



การออกแบบและทดสอบใบกังหันลมแกนตั้งความเร็วลมต่ำ
โดยการจำลองพลศาสตร์ของไหล

Design and Testing of Vertical Wind Turbine Blade for Low Wind Speed
Using Computational Fluid Dynamic (CFD) Model

ธนพัฒน์ อัครชัยพันธุ์

Thanaphat Akkarachaiphant

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Energy Technology
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การออกแบบและทดสอบใบกังหันลมแกนตั้งความเร็วลมต่ำ
โดยการจำลองพลศาสตร์ของไหล

Design and Testing of Vertical Wind Turbine Blade for Low Wind Speed
Using Computational Fluid Dynamic (CFD) Model

ธนพัฒน์ อัครชัยพันธ์

Thanaphat Akkarachaiphant

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Energy Technology
Prince of Songkla University

2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและทดสอบใบกังหันลมแกนตั้งความเร็วลมต่ำ โดยการจำลองพลศาสตร์
ของไหล

ผู้เขียน นายธนวัฒน์ อัครชัยพันธุ์

สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววงศ์ดี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี เลื่องชวนนท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาคม ปะหลามานิต)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ภิระวณิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญฤทธิ ฉัตรทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายธนวัฒน์ อัครชัยพันธุ์)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

.....

(นายธนพัฒน์ อัครชัยพันธุ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและทดสอบใบกังหันลมแกนตั้งความเร็วลมต่ำ โดยการจำลองพลศาสตร์ของไหล
ผู้เขียน	นายธนพัทธ์ อัครชัยพันธ์
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพลังงาน
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญอย่างหนึ่งในปัจจุบัน การนำพลังงานลมมาใช้นั้น โดยส่วนมากแล้วก็จะใช้กังหันลม ซึ่งทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานกล แล้วนำพลังงานกลนั้นไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า กังหันลมสามารถแยกเป็นประเภทได้ 2 ประเภทหลักๆ คือ กังหันลมแนวตั้ง (Vertical-axis wind turbine, VAWT) และกังหันลมแนวนอน (Horizontal-axis wind turbine, HAWT) ซึ่งประเภทของกังหันลมนี้ จะถูกเลือกใช้ตามสภาวะที่ต่างกันของสภาพอากาศ แวดล้อม ตำแหน่งที่ตั้ง และ ความต้องการในการใช้พลังงาน โดยการออกแบบกังหันลมก็เป็นปัจจัยสำคัญ ในการทำให้กังหันลมมีประสิทธิภาพ งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบกังหันลมแนวตั้ง โดย การศึกษาและออกแบบด้วยการใช้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) วิเคราะห์จำลองการไหลของอากาศโดยการคำนวณออกแบบประมวลผลและหาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น โดยงานวิจัยจะเป็นส่วนที่ศึกษาโมเดลกังหันลมแกนตั้งที่ออกแบบไว้ด้วยการกำหนดเงื่อนไขสภาวะอากาศ ต่างๆ รูปแบบของกังหัน และเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลจากการทำงาน ของโมเดลกังหันลมแกนตั้งที่ออกแบบจริง ได้แก่ ค่าความเร็วลม ความเร็วรอบ ทอร์ค ค่ากำลัง รวมไปถึง ประสิทธิภาพ

การศึกษาในส่วนแรกเป็นการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม ANSYS® Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการศึกษาของไหล เบื้องต้นได้ทำการศึกษาและออกแบบแกน ใบ Airfoil อย่างง่ายและใช้โปรแกรม ด้วยรูปแบบ 2D-simulation โดยจะแสดงผลให้เห็นอย่างง่ายด้วย แผนภาพ Contour ถึงความเร็วลมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเคลื่อนที่ปะทะแกนใบ Airfoil ซึ่งต่อมาก็นำความรู้ที่ ศึกษาจากรูปแบบ 2D มาปรับใช้ในรูปแบบ 3D-simulation โดยได้ทำการออกแบบโมเดลกังหันลมหลาย โมเดล และเลือกใช้โมเดลกังหันลมที่ 7 และ 8 มาเป็นกรณีศึกษาเพราะมีความเหมาะสมที่สุด

การศึกษาโมเดลกังหันลมที่ 7 และ 8 จะใช้การ Simulation ที่มีเงื่อนไขของ สภาพแวดล้อมเหมือนที่กันด้วยขนาดของอุโมงค์ลมที่เท่ากัน โมเดลกังหันลมที่ 8.1 และ 8.2 จะใช้พื้นที่ใน

การ Simulation ที่มากกว่าโมเดลที่ 7 และ 8 เนื่องด้วยขนาดของโมเดลกัณฑ์ลุมที่ใหญ่กว่า โดยในการ Simulation จะใช้ค่าความเร็วลุมเท่ากันทั้ง 4 โมเดล ที่ความเร็วลุม 5 m/s โดยผลลัพธ์ของการ Simulation แสดงให้เห็นว่าค่าความเร็วรอบของโมเดลที่ 7 จะมีค่ามากกว่า โมเดลที่ 8 และ 8.1 กับ 8.2 ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์กำลัง โมเดลที่ 7 จะมีค่าสูงที่สุด ผลลัพธ์ของโมเดลที่ 8.1 และ 8.2 สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มส่วนเสริมเพื่อเพิ่มความสามารถในการออกตัวให้ดีขึ้นสำหรับโมเดลกัณฑ์ลุมที่ 8 นั้นใช้ได้ผล แต่ทว่าการเพิ่มส่วนเสริมก็มีข้อเสีย เนื่องด้วยน้ำหนักที่มากขึ้นและพื้นที่รับลุมที่กว้างขึ้น ทำให้เมื่อทำงานไปได้ซักพักจะเกิดปัญหาขึ้น โดยจะเกิดการหมุนติกลับของตัวใบกัณฑ์ลุม

การศึกษาเรื่องวัสดุที่มีผลต่อกัณฑ์ลุม จะใช้โมเดลที่ 7 มาศึกษา โดยจะใส่แกนเข้าไปในตัวโมเดลกัณฑ์ลุมจากเหตุผลในการสร้างทางวิศวกรรมและการติดตั้ง โดยวัสดุที่จะใช้ศึกษาคือ อะคริลิก และ แสตนเลส โดยทำการศึกษาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นก็จะทำการสร้างเป็นโมเดลกัณฑ์ลุมขนาดเล็กมาทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ และเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ความเร็วลุม 4 5 และ 6 m/s ผลลัพธ์จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ และโมเดลกัณฑ์ลุมจำลอง พบว่า วัสดุอะคริลิกให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง และ ค่าความเร็วรอบที่ดีกว่าแสตนเลส และจากการเปรียบเทียบข้อมูลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ และโมเดลกัณฑ์ลุมจำลองแล้ว จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างจะของพารามิเตอร์ต่างๆอยู่ในช่วง 10-30 % จึงต้องพัฒนาต่อไป

คำสำคัญ : พลังงานลุม, กัณฑ์ลุมแนวตั้ง, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, วัสดุกัณฑ์ลุม

Thesis Title	Design and Testing of Vertical Wind Turbine Blade for Low Wind Speed Using Computational Fluid Dynamic (CFD) Model
Author	Mr.Thanaphat Akkarachaiphant
Major Program	Energy Technology
Academic Year	2021

Abstract

Wind energy is one form of renewable energy, the most commonly known method to harvest wind energy is using wind turbine by conversion of kinetic energy from wind to mechanical energy and finally to electrical energy with power generator. Normally, the wind turbine can be classified into two types which are composed of the vertical-axis wind turbine (VAWT) and horizontal-axis wind turbine (HAWT). Each wind turbine type was evaluated and set up depending on weather condition, area site and energy demand. Due to mentioned conditions, design of wind turbine. Due to mentioned conditions, design of wind turbine is one major point that relatively affect to power efficiency of the turbine. Therefore, the main objectives of this thesis are to study on effect of the various VAWT wind turbine structures on their efficiency and to reach the objectives, the design of wind turbines are simulated by the computational fluid dynamic (CFD). Finally, the validation of the simulated VAWT and the actual VAWT are comparative studied in terms of the wind speed, rotational speed, torque and power.

At the beginning part of this work, the simulation work of the VAWT using the CFD program (called ANSYS® Fluent) was carried on. On this purpose, the simulation on simple wind turbine blade airfoil was run on 2D-simulation and the result showing in contour line of the wind speed was changed when it contacted with airfoil. And this simulated result was used for approval of wind blade structure to 3D-simulation. And the 3D wind turbine structures were carried on in various types many models. Finally, the wind turbine structures model 7 and 8 are the suitable types which were chosen for study in the deep detail.

The study of the simulated wind turbine model 7 and 8 were comparatively presented with the same weather conditions and fixed wind speed of 5 m/s. However, due to limitation of the wind tunnel size the wind turbine model 8.1 and 8.2 were constructed in different size. The results shows that wind turbine model 7 has a highest rotational speed and highest power coefficient. Moreover, the wind turbine model 8.1 and 8.2 attach airfoil and curve blade on wind turbine model 8 can be reduced the lower cut-in speed while the increase of weight and wind contact area causes the wind turbine to reverse rotate in a long term operation.

Finally, the effect of different wind turbine materials on efficiency of wind turbine model 7 was carried on. By adding a spindle pole in the wind turbine model 7 for good vertical installation, the materials use in study are acrylic and stainless steel was selected to build the wind turbine structures and the results show that at the wind speed of 4, 5, and 6 m/s of the acrylic wind turbine had high power coefficient and rotational speed compared to the stainless wind turbine. The comparison between simulation and experimental show the percentage of difference are 10-30% which can be improved.

Keywords: Wind energy, Vertical-axis wind turbine (VAWT), Computational Fluid dynamic (CFD), Wind turbine materials.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพพระเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ฐิระวณิชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำในการดำเนินการวิจัย และคอยติดตามความก้าวหน้าและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สำนักนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน ที่ให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน (IGS) ของสถาบันวิจัยระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบพระคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ อาคารวิจัยวิศวกรรมประยุกต์สิรินธร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับสถานที่และอุปกรณ์เพื่อการทำวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ให้คำแนะนำ และช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่คอยให้การช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ พระบิดา มารดา ที่คอยให้การสนับสนุน และให้ทุนทรัพย์ในการศึกษา มาโดยตลอด ตลอดจนทุกท่านที่มีได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

ธนวัฒน์ อัครชัยพันธุ์

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญ	(10)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพประกอบ	(13)
สารบัญกราฟ	(16)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4. ขอบเขตของการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1. พลังงานลม (Wind power)	3
2.2. อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)	3
2.3. แรงยกและแรงต้าน (Lift force & Drag force)	4
2.4. Blade Element Theory (BET)	6
2.5. อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบกังหัน (Tip-speed ratio)	8
2.6. ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Types of Wind Turbine)	8
2.7. ศักยภาพพลังงานลม	11
2.8. การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull's distribution)	13
2.9. วัสดุองค์ประกอบในการสร้างใบกังหันลม (Material composition for construction of wind blade)Computational Fluid Dynamic (CFD)	13

2.10. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD)	15
2.11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	21
3.1. การศึกษาด้วยการ simulation โดยใช้ CFD	21
3.1.1. การออกแบบโมเดลทดลอง	21
3.1.2. การทดลองใช้โปรแกรม	36
3.1.3. การจำลองแบบ 3D (3 Dimension Simulation)	37
3.2. การศึกษาเรื่องชนิดวัสดุที่มีผลต่อประสิทธิภาพ	40
3.2.1. การจำลอง (Simulation)	41
3.2.2. การทดลองจริง	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	47
4.1. ผลการทดลองด้วยการ simulation	47
4.1.1. ผลการทดลองใช้โปรแกรมด้วยการ Simulation แบบ 2D	47
4.1.2. ผลการทดลองการ Simulation แบบ 3D	48
4.2. ผลการทดลองการศึกษาเรื่องชนิดวัสดุที่มีผลต่อประสิทธิภาพ	60
4.2.1. ผลการทดลองจากการ simulation	60
4.2.2. ผลการทดลองกักหน้ลมในอุโมงค์ลม	73
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	78
5.1. สรุปผลการทดลอง	78
5.2. ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม	80

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 7	28
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 8	34
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 8.1 และ 8.2	38
ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 7.1	41
ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงถึงประสิทธิภาพของกังหันลมแต่ละโมเดล	59
ตารางที่ 4-2 ค่าของ Tip Speed Ratio(TSR) ของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	66
ตารางที่ 4-3 ค่าทอร์คของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	66
ตารางที่ 4-4 ค่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	67
ตารางที่ 4-5 ค่าของ Tip Speed Ratio(TSR) ของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1	71
ตารางที่ 4-6 ค่าทอร์คของโมเดลที่ 7.1 วัสดุสแตนเลส	72
ตารางที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1	72
ตารางที่ 4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	76
ตารางที่ 4-9 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1	76
ตารางที่ 4-10 ค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 7.1 จากเครื่องวัด	76
ตารางที่ 4-11 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	77
ตารางที่ 4-12 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1	77

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2-1 ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปตามรูปร่าง	5
รูปที่ 2-2 การสูญเสียแรงตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น	6
รูปที่ 2-3 มุมและแรงที่กระทำกับใบ	7
รูปที่ 2-4 กังหันลมแนวแกนนอน	9
รูปที่ 2-5 กังหันลมแนวตั้ง	10
รูปที่ 3-1 โมเดลที่ 1.1(ซ้าย) และ 1.2(ขวา)	22
รูปที่ 3-2 โมเดลที่ 2.1(ซ้าย) และ 2.2(ขวา)	22
รูปที่ 3-3 โมเดลที่ 3.1 (ซ้าย) 3.2 (ขวา)	23
รูปที่ 3-4 โมเดลที่ 4	23
รูปที่ 3-5 โมเดลที่ 5.1 (ซ้าย) และ 5.2 (ขวา)	24
รูปที่ 3-6 โมเดลที่ 6.1 (ซ้าย) และ 6.2 (ขวา)	24
รูปที่ 3-7 โมเดลที่ 7 (ซ้าย) และ 7.1 (ขวา)	25
รูปที่ 3-8 โมเดลที่ 8 (ซ้าย) 8.1 (กลาง) และ 8.2 (ขวา)	25
รูปที่ 3-9 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ของการออกแบบสองมิติ 2D (2D Geometry)	27
รูปที่ 3-10 Mesh อย่างง่ายของแบบจำลอง 2 มิติ (2D Model)	27
รูปที่ 3-11 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดลที่ 7	29
รูปที่ 3-12 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 7	29
รูปที่ 3-13 โมเดลการจำลองสำหรับกังหันลมโมเดลที่ 7	30
รูปที่ 3-14 ค่าความเร็วลมที่ใช้ในการจำลองของกังหันลมโมเดลที่ 7	31

รูปที่ 3-15 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม โมเดลที่ 7	32
รูปที่ 3-16 จำนวนและขนาดของ Time-step สำหรับกังหันลมโมเดลที่ 7	33
รูปที่ 3-17 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดล ที่ 8	34
รูปที่ 3-18 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 8	35
รูปที่ 3-19 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม โมเดลที่ 8	36
รูปที่ 3-20 จำนวนและขนาดของ Time-step สำหรับกังหันลมโมเดลที่ 8	37
รูปที่ 3-21 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดล ที่ 8.1 และ 8.2	38
รูปที่ 3-22 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 8.1 และ 8.2	39
รูปที่ 3-23 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม โมเดลที่ 8.1	39
รูปที่ 3-24 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลม โมเดลที่ 8.2	40
รูปที่ 3-25 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดล ที่ 7.1	42
รูปที่ 3-26 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 7.1	42
รูปที่ 3-27 แบบกังหันลมที่สร้างขึ้นจากกังหันลมโมเดลที่ 7.1	43
รูปที่ 3-28 อุโมงค์ลมที่จะใช้ทดสอบการทำงานของกังหันลม	44
รูปที่ 3-29 เครื่องแปลงไฟสำหรับปรับความเร็วลมในอุโมงค์ลม	45
รูปที่ 3-30 แลปที่อบและเครื่องวัดความเร็วรอบ	45
รูปที่ 4-1 ภาพ Contour จากการจำลอง (Simulation)	46

รูปที่ 4-2 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 7	49
รูปที่ 4-3 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8	52
รูปที่ 4-4 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8.1	54
รูปที่ 4-5 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8.2	56
รูปที่ 4-6 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมจากภาพตัดขวางข้าง (Side Cross section)	62
รูปที่ 4-7 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วรอบโดยมองจากมุมบน (Plan)	62

สารบัญกราฟ

กราฟ	หน้า
กราฟที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลง เพราะจุดตัด	48
กราฟที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมโมเดลที่ 7	50
กราฟที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8	53
กราฟที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8.1	55
กราฟที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8.2	57
กราฟที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบค่าทอร์คและความเร็วรอบของกังหันลม โมเดลที่ 7, 8, 8.1 และ 8.2	58
กราฟที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของโมเดลทั้ง 4 ชนิด	60
กราฟที่ 4-8 กราฟความเร็วลมที่ต่างกันของการ Simulation ทั้ง 3 ครั้ง ที่ เวลาใดๆ	61
กราฟที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมอะคริลิคโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 4 m/s	63
กราฟที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลาของกังหันลมอะคริลิคโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 5 m/s	64
กราฟที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลา ของกังหันลมอะคริลิคโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 6 m/s	65

กราฟที่ 4-12 ค่าทอร์คที่ได้จากความเร็วลมทั้ง 3 ค่าของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1	67
กราฟที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tip Speed Ration กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมโมเดลที่ 7.1 วัสดุอะคริลิก	68
กราฟที่ 4-14 กราฟความเร็วลมของกังหันลมสเตนเลสโมเดลที่ 7.1	69
กราฟที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลา ของกังหันลมสเตนเลสโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 5 m/s	70
กราฟที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และ Boundary normal distance ของกังหันลมสเตนเลสโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 6 m/s	71
กราฟที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tip Speed Ration กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมโมเดลที่ 7.1 วัสดุอะคริลิก	73
กราฟที่ 4-18 กราฟความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 ในอุโมงค์ลม	74
กราฟที่ 4-19 กราฟความเร็วลมของกังหันลมสเตนเลสโมเดลที่ 7.1 ในอุโมงค์ลม	74
กราฟที่ 4-20 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 จากการทดสอบในอุโมงค์ลมและผลการจำลองทางคณิตศาสตร์	75
กราฟที่ 4-21 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของกังหันลมสเตนเลสโมเดลที่ 7.1 จากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมและผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์	75

บทที่ 1 บทนำ

1.1. ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

พลังงานลมถือเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญอย่างหนึ่งในโลก (Quan and Leephakpreeda, 2015) และมีการพัฒนาการนำพลังงานลมมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในประเทศไทยก็ได้มีการนำพลังงานลมมาใช้เป็นพลังงานหมุนเวียนด้วยเช่นกัน เพียงแต่สัดส่วนการใช้จะไม่มากนักเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ (Werapun et al., 2014) อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำขนาดใหญ่ พลังงานจากชีวมวล และพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม ตามสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนของกระทรวงพลังงานแห่งประเทศไทย 2561 ตัวอย่างพื้นที่ที่ได้มีการติดตั้งกังหันลมสำหรับใช้งานก็มีดังนี้ ทุ่งกังหันลมห้วยบง อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา กำลังการผลิต 207 MW, ทุ่งกังหันลมแหลมฉับ อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี กำลังการผลิต 840 MW, โครงการหาดกังหันลม อำเภอรอนดง จังหวัดสงขลา กำลังการผลิต 126 MW และทุ่งกังหันลมนครศรีธรรมราช อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม กำลังการผลิต 1.75 MW ซึ่งตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 2018 (Alternating Energy Development Plan, AEDP 2018-2037) ได้มีการตั้งเป้าหมายให้มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมใน พ.ศ. 2580 ที่ 1485 MW อย่างไรก็ตามจากผลสำรวจล่าสุดปี ค.ศ. 2018 ประเทศไทยมีกำลังผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมที่ 1102.84 MW

ปัจจุบันการนำพลังงานจากลมมาใช้ จะใช้กังหันลมผลิตเพื่อการผลิตไฟฟ้า โดยการนำพลังงานลมที่ได้มาเปลี่ยนเป็นพลังงานกล และเปลี่ยนพลังงานกลที่ได้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) โดยตัวกังหันลมจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ เช่นตัวใบกังหันลม และตัวกำเนิดไฟฟ้า เพลา ความเร็วรอบต่ำ เพลาความเร็วรอบสูง เป็นต้น และเกือบทั้งหมดที่มีการติดตั้งในโครงการขนาดใหญ่เป็นการนำกังหันลมจากต่างประเทศที่มีความเร็วเริ่มต้นของการทำงานของกังหันลมสูงกว่า 4 m/s (cut-in speed) ซึ่งไม่เหมาะสมกับประเทศไทยมากนักเพราะค่าความเร็วลมเฉลี่ยต่ำ ดังนั้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจออกแบบศึกษากังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำ เพราะกังหันลมแบบแนวตั้ง (Vertical axis wind turbine) มีความเหมาะสมและไม่ขึ้นกับแรงลมที่แปรเปลี่ยนมาก อย่างไรก็ตามการออกแบบใบกังหันลมมีความสำคัญมาก โดยจะศึกษาค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องและส่งผลกระทบต่อตัวใบกังหันลมเช่น ความเร็วที่ปะทะกับใบกังหัน มุมปะทะของใบ และรูปร่างของใบ เป็นต้น แล้วนำข้อมูลที่ศึกษามาออกแบบใบกังหัน

ให้ตัวใบกังหันลมสามารถนำไปใช้งานที่ความเร็วลมต่ำอย่างมีประสิทธิภาพที่สุดโดยจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลมาช่วยในการออกแบบตัวใบกังหัน และจะสร้างเป็นตัวโมเดลขนาดเล็กขึ้นมาเพื่อทดสอบโดยการนำแบบจำลองหรือโมเดลไปทดสอบการไหลของอากาศในอุโมงค์ลม และปรับปรุงรูปแบบจนได้ต้นแบบกังหันลมแกนตั้งความเร็วลมต่ำ ในการใช้งานจริงต่อไป

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1. เพื่อศึกษาและออกแบบใบกังหันลมแกนตั้งที่สามารถใช้งานได้ที่ความเร็วลมต่ำ โดยการใช้โปรแกรม CFD

1.2.2. ทดสอบการทำงานของโมเดลกังหันลมแกนตั้งที่ออกแบบไว้ในอุโมงค์ลม และคำนวณหาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำต้นแบบตัวใบกังหันลมแกนตั้งสำหรับความเร็วลมที่ได้ออกแบบไว้ นำไปใช้งานในแต่ละพื้นที่ได้

ได้ข้อมูลด้านการทดสอบและสร้างกังหันลมแกนตั้งสำหรับการพัฒนาเป็นกังหันลมความเร็วลมต่ำต่อไป

1.4. ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานจะแบ่งเป็น 4 ส่วนด้วยกัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.4.1. ออกแบบตัวใบกังหันลม และสร้างออกมาเป็นโมเดลหรือแบบจำลอง โดยจะใช้โปรแกรมสำหรับการออกแบบและจำลองการไหล ANSYS® โดยประเภทของกังหันที่จะออกแบบ คือกังหันลมแนวตั้ง (Vertical axis wind turbine)

1.4.2. จำลองการไหลของอากาศกับโมเดลที่ออกแบบไว้ด้วย ANSYS® Fluent โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการไหลของอากาศ ที่มีต่อการหมุนของกังหันลม เช่น อัตราส่วนความเร็วลม (tip-speed ratio) แรงยก (Lift force) และ แรงต้าน (Friction force)

1.4.3. ใช้โมเดลกังหันที่ทดสอบในโปรแกรม ANSYS® Fluent มาทดสอบด้วยอุโมงค์ลม โดยวัดและศึกษาดูอัตราการหมุนรอบต่อนาทีและเปรียบเทียบกับผลจำลอง เพื่อดูประสิทธิภาพของกังหัน

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. พลังงานลม (Wind energy)

ลม คือ พลังงานรูปแบบหนึ่ง ที่สามารถทำงานได้หรือเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานรูปแบบอื่นได้ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล (Douak et al., 2017) ลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศ ซึ่งเกิดจากการที่บริเวณผิวโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ไม่เท่ากันทุกบริเวณพื้นที่ ซึ่งพื้นที่ที่มีปริมาณความร้อนสูง อากาศจะมีความหนาแน่นน้อยเนื่องจากอากาศจะลอยตัวสูงขึ้น (ความกดอากาศต่ำ หรือความดันอากาศต่ำ) ซึ่งอากาศบริเวณพื้นที่ข้างเคียงที่อุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นอากาศสูงกว่า ทำให้เกิดกระแสอากาศเคลื่อนที่เข้าแทนที่ ทำให้เกิดกระแสลมขึ้น ซึ่งขณะที่กระแสลมเคลื่อนที่ ก็จะมีพลังงานจลน์เกิดขึ้น

พลังงานลมถือเป็นหนึ่งในพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญอย่างหนึ่งในโลก และได้มีการพัฒนาการใช้พลังงานลมมากขึ้นเรื่อยๆ โดยจุดที่ทำให้มีความสนใจมากขึ้นเนื่องมาจากแนวโน้มการพัฒนา และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ปริมาณน้อย (Waewsak et al., 2015) โดยพลังงานลมจะสามารถนำมาแปลงใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ด้วยการใช้กังหันลม แต่บางพื้นที่ก็ไม่สามารถใช้กังหันลมในการผลิตไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปแล้วพบว่าศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งมีค่าสูงมากกว่าบริเวณภายในฝั่ง (Werapun et al., 2014) เนื่องจากความเร็วลมเฉลี่ยที่สูงกว่าและส่งผลกระทบต่อทัศนวิสัยน้อยกว่าและประการสำคัญคือลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผู้คนในพื้นที่บนชายฝั่ง โดยในปัจจุบันโรงไฟฟ้าพลังงานลมถือว่ามีความประสิทธิภาพและคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่าเมื่อเทียบกับโรงงานไฟฟ้าพลังงานจากถ่านหิน (Waewsak et al., 2017)

2.2. อากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic)

เมื่อพิจารณาพลังงานจลน์ต่อเวลาที่พิจารณาจากการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านพื้นที่ปะทะลม จะได้พลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลาคือสมการของกำลังลม (P_{wind}) ดังสมการที่ 2-1 ซึ่งบอกถึงพลังงานจลน์ของลมทั้งหมดที่ค่าความเร็วลม (v) ที่มีความหนาแน่นของอากาศ ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$) และพัดผ่านพื้นที่การหมุนกวาดของใบพัด (A) (Korprasertsak and Leephakpreeda, 2016)

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad 2 - 1$$

พลังงานลมที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลของแกนหมุนกังหันลม มวลของอากาศที่ปะทะเข้ากับใบกังหันลมจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้าลง ในทางปฏิบัติแล้วพลังงานจากลมไม่สามารถถ่ายเทให้กับ

กังหันลมได้ทั้งหมด (Hand and Cashman, 2018) ซึ่งถ้าเกิดขึ้นจริง จะหมายความว่ามวลของอากาศที่ปะทะเข้ากับใบกังหันจะต้อง หยุดสนิทอยู่กับที่บริเวณพื้นที่หน้าตัดของใบกังหันลมทั้งหมด สมการที่ใช้ในการอธิบาย พลังงานทั้งหมดที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปได้จากพลังงานลม ดังสมการที่ 2-2

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad 2 - 2$$

เมื่อ $P_{turbine}$ คือ พลังงานจลน์ที่กังหันลมสามารถดึงมาใช้ได้จากกระแสลมที่ผ่านพื้นที่ใบกวาดของใบพัด (J) ซึ่ง C_p คือค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุดของใบกังหันลม หรือเรียกว่า Betz Coefficient โดยมีค่าประมาณร้อยละ 59.3 (Alanis Ruiz et al., 2021)

2.3. แรงยกและแรงต้าน (Lift force and Drag force)

กังหันลมสามารถหมุนได้ด้วยการเคลื่อนที่ของกระแสลมที่มีพลังงานจลน์เกิดขึ้น โดยเมื่อกระแสลมไหลผ่านตัวใบกังหัน จะทำให้ใบกังหันหมุนรอบแกน โดยแรงที่กระทำต่อใบกังหันจะมีอยู่ด้วยกัน 2 แรง คือ แรงยกและแรงต้าน โดยแรงทั้งสองจะกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน

2.3.1 แรงต้าน (D)

แรงต้านเป็นแรงที่มีทิศทางต่อต้านการเคลื่อนที่หรือทิศทางตรงข้ามกับแรงที่พยายามจะทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านกระแสลมอากาศ (Douak et al., 2017) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-3

$$D = 0.5 \rho v^2 C_D A \quad 2 - 3$$

โดย D คือแรงต้านอากาศ (N) และ C_D คือสัมประสิทธิ์ของแรงต้านอากาศ ไม่มีหน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเป็นผลจากรูปร่างของวัตถุ (Lin et al., 2016) ตัวอย่างเช่น ทรงกลมกลวงผ่าครึ่งของเครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย ถ้าหันด้านเว้าให้ลมค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ 0.42 แต่ถ้าหันด้านโค้งให้ลมค่าจะลดลงเหลือ 0.38 รถยนต์สมัยใหม่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศอยู่ระหว่าง 0.27-0.45 เครื่องบินหรือใบพัดกังหันลมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศน้อยมากประมาณ 0.04 และรูปร่างอื่นๆ ตามรูปที่ 2-1 ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากแรงต้านอากาศ เช่น เครื่องวัดความเร็วลมแบบถ้วย กังหันลมแบบซาโวเนียส (Savonius Wind Turbine) ซึ่งเป็นกังหันลมชนิดแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine) โดยแรงลมจะผลักใบพัดของกังหันลมทำให้เกิดแรงต้านอากาศที่ขึ้นกับใบกังหันลมทั้งสองด้านที่แตกต่างกัน ทำให้โรเตอร์ของกังหันลมหมุน

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

รูปที่ 2-1 ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่เปลี่ยนไปตามรูปร่าง (Mahmuddin et al., 2017)

2.3.2 แรงยก (L)

แรงยกเป็นแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางของกระแสอากาศหรือของไหลที่ไหลผ่านวัตถุเป็นแรงที่มีทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงหรือน้ำหนักวัตถุนั้นๆ แรงยกคำนวณได้จากสมการที่ 2-4 (Pourrajabian et al., 2016)

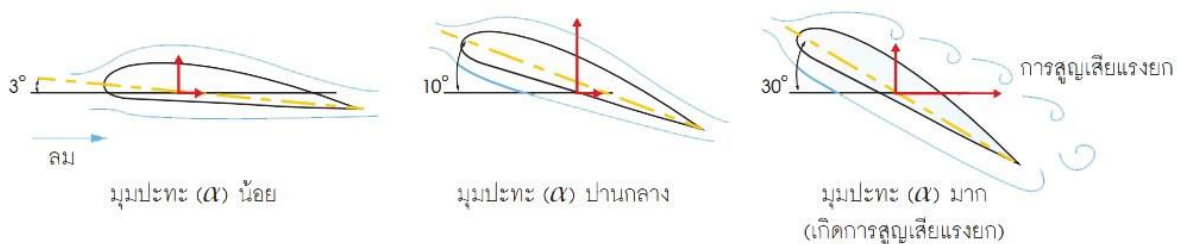
$$L = 0.5\rho v^2 C_L A \quad 2 - 4$$

โดย L คือแรงยก และ C_L คือสัมประสิทธิ์ของแรงยก ไม่มีหน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกแปรผันกับรูปร่างและความเรียบของพื้นผิวของวัตถุ (Chong et al., 2017) ตัวอย่างของการใช้ประโยชน์จากแรงยกเช่น เครื่องบิน กังหันลมผลิตไฟฟ้าสมัยใหม่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้งแบบแดร์เรียส (Darrieus wind turbine) โดยแรงลมจะผลักใบของกังหันลม ทำให้ด้านล่างของแพนอากาศเกิดความดันสูง และด้านบนของแพนอากาศเกิดความดันต่ำ ส่งผลทำให้เกิดแรงยกขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับลมทำให้โรเตอร์หมุน

2.3.3 การสูญเสียแรงยก (Lift force lose)

การสูญเสียแรงยกเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดเมื่ออากาศที่ไหลผ่านเหนือแผ่นอากาศ เกิดการแยกตัวออกจากพื้นผิวและก่อให้เกิดลมหมุนขึ้น ทำให้แรงยกมีค่าลดลงและเกิดแรงต้านมากขึ้น (Galinos et al., 2016) ดังรูปที่ 2-2

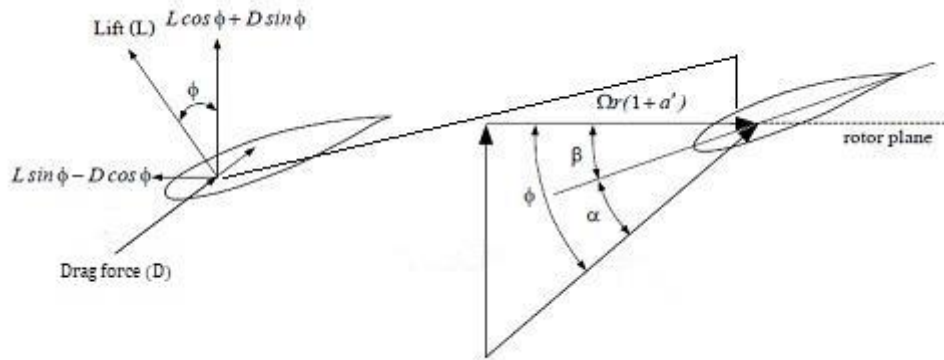


รูปที่ 2-2 การสูญเสียแรงตามมุมปะทะที่เพิ่มขึ้น

ปรากฏการณ์นี้เป็นประโยชน์ในการจำกัดพลังงานจากลมที่กระทำต่อกังหันลม เมื่อความเร็วลมสูงกว่าความเร็วลมพิกัดในกังหันลมแกนหมุนแนวนอน (horizontal axis wind turbine (HAWT)) ที่ไม่สามารถปรับมุมใบพัดได้ส่ง ผลทำให้มุมปะทะ (α) มีค่าเพิ่มขึ้นใบพัดกังหันลมเกิดการสูญเสียแรงยกพลังงานจากลมจะถูกจำกัดให้ลดลงได้ (แต่มีค่าไม่คงที่) และในขณะที่เกิดการสูญเสียแรงยกจะส่งผลทำให้เกิดความเครียดกับใบพัดกังหันลมมากขึ้น และเกิดเสียงดังมากขึ้นไปด้วย ในกังหันลมที่สามารถปรับมุมใบพัดได้ เมื่อปรับมุมใบพัดเพื่อเพิ่มมุมปะทะ (α) ใบพัดกังหันลมจะทำงานในสภาวะการสูญเสียแรงยกส่งผลให้แรงยกของกังหันลมลดลงทำให้กังหันลมสามารถจำกัดพลังงานจากลมให้คงที่ได้ แต่การปรับมุมใบพัดให้เกิดการสูญเสียแรงยกเป็นการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของใบพัดให้หันหน้าหาลมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงลากมากขึ้นใบพัดก็จะได้รับความเครียดมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

2.4. ทฤษฎีใบกังหันลม (Blade Element Theory, BET)

เมื่อพิจารณาเวกเตอร์ความเร็วจากรูปที่ 2-3 ให้ ϕ เป็นมุมลมเข้า (inflow angle) α คือ มุมปะทะ (angle of attack) และ β คือ มุมเฝิน (Pitch angle) (Pourrajabian et al., 2016)



รูปที่ 2-3 มุมและแรงที่กระทำกับใบ (Lanzafame et al., 2015)

เมื่อแตกแรงยกและแรงต้านเข้าสู่แนวแกนการหมุน (rotor plane) ผลบวกของทั้งสองแรงนี้ คือแรงตั้งฉาก (Normal force) แสดงไว้ดังสมการที่ 2-5 (Lanzafame et al., 2015)

$$dT = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad 2-5$$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อแตกแรงยกและแรงต้านเข้าสู่แนวสัมผัสทิศทางการหมุน ผลบวกของทั้งสองแรง คือ แรงในแนวสัมผัส (Tangential force) แสดงไว้ดังสมการที่ 2-6

$$\frac{dQ}{r} = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad 2-6$$

หากกังหันลมมีจำนวนใบกังหันเท่ากับ B ดังนั้นผลรวมของแรงตั้งฉากของกังหันลม ณ ตำแหน่งที่พิจารณา r วัดจากจุดศูนย์กลางของโรเตอร์ แสดงไว้ดังสมการที่ 2-7

$$dT = Bc \frac{1}{2} \rho v^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) dr \quad 2-7$$

$$dQ = \sigma' \pi \left[\frac{v_0(1-a)}{\sin \phi} \right]^2 (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) r dr \quad 2-8$$

เมื่อ $\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r}$ คือ ความแน่นจำเพาะที่ r ใดๆ (Local solidity) และอนุพันธ์ของแรงบิดอันเนื่องมาจากแรงสัมผัสที่กระทำ ณ ตำแหน่ง r จากจุดศูนย์กลาง แสดงไว้ดังสมการที่ 2-9

$$dQ = Bc \frac{1}{2} \rho v^2 (C_L \sin \phi + C_D \cos \phi) r dr \quad 2-9$$

โดยเมื่อ Q คือค่าที่ใช้บ่งบอกความถูกต้องซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 2-

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{B/2[1 - r/R]}{(r/R) \cos \beta} \right) \right\} \right] \quad 2 - 10$$

จากค่า Q จะได้สมการคำนวณความถูกต้องจากการสูญเสียส่วนปลายใบดังสมการที่ 11

$$dT = Q4a'(1 - a)\rho V \Omega r^3 dr \quad 2 - 11$$

เมื่อถ้าให้สมการที่ 2-8 และสมการที่ 2-11 มาเท่ากันแล้วผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะเป็นดังสมการที่ 2-12 และสมการที่ 2-13 ดังนี้

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{\sigma' [C_L \sin \beta + C_D \cos \beta]}{4Q \cos^2 \beta} \quad 2 - 12$$

$$\frac{a'}{1 - a} = \frac{\sigma' [C_L \cos \beta + C_D \sin \beta]}{4Q \lambda_r \cos^2 \beta} \quad 2 - 13$$

โดยจะเรียกสมการที่ 2-12 และ 2-13 ว่า Blade element momentum (BEM)

2.5. อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบก้าน (Tip-speed ratio)

คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วสัมผัสที่ใบก้านกับความเร็วลม โดยจะเป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของใบก้านโดยจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของใบก้านที่ออกแบบ ซึ่งจะเป็นดังสมการที่ 2-14 นี้ (Pourrajabian et al., 2016)

$$\lambda = \frac{\text{Tip speed of blade}}{\text{Wind speed}} = \frac{\omega R}{v} \quad 2 - 14$$

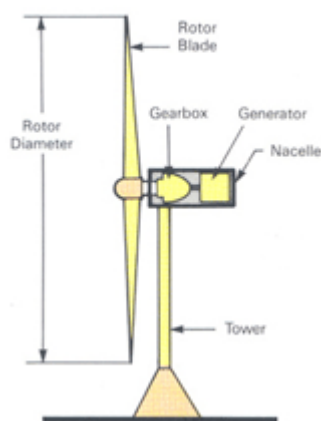
โดย ω คือความเร็วเชิงมุมหรือความเร็วของโรเตอร์ในการหมุน มีหน่วยเป็น รอบต่อวินาที R คือรัศมีของโรเตอร์ หน่วยเป็น เมตร และ v คือความเร็วลม ซึ่งมีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

2.6. ชนิดของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Types of wind turbine)

โดยหลักๆแล้วจะสามารถแบ่งชนิดของกังหัน ตามแนวการรับลม โดยจะสามารถแบ่งได้หลักๆ 2 ชนิดด้วยกัน

2.6.1 กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

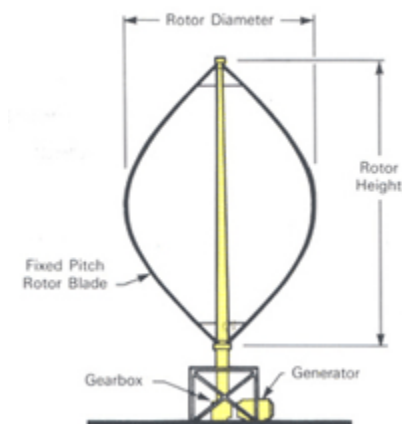
เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลมตั้งในรูปที่ 2-4 มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม (Tang et al., 2015) เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง และตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน นิยมใช้กับเครื่องสูบน้ำ กังหันลมแบบกังล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอบเพลเลอร์ (Propeller)



รูปที่ 2-4 กังหันลมแนวแกนนอน (Feng and Shen, 2017)

2.6.2 กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบตั้งในรูปที่ 2-5 ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทางโดยนิยมใช้งานกับสถานที่ที่มีความเร็วลมต่ำ (Korprasertsak and Leephakpreeda, 2016) มีตัวอุปกรณ์และตัวผลิตไฟอยู่ข้างล่างตัวใบ โดยมีหลากหลายแบบ เช่น แบบซาโวเนียส(Savonius) แบบดาเรีอัส (Darrieus) และแบบ H-rotor เป็นต้น



รูปที่ 2-5 กังหันลมแนวตั้ง (Balduzzi et al., 2016)

กังหันลมแบบแนวแกนนอนเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากออกแบบให้เป็นชนิดที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งได้รับการพัฒนามากในระยะหลัง ก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเช่นกัน (Tahani et al., 2017) ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีที่มากกว่าแบบแนวแกนนอนคือ ในแบบแนวแกนตั้งนั้นไม่ว่าลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแกนนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแกนนอนที่ติดอยู่บนหอคอยสูง (Müller et al., 2017)

ข้อดี

- มีความซับซ้อนของกลไกที่น้อยกว่ากังหันลมแนวนอน
- ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่ากังหันลมแนวนอน
- สามารถใช้งานได้ที่ความเร็วลมต่ำได้ดีกว่ากังหันลมแนวนอน
- สามารถรับลมได้รอบทิศทาง

ข้อเสีย

- ต้องการทอร์คเริ่มต้นสูงกว่ากังหันลมแนวนอนในการเริ่มเดินเครื่อง
- พลังงานที่ผลิตได้ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกังหันลมแนวนอน

2.7. ศักยภาพพลังงานลม (Potential of wind energy)

การจะนำพลังงานลมมาใช้งานจะต้องมีการประเมินศักยภาพพลังงานลมของพื้นที่ เพื่อดูความเร็วลม ความหนาแน่นกำลังลม และระดับความสูงของพื้นที่ เพื่อประเมินการติดตั้งกังหันลม โดยข้อมูลที่ศึกษาจะนำมาวิเคราะห์เป็นเชิงสถิติ

2.7.1 การวิเคราะห์ข้อมูลลม

ศักยภาพของพลังงานลมสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าต่างๆ ดังนี้

2.7.1.1 อัตราเร็วลมเฉลี่ย (Average Wind Speed)

อัตราเร็วลมเฉลี่ยเป็นข้อมูลทางด้านสเปกตรัมการกระจายอัตราเร็วของลมที่สำคัญ ณ บริเวณที่ทำการติดตั้งกังหันลม โดยสามารถวิเคราะห์อัตราเร็วลมเฉลี่ย v_m ในรูปที่ง่ายดังสมการที่ 2-15

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad 2 - 15$$

โดย n คือจำนวนของค่าความเร็วลมจะนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.7.1.2 การประมาณค่าอัตราเร็วลม (Velocity, V)

โดยทั่วไปอัตราเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงที่แตกต่างกัน (Waewsak et al., 2015) โดยอัตราเร็วลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง จากอัตราเร็วที่เป็นศูนย์ในระดับพื้นผิวไปจนถึงที่ระดับความสูงหนึ่ง การวิเคราะห์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงที่ต้องการศึกษา สามารถนำความสูงมาใช้ในการประมาณค่าอัตราเร็วที่ระดับความสูงที่เราต้องการได้จากสมการที่ 2-16

$$V(z) = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad 2 - 16$$

โดย z คือ ระดับความสูงที่ต้องการทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (m) z_r คือ ระดับความสูงที่ทราบค่าอัตราเร็วลมเหนือพื้นดิน (m) V_r คือ อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงที่ทราบค่า (m/s) $V(z)$ คือ อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงที่ต้องการทราบค่า (m/s) α คือ สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลม ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ 2-17

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{V_z}{V_r} \right)}{\ln \left(\frac{z}{z_r} \right)} \quad 2 - 17$$

โดยทั่วไป สัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมส่วนใหญ่จะมีค่าตั้งแต่ 0.1 – 0.4 ตามสภาพความขรุขระของสภาพพื้นที่ที่ทำการศึกษา (Tian et al., 2018)

2.7.2 พลังงานลมและกำลังลม (Energy and Power, E and P)

พลังงานลม คือ มวลของอากาศที่เคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวโลกด้วยความเร็ว ดังนั้นพลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ โดยพลังงานจลน์ของอากาศเมื่อพิจารณาของส่วนหมุนของกังหัน ที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางจะสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2-18 ได้ดังนี้ (Shao et al., 2017)

$$E = \frac{1}{2} \rho_a V v^2 \quad 2 - 18$$

โดย E คือพลังงานจลน์ (J) ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m³) V คือ ปริมาตรของมวลอากาศที่ผ่านส่วนหมุน (m³) และ v คือ อัตราเร็วลม (m/s)

จากนิยามของ กำลังลม คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ต่อหน่วยเวลา จะได้สมการกำลังลมที่ 2-19

$$\frac{dE}{dt} = P_w = \frac{1}{2} \rho_a A v^3 \quad 2 - 19$$

โดย P_w คือกำลังลม (W) และ A คือพื้นที่ภาคตัดขวางของส่วนหมุน (m²) กำลังลมต่อหน่วยพื้นที่แสดงได้ดังสมการที่ 2-20 นี้

$$P_v = \frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho_a v^3 \quad 2 - 20$$

โดย P_v คือกำลังต่อพื้นที่ (W/m²)

2.8. การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull's distribution)

การแจกแจงไวบูลล์เป็นการแจกแจงทางสถิติซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว ดังสมการที่ 2-21 ซึ่งใช้แทนลักษณะของการกระจายตัวของข้อมูลลมสถิติลม (Luankaeo and Tirawanichakul, 2017) โดยพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวได้แก่

พารามิเตอร์รูปร่าง (Shape Parameter, k) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของการกระจายของสถิติความถี่ของการเกิดลมในช่วงความเร็วต่างๆ โดยในบริเวณที่มีค่าต่ำ จะเป็นตัวแสดงว่าในบริเวณนั้นมีอัตราเร็วลมต่ำบ่อยครั้งกว่าความเร็วลมสูง และในกรณีที่มีค่าสูง ก็จะเป็นตัวแสดงผลซึ่งตรงกันข้ามกัน

พารามิเตอร์สเกล (Scale Parameter, c) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วลมเฉลี่ย เมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยมีค่าสูง ค่า c ก็จะมีค่าสูงเช่นกัน และเมื่ออัตราเร็วลมเฉลี่ยต่ำค่า c ก็จะมีค่าต่ำด้วย ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองค่ามีผลต่อฟังก์ชันการกระจายอัตราเร็วลมเฉลี่ย ดังสมการที่ 2-21

