รูปแบบที่ถูกอินทิเกรตแล้วแบบทั่วไปของสมการการเคลื่อนย้าย (Transport Equation) คือ

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{cv} (\rho\phi) dV \right) dt + \int_{\Delta A} n \cdot (\rho\phi u) dA dt = \int_{\Delta A} \int_{\Gamma_\phi} (\text{grad}\phi) dA dt + \int_{\Delta cv} S_\phi dV dt \quad (2.28)$$

2.8 Upwind Differencing Scheme for Convective

Upwind Differencing Schemes คือ กระบวนการแก้ปัญหาวิชาเชิงตัวเลขในปัญหาการคำนวณหาผลคำตอบทางพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ

จากสมการ 2.23 มี 1 Convection Term ใช้ Upwind Scheme ในการประมาณค่าซึ่งมี 2 กรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 Positive Direction $u_w > 0, u_e > 0$ (รูปที่ 2.2 แสดงการแบ่งการคิด)
จากระเบียบวิธีของ Upwind กำหนดให้

$$\phi_w = \phi_w \text{ และ } \phi_e = \phi_e$$

กำหนดให้ D คือ Diffusion Conductance และ F คือ Convection Mass Flux และจากสมการ Discretized ได้สมการดังนี้

$$F_e \phi_p - F_w \phi_w = D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.29) เมื่อจัดรูปใหม่ได้

$$[(D_w + F_w) + D_e + (F_e - F_w)] \phi_p = (D_w + F_w) \phi_w + D_e \phi_e \quad (2.30)$$

กรณีที่ 2 Negative Direction $u_w < 0, u_e < 0$ (รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งการคิด)

จากระเบียบวิธีของ Upwind กำหนดให้

$$\phi_w = \phi_w \text{ และ } \phi_p = \phi_e$$

และจากการ Discretized สมการได้

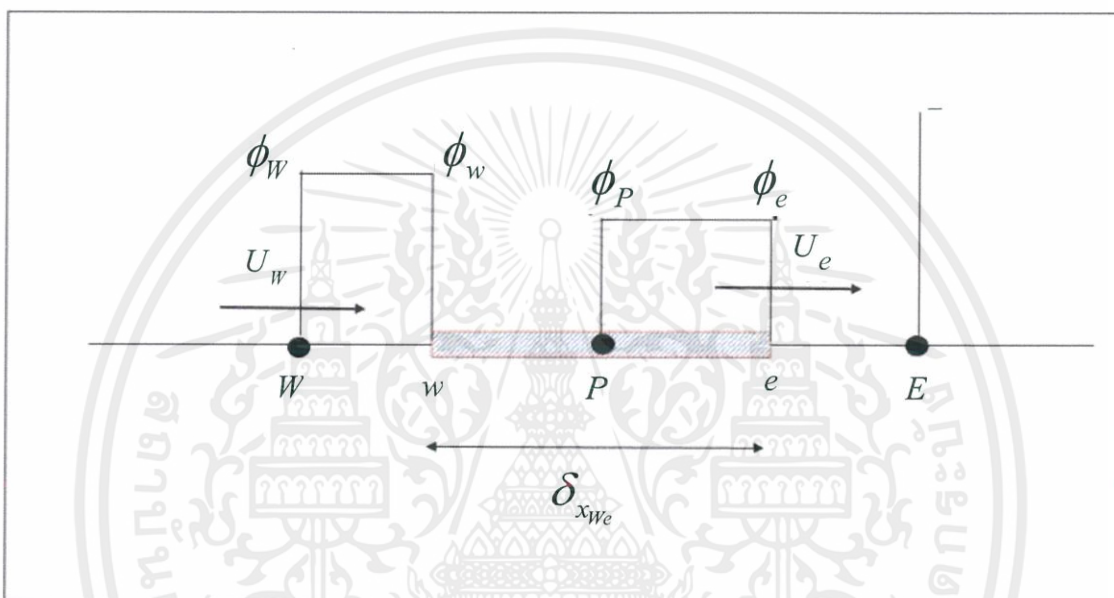
$$F_e \phi_e - F_w \phi_p = D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.31) เมื่อจัดรูปใหม่ได้

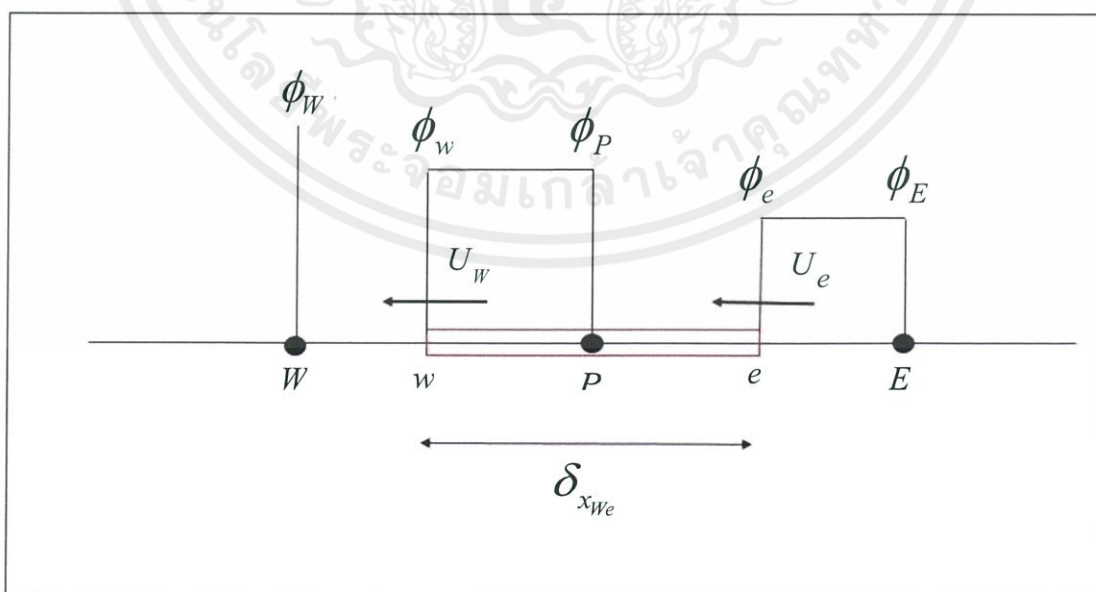
$$[(D_e - F_e) + D_w + (F_e - F_w)]\phi_p = (D_e - F_e)\phi_e + D_w\phi_w \quad (2.32)$$

2. Diffusion Term หาค่าโดยใช้วิธีของ Central Difference

3. Source Term คือ ส่วนที่เหลือจากการจัดสมการที่ไม่ได้อยู่ใน Convection Term และ Diffusion Term



รูปที่ 2.2 Upwind Scheme สำหรับทิศทางการไหลแบบบวก



รูปที่ 2.3 Upwind Scheme สำหรับทิศทางการไหลแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 The SIMPLE Algorithm

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) เป็นการเดาค่าของความดันบน Stagger Grid โดยพิจารณาเป็นการไหลแบบราบเรียบในสภาวะคงตัว และเป็นแบบ 2 มิติ ในพิกัดของคาร์ทีเซียน โดยให้สนามความดัน และส่วนประกอบของความเร็ว u^* และ v^* ได้

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_e \quad (2.33)$$

$$a_e v_e^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (p_P^* - p_E^*) A_n \quad (2.34)$$

จุดหมายคือการหาทางปรับค่าความดัน p^* ที่ได้จากการเดาค่าโดยให้ค่าของสนามความเร็ว v^* เข้าใกล้ค่าที่เป็นจริงอย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องโดย Correct Pressure สามารถหาได้จาก

$$p = p^* + p' \quad (2.35)$$

โดยที่ p' เรียกว่า Pressure Correction ซึ่งเป็นค่าผลต่างของความดันที่คำนวณได้ใหม่กับค่าความดันที่ใช้คำนวณครั้งก่อน ในทำนองเดียวกัน Velocity Correction u' และ v' สามารถหาได้จากวิธีเดียวกันดังนั้นได้

$$u = u^* + u' \quad (2.36)$$

$$v = v^* + v' \quad (2.37)$$

ถ้าลบสมการ (2.30) จาก $a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + b + (p_P + p_E) A_e$ ได้

$$a_e u_e' = \sum a_{nb} u_{nb}' + b + (p_P' - p_E') A_e \quad (2.38)$$

ตัดเทอมของ $\sum a_{nb} u_{nb}'$ ออกไปจากสมการ (2.35) ได้เป็น

$$a_e u_e' = (p_P' - p_E') A \quad (2.39)$$

$$\text{กำหนดให้ } d_e = \frac{A_e}{a_e} \text{ ได้}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u'_e = d_e (p'_P - p'_E) \quad (2.40)$$

สมการ (2.30) เราเรียกว่า Velocity Correction สามารถเขียนได้เป็น

$$u_e = u_e^* + d_e (p'_P - p'_E) \quad (2.41)$$

$$v_n = v_n^* + d_n (p'_P - p'_E) \quad (2.42)$$

ลำดับขั้นตอนของวิธี SIMPLE Algorithm

1. เดาค่าสนามความดัน p^*
2. แก้สมการโมเมนต์ เช่น สมการที่ (2.30) – (2.31) ได้ u^* และ v^*
3. แก้สมการของ p'
4. คำนวณหาค่า p จากสมการ (2.32)
5. คำนวณหาค่า u และ v จากสมการที่มีเครื่องหมายดาว โดยใช้สูตรของ Velocity Correction สมการที่ (2.38) และ (2.39)
6. แก้สมการหาค่าอื่นๆ ที่มีผลต่อสนามการไหล
7. หาค่า p จากการเดาค่าใหม่ของ p^* จากนั้นกลับไปทำขั้นตอนที่สองใหม่ และทำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าลู่เข้า

2.10 แบบจำลองของโมเดลแบบปั่นป่วน (Turbulence Models)

มีข้อสงสัยเกิดขึ้นเมื่อการจำลองทางปรากฏการณ์ทางกายภาพของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งต่อมา สามารถเห็นได้ว่าการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการเกิดการหมุนวนของของไหลขึ้นเป็นช่วงกว้าง

ในปัจจุบันนี้การคำนวณสามารถหาการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณจากสมการนาเวียร์-สโตก โดยวิธีเชิงตัวเลขโดยตรง ซึ่งวิศวกรต้องการกระบวนการคำนวณที่สนับสนุนให้ข้อมูลที่เพียงพอเกี่ยวกับกระบวนการเกิดการไหลแบบปั่นป่วน แต่เพื่อหลีกเลี่ยงการคาดการณ์ของผลกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้นในการไหลแบบหมุนวน โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ถูกทำให้รับรองได้โดยการให้ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้เวลาเฉลี่ยของคุณสมบัติของของไหล (เช่น ความเร็ว ความดัน หรือความเค้น เป็นต้น) ดังนั้น วิศวกรสามารถสนใจที่ค่าเฉลี่ยโดยการปรับค่าให้เหมาะสมกับเวลาการเกิดโดยเฉลี่ย ซึ่งกระบวนการนี้เป็นที่รู้จักกันดีคือ สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) โดยวิธีหาความเร็วและความดัน มี 3 วิธี ได้แก่

1. DNS (Direct Numerical Simulation)

ประกอบด้วย 3 วิธี ได้แก่ Finite Differential Method (FDM) Finite Element Method (FEM) และ Finite Volume Method (FVM) ต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากที่สุดและใช้งบประมาณสูงในการปฏิบัติจริง

2. RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)

เป็นวิธีทางสถิติในการอธิบายพฤติกรรมของการไหล โดยมีการเพิ่มสมการ Time Averages Ensemble Averages Spatial Averages และ Mass Averages ในการหาความเร็วและความดัน ซึ่งประกอบด้วย Zero-Equation Models One-Equation Models Two-Equation Models Second Order Closure Models (Reynolds Stress Model) และ Algebraic Reynolds Stress Models

3. LES (Large Eddy Simulation)

- เป็นโมเดลที่ถูกสร้างมาแก้ไขข้อดีข้อเสียระหว่าง DNS และ RANS
- การโมเดลง่ายกว่า RANS
- การสร้าง Mesh ต้องละเอียดกว่า RANS แต่ไม่มากเท่า DNS
- มี 2 ขั้นตอนในการทำ Model คือ Filtering และ Subgrid Scale Modeling

RANS Models

1. One-Equation Models

- Spalart-Allmaras เป็นโมเดลที่เหมาะสมสำหรับการทำงาน 2 มิติ มากกว่า 3 มิติ

2. Two-Equation Models

- $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการหาผลค่านวนการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้เป็นการจำลองรูปแบบของค่าเฉลี่ยการไหล ซึ่งใช้สมการอนุพันธ์ย่อยสองสมการของสมการเคลื่อนย้าย ในการหาผลคำตอบซึ่งประกอบไปด้วย Turbulent Kinetic Energy และ Dissipation แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดการใช้งานคือ ไม่เหมาะสมกับการทำการหาคำตอบที่มีการไหลที่ซับซ้อน
- $k-\omega$ เป็นโมเดลที่เหมาะสมกับใช้งานในค่า Reynold Number ที่ต่ำ และรูปทรงที่ซับซ้อน ซึ่ง 2 สมการที่เพิ่มเข้ามาเพื่ออธิบายพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วน คือ สมการพลังงานจลน์ของการปั่นป่วน

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \tau_y \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \beta' f_{\beta'} k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

สมการ Dissipation Rate ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_y \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \beta' f_{\beta'} k \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

โดยมีค่า Eddy Viscosity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_T = \alpha \rho \frac{k}{\omega}$$

และ Reynolds Stresses

$$\tau_{ij} = 2\mu \bar{s}_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

3. Other Models

- Transition $k-kl-\omega$ (3eq)
- Transition SST (4eq)
- Reynolds Stress (5eq)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ

งานวิจัยเล่มนี้ เป็นการศึกษาแบบจำลองอากาศพลศาสตร์ของ รถจักรยาน และรถบรรทุก โดยการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาในที่นี้คือ คอมพิวเตอร์และโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยสำหรับการคำนวณหาผลคำตอบของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ การศึกษาภายในงานวิจัยเล่มนี้มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบชุดการศึกษาเพื่อหาระยะปลอดภัยของจักรยาน

3.1.1 การกำหนดเป้าหมาย

กำหนดเป้าหมายของการออกแบบชุดอากาศพลศาสตร์ของรถบรรทุกและจักรยาน เพื่อหาระยะห่างของจักรยาน โดยที่สัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างที่เกิดขึ้นบนจักรยานไม่ส่งผลกระทบต่อรถจักรยาน

