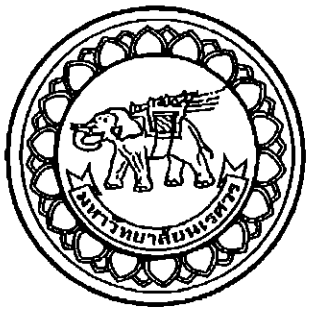


การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง (VAWT)

Study of Air Flow through a Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

นายภาณุพงศ์ ศรีชัย รหัส 49381087

นายวชิระ สุริยะกอง รหัส 49381193

นายวิรัตน์ แม่นยำ รหัส 49381285

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 14 ต.ค. 2553
เลขทะเบียน 150729791
เลขเรียกหนังสือ ปร. ส1482ภ
มหาวิทยาลัย... ปร. 2552

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2552

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง (VAWT)		
ผู้ดำเนินโครงงาน	**นายภาณุพงศ์**	**ศรีชัย**	**รหัส 49381087**
	นายวชิระ	สุริยะกอง	รหัส 49381193
	นายวิรัตน์	แม่นยำ	รหัส 49381285
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.ภาณุ พุทธวงศ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2552		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(ดร.ภาณุ พุทธวงศ์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.กุลยา กนกจารุวิจิตร)

.....กรรมการ
(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน	การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง (VAWT)	
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายภาณุพงศ์ ศรีชัย	รหัส 49381087
	นายวชิระ สุริยะกอง	รหัส 49381193
	นายวิรัตน์ แม่นยำ	รหัส 49381285
ที่ปรึกษาโครงงาน	ดร.ภาณุ พุทธวงศ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	2552	

บทคัดย่อ

โครงงานนี้ นำเสนอการวิเคราะห์อากาศที่ไหลผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง **ด้วยวิธี ไฟไนท์เอลิเมนท์** โดยหาค่าความเร็วก่อนและหลังปะทะกังหันลม เพื่อนำไปหาค่าสัม**ประสิทธิ์กำลังของกังหันลม** (ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม คือค่าความสามารถในการสกัดพลังงานกลที่มีอยู่ในกระแสอากาศอิสระ) ที่ความเร็วกระแสอากาศอิสระ 9 m/s และ 11 m/s แล้วนำค่า**สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม**ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blackwell และคณะ (1976) จากการวิเคราะห์พบว่า ณ ความเร็วรอบของกังหันลมคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสูงสุด เท่ากับ 0.27 ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระ 9m/s และมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 15.6% และ 0.34 ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระ 11m/s มีค่าความผิดพลาด เท่ากับ 1.5% เนื่องจากผลการทดลองของ Blackwell และคณะ (1976) กำหนดให้กังหันลมหมุนด้วยความเร็วรอบที่ไม่คงที่

Project title	Study of Air Flow through a Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)		
Name	Mr. Panupong	Srichai	ID. 49381087
	Mr. Washira	Suriyakong	ID. 49381193
	Mr. Wirat	Maenyum	ID. 49381285
Project advisor	Dr. Panu Putthawong		
Major	Mechanical Engineering		
Department	Mechanical Engineering		
Academic year	2009		

Abstract

This project aims to present an analysis of air flow through a vertical axis wind turbine by using finite element method By using air velocities of the previous and of the after hitting the turbine blade, the power coefficient of the turbine can be obtained. The simulation uses the free stream velocity of 9 m/s and 11 m/s. The obtained power coefficients are then being compared with the results from Blackwell et al (1976). It is found that, with a constant angular speed, the maximum power coefficient is 0.27 at the free stream velocity of 9 m/s. Also, the maximum power coefficient is 0.34 at the free steam velocity of 11 m/s. The errors are 15.6% and 1.5%, consequently. These errors come from the reason that the angular speed of the turbine varies

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานการศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง (VAWT) นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คณะผู้ดำเนินโครงงานนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงงานมาโดยตลอด จนสำเร็จลุล่วงด้วยดีดังนี้

1. ดร.ภาณุ พุทธวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำและให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics™ และวิธีการคำนวณทางด้านอากาศพลศาสตร์

2. ท่านคณะกรรมการสอบ ที่ให้คำติชม และแนะนำ

3. ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสืบค้นข้อมูล

4. เพื่อนๆนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลชั้นปีที่ 4 ทุกคนที่ให้คำปรึกษา แนะนำและคอยเป็นกำลังใจให้สู้เสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงงานขอขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยอบรมสั่งสอน สนับสนุน และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

คณะผู้ดำเนินโครงงานวิศวกรรม
นายภาณุพงศ์ ศรีชัย
นายวชิระ สุริยะกอง
นายวิรัตน์ แม่นยำ
พฤษภาคม 2553

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อภาษาไทย ..... ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ช
สารบัญรูป ..... ซ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1
1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน 1
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2
1.6 แผนการดำเนินงาน 2
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน 2

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 3
2.1 ประเภทของกังหันลม 3
2.2 ทฤษฎีโมเมนตัมเบื้องต้นของ Betz 4
2.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานลมโดยใช้แรงต้าน หรือ แรงยก ทางอากาศพลศาสตร์ 8
2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมดาร์เรียส 9
2.5 ข้อมูลการทดลอง Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades 10
2.6 โปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 12
3.1 การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ เพื่อ import เข้าโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 12
3.2 การจำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 15
3.3 ยืนยันผลการจำลองการไหลจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กับผลงานวิจัยของ Blackwell และคณะ 19

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ 20
4.1 ผลการทดลอง 20
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง 21

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 24
5.1 สรุปผล 24
5.2 ข้อเสนอแนะ 24

เอกสารอ้างอิง 25

ภาคผนวก ก 26
ภาคผนวก ข 39
ภาคผนวก ค 37
ภาคผนวก ง 46

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนการดำเนินงาน 2

3.1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการประมวลผล 17

4.1 ตารางความเร็วลมจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กระแสอากาศอิสระ 9 m/s 21

4.2 ตารางความเร็วลมจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กระแสอากาศอิสระ 11 m/s 21

4.3 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 9 m/s 22

4.4 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 11 m/s 22

4.5 ตารางค่า Tip speed ratio ที่ความเร็วรอบต่างๆ 23

ก.1 แพนอากาศ NACA 0012 Coordinates 27

ก.2 แพนอากาศ NACA 0012 Coordinates Chord Length 8.815 cm 28

ง.1 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 11 m/s 47

ง.2 ตารางค่า Tip speed ratio ที่ความเร็วรอบต่างๆ 48

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 กังหันลมพรอเพลเลอร์ ... 3

2.2 กังหันลมวินด์มิลล์ ... 3

2.3 กังหันลมดาร์เรียส ... 4

2.4 กังหันลมซาโวเนียส ... 4

2.5 การไหลตามกฎอนุรักษ์มวล ... 5

2.6 สัมประสิทธิ์กำลังต่ออัตราส่วนความเร็ว ... 7

2.7 แรงฉุดและแรงยกที่กระทำต่อวัตถุ ... 8

2.8 ส่วนประกอบของกังหันลมดาร์เรียส ... 9

3.1 รูปร่าง 2 มิติ ... 13

3.2 การวาดรูปแบบจำลองแพนอากาศ ... 13

3.3 การยืดแพนอากาศโค้งตามรัศมีจาก 2 มิติ เป็น 3 มิติ ... 14

3.4 การยืดรูปแพนอากาศต่อจากปลายที่ยืดโค้งตามรัศมี ... 14

3.5 นำใบพัดเข้ามาประกอบกัน ... 14

3.6 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งที่เสร็จสมบูรณ์ ... 15

3.7 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านหน้า ... 16

3.8 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านบน ... 16

3.9 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งอุโมงค์ลม และกล่องครอบกังหันลมที่ได้จากการ Import ... 16

3.10 การกำหนดค่า Boundary Settings ... 18

3.11 การแบ่งเอลิเมนท์ ... 18

4.1 รูประดับการวัดค่าตามความสูงของกังหันลม ... 20

4.2 รูปมุมมองด้านบนของกังหันลมภายในอุโมงค์ลม ... 20

ผข.1 การเรียกใช้โปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ ... 30

ผข.2 การพล็อตจุดแพนอากาศ ... 30

ผข.3 การวาดรูปแบบจำลองแพนอากาศ ... 31

ผข.4 ยืดรูปโค้งตามรัศมีให้เป็น 3 มิติ ... 31

ผข.5 การวาดเส้นตามเส้นขอบของแพนอากาศ ... 32

ผข.6 การยืดรูปความยาวตามขนาดจริง ... 32

ผข.7 การนำไฟล์เข้ามาประกอบให้เป็นกังหันลมชนิดแกนตั้ง ... 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ผข.8 การวาดส่วนประกอบที่เหลือของกังหันลมชนิดแกนตั้ง 33

ผข.9 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านหน้า 33

ผข.10 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านบน 33

ผข.11 คลิกผิวที่พื้นผิวด้านที่ติดพื้นของกังหันลม 34

ผข.12 การวาดรูปแบบจำลองอุโมงค์ลม 34

ผข.13 ยืดรูปออกเป็น 3 มิติ 35

ผข.14 การวาดรูปกล่องครอบ 35

ผข.15 ยืดรูปออกเป็น 3 มิติ 36

ผค.1 การเรียกหน้าแรกของโปรแกรม 38

ผค.2 การกำหนดค่า Constants 39

ผค.3 การ Import แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลม 40

ผค.4 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลมที่ได้จากการ Import 40

ผค.5 การกำหนดค่า Subdomain Settings ที่ Tab Physics 41

ผค.6 การกำหนดค่า Subdomain Settings ที่ Tab Init 41

ผค.7 การกำหนดค่า Boundary Settings 42

ผค.8 การกำหนดขนาดของเอลิเมนท์ 43

ผค.9 การแบ่งเอลิเมนท์เสร็จสมบูรณ์ 43

ผค.10 การกำหนดค่า Maximum number of iterations 44

ผค.11 การหาค่าความเร็วลมตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน 44

ผค.12 กราฟค่าความเร็วลมตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน 45

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

c_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม
N	=	ความเร็วรอบของกังหันลม (RPM)
ω	=	ความเร็วเชิงมุม (rad/min)
R	=	รัศมีสูงสุดของกังหันลม
v_1	=	ความเร็วลมก่อนปะทะใบกังหันลม
v_2	=	ความเร็วลมหลังปะทะใบกังหันลม
V_∞	=	ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า
X_∞	=	tip speed ratio

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

การผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันใช้เชื้อเพลิงจาก น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และปฏิกริยาจากอะตอมยูเรเนียม ซึ่งมีของเสียจากกระบวนการผลิตถูกปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อมทั้งกำจัดได้และกำจัดไม่ได้ ทำให้พบเห็นกลุ่มคนที่ออกมาต่อต้านการก่อสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากพลังงานดังกล่าว ดังนั้นจึงมีพลังงานทางเลือกอื่นที่ยอมรับโดยทั่วไปและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้แก่ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น แต่พลังงานแสงอาทิตย์ยังอยู่ในประสิทธิภาพที่ต่ำเมื่อเทียบกับต้นทุน พลังงานลมจึงถูกเพิ่มความสำคัญเข้ามาช่วยทดแทนในการผลิตไฟฟ้าถึงแม้ว่าจะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในช่วงที่มีความเร็วลมเหมาะสมก็ตามแต่มีประสิทธิภาพมากกว่าพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ของกระแสลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกลเข้ามาเกี่ยวข้องคือกังหันลม (Wind turbine) ซึ่งแบ่งประเภทตามแนวการหมุนมีกังหันลมแกนนอน และกังหันลมแกนตั้ง