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad 2 - 21$$

2.9. วัสดุองค์ประกอบในการสร้างใบกังหันลม (Material composition for construction of wind blade)

2.9.1 วัสดุเสริมแรงประเภทเส้นใย (Worasinchai and Suwannakij, 2018)

ความแข็งแรงของสารประกอบในการทำโครงสร้างใบของกังหันลมสามารถพิจารณาหรือบ่งบอกได้จากค่าความแข็งแรงของตัวเส้นใยและปริมาตรตัวเนื้อที่ใช้สร้างใบกังหันลมซึ่งมีหลายชนิด แสดงรายละเอียดดังนี้

2.9.1.1 เส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน (glass fiber and carbon fiber)

โดยทั่วไป E-glass fiber หรือใยแก้วที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง ถูกนำมาใช้เสริมในสารประกอบเพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นของตัวใย ความแข็งแรงดึง และแรงอัด ตามสัดส่วน โดยปกติสารประกอบแก้วหรือ อีพ็อกซีหรืออีโพลีอีพอกไซด์ซึ่งเป็นพลาสติกแบบพอลิเมอร์เทอร์โมเซตติงที่ขึ้นรูปจากปฏิกิริยาระหว่างอีพอกไซด์เรซินกับพอลิอามีน ในใบกังหันจะมีน้ำหนักของแก้วอยู่ถึง 75% (Ahmed and Khanna, 2020)

เส้นใยคาร์บอนถือเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความน่าสนใจมาก เส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงมากกว่าและความหนาแน่นที่น้อยกว่าเส้นใยแก้ว ทำให้มีขนาดเล็กกว่าและเบากว่าแต่แข็งแรงกว่า อย่างไรก็ตามเส้นใยคาร์บอนมีความทนทานและแรงกดที่ต่ำ มีความเครียดสูง และราคาแพงกว่า E-glass fiber มาก วัสดุสารประกอบที่มีการเสริมด้วยเส้นใยคาร์บอนจะมีความไวต่อการวางแนวผิดและการวางตัวของลักษณะคลื่น การวางตัวผิดแม้เพียงนิดเดียวอาจส่งผลให้แรงอัดและแรงล้าเกิดการลดลง (Handwerker et al., 2021)

เส้นใยคอมโพสิต (Composite fiber) เป็นเส้นใยที่เกิดจากการผสมของเส้นใยสองชนิด ถือเป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เส้นใยเสริมนอกจากการใช้เส้นใยชนิดใดชนิดหนึ่งล้วน โดยการใช้เส้นใยผสมเป็นการช่วยในเรื่องของการลดน้ำหนักแต่ก็จะเป็นการเพิ่มราคาให้มากขึ้นเช่นกัน การลดลงของน้ำหนักและการเพิ่มของราคาจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนที่ใช้ในวัสดุสารผสม (Park et al., 2019)

2.9.2 วัสดุองค์ประกอบหลัก

โดยทั่วไป วัสดุสารเนื้อพื้นหลักที่ใช้ในการสร้างสารประกอบจะเป็น เทอร์โมเซต หรือ เทอร์โมพลาสติก

2.9.2.1 เทอร์โมเซต (Thermosets)

เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกแล้ว เทอร์โมเซตจะมีข้อได้เปรียบกว่าในความเป็นไปได้ของ เรื่องของพื้นที่ การพันตัวที่อุณหภูมิต่ำ และมีความเหนียวที่ต่ำกว่า โดยเมื่อก่อนได้มีการใช้ เส้นใยสังเคราะห์เรซินในการสร้างสารประกอบ แต่ในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนไปใช้อีพ็อกซีเรซินแทนในการสร้างสารประกอบ โดยพบเห็นได้ส่วนมากในกังหันลมขนาดใหญ่หรือใหญ่มาก (He et al., 2021)

2.9.2.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics)

สารประกอบที่สร้างจากเทอร์โมพลาสติกจะมีจุดเด่นที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง คือความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือการรีไซเคิล แต่ก็มีข้อเสียคือต้องใช้ความร้อนสูงในกระบวนการ ทำให้ใช้พลังงานมากขึ้นและอาจจะส่งผลต่อตัวเส้นใย และยากที่จะผลิตขนาดใหญ่ได้เกิน 2 เมตร และหนาเกิน 5 มิลลิเมตร เนื่องจากความหนืดที่มาก เทอร์โมพลาสติกมีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัว และสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ระหว่างหลอมขึ้นรูป (Wang et al., 2021)

2.10. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD)

Computational Fluid Dynamic (CFD) หรือพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่างๆด้วยการคำนวณทางคณิตศาสตร์บนฐานของสมการการไหลของของไหล ทั้งสมการการเคลื่อนที่ และดุลพลังงาน เช่น การถ่ายเทความร้อน การไหลของอากาศหรือของเหลว การแพร่กระจายของอนุภาค รวมไปถึงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมที่เกิดขึ้น และหาผลเฉลยออกมา โดยสรุปพื้นฐานของ CFD คือ การแก้ปัญหาค่าผลเฉลยของสมการนาเวียร์-สโตกส์ซึ่งเป็นสมการควบคุมการไหล CFD ถูกพัฒนาขึ้นราวๆปี 1930 สำหรับใช้จำลองการไหลรอบทรงกระบอกสองมิติ จากนั้นเมื่อเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้ามากขึ้น จึงทำให้มีการพัฒนาสู่การจำลองแบบสามมิติโดยบริษัทและองค์กรด้านการบินต่างๆ (Belkacem and Paraschivoiu, 2016)

2.10.1 สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

สมการ Navier-Stokes เป็นสมการอนุพันธ์เชิงย่อยที่ใช้ในการอธิบายการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ของของไหล สมการนี้เป็นสมการที่เกิดจากสมการของ Leonhard Euler จากศตวรรษที่ 18 ที่ใช้อธิบายถึงการไหลแบบบีบอัดไม่ได้และไร้ความฝืดของของไหล โดยในปีที่ 1821 Claude-Louis Navier ได้เพิ่มองค์ประกอบของความหนืดเพื่อความสมจริงที่มากขึ้น และเพื่อแก้ปัญหาที่มากขึ้นของการแก้ปัญหาวงการไหล ต่อมาในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 Sir George Gabriel Stokes ได้ปรับปรุงสมการจนสามารถใช้แก้ปัญหาการไหลแบบ 2 มิติอย่างง่ายได้ ความซับซ้อนของความปั่นป่วน (Turbulence) และกระแสวน (Vortices) หรือความยุ่งเหยิงที่เกิดขึ้นในการไหลของของไหลแบบ 3 มิติ ที่มีความเร็วมากขึ้นเป็นตัวบ่งบอกถึงความยากโดยประมาณในการคิดวิเคราะห์เชิงตัวเลข

สมการดั้งเดิมของ Euler ในปัจจุบัน

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla P}{\rho} \quad 2 - 22$$

โดย u คือความเร็วของของไหล P คือความดันของของไหล ρ คือความหนาแน่น

สมการ Navier-Stokes ในปัจจุบัน

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 u \quad 2 - 23$$

โดย ν คือความหนืดเชิงกลของของไหล

2.10.2 Standard k-epsilon Model & Standard k-omega Model

Standard k-epsilon Turbulence Model คือ โมเดลที่ใช้ในการศึกษาและหาคำตอบของการไหลแบบปั่นป่วน โดยจะประกอบไปด้วยสมการสองโมเดลที่อธิบายถึงลักษณะที่เกิดขึ้นของความปั่นป่วน ด้วยค่าเฉลี่ยของสมการการเคลื่อนที่ของสมการ โดยค่าตัวแปรจากสมการแรกคือ turbulent kinetic energy (k) และค่าตัวแปรจากสมการที่สองคือ rate of dissipation of turbulent kinetic energy (ϵ)

สมการ turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad 2 - 24$$

สมการ rate of dissipation of turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (P_k + C_{3\epsilon} P_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad 2 - 25$$

โดย P คือพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้น μ_t คือความหนืดไหลวน Y_M คือค่าที่เกิดจากการผันผวนจากการขยายตัวของการบีบอัด C คือค่าคงที่

Standard k-omega Turbulence Model คือ โมเดลของสมการความปั่นป่วนสองสมการ ที่หาค่าประมาณสำหรับสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes โมเดลนี้จะประมาณค่าความปั่นป่วนด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยค่าตัวแปรจากสมการแรกคือ turbulent kinetic energy (k) และค่าตัวแปรจากสมการที่สองคือ rate of dissipation เฉพาะส่วน ที่ทำให้ turbulent kinetic energy เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายใน (ω)

สมการ คือ turbulent kinetic energy

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma^* v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad 2 - 26$$

สมการ rate of dissipation เฉพาะส่วน

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad 2 - 27$$

2.11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องด้วยวัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สนใจวิเคราะห์และสร้างกังหันลมแกนตั้ง จึงสำรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวกับกังหันลมแกนตั้งเป็นหลัก ดังรายละเอียด

Korprasertsak et al. (2016) ได้ทำการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยการใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Wind booster กับกังหันลมแนวตั้งซาโวนีเยส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลม โดยเป็นช่องโบนำลมเข้า เพื่อนำลมเข้าไปหาตัวกังหันและเพิ่มความเร็ว โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหัน โดยได้มีการจำลองด้วย CFD เพื่อศึกษาก่อนนำไปทดลองใช้งานจริง ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาพบว่า การใช้ Wind booster สามารถเพิ่มความเร็วทางกระแสอากาศได้ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและการผลิตพลังงานของกังหันลมได้

Douak et al. (2017) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกังหันลมแบบดาเรียส ให้สามารถเริ่มการทำงานให้ดีขึ้น โดยควบคุมมุมปะทะและศึกษาแรงปะทะ เพื่อควบคุมค่าทอร์คเริ่มต้นสำหรับการเดินเครื่องของกังหัน โดยผลที่ออกมาจะแสดงถึงความสัมพันธ์ของค่ากำลังสูงสุดกับค่าทอร์คที่เพิ่มขึ้น โดยที่มุมปะทะ 15 องศา เมื่อมีการทำงานถึงระดับคงที่ จะมีอิทธิพลของตัวใบไม่เกิน 0.25 rad (14.38)

Lin et al. (2016) ได้ทำการออกแบบให้ตัวใบกังหันมีการโค้งเป็นรูปคลื่นที่ปลายหางใบ โดยใช้โมเดล NACA0015 ในโปรแกรม ANSYS® Fluent เพื่อดูการไหลและกระแสปั่นป่วนที่มีผลต่อตัวใบปกติ จากนั้น ทำการจำลองให้ตัวปลายหางใบมีความโค้งเป็นรูปคลื่นตามโดยขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่น โดยในงานวิจัยจะใช้โมเดล 2.5D ในการจำลองศึกษาและ 2D สำหรับการตรวจสอบ ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกมาแสดงให้เห็นว่า ตัวใบกังหันที่ออกแบบสามารถเพิ่มแรงผลักให้มากถึง 0.38 -2.31% เมื่อเทียบใบแบบปกติ

Tahani et al. (2017) ได้ออกแบบโมเดลใบกังหันลมของกังหันลมชนิดซาโวนีเยส โดยการใช้กระแสการไหลผ่านอากาศ (Discharge flow) เพื่อให้สามารถใช้ในการระบายอากาศให้กับตัวอาคาร ขั้นตอนในการออกแบบนั้นจะใช้ผลจากการทดลองที่มีอยู่แล้วหรือศึกษาไว้ก่อนหน้า โดยออกแบบเป็น 2 รูปแบบ กล่าวคือ แบบแรก เป็นการออกแบบให้มีรูปร่างตรงกลางของกังหัน ให้มีค่าที่แปรผันในภาคตัดขวาง (cross-section) โดยคำนึงถึงความสูงของโรเตอร์ (rotor) โดยการไหลเข้าของอากาศในกังหันลมแบบซาโวนีเยส อากาศที่ไหลผ่านผิวสัมผัส (tangential flow) ของทรงกรวยที่อยู่ตรงกลาง จะถูกเบี่ยงเบนให้มีความดันต่ำ เพื่อเพิ่ม Discharge flow rate และแบบที่ 2 เป็นการปรับปรุงรูปร่างโดยการบิด

ของตัวกังหันลมเป็นเกลียว ซึ่งทำให้ความดันในพื้นที่ส่วนภายในของ Rotor มีการเปลี่ยนแปลง และเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ Discharge flow แต่ก็จะเป็นการเพิ่มค่าทอร์คเชิงลบ และลดสัมประสิทธิ์ของการทำงานด้วยเช่นกัน ผลจากการศึกษา แสดงให้เห็นว่าการปรับโดยการบิดของกังหันลมแบบซาโวเนียส สามารถลดค่าทอร์คในเชิงลบและเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้ โดยแบบแรกจะมีสัมประสิทธิ์ของพลังงานมากขึ้น 18% และ Discharge flow เพิ่มขึ้น 31% และแบบที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์พลังงานลดลง 12% และ Discharge flow เพิ่มขึ้น 5%

ชนะ และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ตอนกลางของประเทศไทย โดยอาศัยข้อมูลของสถานีวิจัยพลังงานลม ในพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัด นครศรีธรรมราช และจังหวัดสงขลา ทั้งหมด 14 สถานี โดยวัดอัตราเร็วและทิศทางลมที่ระดับความสูง 20 เมตร 30 เมตร และ 40 เมตร วัดความเร็วทุกๆ 1 นาที และบันทึกทุกๆ 10 นาที โดยประมาณค่าอัตราเร็ว ที่ความสูง 50 เมตร ผลการศึกษาพบว่า อัตราเร็วเฉลี่ยที่ระดับความสูง 50 เมตร ทั้ง 14 สถานี มีค่าอยู่ในช่วง 2.6-4.6 m/s ค่าพารามิเตอร์ระดับ 2.8-5.2 m/s และพารามิเตอร์รูปร่าง 1.2-2.3 ระดับของกำลัง ลม -1 ถึง +1

ชนะ และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาศักยภาพลมบริเวณอำเภอหัวไทรของจังหวัด นครศรีธรรมราช ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายเดือนในช่วง มกราคม-ธันวาคม 2551 ที่ระดับ ความสูง 20 30 และ 40 เมตร ผลการวิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์รูปร่างและพารามิเตอร์ระดับจากระเบียบ วิธีกราฟมีค่า 1.52-2.57 และ 3.93-5.81 m/s ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์การแจกแจงไวบูลล์ ความถี่ของอัตราเร็วมีค่าอยู่ในช่วง 2.50-14.00 m/s ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนลมเฉลี่ยรายเดือนมีค่า 0.05-0.52 ความหนาแน่นกำลังลมที่ระดับความสูง 80 90 และ 100 เมตร มีค่าเท่ากับ 721 823 และ 965 W/m² ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในกำลังลมระดับ 5 โดยสรุปได้ว่าพื้นที่อำเภอหัวไทร จังหวัดนครศรีธรรมราช มีศักยภาพลมสูงต่อการพัฒนาพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้า

วรพงศ์ และคณะ (2553) ได้ทำการประเมินศักยภาพพลังงานลมเพื่อประเมินความไปได้ในการ ติดตั้งโรงไฟฟ้าฟาร์มกังหันลมขนาดกลางตามแนวชายฝั่งทะเลของจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยติดตั้ง สถานีตรวจวัดลม จำนวน 10 สถานี เสาถักโครงสามเหลี่ยมสูง 45 เมตร วัดที่ความสูง 20 30 และ 40 เมตร บันทึกข้อมูลทุกๆ 10 นาที ช่วงเดือน มกราคม-ธันวาคม 2551 โดยพิจารณาการผลิตไฟฟ้าจาก กังหันลม โดยผลพบว่า ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันมีค่า 0.03-2.07 จิกะวัตต์ต่อปี และประสิทธิภาพ 0.9-51.5 พื้นที่มีศักยภาพสูงและมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลม

Luankaeo et al. (2017) ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานลมความเร็วลมต่ำในพื้นที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยทำการวัดความเร็วลมที่ระดับความสูง 32 เมตร โดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 3 กิโลเมตรจากตัวมหาวิทยาลัย โดยนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อสร้างผังลมหาอัตราเร็วลมเฉลี่ย ความหนาแน่นกำลังลมเฉลี่ย รวมถึงพารามิเตอร์ไวบูลล์ สรุปได้ว่า มีค่าอัตราเร็วลมเฉลี่ย 3.4 m/s ค่าความหนาแน่นกำลังลมเฉลี่ยเท่ากับ 49 W/m² และค่าพารามิเตอร์รูปร่างเท่ากับ 1.49 โดยทิศทางลมส่วนใหญ่มาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันออก ซึ่งโดยรวมแล้วถือเป็นลมเฉื่อยในมาตราโบฟอร์ต

Sharma et al. (2016) ได้ทำการศึกษากังหันลมรูปแบบ Savonius โดยเน้นไปในเรื่องของประสิทธิภาพการทำงาน (Coefficient of Performance, COP) ด้วยการ Simulation เชิงตัวเลข โดยตัวโมเดลจะเป็นกังหันลม Savonius ที่ทับซ้อนกันเป็นไตรมาส และโมเดลที่ใช้ในการ Simulation คือ Shear Stress Transport (SST) model ในส่วนของ Mesh ได้เน้นความละเอียดหลักในส่วนของชั้นแรกสุดของตัวโมเดลโดยใช้เป็นค่าประมาณ โดยจากการปรับปรุงทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการทำงานที่มากขึ้น โดยประมาณ 8.89 – 13.69%

Sranpat et al. (2017) ได้ทำการศึกษารูปแบบและดีไซน์ที่จะมีผลต่อศักยภาพของกังหันลมแนวตั้ง (VAWT) ที่ความเร็วลมต่ำ ด้วยการ ใช้ CFD ด้วยโปรแกรม X-Flow™ โดยตัวแปรในการออกแบบก็จะประกอบไปด้วย ชนิด รูปแบบ จำนวนของใบ ชนิดของวัสดุ ส่วนสูงและรัศมี โดยผลสรุปของงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต่างๆจะส่งผลต่อการทำงานของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างกัน โดย กังหันลมแบบ Savonius สามารถเลือกใช้ได้ดีที่สุดในกรณีที่มีค่าทอร์คสูงและความเร็วเชิงมุมต่ำ ในขณะที่กังหันลมแบบ Darrieus สามารถเลือกใช้ด้วยความสามารถในการผลิตพลังงานและค่าความเร็วเชิงมุมที่สูงกว่า

Warit et al. (2013) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งในจังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยได้ติดตั้งหอสามเหลี่ยมสูง 120 เมตรในพื้นที่ตำบลพะงัน เกาะพะงัน โดยจะมีจุดวัดสภาพอากาศ 5 จุด รวมไปถึง เครื่องวัดความเร็วลม เครื่องตรวจจับความชื้นสัมพัทธ์ และเครื่องวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อมแบบกระเปาะแห้ง ที่ความสูง 65, 90, 100, 110 และ 120 เมตร โดยเครื่องตรวจจับใบพัดลมจะถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 100 และ 120 เมตร ข้อมูลจะถูกเก็บบันทึกทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่ช่วงเดือนธันวาคม 2011 ถึง พฤษภาคม 2012 ความค่าเร็วลมเฉลี่ยมีค่า 4.28 m/s และค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของกำลังลมมีค่า 85 W/m² อิทธิพลของผลมาจากทิศเหนือ โดยจากข้อมูลเหล่านี้ จึงได้มีการจำลองฟาร์มกังหันขึ้น 9 แบบเพื่อประเมินการทำงาน โดยค่าสมรรถนะของฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งอยู่ในช่วง 0.98-

2.68 นี้แสดงให้เห็นว่าสถานที่และสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมสำหรับการลงทุน อย่างไรก็ตามที่พื้นที่สูงของเกาะนั้นมีความเร็วลมที่สูง ควรจะมีการประเมินในทำนองเดียวกัน

Jompob et al. (2017) ได้ทำการศึกษาและเสนอถึงแนวทางสำหรับการประเมินผลทางด้านเทคนิค เศรษฐกิจ สิ่งแวดล้อม และผลประโยชน์ต่อชุมชน ของโรงไฟฟ้าพลังงานลม โดยเน้นเฉพาะสำหรับประเทศกำลังพัฒนา การประเมินทางด้านเทคนิคจะมีตั้งแต่การประเมินลมในพื้นที่พิจารณาจนไปถึงการประเมินขนาดของกังหันลมจามตลาด การประเมินทางด้านเศรษฐกิจ จะอ้างอิงจากผลการผลิตพลังงานประจำปี โดยจะประมาณรูปแบบกังหันลมตามความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ ในส่วนของผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโรงไฟฟ้าพลังงานลมจะประเมินในเรื่องของเสียง ทัศนวิสัย เงาม และการยินยอมจากชุมชน โดยวิธีการนี้ได้มีการใช้ในพื้นที่เกาะใหญ่จังหวัดสงขลาโดยจะเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานขนาด 20 MW โดยมีค่าความเร็วลมต่ำ เฉลี่ยอยู่ที่ 5.2 m/s ที่ระดับความสูง 100 m จากระดับพื้น โดยโรงไฟฟ้านี้สามารถผลิตไฟได้ 33 GW ชั่วโมง/ต่อปี แต่เมื่อมองในทางด้านการเงินแล้วโรงไฟฟ้านี้ไม่สามารถดำเนินการได้แรงจูงใจทางการเงินของการไฟฟ้าแห่งประเทศไทยในตอนนั้นได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อวิเคราะห์ในด้านของการพัฒนาอย่างยั่งยืนแล้ว โครงการสามารถทำประโยชน์ได้พึงพอใจ

Montri and Rattana (2021) ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มคุณค่าให้กับของเสียทางการเกษตรจากต้นปาล์มน้ำมันโดยการศึกษาคุณสมบัติในการยืดแผ่นไม้อัดยางพาราด้วยผงจากต้นปาล์มน้ำมัน โดยใช้หรือไม่ใช้กรดซิตริกด้วยการทำให้เป็นของเหลวในช่วงการกดด้วยความร้อน ผลการวิจัยพบว่าผงจากต้นปาล์มน้ำมันทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมที่ดีสำหรับไม้อัดยางพารา เมื่อบีบอัดที่อุณหภูมิประมาณ 180 °C เป็นเวลา 5 นาที ความเป็นกรดของผงต้นปาล์มน้ำมันจะมากขึ้นตามปริมาณของกรดซิตริก โดยกรดซิตริกจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมขวางและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยเพิ่มความทนทานต่อน้ำ แต่ก็มีสิ่งที่ควรคำนึงถึงคือปริมาณของกรดซิตริกที่มาก อาจทำให้คาร์โบไฮเดรตโพลีเมอร์เสื่อมคุณภาพลง และอาจไปลงอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ไม่ได้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

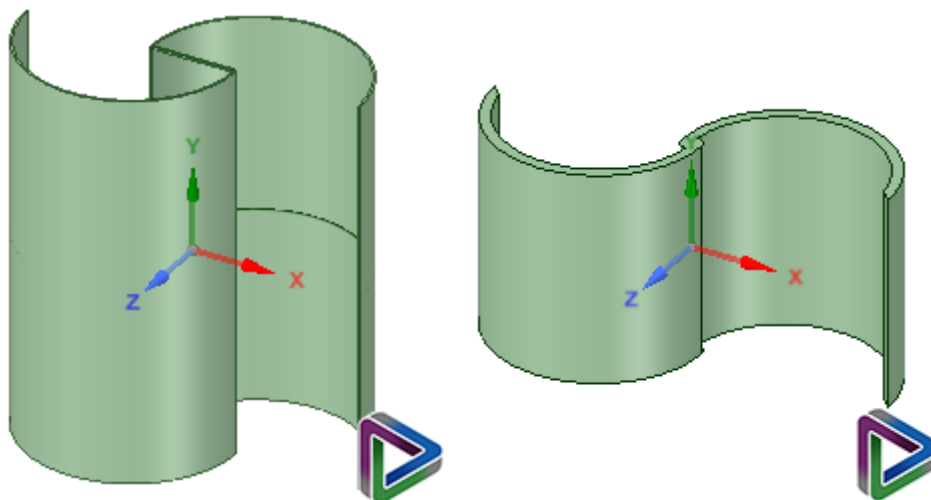
3.1 การศึกษาด้วยการ simulation โดยใช้ CFD

CFD หรือ Computational Fluid Dynamics คือสาขาหนึ่งในกลศาสตร์ของไหลที่ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขและขั้นตอนวิธี (algorithm) ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล เพื่อการนี้ คอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้เพื่อทำการคำนวณนับล้านๆ ครั้ง ก่อนที่จะสร้างแบบจำลองการทำปฏิกิริยาของของไหลและก๊าซต่อขอบผิวซึ่งกำหนดโดยสถานะของขอบเขต แต่ทว่า ผลลัพธ์ที่ได้นั้นก็ยังเป็นเพียงการประมาณการที่ได้จากในหลายๆ กรณีเท่านั้น ถึงแม้ว่าจะใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ความเร็วสูงในการคำนวณก็ตาม อย่างไรก็ตาม การพัฒนาของโปรแกรมในปัจจุบัน ความแม่นยำและความเร็วในการคำนวณสถานะการณ์ที่ซับซ้อนนั้นได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นเรื่อยๆ เช่น การจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โปรแกรมนี้แต่เดิมถูกนำมาใช้กับการจำลองกังหันลม แต่ปัจจุบันถูกนำมาใช้ในการทดสอบการบินด้วย

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณในวิทยาพนธ์เล่มนี้คือ ANSYS® fluent โปรแกรม ANSYS® เป็นโปรแกรมที่นำมาใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม โดยมีความแม่นยำในการประมวลผล และมีเทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถวิเคราะห์ได้ทุกศาสตร์ ทางด้านวิศวกรรม ด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) ด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ด้านอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) รวมถึงด้านที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) นอกจากนี้โปรแกรม ANSYS ยังสามารถวิเคราะห์ทุกศาสตร์ร่วมกันได้โดยไม่มีข้อจำกัด ทำให้เป็นโปรแกรมที่นิยมอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม

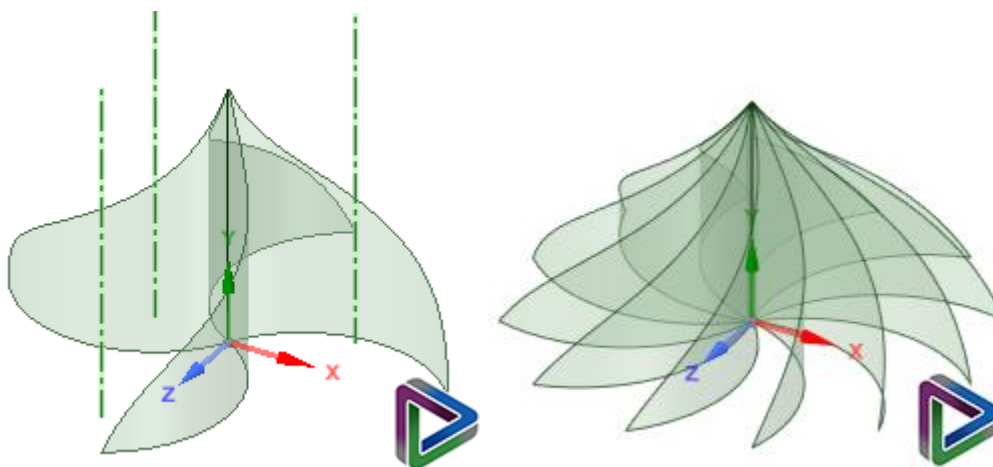
3.1.1 การออกแบบโมเดลทดลอง

ในการศึกษาด้วยโปรแกรม ANSYS ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและออกแบบรูปแบบของกังหันแกนตั้งลมแบบต่างๆ ไว้ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ได้แก่ แบบจำลองกังหันลมโมเดลที่ 1-8 ตามรูปที่ 3.1-3.8 ตามลำดับ



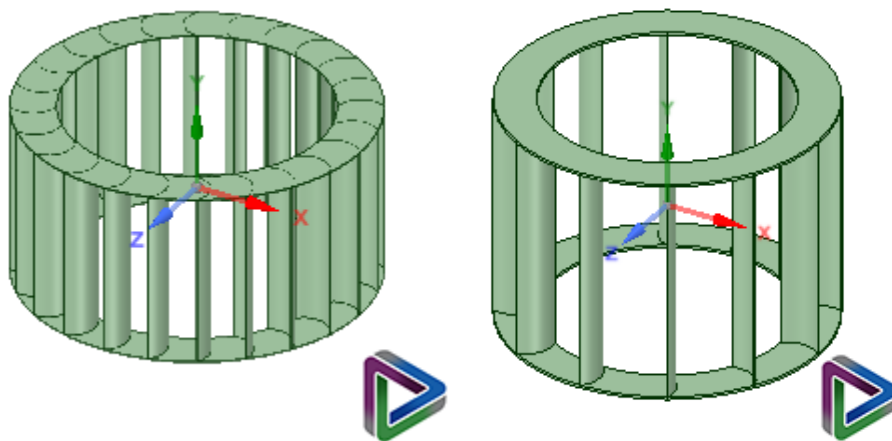
รูปที่ 3-1 โมเดลที่ 1.1 (ซ้าย) และ 1.2 (ขวา) ใบกังหันโค้งเข้าหากัน

โมเดลที่ 1.1 และ 1.2 เป็นโมเดลที่สร้างแบบมาจากกังลมประเภท Savonius โดยโมเดลทั้ง 2 นี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการสร้างโมเดล 3D ครั้งแรกด้วยโปรแกรม Spaceclaim® โดยเป็นรูปแบบใบโค้ง 2 ใบหันโค้งเข้าหากันเพื่อให้ลมดันใบ เพื่อให้เกิดแรงดันลมส่งจากใบหนึ่งไปสู่อีกใบหนึ่ง



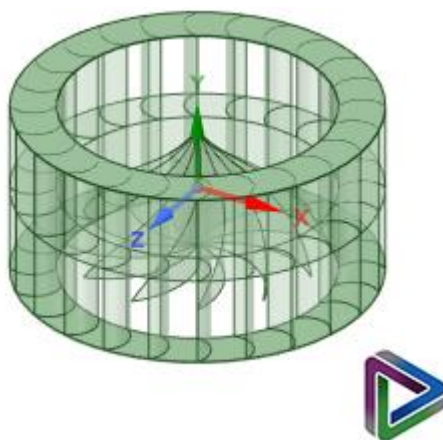
รูปที่ 3-2 โมเดลที่ 2.1 (ซ้าย) และ 2.2 (ขวา) ใบกังหันลมรูปกรวยคว่ำ

โมเดลที่ 2.1 และ 2.2 เป็นแค่โมเดลที่ผู้วิจัยได้ลองสร้างขึ้นหลังจากได้เห็นใบพัดที่ใช้สำหรับเข็ลลม ซึ่งสังเกตได้ตามตึกอาคารต่างๆ ในเมือง เนื่องด้วยตอนที่ได้เห็น สภาพอากาศลมไม่แรงนัก แต่ใบพัดดังกล่าวกลับหมุนได้เร็ว แต่ใบพัดที่เห็นมีขนาดค่อนข้างเล็ก



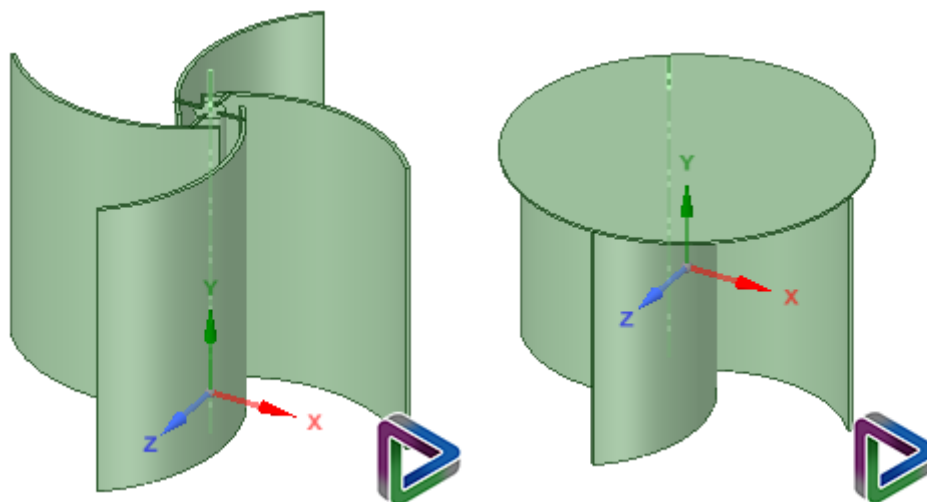
รูปที่ 3-3 โมเดลที่ 3.1 (ซ้าย) และ 3.2 (ขวา) ใบกังหันลมรูปปีกทรงกระบอก

โมเดลที่ 3.1 และ 3.2 เป็นโมเดลของ Wind Booster ซึ่งมีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ชิ้นนี้สามารถช่วยให้กังหันลมทำงานดีขึ้น



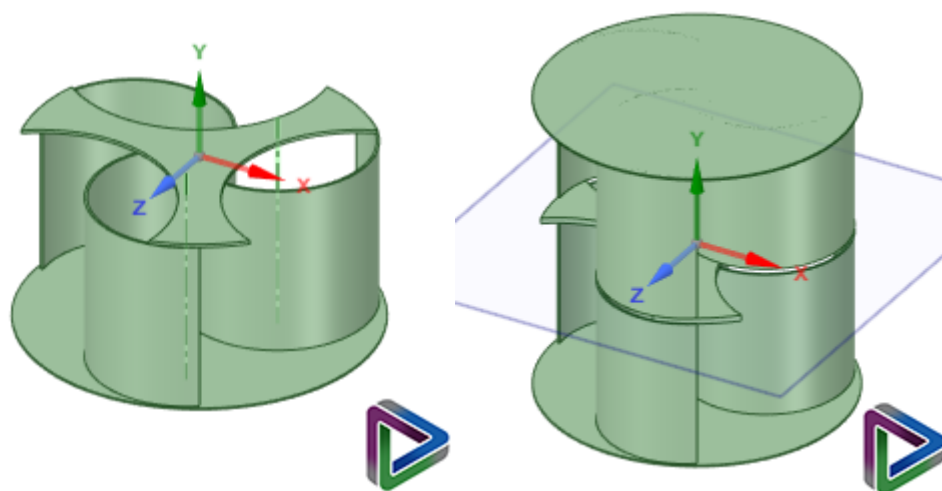
รูปที่ 3-4 โมเดลที่ 4 ใบกังหันลมรูปทรงกระบอกถั

โมเดลที่ 4 คือการนำโมเดลที่ 2.2 และ 3.1 มารวมกันให้เป็นโมเดลตัวเดียวด้วยโปรแกรม Spaceclaim



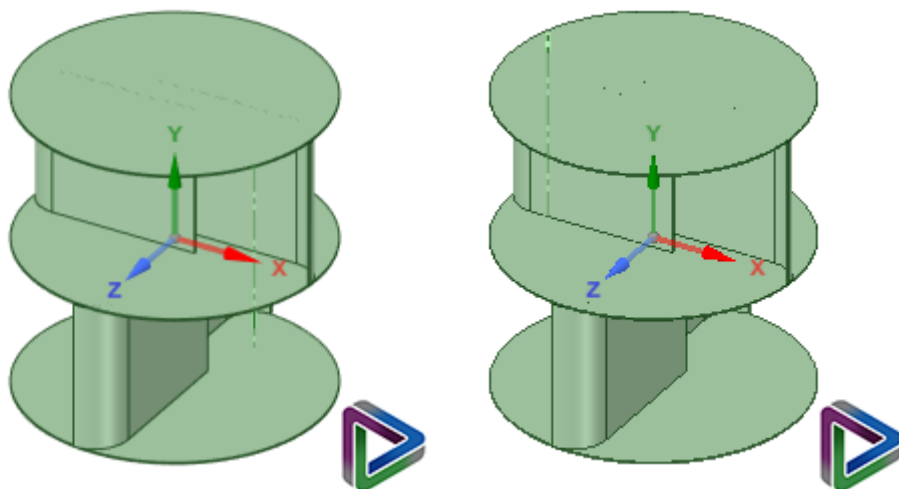
รูปที่ 3-5 โมเดลที่ 5.1 (ซ้าย) และ 5.2 (ขวา) ใบกังหันรูป 2S และ 2S ฝาปิด

โมเดลที่ 5.1 และ 5.2 เป็นกังหันลมแบบ Savonius แบบ 4 ใบ โดยโมเดลที่ 5.2 คือการนำโมเดลที่ 5.1 มาสร้างแผ่นวงกลมปิดข้างบน โดยคาดว่าอาจจะทำให้ลมเคลื่อนที่ผ่านไปได้ดีขึ้น



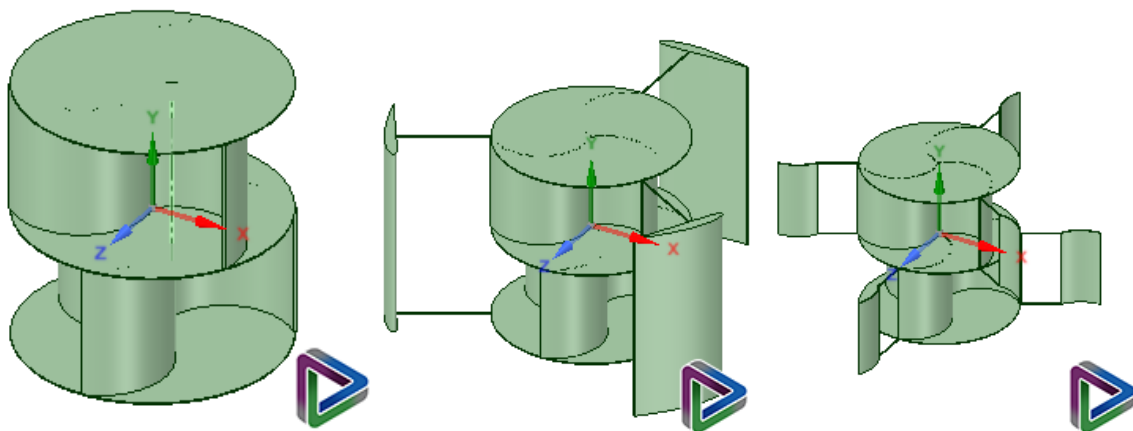
รูปที่ 3-6 โมเดลที่ 6.1 (ซ้าย) และ 6.2 (ขวา) ใบกังหันลมรูป 3 แฉก และ 3 แฉกฝาปิด

โมเดลที่ 6.1 จะเป็นกังหันลมแบบ Savonius โดยปิดส่วนล่างด้วยแผ่นวงกลม โดยแผ่นบนเป็นตัวยึดและเปิดช่องเป็นรูไว้ โมเดลที่ 6.2 เป็นการสร้างส่วนสมมาตรขึ้นด้านบนจากโมเดลที่ 6.1



รูปที่ 3-7 โมเดลที่ 7 (ซ้าย) และ 7.1 (ขวา) ใบกังหันลมทรงกระบอกแบบมีแกน และไม่มีแกน

โมเดลที่ 7 เป็นการนำกังหันลมแบบ Savonius มาสร้างโดยออกแบบให้กังหันลมแบบ 2 ชั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยจะออกแบบโค้งไว้ที่ปลายใบพัดทั้ง 4 และมีช่องตรงกลางกังหันเพื่อให้ลมไหลผ่านได้ โมเดลที่ 7.1 คือการนำโมเดลที่ 7 มาใส่แกนเข้าไปตรงแกนโมเดลเพื่อให้ตรงกับโมเดลที่สร้างออกมาทดสอบในส่วนของวัสดุ



รูปที่ 3-8 โมเดลที่ 8 (ซ้าย) 8.1 (กลาง) และ 8.2 (ขวา) ใบกังหันลมตัวสามแฉก 2 ชั้นทรงกระบอก และกังหันลมเพิ่ม airfoil และกังหันลมเพิ่มใบโค้ง

โมเดลที่ 8 จะเป็นกังหันลมแบบ Savonius ที่มี 2 ชั้นและมีใบโค้งทั้งหมด 6 ใบ ส่วนบน 3 ใบ ส่วนล่าง 3 ใบ โดยใบจะเชื่อมติดกันที่กลางกังหัน ทำให้มีช่องสำหรับให้ลมผ่าน โมเดลที่ 8.1 และ 8.2 จะเป็นการนำโมเดลที่ 8 มาสร้างส่วนเสริมออกมาจากตัวใบ โดยส่วนที่เสริมเข้าไปในโมเดลที่ 8.1 คือ Airfoil nasca 0012 โมเดลที่ 8.2 คือใบโค้ง ทั้งนี้จุดประสงค์คือเพื่อทดสอบว่าส่วนที่เสริมเข้าไปสามารถช่วยให้กังหันลมเริ่มทำงานได้เร็วขึ้นหรือไม่

ข้อสรุปการสร้างโมเดล

โมเดลที่ 1.1, 1.2, 2.1 และ 2.2 เป็นแค่โมเดลที่ผู้วิจัยได้ทดลองสร้างขึ้นมาเพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมวาด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงไม่นำโมเดลที่กล่าวมาจำลอง

โมเดลที่ 5.1, 5.2 เป็นการสร้างกังหันปิดส่วนบนไว้โดยคาดว่าจะช่วยเพิ่มแรงที่เกิดจากการดันของลมจากการไหลลงข้างล่าง โมเดลที่ 6.1, 6.2 เป็นสร้างสร้างกังหันปิดส่วนล่างไว้โดยคาดว่าจะช่วยเพิ่มแรงที่เกิดจากการไหลของลมขึ้นข้างบน แต่ทว่าหลังจากได้ลอง Simulation เพื่อดู Streamline แล้ว การไหลของอากาศไม่เป็นได้ตามที่คาดการณ์ เพิ่มเติมด้วยคำแนะนำจากผู้วิจัยผู้อื่นทำให้สรุปได้ว่า โมเดลทั้ง 4 ไม่เหมาะจะนำมาศึกษา

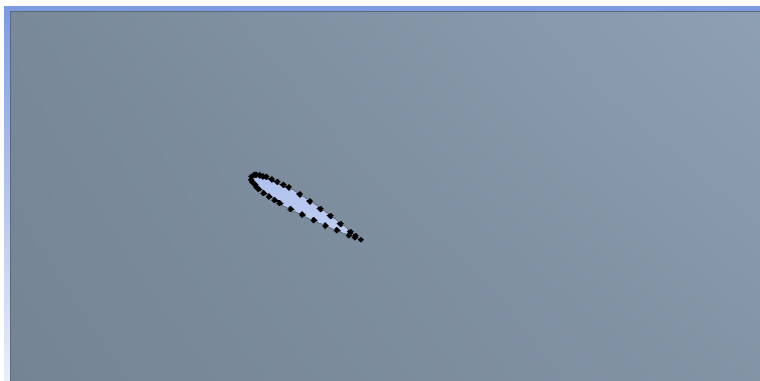
โมเดลที่ 7 และ โมเดลที่ 8 เป็นการใช้แบบจากโมเดลที่ 5.2 และ 6.1 มาออกแบบใหม่ โดยปิดส่วนบนและล่างของกังหันลมและทำเป็น 2 ชั้น โดยโมเดลที่ 7 มีช่องว่างระหว่างใบที่แกนกลางเพื่อให้ลมไหลผ่านเพื่อให้ลมไหลผ่านไปดันใบกังหันอีกอัน โมเดลที่ 8 จะไม่มีช่องว่างตรงกลางกังหัน แต่จะมีจำนวนใบที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่รับลมแทน

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยด้วยโปรแกรม ANSYS® Fluent ผู้วิจัยได้เลือก โมเดลที่ 7 โมเดลที่ 7.1 โมเดลที่ 8 โมเดลที่ 8.1 โมเดลที่ 8.2 มาใช้ทดลอง

3.1.2 การทดลองใช้โปรแกรม

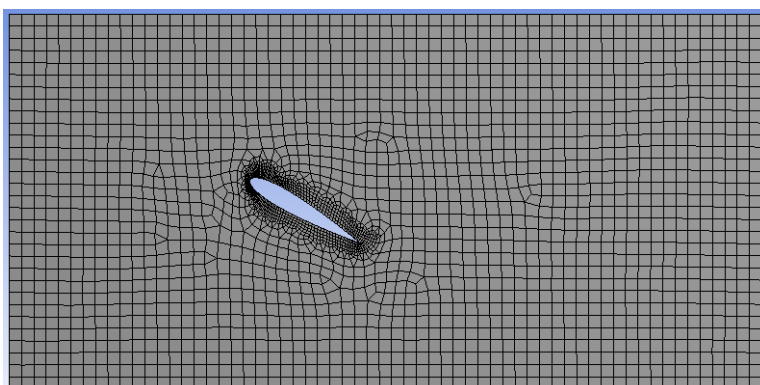
3.1.2.1 การจำลองแบบ 2D (2 Dimension simulation)

ในตอนเริ่มของการศึกษา ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาการใช้โปรแกรม โดยเริ่มที่การทำการศึกษาแบบ 2D เป็นอันดับแรก โดยจะตั้งค่ารูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3-9 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) ของการออกแบบสองมิติ 2D (2D Geometry)

โดยขั้นตอนต่อไปจะทำการสร้าง Mesh โดยใช้ Elemental size ขนาด 0.001 ได้ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3-10 Mesh อย่างง่ายของแบบจำลอง 2 มิติ (2D Model)

หลังจากการสร้าง Mesh เสร็จสิ้น ในขั้นตอนของ Setup Simulation จะใช้โมเดล k-epsilon ในการ Simulation โดยใช้ความเร็วลมที่ 5 m/s และดูผลการจำลองและวิเคราะห์เมื่อเสร็จสิ้น

3.1.3 การจำลองแบบ 3D (3 Dimension Simulation)

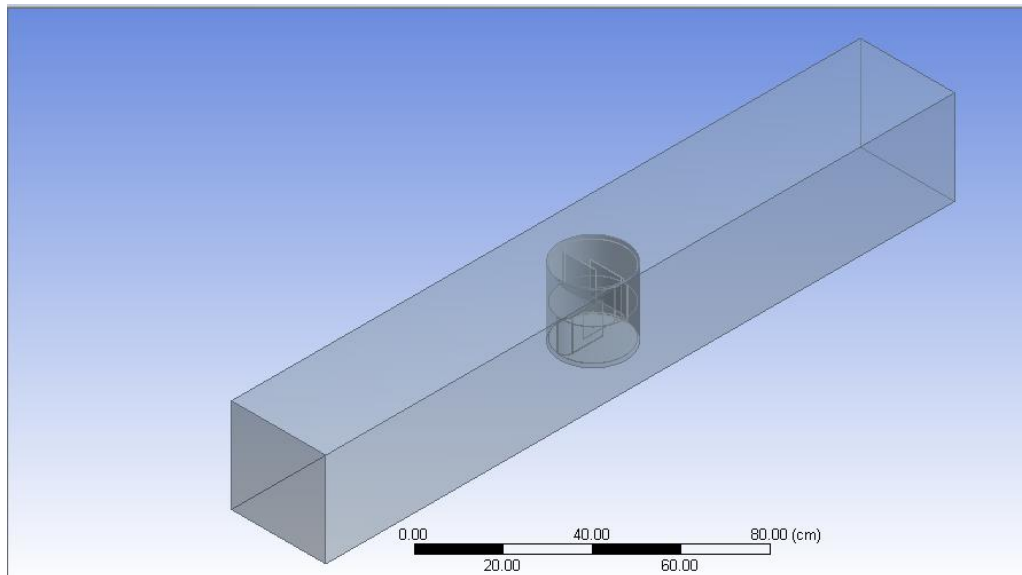
การทดลอง simulation แบบ 3D โมเดลที่ 7 ในตอนเริ่มของการ simulation แบบ 3D ผู้วิจัยได้ใช้ เทคนิคการ simulation ที่เรียกว่า dynamic mesh method ในการทดลอง