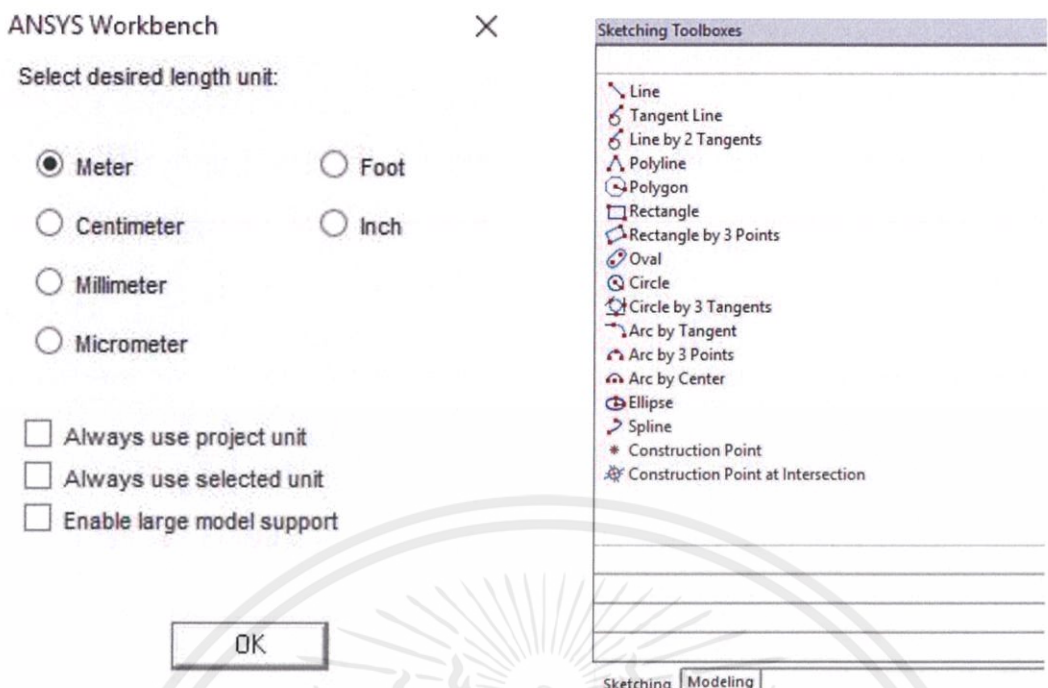
3.1.2 ศึกษาหาสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างที่ทำให้จักรยานไม่ได้รับผลกระทบ

จากการศึกษาจากหนังสือ Defining Measuring and Improving Aerodynamic Testing in the Bicycle Industry ของ Easton Cycling [8] ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อหาความเร็วลมที่ส่งผลให้จักรยานล้ม พบว่าลมที่มีความเร็ว 30 ไมล์/ชั่วโมง และมุมมองเข้าปะทะกับตัวจักรยาน 90° จากนั้นนำมาทำการหาผลจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงต้าน พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างที่ทำให้รถจักรยานล้มได้มีค่าคือ 0.298

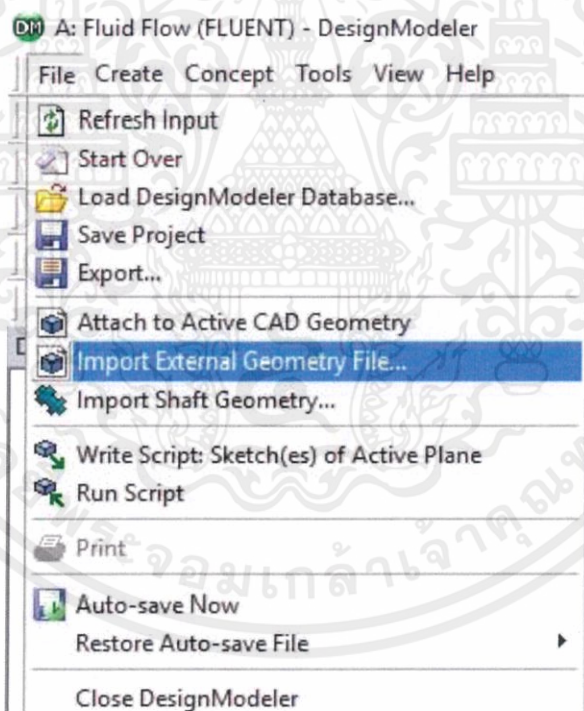
3.2 ทดสอบแบบจำลองโดยวิธีจำลองเชิงตัวเลข

3.2.1 การสร้างรูปทรงที่ใช้ศึกษา (Geometry)

การเขียนรูปทรงขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาผลคำตอบทางคณิตศาสตร์ ภายโปรแกรมสามารถสร้างโดยเครื่องมือของโปรแกรมซึ่งสามารถกำหนดเลือกหน่วยได้ โดยการใช้คำสั่ง Draw วิธีการทำสามารถดูได้จากรูปที่ 3.1 หรือสามารถนำไฟล์รูปทรงมาจากโปรแกรม SOLIDWORK ได้ด้วยเหมือนกันซึ่งชนิดของข้อมูลแบบจำลองต้องเป็น .IGS เพื่อที่สามารถนำมาใช้งานได้ในโปรแกรม ANSYS ซึ่งวิธีการสามารถดูได้ตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องมือวาดรูปทรงในโปรแกรม ANSYS



รูปที่ 3.2 วิธีการนำรูปทรงจากโปรแกรมอื่นเข้าในโปรแกรม ANSYS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นงานย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าตอบ

ในการศึกษานี้ได้ใช้การแบ่งชิ้นงานออกเป็นชิ้นงานย่อยได้หลายรูปแบบแต่ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้รูปทรงสามเหลี่ยมทรงสี่หน้า (Tetrahedron) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสามารถทำการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในขั้นตอนนี้มีการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม (Mesh Independence) เพื่อช่วยลดเวลาในการหาค่าตอบและใช้พื้นที่ของหน่วยความจำในคอมพิวเตอร์น้อยกว่า

Details of "All Triangles Method" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Triangles
Element Midside Nodes	Use Global Setting

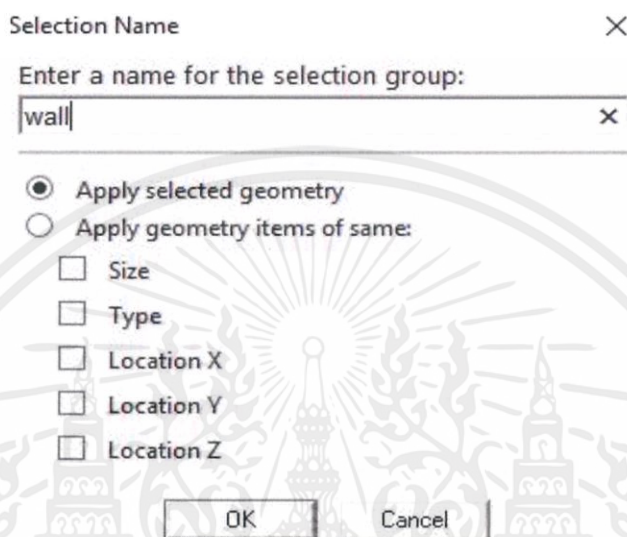
รูปที่ 3.3 แสดงการเลือกลักษณะของเอลิเมนต์

Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input checked="" type="checkbox"/> Element Size	0.001
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default

รูปที่ 3.4 แสดงการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์

3.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ของแบบจำลอง

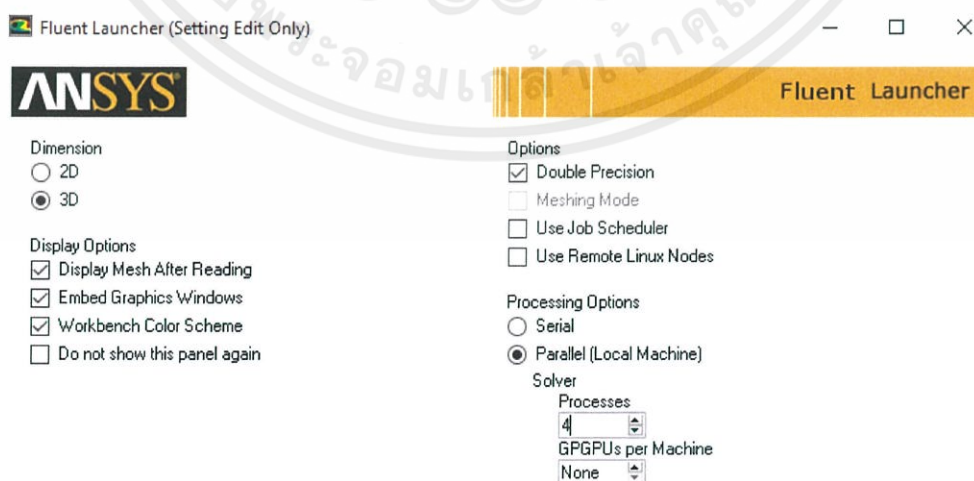
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) เป็นการกำหนดเงื่อนไขของการสร้างแบบจำลองเฉพาะในแต่ละด้านหรือแต่ละพื้นที่ที่ประกอบด้วย การกำหนดตั้งชื่อของทิศทางความเร็วของของไหลที่เข้า การกำหนดความดันของของไหลที่ออก และการกำหนดพื้นผิวล้อมรอบให้เป็น Wall ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การตั้งชื่อของขอบเขตของตัวรูปทรง

3.2.4 การตั้งค่าสำหรับการคำนวณหาคำตอบ

ในส่วนของการเลือกวิธีการคำนวณเพื่อกำหนดการคิดของโปรแกรมในการหาผลคำตอบซึ่งมีการกำหนดเลือกให้ใช้คิดแบบ Double Precision และ คิดแบบ Parallel 4 Processes ดังแสดงในรูปที่ 3.6



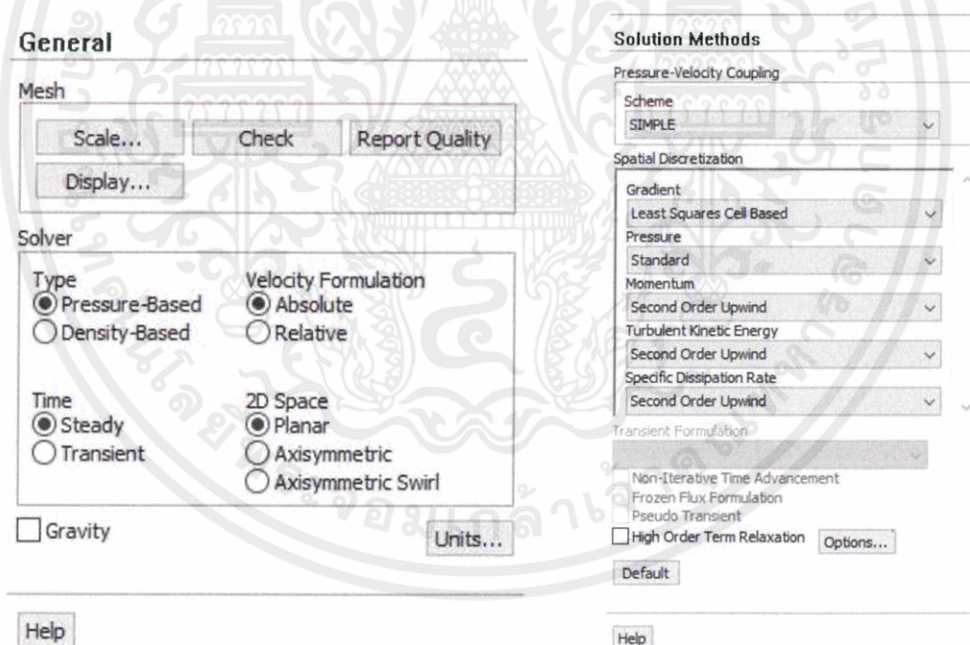
รูปที่ 3.6 การตั้งค่าการคำนวณหาคำตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

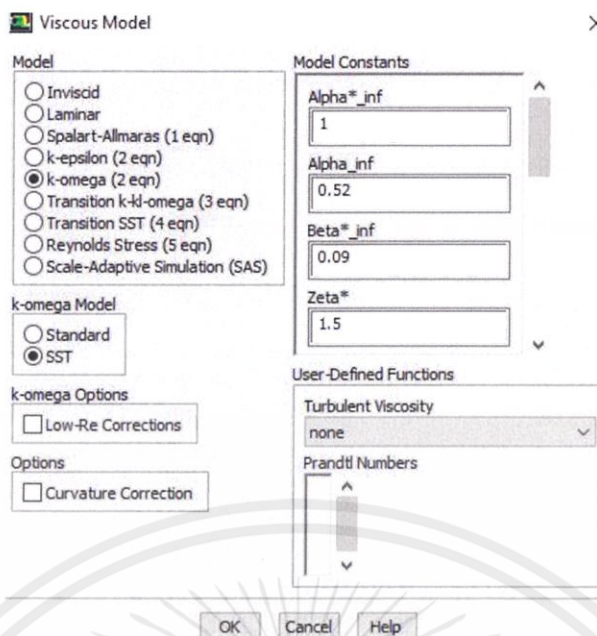
3.2.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร (Variable Condition) และสภาวะการแก้ปัญหา

โปรแกรมแอนซิสฟลูเอนส์ (Ansys Fluent) เป็นการนำแบบจำลองที่มีการสร้างขอบเขตย่อยและเงื่อนไขเริ่มต้นมาจำลอง ซึ่งมีการสร้างแบบจำลองที่แตกต่างกันออกไป การพิจารณาการสร้างแบบจำลองเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในสภาวะคงตัว (Steady State) มีผนังที่ไม่เคลื่อนที่และไม่เลื่อนไหลจึงใช้รูปแบบการคำนวณแบบ Non-Slip Condition ซึ่งรูปแบบการไหลปั่นป่วนใช้หลักการคำนวณในรูปแบบของ $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ SST ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีพฤติกรรมคล้ายกับ standard $k-\omega$ ที่เหมาะสมกับขอบเขตการไหลที่ซับซ้อน อย่างเช่นการไหลภายนอกของอากาศยาน โดย $k-\omega$ SST ให้การทำนายผลของการไหลที่ดีกว่ารูปแบบจำลองอื่น