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาและวิจัยกังหันลมแกนตั้งน้อยกว่ากังหันลมแนวนอน แต่ข้อดีของกังหันลมแกนตั้งคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งไว้ด้านล่างใกล้กับพื้นดินซึ่งง่ายต่อการบำรุงรักษา และสามารถรับลมได้ทุกทิศทางไม่มีความจำเป็นต้องหันหาทิศทางลม ข้อเสียคือไม่สามารถเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเองได้ และประสิทธิภาพน้อยกว่ากังหันลมแกนนอน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

ศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำนายสัมประสิทธิ์กำลัง และสมรรถนะจากแบบจำลองการไหลของอากาศทางคอมพิวเตอร์ผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง

1.4 ขอบเขตการทำโครงงาน

1. จำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองกังหันลม Darrieus ทางคอมพิวเตอร์แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Blackwell และคณะ (1976)

2. แบบจำลองกังหันเป็นชนิด 2 ใบพัด หยุดนิ่งตั้งฉากกับทิศทางลม

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 เสนอโครงงานกับคณะกรรมการ

1.5.2 ศึกษาข้อมูล

1.5.3 ทำการวาดกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ

1.5.4 ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 3.2b

1.5.5 นำผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 3.2b มาคำนวณเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Blackwell และคณะ (1976)

1.5.6 สรุป และจัดทำรายงาน

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	2552							2553			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. หาหัวข้อโครงงานและอาจารย์ที่ปรึกษา											
2. ศึกษาปัญหาร่วมกับอาจารย์ที่ปรึกษา											
3. เขียงแบบเสนอโครงร่าง											
4. นำเสนอโครงร่างโครงงาน											
5. เขียนรูปกังหันลมชนิดแกนตั้งที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ผล											
6. ทำการวิเคราะห์การไหลของอากาศด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ ที่ความเร็วต่างๆ											
7. เปรียบเทียบผลโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กับงานวิจัยของ Blackwell และคณะ											
8. สรุปผลที่ได้											

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงงาน

1. ค่าเอกสารและการเข้าเล่มปริญญานิพนธ์	3000	บาท
รวมเป็นเงิน	3000	บาท (สามพันบาท)

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ประเภทของกังหันลม

ได้มีการแยกกังหันลมออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

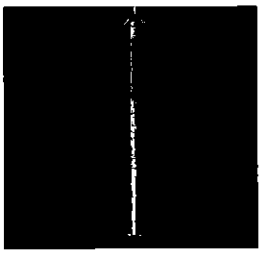
2.1.1 ตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน

2.1.1.1 กังหันลมแบบแกนนอน (Horizontal-axis wind turbine, HAWT) หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของกระแสลม เช่น กังหันลมพรอเพลเลอร์ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) เป็นต้น

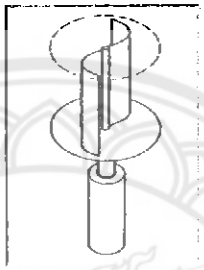
รูปที่ 2.1 กังหันลมพรอเพลเลอร์ [2]

รูปที่ 2.2 กังหันลมวินด์มิลล์ [3]

2.1.1.2 กังหันลมแบบแกนตั้ง (Vertical-axis wind turbine, VAWT) หมายถึง กังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลม เช่น กังหันลมดาร์เรียส (Darrieus) กังหันลมซาโวเนียส (Savonius) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 กังหันลมดาร์เรียส [4]



รูปที่ 2.4 กังหันลมซาโวเนียส [5]

2.1.2 จำแนกตามลักษณะของแรงขับที่กระแสลมกระทำต่อใบกังหันลม

ขับด้วยแรงยก (Lift Force)

ขับด้วยแรงฉุด หรือแรงหน่วง (Drag Force)

การจำแนกตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน เป็นวิธีที่เด่นชัด และสามารถเข้าใจได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมมากกว่าการจำแนกตามลักษณะของแรงขับที่กระแสลมกระทำต่อใบกังหันลม นอกจากนี้ยังมีกังหันลมที่ไม่เข้าประเภททั้ง 2 ชนิดดังกล่าว เช่น กังหันลมทอร์นาโด หรือกังหันลมที่เพิ่มดิฟฟิวเซอร์ หรือคอนเซนเตรเตอร์

2.2 ทฤษฎีโมเมนตัมเบื้องต้นของ Betz

พลังงานลม คือ มวลของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ไปบนผิวโลกตามแนวนอนในทุกทิศทางด้วยความเร็วต่างๆกัน พลังงานลมเกิดจากอิทธิพลของดวงอาทิตย์ โดยที่ผิวโลกในแต่ละส่วนได้รับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากัน จึงเป็นเหตุให้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงเกิดการลอยตัวสูงขึ้น และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้ามาแทนที่ จึงทำให้มวลของอากาศเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นซึ่งเราเรียกว่าลม

พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ เมื่อพิจารณาในรูปของสมการโดยพิจารณาว่า มวล m ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะก่อให้เกิดพลังงานจลน์ (E) ดังสมการ

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

พิจารณาพื้นที่หน้าตัด A โดยมีอากาศไหลผ่านด้วยความเร็ว v ที่ปริมาตร $\dot{V}$ ไหลผ่านในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา เรียกว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร คือ

$$\dot{V} = vA \tag{2}$$

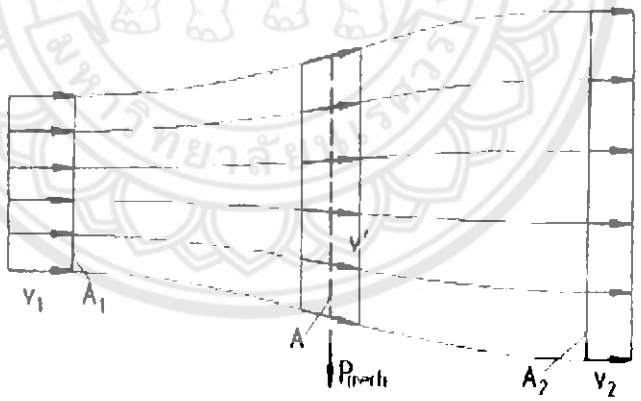
และอัตราการไหลเชิงปริมาตรเมื่อมีความหนาแน่นของอากาศ ρ คือ

$$\dot{m} = \rho vA \tag{3}$$

สมการแสดงในรูปของพลังงานจลน์การเคลื่อนที่ของอากาศ และอัตราการไหลเชิงปริมาตร รวมเป็นพลังงานที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในช่วงหนึ่งหน่วยเวลา จะมีกำลัง P คือ

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \tag{4}$$

พลังงานกลสามารถเปลี่ยนรูปจากพลังงานจลน์เนื่องจากการไหลของอากาศอิสระ (รูปที่ 2.5) ภายใต้สมมุติฐานกฎอนุรักษ์มวล



รูปที่ 2.5 การไหลตามกฎอนุรักษ์มวล [6]

ให้ v_1 คือความเร็วการไหลของกระแสอากาศทางเข้า และ v_2 คือความเร็วการไหลของกระแสอากาศทางออก

พลังงานกลที่ได้โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์จากการไหลของอากาศผ่านใบพัดกังหันลม คือ

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2}\rho(A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \tag{5}$$

กฎการอนุรักษ์อัตราการไหลเชิงมวล (สมการความต่อเนื่อง) จะได้ดังนี้

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \tag{6}$$

ดังนั้น

$$P = \frac{1}{2}\rho v_1 A_1 (v_1^2 - v_2^2) \tag{7}$$

หรือ

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) \tag{8}$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยอากาศออกแรงบนกังหันลมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \tag{9}$$

ตามกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน (แรงกริยาเท่ากับแรงปฏิกริยา) แรงผลักต้องถูกหักล้างกับแรงจากอากาศที่ไหลผ่านกังหันลมด้วยความเร็ว v' กำลังที่ต้องการคือ

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \tag{10}$$

ดังนั้นกำลังกลได้รับแรงจากอากาศที่ไหลสามารถส่งพลังงานหรือกำลังก่อนและหลังกังหันลมที่ต้องรับภาระจากแรงผลักและความเร็วการไหล สมการทั้งสองแสดงผลความสัมพันธ์ความเร็วการไหล v' ดังนี้

$$\frac{1}{2}\dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \tag{11}$$

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \tag{12}$$

ดังนั้นความเร็วที่ไหลผ่านกังหันลมมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของ v_1 และ v_2 ดังนี้

$$v' = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \tag{13}$$

ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลจะได้ดังนี้

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2}\rho A(v_1 + v_2) \tag{14}$$

กำลังกลที่ได้จากกังหันลมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$P = \frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \tag{15}$$

กำลังของกระแสอากาศอิสระ คือ

$$P_0 = \frac{1}{2}\rho A v_1^3 \tag{16}$$

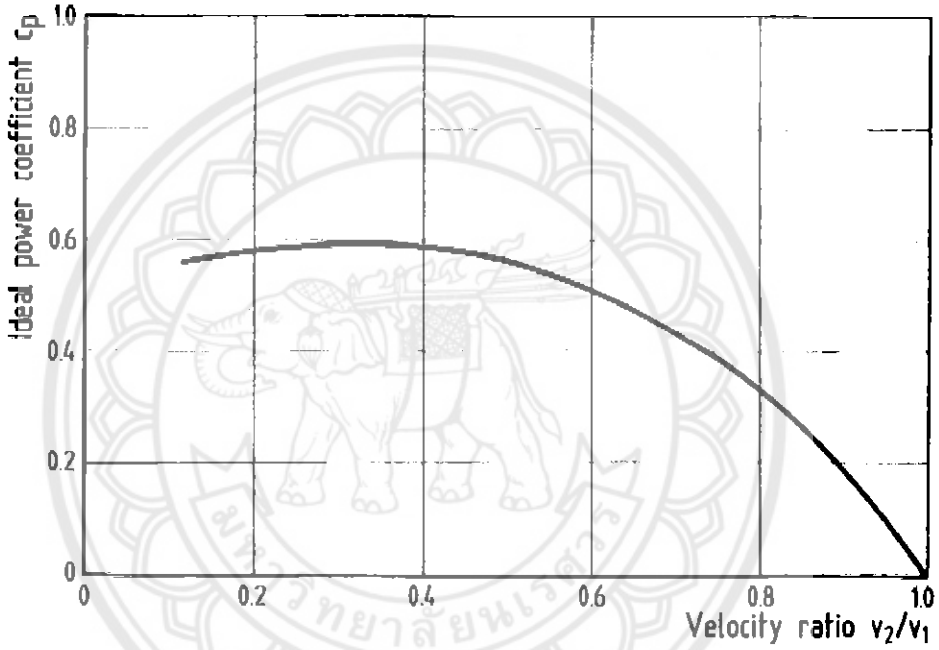
อัตราส่วนระหว่างกำลังของกังหันต่อกำลังของกระแสอากาศอิสระ เรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, c_p)

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} \quad (17)$$

จากสมการที่ 17 จะได้

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right|\left|1 + \frac{v_2}{v_1}\right| \quad (18)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะแปรผันกับอัตราส่วนความเร็วการไหลของกระแสอากาศทางเข้าและทางออกกังหันลม



รูปที่ 2.6 สัมประสิทธิ์กำลังต่ออัตราส่วนความเร็ว [6]

จากสมการที่ 18 ทำการ อนุพันธ์ของฟังก์ชันความเร็วเทียบกับศูนย์จะได้อัตราส่วนความเร็ว $v_2/v_1 = 1/3$ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงสุด "สัมประสิทธิ์กำลังอุดมคติ" $c_{P,max}$ หาได้โดยแทนค่า $v_2/v_1 = 1/3$ ในสมการที่ 18 จะได้

$$c_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (19)$$

เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของเบทซ์ (Betz Coefficient) คือสัดส่วนกำลังที่ดึงออกมาได้สูงสุดจากกังหันลมเป็นค่าทางทฤฎีสำหรับกังหันลมที่มีใบพัดเป็นจำนวนอนันต์ไม่มีความเสียดทาน และหมุนด้วยความเร็วสูง