3.1.3.1 การศึกษาโมเดลที่ 7

ในการ Simulation โมเดลที่ 7 จะทำการสร้างรูปแบบสำหรับการ simulation ไว้ดังรูปที่ 3.11 โดยเป็นทางเดินลมสี่เหลี่ยมขนาด $200 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ โดยขนาดของอุโมงค์ลมนี้จะอ้างอิงมาจากอุโมงค์จากห้องปฏิบัติการพลังงานที่ตึกสิรินธร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ พื้นที่หมุนมีความสูง 21 cm เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่หน้าวงกลมเท่ากับ 21 cm โดยโมเดล 7 จะมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

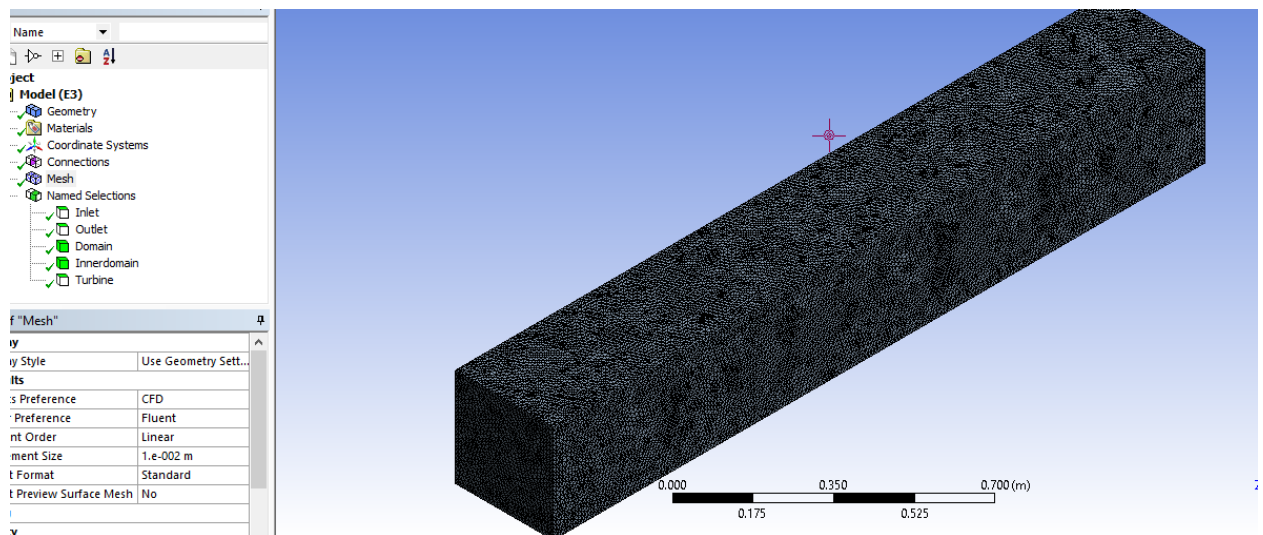
ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 7

ลักษณะของโมเดล	รายละเอียด
จำนวนใบ	2x2 (ทั้งสองชั้น)
ความสูง	20 cm
รัศมี	10 cm
ความหนาของใบ	0.15 cm
ความหนาแผ่นวงกลม	0.1 cm
ความโค้งปลายใบ	90 องศาเทียบจุดศูนย์กลางวงกลม
ช่องระหว่างใบพัดทั้งสอง	2 cm
วัสดุที่ใช้อ้างอิงในการจำลอง	อะคริลิก
มวล	217.0957 g
โมเมนต์ความเฉื่อย	0.00092 kg.m^2



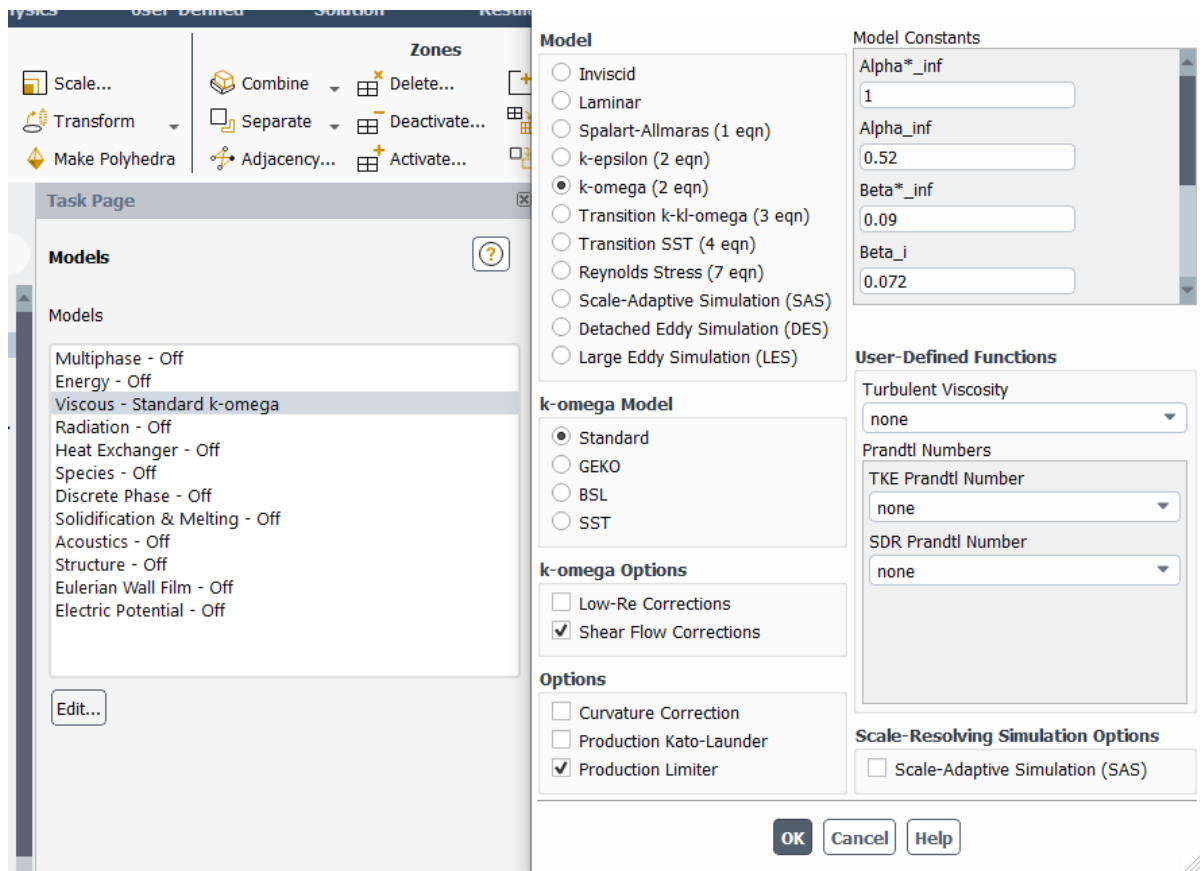
รูปที่ 3-11 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดลที่ 7

ในส่วน mesh จะใช้ element size ขนาด 0.01 m และตั้งชื่อส่วนต่างๆ ไว้ดังนี้ ทางเดินลม Domain พื้นที่หมุน Inner-domain กังหัน turbine ทางเข้าลม Inlet และทางออกลมเป็น Outlet ซึ่งเมื่อจัดการในส่วน mesh แล้วก็จะได้ดังรูปที่ 3.12



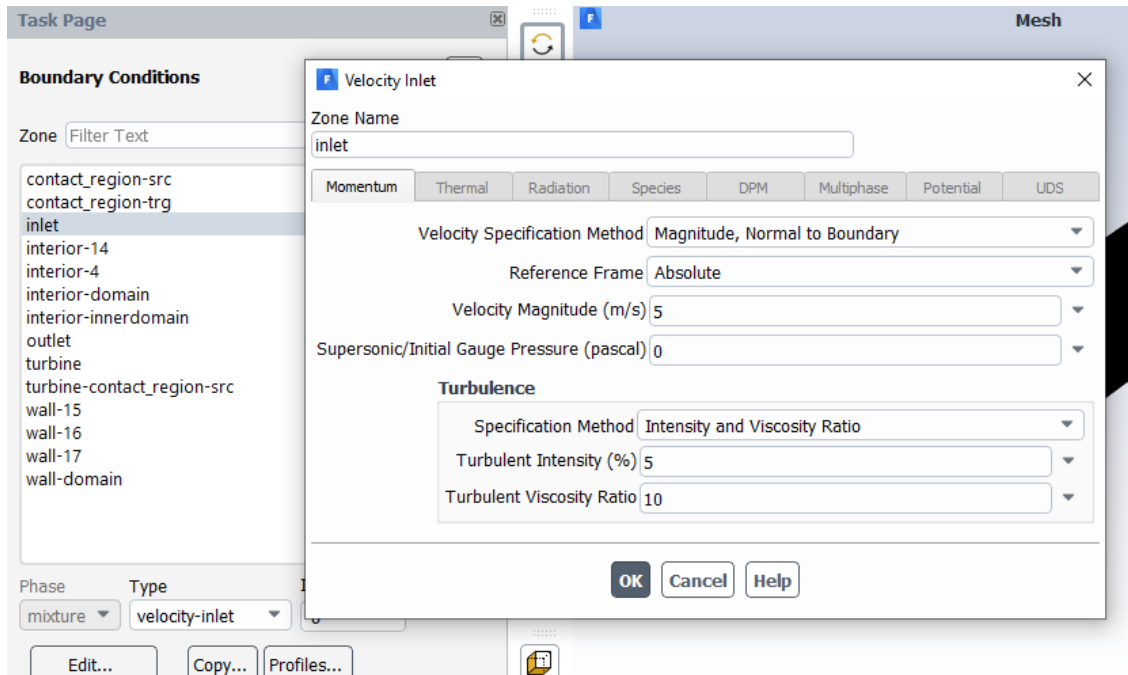
รูปที่ 3-12 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 7

ในส่วน set up โมเดลที่ใช้จะเป็น Viscous model k-omega ดังแสดงในรูปที่ 3.13



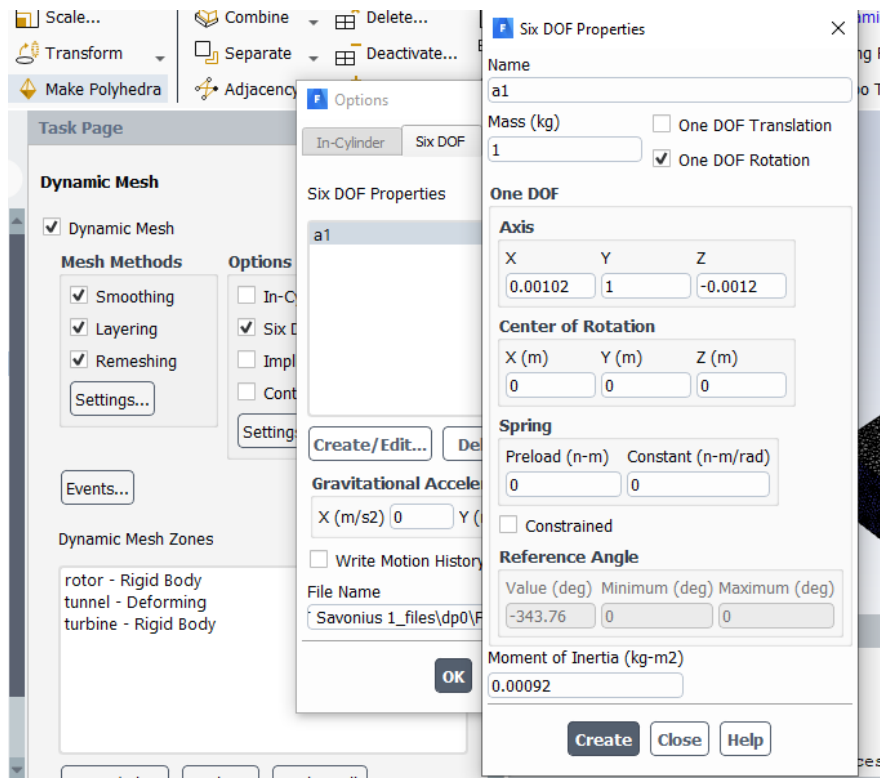
รูปที่ 3-13 โมเดลการจำลองสำหรับกังหันลมโมเดลที่ 7

สำหรับในส่วนของ Boundary condition ส่วน Inlet จะใช้ความเร็วลมที่อ้างอิงมากจากบริเวณภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมเก็บข้อมูล โดยจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3-5 m/s ที่ความสูงประมาณ 30 เมตรจากระดับน้ำทะเล (Luankaeo and Tirawanichakul, 2017)



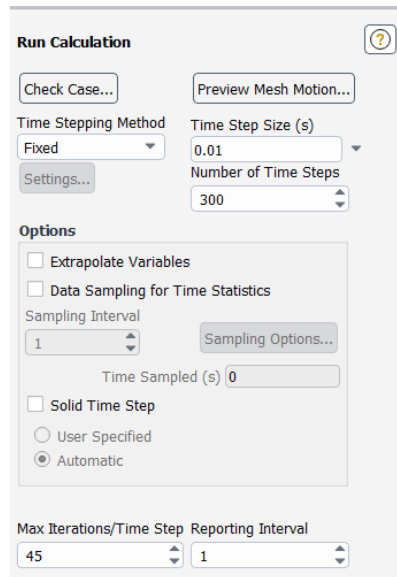
รูปที่ 3-14 ค่าความเร็วลมที่ใช้ในการจำลองของกังหันลมโมเดลที่ 7

ในการศึกษาประสิทธิภาพจะใช้ Dynamic mesh method ในการศึกษา โดยในส่วน Six DOF (Degree of Freedom) จะใช้ค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยที่เป็นผลมาจากวัสดุอะลูมิเนียม ซึ่งจะได้ค่าประมาณ 0.00092 kg.m^2 และตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุเป็น $(0.00102, 1, -0.00123)$



รูปที่ 3-15 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมโมเดลที่ 7

ในส่วน Calculation หรือการคำนวณจะใช้ขนาดเวลาแต่ละช่วงห่างกัน 0.01 วินาที และมีจำนวนช่วง time-step ทั้งหมด 300 time-step และตั้งค่าจำนวนรอบของการหาคำตอบสูงสุด 45 รอบต่อ 1 time-step



รูปที่ 3-16 จำนวนและขนาดของ Time-step สำหรับกังหันลมโมเดลที่ 7

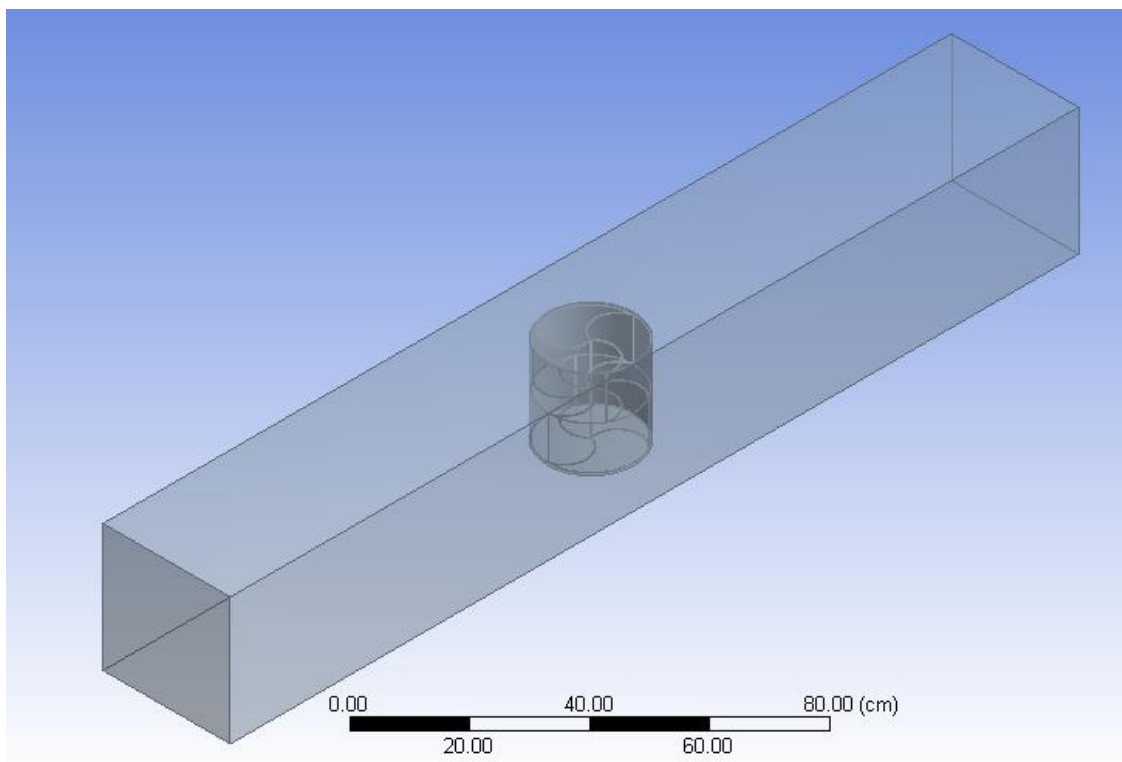
จากนั้นเมื่อจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราก็จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการ simulation โดยในส่วนแรกก็จะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความเร็รรอบของกังหันลม จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ค่าทอร์คและค่าประสิทธิภาพ

3.1.3.2 การศึกษาโมเดลที่ 8

รูปแบบสำหรับโมเดลที่ 8 นั้นจะมีความคล้ายกับโมเดลที่ 7 โดยทางเดินลม ขนาด $200 \times 30 \times 30$ cm³ และมีพื้นที่หมุน หน้าตัด 21 cm และสูง 21 cm โดยโมเดลที่ 8 จะมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

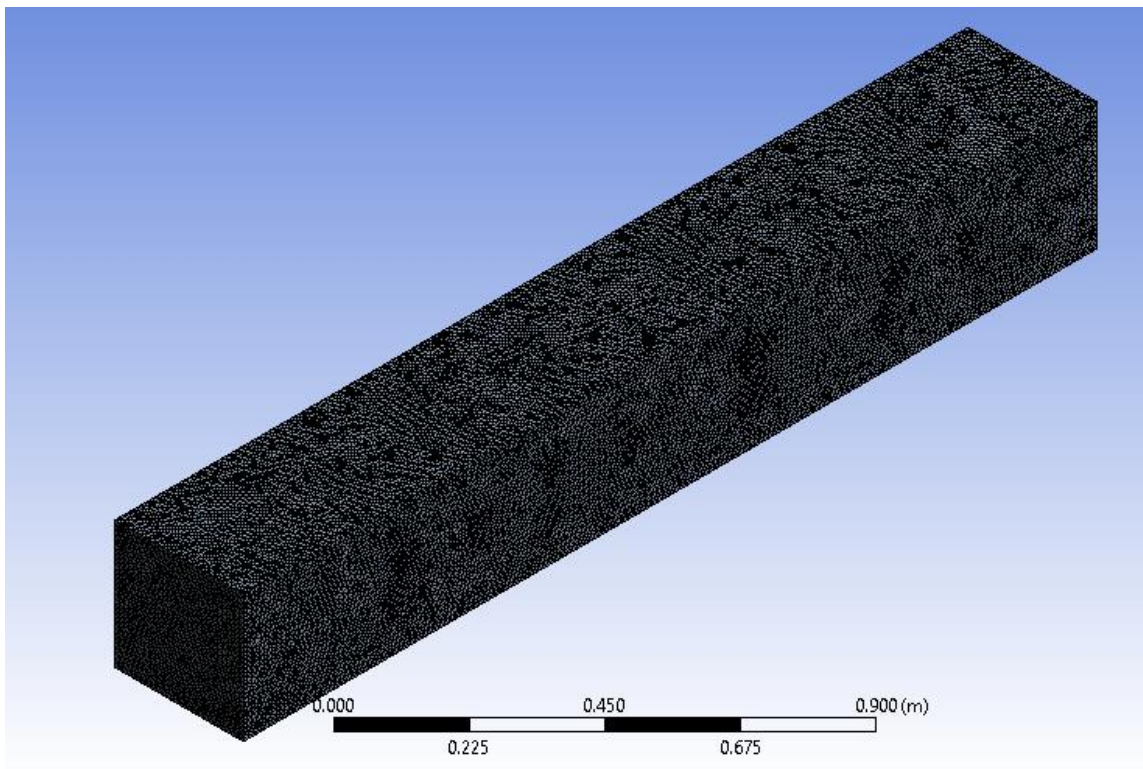
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 8

ลักษณะของโมเดล	รายละเอียด
จำนวนใบ	3x3 (ทั้งสองชั้น)
ความสูง	20 cm
รัศมี	10 cm
ความหนาของใบ	0.15 cm
ความหนาแผ่นวงกลม	0.1 cm
ความโค้งงอของใบ	150 องศา เทียบจุดศูนย์กลางวงกลม
วัสดุที่ใช้อ้างอิงในการจำลอง	อะคริลิก
มวล	306.1086 g
โมเมนต์ความเฉื่อย	0.0014 kg.m ²



รูปที่ 3-17 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดลที่ 8

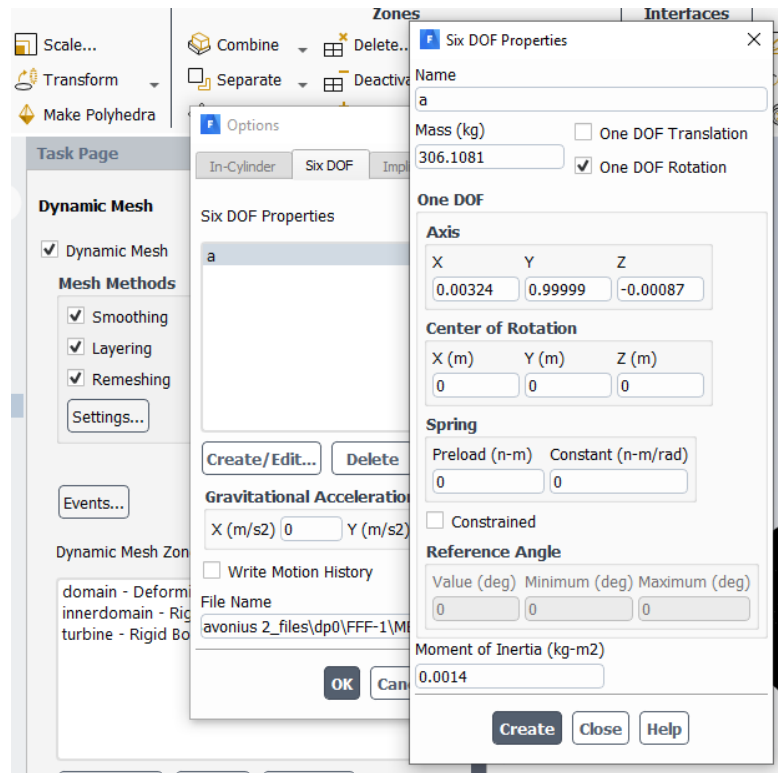
ในส่วน mesh ก็จะใช้ element size ขนาด 0.01 m และตั้งชื่อส่วนต่างๆไว้ดังนี้ ทางเดินลม Domain พื้นที่หมุน Inner-domain กังหัน turbine ทางเข้าลม Inlet และทางออกลมเป็น Outlet ซึ่งเมื่อจัดการในส่วน mesh แล้วก็จะได้ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3-18 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 8

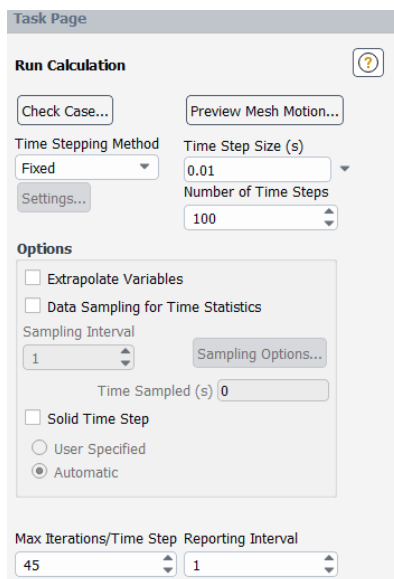
ในส่วน set up จะใช้ model viscous k-omega เหมือนโมเดลที่ 7 และในส่วน Boundary condition จะใช้ความเร็วลมประมาณ 3 - 5 m/s

ในส่วน Dynamic mesh ใน Six DOF จะใช้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากค่าของวัสดุอะลูมิเนียมซึ่งมีค่า 0.0014 kg.m^2 (Iqbal Khan et al., 2021) และ ใช้พิกัดจุดศูนย์กลางวัตถุ (0.00324, 0.99999, -0.00087)



รูปที่ 3-19 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมโมเดลที่ 8

ในส่วน Calculation หรือการคำนวณจะใช้ช่วงเวลาห่างกัน 0.01 s และมีจำนวนช่วง time-step 300 time-step และตั้งค่าจำนวนรอบของการหาค่าตอบสูงสุดที่ 45 รอบต่อ 1 time-step



รูปที่ 3-20 จำนวนและขนาดของ Time-step สำหรับกังหันลมโมเดลที่ 8

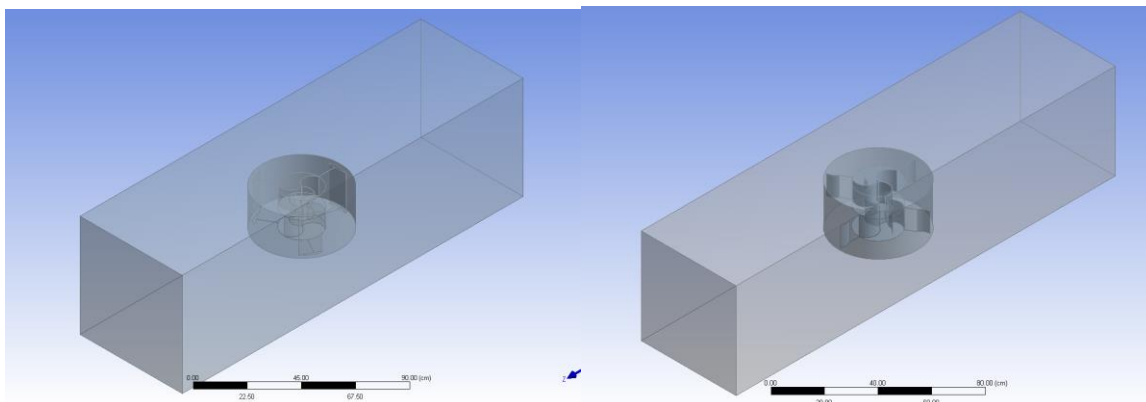
จากนั้นเมื่อจำลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราก็จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการ simulation โดยในส่วนแรกก็จะทำการวิเคราะห์ในเรื่องของความเร็รรอบของกังหันลม จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ค่าทอร์ค และค่าประสิทธิภาพ

3.1.3.3 การศึกษาโมเดลที่ 8.1 และ 8.2

โมเดลที่ 8.1 และ 8.2 เป็นการใช้โมเดลที่ 8 มาดัดแปลง เพื่อศึกษาว่าการเพิ่มใบที่ยื่นออกไปจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมได้หรือไม่ โดย โมเดลที่ 8.1 จะเป็นการ เพิ่มใบ Airfoil เข้าไป 3 ใบ ดังรูปที่ 3.8 (กลาง) โมเดลที่ 8.2 จะเป็นการติดใบรับลมทรงโค้งคล้ายๆใบของ Savonius เข้าไป 6 ใบ ดังรูปที่ 3.8 (ขวา) ขนาดของทางเดินลม และพื้นที่หมุนของโมเดล 8.1 และ 8.2 จะใช้ขนาดเท่ากัน โดยขนาดของทางเดินลมที่จะใช้ Simulation ก็จะใช้ขนาดใหญ่ เพื่อให้พอดีกับ ขนาดของโมเดลที่ใหญ่ขึ้น เป็นขนาด $50 \times 50 \times 200 \text{ cm}^3$ และ พื้นที่หมุนซึ่งใช้ครอบกังหันจะเป็น $41 \times 22 \text{ cm}^3$

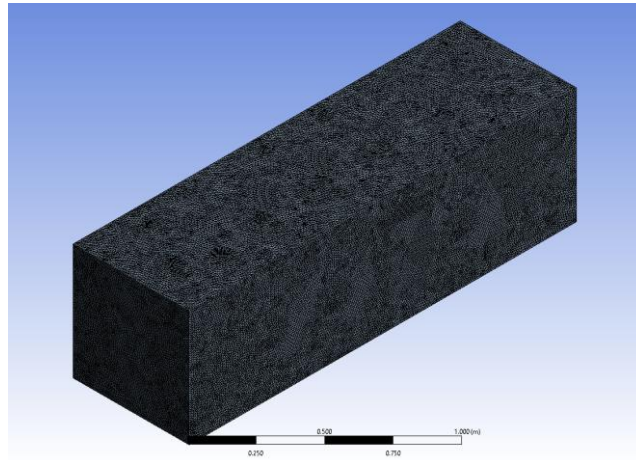
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 8.1 และ 8.2

ลักษณะของโมเดล	รายละเอียด	
	8.1	8.2
จำนวนใบตัวหลัก	3x3 (ทั้งสองชั้น)	3x3 (ทั้งสองชั้น)
ส่วนที่เพิ่มเข้าไป	Airfoil NACA0012 3 ชั้น	ใบโค้ง 6 ใบ 60 องศา บน3 ล่าง3
ความสูงตัวหลัก	20 cm	20
รัศมีตัวหลัก	10 cm	10
ความหนาของใบ	0.15 cm	0.15 cm
ความหนาแผ่นวงกลม	0.1 cm	0.1 cm
ความโค้งงอของใบตัวหลัก	150 องศาเทียบจุดศูนย์กลางวงกลม	150 องศาเทียบจุดศูนย์กลางวงกลม
วัสดุที่ใช้อ้างอิงในการจำลอง	อะคริลิก	อะคริลิก
มวล	899.7959 g	345.0017 g
โมเมนต์ความเฉื่อย	0.01614 kg.m ²	0.00259 kg.m ²



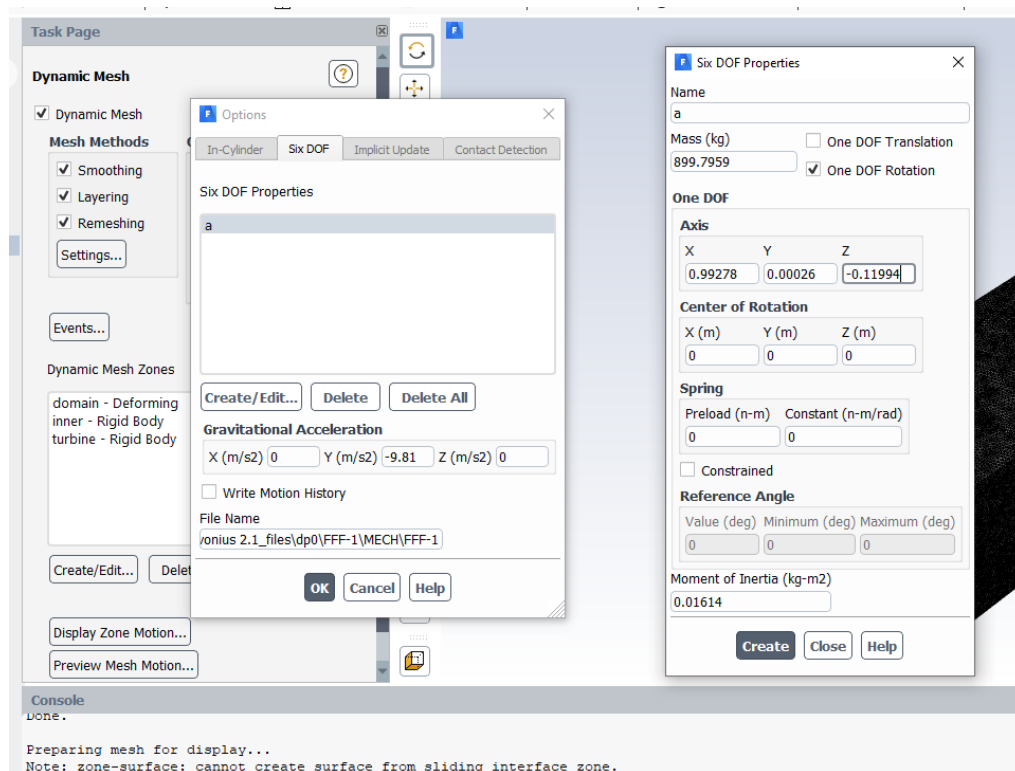
รูปที่ 3-21 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดลที่ 8.1 และ 8.2

ในส่วนของ Mesh จะใช้ element size 0.01 ด้วยกันทั้ง 2 โมเดล และชื่อส่วนต่างๆก็จะตั้งเหมือนกัน ทั้ง inlet, outlet, domain, inner-domain, turbine

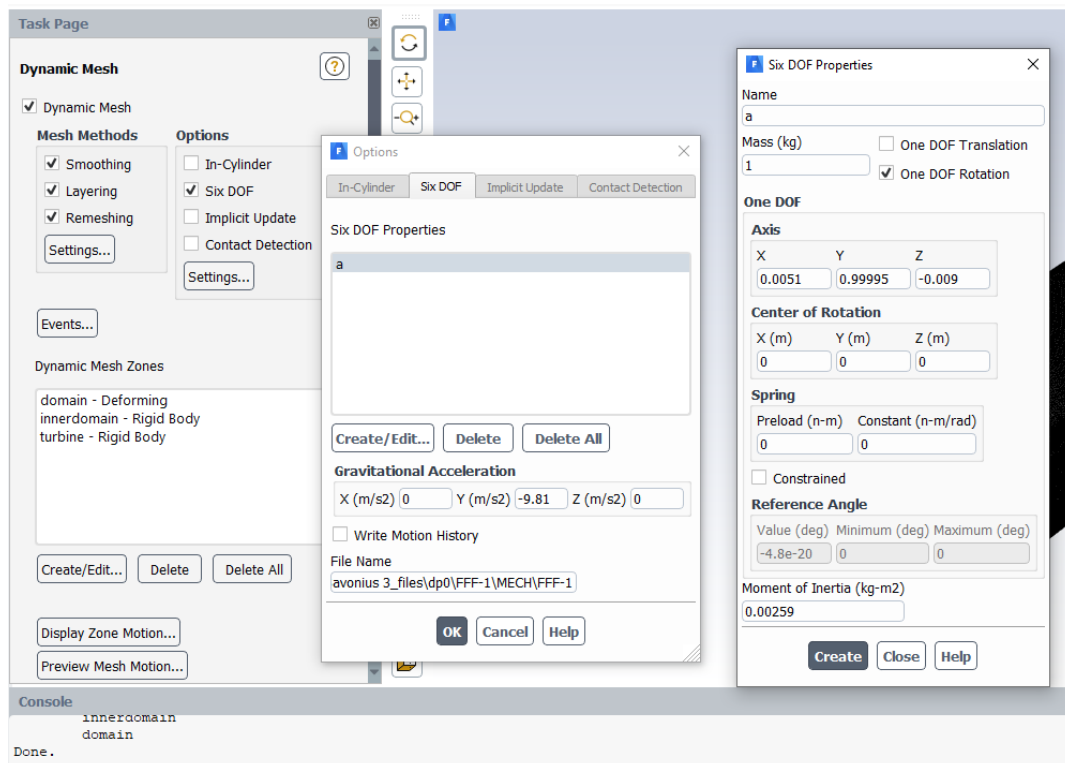


รูปที่ 3-22 Mesh ของโมเดลกังหันลมที่ 8.1 และ 8.2

ในส่วนของการ setup จะยังคงใช้ โมเดล Viscous k-omega ส่วน boundary condition จะใช้ ความเร็วลมที่ inlet ประมาณ 3 - 5 m/s ในส่วนของ dynamic mesh โมเดลที่ 8.1 จะใช้ ข้อมูล 6DOF ตามรูปที่ 3.23 และ 8.2 จะใช้ข้อมูลของ 6DOF ตามรูปที่ 3.24 โดยวัสดุที่ใช้จะเป็นอะคริลิกทั้งสองโมเดล



รูปที่ 3-23 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมโมเดลที่ 8.1



รูปที่ 3-24 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางวัตถุและค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันลมโมเดลที่ 8.2

ในส่วนของการคำนวณ ช่วงเวลาห่างกัน 0.01 s และมีจำนวนช่วง time-step 300 time-step และตั้งค่าจำนวนรอบของการหาค่าตอบสนองสูงสุดที่ 45 รอบต่อ 1 time-step และเมื่อ Simulation เสร็จสิ้น ก็จะนำผลมาวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดูว่าการติดส่วนเสริมสามารถช่วยการทำงานได้หรือไม่

3.2 การศึกษาเรื่องชนิดวัสดุที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

วัสดุที่จะใช้สร้างกังหันมีผลต่อกังหันลมในเรื่องของการทำงาน เนื่องด้วยวัสดุที่ต่างชนิดกันจะทำให้หน้าหนักของกังหันลมต่างกันไปด้วย และเนื่องด้วยค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยของกังหันเป็นผลโดยตรงมาจากน้ำหนักและ ความหนาแน่นของวัสดุ ดังนั้นประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมก็เปลี่ยนแปลงไปตามวัสดุที่ใช้ด้วย

3.2.1 การจำลอง (Simulation)

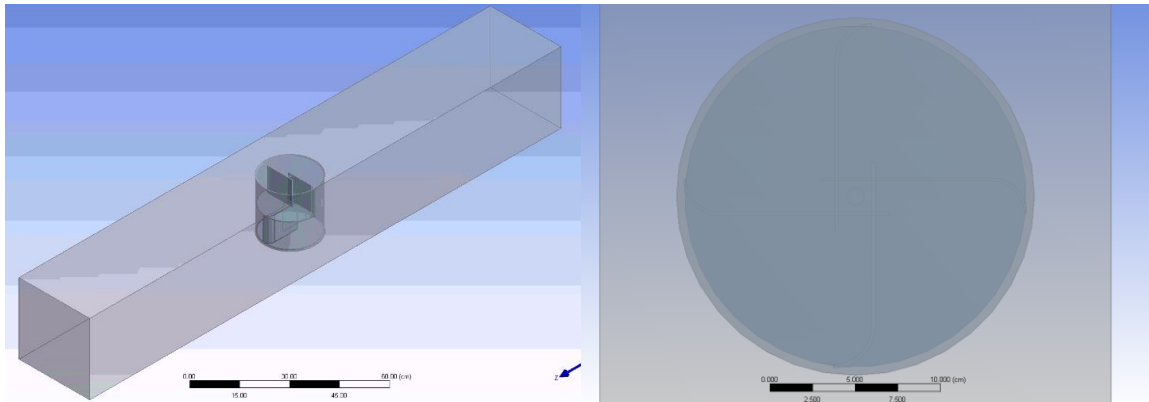
การจำลองแบบด้วยวัสดุต่างชนิดกันด้วยสองวัสดุ 2 ชนิด โดยวัสดุแรกคือ อะคริลิก เนื่องด้วยน้ำหนักของวัสดุที่เบาและตัดโค้งง่าย และชนิดที่สองคือสแตนเลส ที่มีความแข็งแรงคงทน โดย โมเดลที่ใช้ จะเป็น โมเดลที่ 7.1 ภายในเงื่อนไขที่เหมือนกัน คือ ในอุโมงค์ลมเดียวกัน ที่ความเร็ว 4 5 และ 6 m/s โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากผลการจำลองจะนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ต่อไป

โมเดลที่ 7.1 จะเป็นการนำโมเดลที่ 7 ดัดแปลงโดยการเพิ่มแกนเข้าไปในตัวถังหันเนื่องด้วยเหตุผลในการสร้างเพื่อการติดตั้ง ที่ต้องมีแกนในการจับยึดแบร์ริง โดยคุณสมบัติของโมเดลที่ 7.1 จะแสดงดังตารางที่ 3.4 นี้

ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติและข้อมูลของการ Simulation โมเดลที่ 7.1

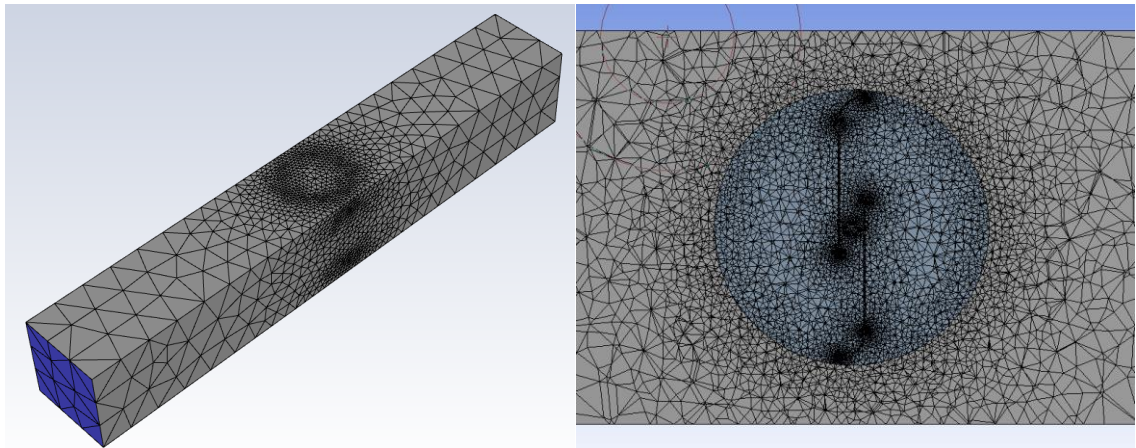
ลักษณะของโมเดล	รายละเอียด
แกนกลาง	1 cm
จำนวนใบ	2x2 (ทั้งสองชั้น)
ความสูง	20 cm
รัศมี	10 cm
ความหนาของใบ	0.15 cm
ความหนาแผ่น	0.1 cm
ความโค้งปลายใบ	90 องศาเทียบจุดศูนย์กลางวงกลม
ช่องระหว่างใบพัดทั้งสอง	2 cm
มวล (อะคริลิก)	235.5385 g
โมเมนต์ความเฉื่อย (อะคริลิก)	0.00092 kg.m ²
มวล (สแตนเลส)	1556.9452 g
โมเมนต์ความเฉื่อย (สแตนเลส)	0.00612 kg.m ²

ในส่วนของ Geometry นั้น จะไม่แตกต่างจากของ model 7 มากนัก โดยจะแตกต่างตรงที่ model 7.1 มีแกนเพิ่มมาที่ตรงกลางกังหันลม



รูปที่ 3-25 รูปทรงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการจำลองกังหันลมโมเดลที่ 7.1

โดยในส่วน mesh นั้น ได้มีการใช้ mesh sizing เพื่อเพิ่มความละเอียดเฉพาะส่วนและลดเวลาในการ simulation ลง โดยเมื่อใช้ mesh sizing แล้วก็จะเป็นดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3-26 Mesh ของกังหันลมโมเดลที่ 7.1

ขนาดของ mesh sizing ที่ใช้คือ 0.01 m โดยเมื่อสร้าง mesh เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะไปในขั้นตอนของการ setup ต่อ ซึ่งในส่วนของการ setup นั้น จะไม่ต่างจากการ setup ของโมเดล 7 มากนัก โดยสิ่งที่จะต่างออกไปคือค่า โมเมนต์ความเฉื่อย

3.2.1.1 อะคริลิก

โมเดล 7.1 ที่วัสดุเป็นอะคริลิกนั้นจะใช้ ค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยอยู่ที่ 0.00092 kg.m^2 และจำนวน time-step ในการ simulation จำนวน 300 จำนวน และ time-scale 0.01 s โดยจะทำการจำลองที่ความเร็วลม 4 m/s 5 m/s และ 6 m/s

3.2.1.2 แสตนเลส

โมเดล 7.1 ที่วัสดุเป็นแสตนเลสนั้นจะใช้ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยอยู่ที่ 0.00612 kg.m^2 และจำนวน time-step ในการ simulation จำนวน 1000 จำนวน และ time-scale 0.01 s โดยจะทำการจำลองที่ความเร็วลม 5 m/s และ 6 m/s

3.2.2 การทดลองจริง

ในการทดลองจริง ผู้วิจัยได้ทำการสร้างโมเดลขึ้นมา 2 ชั้นด้วยกัน นั่นคือ โมเดลที่ทำจากอะคริลิก และโมเดลที่ทำจากแสตนเลส ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3-27 แบบกั้นลมที่ทำขึ้นจากกั้นลมโมเดลที่ 7.1

โดยในการทดลองได้ทำการใช้บริเวณพื้นที่และอุโมงค์ของห้องปฏิบัติการพลังงานที่ตึกสิรินธร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ซึ่งมีขนาด 200x30x30 cm ตามรูปที่ 3.28



รูปที่ 3-28 อุโมงค์ลมที่จะใช้ทดสอบการทำงานของกังหันลม

3.2.2.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

อุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลองจะมีดังนี้

- เครื่องวัดความเร็วลม GM8903 Hot Wire Anemometer
- เครื่องวัดความเร็วรอบ DIGITION PHOTO TACHOMETER รุ่น DT-2234C+ ค่าความละเอียด

0.1 RPM

- แล็ปท็อป Lenovo 1 เครื่อง
- อุโมงค์ลมขนาด 100x30x30 cm³
- ตัวปรับแรงดันไฟเพิ่มเปลี่ยนความเร็วลม



รูปที่ 3-29 เครื่องแปลงไฟสำหรับปรับความเร็วลมในอุโมงค์ลม



รูปที่ 3-30 แล็บที่อปและการจัดวางเครื่องวัดความเร็วรอบ

โดยเมื่อจัดชุดระบบทดสอบทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการทดลองโดยทำตามขั้นตอนดังนี้

- เริ่มปรับความเร็วโดยดูค่าจากแล็บที่อปที่เชื่อมต่อกับตัววัดความเร็วลม
- ค่อยๆปรับความเร็วขึ้นทีละนิด เพื่อดูว่า กังหันลมเริ่มขยับที่ความเร็วเท่าไร และเก็บค่าความเร็วเริ่มต้นที่กังหันลมหมุน
- เมื่อกังหันเริ่มขยับ ก็ทำการปรับค่าให้ค่าความเร็วตามที่ต้องการศึกษา

- เมื่อปรับความเร็วลมได้ค่าตามที่ต้องการ ก็ทำการวัดความเร็วรอบโดยเก็บค่า 3-5 ค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ย