สำหรับการคำนวณผลเฉลย ในการจำลองนี้ใช้หลักการเดาค่าความดัน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร็วและปริมาณสเกลาร์อื่นๆ จากสมการนาเวียร์-สโตกส์ และตรวจสอบโดยสมการอนุรักษ์มวล หากค่าทั้งหมดมีความสอดคล้องกับสมการควบคุม แสดงว่าค่าความดันที่เดามีค่าที่ถูกต้อง หากไม่สอดคล้องต้องทำการเดาค่าความดันใหม่บนฐานของค่าความดันเก่า และความเร็วที่คำนวณได้ ซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า วิธีการคำนวณหาผลเฉลยแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Link Equation) ขั้นตอนการตั้งค่าได้แสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 การกำหนดตัวเลือกในการหาคำตอบ



รูปที่ 3.8 การกำหนดแบบจำลองการไหลเพื่อใช้ในการหาคำตอบ

3.3 กรณีศึกษา

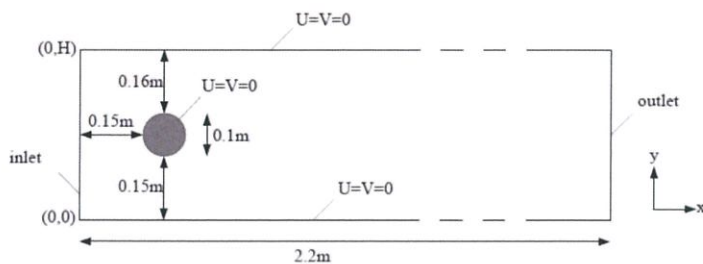
ในการศึกษานี้ได้ใช้กรณีศึกษาทั้งหมด 3 กรณีหลัก ซึ่งประกอบไปด้วยรูปทรงแบบง่าย (ทรงกระบอกและทรงกลม) รูปทรงที่ซับซ้อน (Ahmed Body) และรูปทรงจริง (รถจักรยานกับนักปั่นและรถบรรทุก) เพื่อศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้าง

3.3.1 รูปทรงอย่างง่ายแบ่งแยกย่อยออกเป็น 2 รูปทรงคือ ทรงกระบอก และทรงกลม

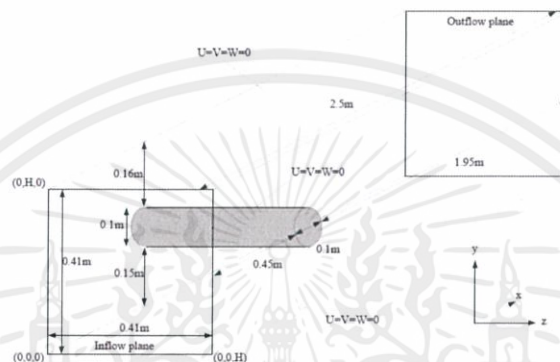
ทรงกระบอกที่ใช้สำหรับการศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.01 เมตร และมีความยาวเท่ากับ 0.1 เมตร ดังที่แสดงในรูป 3.9 และ 3.10 ในการศึกษาทำการหาความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อที่ค่า Reynolds Number ต่างกัน จากนั้นทำการทดสอบเทียบกับค่าผลเฉลยทางสมการ

ทรงกระบอกที่ใช้สำหรับการศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.01 เมตร และมีความยาวเท่ากับ 0.1 เมตร ทั้งรูปทรง 2 และ 3 มิติ ในการศึกษาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน และทำการทดสอบเทียบค่าเพื่อรับรองผลกับงานวิจัยของ M. Schäfer [10] Meng Wang [11] และ W. Bai [13]

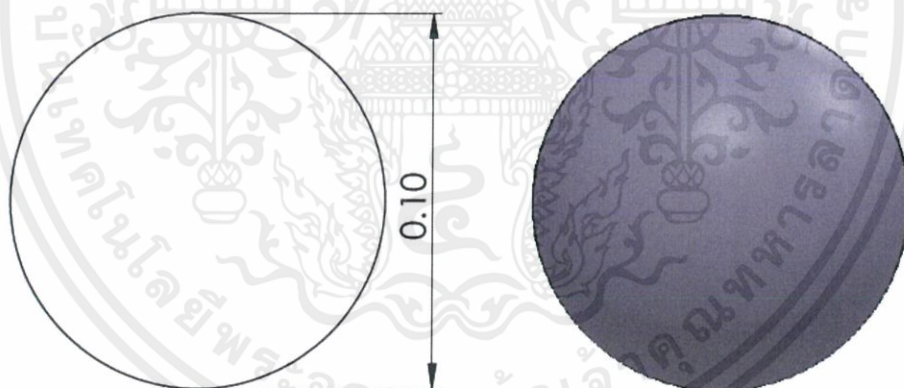
ทรงกลมที่ใช้สำหรับการศึกษามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.1 เมตร ดังที่แสดงในรูป 3.11 ในการศึกษาเราได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงที่ค่า Reynolds Number ที่ต่างกัน จากนั้นทำการทดสอบเทียบค่าเพื่อรับรองผลกับงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5]



รูปที่ 3.9 ขนาดของทรงกระบอกที่ใช้ในการคำนวณหาผลคำตอบแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.10 ขนาดของทรงกระบอกที่ใช้ในการคำนวณหาผลคำตอบแบบ 3 มิติ

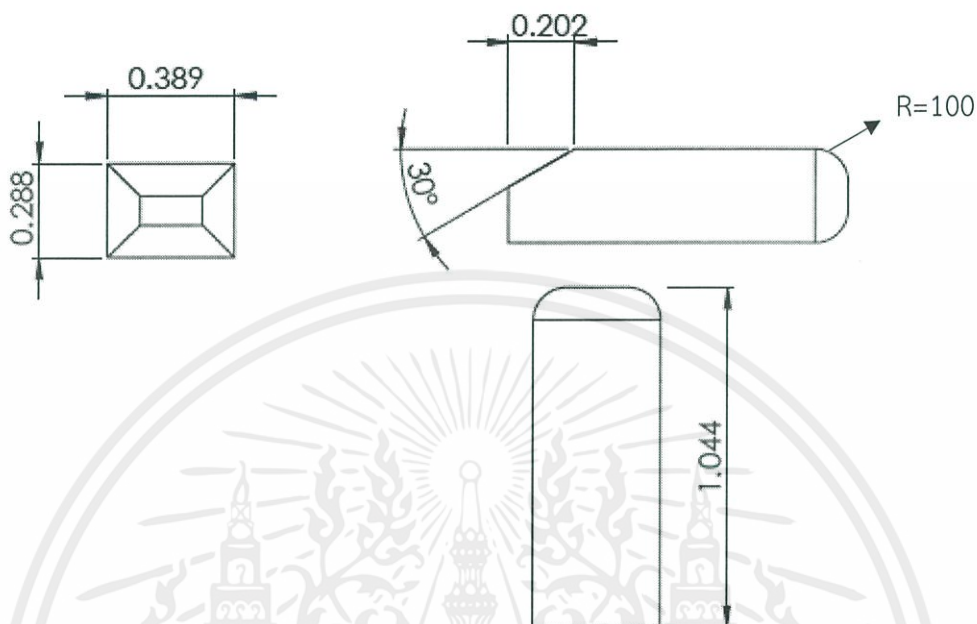


รูปที่ 3.11ขนาดของรูปทรงกลมทั้ง 2 และ 3 มิติ

3.3.2 รูปทรงที่ซับซ้อน (Ahmed Body)

รูปทรงมีลักษณะดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเป็นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านหน้าของรูปทรง โดยการทำการเปลี่ยนค่ามุมด้านหลังของตัวรูปทรงจำลองในโปรแกรมเพื่อ ดูค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศจากมุมด้านหลังที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาในขั้นตอนนี้ได้มีการทำการตรวจเทียบค่าจากงานวิจัย Analyzing the Profile Modification of Truck-Trailer to Prune the

Aerodynamic Drag and Its Repercussion on Fuel Consumption ของ Chaitanya Chilbule
[7]

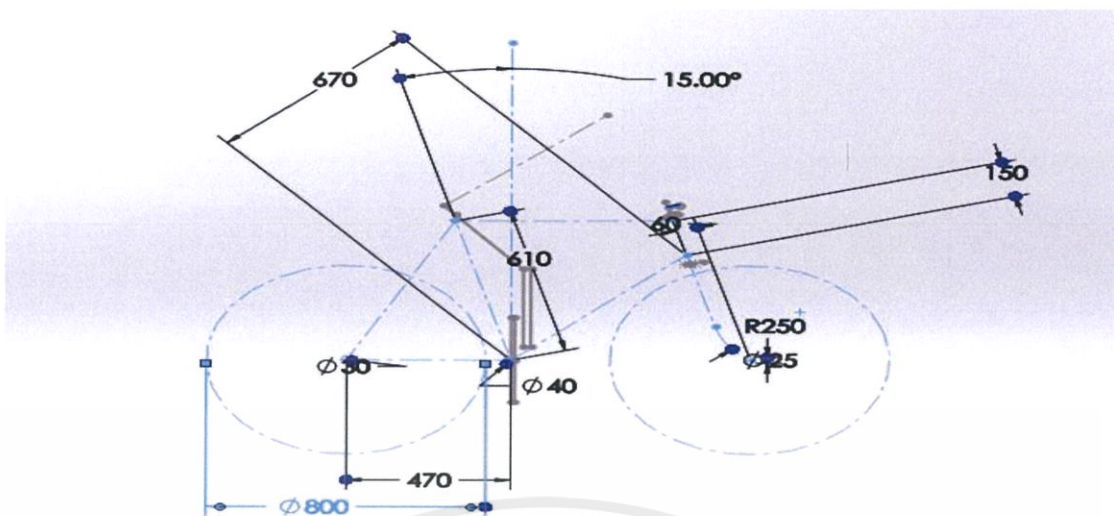


รูปที่ 3.12 ขนาดของรูปทรง Ahmed Body

จากการศึกษาจากรูปทรงในขั้นตอนก่อนหน้านี้แล้วทำให้เราสามารถทำการยืนยันการตั้งค่าต่างๆภายในโปรแกรม และได้มีการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อที่ช่วยลดเวลาในการคำนวณหาผลคำตอบ ซึ่งเราสามารถนำมาปรับใช้ในรูปทรงจริงนี้เพื่อหาคำตอบของการศึกษา โดยในขั้นตอนต่อไปนี้เรามีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของจักรยานและตัวนักปั่นเพื่อหาระยะปลอดภัยของนักปั่น

3.3.3 รูปทรงจริง (รถจักรยานกับนักปั่น และรถบรรทุก)

โดยในการศึกษานี้เราได้ทำการสร้างรูปทรงจักรยานที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน มีขนาดกำหนดดังแสดงในรูปที่ 3.13 และรูปทรงสำเร็จแสดงไว้ในรูปที่ 3.14 และ 3.15

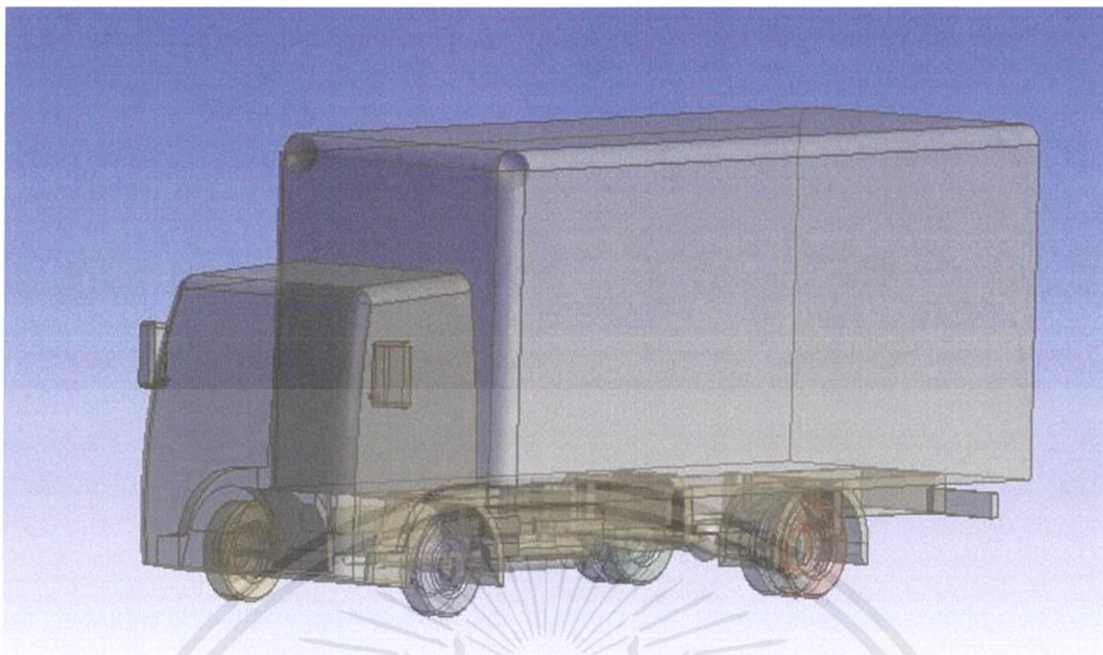


รูปที่ 3.13 ขนาดของรถจักรยานที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.14 รูปทรง 3 มิติของรถจักรยานที่ใช้ในการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 รูปทรง 3 มิติของรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการศึกษาของแบบจำลองตั้งต้น

4.1 การ Validation ผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์เทียบกับผลการทดลองที่ได้มีการทำ Mesh Independence โดยเลือกแบบจำลองปั่นป่วน (Turbulence Models) ในการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการจำลองหาผลคำตอบทางคอมพิวเตอร์ค่าที่ถูกเอามาตรวจเทียบค่าและแนวโน้ม เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ค่า Reynolds Number ต่างๆ จากผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้านี้

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Model) ที่เลือกใช้ในการหาผลคำตอบการจำลองทางคอมพิวเตอร์มี 2 แบบ ได้แก่ $k-\epsilon$ และ $k-\omega$ SST ซึ่งเป็นโมเดลที่งานวิจัยด้านการไหลภายนอกเลือกใช้ ซึ่งใช้ในการหาคำตอบรูปทรงอย่างง่ายและในรูปทรงที่ซับซ้อนขึ้น แต่ในรูปทรงจริงนั้นได้เลือกใช้งานแบบจำลอง $k-\omega$ SST เป็นรูปแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