2.3 การเปลี่ยนแปลงพลังงานลมโดยใช้แรงต้าน หรือ แรงยก ทางอากาศพลศาสตร์

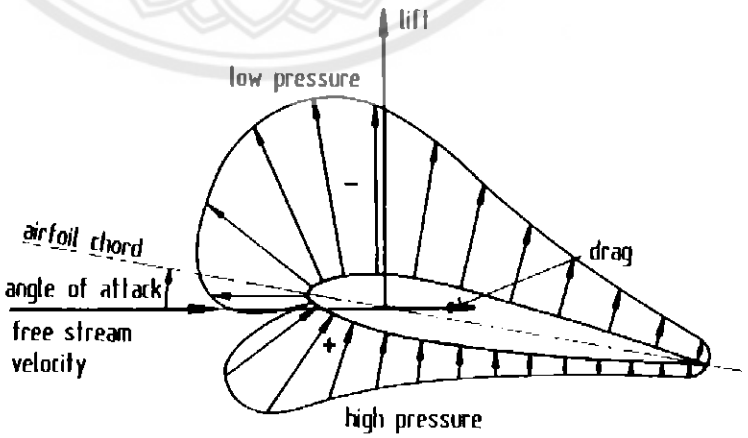
จากกระแสลมเคลื่อนที่จะมีพลังงานจลน์เกิดขึ้นเมื่อผ่านใบพัดจะผลักดันให้ใบพัดหมุนรอบแกน เกิดแรงที่กระทำต่อใบพัดประกอบด้วย 2 แรง กระทำในทิศทางตั้งฉากกันเรียกว่า แรงฉุด และแรงยก ขนาดของแรงยกจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ มุมของวัตถุต่อทิศทางกระแสลมและความเร็วของกระแสลม

2.3.1 แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์

คือ คือแรงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของไหล ทิศทางของแรงอยู่ในแนวเดียวกันกับทิศของการเคลื่อนที่ ถ้าวัตถุวางตัวอยู่ในแนวพื้นที่ด้านข้างตั้งฉากกับกระแสลมแรงฉุดที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่ามากที่สุด แต่ถ้าพื้นที่ด้านข้างอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางของกระแสลมแรงฉุดจะมีค่าต่ำสุด

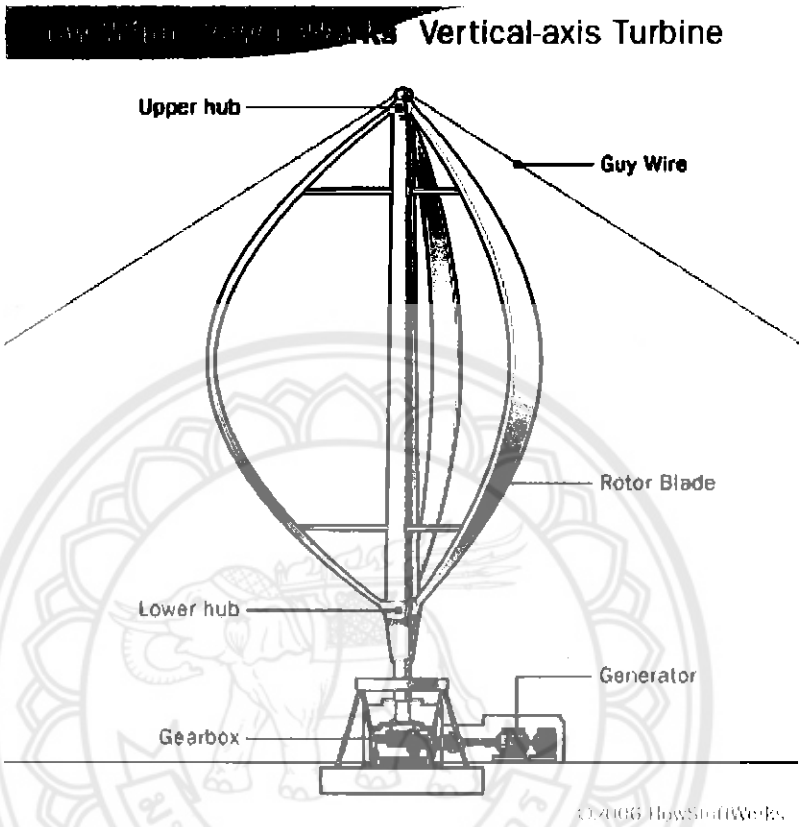
2.3.2 แรงยกทางอากาศพลศาสตร์

แรงยกเกิดขึ้นโดยความกดอากาศต่ำ ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวด้านบนแพนอากาศ (รูปที่ 2.7) เมื่อเปรียบเทียบกับความกดอากาศที่พื้นผิวด้านล่างของแพนอากาศ หรือ แรงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวด้านบนของแพนอากาศน้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวของแพนอากาศด้านล่างตามหลักของเบอร์นูลลี่ ทำให้เกิดแรงยกขึ้นข้างบนของแพนอากาศ ลักษณะรูปร่างของแพนอากาศถูกออกแบบมาให้อากาศที่พัดไหลผ่านด้านบนของแพนอากาศจะมีระยะทางที่อากาศต้องไหลผ่านมากกว่า จึงทำให้อากาศไหลผ่านเร็วกว่าด้านล่างของแพนอากาศ ทำให้เกิดความกดอากาศต่ำ ทำให้แพนอากาศถูกยกขึ้น แรงยกก็คือ แรงที่อยู่ตรงข้ามกับน้ำหนัก หรือแรงดึงดูดของโลก



รูปที่ 2.7 แรงฉุดและแรงยกที่กระทำต่อวัตถุ [6]

2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมดาร์เรียส



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของกังหันลมดาร์เรียส [7]

2.4.1 ใบพัด (Rotor Blade)

ใบพัดของกังหันลมเป็นส่วนที่จะก่อให้เกิดพลังงานกล โดยการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการหมุนมาเป็นพลังงานกลในการขับเคลื่อน

2.4.2 ระบบถ่ายทอดกำลัง (Gear Box)

การถ่ายทอดกำลังจากการหมุนของใบพัด จะถูกส่งผ่านไปยังเพลาขับและนำไปใช้งานโดยตรง หรือผ่านชุดเฟืองทด สายพาน หรือระบบไฮดรอลิกส์ เพื่อให้การหมุนของเพลาได้แรงบิดหรือความเร็วรอบตามที่ต้องการใช้งานเสียก่อน

2.4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า ต่อเข้ากับระบบควบคุมไฟฟ้าโดยส่วนมากใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

2.4.4 ลวดยึด (Guy Wire)

มีหน้าที่ยึดเสาของแกนหมุนไม่ให้เคลื่อนที่และให้เสารับแรงจากความเร็วลมที่มาปะทะได้มากขึ้น

2.4.5 Upper Hub และ Lower Hub

เป็นจุดเชื่อมของใบพัดมีหน้าที่ยึดหมุนติดกับเสา

2.5 ข้อมูลการทดลอง Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades

Blackwell และคณะ (1976) ได้ทำการทดลองโดยนำกังหันลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร โรเตอร์สูง 2 เมตร มาทดลองในอุโมงค์ลมซึ่งมี 2 และ 3 ใบพัด โดยทำการทดลองทั้งหมด 27 ครั้ง และแบ่งเป็นช่วงดังนี้

1. ครั้งที่ 1-6 ใช้กังหันลม 3 ใบพัด Chord length 8.815 cm ทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ 3 ครั้งคือ 180, 267 และ 500 RPM อีก 2 ครั้งที่เหลือทดลองที่กระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่ 11 และ 9 m/s
2. ครั้งที่ 7-11 ใช้กังหันลม 3 ใบพัด Chord length 7.346 cm ทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ 3 ครั้งคือ 216, 320 และ 600 RPM อีก 2 ครั้งที่เหลือทดลองที่กระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่ 11 และ 9 m/s
3. ครั้งที่ 13-17 ใช้กังหันลม 3 ใบพัด Chord length 5.887 cm ทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ 3 ครั้งคือ 270, 400 และ 525 RPM อีก 2 ครั้งที่เหลือทดลองที่กระแสอากาศอิสระทางเข้า 9 และ 7 m/s
4. ครั้งที่ 18-23 ใช้กังหันลม 2 ใบพัด Chord length 8.815 cm ทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ 4 ครั้งคือ 180, 267, 350 และ 500 RPM อีก 2 ครั้งที่เหลือทดลองที่ความเร็วกระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่ 11 และ 9 m/s
5. ครั้งที่ 24-28 ใช้กังหันลม 2 ใบพัด Chord length 5.877 cm ทดลองที่ความเร็วรอบคงที่ 3 ครั้งคือ 270, 400 และ 525 RPM อีก 2 ครั้งที่เหลือทดลองที่กระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่ 7 และ 9 m/s

ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงออกมาในรูปของกราฟ tip speed ratio และ c_p

2.6 โปรแกรม COMSOL Multiphysics™

โปรแกรม COMSOL Multiphysics™ (ชื่อเดิม FEMLAB) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปโปรแกรมหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนท์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ได้ทุกประเภทที่อยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์สมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation ; PDE)

ในส่วนของโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ ประกอบไปด้วยการสร้างโมเดลวัตถุและการวิเคราะห์ปัญหาแบ่งออกเป็นหมวดหมู่หรือเป็นโมดูล (Module) ต่างๆตามลักษณะของปัญหาหลักๆทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

ซึ่งในโครงงานนี้ใช้วิธีระเบียบไฟไนท์เอลิเมนท์ในการศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

ในการการศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชนิดแกนตั้ง สามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรม เขียนภาพ 3 มิติเพื่อ import เข้าโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

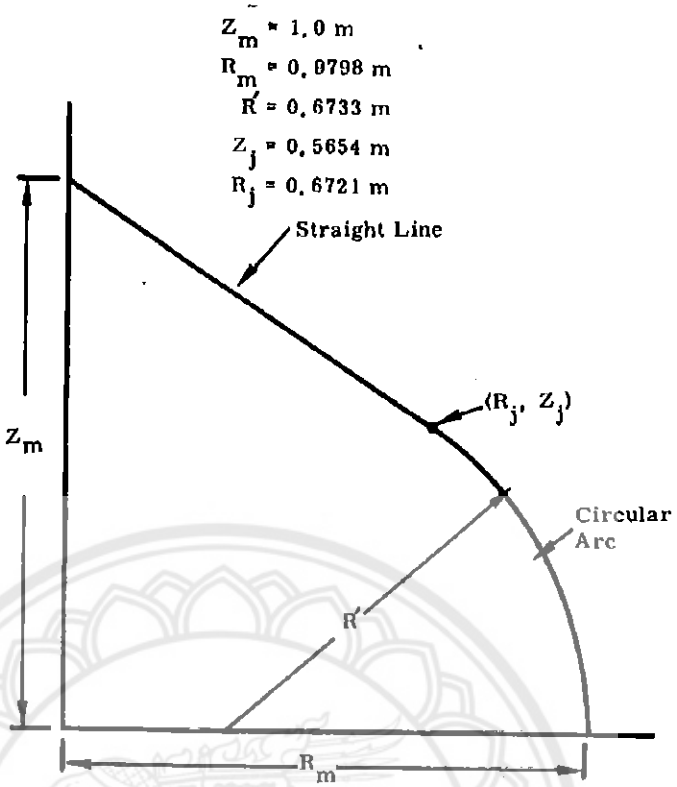
2.การจำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

3. ยืนยันผลการจำลองการไหลจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กับผลงานวิจัยของ Blackwell และคณะ