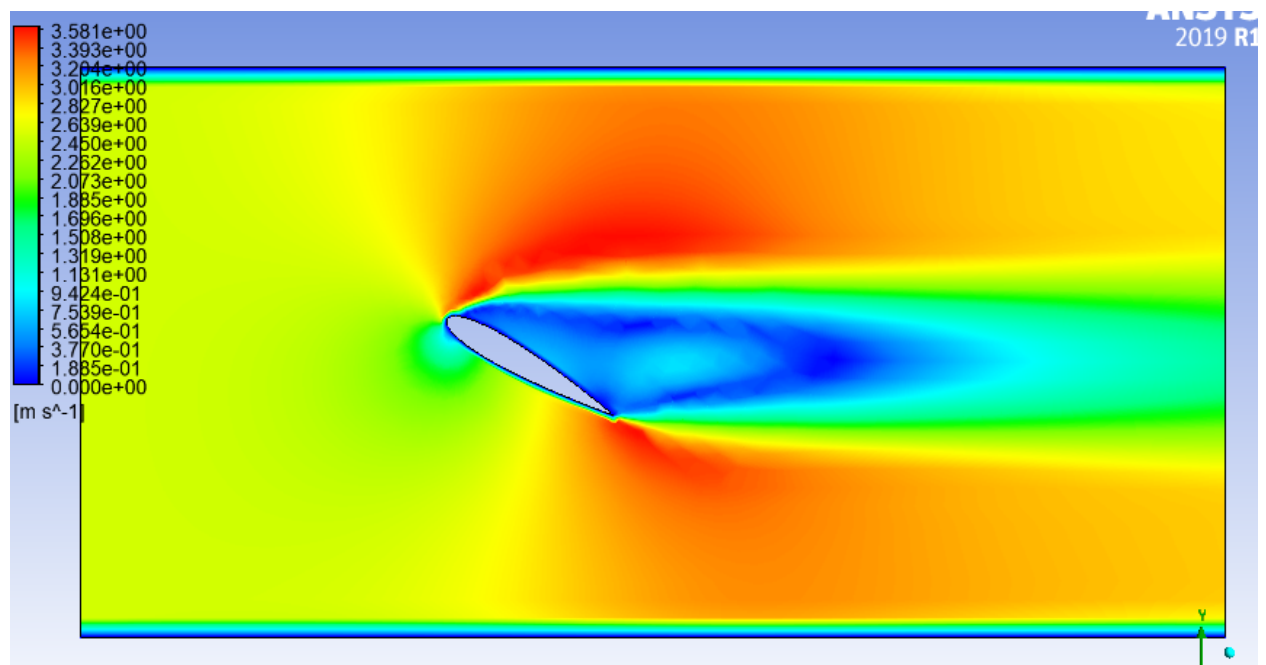
เมื่อได้ผลจากการทดลองจริงก็จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองด้วยการจำลองอากาศพลศาสตร์

4.1.1 ผลการทดลองด้วยการจำลองแบบ 2 มิติ (2D Simulation)

ในส่วนของผลจากการ 2D Simulation เมื่อใช้การดูผลแบบ Contour โดยการสร้างแผ่น plain ขึ้นมาวางบน Geometry ที่ Simulation เรียบร้อยแล้ว และกำหนดรายละเอียด Contour แล้วก็จะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4-1 ภาพ Contour จากจำลอง (Simulation)

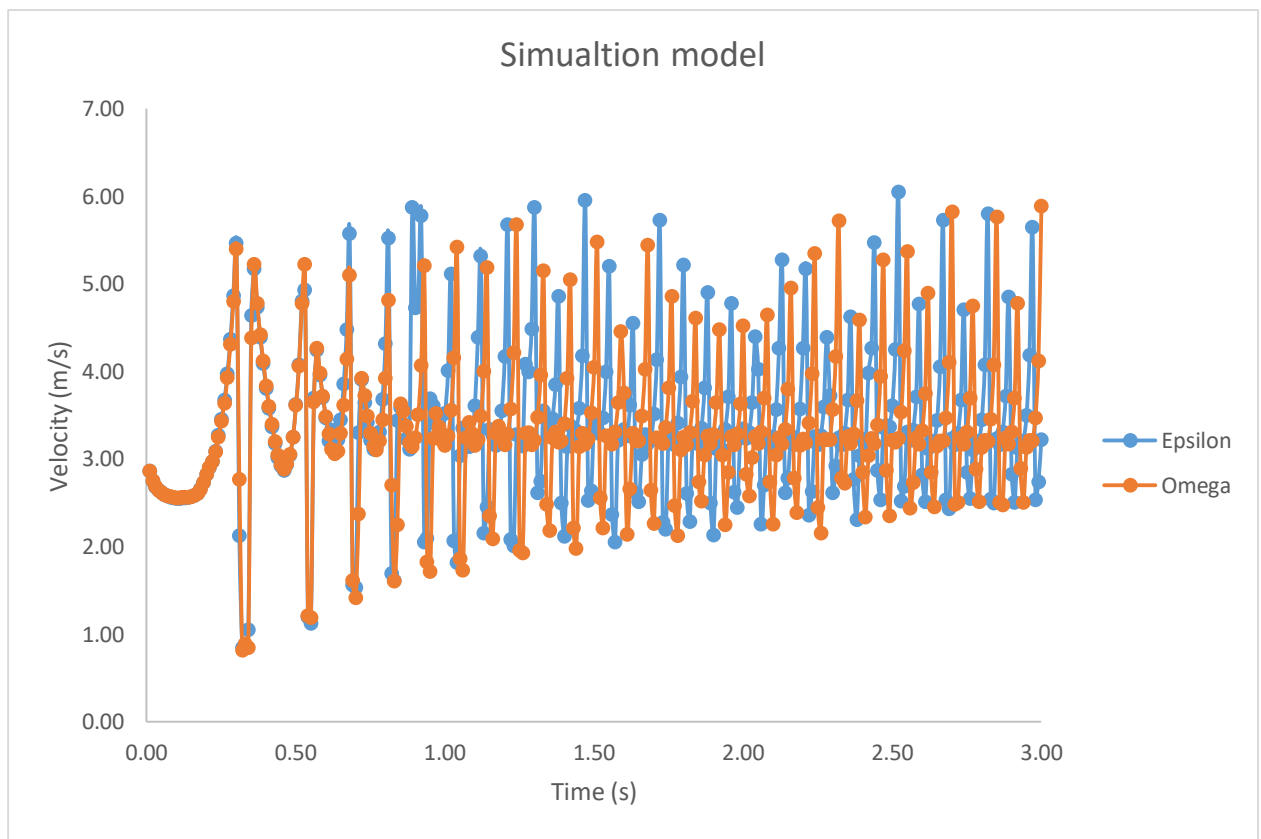
จากรูปจะเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเมื่อสัมผัสกับวัตถุ ซึ่งสามารถดูค่าความเร็วลมคร่าวๆ ได้จากสีที่เห็นใน contour และสามารถหาค่าเจาะจงได้จากการกำหนดจุดแล้ววัดค่าในพื้นที่ดังกล่าว โดยการจำลองในรูปที่ 4.1 นั้นได้ให้ลมพัดจากซ้ายไปขวา ที่ความเร็วลม 5 m/s จะพบว่าความเร็วหน้าใบพัดมีค่าประมาณ 2 m/s ส่วนด้านบนและด้านล่างของใบพัดมีความเร็วลมสูงสุดที่ประมาณ 2 - 3 m/s และความเร็วลมหลังใบพัดจะอยู่ที่ 0.5 - 1 m/s โดยรวมแล้วผลจากการจำลองเป็นไปแนวโน้มทางที่ลมกระทำต่อใบพัดอย่างสมจริง

ในส่วนของการทดลองนี้เพื่อศึกษาเบื้องต้นว่าโปรแกรมทำกระบวนการไหลของของไหลอย่างไรกับสิ่งต่างๆ ซึ่งในการทดลองแบบ 2D สามารถศึกษาปรากฏการณ์แบบอื่นๆได้ เช่น การศึกษาทางไหลของอากาศในช่องแคบ การไหลของอากาศหรือของเหลวในทางที่ซับซ้อน เป็นต้น

4.1.2 ผลการทดลองการจำลองแบบ 3 มิติ (3D Simulation)

4.1.2.1 ความแตกต่างระหว่าง k-epsilon model กับ k-omega model

ในตอนแรกของการศึกษานั้นทำการจำลอง 3 มิติ ด้วย k-epsilon model พบว่ามีข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญในงานประชุมวิชาการฟิสิกส์ไทย (SPC2019) ว่าควรใช้ k-omega model ซึ่งเป็นโมเดลที่มีความเหมาะสมกับการจำลองแบบ 3 มิติที่มีการหมุนมากกว่าโมเดลเดิม และได้ทดลองทำการจำลองแบบ 3 มิติ เปรียบเทียบผลระหว่างโมเดลทั้งสอง โดยเลือกที่จะใช้ศึกษาแบบจำลอง 3 มิติกับกังหันลมโมเดลที่ 7 โดยแสดงผลการจำลองของทั้งสองโมเดลในกราฟที่ 4.1



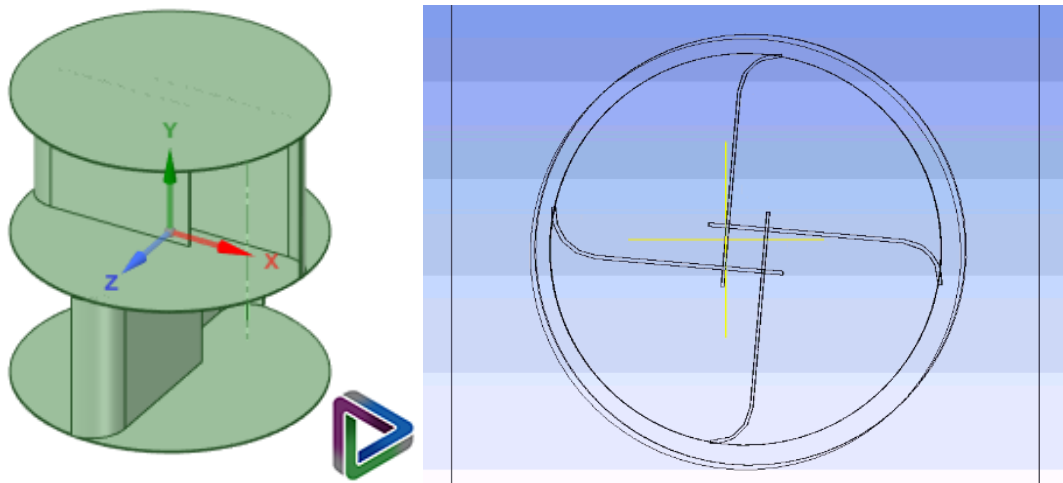
กราฟที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและค่าความเร็วที่เปลี่ยนแปลงเพราะจุดตัด

เปรียบเทียบผลของความแปรปรวนของค่าความเร็วลมในช่วงเวลา 0-3 หน่วยดังที่แสดงในกราฟที่ 4.1 ซึ่งเป็นการแปรปรวนเนื่องจากการหมุนของกังหันลมที่เกิดจากการวางจุดวัดความเร็วลมที่จัดผ่านของใบพัด สรุปได้ว่าการใช้ k-omega model จะมีความเสถียรมากกว่า k-epsilon model ดูได้จากจุดบนกราฟที่เป็นสีส้มมีค่าความแปรปรวนน้อยกว่าจุดสีฟ้าซึ่งแทน k-omega model และ k-epsilon model ตามลำดับ ดังนั้นงานต่อจากนี้ไปในส่วนอื่น ๆ สำหรับการศึกษาคำลองด้วยการหมุน จะศึกษาการจำลองโดยเลือกใช้ k-omega model เป็นหลัก

4.1.2.2 ผลการทดลองโมเดลที่ 7

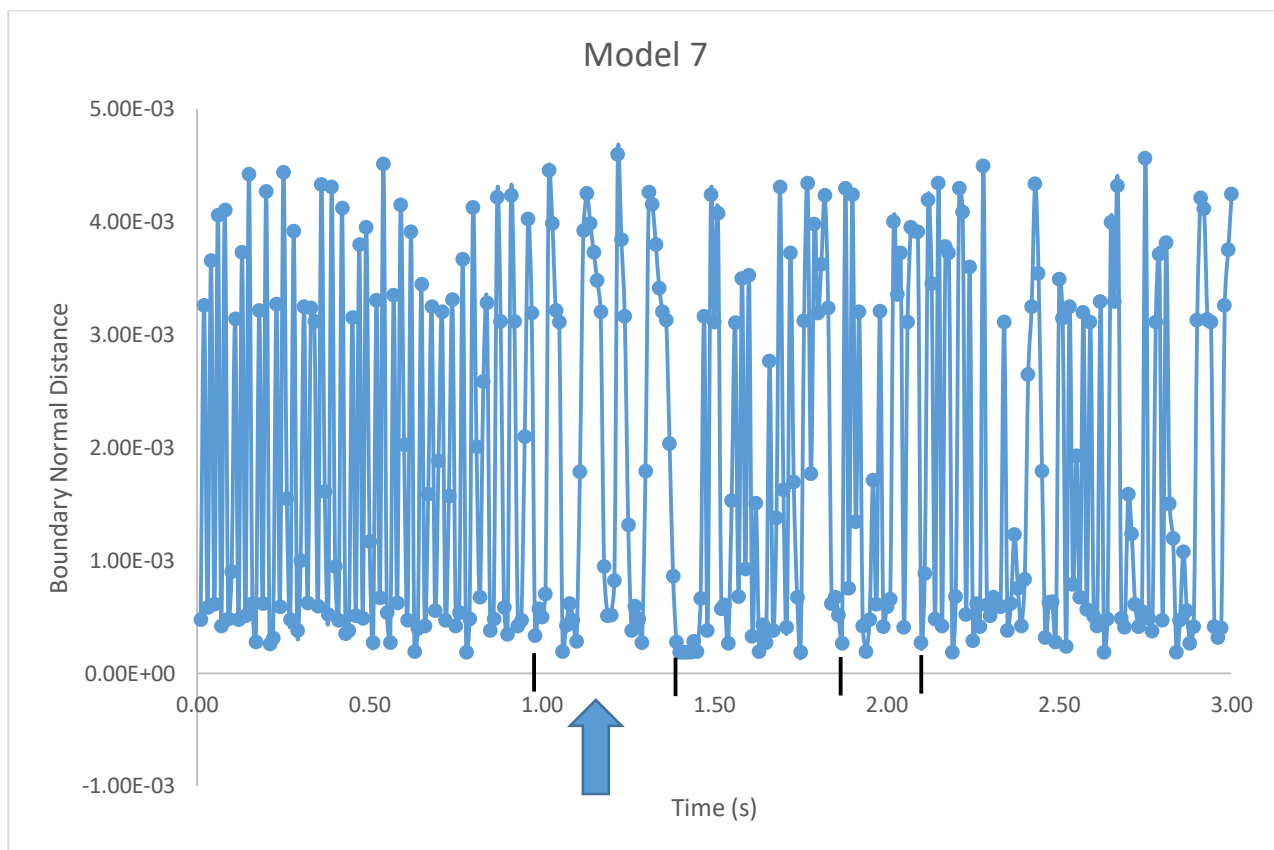
(ก) ค่าความเร็วรอบ

ในการหาค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 5 m/s นั้นจะนำข้อมูลจากการวางจุดเพื่อให้ตัดผ่านใบซึ่งจะทำให้สามารถหาได้ว่าใบกังหันมีการหมุนผ่านจุดนี้ไปได้กี่รอบใน 1 นาที โดยจุดจะวางไว้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงด้วยเส้นสีเหลือง



รูปที่ 4-2 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 7

โดยข้อมูลที่ความเร็วลม 5 m/s จะนำมาสร้างกราฟได้ดังนี้



กราฟที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมโมเดลที่ 7

Boundary normal distance คือ ค่าของตำแหน่งหรือส่วนของ Boundary wall ในพื้นที่ของการ Simulation ซึ่งไม่มีหน่วย โดยจะใช้ตำแหน่งเหล่านี้เพื่อหาการหมุนของกังหันลมที่หมุนครบรอบเพื่อหาค่าความเร็วรอบของกังหันลม

ที่เวลา 1.01 วินาที จากกราฟที่ 4.2 ผนวกกับภาพเคลื่อนไหวจากการ Simulation จะสามารถสังเกตได้ว่า ก่อนหน้านั้น กังหันจะมีการหมุนที่สม่ำเสมอ จนกระทั่งถึงเวลาดังกล่าว ก็จะมีการชะลอไปชั่วขณะช่วงเวลาตามลูกศรชี้ในกราฟ 4.2 จากนั้นที่เวลา 1.40 วินาที ก็จะกลับมาหมุนด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอเช่นเดิม

จากกราฟข้อมูลที่เป็นการแสดงถึงความถี่ของใบกังหันที่ผ่านจุดที่สร้างเอาไว้ ซึ่งค่าความเร็วรอบจะหาจากการนำจำนวนรอบที่กังหันหมุนหารด้วยเวลาที่ทำการหมุนเป็นสมการดังนี้

$$\text{ค่าความเร็วรอบ RPM} = \left(\frac{\text{จำนวนรอบของกังหันลมที่หมุนให้}}{\text{เวลาทั้งหมดในการหมุน (วินาที)}} \right) 60 \quad 4 - 1$$

โดยจากกราฟจะนำข้อมูลช่วงคงที่มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยในสมการดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{2.05 - 1.94} \right) + \left(\frac{1}{0.63 - 0.46} \right) + \left(\frac{1}{0.93 - 0.85} \right) + \left(\frac{1}{2.61 - 2.54} \right) + \left(\frac{1}{2.52 - 2.39} \right) \right] \times 60$$

โดยเวลาแต่ละช่วงที่เลือกมาคือเวลาที่จุดผ่านใบกังหันตอนหมุนผ่าน และเวลาที่จุดกลับมาผ่านกังหันไปรอบหนึ่ง โดยค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 7 จะคำนวณได้ค่าเฉลี่ยดังนี้

$$RPM = 593.42 \text{ รอบ/นาที}$$

จากค่าความเร็วรอบเราสามารถคำนวณหาค่าของ Tip Speed Ratio (TSR) ได้จากสมการ (Nimje and Gandhi, 2020)

$$TSR = \frac{RPM \times \pi \times D}{v \times 60} \quad 4 - 2$$

โดย D คือ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลม (m) และ v คือ ความเร็วลม (m/s)

โดยค่าที่คำนวณได้ออกมาจะมีดังนี้

$$TSR = 1.24$$

(ข) ค่าทอร์ค

ในการคำนวณทอร์คนั้น โปรแกรม ANSYS® จะอิงข้อมูลจากค่าต่างๆ โดยเลือกที่จะต้องการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปใช้คำนวณ ซึ่งค่าทอร์คก็คาดว่าจะอิงจากค่าต่างๆ เช่น ความดันอากาศ ความเร็วลม ค่าส่วนสัมผัส และอื่นๆ

ซึ่งการคำนวณก็จะมีโมเดลคำนวณสำเร็จรูปอยู่ในตัวโปรแกรม โดยจะมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 4.3 นี้ (Concli et al., 2014)

$$\tau = \sum_{i=1}^n \left[\left(v \times \rho \times \frac{dU}{dx} \right) \times A \times r \right] + \sum_{i=1}^n (p \times A \times r) \quad 4 - 3$$

โดยพจน์ $(v \times \rho \times dU/dx)$ แสดงถึงความเค้นเฉือน ดังนั้นเราจะได้ค่าทอร์คจากผลรวมของความหนีดสัมพัทธ์ $\text{Sum}((v \times \rho \times dU/dx) \times A \times r)$ และผลรวมของความเฉื่อย $\text{Sum}(p \times A \times r)$

โดยค่าทอร์คของโมเดลที่ 7 ที่โปรแกรมคำนวณออกมามีค่าดังนี้

$$\tau = 0.0877 \text{ N.m}$$

โดยจากค่าทอร์คเราสามารถนำไปหาค่ากำลังได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{Power}(P) = \left(\frac{\tau \times \pi}{30} \right) \times \text{RPM} \quad 4 - 4$$

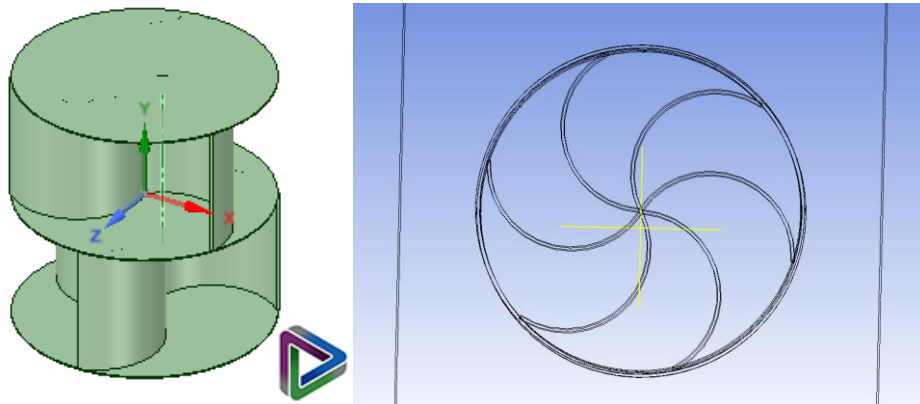
โดยค่ากำลังของกังหันโมเดลที่ 7 จะมีค่าเท่ากับ

$$P = 5.45 \text{ W}$$

4.1.2.3 ผลการทดลองโมเดลที่ 8

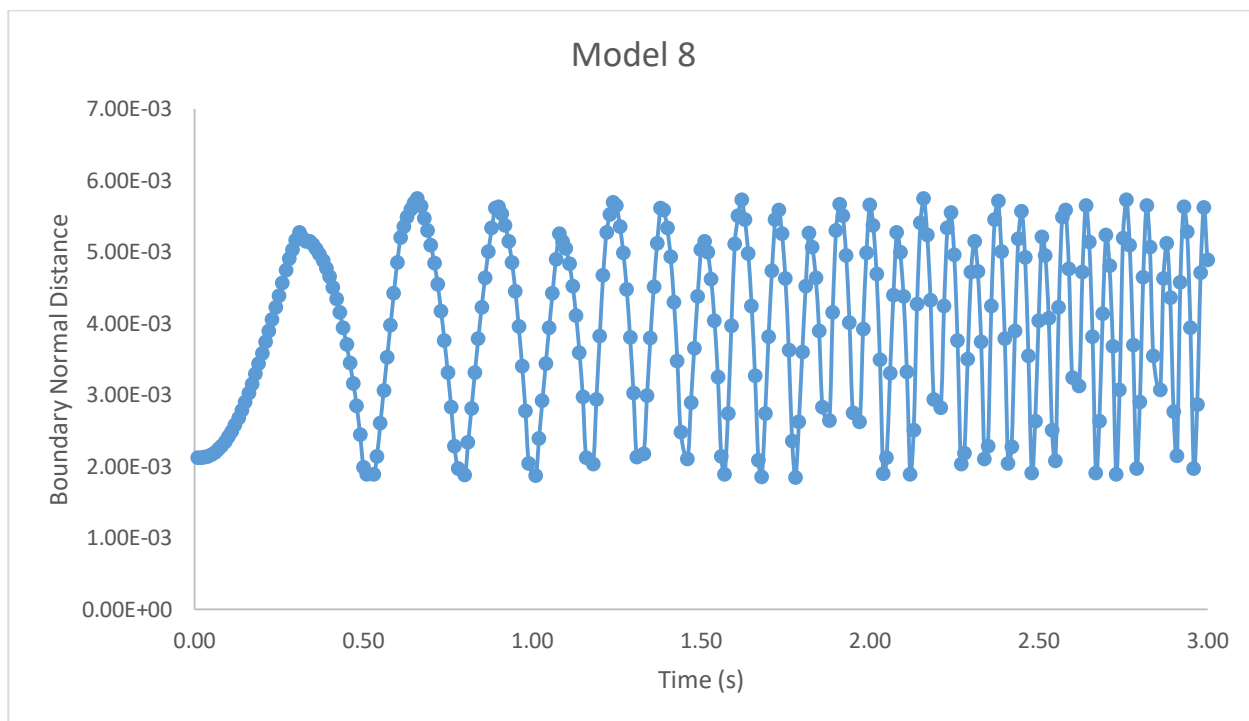
(ก) ค่าความเร็วรอบ

ค่าความเร็วรอบของโมเดลที่ 8 จะหาจากการกำหนดจุดแล้วนำมาคำนวณเหมือนกันกับกรณีการพิจารณาของโมเดลที่ 7 โดยจุดที่จะใช้ในการหาค่าความเร็วรอบเป็นดังรูปที่ 4.3 เส้นกากบาทสีเหลือง



รูปที่ 4-3 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8

โดยจากจุดนี้จะนำผลจากข้อมูลจำลองด้วย k-omega model มาสร้างกราฟได้ดังกราฟที่ 4.3



กราฟที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8

จากกราฟที่ 4.3 และภาพเคลื่อนไหวจากผลการจำลอง 3 มิติ กล่าวได้ว่า โมเดลที่ 8 จะมีการเริ่มการหมุนที่ค่อนข้างช้าช่วงต้นๆของเวลาที่เริ่มหมุน แต่ทว่า จะค่อนข้างคงที่ในเมื่อเริ่มหมุนไประยะเวลาหนึ่งแล้ว

จากกราฟที่ 4.3 เมื่อนำข้อมูลได้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบจากสมการที่ 4.1 ก็ได้ค่า ดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{2.41 - 2.24} \right) + \left(\frac{1}{1.57 - 1.31} \right) + \left(\frac{1}{2.79 - 2.67} \right) + \left(\frac{1}{1.78 - 1.57} \right) + \left(\frac{1}{1.46 - 1.18} \right) \right] \times 60$$

โดยเวลาแต่ละช่วงที่เลือกมาคือเวลาตอนที่จุดผ่านใบกังหันตอนหมุนผ่าน และเวลาที่จุดกลับมาผ่านกังหันไปรอบหนึ่ง โดยค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 8 จะคำนวณได้ค่าเฉลี่ยดังนี้

$$RPM = 331.86 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่า Tip Speed Ratio (TSR) ของโมเดลที่ 8 เมื่อนำมาคำนวณจากสมการที่ 4.2 จะคำนวณออกมาดังนี้

$$TSR = 0.69$$

(ข) ค่าทอร์ค

จากการคำนวณของโปรแกรม ANSYS® ได้ค่าทอร์คที่มีค่าดังนี้

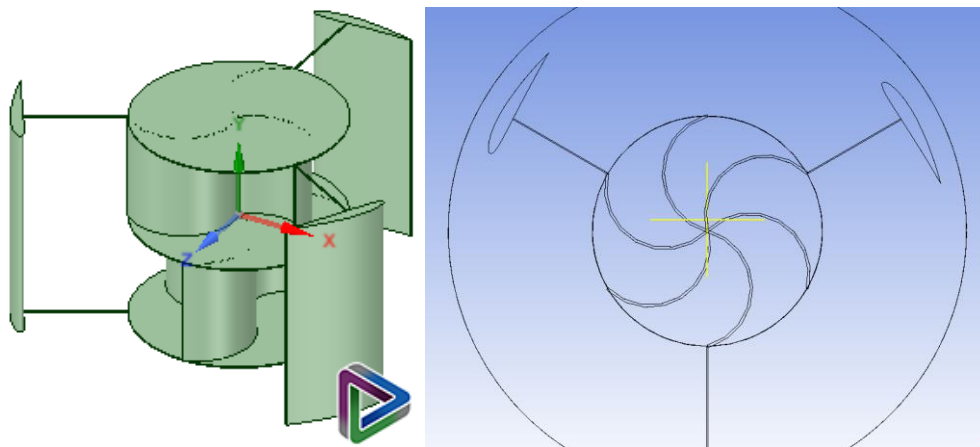
$$\tau = 0.0248 \text{ N.m}$$

จากค่าทอร์คของโมเดลที่ 8 เมื่อนำไปคำนวณในสมการที่ 4.4 ได้ค่ากำลังดังนี้

$$P = 0.86 \text{ W}$$

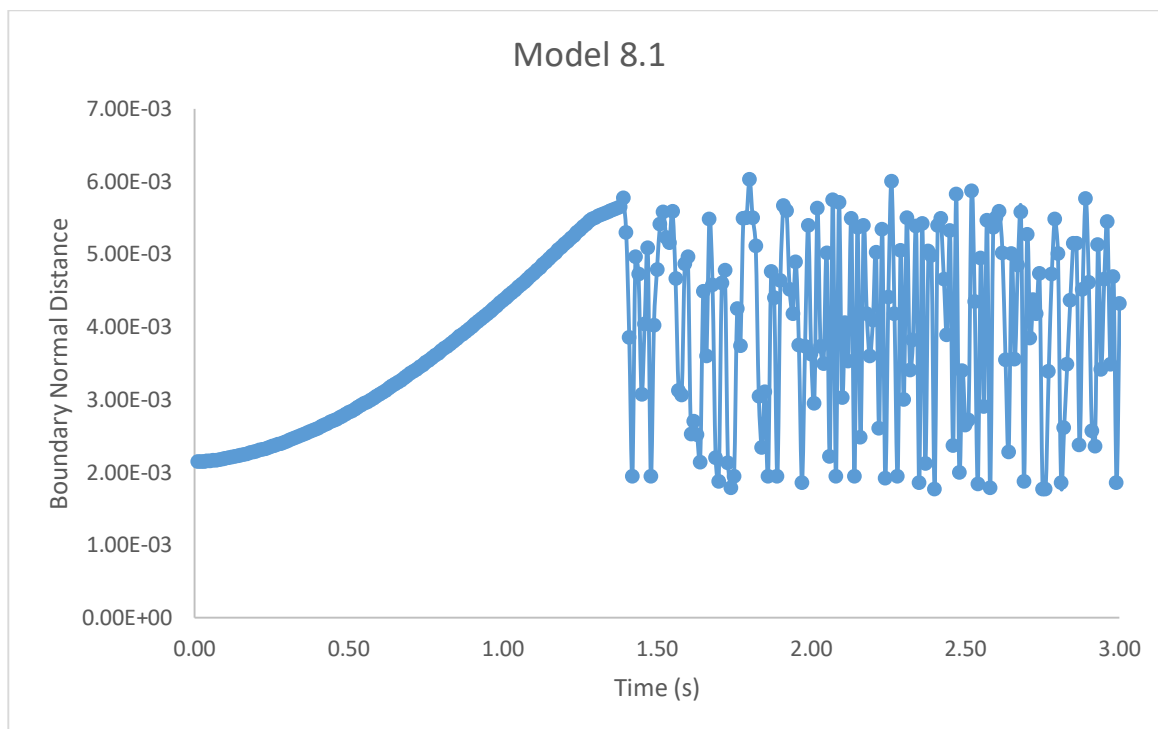
4.1.2.4 ผลการทดลองโมเดลที่ 8.1 และ 8.2

ในการหาค่าความเร็วรอบของโมเดลที่ 8.1 จะหาจากการกำหนดจุดไว้ดังรูปที่ 4.4 กากบาทสีเหลือง



รูปที่ 4-4 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8.1

โดยเมื่อใช้จุดที่วางไว้ใกล้จุดกึ่งกลางกังหันตามรูปที่ 4.4 เราจะสามารถคำนวณค่าความเร็วรอบได้ดังกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4-4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8.1

ที่เวลาโดยประมาณ 1.75 ของการ Simulation จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่ากราฟเกิดการผันผวนในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งในถ้านำมาผนวกกับภาพเคลื่อนไหวในการ Simulation จะสังเกตเห็นได้ว่ากังหันลมเกิดการหมุนกลับทิศทาง

โดยจากกราฟที่ 4.4 เมื่อนำข้อมูลมาคำนวณก็จะได้ค่าความเร็วรอบมาดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{1.58 - 1.42} \right) + \left(\frac{1}{2.35 - 2.24} \right) + \left(\frac{1}{2.58 - 2.48} \right) + \left(\frac{1}{2.81 - 2.69} \right) + \left(\frac{1}{2.99 - 2.81} \right) \right] \times 60$$

โดยเวลาแต่ละช่วงที่เลือกมาคือเวลาตอนที่จุดผ่านใบกังหันตอนหมุนผ่าน และเวลาที่จุดกลับมาผ่านกังหันไปรอบหนึ่ง โดยค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 8.1 จะคำนวณได้ค่าเฉลี่ยดังนี้

$$RPM = 470.75 \text{ รอบ/นาที}$$

จากค่าความเร็วรอบ จะหาค่า Tip Speed Ratio (TSR) จากสมการที่ 4.2 ได้ดังนี้

$$TSR = 0.98$$

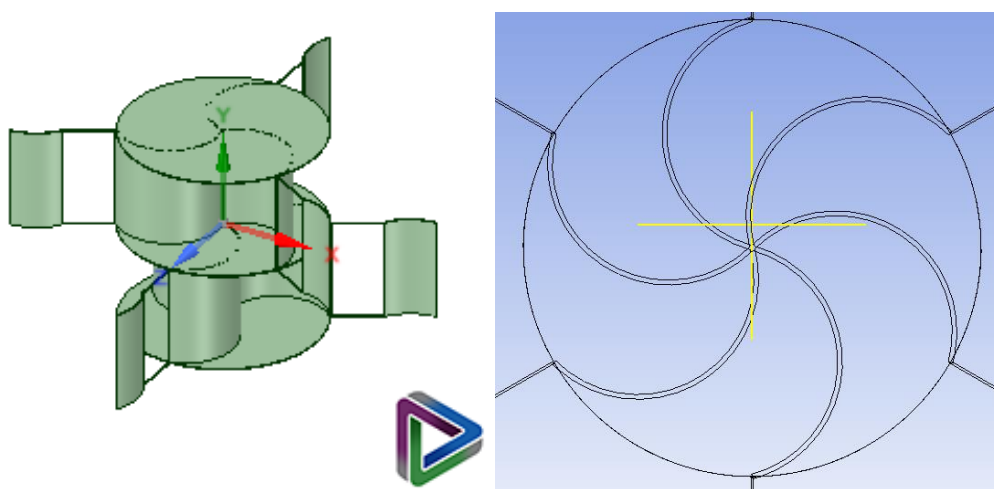
โดยค่าทอร์คของโมเดลที่ 8.1 ซึ่งโปรแกรมคำนวณออกมาจะมีค่าดังนี้

$$\tau = 0.0789 \text{ N.m}$$

ค่ากำลังของกังหันลมโมเดลที่ 8.1 จากสมการ 4.4 จะมีค่าดังนี้

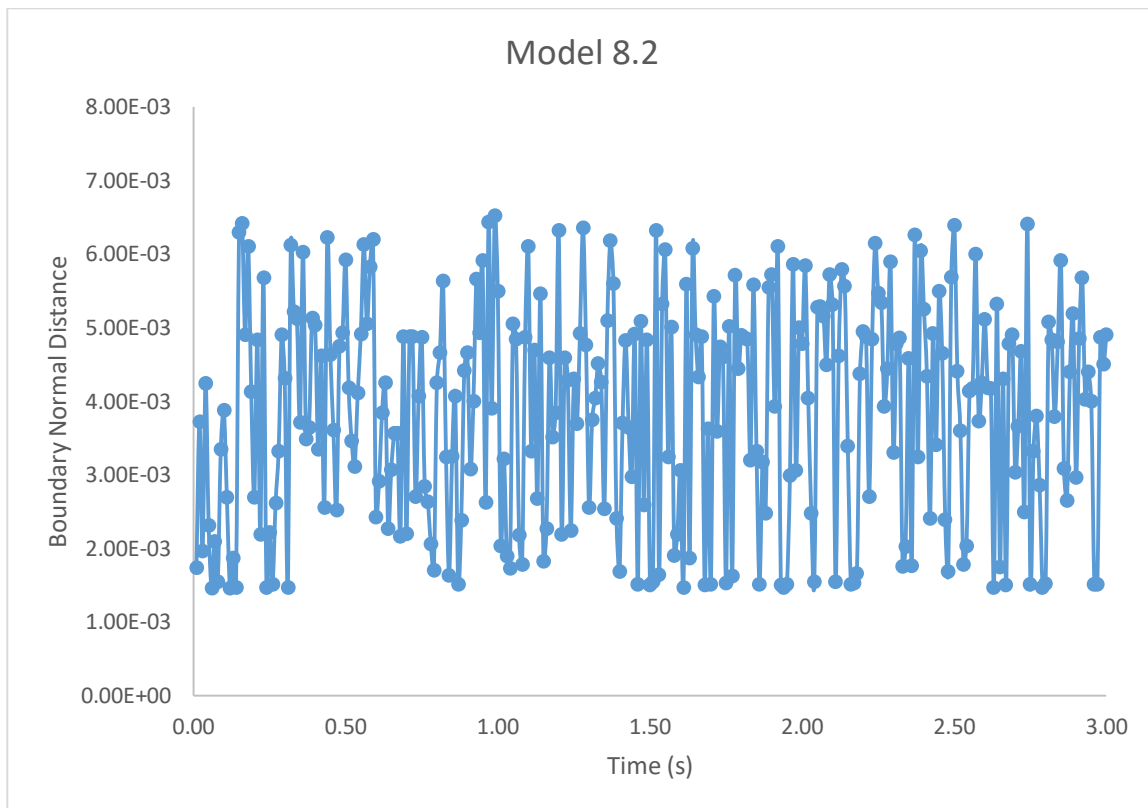
$$P = 3.89 \text{ W}$$

ค่าความเร็วรอบของโมเดลที่ 8.2 จะหาจากการกำหนดจุดไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4-5 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมของกังหันลมโมเดลที่ 8.2

โดยเมื่อใช้จุดใกล้จุดกึ่งกลางกังหันที่เราวางไว้ตามรูป 4.5 จะสามารถคำนวณค่าความเร็วรอบได้ดังกราฟที่ 4.5



กราฟที่ 4-5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมโมเดลที่ 8.2

โดยจากกราฟเมื่อนำข้อมูลมาคำนวณก็จะได้ค่าความเร็วรอบดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{1.75 - 1.61} \right) + \left(\frac{1}{0.7 - 0.6} \right) + \left(\frac{1}{1.15 - 1.04} \right) + \left(\frac{1}{2.11 - 1.94} \right) + \left(\frac{1}{2.75 - 2.63} \right) \right] \times 60$$

โดยเวลาแต่ละช่วงที่เลือกมาคือเวลาตอนที่จุดผ่านใบกังหันตอนหมุนผ่าน และเวลาที่จุดกลับมาผ่านกังหันไปรอบหนึ่ง โดยค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 8.2 จะคำนวณได้ค่าเฉลี่ยดังนี้

$$RPM = 485.39 \text{ รอบ/นาที}$$

จากค่าความเร็วรอบ จะหาค่า Tip Speed Ratio (TSR) จากสมการที่ 4.2 ได้ดังนี้

$$TSR = 1.01$$

ค่าทอร์คของโมเดลที่ 8.2 ที่โปรแกรมคำนวณก็ออกมามีค่าดังนี้

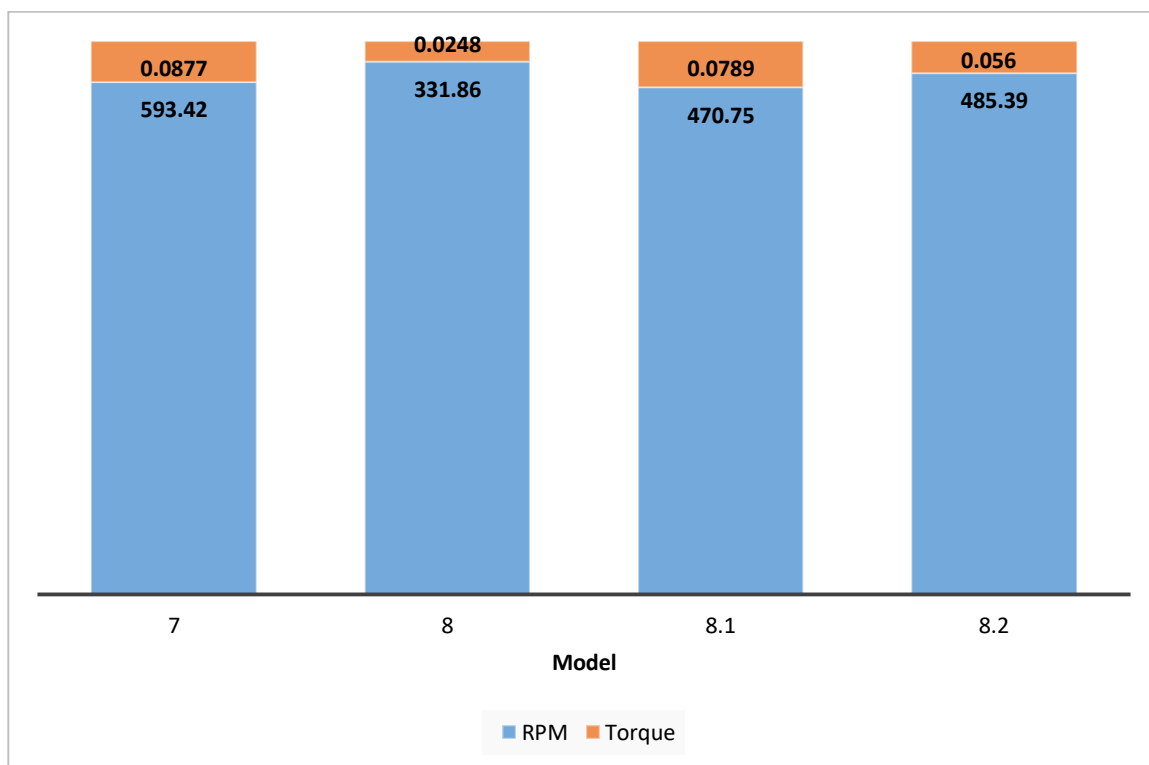
$$\tau = 0.056 \text{ N.m}$$

ค่ากำลังของโมเดลที่ 8.2 จากสมการ 4.4 จะมีค่าดังนี้

$$P = 2.84 \text{ W}$$

โดยเมื่อวิเคราะห์จากค่าความเร็วรอบผนวกกับการดูผลภาพเคลื่อนไหวจากการจำลอง สรุปได้ว่าการเพิ่มส่วนเสริมยึดออกไปจากตัวโบนั้นทำให้กังหันเกิดการหมุนที่ไม่เสถียรและมีการตีกลับของใบกังหัน ถึงแม้ว่ามันจะทำให้กังหันเริ่มทำงานได้เร็วกว่าโดยเฉพาะโมเดลที่ 8.2 แต่เมื่อหมุนไปได้สักพักจะเห็นได้ว่าโมเดลที่ 8 ที่ไม่ติดส่วนเสริมมีการหมุนที่คงที่และดีกว่า โมเดลที่ 8.1 และ 8.2

จากข้อมูลการ Simulation จากโมเดลที่ 7 และ 8 จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 โมเดลมีค่าความเร็วรอบกับทอร์คที่สัมพันธ์ต่างกัน (5.45 และ 0.86 N.m ตามลำดับ) ซึ่งเราสามารถนำค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมาทำกราฟเปรียบเทียบกัน รวมทั้ง โมเดลที่ 8.1 และ 8.2 (3.89 และ 2.84 N.m ตามลำดับ) ได้ดังกราฟที่ 4.6



กราฟที่ 4-6 กราฟเปรียบเทียบค่าทอร์คและความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 7, 8, 8.1 และ 8.2

ที่ความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากันคือ 5 m/s สามารถแสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแต่ละโมเดลได้จากสมการที่ 4.5 ดังนี้

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad 4 - 5$$

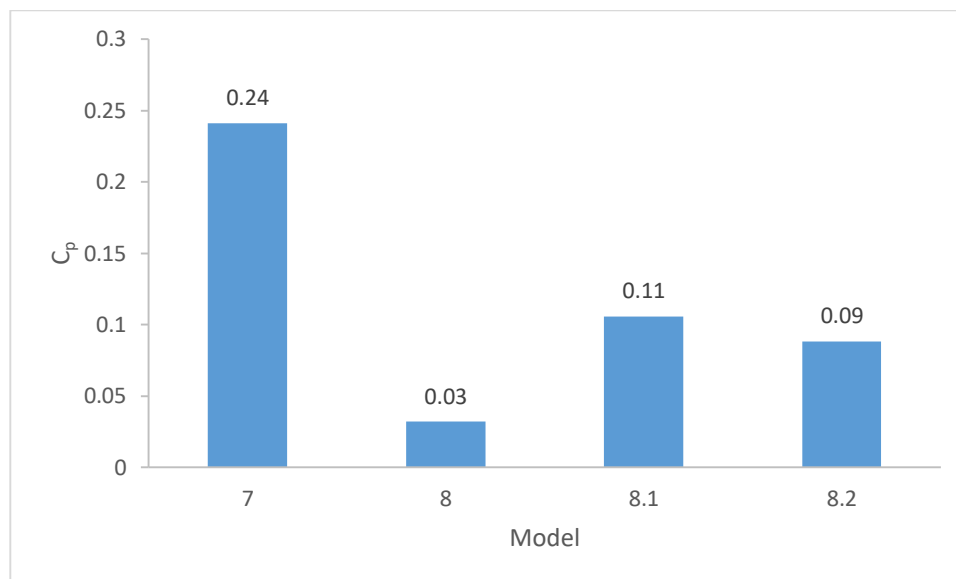
เมื่อ C_p คือสัมประสิทธิ์กำลัง, P_{out} คือ กำลังที่กังหันลมสามารถสร้างออกมาได้ และ P_{in} คือ กำลังที่เกิดจากลม โดยกำลังลมจะคำนวณมาจากสมการที่ 2.1

โดยผลที่ออกมาจะเป็นดังตารางที่ 4.1 นี้

ตารางที่ 4-1 ตารางแสดงถึงสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแต่ละโมเดล

ชนิดของ Model	กำลังลม (W)	กำลังของกังหันลม (W)	สัมประสิทธิ์กำลัง
7	22.58	5.45	0.24
8	26.796	0.86	0.0032
8.1	36.75	3.89	0.105
8.2	32.15	2.84	0.088

โดยถ้าเปรียบเทียบผลของค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมโมเดลที่ 7 - 8 เป็นกราฟก็จะได้ดังกราฟที่ 4.7 ดังนี้



กราฟที่ 4-7 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังของก้านหลวมโมเดลทั้ง 4 ชนิด

โดยสรุปแล้วเมื่อดูที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของก้านหลวม (C_p) แล้ว โมเดลที่ 7 จะมีค่ามากที่สุด และต่ำที่สุดคือ โมเดลที่ 8 โดยรวมแล้วโมเดลที่ 7 จะมีค่าความเร็วรอบและค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับก้านหลวมโมเดลอื่นๆ เหมาะกับการจะนำไปสร้างโมเดลจำลองเพื่อทดสอบในขั้นตอนการศึกษาขั้นถัดไป และการสร้างโมเดลสามารถสร้างได้ง่าย เหมาะกับการทดสอบเรื่องการใช้วัสดุในการสร้างเพื่อเปรียบเทียบ