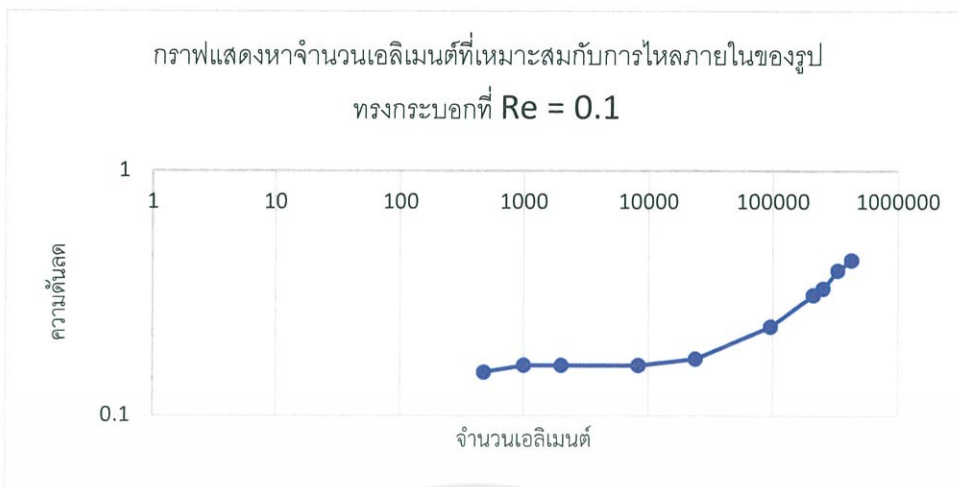
เพื่อเป็นการประหยัดทรัพยากรคอมพิวเตอร์ จึงต้องมีการทำ Mesh Independence เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่น้อยที่สุดที่ทำให้คำตอบของปัญหาไม่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนเอลิเมนต์

4.1 การไหลภายในของรูปทรงกระบอก

ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์ของความดันลดจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับผลเฉลยที่ได้จากสมการ โดยแยกการศึกษาออกเป็น 2 และ 3 มิติ โดยทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้งลักษณะการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน

4.1.1 การไหลแบบราบเรียบของรูปทรงกระบอก

การทำ Mesh Independence ของรูปทรงนี้พบว่า จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมคือ 476-24000 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายในของรูปทรงกระบอกที่ $Re = 0.1$

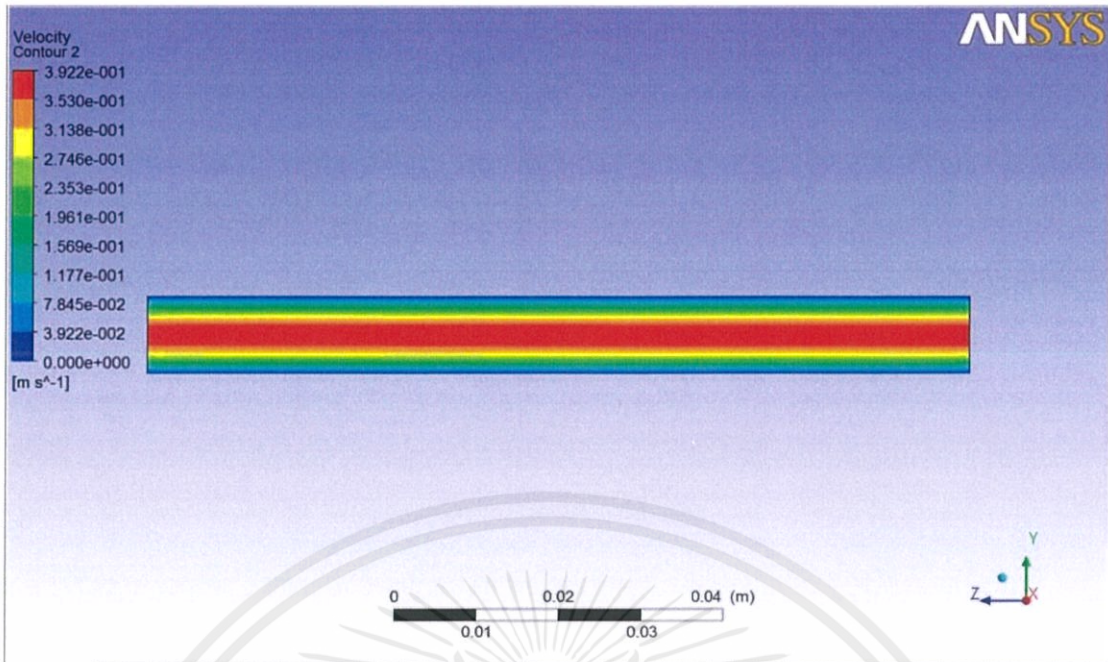
การไหลภายในแบบราบเรียบของรูปทรงกระบอก ทั้งจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยศึกษาที่ Reynolds Number ที่ต่างกัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.01 เมตร และความยาวของท่อ 0.1 เมตร ผลลัพธ์ของการคำนวณและผลเฉลยจากการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงผลลัพธ์ของความดันลดแบบการไหลภายในทรงกระบอกเป็นการไหลแบบราบเรียบของรูปทรง 2 และ 3 มิติ ที่ค่า Re ต่างกัน

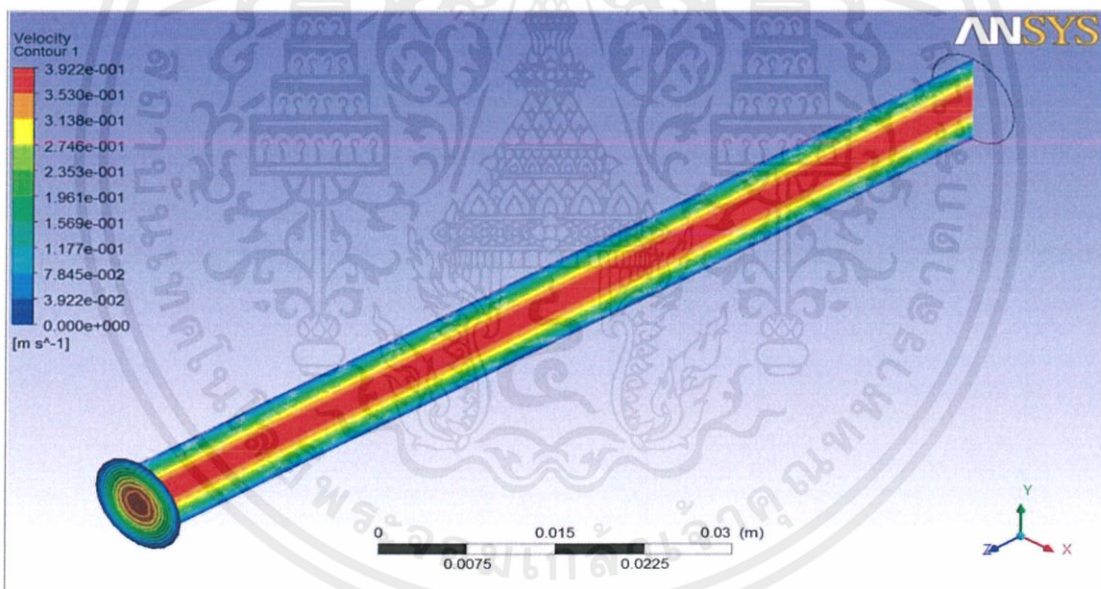
Re	ความดันลด (Pressure drop)		
	ผลเฉลยจากสมการ	จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (2 มิติ)	จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3 มิติ)
0.1	0.32	0.16	0.33
0.3	0.96	0.48	0.99
0.5	1.6	0.8	1.65
0.8	2.56	1.29	2.64
1	3.2	1.61	3.3

จากการศึกษาพบว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าตอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการไหลภายในท่อแบบราบเรียบนั้น มีค่าที่ไม่เท่ากับผลลัพธ์จากสมการ แต่ผลลัพธ์ของการจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ มีแนวโน้มของผลลัพธ์ไปในรูปแบบเดียวกันและผลลัพธ์ในการจำลองแบบ 3 มิติมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์จากสมการมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



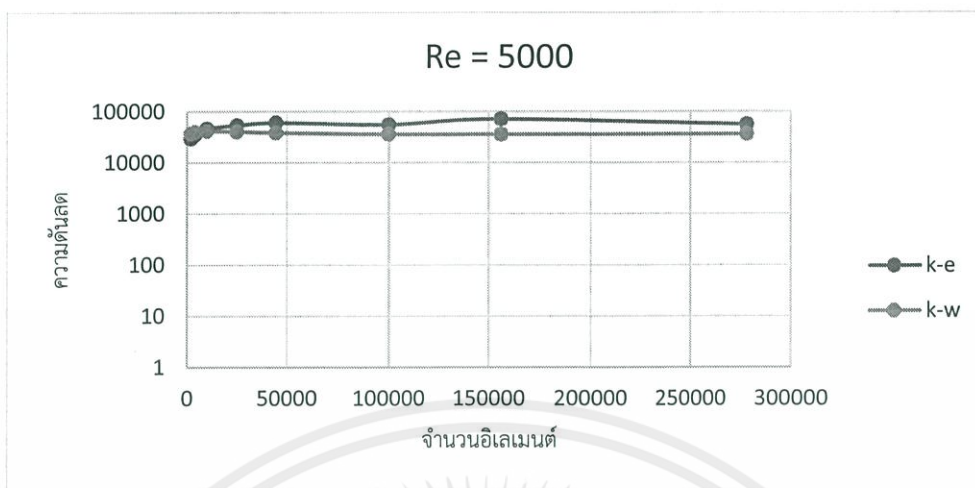
รูปที่ 4.2 แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบราบเรียบรูปทรง 2 มิติ



รูปที่ 4.3 แสดงความเร็วการไหลภายในท่อของการไหลแบบราบเรียบรูปทรง 3 มิติ

จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 เป็นการไหลราบเรียบแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงความเร็วของการไหลภายในท่อ โดยพบว่า การไหลที่ผิวท่อมีความเร็วเท่ากับศูนย์ และที่จุดกึ่งกลางท่อคือจุดที่มีความเร็วสูงสุด การไหลในรูปแบบนี้เป็น การไหลแบบคงรูป (Uniform Flow)

4.1.2 การไหลแบบปั่นป่วนของรูปทรงกระบอก



รูปที่ 4.4 แสดงการหาจำนวนอิเลเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายในท่อแบบปั่นป่วนที่ $Re = 5000$

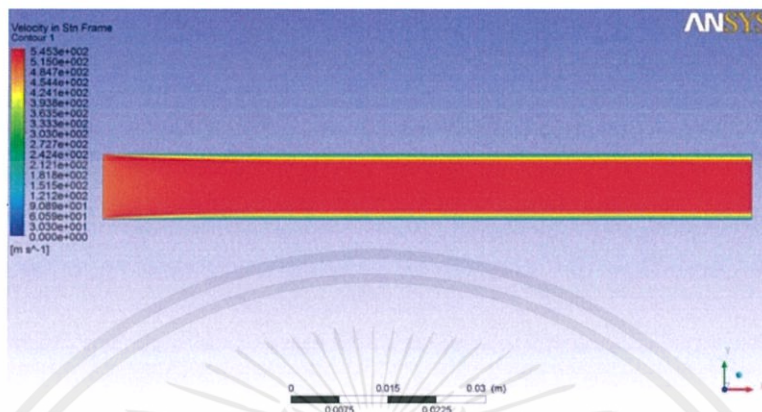
จากการจำลองโดยเพิ่มจำนวนอิเลเมนต์แล้วเปรียบเทียบค่าความดันลด พบว่าค่าความดันลดมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มจำนวนอิเลเมนต์มากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามกราฟจากรูป 4.4

การไหลภายในแบบปั่นป่วนของรูปทรงกระบอกทั้งจำลองแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยศึกษาที่ Reynolds Number ที่ต่างกัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.01 เมตร และความยาวของท่อ 0.1 เมตร ผลลัพธ์ของการคำนวณและผลเฉลยจากการคำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงผลลัพธ์ของความดันลดแบบการไหลภายในทรงกระบอกเป็นการไหลแบบปั่นป่วนของรูปทรง 2 และ 3 มิติ ที่ค่า Re ต่างกัน

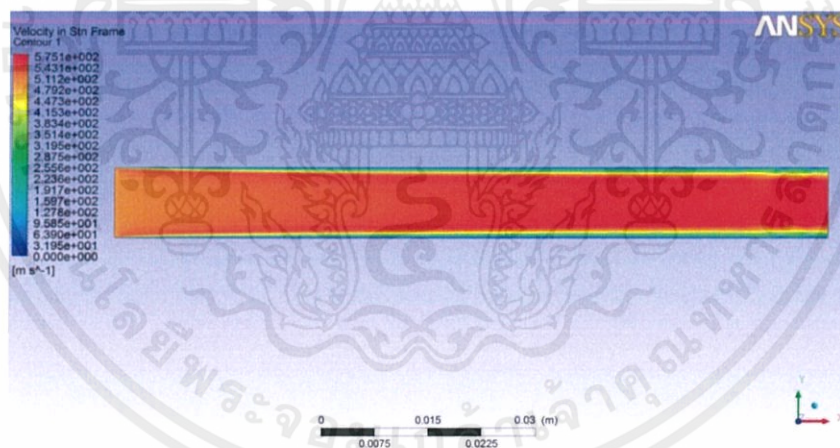
Re	ความดันลด (Pressure drop)				
	ผลเฉลยจากสมการ	จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (2 มิติ)		จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3 มิติ)	
		$k - \varepsilon$	$k - \omega SST$	$k - \varepsilon$	$k - \omega SST$
5000	0.96×10^5	0.56×10^5	0.36×10^5	0.99×10^5	0.85×10^5
8000	2.39×10^5	1.16×10^5	0.74×10^5	1.82×10^5	1.78×10^5
10000	3.71×10^5	1.64×10^5	1.09×10^5	2.41×10^5	2.51×10^5

จากตารางที่ 4-2 เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการไหลภายในท่อที่มีการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนในแบบจำลองการไหลแบบ $k-\varepsilon$ และ $k-\omega SST$ โดยพบว่าผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีค่าต่างกัน แต่หากพิจารณาถึงแนวโน้มของผลลัพธ์ พบว่ามีแนวโน้มผลลัพธ์ไปรูปแบบเดียวกัน จาก



การศึกษานี้พบว่า การไหลในลักษณะนี้ แบบจำลอง $k-\varepsilon$ ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกว่า $k-\omega SST$

รูปที่ 4.5 แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติ ($k-\omega SST$)



รูปที่ 4.6 แสดงความเร็วของการไหลภายในท่อของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติ ($k-\varepsilon$)