3.1 การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรม เขียนภาพ 3 มิติเพื่อ import เข้าโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

ข้อมูลกังหันลมชนิดแกนตั้ง

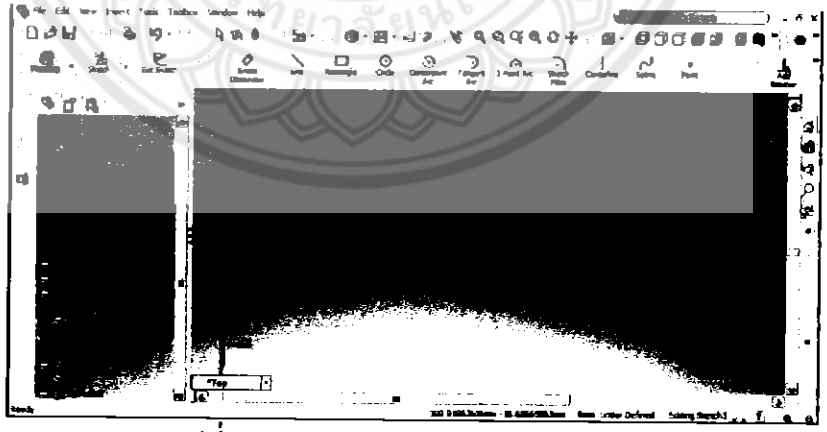
blade number	2
cross-sectional shape	NACA0012
swept area of the rotor	2.595 m^2
height of the rotor	2m



รูปที่ 3.1 รูปร่าง 2 มิติ [8]

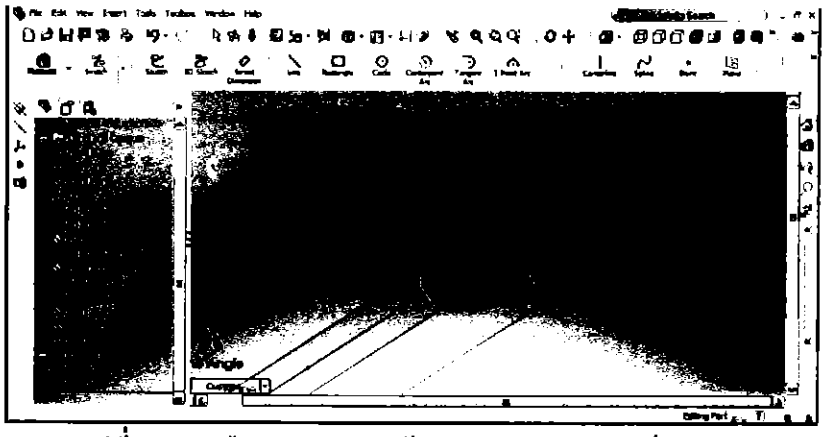
ทำการวาดแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งมีขั้นตอนหลักๆดังนี้

3.1.1 วาดรูปแพนอากาศ chord length 8.815 cm



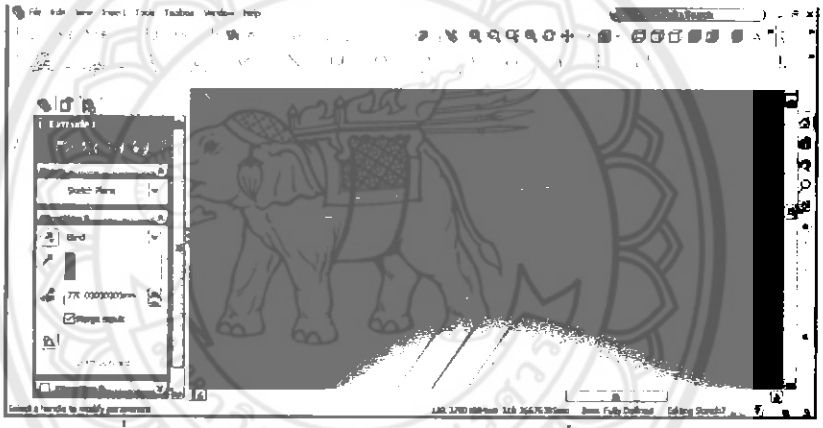
รูปที่ 3.2 การวาดรูปแบบจำลองแพนอากาศ

3.1.2 ทำการขึดแพนอากาศโค้งตามรัศมีจาก 2 มิติ เป็น 3 มิติ



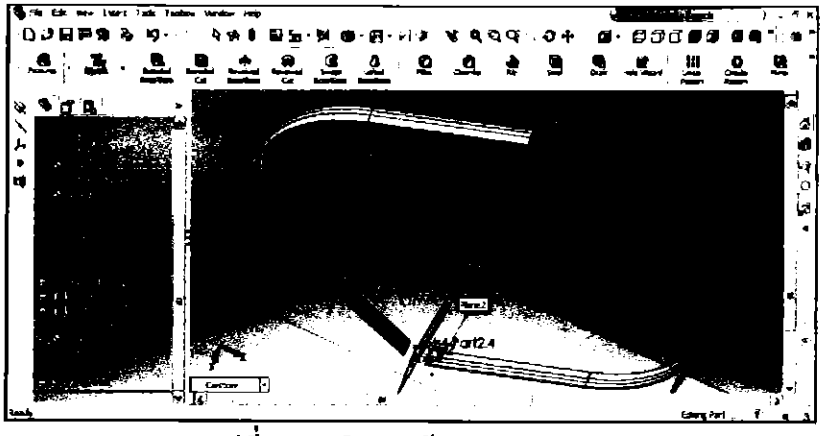
รูปที่ 3.3 การยืดแพนอากาศโค้งตามรัศมีจาก 2 มิติ เป็น 3 มิติ

3.1.3 ทำการยืดรูปแพนอากาศเป็นเส้นตรงต่อจากปลายที่ยืดโค้งตามรัศมี



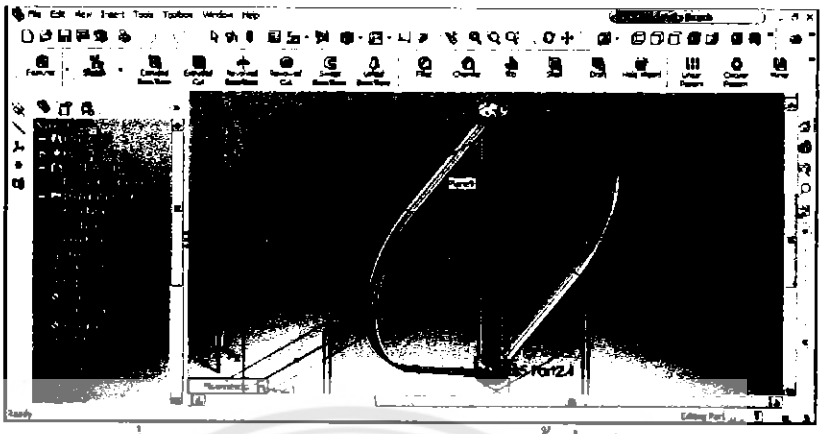
รูปที่ 3.4 การยืดรูปแพนอากาศต่อจากปลายที่ยืดโค้งตามรัศมี

3.1.4 นำใบพัดเข้ามาประกอบกัน



รูปที่ 3.5 นำใบพัดเข้ามาประกอบกัน

3.1.5 วาดส่วนประกอบที่เหลือจะได้กังหันลมชนิดแกนตั้งตามต้องการ



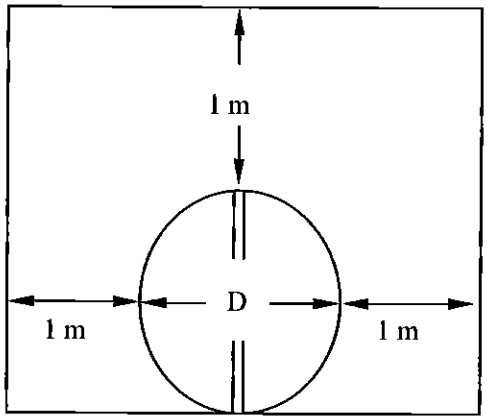
รูปที่ 3.6 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งที่เสร็จสมบูรณ์

3.2 การจำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

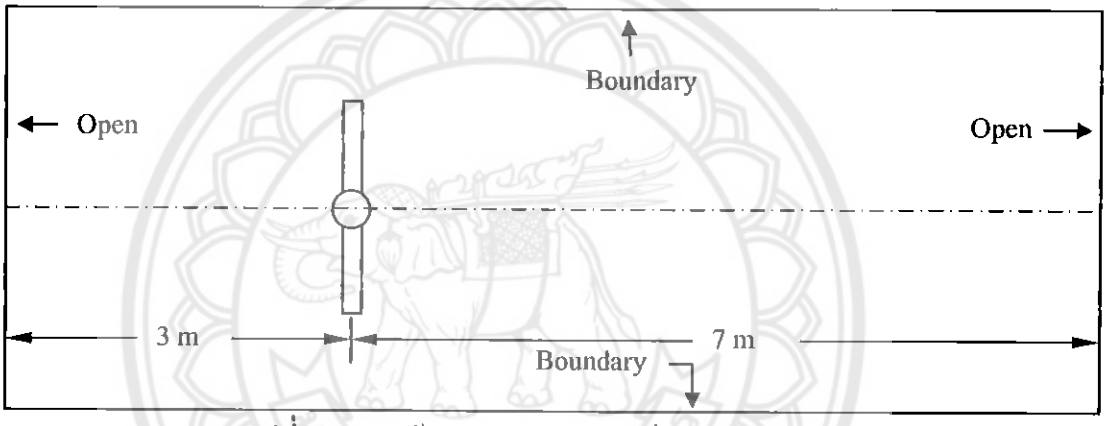
การวิเคราะห์ผลแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง อุปกรณ์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์ CPU : Pentium 4 3.06GHz, Ram : DDR2 2 GB, HDD : SATA 80 GB, OS Microsoft Windows XP Professional และใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics™3.2b ใช้ Space dimension : 3D ชนิดของเอลิเมนท์เป็นแบบ Lagrange-P_1P_2

ซึ่งเป็น Module ที่ใช้วิเคราะห์ของไหลที่มีการไหลคงที่ ที่ใช้ความสัมพันธ์ของนาเวียร์-สโตกส์สำหรับการไหลที่มีค่าความหนืด

ส่วนอุโมงค์ลมกำหนดเงื่อนไขการสร้างโดยให้ อุโมงค์ลมส่วนทางออกมีความยาวมากกว่าทางเข้า เนื่องจากผลการไหลแบบปั่นป่วนจะมีผลต่อการประมวณผลที่ยากและซับซ้อน หากอุโมงค์ลมทางออกสั้น จะทำให้ได้ค่าที่ผิดพลาด โดยที่ตัวกังหันลมติดอยู่กับพื้นอุโมงค์ลม ผนังและเพดานของอุโมงค์ลมห่างจากตัวกังหันลม 1 เมตร ความยาวที่ทางเข้าอุโมงค์ลมถึงตัวกังหันลม ยาว 3 เมตร ความยาวจากกังหันลมถึงทางออกของอุโมงค์ลมยาว 7 เมตร