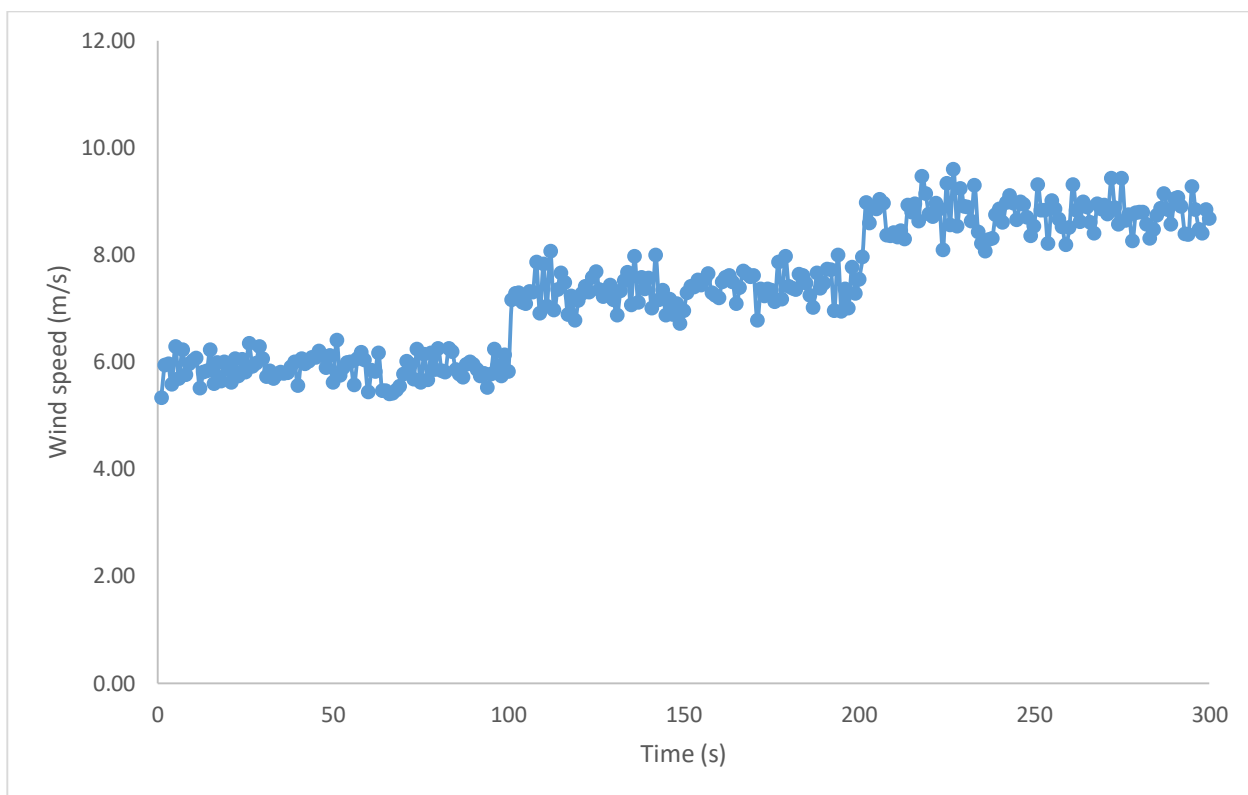
4.2 ผลการทดลองการศึกษาเรื่องปัจจัยของชนิดวัสดุที่ใช้ทำใบก้านหลวมต่อประสิทธิภาพ

4.2.1 ผลการทดลองจากการจำลองก้านหลวม

ในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบวัสดุสองชนิดคือ อะคริลิกและสแตนเลส ในการเก็บผลของการจำลองนั้นได้ทำการกำหนดจุดตำแหน่งไว้เพื่อหาค่าต่าง ๆ ของการจำลอง โดยตำแหน่งของจุดนั้นจะเหมือนกันทั้งวัสดุอะคริลิกและสแตนเลส โดยค่าพารามิเตอร์ที่จะวัดคือ ความเร็วลม ค่าความเร็วรอบของก้านหลวม ค่าของทอร์ค และค่าพลังงาน

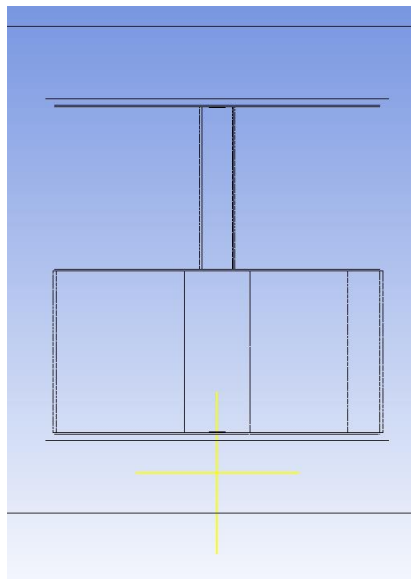
4.2.1.1 ใบกัณฑ์ลมะอะคริลิค

คุณสมบัติของอะคริลิคที่ใช้ในการจำลองมีค่าความหนาแน่นของวัสดุอยู่ที่ 1.18 g/cm^3 ค่าความเร็วลมที่เลือกใช้ในการจำลองคือ 4 (ที่เวลา 1 – 100 s) 5 (ที่เวลา 100 – 200 s) และ 6 (ที่เวลา 200 – 300 s) m/s โดยจำลองทั้ง 3 ค่าความเร็วลม และนำมาเสนอผลการจำลองไว้ในกราฟที่ 4.8 โดยจะได้กราฟความเร็วลมดังนี้



กราฟที่ 4-8 กราฟความเร็วลมที่ต่างกันของการ Simulation ทั้ง 3 ครั้งในเวลาใดๆ

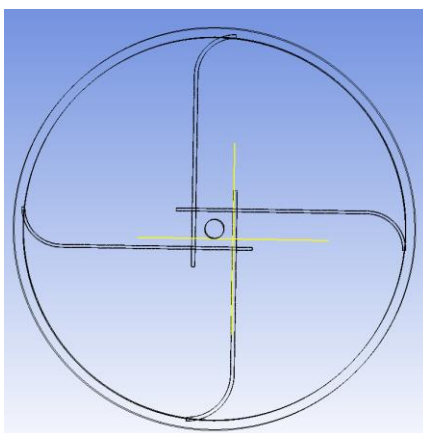
จากกราฟที่ 4.8 ได้ทำการเก็บค่าความเร็วลมจากการ simulation ที่ความเร็วลม 4 5 และ 6 m/s ทั้ง 3 การทดลอง แล้วนำมาเรียงในกราฟอันเดียวกัน โดยตำแหน่งที่ใช้เก็บความเร็วจะเป็นดังภาพที่ 4-6 กากบาทสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4-6 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วลมจากภาพตัดขวางข้าง (Side Cross section)

การที่ผู้ทดลองใช้ตำแหน่งนี้ เพราะว่าในการทดลองกับแบบกังหันลมที่สร้างขึ้นจากวัสดุจริง ตำแหน่งของหัวเครื่องมือวัดที่จะใช้หาค่าความเร็วลมจะอยู่ตำแหน่งด้านใต้กังหันลม

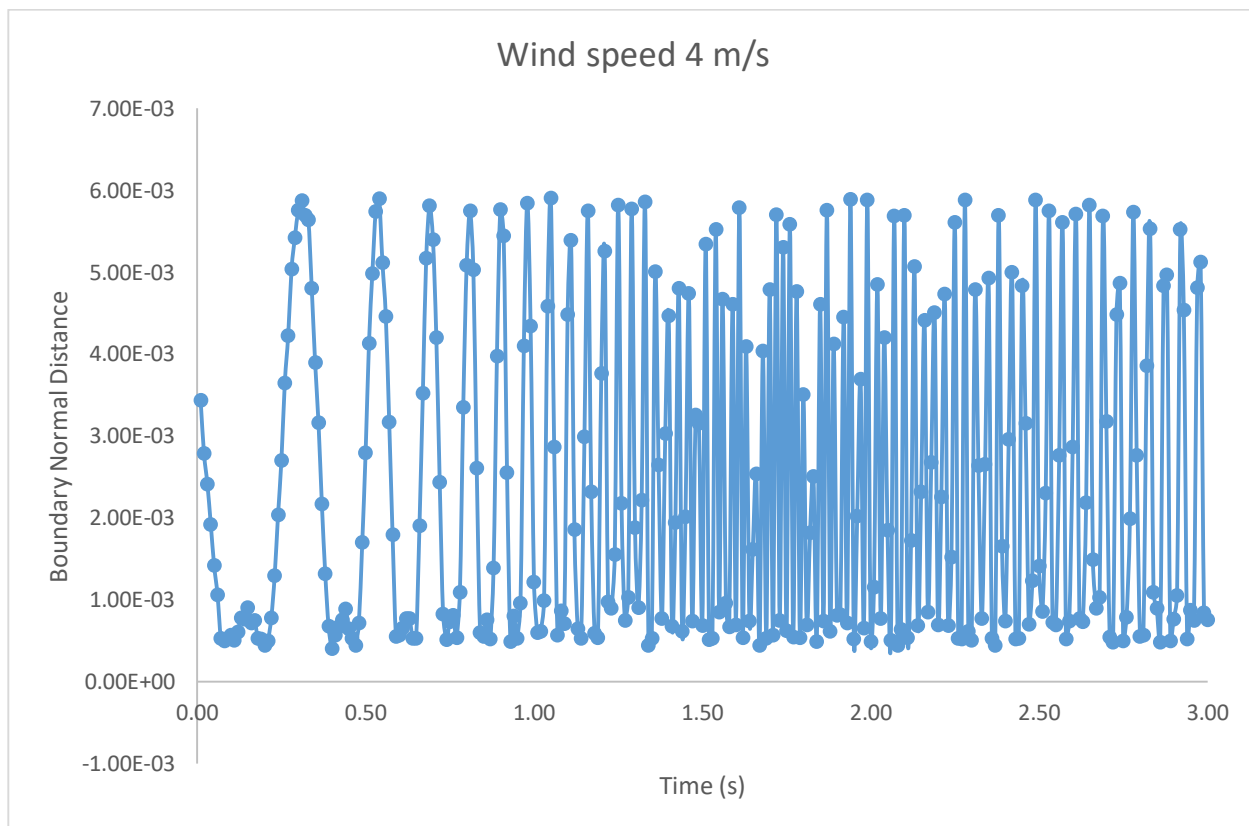
ในการหาค่าความเร็วรอบนั้นผู้วิจัยจะทำการสร้างจุดขึ้นมาบริเวณใกล้กับแกนกลางของกังหัน และให้ตัดกับใบกังหันเวลาเคลื่อนผ่าน โดยตำแหน่งของจุดก็จะเป็นดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ตำแหน่งจุดที่ใช้หาค่าความเร็วรอบโดยมองจากมุมบน (Plan)

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 4 m/s

ในการหาค่าของความเร็วรอบ ผู้วิจัยจะทำการสร้างกราฟโดยใช้ข้อมูลจากจุดที่วางไว้ที่ตำแหน่งใกล้เคียงแกนของกังหันลมจากรูปที่ 4-7 ซึ่งกราฟที่ได้จากรนำข้อมูลจาก Simulation มาสร้าง จะเป็นกราฟระหว่าง Boundary normal distance กับ time ได้ดังกราฟที่ 4.9



กราฟที่ 4-9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมอะคริลิก

โมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 4 m/s

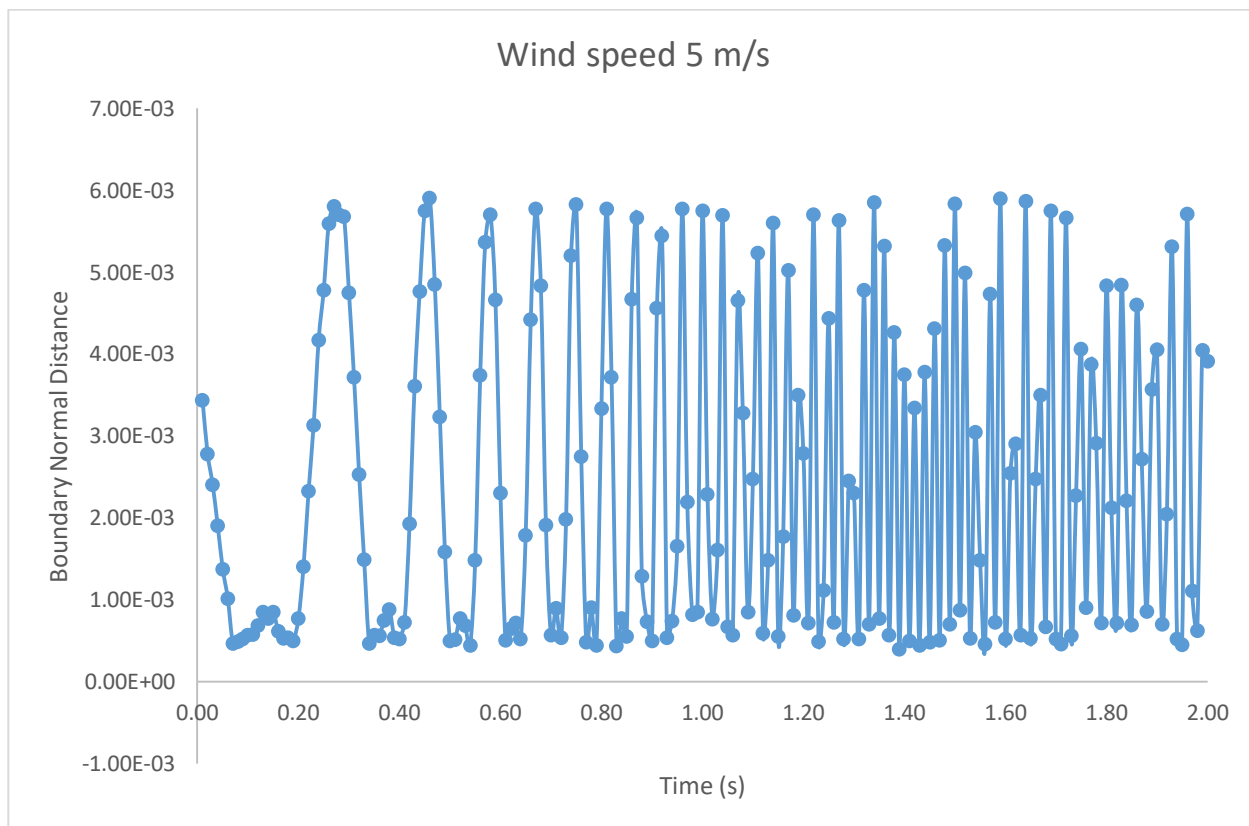
โดยที่ความเร็วลม 4 m/s นี้ จะคำนวณที่ 1 รอบบริเวณที่การหมุนค่อนข้างคงที่มากำหนดหาค่าเฉลี่ยโดยใช้สมการที่ 4-1 มาคำนวณได้ดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{1.07 - 0.93} \right) + \left(\frac{1}{1.19 - 1.07} \right) + \left(\frac{1}{1.34 - 1.19} \right) + \left(\frac{1}{2.44 - 2.27} \right) + \left(\frac{1}{2.8 - 2.72} \right) \right] \times 60$$

$$RPM = 486.30 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 5 m/s

หลักการในการสร้างกราฟที่ความเร็วลม 5 m/s นั้นพิจารณาเหมือนกับการหาค่าความเร็วรอบที่ค่าความเร็วลม 4 m/s โดยตำแหน่งจุดก็จะเหมือนกับในภาพ 4.7 โดยกราฟระหว่าง boundary normal distance และ time นั้นก็จะเป็นดังกราฟที่ 4.10



กราฟที่ 4-10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และเวลาของกังหันลมอะคริลิก

โมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 5 m/s

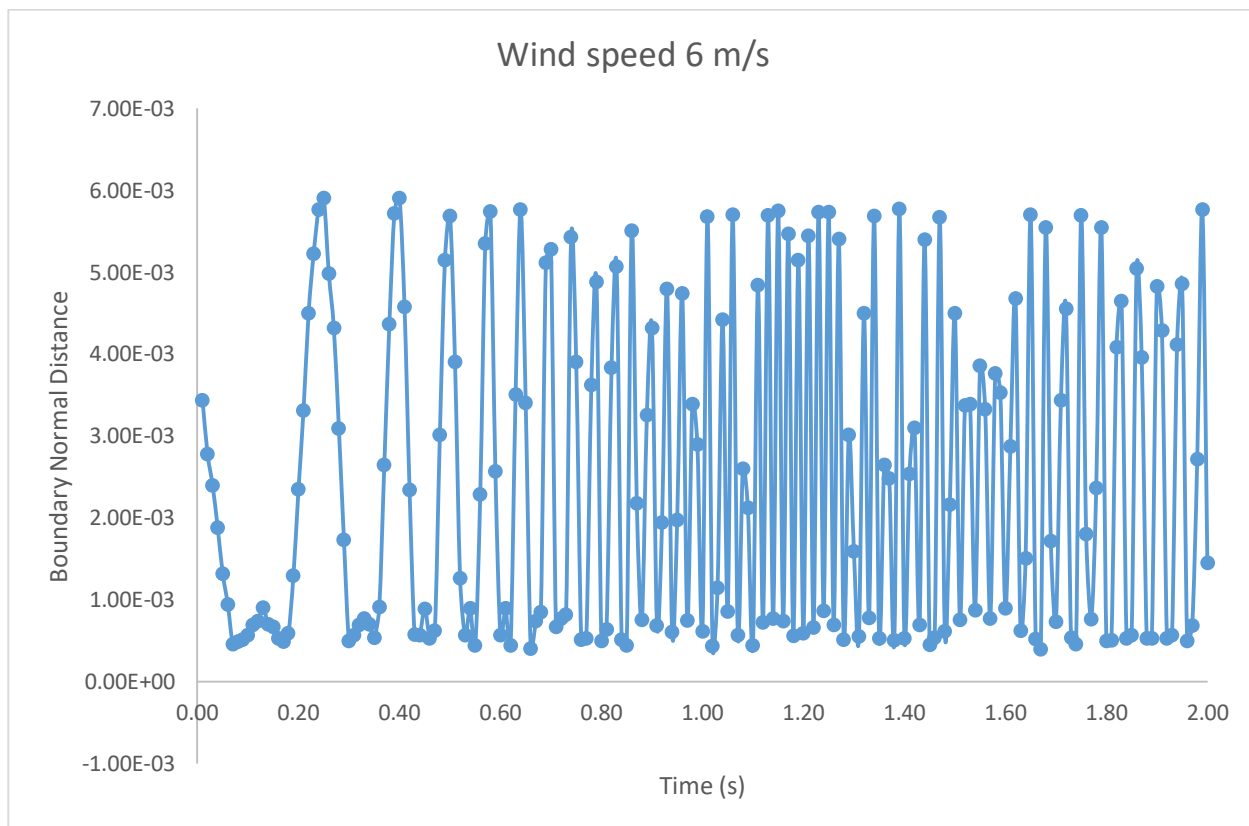
ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 5 m/s นั้นเมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยจากสมการที่ 4.1 นี้ก็จะค่าได้ดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{1.15 - 1.06} \right) + \left(\frac{1}{0.9 - 0.79} \right) + \left(\frac{1}{1.23 - 1.15} \right) + \left(\frac{1}{1.31 - 1.23} \right) + \left(\frac{1}{1.65 - 1.56} \right) \right] \times 60$$

$$RPM = 675.75 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 6 m/s

ความเร็วรอบที่ความเร็วลม 6 m/s นั้นก็จะใช้วิธีการเหมือนกันกับการหาค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 4 และ 5 m/s โดยจะเป็นกราฟที่สร้างจุดในรูป 4-7 เพื่อใช้หาค่าความเร็วรอบที่กราฟระหว่าง Boundary normal distance กับ time ดังกราฟที่ 4.11



กราฟที่ 4-11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลา ของกังหันลม
อะคริลิคโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 6 m/s

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 6 m/s นั้นเมื่อกำหนดหาค่าเฉลี่ยจากสมการที่ 4.1 นี้ก็จะค่าได้
ดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{0.84 - 0.76} \right) + \left(\frac{1}{0.66 - 0.55} \right) + \left(\frac{1}{0.76 - 0.66} \right) + \left(\frac{1}{0.97 - 0.91} \right) + \left(\frac{1}{1.4 - 1.33} \right) \right] \times 60$$

$$RPM = 750.51 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่า Tip Speed Ratio (TSR) ของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 4.2 โดยจะได้ค่าออกมาดังนี้

ตารางที่ 4-2 ค่าของ Tip Speed Ratio(TSR) ของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	Tip Speed Ratio(TSR) (λ)
4	127.31
5	141.52
6	130.98

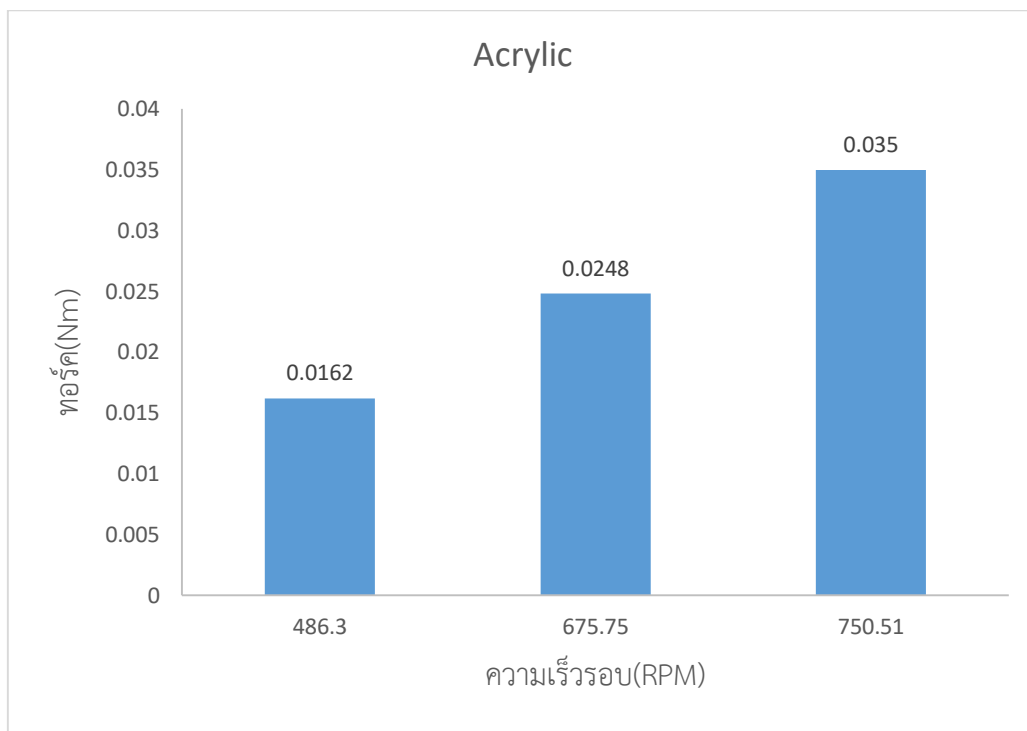
ค่าทอร์ก

โดยจากการคำนวณค่าทอร์กของโปรแกรม เราจะได้ค่าทอร์กของโมเดลที่ 7.1 วัสดุอะคริลิก มา ดังนี้

ตารางที่ 4-3 ค่าทอร์กของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	ค่าทอร์ก (N.m)
4	0.0162
5	0.0248
6	0.035

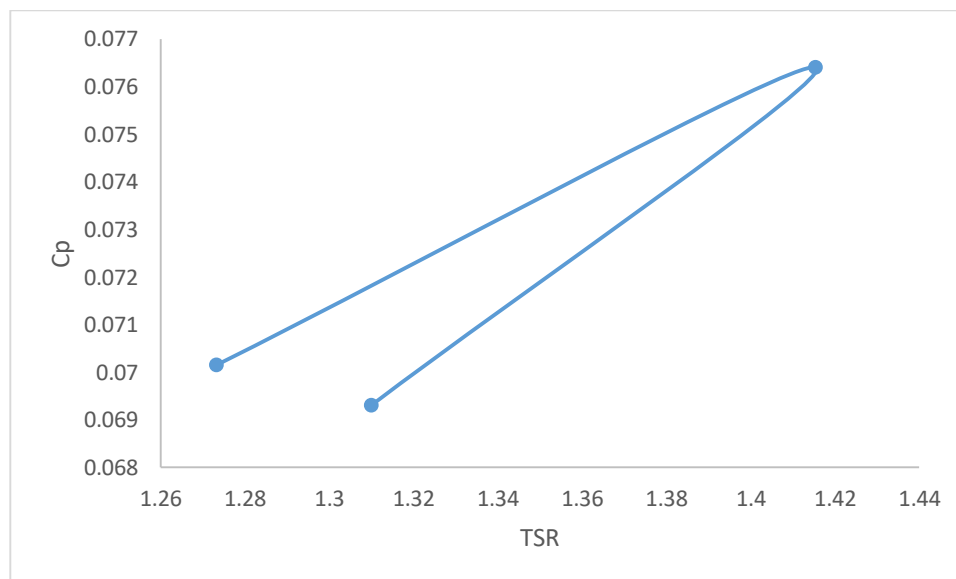
โดยสามารถนำค่าความเร็วรอบและค่าทอร์กมาทำเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังนี้



กราฟที่ 4-12 ค่าทอร์คที่ได้จากความเร็วลมทั้ง 3 ค่าของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 สามารถคำนวณออกมาได้ดังนี้ ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	กำลังลม (W)	กำลังของกังหันลม (W)	สัมประสิทธิ์กำลัง (C _p)
4	11.76	0.82	0.07
5	22.96	1.75	0.076
6	39.69	2.75	0.069

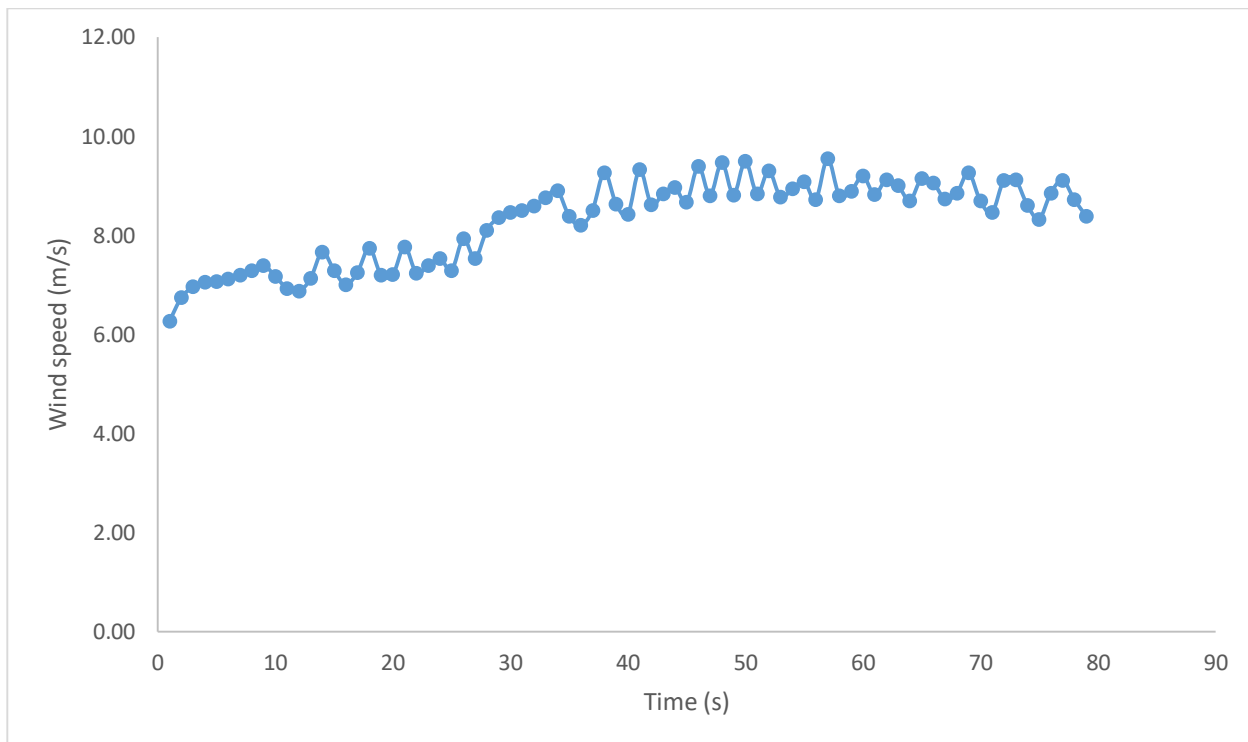
โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังสามารถนำมาทำกราฟเปรียบเทียบกับค่า Tip Speed Ration ได้ดังกราฟที่ 4-13 ดังนี้



กราฟที่ 4-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tip Speed Ratio กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม
โมเดลที่ 7.1 วัสดุอะคริลิก

4.2.1.2 ใบกังหันลมไร้สนิมหรือสแตนเลส

คุณสมบัติของสแตนเลสที่ใช้ในการจำลองมีค่าความหนาแน่นของวัสดุอยู่ที่ 7.8 g/cm^3 ค่าความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดล 7.1 จะใช้ตำแหน่งจากรูป 4.6 เพื่อใช้ในการหาค่า โดยค่าความเร็วลมจากตำแหน่งตามรูปที่ 4.6 จะได้มาดังกราฟที่ 4.14



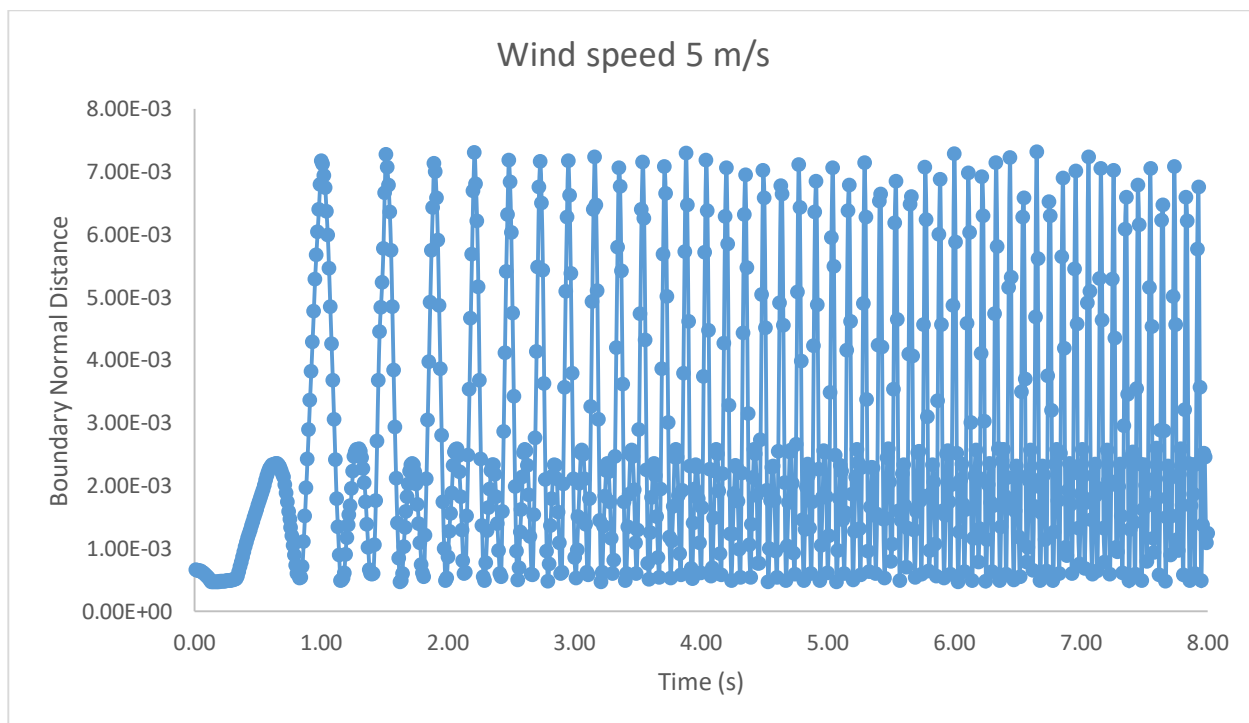
กราฟที่ 4-14 กราฟความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1

การที่นำเสนอความเร็วลมแค่สองค่า เพราะว่าในการทดลองทดลองจริงนั้น กังหันลมเริ่มหมุนหรือเริ่มทำงานที่ความเร็วลมประมาณ 4.8 m/s ดังนั้นผู้วิจัยจึงลดผลการ Simulation เหลือแค่ค่าความเร็วที่ 5 (ช่วงเวลา 1 – 26 s) และ 6 (ช่วงเวลา 27 – 79 s) m/s

โดยจากการใช้จุดจากตำแหน่งตามรูปที่ 4-7 เราจะสามารถใช้หาค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลมต่างๆ ได้ดังนี้

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 5 m/s

ความเร็วรอบของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 จะใช้การหาค่าจากการสร้างกราฟโดยสร้างจากตำแหน่งในรูปที่ 4.7 โดยจะเป็นกราฟระหว่าง Boundary Normal Distance กับ Time โดยจากการ Simulation จะได้กราฟที่ 4.15 ดังนี้



กราฟที่ 4-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Boundary normal distance และ เวลา ของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 5 m/s

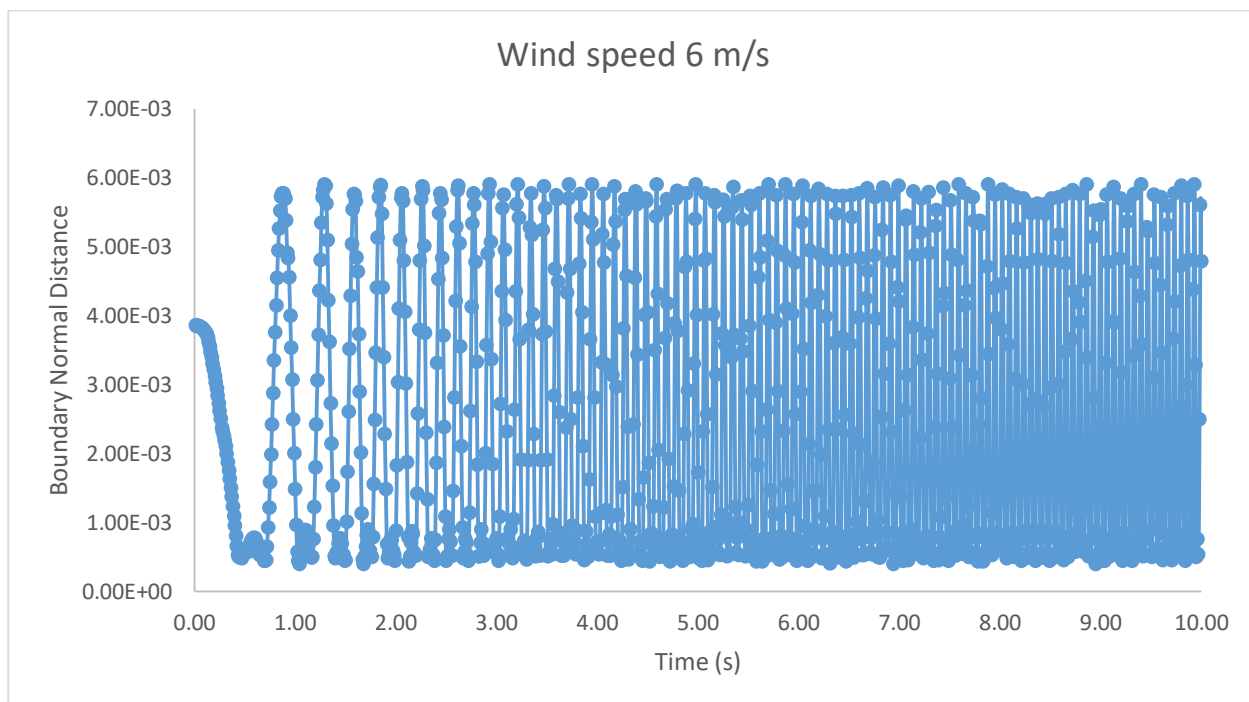
จากกราฟที่ 4.15 เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบที่ความเร็วลม 5 m/s จากการใช้สมการที่ 4.1 ได้ดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{4.67 - 4.53} \right) + \left(\frac{1}{3.76 - 3.59} \right) + \left(\frac{1}{4.39 - 4.24} \right) + \left(\frac{1}{4.94 - 4.81} \right) + \left(\frac{1}{5.45 - 5.33} \right) \right] \times 60$$

$$RPM = 428.61 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่าความเร็วรอบที่ความเร็วลม 6 m/s

จากการวางจุดในรูปที่ 4.7 เราสามารถนำค่าจากการ Simulation มาสร้างกราฟระหว่าง Boundary Normal Distance กับ Time เพื่อค่าความเร็วรอบของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 โดยจะได้กราฟที่ 4.16 ดังนี้



กราฟที่ 4-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และ Boundary normal distance ของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 ที่ความเร็วลม 6 m/s

จากกราฟที่ 4.16 เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของความเร็วรอบที่ความเร็วลม 6 m/s ได้จากการใช้สมการที่ 4.1 โดยค่าความเร็วรอบที่คำนวณออกมาจะมีค่าดังนี้

$$RPM = \left[\left(\frac{1}{9.71 - 9.62} \right) + \left(\frac{1}{6.79 - 6.65} \right) + \left(\frac{1}{7.49 - 7.39} \right) + \left(\frac{1}{8.45 - 8.34} \right) + \left(\frac{1}{8.35 - 8.21} \right) \right] \times 60$$

$$RPM = 533.85 \text{ รอบ/นาที}$$

ค่า Tip Speed Ratio (TSR) ของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 เมื่อเราใช้สมการที่ 4.2 จะสามารถหาค่าออกมาได้ดังตารางที่ 4.5 นี้

ตารางที่ 4-5 ค่าของ Tip Speed Ratio(TSR) ของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	Tip Speed Ratio(TSR)
5	89.79
6	93.17

ค่าทอร์ค

โดยจากการคำนวณค่าทอร์คของโปรแกรม เราจะได้ค่าทอร์คของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 มาดังตารางที่ 4.6 นี้

ตารางที่ 4-6 ค่าทอร์คของโมเดลที่ 7.1 วัสดุสแตนเลส

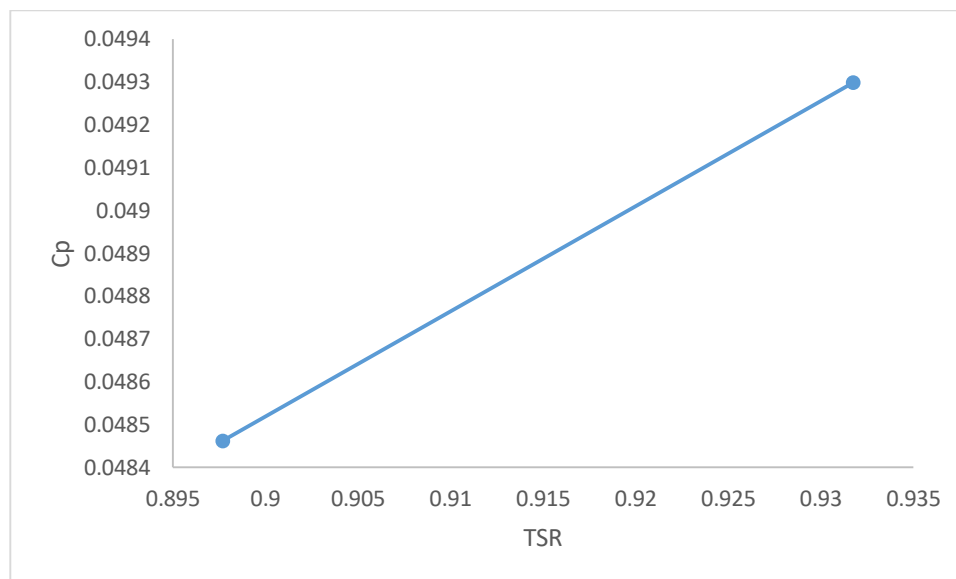
ความเร็วลม	ค่าทอร์ค (N.m)
5	0.0248
6	0.035

ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 สามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 4.7 นี้

ตารางที่ 4-7 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	กำลังลม (W)	กำลังของกังหันลม (W)	สัมประสิทธิ์กำลัง (C _p)
5	22.96	1.11	0.048
6	39.69	1.95	0.049

โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังสามารถนำมาทำกราฟเปรียบเทียบกับค่า Tip-speed ratio ได้ดังกราฟที่ 4-17 ดังนี้

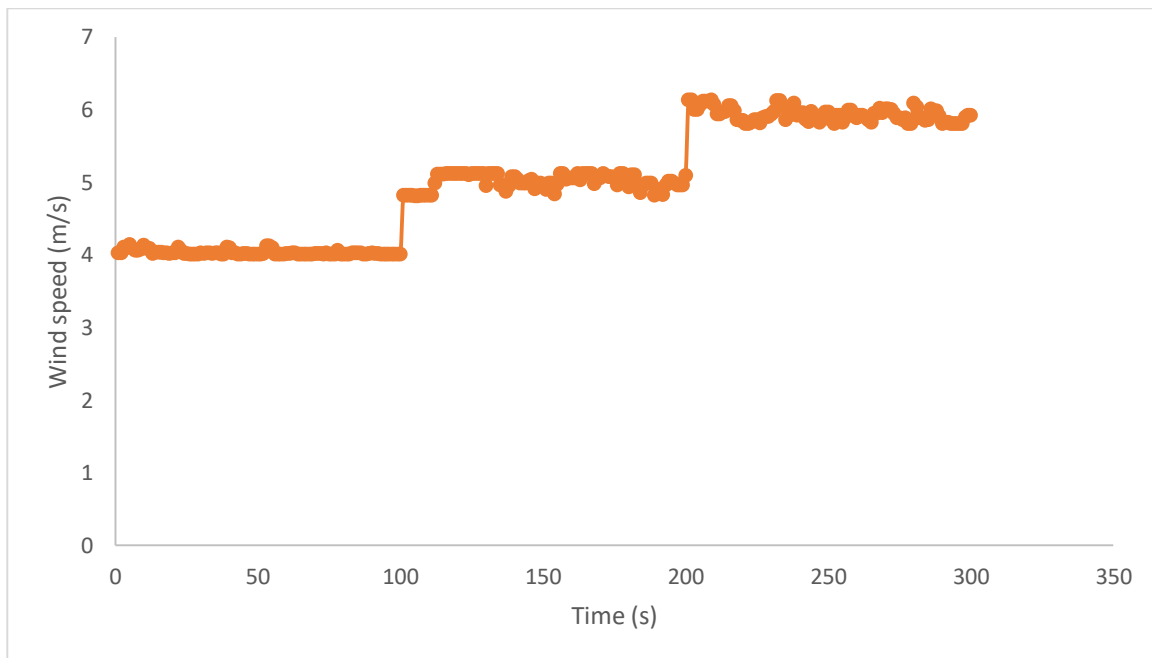


กราฟที่ 4-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Tip-speed ratio กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมโมเดลที่ 7.1 วัสดุอะคริลิก

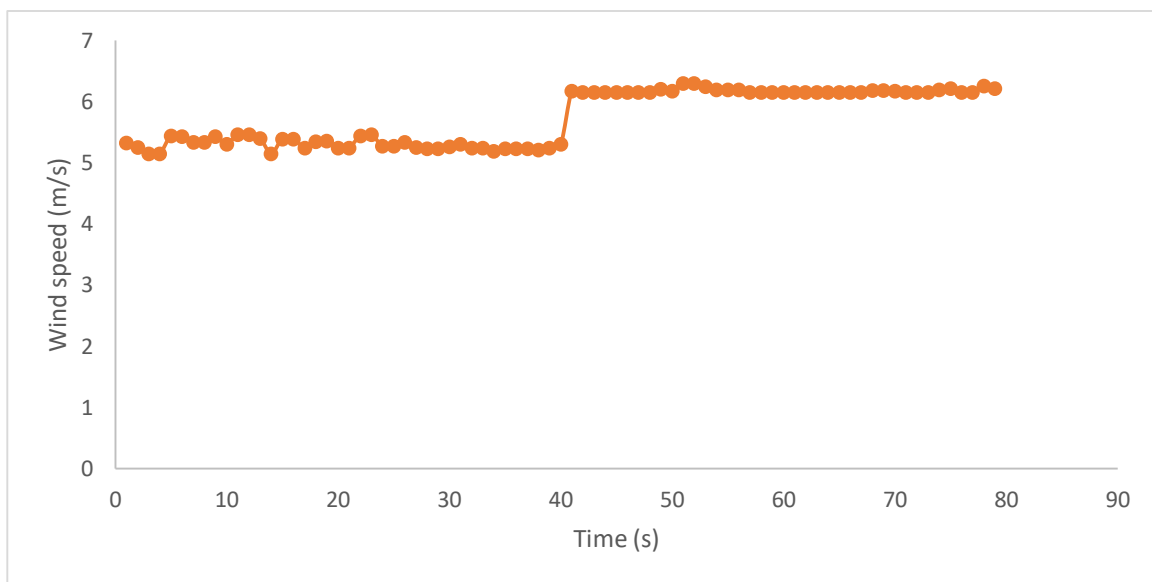
โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการ Simulation ของ 2 วัสดุแล้ว เราจะเห็นได้ว่าการใช้ วัสดุอะคริลิกจะทำให้มีค่าความเร็วรอบที่ดีกว่าที่ความเร็วลมเดียวกัน และค่าสัมประสิทธิ์กำลังโดยรวมของวัสดุอะคริลิกก็มีค่าที่ดีกว่าวัสดุสแตนเลส สรุปว่าเนื่องมาจากการที่ใช้วัสดุต่างชนิดกันทำให้ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของกังหันลมต่างกัน ทั้งในส่วนของน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นที่ส่งผลถึงค่าของโมเมนต์ความเฉื่อย กล่าวคือ ถ้าความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนแปลงก็จะเกิดการเปลี่ยนของน้ำหนักวัสดุซึ่งการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักวัสดุก็จะส่งผลให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัสดุเปลี่ยนไปด้วย

4.2.2 ผลการทดลองกังหันลมในอุโมงค์ลม

จากการทดลองวัดค่าความเร็วลมสามารถแสดงค่าความเร็วของโมเดลที่ 7.1 ทั้งสองวัสดุที่สร้างมาและทดสอบในอุโมงค์ลมได้ดังกราฟที่ 4.18 และ 4.19



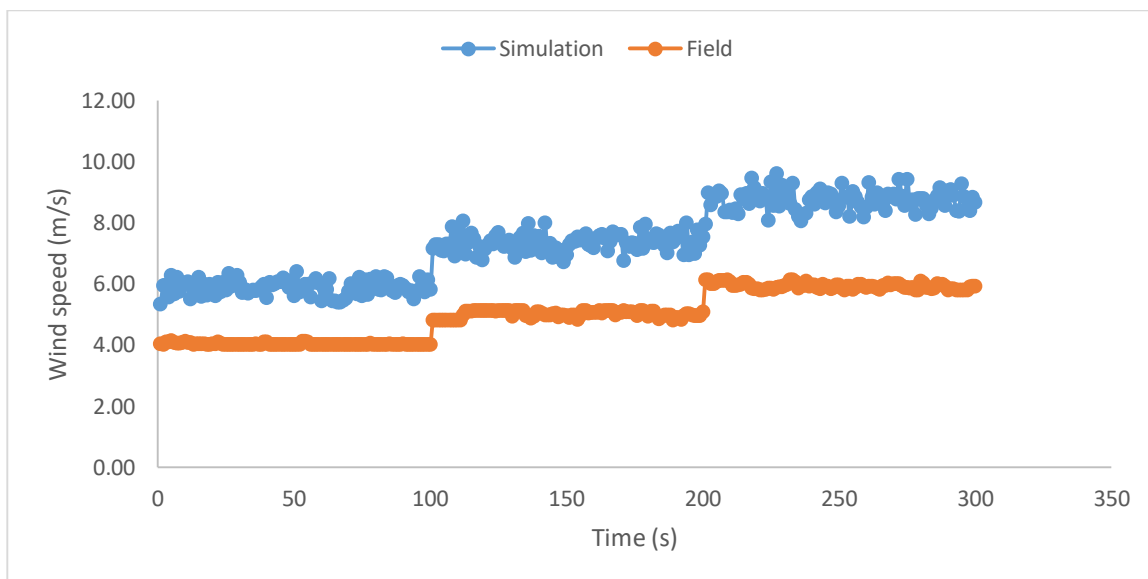
กราฟที่ 4-18 กราฟความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 ในอุโมงค์ลม