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติโดยใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega SST$ ตามลำดับ แสดงถึงความเร็วของการไหลภายในท่อที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงจากความเร็วทุกจุดเท่ากันกลายเป็นการไหลที่ไม่คงรูปที่บริเวณส่วนท้ายของท่อ จากการศึกษานี้พบว่าแบบจำลอง $k-\omega SST$ แสดงให้เห็นถึงความปั่นป่วนของของไหลได้ชัดเจนกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$

4.2 การไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกและทรงกลม

4.2.1 การไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกโดยการไหลแบบราบเรียบ



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกของการไหลแบบราบเรียบ $Re = 20$

จากการจำลองโดยการเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์ และเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้น ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามกราฟจากรูป 4.7

4.2.2 การไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกโดยการไหลแบบปั่นป่วน

ผลแสดงการสอบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรูปทรงกลมแบบ 3 มิติโดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST



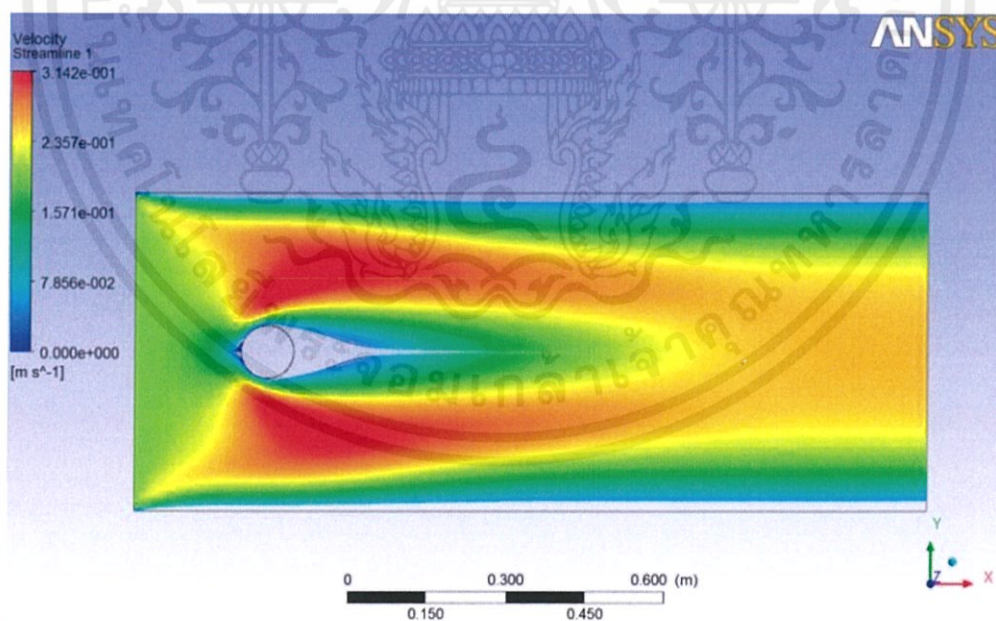
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกของการไหลแบบปั่นป่วน

จากรูป 4.8 แสดงถึงผลลัพธ์จากการจำลองโดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านกับจำนวนเอลิเมนต์ พบว่า แบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST มีผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก

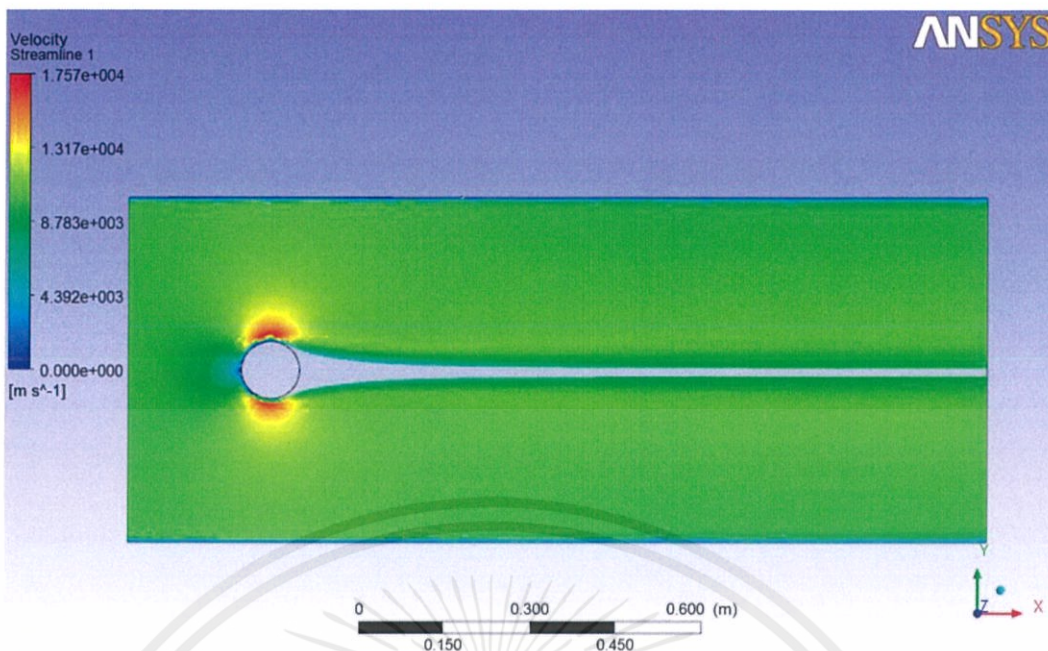
ตารางที่ 4-3 ผลคำตอบการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกแบบ 2 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ตรวจเทียบกับงานวิจัยของ M. Schafer [10]

Re	Cd (งานวิจัยของ M. Schafer)	Cd (Laminar)	Cd ($k-\varepsilon$)	Cd ($k-\omega$ SST)
20	5.5	4.11	-	-
1000000	0.31	-	0.08	0.09

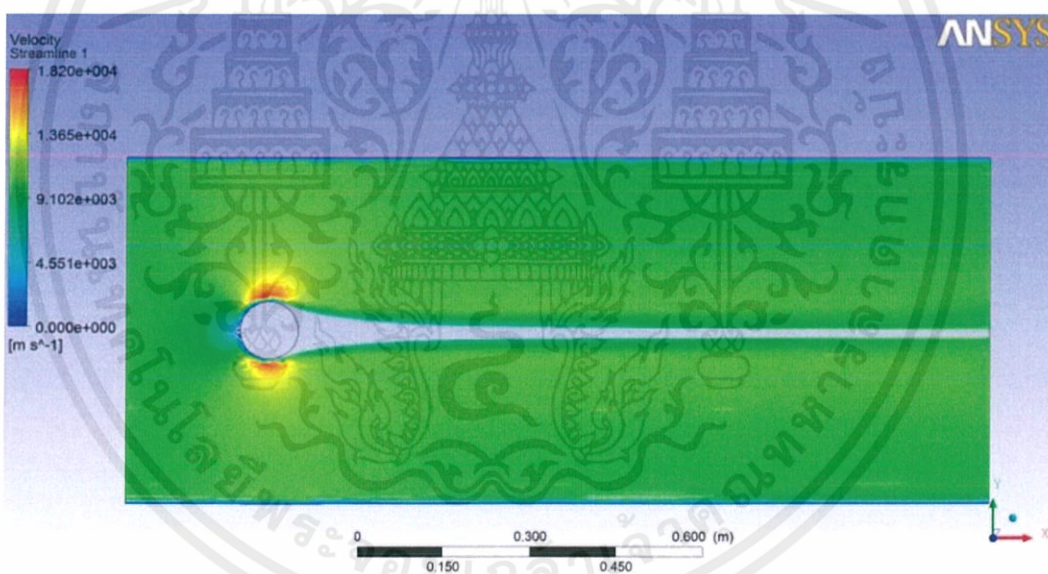
จากตารางที่ 4-3 เป็นการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกแบบ 2 มิติ สำหรับการไหลแบบราบเรียบ โดยการใช้แบบจำลองแบบ Laminar ในโปรแกรม พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งใช้การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสองแบบคือ $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST ทั้งสองแบบจำลองนี้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ไม่ได้เท่ากับงานวิจัยของ M. Schafer [10]



รูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบราบเรียบที่ $Re = 20$



รูปที่ 4.10 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re = 1000000$ โดยโมเดล ($k - \varepsilon$ Model)



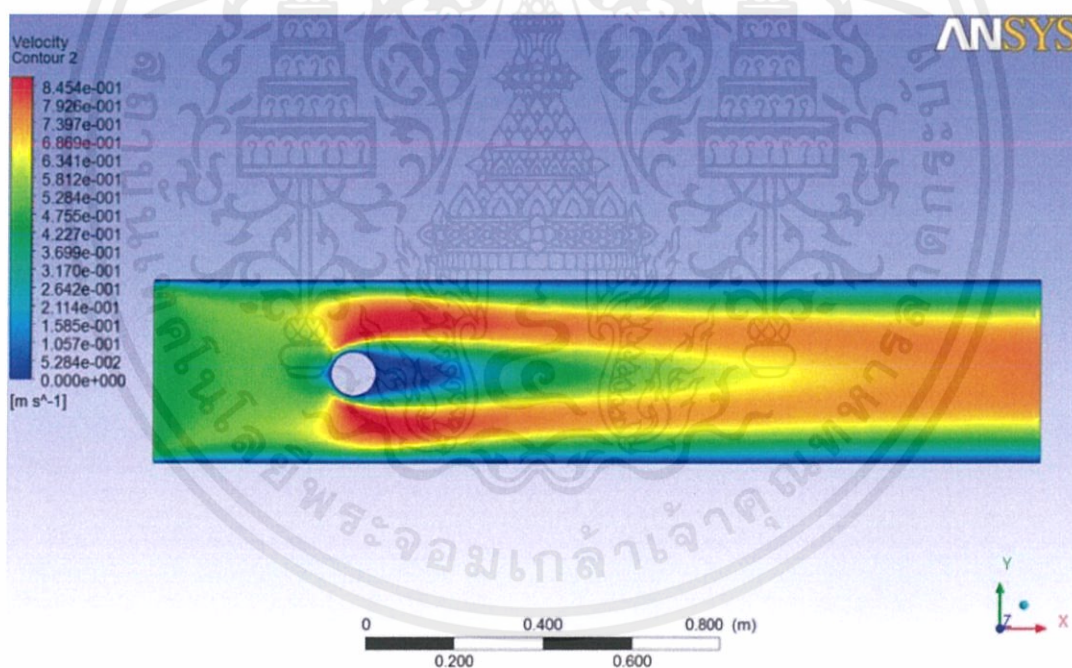
รูปที่ 4.11 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 2 มิติ การไหลแบบปั่นป่วนที่ $Re = 1000000$ โดยโมเดล ($k - \omega$ SST Model)

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนแบบ 2 มิติของการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกโดยใช้แบบจำลอง $k - \omega$ SST และ $k - \varepsilon$ ตามลำดับซึ่งแสดงถึงความเร็วของการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอก โดยด้านหน้าของทรงกระบอกมีความเร็วเท่ากับศูนย์และด้านข้างเป็นจุดที่มีความเร็วสูงสุด

ตารางที่ 4-4 ผลค่าตอบการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกแบบ 3 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ตรวจเทียบกับงานวิจัยของ M. Schafer [10]

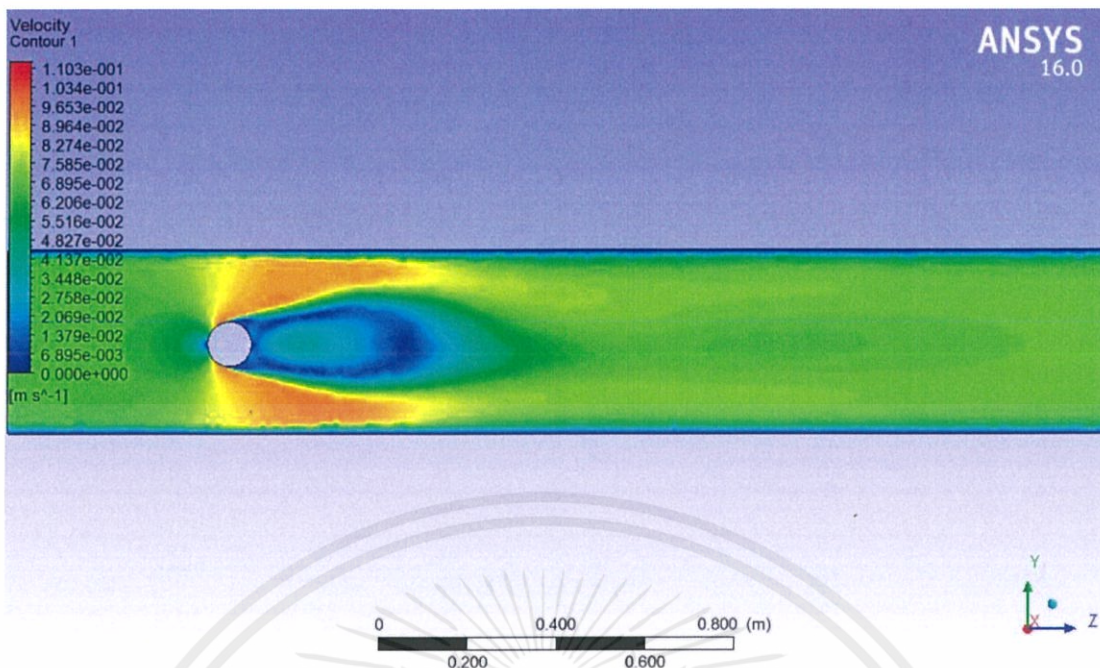
Re	Cd (งานวิจัยของ M. Schafer)	Cd (ค่าจากการ ทดลอง)	Cd (Laminar)	Cd ($k-\varepsilon$)	Cd ($k-\omega SST$)
20	6.0-8.0	-	3.52	-	-
1000000	0.6208	0.93 ± 0.005	-	1.0364	1.2886

จากตารางที่ 4-4 เป็นการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกแบบ 3 มิติ สำหรับการไหลแบบราบเรียบ โดยการใช้แบบจำลองแบบ Laminar พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน และการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งใช้การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega SST$ พบว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$ ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ M. Schafer [10] มากกว่าแบบจำลอง $k-\omega SST$