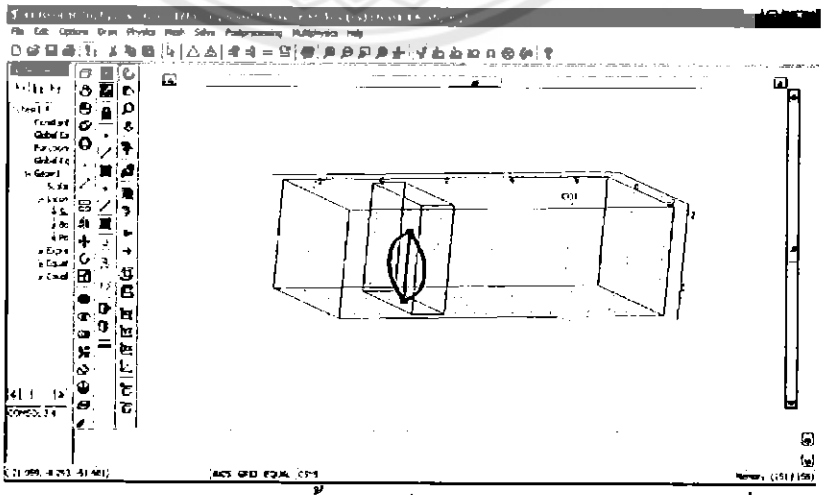


รูปที่ 3.7 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านหน้า



รูปที่ 3.8 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านบน

3.2.1 การ Import แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง อุโมงค์ลม และกล่องครอบกังหันลม



รูปที่ 3.9 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งอุโมงค์ลม และกล่องครอบกังหันลมที่ได้จากการ Import

3.2.2 การกำหนดค่าคงที่

ทำการกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 ลงในโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการประมวลผล

ชื่อ	ปริมาณ
rho	1.23 kg/m^3
eta	1.79e-5 Pa•s
V_mean	11 m/s

ซึ่ง rho คือ ความหนาแน่นของอากาศ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

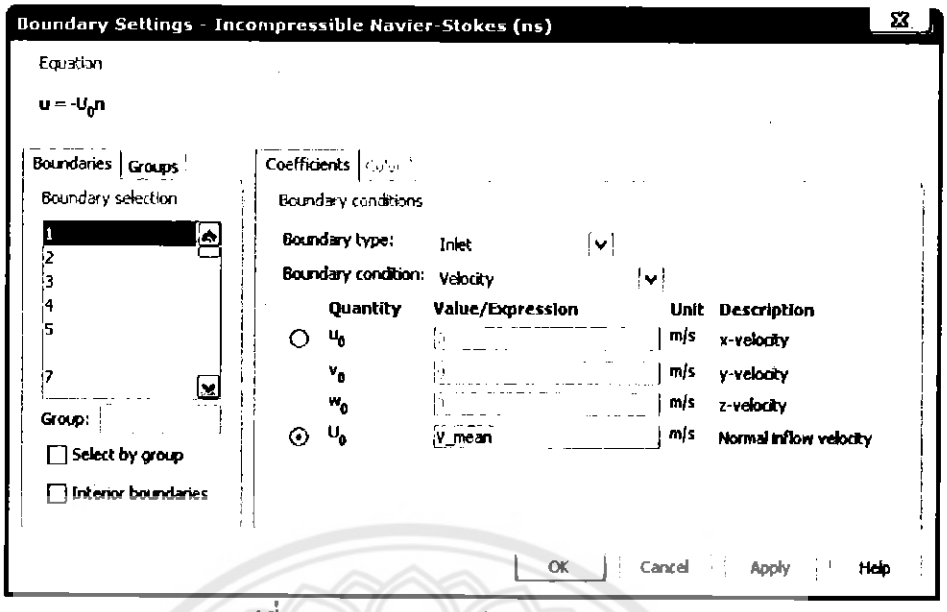
eta คือ ความหนืดจลน์ของอากาศ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

V_mean คือ ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า ครั้งแรกจะใช้ 11 m/s แล้วเปลี่ยนเป็น 9 m/s ต่อไป

3.2.3 การกำหนด Boundary

การกำหนดค่า Boundary settings โดยไปที่ Tab Psysics --> Boundary settings...

- คลิกเลือก Boundary 1 --> Boundary type เลือกเป็น Inlet และช่อง U_0 พิมพ์คำว่า V_mean
- คลิกเลือก Boundary 101 --> Boundary type เลือกเป็น
- คลิกเลือก Boundary 2,3,4,5,7 และ10 --> Boundary type เลือกเป็น Wall และช่อง Boundary condition เลือกเป็น Slip
- คลิกเลือก Boundary 11-99 --> Boundary type เลือกเป็น Wall และช่อง Boundary condition เลือกเป็น No Slip แล้วกด OK

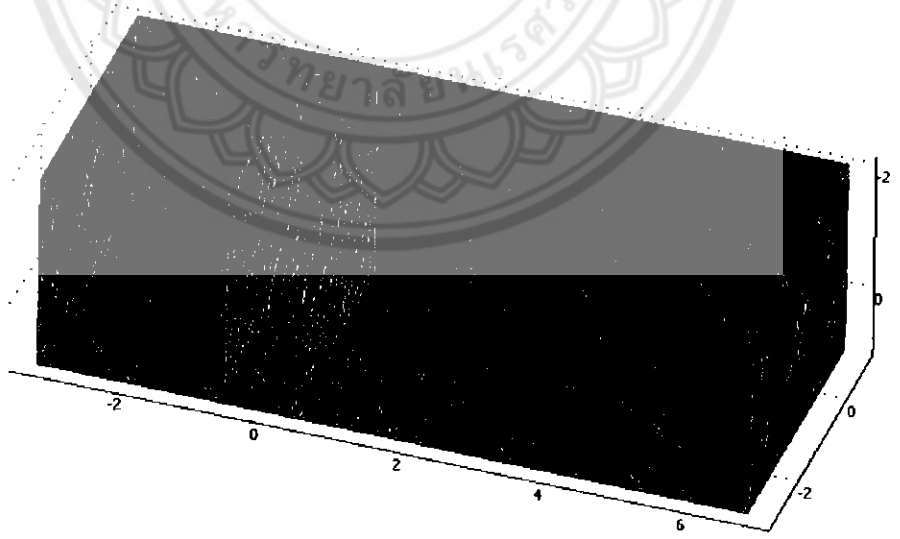


รูปที่ 3.10 การกำหนดค่า Boundary Settings

3.2.4 การแบ่งเอลิเมนท์

กำหนดเอลิเมนท์โดยเลือกแบบ Free Mesh แล้วคลิกที่ Predefined mesh sizes คือการกำหนดค่าความละเอียดของเอลิเมนท์

ซึ่งได้จำนวนเอลิเมนท์ เท่ากับ 22,269 เอลิเมนท์ และ Element volume ratio เท่ากับ 8.73×10^{-9}



รูปที่ 3.11 การแบ่งเอลิเมนท์

3.2.5 การสั่งโปรแกรมคำนวณผล (Solve)

ในการสั่งให้โปรแกรมคำนวณผล ชนิดของ Default solver ที่ใช้เป็นแบบ Stationary Nonlinear โดยมีค่า Relative Tolerance เท่ากับ 10^{-6} และได้ทำการปรับค่า Maximum number of iterations เพิ่มขึ้นเป็น 100 เพื่อเพิ่มจำนวนการวนซ้ำของการคำนวณผล เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามต้องการ โดยโปรแกรมใช้เวลาในการประมวลผลประมาณ 6 ชั่วโมง 30 นาที

3.2.6 การแสดงผล (Postprocessing)

การแสดงผลการจำลองการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง จะเลือกชนิดการแสดงผลเป็นแบบ Cross-Section line data ค่าที่ได้จะเป็นความเร็วลมตามเส้นตรงโดยแสดงผลออกมาในรูปของกราฟ ทำซ้ำโดยเปลี่ยนความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้าเป็น 9 m/s

3.3 ยืนยันผลการจำลองการไหลจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กับผลงานวิจัยของ Blackwell และคณะ

นำค่าความเร็วที่ได้จากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ แทนในสมการสัมประสิทธิ์กำลังดังแสดงไว้ด้านล่าง

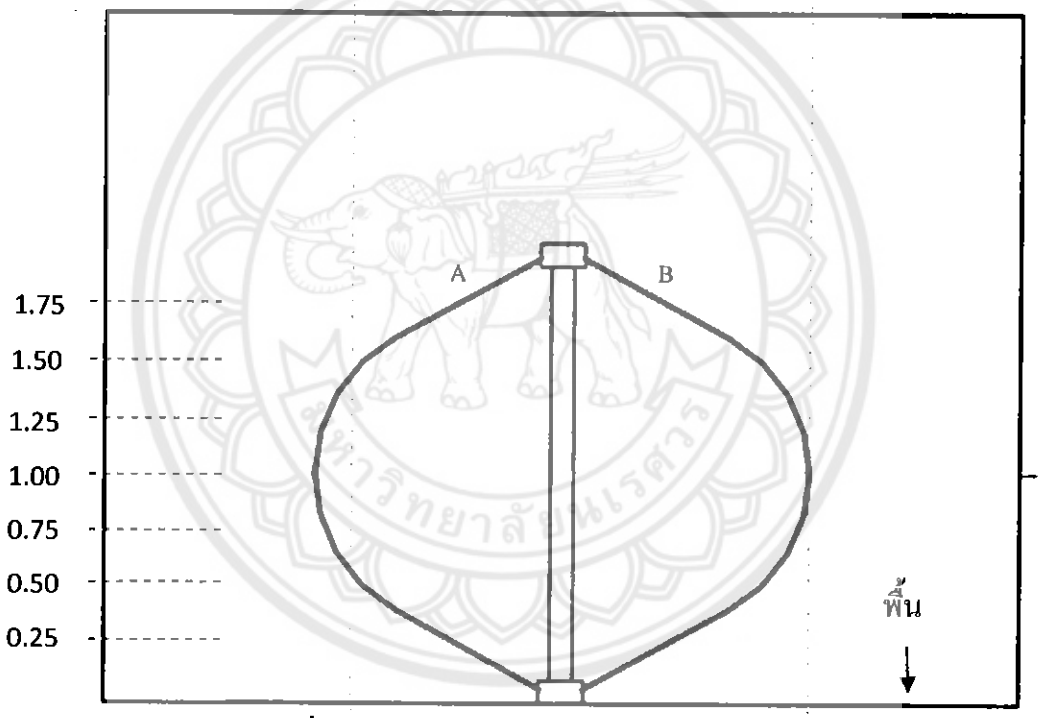
$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right|\left|1 + \frac{v_2}{v_1}\right|$$

จากนั้นคำนวณหาค่า Tip speed ratio ตามความเร็วรอบ 180, 267, 350 และ 500 RPM แล้วนำมาพล็อตลงในกราฟผลงานวิจัยของ Blackwell และคณะ

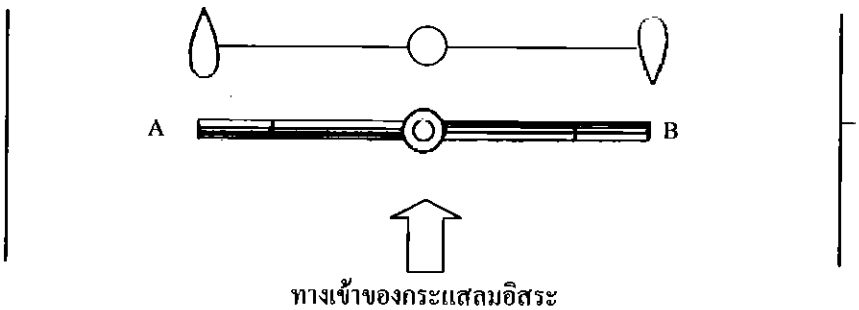
บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์

รูปหน้าตัดขวางของกังหันตั้งฉากกับทิศทางลม โดยหาค่าความเร็วลมในตำแหน่งหน้าและหลังใบพัดตามระดับความสูงต่างๆ ด้าน A คือ ใบพัดโดยส่วนด้านหน้าแพนอากาศปะทะอากาศ ด้าน B คือ ใบพัดโดยส่วนหางแพนอากาศปะทะอากาศ

4.1 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 รูประดับการวัดค่าตามความสูงของกังหันลม