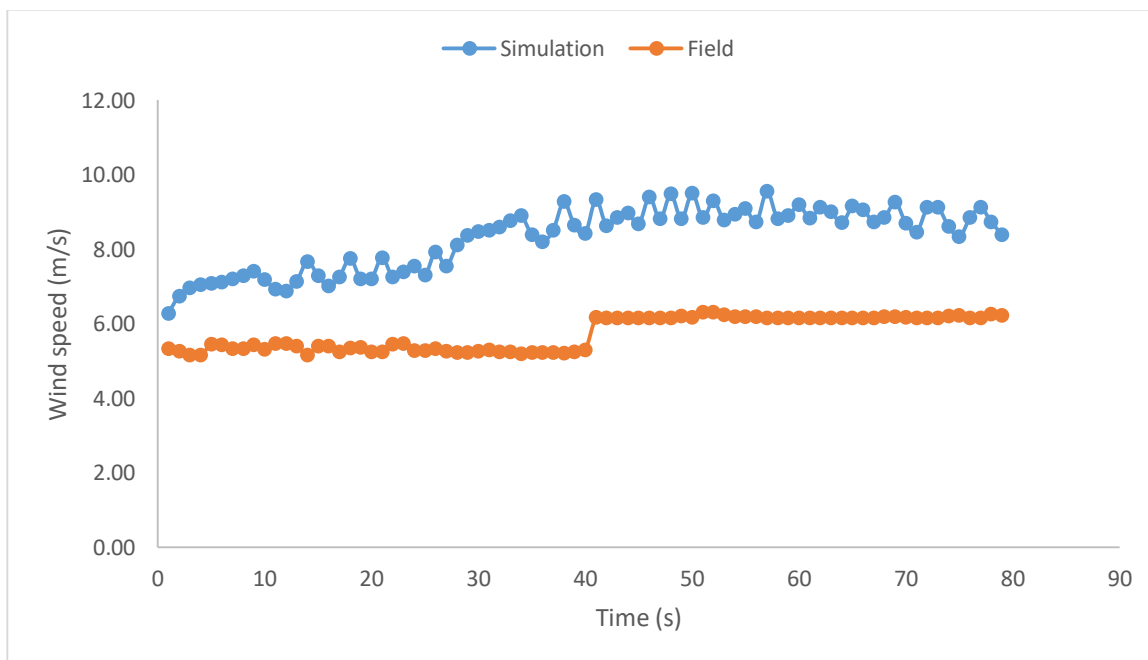
กราฟที่ 4-19 กราฟความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 ในอุโมงค์ลม

4.2.2.1 การเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบ

เมื่อนำข้อมูลกราฟจากการทดลองกังหันลมทั้ง 2 วัสดุในอุโมงค์ลมและจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ มาเปรียบเทียบกันในกราฟที่ 4.20 และ 4.21 ดังนี้



กราฟที่ 4-20 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1 จากการทดสอบในอุโมงค์ลมและผลการจำลองทางคณิตศาสตร์



กราฟที่ 4-21 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1 จากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมและผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยถ้าเปรียบเทียบค่าความเร็วลมเป็นค่าเฉลี่ยแล้วเราสามารถสร้างออกมาเป็นตารางเปรียบเทียบได้
ดังนี้

ตารางที่ 4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม	ผลการทดลองจริง (m/s)	ผลการSimulation (m/s)	%ความแตกต่าง
4 m/s	4.017	5.61	28.39
5 m/s	5.048	6.96	27.47
6 m/s	6.068	8.21	26.09

ตารางที่ 4-9 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วลมของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม	ผลการทดลองจริง (m/s)	ผลการSimulation (m/s)	%ความแตกต่าง
5 m/s	5.243	6.87	23.68
6 m/s	6.186	8.72	29.05

จากตารางการเปรียบเทียบ เห็นได้ว่าค่าความเร็วลมของการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองจริงมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 23-29 % โดยถือว่าอยู่ในค่าความแตกต่างที่ยอมรับได้ (Hosseini and Goudarzi, 2019)

4.2.2.2 การเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบ

จากการใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ ค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดล 7.1 ที่ใช้วัสดุอะคริลิกและสแตนเลสจากการทดลองจริงจะแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4-10 ค่าความเร็วรอบของกังหันลมโมเดลที่ 7.1 จากเครื่องวัด

ความเร็วลม (m/s)	ค่าความเร็วรอบ (RPM)	
	อะคริลิก	สแตนเลส
4	384	-
5	559	482
6	681	606

โดยถ้าเมื่อนำข้อมูลจากการ Simulation มาเปรียบเทียบกับกันแล้วก็ได้ดังตาราง

ตารางที่ 4-11 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบของกังหันลมอะคริลิกโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	ค่าความเร็วรอบ วัสดุอะคริลิก (RPM)		%ความแตกต่าง
	ผลการทดลองจริง	ผลการ Simulation	
4	384	486.3	21.03
5	559	675.75	17.27
6	681	750.02	9.26

ตารางที่ 4-12 ตารางเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบของกังหันลมสแตนเลสโมเดลที่ 7.1

ความเร็วลม (m/s)	ค่าความเร็วรอบ วัสดุอะคริลิก (RPM)		%ความแตกต่าง
	ผลการทดลองจริง	ผลการ Simulation	
5	482	428.61	12.45
6	606	533.85	13.51

จากตารางการเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบทั้งวัสดุอะคริลิกและสแตนเลส จะแสดงค่าความแตกต่างเฉลี่ยให้เห็นอยู่ที่ 9-20 % ซึ่งถือเป็นค่าที่ดีในการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและการทดสอบจริง (He et al., 2020)

จากการเปรียบเทียบการทดสอบวัสดุทั้งอะคริลิกและสแตนเลสของการทดลองจริงและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ได้ออกมาของค่าความเร็วลมและค่าความเร็วรอบ แสดงให้เห็นว่าด้วยการศึกษาทดลองด้วยการใช้โปรแกรมจำลองของไหล ANSYS® โดยใช้วิธี Dynamic Mesh Method สามารถใช้ในการศึกษาได้ดี และผลการทดลองที่ได้ก็อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ โดย มีค่าความแตกต่างอยู่ 10-30% โดยประมาณ

ในส่วนของค่าทอร์คและกำลังนั้นผู้วิจัยไม่สามารถทำการวัดได้เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดทั้งทอร์คและกำลังนั้น มีแต่เครื่องที่ใช้กับขนาดใหญ่ แต่ว่าจากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความเร็วและค่าความเร็วรอบ ซึ่งเป็นค่าที่ส่งผลต่อทั้งค่าทอร์คและค่ากำลังแล้ว จึงอนุมานว่าทั้งค่าทอร์คและค่าของกำลังอาจมีค่าความแตกต่างโดยประมาณที่ 20-40 % โดยเมื่อเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าอื่นๆ

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการนำผลการทดลองการจำลองทางคณิตศาสตร์และการสร้างกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กของกังหันโมเดลที่ 7 8 มาเพื่อเปรียบเทียบกัน โดยคาดว่าถ้ามีการนำกังหันลมแกนตั้งไปสร้างใช้งานจริงจะดีหรือไม่ พบว่ากังหันลมแกนตั้งโมเดลที่ 7 มีค่าของความเร็วรอบเท่ากับ 593.42 รอบ/นาที ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) 0.24 ส่วนกังหันลมแกนตั้งโมเดลที่ 8 มีค่าความเร็วรอบ 331.86 รอบ/นาที ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5 m/s และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) 0.032 โดยสรุป กังหันลมโมเดลที่ 7 จะมีค่าต่างๆ ที่ดีกว่าโมเดลทั้งหมด ทั้งในเรื่องของค่าความเร็วรอบและค่าสัมประสิทธิ์กำลัง อีกทั้งโครงสร้างยังสามารถสร้างได้ง่าย

การจำลองทางคณิตศาสตร์ของกังหันลมโมเดลที่ 8.1 และ 8.2 นั้น โดยหลักๆแล้วมีวัตถุประสงค์เพื่อดูผลว่าการติดส่วนยึดเสริมออกไปสามารถช่วยในเรื่องการเริ่มหมุนของกังหันลมได้ดีหรือไม่อย่างไร โดยผลจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าการใส่ส่วนเสริมสามารถช่วยให้เริ่มหมุนเร็วกว่ากังหันลมโมเดลที่ 8 ได้ และมีค่าความเร็วที่ติกว่าโดยกังหันลมโมเดลที่ 8.1 มีค่าความเร็วรอบอยู่ที่ 470.75 รอบ/นาที เพิ่มขึ้น 41.85 % และกังหันลมโมเดลที่ 8.2 มีค่าความเร็วรอบอยู่ที่ 485.39 รอบ/นาที เพิ่มขึ้น 46.26 % อย่างไรก็ตามเมื่อกังหันลมทำงานหรือหมุนไปได้สักพักหนึ่งก็จะเกิดการตีกลับและการหมุนแบบปั่นป่วน จึงสรุปได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ว่า แม้การเพิ่มส่วนยึดเสริมออกไปจะทำให้กังหันลมหมุนได้เร็วและออกตัวได้เร็วขึ้น (เนื่องจากไปเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย) แต่เมื่อกังหันลมหมุนไปได้ช่วงเวลานึงจะมีประสิทธิภาพต่ำลง ดูได้จากค่าประสิทธิภาพที่น้อยกว่าโมเดลที่ 8 อาจเป็นเนื่องด้วยขนาดพื้นที่ที่ใหญ่และอาจเป็นด้วยความเร็วมากเกินไปที่เพิ่มขึ้นมาจากส่วนที่ยึดออก โดยสรุปจากงานวิทยานิพนธ์นี้ คือ การติดส่วนยึดเสริมออกไปในกังหันลมแกนตั้งทำให้ประสิทธิภาพไม่สูงขึ้น

และเมื่อศึกษาปัจจัยของวัสดุที่ใช้ทำใบกังหันลม สรุปว่าการใช้วัสดุอย่างอะคริลิกจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ติกว่าวัสดุอย่างสแตนเลส โดยมีทั้งน้ำหนักที่เบากว่า ทำให้มีค่าความเร็วรอบที่ติกว่า โดยมีค่าความเร็วรอบ 750.51 รอบ/นาที ที่ความเร็วลม 6 m/s โดยวัสดุที่ใช้สแตนเลสที่ความเร็วลม 6 m/s มีค่าความเร็วรอบ 533.85 รอบ/นาที และจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นว่าการใช้

วัสดุที่ทำจากอะคริลิกมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ดีกว่าโดยมีค่าอยู่ที่ 0.069 ที่ความเร็วลม 6 m/s ในขณะที่วัสดุสแตนเลสที่ความเร็ว 6 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ที่ 0.049

จากการเปรียบเทียบค่าจากการทดลองจริงและค่าจากการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสรุปได้ว่าการใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมสามารถใช้ในการประเมินศักยภาพการทำงานของกังหันลมแกนตั้งได้ โดยพิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ประมาณ 9-20 % ของค่าความเร็วรอบการหมุนกังหันลมและ 20-29 % ของค่าความเร็วลม

งานวิจัยชิ้นนี้เน้นไปในทางการทดลองด้วยการ Simulation โดยในตอนแรกผู้วิจัยได้มีการศึกษาหาข้อมูล และลองใช้โปรแกรมต่างๆ จนในที่สุดก็ได้เลือกใช้โปรแกรม ANSYS® โดยผู้วิจัยไม่เคยมีความรู้หรือเคยใช้งานโปรแกรมเกี่ยวกับการ Simulation มาก่อน ทำให้ในช่วงแรกของการทำวิจัยมีความล่าช้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องทำการศึกษาและเรียนรู้การใช้โปรแกรม และเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการ Simulation

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เน้นหนักไปในทางการ Simulation เพื่อดูถึงการทำงานของกังหันลม ทำให้ไม่ได้มีการศึกษาเรื่องการผลิตงานที่เกิดการใช้งานจริง ดังนั้นหากมีโปรแกรมที่สามารถทำงานในส่วนนี้ได้ อาจจะทำการทดสอบได้มากขึ้นว่าการทำงานเป็นอย่างไร

ในส่วนของการทดลองจริง เนื่องจากโมเดลที่ใช้ทดสอบมีขนาดเท่ากับขนาดของโมเดลใน Simulation ทำให้ไม่มีอุปกรณ์สำหรับการศึกษาค่าของทอร์คและค่ากำลัง โดยคิดว่าถ้าสามารถสร้างขนาดให้ใหญ่ขึ้นโดยอ้างอิงจากการใช้ Scaling law อาจจะทำได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการขยายผลของการทดลอง และผลของการจำลองทางคณิตศาสตร์ ไปสู่การสร้างกังหันลมแกนตั้งที่ความเร็วลมต่ำต่อไปในอนาคต

บรรณานุกรม

- Ahmed, S.R., Khanna, S., 2020. Investigation into features of fracture toughness of a transparent E-glass fiber reinforced polyester composites at extreme temperatures. *Heliyon* 6, e03986.
- Alanis Ruiz, C., Kalkman, I., Blocken, B., 2021. Aerodynamic design optimization of ducted openings through high-rise buildings for wind energy harvesting. *Building and Environment* 202.
- Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., Ferrari, L., 2016. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy* 85, 419-435.
- Belkacem, B., Paraschivoiu, M., 2016. CFD Analysis of a Finite Linear Array of Savonius Wind Turbines. *Journal of Physics: Conference Series* 753.
- Chong, W.-T., Muzammil, W.K., Wong, K.-H., Wang, C.-T., Gwani, M., Chu, Y.-J., Poh, S.-C., 2017. Cross axis wind turbine: Pushing the limit of wind turbine technology with complementary design. *Applied Energy*.
- Concli, F., Gorla, C., Della Torre, A., Montenegro, G., 2014. Churning power losses of ordinary gears: A new approach based on the internal fluid dynamics simulations. *Lubrication Science* 27, 313-326.
- Douak, M., Aouachria, Z., Rabehi, R., Allam, N., 2017. Wind energy systems: Analysis of the self-starting physics of vertical axis wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Feng, J., Shen, W.Z., 2017. Design optimization of offshore wind farms with multiple types of wind turbines. *Applied Energy* 205, 1283-1297.

Galinos, C., Larsen, T.J., Madsen, H.A., Paulsen, U.S., 2016. Vertical Axis Wind Turbine Design Load Cases Investigation and Comparison with Horizontal Axis Wind Turbine. *Energy Procedia* 94, 319-328.

Hand, B., Cashman, A., 2018. Aerodynamic modeling methods for a large-scale vertical axis wind turbine: A comparative study. *Renewable Energy* 129, 12-31.

Handwerker, M., Wellnitz, J., Marzbani, H., Tetzlaff, U., 2021. Annealing of chopped and continuous fibre reinforced polyamide 6 produced by fused filament fabrication. *Composites Part B: Engineering* 223, 109119.

He, J., Jin, X., Xie, S., Cao, L., Wang, Y., Lin, Y., Wang, N., 2020. CFD modeling of varying complexity for aerodynamic analysis of H-vertical axis wind turbines. *Renewable Energy* 145, 2658-2670.

He, X., Ding, Y., Lei, Z., Welch, S., Zhang, W., Dunn, M., Yu, K., 2021. 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoset composites. *Additive Manufacturing* 40, 101921.

Hosseini, A., Goudarzi, N., 2019. Design and CFD study of a hybrid vertical-axis wind turbine by employing a combined Bach-type and H-Darrieus rotor systems. *Energy Conversion and Management* 189, 49-59.

Iqbal Khan, Z., Habib, U., Binti Mohamad, Z., Razak Bin Rahmat, A., Amira Sahirah Binti Abdullah, N., 2021. Mechanical and thermal properties of sepiolite strengthened thermoplastic polymer nanocomposites: A comprehensive review. *Alexandria Engineering Journal*.

Korprasertsak, N., Leephakpreeda, T., 2016. Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 159, 9-18.

- Lanzafame, R., Mauro, S., Messina, M., 2015. HAWT Design and Performance Evaluation: Improving the BEM Theory Mathematical Models. *Energy Procedia* 82, 172-179.
- Lin, S.-Y., Lin, Y.-Y., Bai, C.-J., Wang, W.-C., 2016. Performance analysis of vertical-axis-wind-turbine blade with modified trailing edge through computational fluid dynamics. *Renewable Energy* 99, 654-662.
- Luankaeo, S., Tirawanichakul, Y., 2017. Assessment of Wind Energy Potential in Prince of Songkla University (South Part of Thailand): Hatyai campus, *Energy Procedia*, pp. 704-709.
- Mahmuddin, F., Klara, S., Sitepu, H., Hariyanto, S., 2017. Airfoil Lift and Drag Extrapolation with Viterna and Montgomerie Methods. *Energy Procedia* 105, 811-816.
- Müller, G., Chavushoglu, M., Kerri, M., Tsuzaki, T., 2017. A resistance type vertical axis wind turbine for building integration. *Renewable Energy* 111, 803-814.
- Nimje, A.A., Gandhi, N.M., 2020. Design and development of small wind turbine for power generation through high velocity exhaust air. *Renewable Energy* 145, 1487-1493.
- Park, D.-W., Oh, G.-H., Kim, H.-S., 2019. Predicting the stacking sequence of E-glass fiber reinforced polymer (GFRP) epoxy composite using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. *Composites Part B: Engineering* 177, 107385.
- Pourrajabian, A., Nazmi Afshar, P.A., Ahmadizadeh, M., Wood, D., 2016. Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade. *Renewable Energy* 87, 837-848.

- Quan, P., Leephakpreeda, T., 2015. Assessment of wind energy potential for selecting wind turbines: An application to Thailand. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 11, 17-26.
- Shao, H., Gao, Z., Liu, X., Busawon, K., 2017. Parameter-varying modelling and fault reconstruction for wind turbine systems. *Renewable Energy*.
- Tahani, M., Rabbani, A., Kasaeian, A., Mehrpooya, M., Mirhosseini, M., 2017. Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability. *Energy* 130, 327-338.
- Tang, X., Huang, X., Peng, R., Liu, X., 2015. A Direct Approach of Design Optimization for Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades. *Procedia CIRP* 36, 12-16.
- Tian, W., Mao, Z., Zhang, B., Li, Y., 2018. Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renewable Energy* 117, 287-299.
- Waewsak, J., Kongruang, C., Gagnon, Y., 2017. Assessment of wind power plants with limited wind resources in developing countries: Application to Ko Yai in southern Thailand. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 19, 79-93.
- Waewsak, J., Landry, M., Gagnon, Y., 2015. Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renewable Energy* 81, 609-626.
- Wang, X., Peng, Z., Ding, L., Lu, J., Zhu, Z., Wu, Z., 2021. Mechanical and bonding behavior of a bendable fiber-reinforced thermoplastic rebar. *Construction and Building Materials* 302, 124222.

Werapun, W., Tirawanichakul, Y., Kongnakorn, W., Waewsak, J., 2014. An Assessment of Offshore Wind Energy Potential on Phangan Island by in Southern Thailand. *Energy Procedia* 52, 287-295.

Worasinchai, S., Suwannakij, K., 2018. Performance characteristics of the Savonius turbine, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1 ed.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายธนพัฒน์ อัครชัยพันธุ์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 6010120048

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2559

ทุนการศึกษา

- ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย บัณฑิตวิทยาลัยสหวิทยาการระบบพลังงาน (IGS) ของสถาบันวิจัยระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัย

ธนพัฒน์ อัครชัยพันธุ์, ยุทธนา ฐิระวณิชย์กุล และ บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง. 2562. การออกแบบโมเดลกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวนีเยส และศึกษาด้วยการจำลองผลทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม ANSYS®. Siam Physics Congress 2019 (SPC 2019).

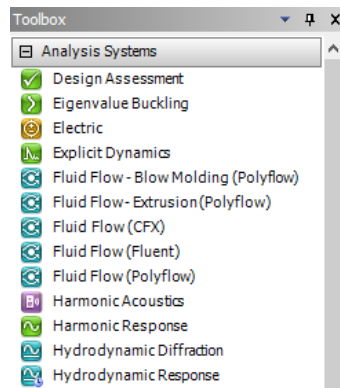
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คู่มือการ Simulation ด้วยโปรแกรม ANSYS®

คู่มือการ Simulation กังหันลมด้วยโปรแกรม ANSYS®

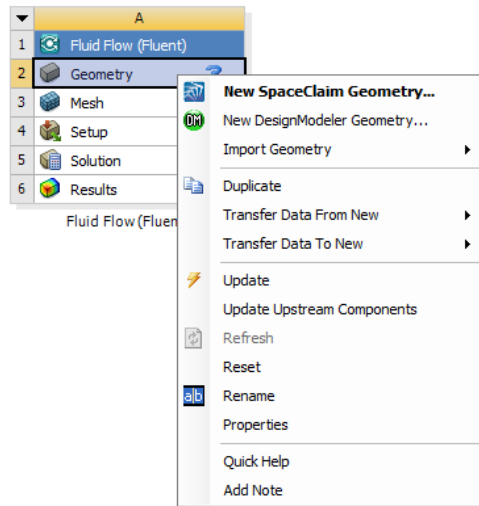
1. ในการ Simulation ให้เลือกใช้ Fluid Flow(Fluent) ในการใช้งาน ตามรูป ซึ่งเป็นการใช้ Simulation เกี่ยวของไหลจำพวกน้ำหรืออากาศ



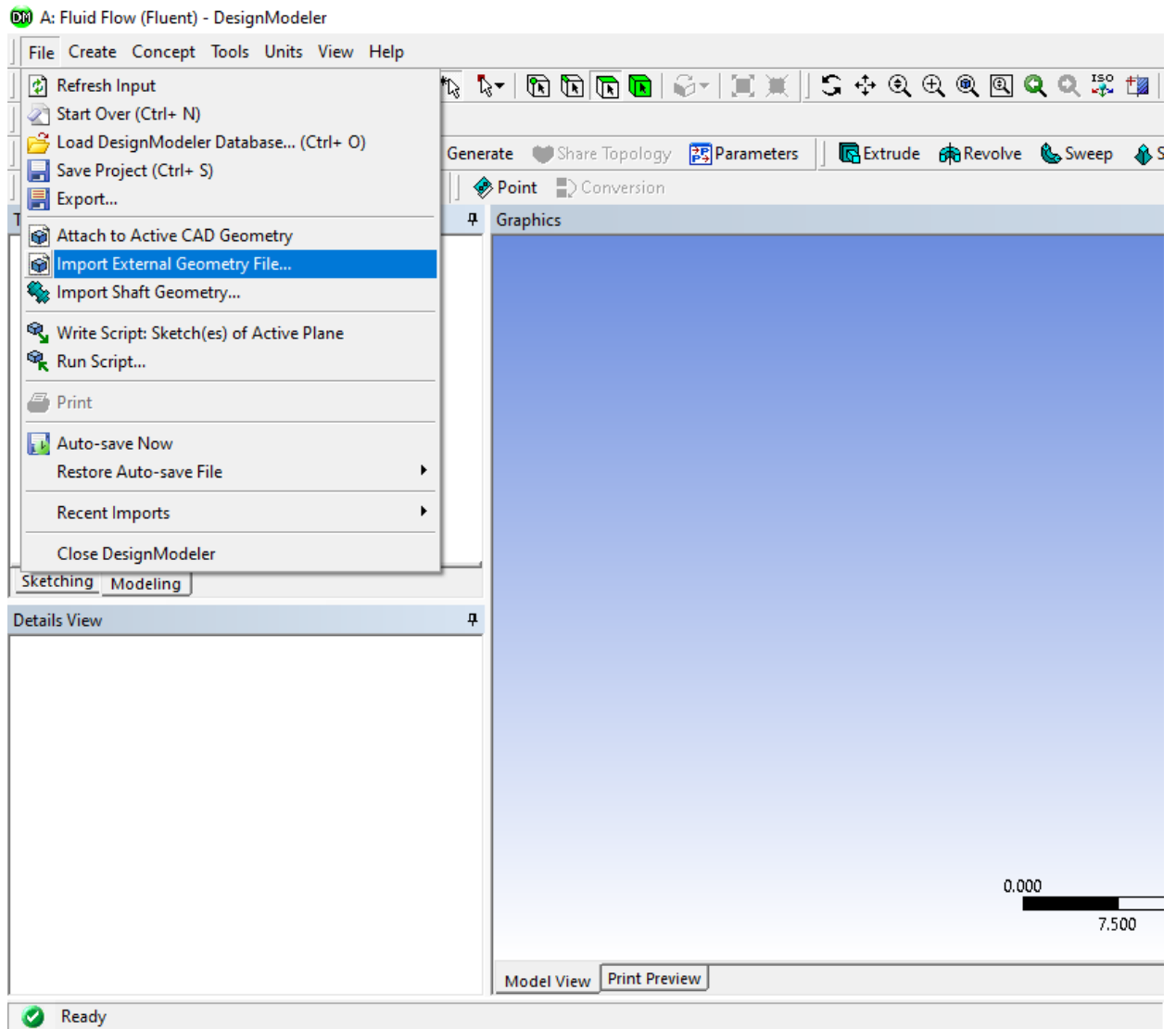
2. การสร้างโมเดลและการออกแบบสร้างพื้นที่สำหรับการ Simulation

สิ่งที่ต้องการอย่างแรกในการ Simulation คือโมเดลในการจำลอง โดยตัวสร้างโมเดลจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ตัวคือ SpaceClaim กับ DesignModeler โดยเราสามารถโหลดตัวโมเดลที่วาด,กับโปรแกรมอื่นมาใช้ได้ในตัวสร้างทั้ง 2 ตัว โดยตัว SpaceClaim จะมีการใช้งานการสร้างโมเดลที่คล้ายคลึงกับโปรแกรม Solidwork

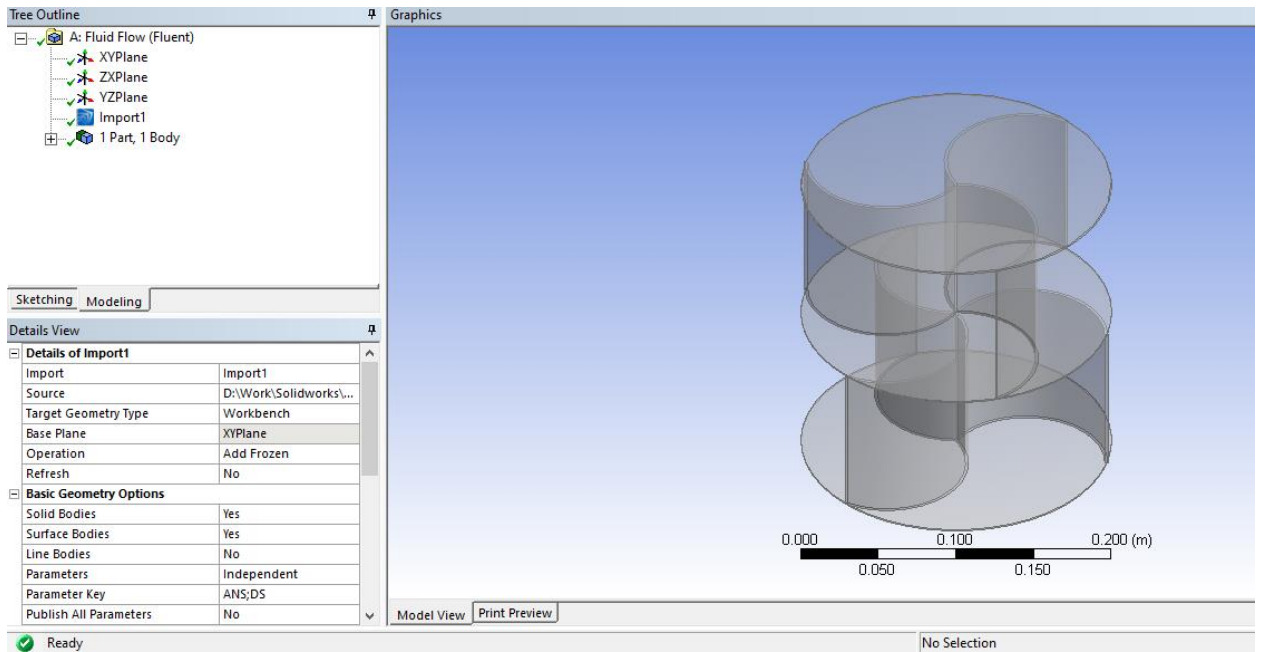
ข้อแนะนำ: ควรสร้างโมเดลหรือปรับแต่งโมเดลด้วย SpaceClaim แล้วค่อยใช้ DesignModeler ในสร้างพื้นที่สำหรับการSimulation



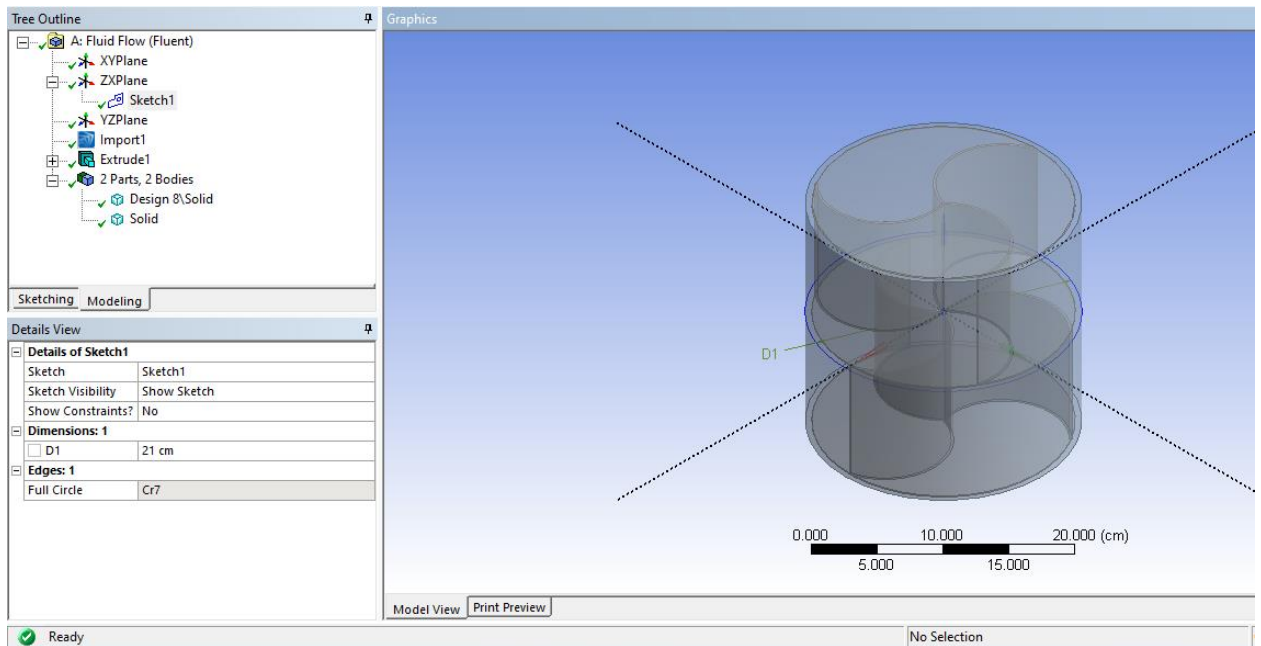
หลังจากการสร้างโมเดลเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้โหลดตัวโมเดลที่สร้างใน DesignModeler โดยเลือก Import External Geometry File ตามรูป ในการ import นี้สามารถดึงตัวโมเดลที่สร้างจากโปรแกรมอื่นมาได้โดยให้ดูที่นามสกุลไฟล์ให้ตรงกับที่มีให้เลือก

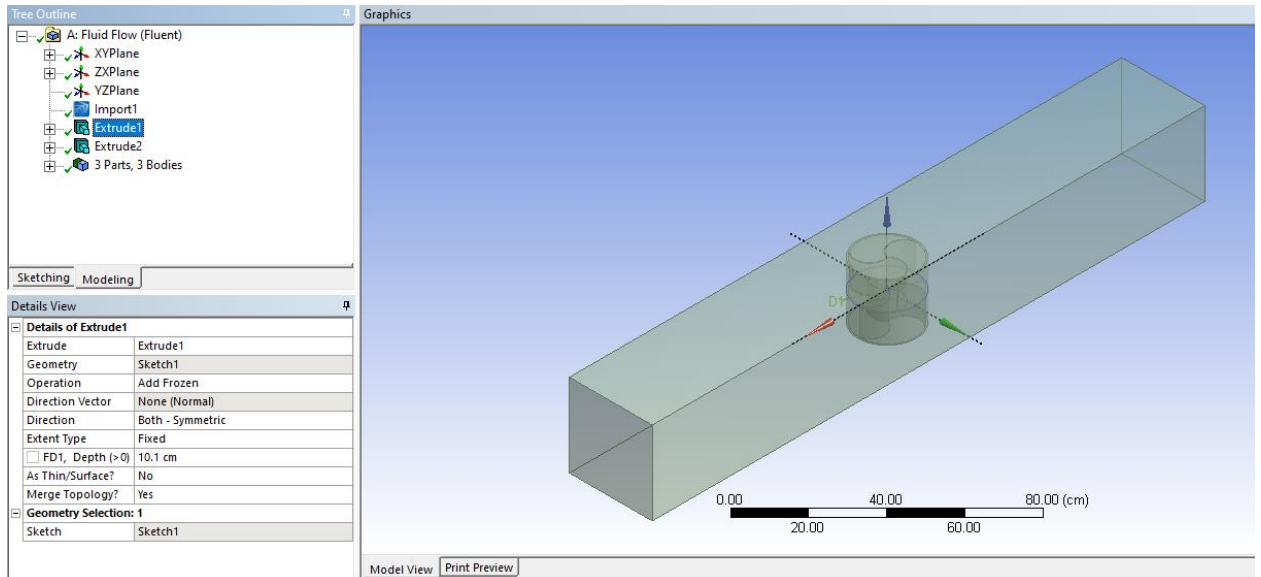


เมื่อโหลดเสร็จเรียบร้อยแล้วให้กด Generate จะได้ตามรูป

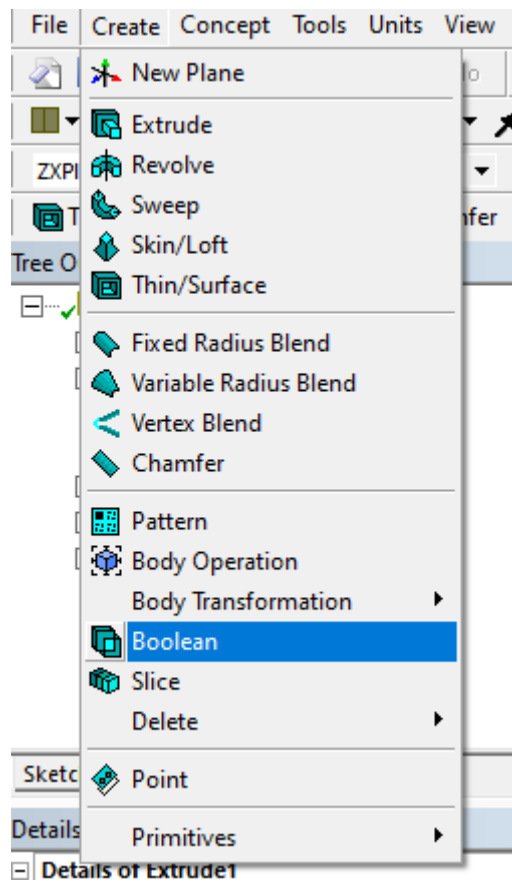


จากนั้นก็ทำการสร้างรูปทรงกระบอกขึ้นมาครอบตัวโมเดล แล้วสร้างทางยาวสี่เหลี่ยมสำหรับ อุโมงค์ลม โดยตั้ง Operation ทั้งสองอย่างเป็น add frozen เพื่อไม่ให้ทั้งสองส่วนรวมเป็นอันเดียวกัน

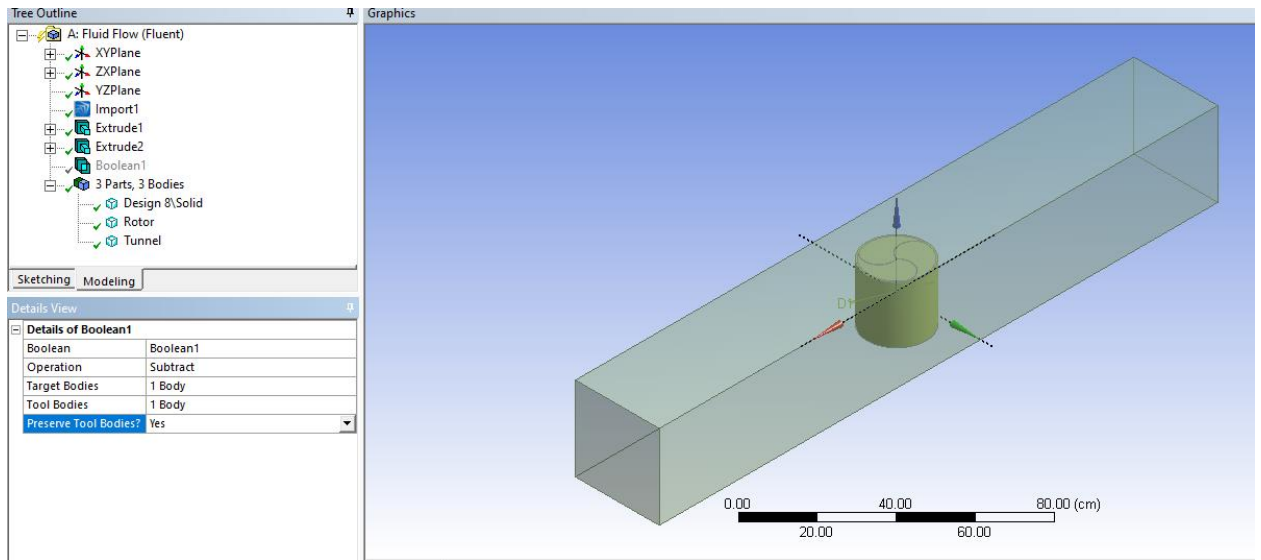




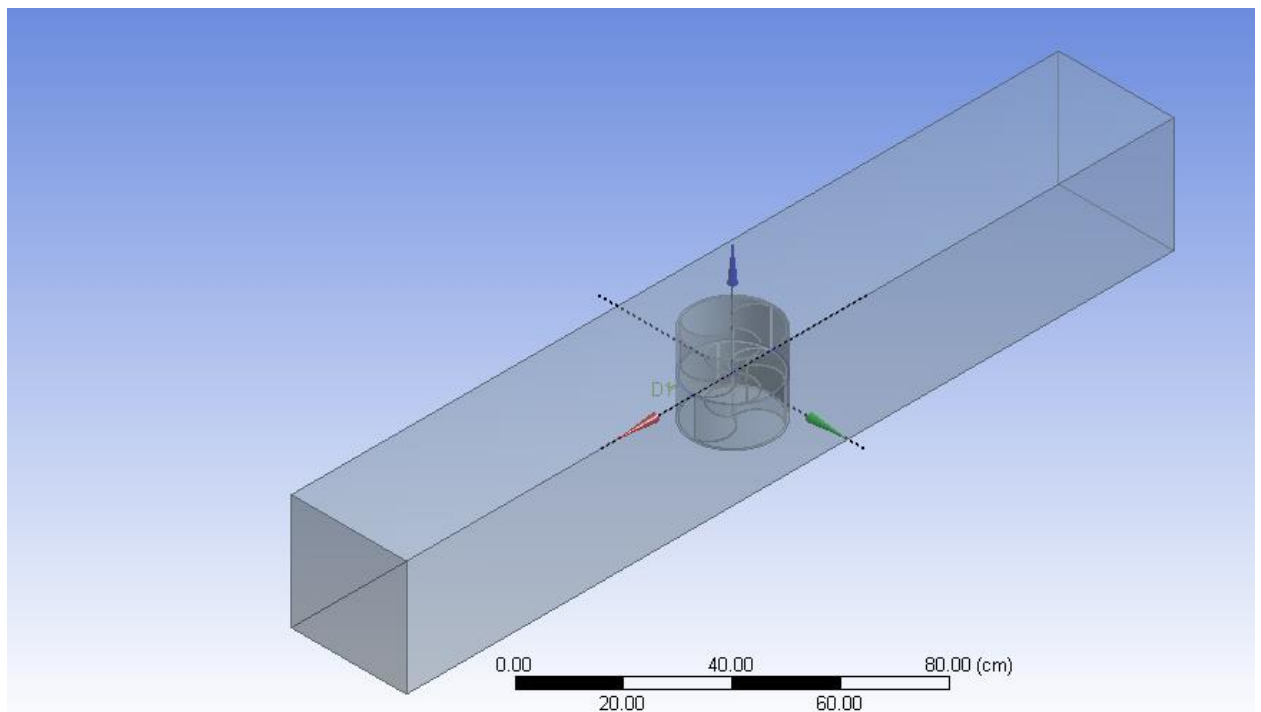
จากนั้นก็ทำการใช้ Boolean โดยเลือกใช้การ Subtract



โดย Boolean แรกให้ใช้ อุโมงค์ลมเป็น Target Bodies และทรงกระบอกเป็น Tool Bodies
โดยเลือก Yes ที่ Preserve bodies เพื่อให้โปรแกรมยังแสดงทรงกระบอกไว้แม้ตัดส่วนออกไปแล้ว



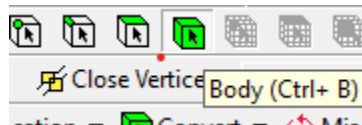
Boolean ที่สองให้ใช้ ทรงกระบอกที่เรา Preserve Bodies ไว้เป็น Target Bodies และโมเดล
เป็น Tool Bodies โดยเลือก No ที่ Preserve Bodies



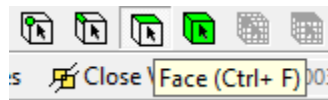
เมื่อทำการตั้งแบบโมเดลสำหรับSimulationเรียบร้อยแล้วก็ไปขั้นตอนต่อไปได้เลย

3. การตั้งค่า Mesh และกำหนดแบริเรียสำหรับการ Simulation

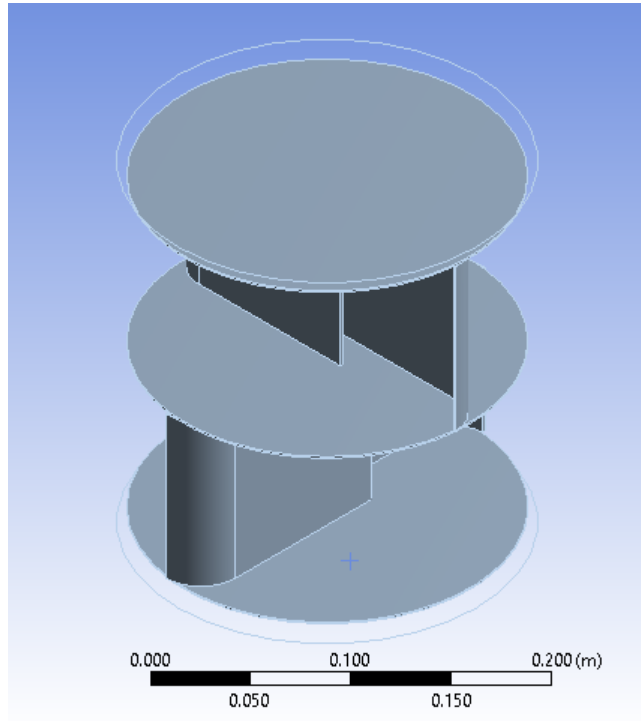
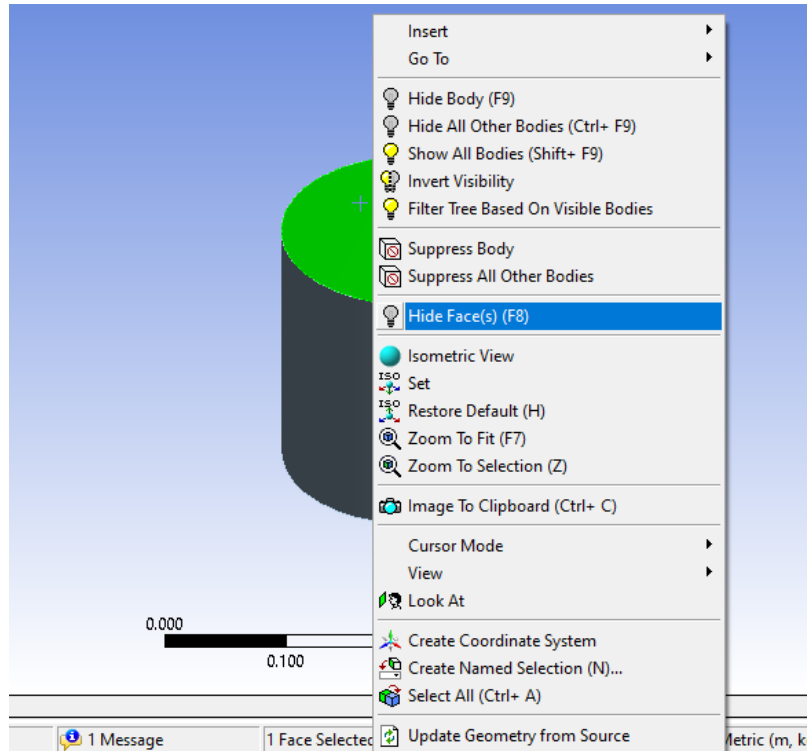
อย่างแรกที่ต้องทำคือกำหนดชื่อให้กับแบริเรียต่างๆ โดยเราจะเลือกการเลือกแบบ Body ในการสร้างชื่อให้กับตัวอุโมงค์ลมและ บริเวณที่ต้องการให้หมุน



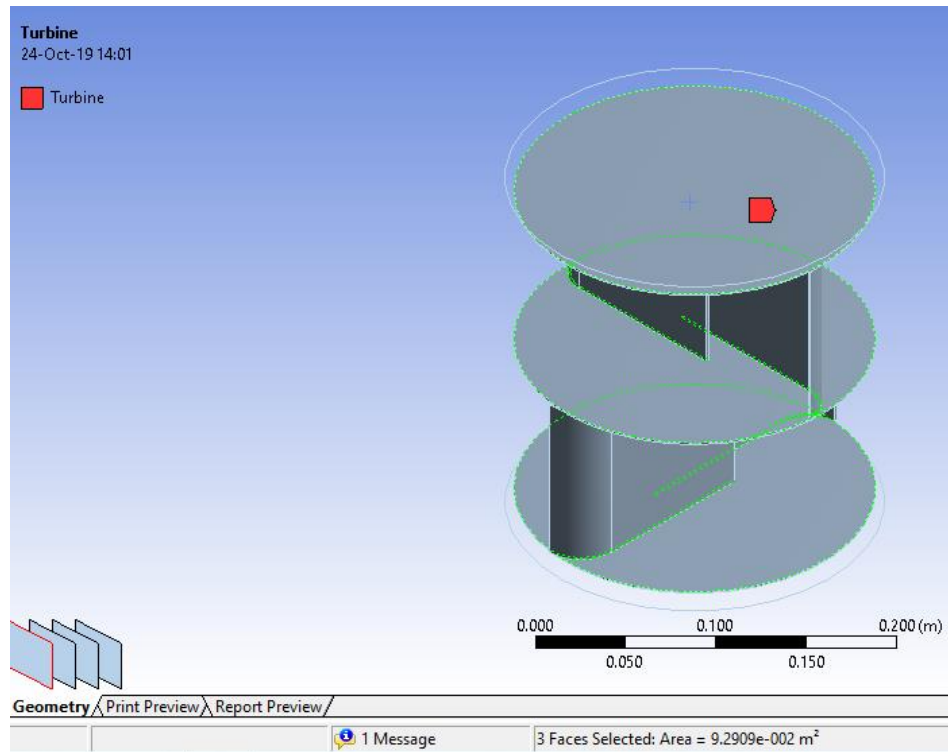
โดยให้ตั้งชื่อตัวอุโมงค์ลมให้อย่างง่ายว่า Domain และพื้นที่หมุนว่า Innerdomain จากนั้นก็ให้ทำการเลือกแบบ บริเวณหน้าหรือ Select face