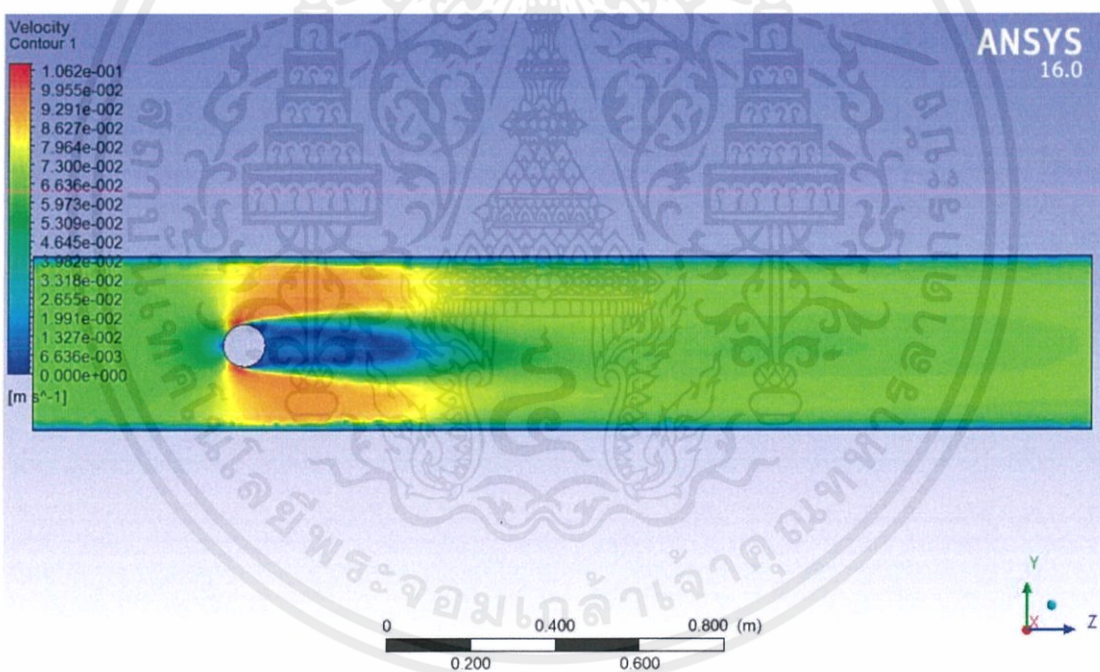


รูปที่ 4.12 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 20$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 1000000$ ($k - \varepsilon$)



รูปที่ 4.14 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกระบอก 3 มิติ $Re = 1000000$

($k - \omega$ SST)

จากรูปที่ 4.12 เป็นการไหลแบบราบเรียบของรูปทรง 3 มิติ ซึ่งเป็นการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกในแบบจำลอง Laminar โดยแสดงถึงความเร็วของการไหลภายนอก จากการศึกษาพบว่าด้านหน้าของทรงกระบอกมีความเร็วเท่ากับศูนย์ และ ด้านข้างเป็นจุดที่มีความเร็วสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

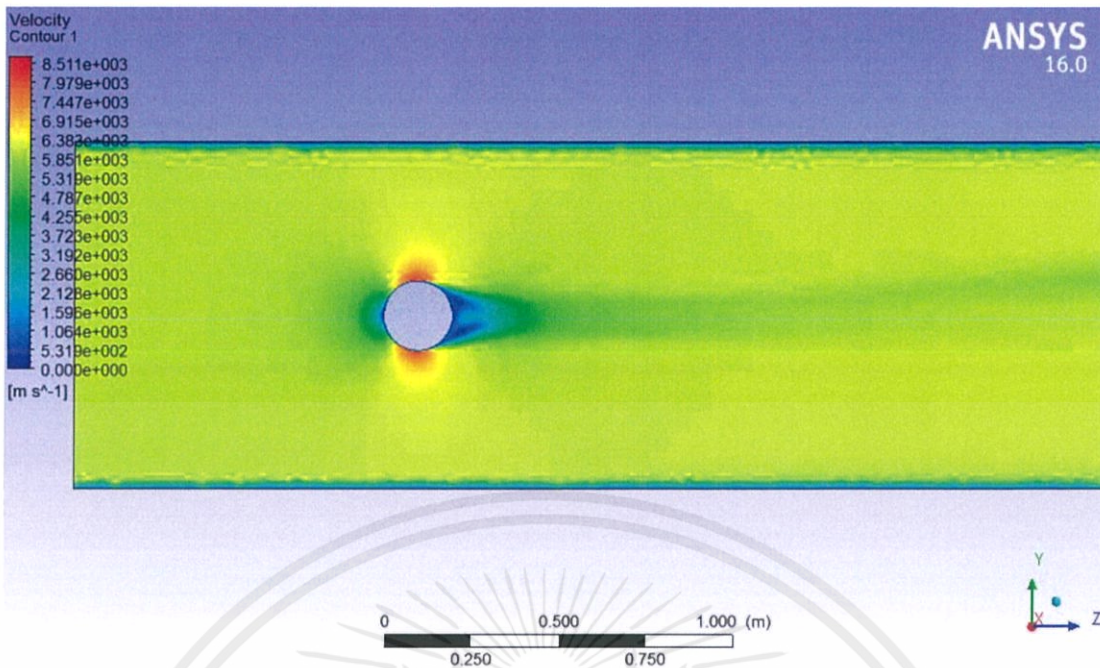
จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนของรูปทรง 3 มิติ ซึ่งเป็นการไหลภายนอกของรูปทรงกระบอกโดยใช้แบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST ตามลำดับ โดยแสดงถึงความเร็วของการไหลภายนอก จากการศึกษาพบว่าด้านหน้าของทรงกระบอกมีความเร็วเท่ากับศูนย์และด้านข้างเป็นจุดที่มีความเร็วสูงสุด

สำหรับรูปทรงกลมแบบ 3 มิติ การจำลองใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนคือ $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST จากนั้นทำการแสดงการสอบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรูปทรงกลม

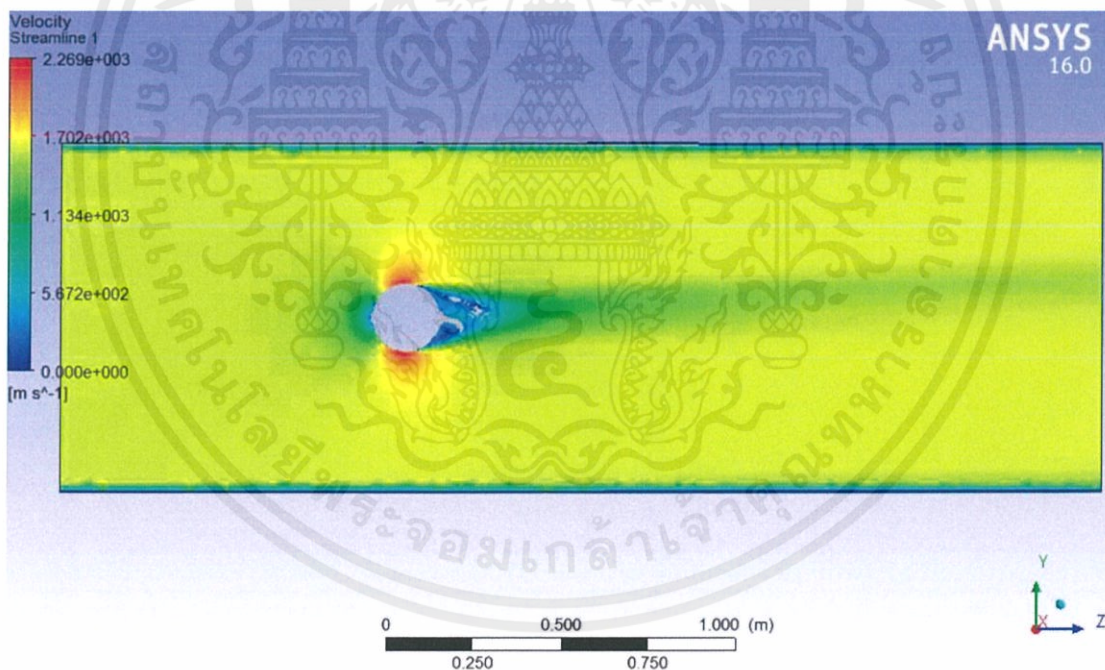
ตารางที่ 4-5 ผลคำตอบการไหลภายนอกของรูปทรงกลมแบบ 3 มิติ จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ตรวจเทียบกับงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5] ที่เคยศึกษา

Re	C_D (จากงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5])	C_D	
		$k-\varepsilon$	$k-\omega$ SST
160000	0.12	0.16	0.17
600000	0.12	0.17	0.15
1000000	0.13	0.08	0.15

จากตารางที่ 4-5 แสดงถึงผลลัพธ์จากการจำลองการไหลภายนอกของทรงกลมโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างแบบจำลอง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ SST กับงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5] เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละ Re พบว่าผลลัพธ์จากแบบจำลอง $k-\omega$ SST มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Bruce D. Kothmann [5] มากกว่าแบบจำลอง $k-\varepsilon$

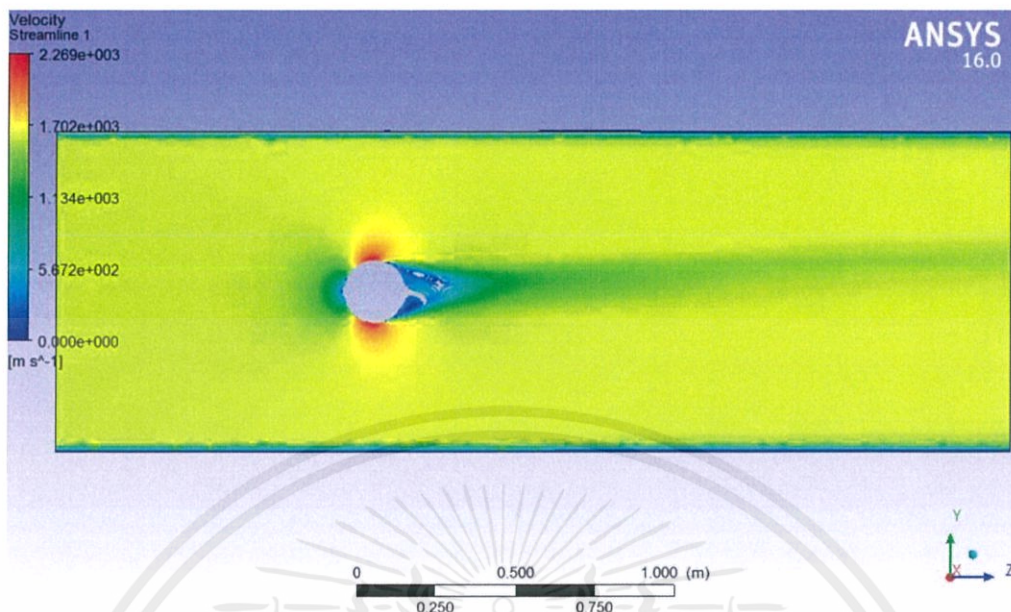


รูปที่ 4.15 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 16000$



รูปที่ 4.16 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 600000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงความเร็วของการไหลของอากาศรอบทรงกลม 3 มิติ $Re = 1000000$

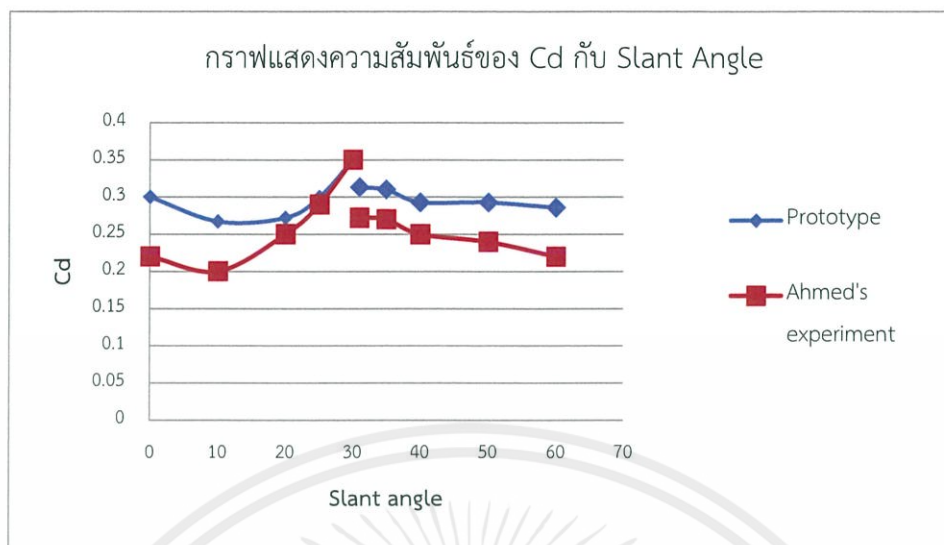
4.3 การไหลภายนอกของรูปทรง Ahmed body

หลังจากที่ได้ศึกษาผลลัพธ์ของรูปทรงอย่างง่ายไปแล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นการจำลองรูปทรงที่ซับซ้อนขึ้นมา โดยรูปทรงนี้เรียกว่า Ahmed Body ซึ่งในการศึกษานี้ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงนี้โดยการปรับเปลี่ยนมุมด้านหลัง (Slant Angle) ของรูปทรง โดยมีการตั้งค่าให้ความเร็วทางเข้าเท่ากับ 40 เมตร/วินาที

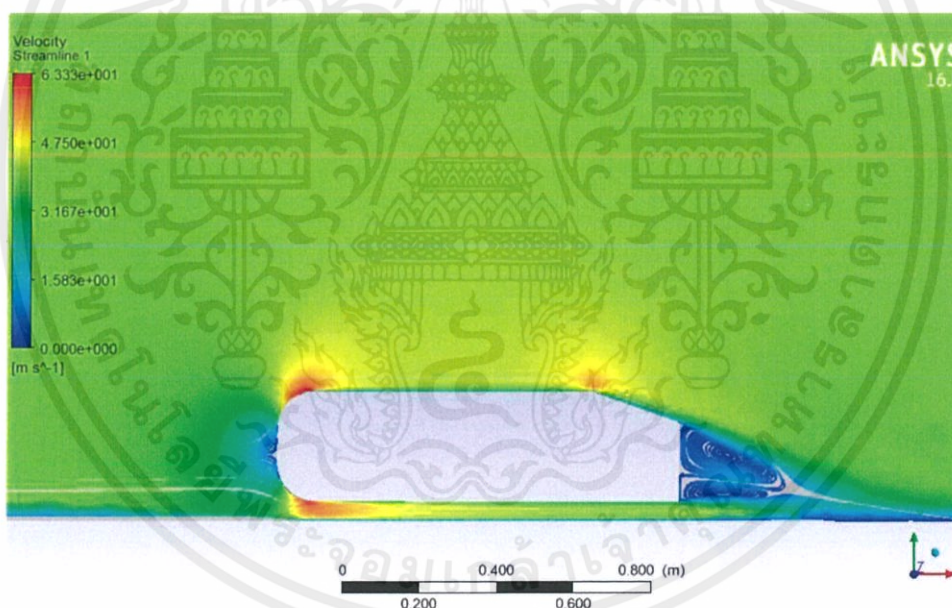
ตารางที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรง Ahmed Body