รูปที่ 4.2 รูปมุมมองด้านบนของกังหันลมภายในอุโมงค์ลม

ค่าความเร็วที่ได้จากโปแกรม COMSOL Multiphysics™ แสดงในตาราง 3.2 และ 3.3

ตารางที่ 4.1 ตารางความเร็วลมจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กระแสอากาศอิสระ 9 m/s

ระดับความสูงจากพื้น (m)	ก่อนปะทะ		หลังปะทะ	
	A (m/s)	B (m/s)	A (m/s)	B (m/s)
0.25	1.6138	0.3711	0.536	0.45
0.50	1.007	0.456	0.576	0.47
0.75	2.3598	1.076	0.85	0.49
1.00	3.1144	1.2553	1.072	1.249
1.25	1.9287	0.9334	0.473	0.5228
1.50	1.2547	0.739	0.4058	0.8224
1.75	1.362	0.4106	0.65	0.4472

ตารางที่ 4.2 ตารางความเร็วลมจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กระแสอากาศอิสระ11m/s

ระดับความสูงจากพื้น (m)	ก่อนปะทะ		หลังปะทะ	
	A (m/s)	B (m/s)	A (m/s)	B (m/s)
0.25	1.9715	0.4536	0.6558	0.5240
0.50	1.2305	0.5573	0.7048	0.5763
0.75	2.8838	1.3151	1.384	0.6000
1.00	3.8059	1.5342	1.3100	1.5268
1.25	2.3570	1.1400	0.5781	0.6391
1.50	1.5334	0.9032	0.5244	0.9187
1.75	1.6645	0.5019	0.7945	0.5464

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ผลการจำลองการไหลของโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ กับค่าสัมประสิทธิ์กำลังของ Blackwell และคณะ การคำนวณจะใช้สมการที่ 18 นั่นคือ

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right|\left|1 + \frac{v_2}{v_1}\right|$$

ใช้ค่าความเร็วลมที่ ตาราง 3.2 และ 3.3 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้าเท่ากับ 9 และ 11 m/s จะได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังตามตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 9 m/s

ระดับความสูงจากพื้น (m)	c_p		
	A	B	total
0.25	0.5926	0.5204	0.0722
0.5	0.5288	0.0633	0.4655
0.75	0.5919	0.5768	0.0151
1	0.5925	0.0100	0.5825
1.25	0.5852	0.5353	0.0498
1.5	0.5925	0.2519	0.3406
1.75	0.5704	0.1945	0.3759
ค่าเฉลี่ย	0.5791	0.3075	0.2717

ตารางที่ 4.4 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 11 m/s

ระดับความสูงจากพื้น (m)	c_p		
	A	B	total
0.25	0.5926	0.2338	0.3588
0.5	0.5284	0.0705	0.4579
0.75	0.5695	0.5766	-0.0071
1	0.5925	0.0096	0.5829
1.25	0.5852	0.5351	0.050
1.5	0.5925	0.0349	0.5576
1.75	0.570	0.19	0.380
ค่าเฉลี่ย	0.5780	0.2358	0.340

ทำการหาค่า Tip speed ratio ของความเร็วกระแสอากาศอิสระทางเข้า 9 และ 11 m/s โดยใช้ความเร็วรอบของกังหันลม (N) ที่ 180, 267, 350 และ 500 RPM โดยทำการแปลงเป็นความเร็วเชิงมุม (ω) แล้วแทนค่าในสมการ

$$X_\infty = \frac{R\omega}{V_\infty} \tag{20}$$

เมื่อ X_∞ คือ ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า

R คือ รัศมีสุงสุดของกังหันลม

V_∞ คือ ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า

จะได้ค่า Tip speed ratio ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางค่า Tip speed ratio ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Tip speed ratio	180 RPM	267 RPM	350 RPM	500 RPM
ที่ 9 m/s	2.260	3.350	4.3970	6.2820
ที่ 11 m/s	1.850	2.7477	3.60	5.1398

จากการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

1. ความเร็วของกระแสอากาศอิสระมีค่าคงที่
2. ความเร็วรอบมีค่าคงที่
3. กังหันหยุดนิ่งตั้งฉากกับกระแสอากาศอิสระเพราะจะทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด

เมื่อนำผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม COMSOL เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blackwell และคณะ จากการคำนวณจะได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด เป็นไปตามเงื่อนไขการวิเคราะห์ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์กำลังของ Blackwell และคณะ มีหลายค่า เพราะวัดค่าจากกังหันลมที่ได้ทดลองจากการทดลองจริงในอุโมงค์ลม ภายใต้เงื่อนไข ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่และความเร็วรอบไม่คงที่

จากการเปรียบเทียบ พบว่า ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระ 9 m/s จะได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลม เท่ากับ 0.27 ที่ Tip speed ratio 4.05 ถึง 6.28 หรือในช่วงความเร็วรอบของกังหันลมที่ 322 ถึง 500 RPM และที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระ 11 m/s จะได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลม เท่ากับ 0.34 ที่ Tip speed ratio 4.70 ถึง 5.14 หรือในช่วงความเร็วรอบของกังหันลมที่ 457 ถึง 500 RPM

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการวาดแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง โดยใช้อัตราส่วนขนาดจริง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีระเบียบไฟไนท์เอลิเมนท์โดยใช้โปรแกรม COMSOL Mutiphysics™ ในการวิเคราะห์ที่ความเร็วกระแสอากาศอิสระที่ 9 และ 11 m/s และกังหันลมหยุดนิ่งตั้งฉากกับกระแสอากาศอิสระ เพื่อหาความเร็วลมก่อนและหลังปะทะใบพัด แล้วนำค่าความเร็วที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blackwell และคณะ [1]

สรุปได้ว่า ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า 9 m/s ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสูงสุดจากโปรแกรม COMSOL Mutiphysics™ เท่ากับ 0.27 ที่ความเร็วรอบของกังหันลมในช่วง 322 และ 500 RPM ซึ่งค่าที่ได้น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของการทดลองของ Blackwell และคณะ 15.6% เนื่องจาก ได้ทำการวิเคราะห์ให้กังหันลมหยุดนิ่งตั้งฉากกับกระแสอากาศอิสระ และความเร็วรอบของกังหันลมคงที่

ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า 11 m/s ได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมสูงสุดจากโปรแกรม COMSOL Mutiphysics™ เท่ากับ 0.34 ที่ความเร็วรอบของกังหันลมในช่วง 457 ถึง 500 RPM ซึ่งค่าที่ได้น้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของการทดลองของ Blackwell และคณะ 1.5% เนื่องจาก ได้ทำการวิเคราะห์ให้กังหันลมหยุดนิ่งตั้งฉากกับกระแสอากาศอิสระ และความเร็วรอบของกังหันลมคงที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทำแบบจำลองขนาดเล็กแล้วนำไปทดลองในอุโมงค์เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบต่อไป

5.2.2 ทำการทดลองโดยกำหนดให้ความเร็วรอบของกังหันลมแปรผัน

5.2.3 ทำการทดลองแปรผันมุมกระแสอากาศปะทะกังหันลม

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

I 5047977
วธ
ว343ก
2552
ค.1

เอกสารอ้างอิง

[1] B.F. Blackwell, R.E. Sheldahl, L.V. Felts. (1976). **Wind Tunnel Performance Data for the Darrieus Wind Turbine with NACA 0012 Blades.** SAND76-0130, จาก http://www.sandia.gov/wind/topical.htm

[2] Hui. (2006) **1 MW Wind Turbine Generator.** สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2552, จาก http://www.diytrade.com/china/4/products/1854634/1_MW_Wind_Turbine_Generator.html

[3] **Brill windmill.** สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2552, จาก http://www.visitbuckinghamshire.org/site/brill

[4] **Darrieus Vertical-Axis Wind Turbine.** สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2552, จาก http://www.symscape.com/node/406

[5] **Savonius Wind Turbines.** สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2552, จาก http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm

[6] E. (Erich), Hau. (2006). **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics.** Springer

[7] Layton, Julia. (2006) **How Wind Power Works.** สืบค้นเมื่อ 8 สิงหาคม 2552, จาก http://science.howstuffworks.com/wind-power.htm/printable

[8] **ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุตร จำลองกุล. 2545. พลังงานหมุนเวียน.** โอ.เอส. พริ้นติ้ง เฮ้าส์ กรุงเทพมหานคร

[9] **วรนุช** แจ้งสว่าง. 2551. **พลังงานหมุนเวียน Renewable Energy.** แอคทีฟ พริ้นท์ จำกัด

ภาคผนวก ก

แพนอากาศ NACA 0012

ตารางที่ ก.1 แพนอากาศ NACA 0012 Coordinates

X/c	Y/c	X/c	Y/c	X/c	Y/c	X/c	Y/c
1.000000	0.001260	0.369372	0.059023	0.000036	-0.001014	0.387789	-0.058466
0.992704	0.002274	0.350989	0.059462	0.000322	-0.003059	0.406241	-0.057796
0.979641	0.004079	0.332648	0.059779	0.000894	-0.005155	0.424740	-0.057019
0.964244	0.006169	0.314366	0.059965	0.001777	-0.007318	0.443287	-0.056144
0.947231	0.008434	0.296159	0.060009	0.003007	-0.009544	0.461875	-0.055178
0.929323	0.010765	0.278033	0.059903	0.004621	-0.011797	0.480488	-0.054127
0.910956	0.013101	0.259997	0.059634	0.006653	-0.014058	0.499117	-0.052996
0.892372	0.015420	0.242060	0.059191	0.009117	-0.016316	0.517763	-0.051786
0.873723	0.017700	0.224236	0.058562	0.012012	-0.018579	0.536430	-0.050503
0.855041	0.019931	0.206544	0.057733	0.015371	-0.020871	0.555117	-0.049149
0.836311	0.022119	0.189011	0.056692	0.019310	-0.023217	0.573821	-0.047728
0.817558	0.024266	0.171676	0.055421	0.023982	-0.025653	0.592538	-0.046245
0.798819	0.026366	0.154596	0.053909	0.029567	-0.028218	0.611266	-0.044701
0.780088	0.028414	0.137852	0.052138	0.036254	-0.030913	0.630004	-0.043098
0.761336	0.030413	0.121548	0.050098	0.044211	-0.033717	0.648751	-0.041440
0.742560	0.032370	0.105827	0.047785	0.053594	-0.036612	0.667502	-0.039728
0.723780	0.034284	0.090903	0.045220	0.064541	-0.039548	0.686255	-0.037964
0.705012	0.036149	0.077039	0.042449	0.077039	-0.042449	0.705012	-0.036149
0.686255	0.037964	0.064541	0.039548	0.090903	-0.045220	0.723780	-0.034284
0.667502	0.039728	0.053594	0.036612	0.105827	-0.047784	0.742560	-0.032370
0.648751	0.041440	0.044211	0.033717	0.121548	-0.050098	0.761336	-0.030413
0.630004	0.043098	0.036254	0.030913	0.137852	-0.052138	0.780088	-0.028414
0.611266	0.044701	0.029567	0.028218	0.154596	-0.053909	0.798819	-0.026366
0.592538	0.046245	0.023982	0.025653	0.171676	-0.055421	0.817558	-0.024266
0.573821	0.047728	0.019310	0.023217	0.189011	-0.056692	0.836311	-0.022119
0.555117	0.049149	0.015371	0.020871	0.206544	-0.057733	0.855041	-0.019931
0.536430	0.050503	0.012012	0.018579	0.224236	-0.058562	0.873723	-0.017700
0.517763	0.051786	0.009117	0.016316	0.242060	-0.059191	0.892372	-0.015420
0.499117	0.052996	0.006653	0.014058	0.259997	-0.059634	0.910956	-0.013101
0.480488	0.054127	0.004621	0.011797	0.278033	-0.059903	0.929323	-0.010765
0.461875	0.055178	0.003007	0.009544	0.296159	-0.060009	0.947231	-0.008434
0.443287	0.056144	0.001777	0.007318	0.314366	-0.059965	0.964244	-0.006169
0.424740	0.057019	0.000894	0.005155	0.332648	-0.059779	0.979641	-0.004079
0.406241	0.057796	0.000322	0.003059	0.350989	-0.059462	0.992704	-0.002274
0.387789	0.058466	0.000036	0.001014	0.369372	-0.059023	1.000000	-0.001260