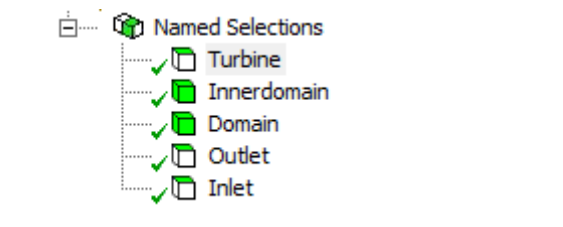
เลือกบริเวณที่ต้องให้ลมเข้าที่อุโมงค์ลมว่า Inlet และปลายอุโมงค์ลมว่า Outlet การตั้งชื่อให้เป็น Inlet และ Outlet จะทำให้ตำแหน่งนั้นเป็นจุดลมเข้าและลมออกในส่วนของ Simulation โดยอัตโนมัติ ส่วนที่ไม่ตั้งชื่อทั้งหมดจะถูกจัดเป็น Wall ซึ่งก็คือกำแพงไปโดยอัตโนมัติ จากนั้นก็ให้ทำการซ่อน Body ของอุโมงค์ลม และทำการ Hide face ของบริเวณหมุนทั้งหมด โดยเราจะเห็นเป็นรูปทรงกึ่งเห็นตามรูป



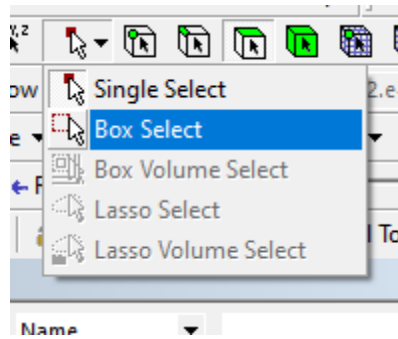
จากนั้นก็ให้ทำการเลือกแบบ Select face โดยให้คลิกเลือกหน้าทั้งหมดที่โมเดลที่เราสร้างไว้โดยการกด Ctrl ค้างไว้เวลาเลือกหน้าทั้งหมด โดยเมื่อเลือกเสร็จแล้วก็ให้ทำการตั้งชื่อ Turbine



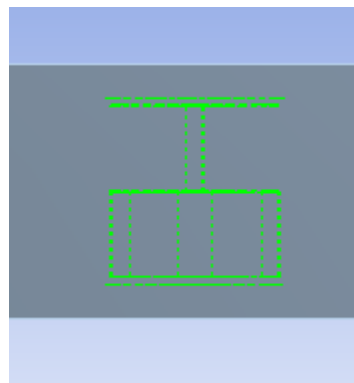
จากนั้นก็ทำการคืน ตัว Body และ Face ที่ซ่อนไว้ โดยการกด Show hidden face, Show hidden body



อีกวิธีในการกำหนดชื่อสำหรับก้งหันลมคือการใช้ Box Select ตามรูป

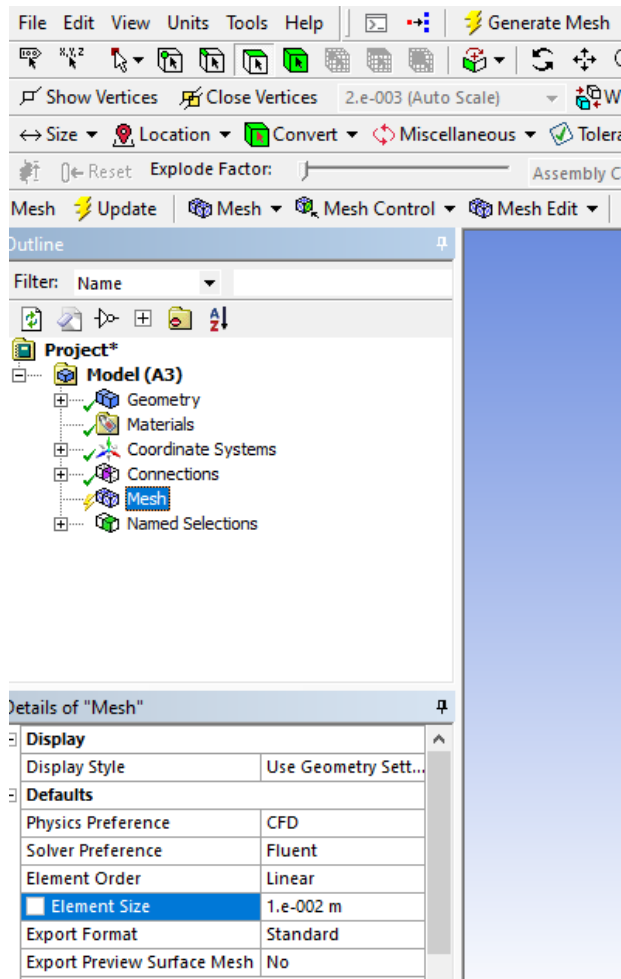


จากนั้นก็ทำการใช้กรอบสี่เหลี่ยมครอบบริเวณกลางอุโมงค์ลมที่คาดว่ากังหันลมน่าจะอยู่ก็จะได้ดังรูป



โดยเราสามารถตั้งชื่อให้ส่วนที่เลือกได้ด้วยวิธี

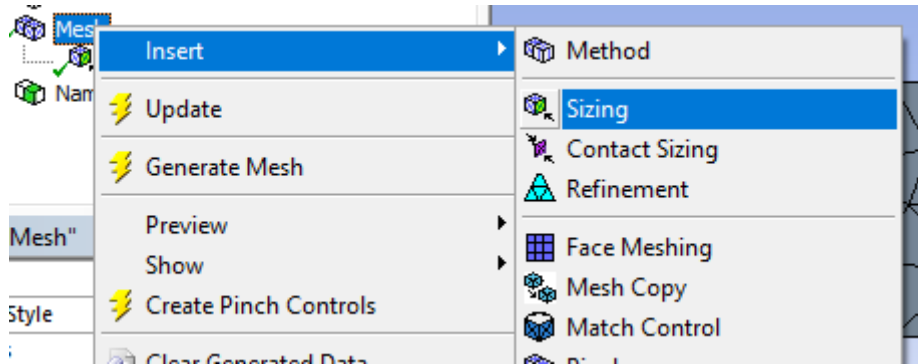
จากนี้ก็จะเป็นการสร้าง Mesh โดยอย่างแรกเลยคือกำหนด Elemental size ให้กับการ Simulation โดยยิ่ง mesh ละเอียดมากผลการ Simulation ก็ยิ่งละเอียด แต่ก็ทำให้ใช้เวลาในการ Simulation นานมากขึ้นกับไฟล์หนักขึ้น โดยการเลือกขนาด mesh นี้ไม่ได้จำเป็นว่าต้องละเอียดมากทุกครั้ง โดยให้ดูถึงความเหมาะสมกับโมเดล โดยถ้าการ Simulation เกิด Error เราสามารถมาปรับ ตรง mesh ให้ละเอียดเพื่อให้ผลดีขึ้นได้ โดยในตัวอย่างได้เลือกให้มีขนาด 0.01 โดยเมื่อเลือกเสร็จแล้วก็ให้ทำการ Generate mesh จะได้ตามรูป



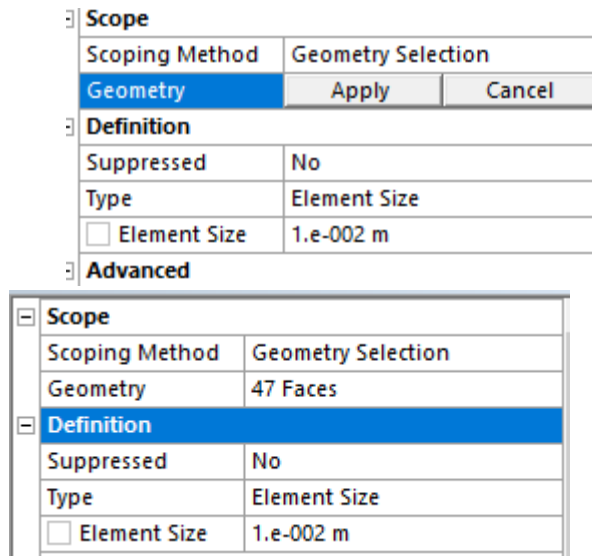
เมื่อ Generate mesh เสร็จแล้วก็ให้ทำการกด Update เป็นอันเสร็จสิ้นการสร้าง Mesh

3.1 Sizing mesh

อีกวิธีหนึ่งสำหรับการเพิ่มความละเอียดของ mesh โดยการเพิ่มความละเอียดเฉพาะจุด โดยการ
ใช้ sizing mesh ตามรูป



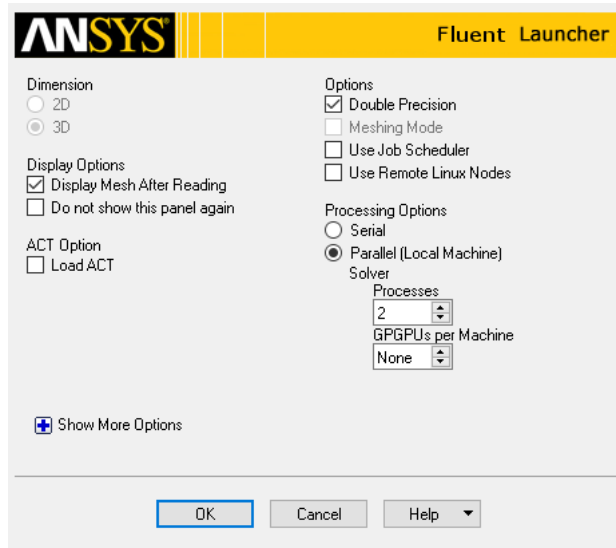
โดยการเลือกพื้นที่ใช้ในการเจาะจงพื้นที่ละเอียดคือบริเวณก้างหัน โดยสามารถเลือกพื้นที่โดยใช้วิธีการใช้ Box Select เหมือนการตั้งชื่อพื้นที่ตามรูป



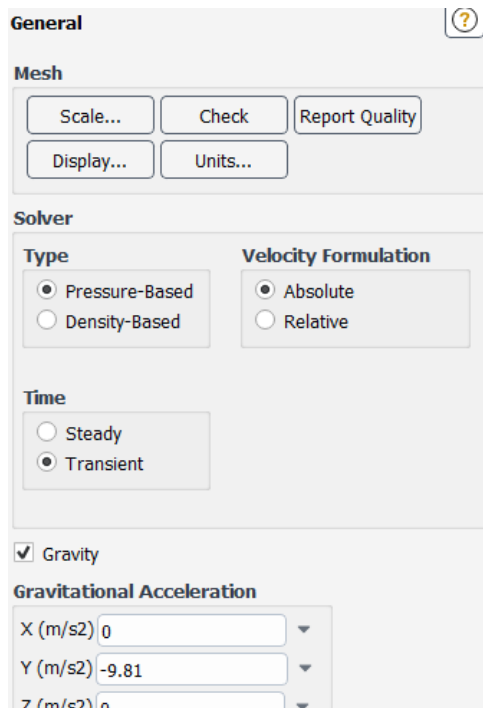
โดยขนาดของ Element Size ก็กำหนดความละเอียดตามความเหมาะสมที่จะใช้ในการ Simulation

4. Setup Simulation

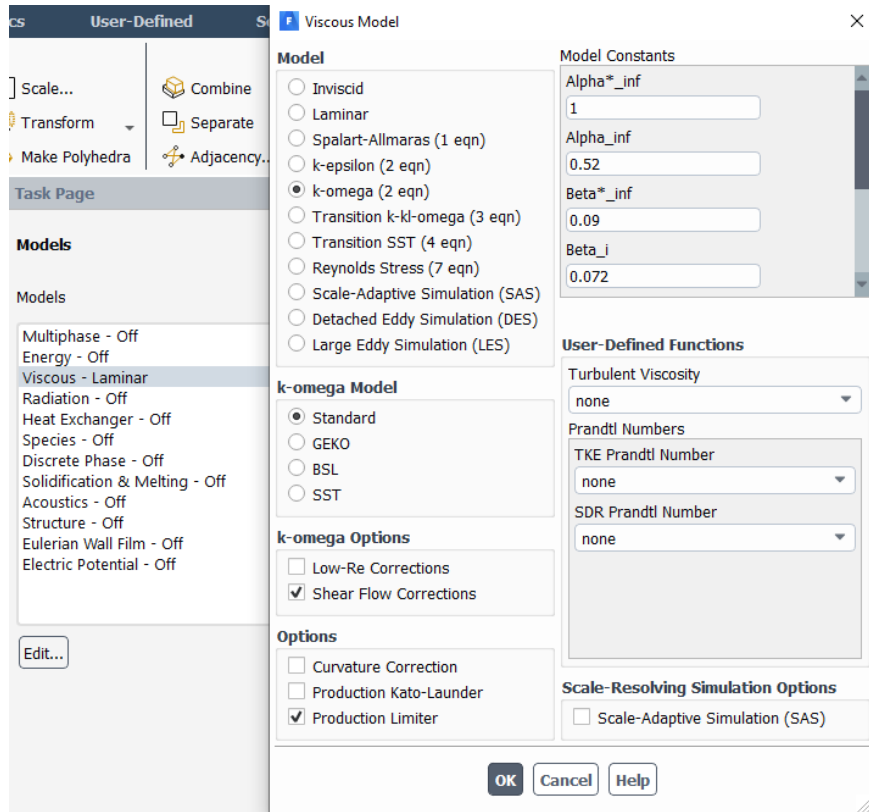
ในส่วนของการ Setup เริ่มต้นในส่วนของ Launcher เลือกให้ Option เป็น Double Precision เพื่อความละเอียดที่มากขึ้น และเลือก Processing Options เป็นแบบ Parallel โดยจำนวน Processes ที่ใช้ก็ให้เลือกขึ้นอยู่กับตัวประมวลผลของคอมที่ใช้ โดยในงานจะใช้ 2 ตามรูป



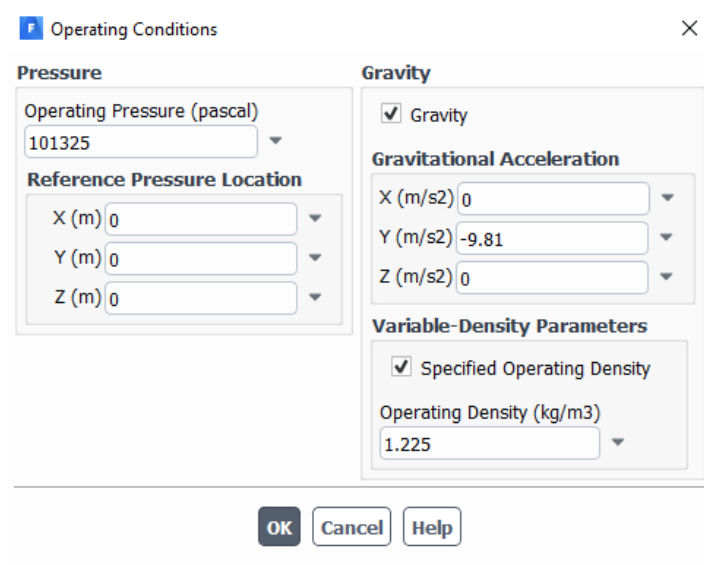
จากนั้นในส่วนต่อมา ในส่วน Setup General ให้เลือก Time เป็น Transient เนื่องจากเราต้องการให้เป็นการ Simulation ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จากนั้นก็เลือกติ๊กที่ Gravity และตั้งค่าที่ Y เป็น -9.81



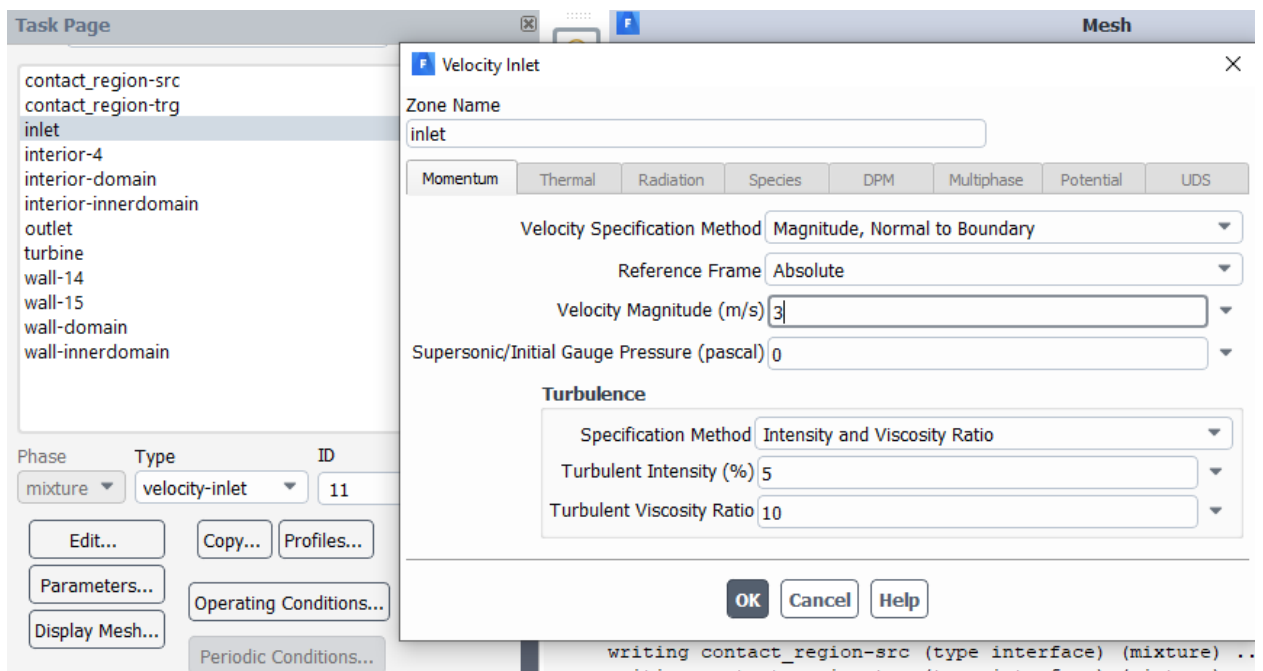
ใน Setup Model ให้เลือกใช้ Viscous Model k-omega (2eqn) โดย k-omega จะเหมาะกับการ Simulation ที่มีการหมุนในพื้นที่ของของไหล มากกว่า k-epsilon



จากนั้นใน Setup Cell Zone Conditions ให้กดที่ Operating Condition แล้วทำการติ๊กที่ Specified Operating Density ตามรูป

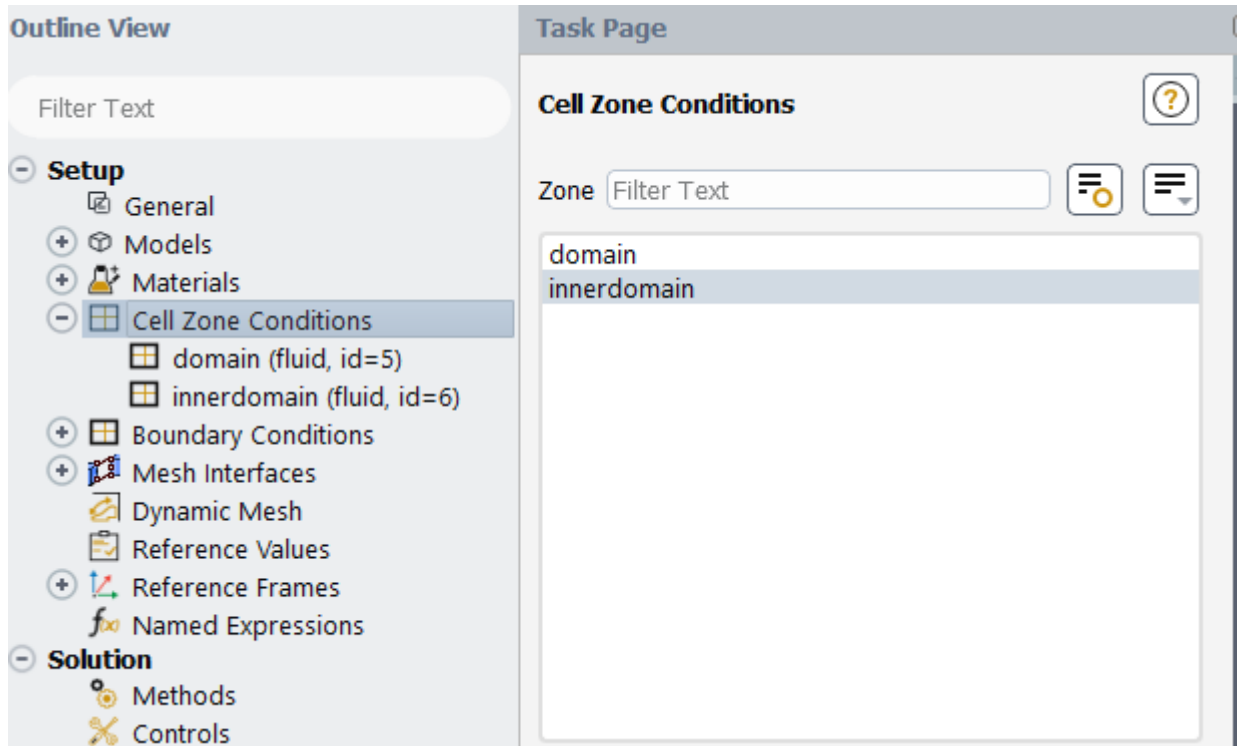


ในส่วนของ Setup Boundary Condition ให้เลือกที่ Inlet และ Edit จะเป็นการกำหนดค่าความเร็วลมที่ต้องการให้ปล่อยเข้าไปทาง inlet โดยในส่วน Inlet นี้ ถ้าตั้งชื่อตำแหน่งที่จะปล่อยลมเป็นชื่ออื่นๆ ที่ไม่มีคำว่า Inlet อยู่ในชื่อ จะต้องมาเปลี่ยน Type ให้กลายเป็น Velocity-inlet ซะก่อน แต่ถ้าในชื่อตำแหน่งนั้นใส่คำว่า Inlet ไว้ โปรแกรมจะทำการจำว่ามันคือ Velocity-inlet เองโดยอัตโนมัติ จากนั้นก็เลือกใส่ความเร็วที่ต้องการใน Velocity Magnitude จากนั้นก็ทำการ Ok

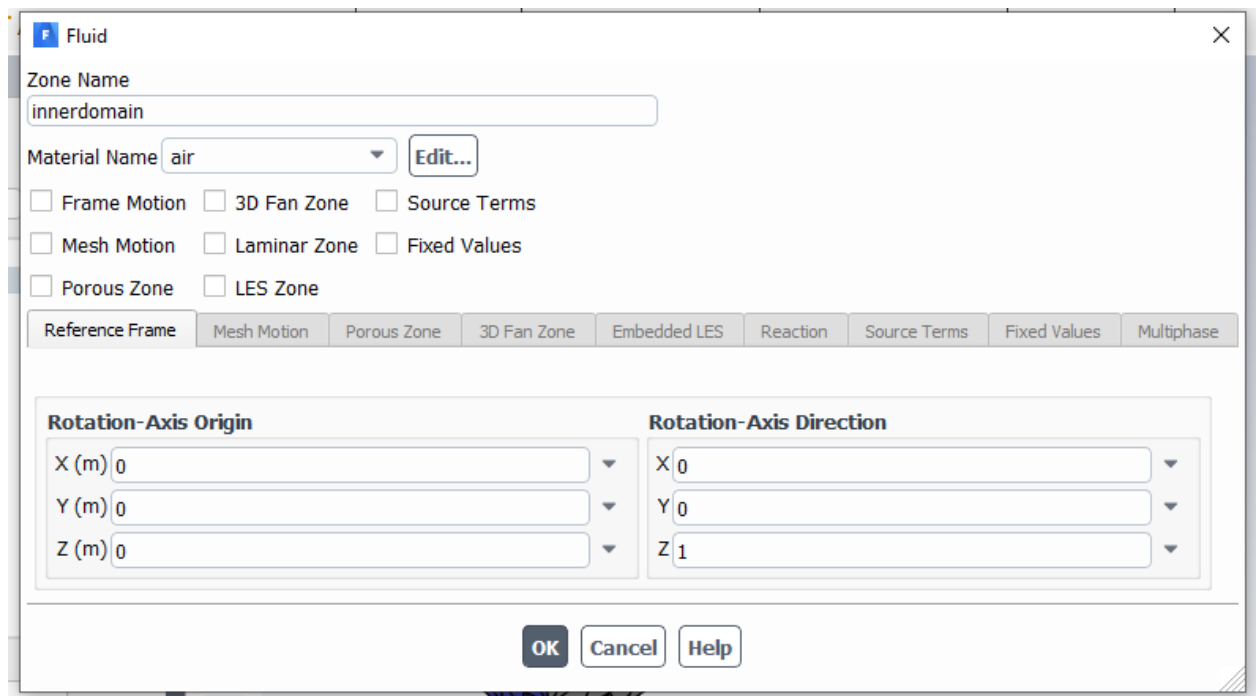


4.1 Sliding mesh method

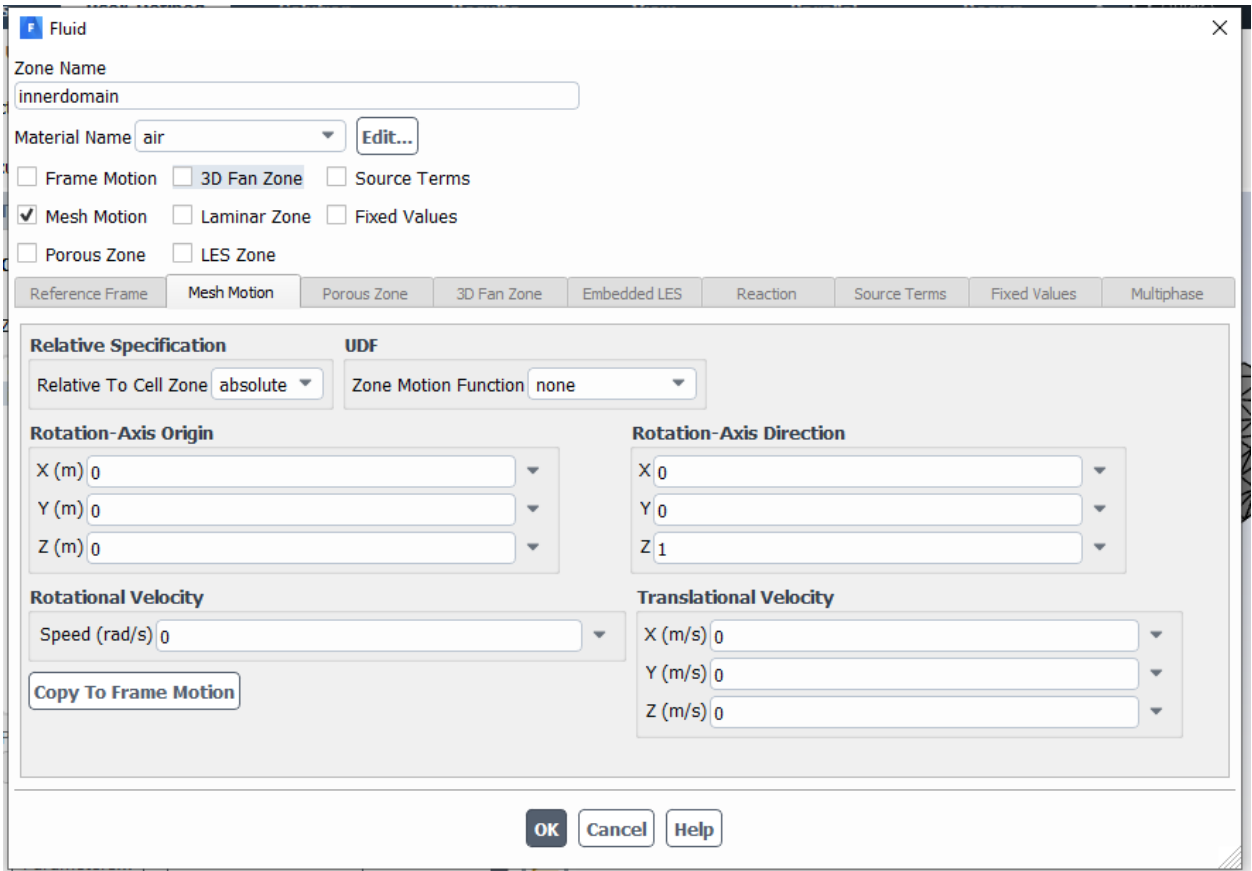
ในส่วนของ Sliding Mesh จะเริ่มทำในส่วนของ Cell Zone Conditions ตามรูป



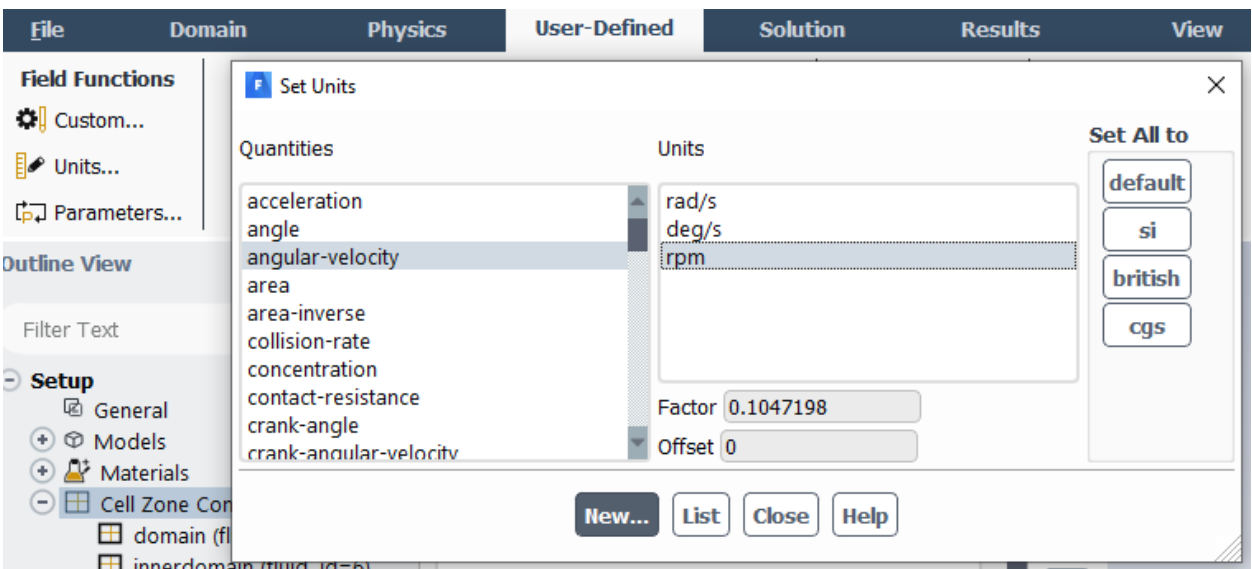
จากนั้นก็เลือกในส่วนของ innerdomain แล้วเลือก Edit ตามรูป



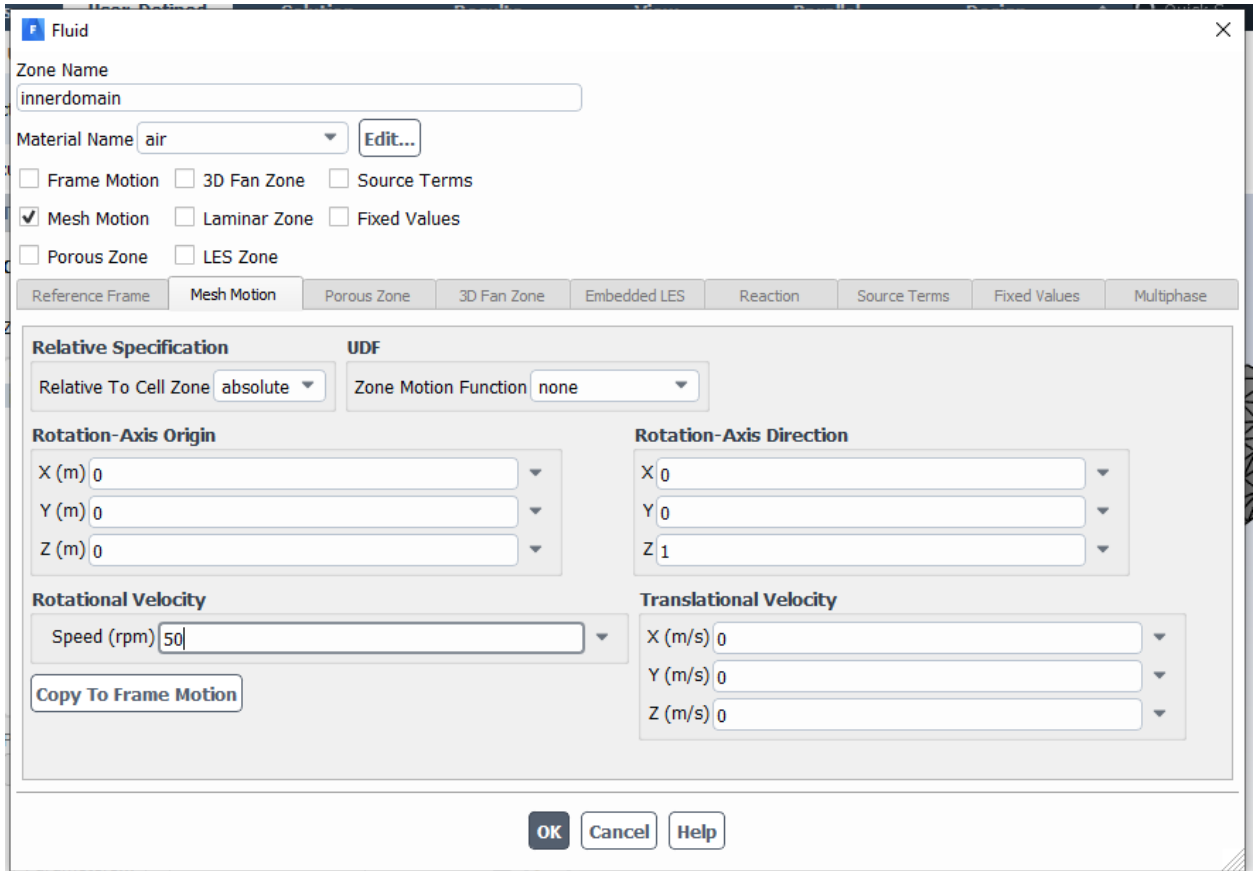
จากนั้นก็เลือก Mesh Motion แล้วตั้ง



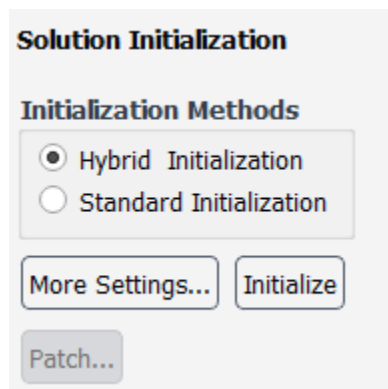
ค่า Rotational Velocity ยังเป็นหน่วย rad/s ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนหน่วยซะก่อน โดยเปลี่ยนที่ unit



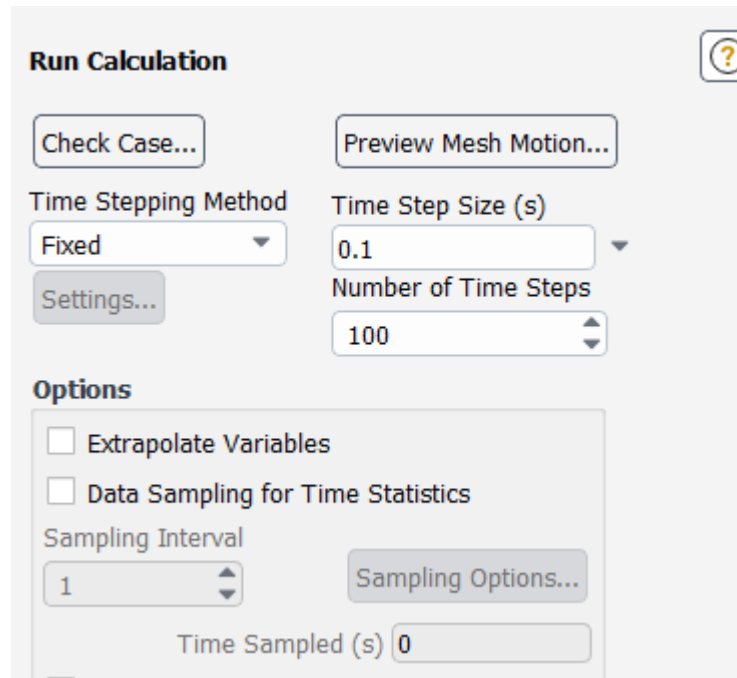
เมื่อเปลี่ยนหน่วยแล้วก็กลับมาตั้งค่า Rotational Velocity เป็น 50 rpm และตั้ง Rotational-Axis Direction เป็นที่แกน Z



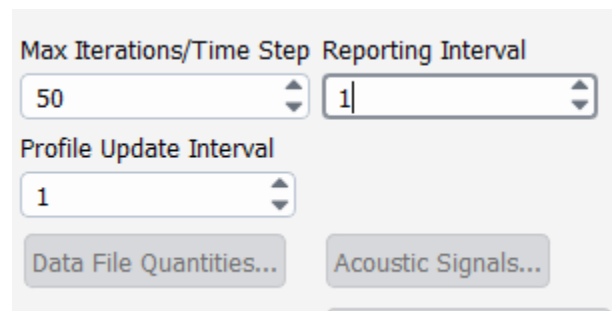
ในส่วนของการ Initialization นั้นให้เลือกใช้ Initialization Method เป็น Hybrid Initialization



ในส่วนของ Run Calculation ให้ตั้งค่า time step size และจำนวน time step ตามที่ต้องการ

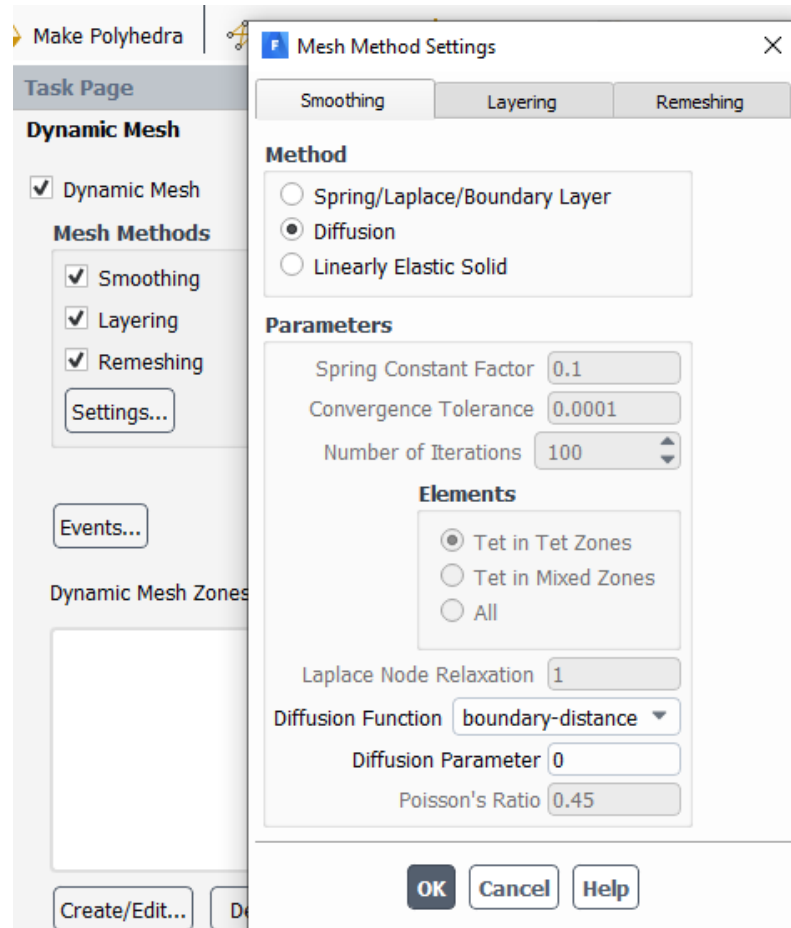


ในส่วนการ Iterations ให้เลือกค่าประมาณ 40-50 โดยประมาณ

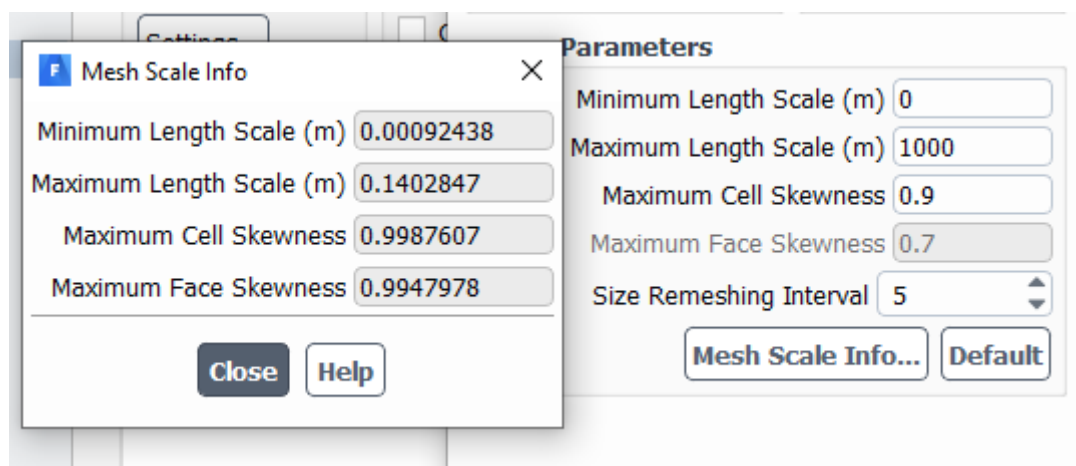


4.2 Dynamic Mesh Method

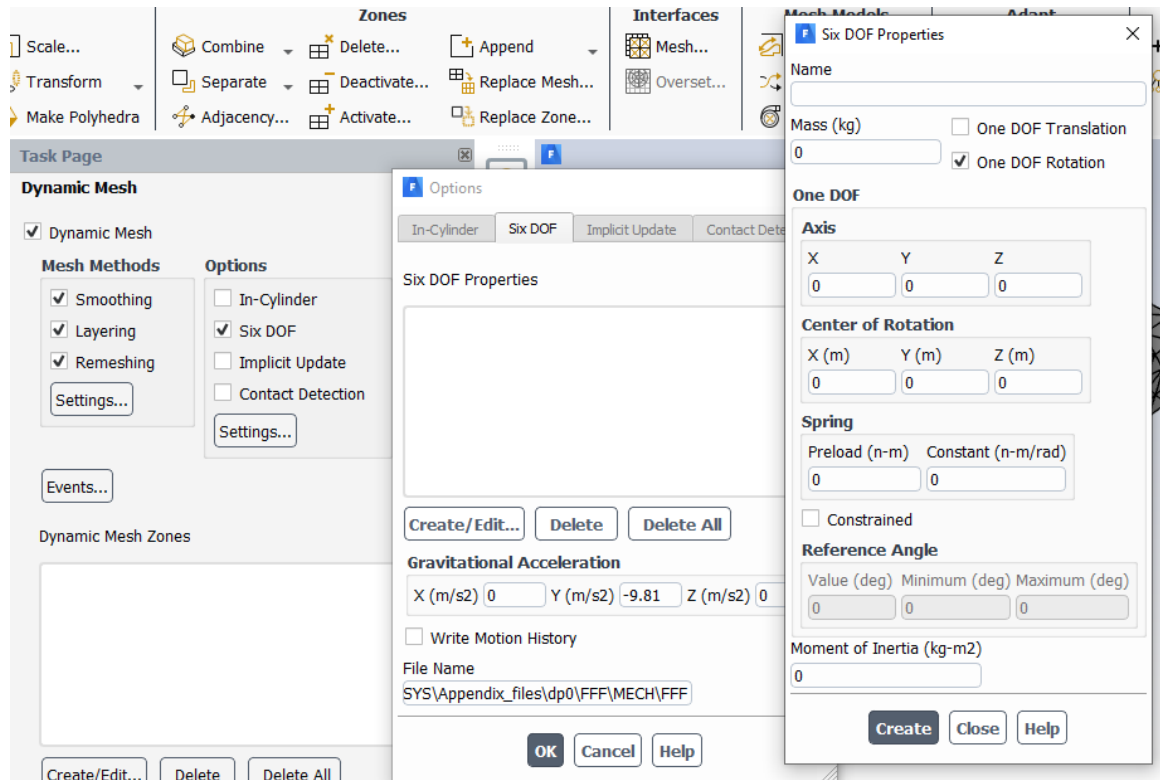
การใช้ Dynamic Mesh Method นั้น ให้เริ่มโดยทำการเลือก Smoothing Layering และ Remeshing ในหมวด Mesh Methods ในส่วนของ Smoothing ให้ทำการเลือก Diffusion ในส่วน Layering ไม่ต้องทำอะไร



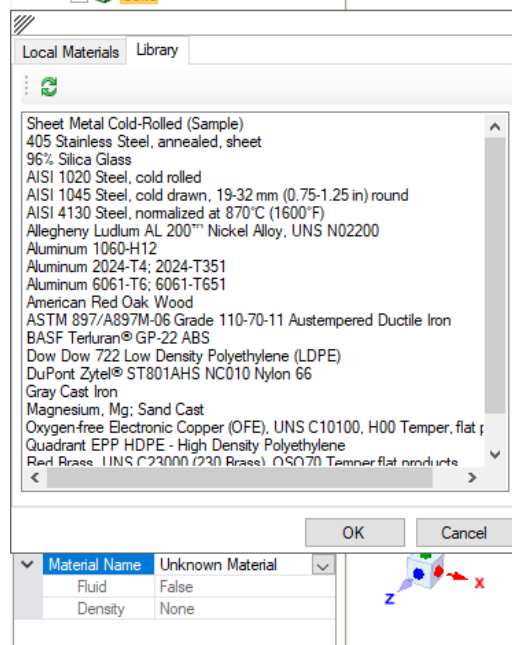
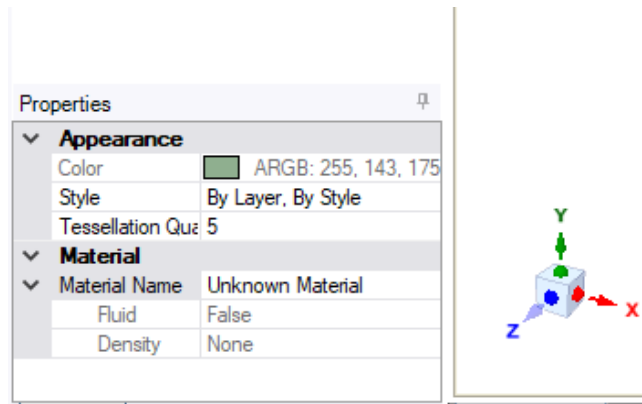
ในส่วน Remeshing ให้ทำการเปลี่ยน Parameters โดยเปลี่ยนค่า Minimum Length Scale และ Maximum Length Scale โดยอิงค่ามาจาก Mesh Scale Info