Slant Angle	C_D (งานวิจัยของ Chaitanya)	C_D
0	0.22	0.3
10	0.2	0.27
20	0.25	0.27
25	0.29	0.3
30	0.35	0.35
35	0.27	0.31
40	0.25	0.29
50	0.25	0.29
60	0.22	0.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของผลการจำลองจากงานวิจัยของ Chaitanya [7] กับผลการจำลองคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.19 แสดงผลลัพธ์ของพื้นที่รูปร่างความเร็วรูปทรง Ahmed Body

จากการจำลอง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4-6 และ รูปที่ 4.18 - 4.19 เป็นการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในแต่ละมุม Slant จากแบบจำลอง $k-\omega$ SST กับผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Chaitanya [7] พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเมื่อมุม Slant มีค่ามากกว่า 30 องศา

บทที่ 5

ผลการศึกษา

5.1 ผลการศึกษาของรูปทรงจักรยานกับรถบรรทุก

ผลการทดลองของรูปทรงที่ใช้เพื่อศึกษาหาระยะที่เหมาะสมของจักรยานโดยดูผลของสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรถจักรยานขณะที่มีนักปั่นอยู่บนรถจักรยาน มีตำแหน่งทั้งหมด 33 ตำแหน่ง โดยเป็นตำแหน่ง ส่วนหน้าของรถบรรทุกจำนวน 11 ตำแหน่ง ส่วนกลางของรถบรรทุกจำนวน 11 ตำแหน่ง และส่วนหลังของรถบรรทุกจำนวน 11 ตำแหน่ง โดยเริ่มต้นที่ระยะ 10 เซนติเมตร และเพิ่มขึ้นทีละ 10 เซนติเมตร จนไปถึงระยะ 100 เซนติเมตร จากนั้นเพิ่มระยะเป็นระยะที่ 200 เซนติเมตร

ผลการศึกษาทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างออกมาดังผลลัพธ์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 5-1 และกราฟดังข้างล่างนี้ (รูปที่ 5.2 - 5.4) สำหรับผลการจำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของทั้ง 33 ตำแหน่งได้แสดงไว้ข้างล่างเช่นกัน (ตารางที่ 5-1 และ 5-2)

โดยผู้ศึกษาได้ทำการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงนี้เพื่อที่ช่วยลดเวลาในการคำนวณหาผลคำตอบของสมการดังแสดงไว้ในกราฟด้านล่างนี้ ที่รูปที่ 5.1

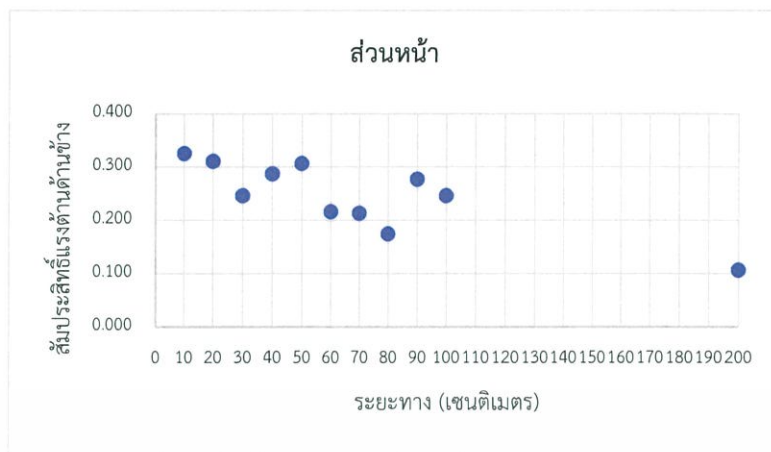


รูปที่ 5.1 แสดงการหาจำนวนเอลิเมนต์ของรูปทรงจักรยานกับรถบรรทุก

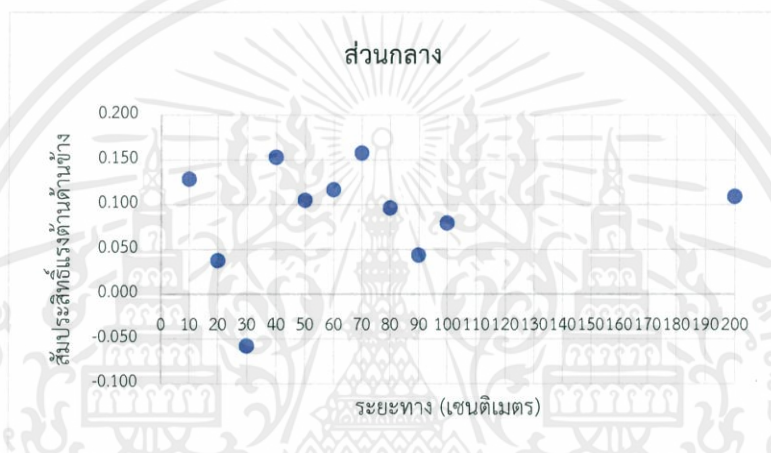
จากการจำลองโดยเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์แล้วเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้าน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นและค่อนข้างคงที่เมื่อจำนวนเอลิเมนต์มากกว่า 3,000,000 เอลิเมนต์ ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามกราฟจากรูป 4.7

ตารางที่ 5-1 ผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรถจักรยานจากการหาค่าตอบด้วยโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์

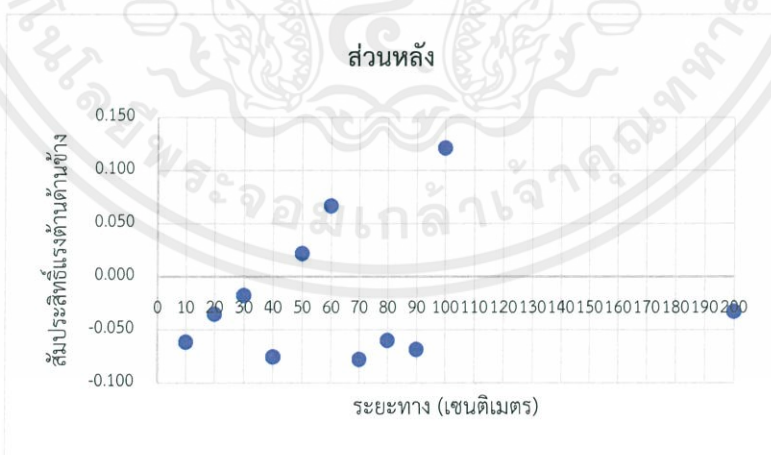
	ตำแหน่งด้านข้าง (ซม.)										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200
ตำแหน่ง	0.325	0.310	0.246	0.287	0.306	0.216	0.213	0.174	0.277	0.246	0.106
ส่วนหน้า	0.128	0.037	-0.058	0.153	0.105	0.117	0.158	0.096	0.044	0.079	0.109
ส่วนหลัง	-0.062	-0.035	-0.018	-0.075	0.022	0.067	-0.078	-0.068	-0.068	0.121	-0.033



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนหน้าของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนกลางของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่บริเวณส่วนหลังของรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

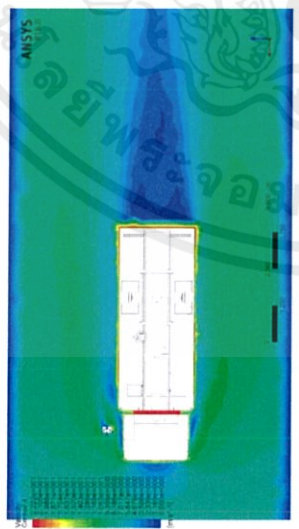
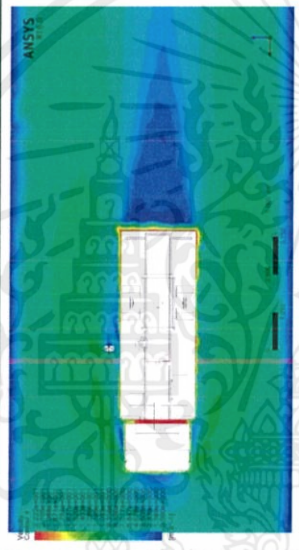
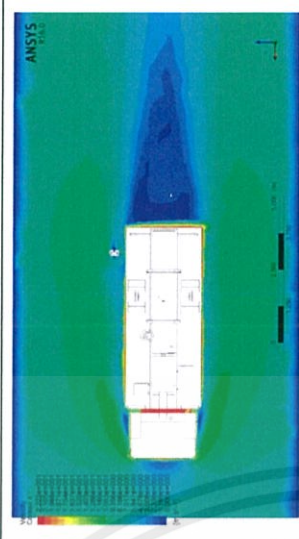
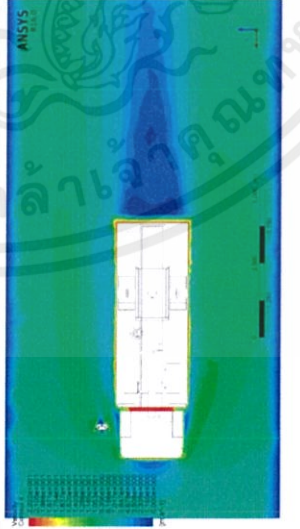
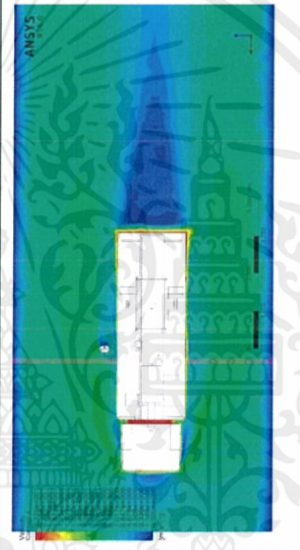
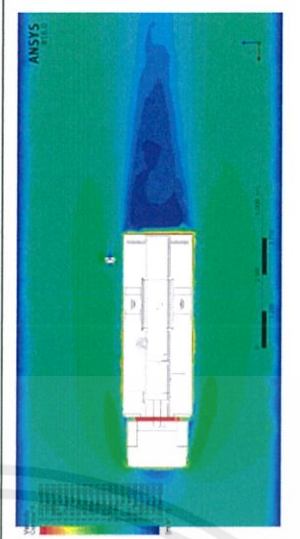
จากตาราง 5-1 แสดงผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของจักรยาน ซึ่งเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเขียนอยู่ในรูปกราฟในแต่ละตำแหน่งของรถบรรทุก ตามรูปที่ 5.2 - 5.4 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ไม่มีความเป็นเส้นตรงทั้งในระยะห่างด้านข้างและแต่ละตำแหน่งของตัวรถบนทุก แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างมีแนวโน้มลดลงเมื่อจักรยานอยู่ห่างจากรถบรรทุก และเมื่อจักรยานอยู่ที่ตำแหน่งด้านหน้ารถบรรทุกมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างสูงกว่าด้านกลางและด้านหลัง

ตารางที่ 5-2 แสดงภาพความเร็วในแต่ละระยะห่างจากรถบรรทุกและตำแหน่งของรถบรรทุกทั้งหมด 33 จุด