ตารางที่ก.2 แพนอากาศ NACA 0012 Coordinates Chord Length 8.815 cm

X/c	Y/c	X/c	Y/c	X/c	Y/c	X/c	Y/c
88.150000	0.111069	32.560142	5.202877	0.003173	-0.089384	34.183600	-5.153778
87.506858	0.200453	30.939680	5.241575	0.028384	-0.269651	35.810144	-5.094717
86.355354	0.359564	29.322921	5.269519	0.078806	-0.454413	37.440831	-5.026225
84.998109	0.543797	27.711363	5.285915	0.156643	-0.645082	39.075749	-4.949094
83.498413	0.743457	26.106416	5.289793	0.265067	-0.841304	40.714281	-4.863941
81.919822	0.948935	24.508609	5.280449	0.407341	-1.039906	42.355017	-4.771295
80.300771	1.154853	22.918736	5.256737	0.586462	-1.239213	43.997164	-4.671597
78.662592	1.359273	21.337589	5.217687	0.803664	-1.438255	45.640808	-4.564936
77.018682	1.560255	19.766403	5.162240	1.058858	-1.637739	47.286305	-4.451839
75.371864	1.756918	18.206854	5.089164	1.354954	-1.839779	48.933564	-4.332484
73.720815	1.949790	16.661320	4.997400	1.702177	-2.046579	50.582321	-4.207223
72.067738	2.139048	15.133239	4.885361	2.114013	-2.261312	52.232225	-4.076497
70.415895	2.324163	13.627637	4.752078	2.606331	-2.487417	53.883098	-3.940393
68.764757	2.504694	12.151654	4.595965	3.195790	-2.724981	55.534853	-3.799089
67.111768	2.680906	10.714456	4.416139	3.897200	-2.972154	57.187401	-3.652936
65.456664	2.853416	9.328650	4.212248	4.724311	-3.227348	58.840301	-3.502023
63.801207	3.022135	8.013099	3.986143	5.689289	-3.486156	60.493378	-3.346527
62.146808	3.186534	6.790988	3.741879	6.790988	-3.741879	62.146808	-3.186534
60.493378	3.346527	5.689289	3.486156	8.013099	-3.986143	63.801207	-3.022135
58.840301	3.502023	4.724311	3.227348	9.328650	-4.212160	65.456664	-2.853416
57.187401	3.652936	3.897200	2.972154	10.714456	-4.416139	67.111768	-2.680906
55.534853	3.799089	3.195790	2.724981	12.151654	-4.595965	68.764757	-2.504694
53.883098	3.940393	2.606331	2.487417	13.627637	-4.752078	70.415895	-2.324163
52.232225	4.076497	2.114013	2.261312	15.133239	-4.885361	72.067738	-2.139048
50.582321	4.207223	1.702177	2.046579	16.661320	-4.997400	73.720815	-1.949790
48.933564	4.332484	1.354954	1.839779	18.206854	-5.089164	75.371864	-1.756918
47.286305	4.451839	1.058858	1.637739	19.766403	-5.162240	77.018682	-1.560255
45.640808	4.564936	0.803664	1.438255	21.337589	-5.217687	78.662592	-1.359273
43.997164	4.671597	0.586462	1.239213	22.918736	-5.256737	80.300771	-1.154853
42.355017	4.771295	0.407341	1.039906	24.508609	-5.280449	81.919822	-0.948935
40.714281	4.863941	0.265067	0.841304	26.106416	-5.289793	83.498413	-0.743457
39.075749	4.949094	0.156643	0.645082	27.711363	-5.285915	84.998109	-0.543797
37.440831	5.026225	0.078806	0.454413	29.322921	-5.269519	86.355354	-0.359564
35.810144	5.094717	0.028384	0.269651	30.939680	-5.241575	87.506858	-0.200453
34.183600	5.153778	0.003173	0.089384	32.560142	-5.202877	88.150000	-0.111069

ภาคผนวก ข

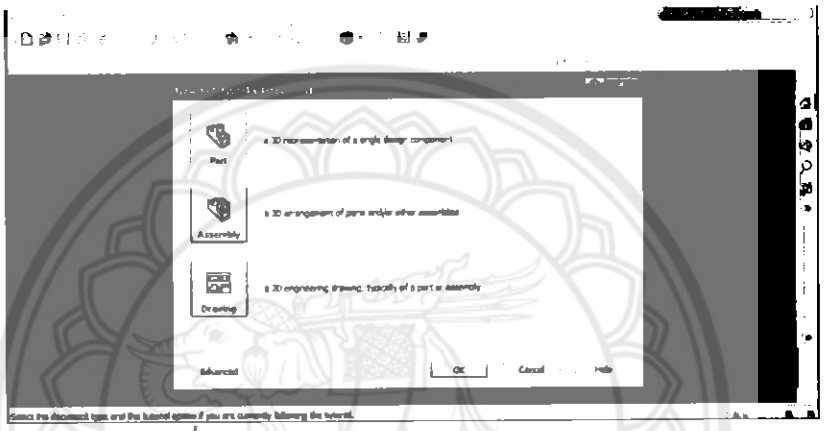
การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง และอุโมงค์ลม

ข.1 การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลมด้วยโปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ

การสร้างแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งทางคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์ CPU : Pentium 4 3.06GHz, Ram : DDR2 2 GB, HDD : SATA 80 GB, OS Microsoft Windows XP Professional และใช้โปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ มีขั้นตอนดังนี้

1.1 การเรียกใช้โปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ

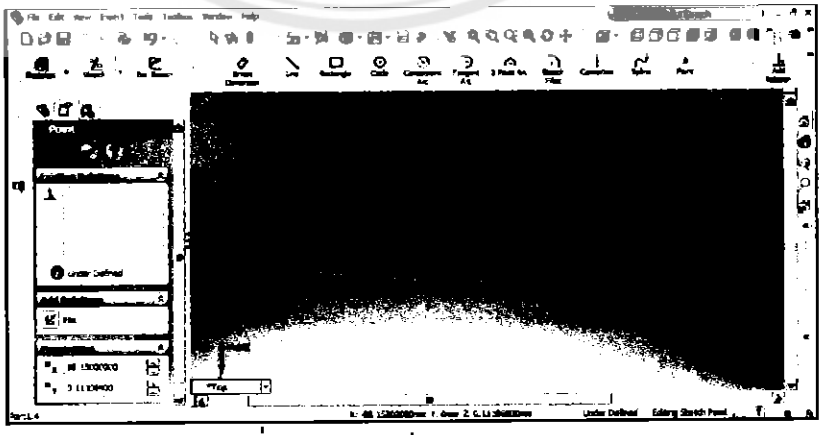
ดับเบิ้ลคลิกที่ไอคอนโปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ บน Desktop แล้วเลือก New--> New SolidWorks Document เลือก Part แล้วคลิก OK



รูปที่ ผข.1 การเรียกใช้โปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ

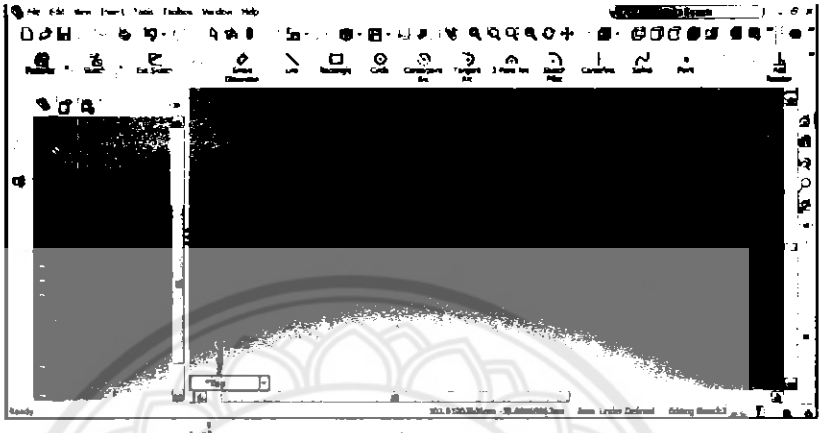
1.2 การวาดแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง

1.2.1 เลือก Top Plane แล้วคลิกที่ Sketch เลือก Point พล็อตจุดใส่ค่าตำแหน่งแพนอากาศ NACA0012 Chord Length 8.815 cm บนแกน X และ Y



รูปที่ ผข.2 การพล็อตจุดแพนอากาศ

1.2.2 เลือก Top Plane แล้วคลิกที่ Sketch เลือก Sketch วาดรูปแบบจำลองแพนอากาศตามความเหมาะสม (หากลากเส้นละเอียดทุกจุด การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม COMSOL Multipsysics™ จะพบปัญหาในขั้นตอนการ Mesh)

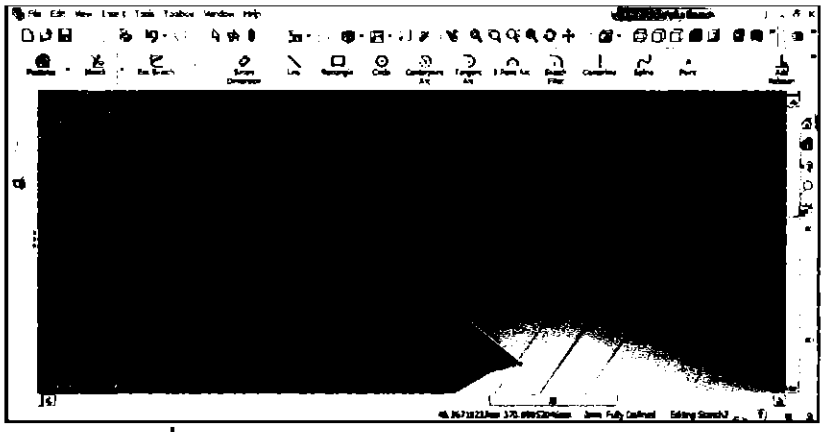


รูปที่ ผข.3 การวาดรูปแบบจำลองแพนอากาศ

1.2.3 คลิกที่ Features เลือก Revoled Boss/Base เพื่อทำการยืดรูปโค้งตามรัศมีให้เป็น 3 มิติ โดยกำหนดให้มีรัศมีเท่าขนาดจริง

รูปที่ ผข.4 ยืดรูปโค้งตามรัศมีให้เป็น 3 มิติ

1.2.4 คลิกที่หน้าตัดแพนอากาศ แล้วคลิกที่ Sketch เลือก Sketch วาดเส้นตามเส้นขอบของแพนอากาศ