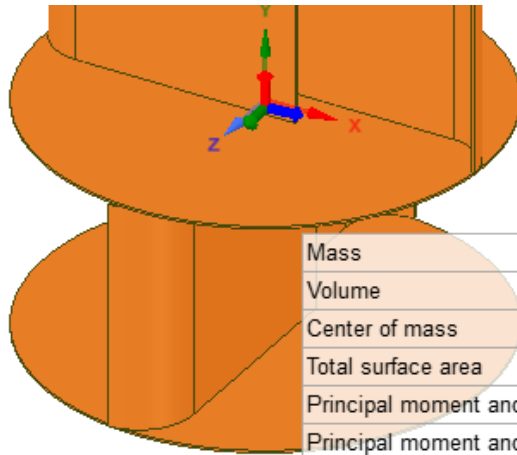
จากนั้นในส่วน Option ให้ทำการเลือก Six DOF และทำการ Setting จากนั้นให้ทำการ Create/Edit จากนั้นใน Properties ให้ทำการเลือก One DOF Rotation และทำการตั้งชื่ออย่างง่าย และใส่ น้ำหนัก Axis และ Moment of Inertia



โดยข้อมูลของ น้ำหนัก Axis และ Moment of Inertia สามารถหาได้จากการกำหนดวัสดุให้โมเดลใน SpaceClaim

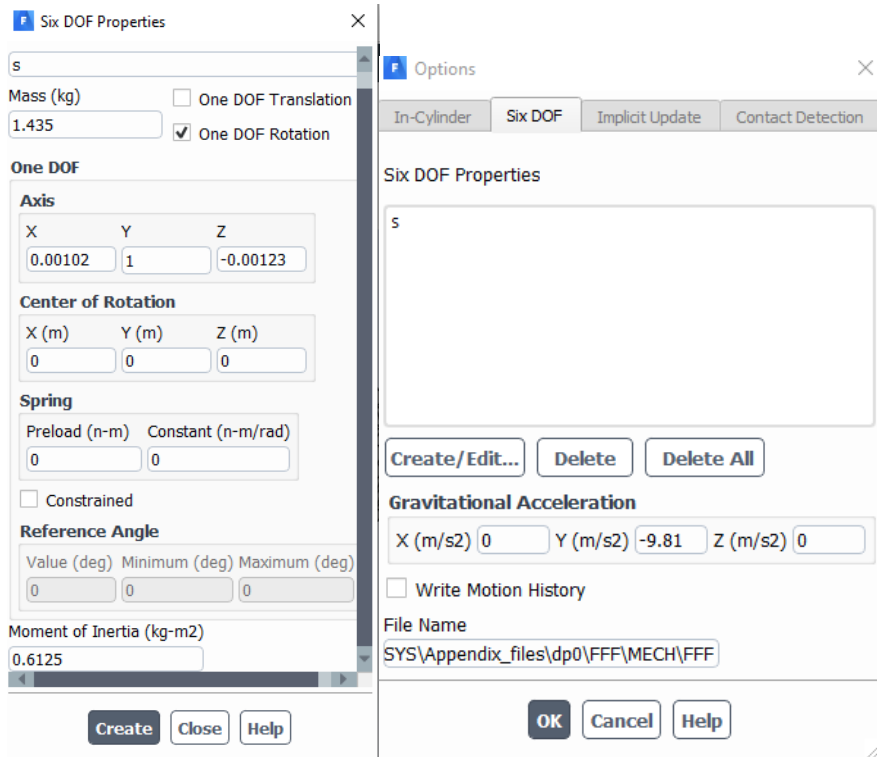


โดยเราสามารถเลือกวัสดุที่มีให้เลือกหรือ กำหนดวัสดุเองได้โดยกำหนดที่ Local Materials โดยการกำหนดนี้เพื่อใส่ความหนาแน่นให้วัสดุเพื่อหา Moment of Inertia เมื่อกำหนดวัสดุได้แล้วก็ให้ทำการ Measure โดยใช้ Mass Properties จะได้ดังนี้

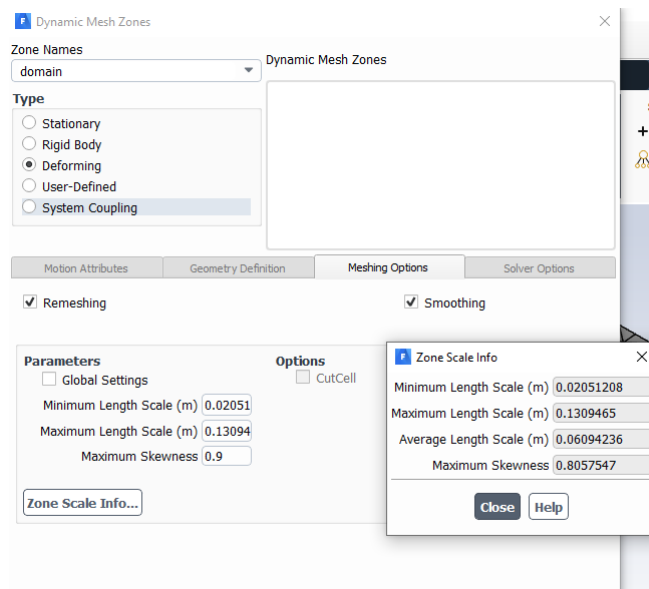


Mass	1435.0397 g
Volume	183979.4477mm ³
Center of mass	(-0.1976, -3.3334, 0.0698)mm
Total surface area	295513.193mm ²
Principal moment and axis	6125266.91076655 g mm ² (0.00102, 1, -0.00123)
Principal moment and axis	10244733.1687576 g mm ² (0.07939, 0.00114, 0.99684)
Principal moment and axis	10583959.6926382 g mm ² (0.99684, -0.00112, -0.07939)
Known relative accuracy %	0.01

จากรูปจะเห็นถึง น้ำหนัก จุดศูนย์กลางมวลและ ค่า Moment of Inertia และ axis ทั้ง 3 ค่า โดยใช้ค่าแรกสุด ในส่วนของ Axis และ Moment of Inertia โดยต้องเปลี่ยนค่าจาก g.mm² เป็น kg.m² จากนั้นก็กลับไปยังส่วนของ Setup เมื่อใส่ค่าแล้วก็ให้ทำการกด Create จะได้ดังรูป



จากนั้นก็ออกไปในส่วน Dynamic Mesh Zones ทำการ Create/Edit เลือกโซนแรกเป็น Domain และเลือก Type เป็น Deforming แล้วปรับ Parameters ตาม Zone Scale Info ตามรูป จากนั้นก็ทำการ Create



โซนต่อไปให้เลือก innerdomain แล้วเลือก Type เป็น Rigid Body จากนั้นก็เลือก DOF/UDF ที่สร้างไว้ก่อนหน้ามา และเลือก Six DOF เป็น on และ Passive จากนั้นก็ Create

Zone Names
innerdomain

Dynamic Mesh Zones
domain

Type

- Stationary
- Rigid Body
- Deforming
- User-Defined
- System Coupling

Motion Attributes | Geometry Definition | Meshing Options | Solver Options

Six DOF UDF/Properties
s

Motion Options
 Relative Motion
Relative Zone

Six DOF
 On
 Passive

Center of Gravity Location

X (m) 0
Y (m) 0
Z (m) 0

Rigid Body Orientation

Theta (deg) 0
Axis_X 0
Axis_Y 0
Axis_Z 0

Center of Gravity Velocity

V_X (m/s) 0
V_Y (m/s) 0
V_Z (m/s) 0

Rigid Body Angular Velocity

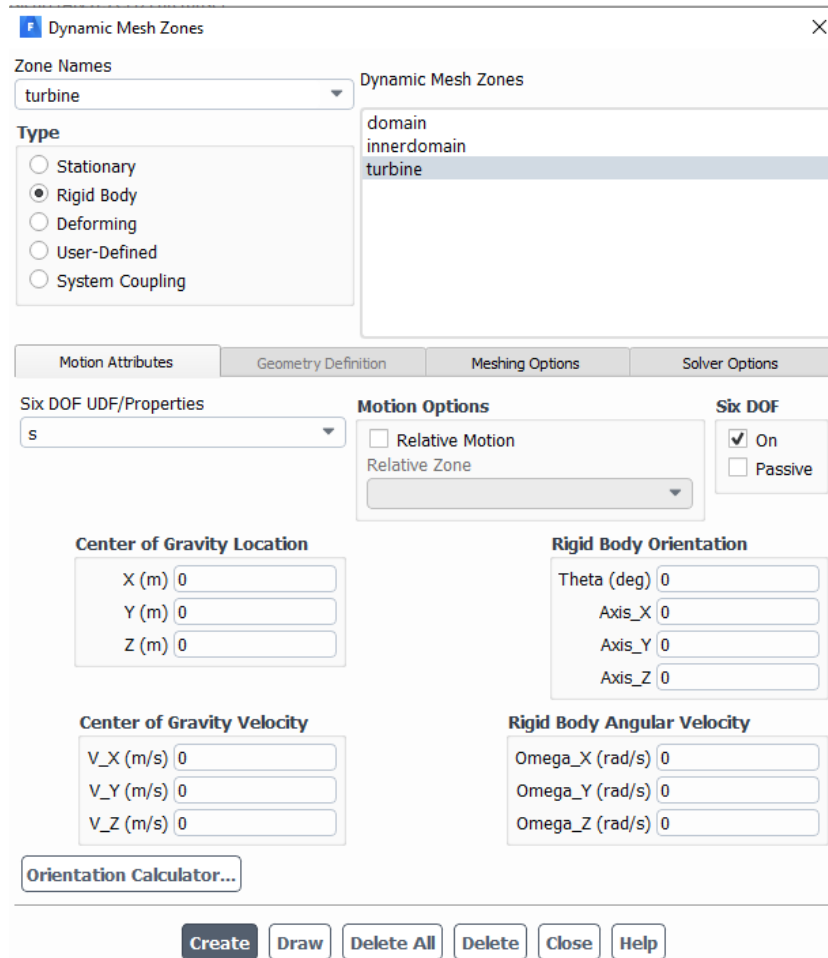
Omega_X (rad/s) 0
Omega_Y (rad/s) 0
Omega_Z (rad/s) 0

Orientation Calculator...

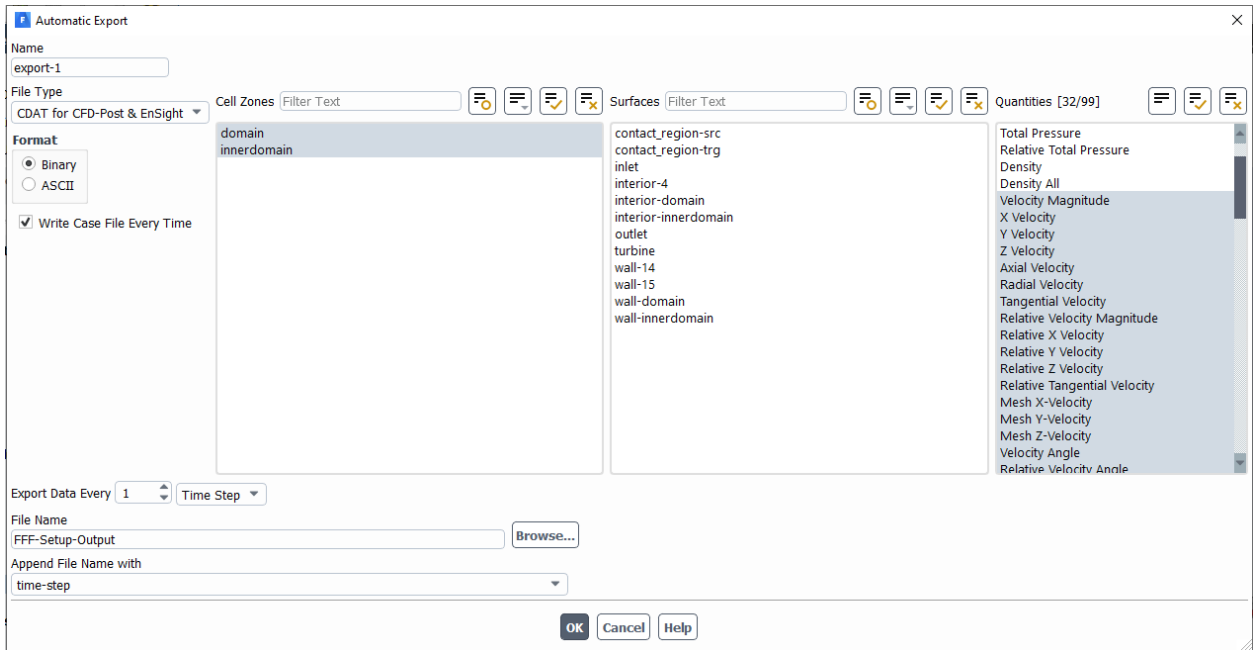
Create Draw Delete All Delete Close Help

โซนสุดท้ายให้เลือกเป็น Turbine และทำเหมือน innerdomain เลย ยกเว้นตรง Six DOF ให้เลือกในส่วนของ Passive ออก

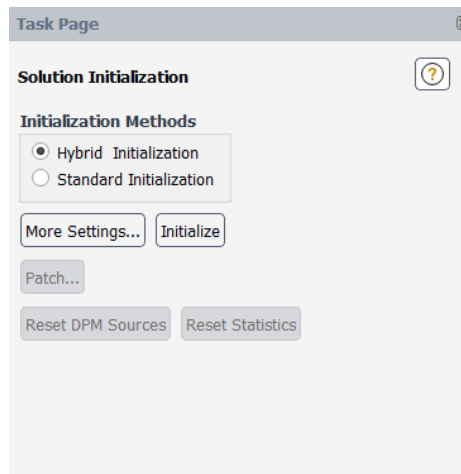
ข้อแนะนำ: ในกรณีที่เกิดการ floating point ให้ทำการเอา axis มาใส่ในส่วน center of gravity location เพื่อช่วยได้



จากนั้นก็ไปในส่วน Calculation Activities เพื่อทำการกำหนดให้โปรแกรมทำการเก็บข้อมูลการ Simulation โดยทำการ Create Solution Data Export แล้วทำการเลือกไฟล์ Type เป็น CDAT เลือก ข้อมูลใน Quantities ที่ต้องการเก็บ เลือกความถี่ที่ต้องการให้เก็บข้อมูล ใน Export Data Every

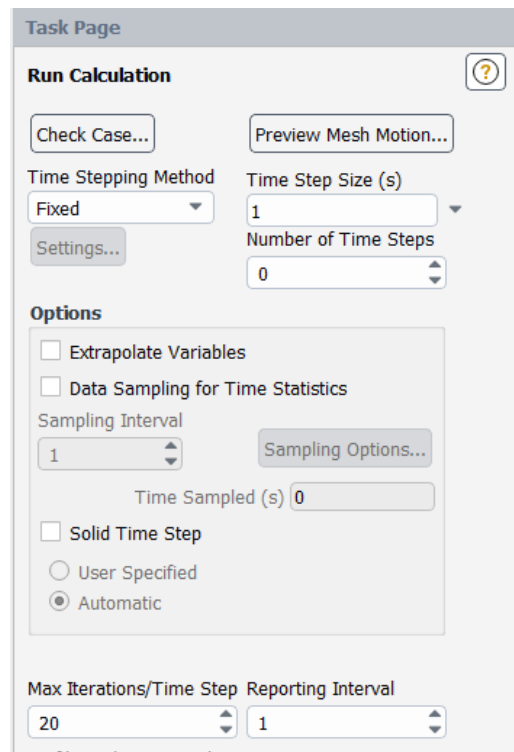


จากนั้นก็ให้ทำการ Initialization โดยใช้การ hybrid initialization



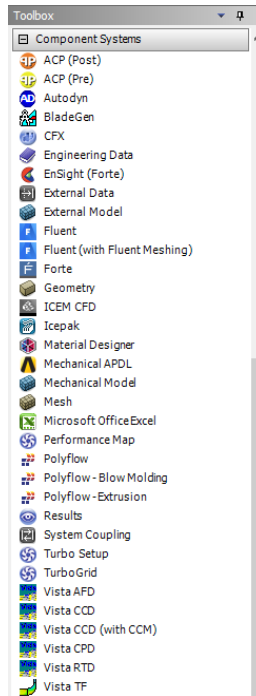
สุดท้ายคือส่วน Run Calculation ให้ทำการกำหนด Time Step Size ซึ่งเป็นค่าความกว้างยาวของช่วงเวลาที่ต้องการให้ Simulation เช่น 1 วินาที หรือ 0.1 วินาที กำหนด Number of Time Steps เป็นการกำหนดให้ว่าจะทำการ Simulation ตามความกว้าง Time Step ที่กำหนดไว้กี่ครั้ง กด Max

Iterations/Time Step ให้โปรแกรมทำการ อินทิเกรตค่าข้อมูลทีละครั้งในหนึ่ง Time Step โดยกำหนดค่า อยู่ในช่วง 40 50 Iteration/Time Step จากนั้นก็ให้ทำการกด Calculate

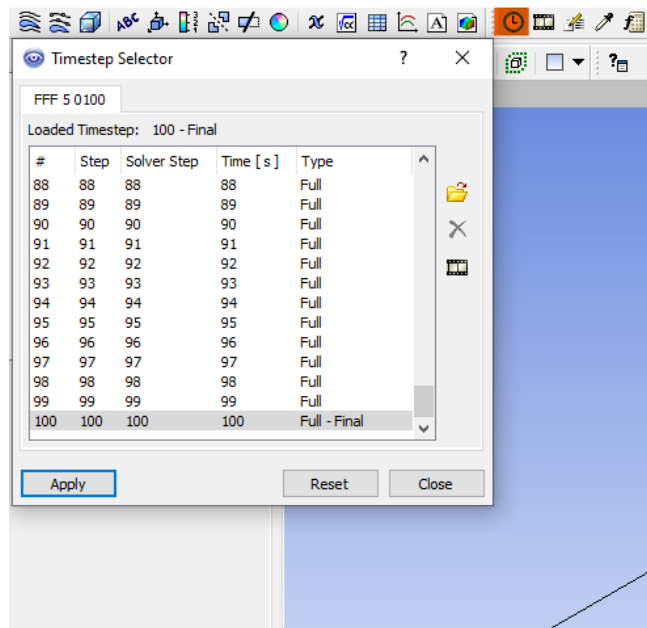


5. Result และ การเก็บผล

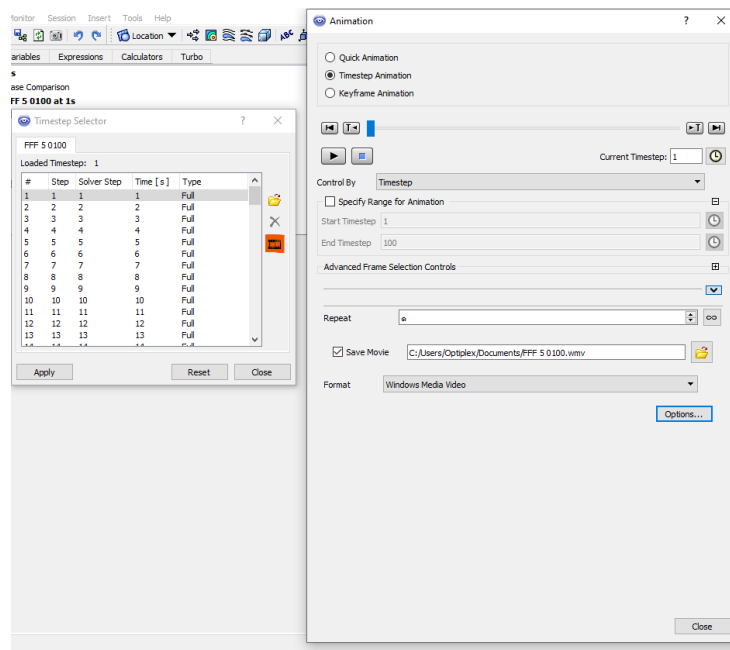
ในส่วนของการเก็บข้อมูล ในกรณีที่หมวดresult หรือให้สร้าง Result จากส่วน Component Systems ก็ได้



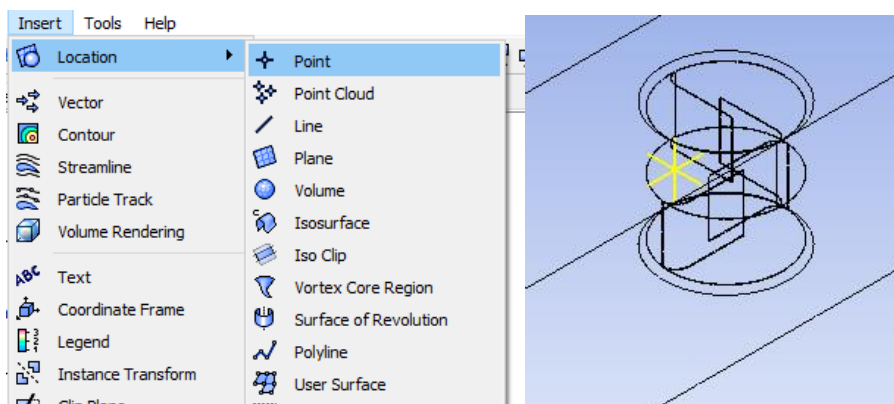
จากนั้นก็ให้ทำการ Load Result แล้วทำการเลือกไฟล์ CDAT ตัวล่าสุด เมื่อโหลดเสร็จแล้วทำการกดที่ Timestep Selector ในส่วนนี้จะทำให้เราสามารถเลือกดูว่าที่ Time Step นั้นๆ เกิดอะไรขึ้นบ้าง



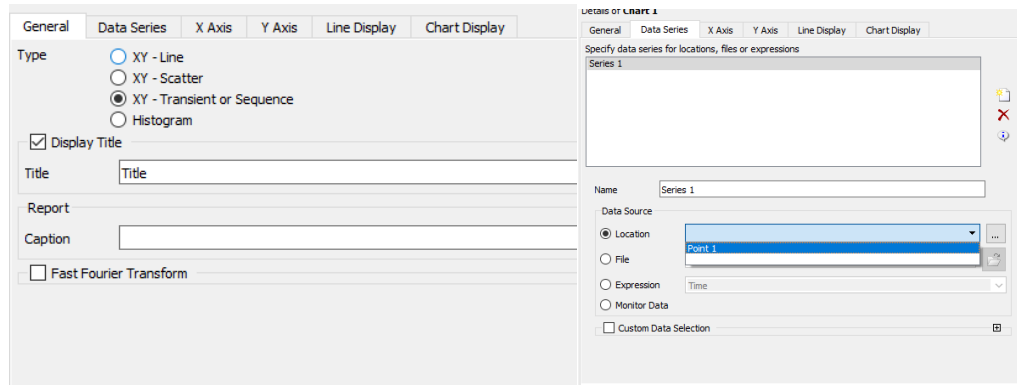
จากนั้น ถ้าต้องการสร้าง ภาพอนิเมชัน ให้กดที่ Animation โดยให้ลากจุด Time Step กลับไปทางซ้ายสุด โดยสามารถเลือกตำแหน่งที่ให้ Save วิดีโอ และจำนวนที่ให้เล่นซ้ำได้ จากนั้นก็ให้กดตัวเพลย์ เพื่อให้โปรแกรมทำการสร้างวิดีโอ



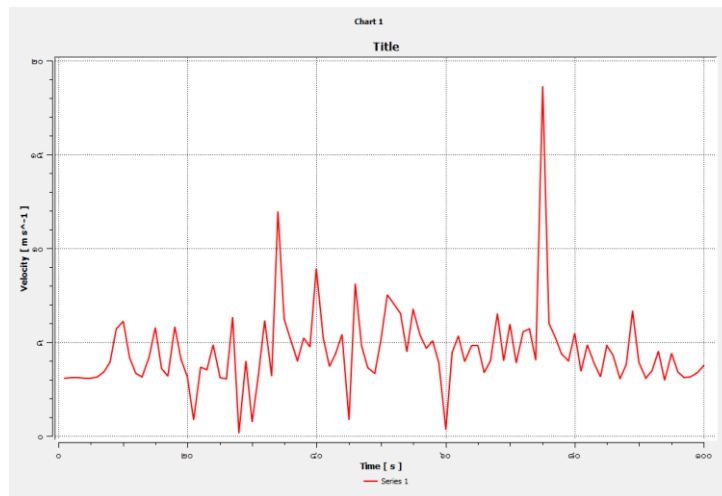
จากนั้นเมื่อต้องการศึกษาเกี่ยวกับกังหันลมที่สร้าง ให้ทำการสร้างจุดขึ้นมาจุดหนึ่ง โดยสามารถกำหนดจุดพิกัดที่ต้องการให้จุดอยู่ได้ โดยพิกัดจะเป็น x,y,z



โดยเมื่อสร้างจุดเสร็จแล้วก็ให้ทำการสร้างกราฟตดยให้เลือก Type เป็น XY-Transient of Sequence และเลือก Data Series Location ที่ Point ที่สร้างไว้

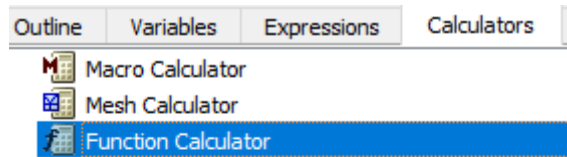


จากนั้นก็ให้กด apply เพื่อสร้างกราฟจะได้ภาพดังนี้



โดยเมื่อได้กราฟมาก็สามารถนำข้อมูลมาศึกษาเพื่อศึกษาค่าต่างๆได้ เช่น ค่าความเร็วในการหมุนของกังหัน ความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ในอุโมงค์ลม

เราสามารถใส่โปรแกรมคำนวณค่าต่างได้จากการใช้ Function Calculator ในหมวด Calculators ได้



โดยค่าที่สามารถคำนวณได้ก็ขึ้นอยู่กับค่า Parameter ที่เราเลือกเก็บข้อมูลจากส่วน Set up Simulation อย่างเช่นค่า ทอร์คที่หาจากค่า Pressure และ Velocity เป็นต้น โดยจากค่าทอร์ค รวมกับ ข้อมูลค่าความเร็ว ความเร็วรอบ และค่าอื่นๆที่เก็บผลได้ เราก็สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าอื่นๆได้อีก เช่น ค่ากำลังได้ ค่าพลังงานลม เป็นต้น

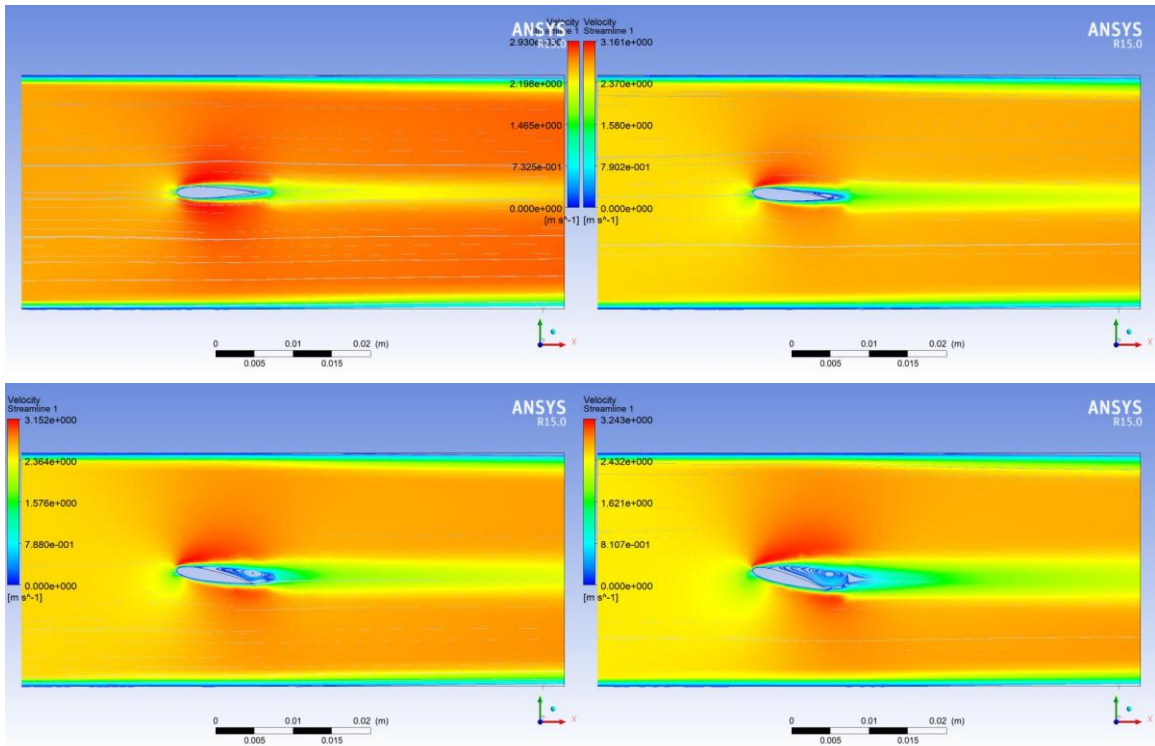
ภาคผนวก ข

ผลการจำลองการไหล

ผลการการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS®

การทดลองปรับมุมใบ Airfoil naca 0012

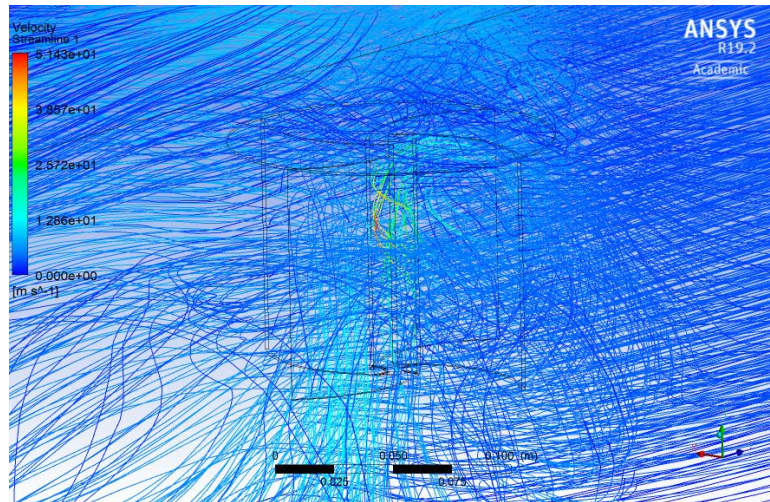
ในการทดลองจะเป็นการ Simulation รูปแบบ 2D โดยการเปลี่ยนมุมปะทะเพื่อค่าความเร็วที่แตกต่างกันดังนี้



มุมที่บิดจะเป็น 0 5 10 15 องศาตามลำดับรูป ความเร็วที่ใช้คือ 3 m/s โดยในการทดลองนี้ได้ทดลองเพื่อดูถึงผลที่เกิดขึ้นจากการใช้ Airfoil ใน Simulation เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการ Simulation แบบ 3D

การทดลองทดสอบทิศการไหลของอากาศในโมเดลที่ 5.2

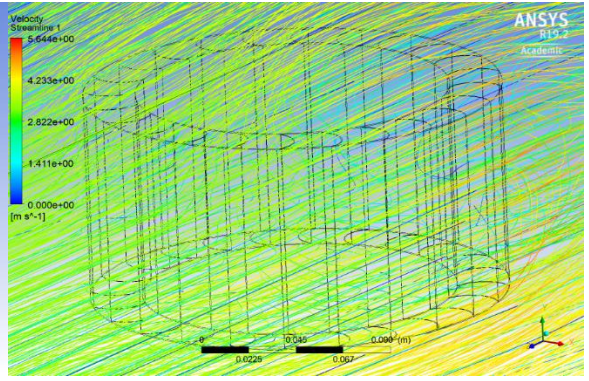
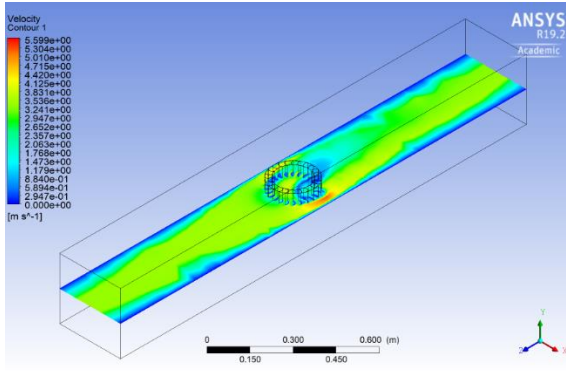
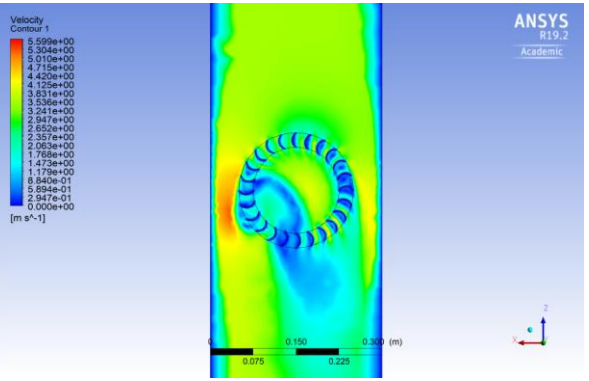
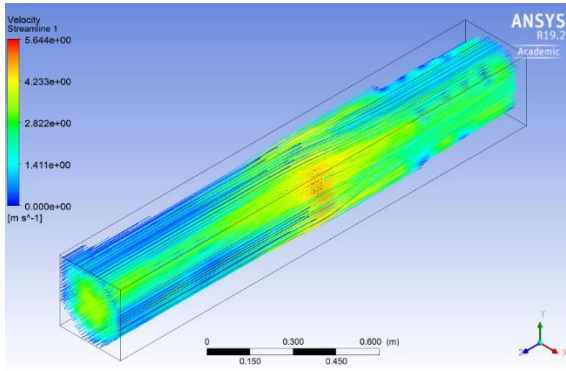
เนื่องด้วยโมเดลที่ 5.2 เป็นโมเดลที่สร้างขึ้นมาเพื่อศึกษาการใช้โปรแกรมและเพื่อดูทิศทางการไหลของอากาศที่ปิดส่วนบนไว้ จึงได้ทดลองโดยการ Simulation แบบภาพนิ่งเพื่อดูถึงทิศทางและพฤติกรรมของลมที่จะเกิดขึ้นเมื่อลมปะทะกับกั้นลม โดยจะได้ดังรูป



โดยจากหนึ่งในรูปที่นำมาแสดงจะบอกได้ถึงความไม่เสถียรของลมที่เกิดขึ้นจากการปะทะ ดังนั้นจึงถือว่าโมเดลตัวนี้สร้างไว้เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับโมเดลตัวอื่น

การทดลองการไหลของอากาศผ่าน Wind Booster

โดยจากงานวิจัยที่ศึกษาได้มีการแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่เรียกว่า Wind Booster สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้กับกั้นลมได้ จึงได้ลองทำการสร้างเป็นโมเดลโดยการตัดแปลงมุมและจำนวนใบให้ต่างจากงานวิจัยและทดลองดูผล โดยผลจากการ Simulation ก็จะเป็นดังรูป



ภาคผนวก ค

งานวิจัยที่ตีพิมพ์

PAPER • OPEN ACCESS

Preliminary design and testing of VAWT blade for low wind speed using CFD

To cite this article: Thanaphat Akkarachaiphant *et al* 2019 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1380** 012130

View the [article online](#) for updates and enhancements.

A promotional banner for the 240th ECS Meeting. The banner features a colorful diagonal border at the top. On the left, the ECS logo is displayed in a green circle. To the right of the logo, the text reads: "240th ECS Meeting", "Digital Meeting, Oct 10-14, 2021", "We are going fully digital!", "Attendees register for free!", and "REGISTER NOW" in bold orange letters. On the right side of the banner, there is a photograph of a diverse group of people in a professional setting, with a man in a white shirt and tie clapping and smiling.

ECS **240th ECS Meeting**
Digital Meeting, Oct 10-14, 2021
We are going fully digital!
Attendees register for free!
REGISTER NOW

Preliminary design and testing of VAWT blade for low wind speed using CFD

Thanaphat Akkarachaiphant¹, Boonyarit Chatthong^{2*} and Yutthana Tirawanichakul²

¹Energy technology program, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, 90110, Thailand

²Plasma and Energy Technology, Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hatyai, 90110, Thailand

*E-mail address: boonyarit.ch@psu.ac.th

Abstract. This research aims to study and design vertical-axis wind turbine (VAWT) for low wind speed using computational fluid dynamics (CFD) program called ANSYS[®] Academic Student Release 19.2. The wind turbine type used is of Savonius type with some parts being modified in order to optimize its rotation in the simulation. The simulation setup is to place the turbine in the middle of the wind tunnel, using initial wind speed of 5 m/s. The turbine itself has dimension of 20 cm of height, 10 cm of radius and 0.15 cm of thickness. These simulation data are used to analyses wind flow dynamics, rotational speed of the turbine, tip speed ratio and Reynolds number of this design. It found that the angular velocity is 200 rpm or 20.94 rad/s, tip speed ratio is 0.41 while Reynolds number is in turbulent flow of 6,798,002.

1. Introduction

Wind energy is one of the important renewable energy in the world. Wind turbine is one of the most common way to capture wind energy for producing power. Generally, there are two types of wind turbine, vertical and horizontal axis turbines, which used to convert kinetic energy to mechanical energy of wind turbine. The type of wind turbine used for this work is vertical wind axis turbine (VAWT) due to omnidirectional capability at low wind speeds [1]. VAWT that considered in this work is Savonius wind turbine. Savonius wind turbine is a drag driven wind turbine. While operating, in certain angular position of the rotor, and while the tip speed ratio is greater than one, the lift force acts on blades [2].

In this work, computational fluid dynamics (CFD) is use for the simulations to study aerodynamic characteristics and the performance of wind turbine design. The turbine used for simulation is a two-stack Savonius wind turbine as shown in figure 1. Physical properties of the turbine is show in table 1. The setup condition to be use in CFD simulation is to place wind turbine in the middle of wind tunnel with dimension of 30x30 cm² and 2 m long using wind speed of 5 m/s injected from the inlet of wind tunnel. The data collected form the simulation is rotational speed of wind turbine, collected by placing a measurement point between the blades. This measurement point will record wind velocity as a function of time. Its time evolution graph can be used to calculate the rotational speed as the velocity normally drops when one of the blades is passing through the point. Other physical values such as angular velocity, torque, Reynolds number etc. can then be calculated from the measured rotational speed [3].



Table 1. Illustration of Savonius wind turbine.

Properties of the wind turbine	Detail
Number of blade	2x2 (stack)
Height	20 cm
Radius	10 cm
Blade thickness	0.15 cm
Plate thickness	0.1 cm
Gap between two blades	2 cm
Material	Acrylic
Mass	217.0957
Moment of inertia	0.00092 kg.m ²

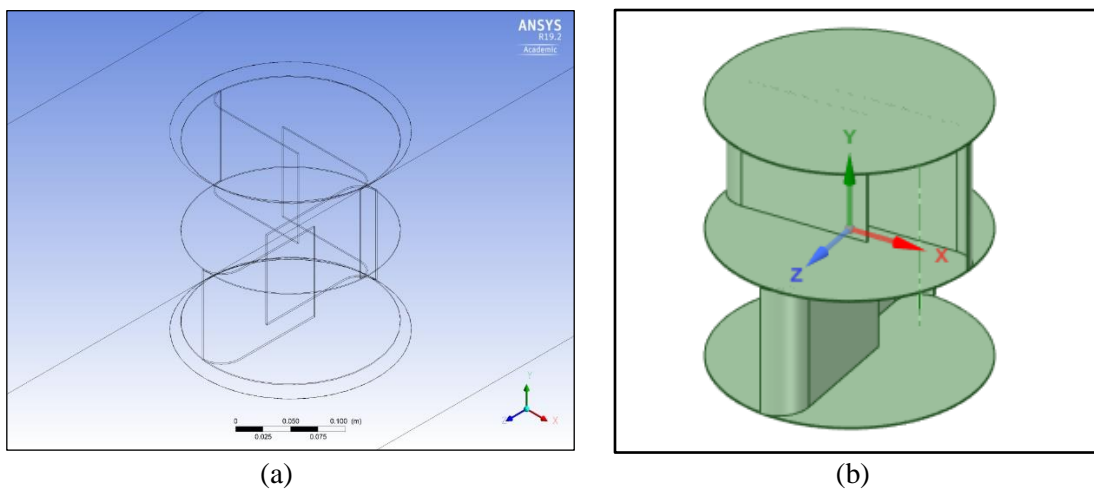


Figure 1. Two-stack Savonius wind turbine (a) Image in simulation (b) Image of geography (Images used courtesy of ANSYS, Inc.).

2. Method

2.1. Methods

2.1.1. *Wind power.* Wind power is a kinetic power that flows into wind turbine [4]. It can be calculated as follows:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

where ρ is air density (kg/m³), A is rotational area and v is wind speed (m/s)

2.1.2. *Angular velocity.* Angular velocity refers to how fast an object rotates or revolves relative to a reference point [5]. In general, angular velocity is measure in angle per unit time, which is radians per second in SI units. The unit can be change to rpm (round per minute) as shown:

$$1 \text{ rad/s} = \frac{1}{2} \text{ Hz} = \frac{60}{\pi} \text{ rpm} \quad (2)$$

2.1.3. *Tip speed ratio.* The tip speed ratio is defined as the ratio of the blade tip speed and the wind speed at which the blade tip moves with rotation [3], calculated as:

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (3)$$

where λ is tip speed ratio, ω is the angular velocity of wind turbine (rad/s), and r is the radius of wind turbine (m).

2.1.4. Reynolds number. The Reynolds number is a dimensionless value that measures the ratio of inertial forces to viscous forces and describes the degree of laminar or turbulent flow [6] as shown:

$$\text{Re} = \frac{\rho v}{\mu} \quad \frac{vL}{k} \quad (4)$$

where Re is Reynolds number, μ is dynamic viscosity (Ns/m²), L is the blade chord length (m) and k the kinematic air viscosity (m²/s).

2.2. CFD simulation parameters. The simulation program used for study is ANSYS® Academic Student Release 19.2, the parameters for simulations are shown in table 2.

Table 2. Numerical values of simulation parameters.

Parameter	Values
Wind speed	5 m/s
Viscous model	k-epsilon
Air density	1.225 kg/m ³
Air viscosity	1.7894e-05 kg/m•s

3. Result and discussion

Figure 2 shows the effect of wind speed on wind turbine blades, presented using contour plot. Note that the contour line on upper blade and lower blade are the same. It can be seen that the wind speed close to the blades ranges from close to 0 (in front of the blade) to around 13.37 m/s (at the back of the blade).

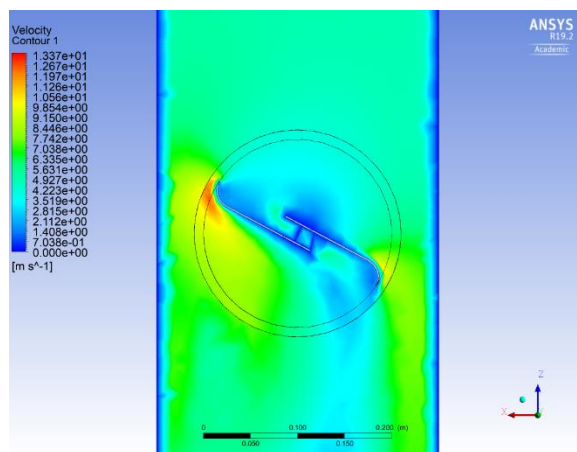


Figure 2. Contour line illustrating the effect of wind speed on wind turbine blades at different time (Images used courtesy of ANSYS, Inc.)

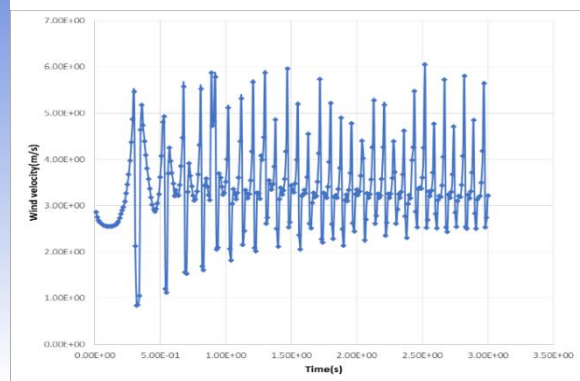


Figure 3. relationship between wind velocity and time

Figure 3 demonstrates a time evolution of wind velocity of a single point inside the rotation region, used for measurement, in the simulation grid as marked in figure 2. It can be seen that the wind velocity varies up and down as the blades spin around. The dropped values correspond to the moment where one of the blades coincide with the measuring point. Hence, the frequency of the dropped wind velocity can be used to estimate the rotational speed for the wind turbine. As a result, for a wind speed of 5 m/s, the rotational speed is equal to 200 rpm. Consequently, other parameters can be calculated i.e.

the angular velocity is 20.94 rad/s. The tip speed ratio is 0.41 which is normally too low for tip speed ratio standard for 2 blade type turbine [7]. Reynolds number equals to 6798002 which means that the flow around the blade is categorized as turbulence [8].

4. Conclusion

In this study using computational fluid dynamic, the results show that dynamic mesh method can be used to study the performance of wind turbine in pre-defined condition. The preliminary result show that the turbine has rotational speed of 20.94 rad/s at incoming wind speed of 5 m/s. Tip speed ratio and Reynolds number show that this wind turbine has a low efficiency but can perform at the low wind speed.

Acknowledgments

The authors would sincerely like to thank to Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Department of Physics, Faculty of Science on Prince of Songkla University for their support and experiment space, and Interdisciplinary Graduate School of Energy System (IGS-Energy) for their financial support.

References

- [1] Sranpat C *et al* 2017 *Energy Procedia* **138** 500–5
- [2] Zemamou M, Aggour M and Toumi A 2017 *Energy Procedia* **141** 383–8
- [3] Sharma S and Sharma R K 2016 *Energy Convers. Manage.* **127** 43–54
- [4] Han D *et al* 2018 *Energies* **11** 1517–35
- [5] Bayati I *et al* 2017 *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* **167** 217–27
- [6] Li Q *et al* 2016 *Renew. Energy* **90** 291–300
- [7] Elbatran A H, Ahmed Y M and Shehata A S 2017 *Energy* **134** 566–84
- [8] Tian W *et al* 2018 *Renew. Energy* **117** 287–99