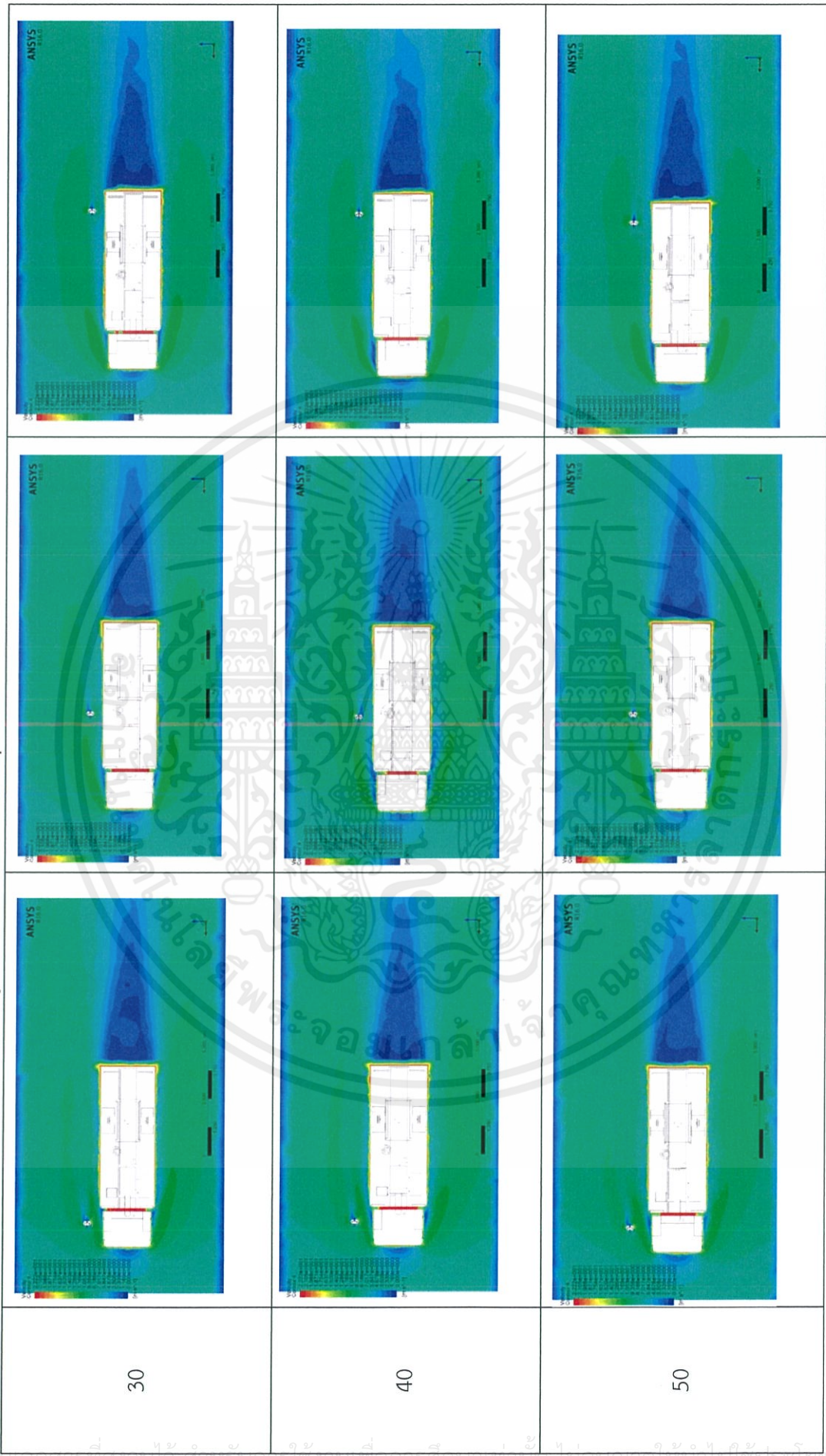


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

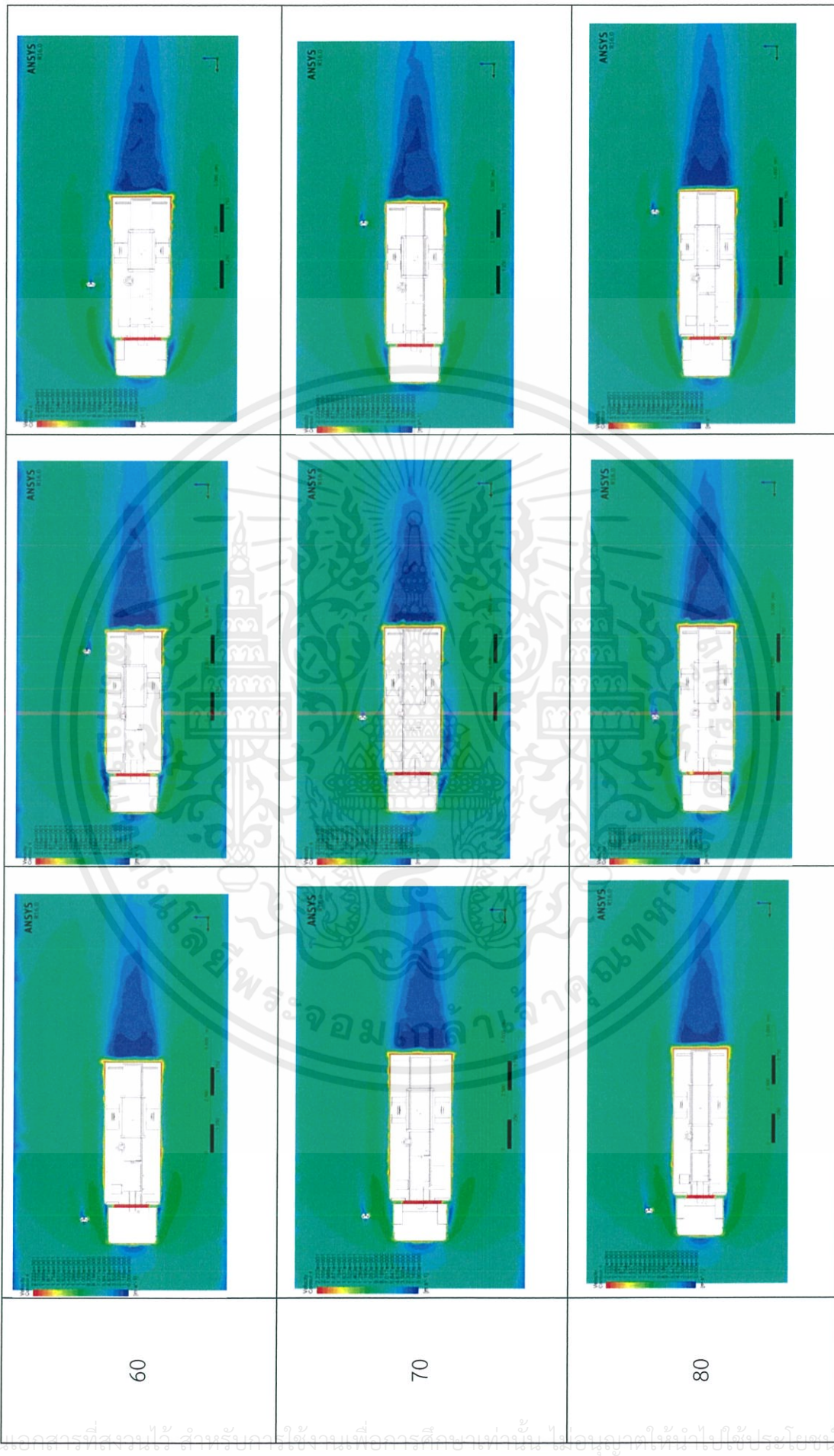
ตารางที่ 5-2 แสดงผลลัพธ์ของผลการจำลองของรูปทรงจิกเรียนและรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่ง (เซนติเมตร)	ส่วนหน้า	ส่วนกลาง	ส่วนหลัง
10			
20			

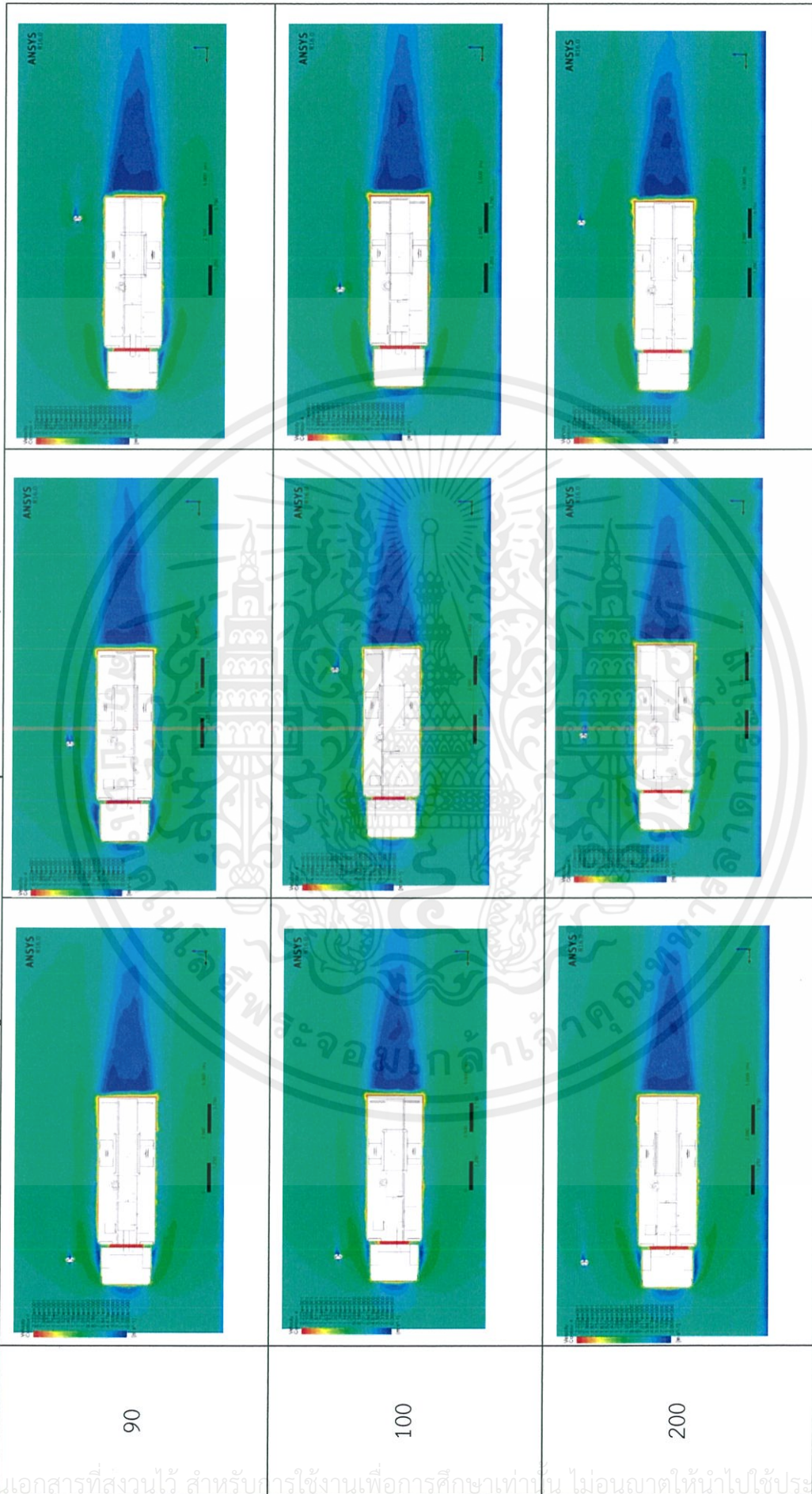
ตารางที่ 5-2 แสดงผลลัพธ์ของผลการจำลองของรูปทรงจากรังสีความร้อนและกรรณรังสีที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ต่อ)



ตารางที่ 5-2 แสดงผลลัพธ์ของผลการจำลองของรูปทรงจักรยานและรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ต่อ)



ตารางที่ 5-2 แสดงผลลัพธ์ของผลการจำลองของรูปทรงจักรยานและรถบรรทุกที่ตำแหน่งต่าง ๆ (ต่อ)



สรุปผลการศึกษา

6.1 วิจารณ์และสรุปผลการศึกษา

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษารูปทรงอย่างง่าย (การไหลภายในท่อทรงกระบอก การไหลล้อมรอบทรงกระบอก และการไหลภายนอกของรูปทรงกลม) พบว่าค่าที่ใช้ในการศึกษานั้นมีแนวโน้มเดียวกับผลการศึกษาของผู้ที่ได้ M. Schafer [10] และ Bruce D. Kothmann [5]

จากการศึกษาการไหลภายนอกของรูปทรง Ahmed Body พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของรูปทรงนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมด้านหลังของรูปทรง แสดงว่ารูปทรงของวัตถุนี้มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ซึ่งค่าผลลัพธ์นี้มีแนวโน้มเดียวกับงานวิจัยของ Ahmed S.R. [2]

จากการจำลองหาผลคำตอบทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ของรูปทรงที่ศึกษา (รถจักรยานกัรบรถบรรทุก) โดยใช้ $k-\omega$ SST เป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน ผลจากการศึกษาพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการคำนวณคือ $3.5 \times 10^6 - 5 \times 10^6$ เอลิเมนต์

จากการศึกษานี้ทำให้ได้ข้อสรุปในเรื่องต้นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้าง คือ ผลของความดันและความเร็วที่ต่างกันของวัตถุสองวัตถุที่มีตำแหน่งต่างกันและวิ่งด้วยความเร็วที่ต่างกันและสำหรับผลสรุปสุดท้ายของการศึกษานี้สรุปได้ว่า ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับนักปั่นคือระยะห่างตั้งแต่ 60 เซนติเมตร เพราะค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างของรถจักรยานตั้งแต่ตำแหน่งนี้ไม่ได้รับผลกระทบของแรงจากอากาศพลศาสตร์ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างที่ทำให้รถจักรยานล้มได้คือมากกว่า 0.298 ซึ่งระยะตั้งแต่ 60 เซนติเมตรเป็นต้นไป ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.298 ดังนั้นการศึกษานี้เป็นไปตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ในตอนต้น

วิจารณ์ผลการศึกษา

จากการศึกษานี้เราได้กำหนดให้ลักษณะของนักปั่น (ลำตัว แขน และขาของนักปั่น) ไว้ที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีการเคลื่อนไหว ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้นี้อาจยังไม่ครอบคลุมตามเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในความเป็นจริง ซึ่งตำแหน่งของ แขน และขา นั้นอาจไม่ส่งผลมากต่อการศึกษา แต่การก้มของช่วงลำตัวนี้อาจเป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านด้านข้างได้ ซึ่งด้วยระยะเวลาที่จำกัดของการศึกษานั้นทำให้ไม่เพียงพอต่อการศึกษา เนื่องด้วยแต่ละการศึกษานี้ ใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานในการได้ผลลัพธ์ โดยผู้ศึกษาเองหวังว่าการศึกษานี้สามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้งานมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้เป็นเพียงการจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น ซึ่งการศึกษาในภายหน้าควรมีการทำการทดลองในอุโมงค์ลมเพื่อทำการสอบเทียบค่าของผลลัพธ์จากการคำนวณทางคอมพิวเตอร์(Validation)

ในการศึกษานี้สามารถนำแนวคิดนี้ และการตั้งค่าต่างๆไปใช้หาคำตอบของการศึกษาต่อเพิ่มเติม เช่น องศาการก้มของนักปั่น หรือเป็นแนวทางในการศึกษาแบบจำลองรูปทรงอื่นๆ เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] Adelya Khayrullina, Bert Blocken, Wendy Janssen and Jochem Straathof. CFD simulation of train aerodynamics: Train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform, vol. 139. 2015
- [2] Ahmed, S.R. Influence of base slant on wake structure and drag of road vehicles.1981.
- [3] Bert Blocken and Yasin Toparlak. A following car influences cyclist drag: CFD simulations and wind tunnel measurements, vol. 145. 2015.
- [4] Bert Blocken, Yasin Toparlak and Thomas Andrienne. Aerodynamic benefit for a cyclist by a following motorcycle, vol. 155. 2016
- [5] Bruce D. Kothmann. Aerodynamics of Sports Balls. 2007.
- [6] Bruce R. Munson and Ted H Okiishi. 2013. Fluid mechanic. 7th ed. Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
- [7] Chaitanya Chibule, Awadhesh Upadhyay and Yagna Mukkamala. Analyzing the profile modification of truck-trailer to prune the aerodynamic drag and its repercussion on fuel consumption, vol. 97. 2014.
- [8] Easton Cycling. Defining, Measuring and Improving Aerodynamic Testing in the Bicycle Industry
- [9] H.K. Versteeg and W. Malalasekera.1995. An introduction to computational fluid dynamics The Finite Volume method. Longman Group Ltd
- [10] M. Schäfer and S. Turek. Benchmark computations of laminar flow around a cylinder. 1996.
- [11] Meng Wang, Pietro Catalano and Gianluca Laccarino. Prediction of high Reynolds number flow over a circular cylinder using LES with wall modelling. 2001.
- [12] T.J. CHUNG. 2002. Computational Fluid Dynamics. United Kingdom. Cambridge University Press.
- [13] W.Bai, C.G. Mingham, D.M. Causon, L. Qian. Detached eddy simulation of turbulent flow around square and circular cylinders on Cartesian cut cells. 2016.