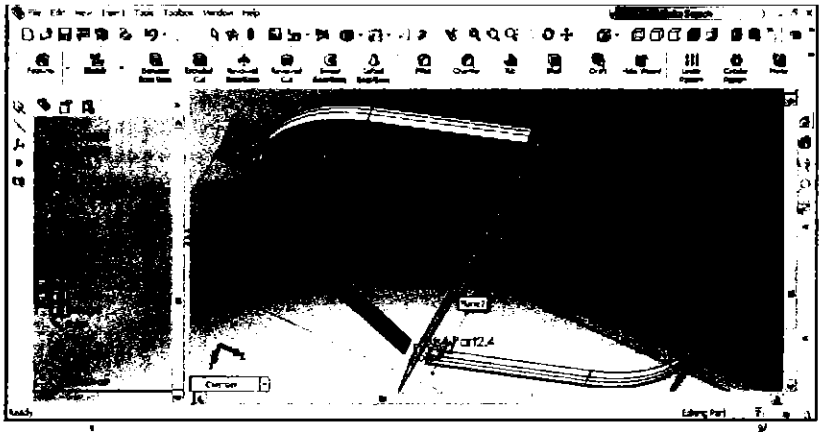


รูปที่ ผข.5 การวาดเส้นตามเส้นขอบของแพนอากาศ

1.2.5 คลิกที่ Features ทำการยืดรูปความยาวตามขนาดจริง และหน้าตัดอีกด้านก็ใช้วิธีเดิม

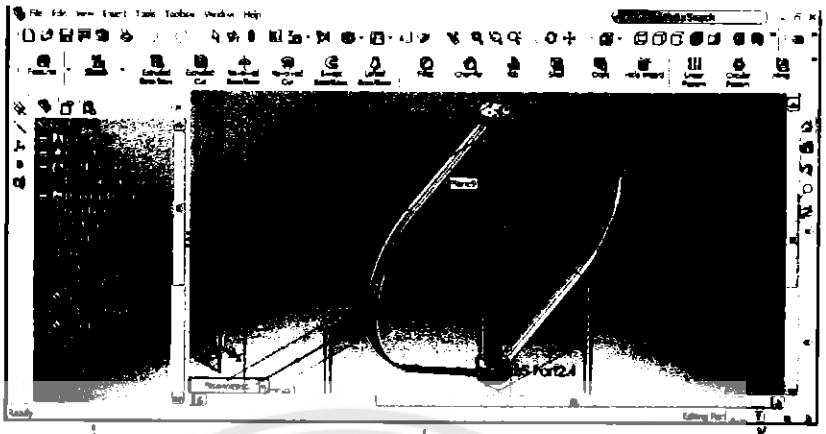
รูปที่ ผข.6 การยืดรูปความยาวตามขนาดจริง

1.2.6 ทำการเซฟแยกไว้เป็นสองไฟล์ เลือกเปิดไฟล์ใดไฟล์หนึ่ง แล้วเข้าไปที่Insert--> Part... แล้วเลือกอีกไฟล์เข้ามาประกอบให้เป็นกังหันลมชนิดแกนตั้ง



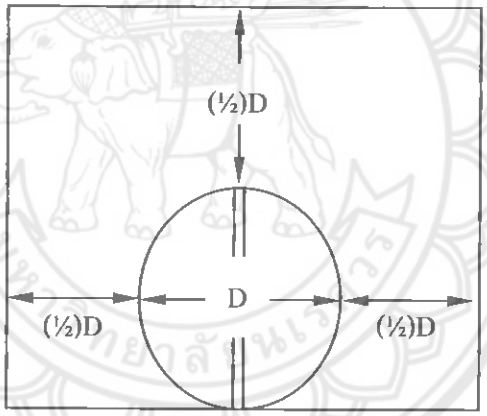
รูปที่ ผข.7 การนำไฟล์เข้ามาประกอบให้เป็นกังหันลมชนิดแกนตั้ง

1.2.7 วาดส่วนประกอบที่เหลือของกังหันลมชนิดแกนตั้ง และเซฟเป็นไฟล์นามสกุล .STEP

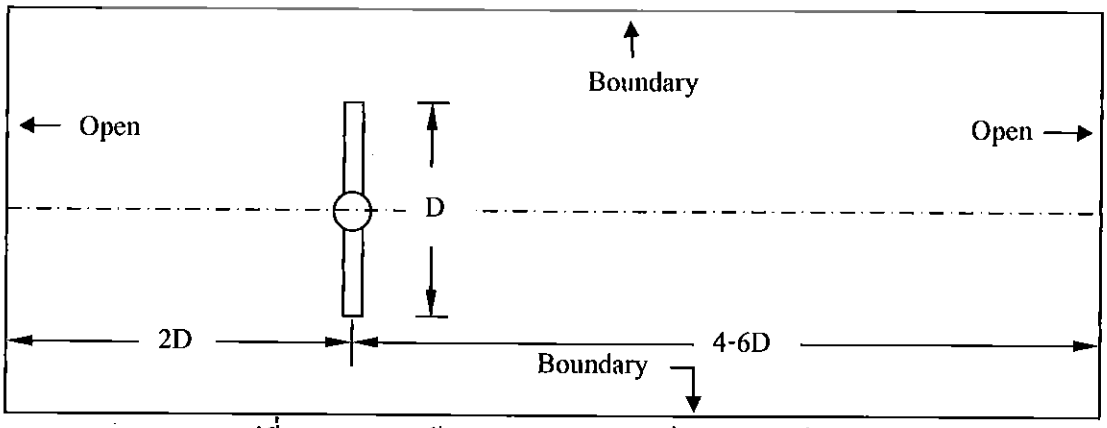


รูปที่ ผข.8 การวาดส่วนประกอบที่เหลือของกังหันลมชนิดแกนตั้ง

1.3 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลม

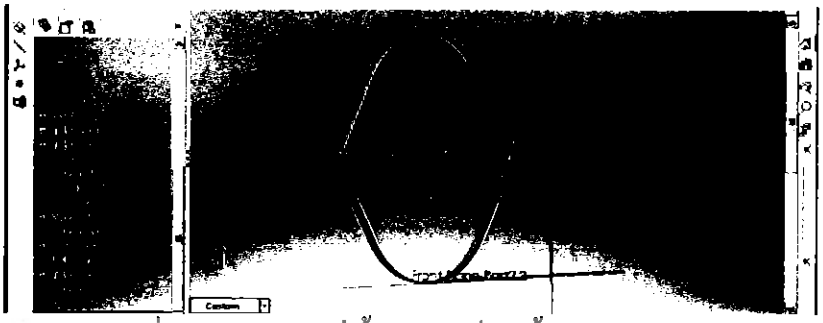


รูปที่ ผข.9 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านหน้า



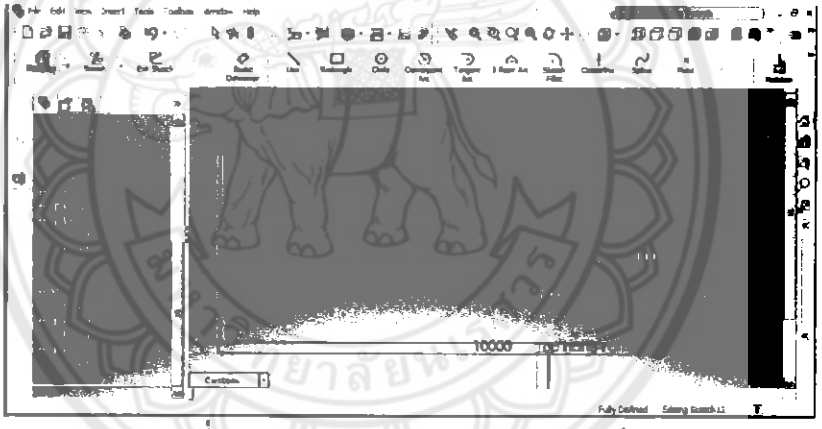
รูปที่ ผข.10 การสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมมุมมองด้านบน

1.3.1 เปิดแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งที่ทำเสร็จแล้ว เซฟเป็นไฟล์ใหม่ให้เป็นไฟล์ของแบบจำลองอุโมงค์ลม จากนั้นคลิกผิวที่พื้นผิวด้านที่ติดพื้นของกังหันลม



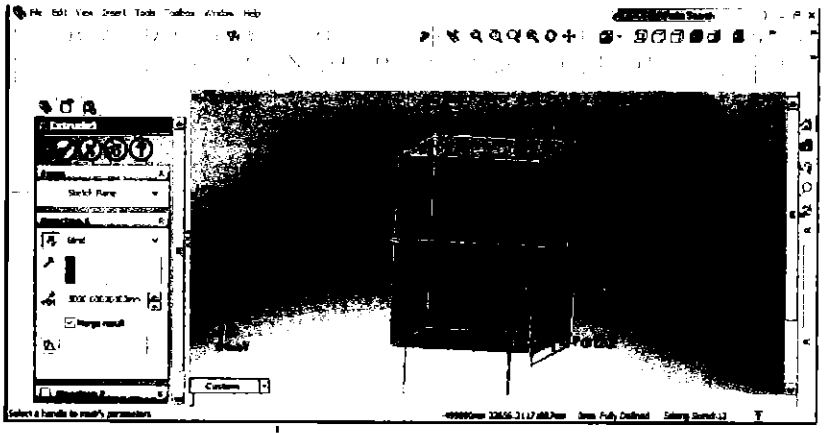
รูปที่ ผข.11 คลิกผิวที่พื้นผิวด้านที่ติดพื้นของกังหันลม

1.3.2 คลิกที่ Sketch เลือก Sketch วาดรูปแบบจำลองอุโมงค์ลมตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ ผข.12 การวาดรูปแบบจำลองอุโมงค์ลม

1.3.3 คลิกที่ Features เลือก Extruded Boss/Base เพื่อทำการยืดรูปให้เป็น 3 มิติ โดยกำหนดให้มีความยาวเท่าขนาดจริง และเซฟเป็นไฟล์นามสกุล .STEP



รูปที่ ผข.13 ยืดรูปออกเป็น 3 มิติ

1.4 การสร้างกล่องครอบแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง

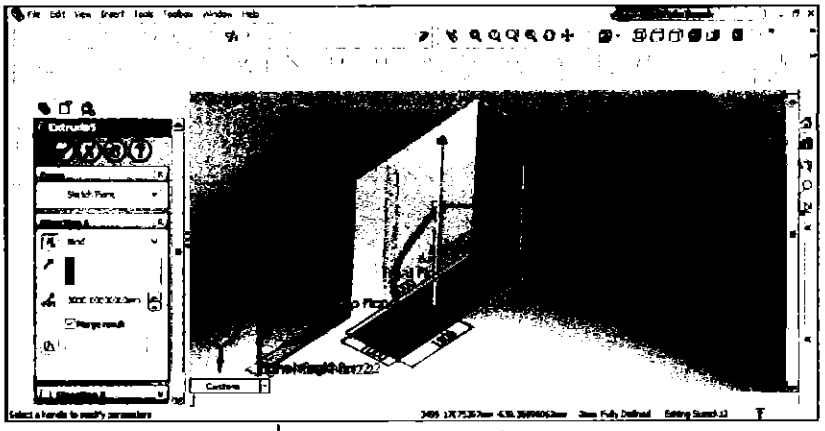
เพื่อลดความซับซ้อนของการแบ่ง elements ในขั้นตอนการ Mesh มีขั้นตอนดังนี้

1.4.1 เปิดแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งที่ทำเสร็จแล้ว เซฟเป็นไฟล์**ใหม่ให้เป็นไฟล์ของ**กล่องครอบแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้ง จากนั้นคลิกผิวที่พื้นผิวด้านที่ติดพื้น**ของกังหันลม ดัง**รูปที่ ผข.11

1.4.2 คลิกที่ Sketch เลือก Sketch วาดรูปกล่องครอบตามที่ออกแบบไว้

รูปที่ ผข.14 การวาดรูปกล่องครอบ

1.3.3 คลิกที่ Features เลือก Extruded Boss/Base เพื่อทำการยืดรูปให้เป็น 3 มิติ โดยกำหนดให้มีความยาวเท่าความสูงของแบบจำลองอุโมงค์ลม และเซฟเป็นไฟล์นามสกุล .STEP



รูปที่ ผข.15 ยืดรูปออกเป็น 3 มิติ

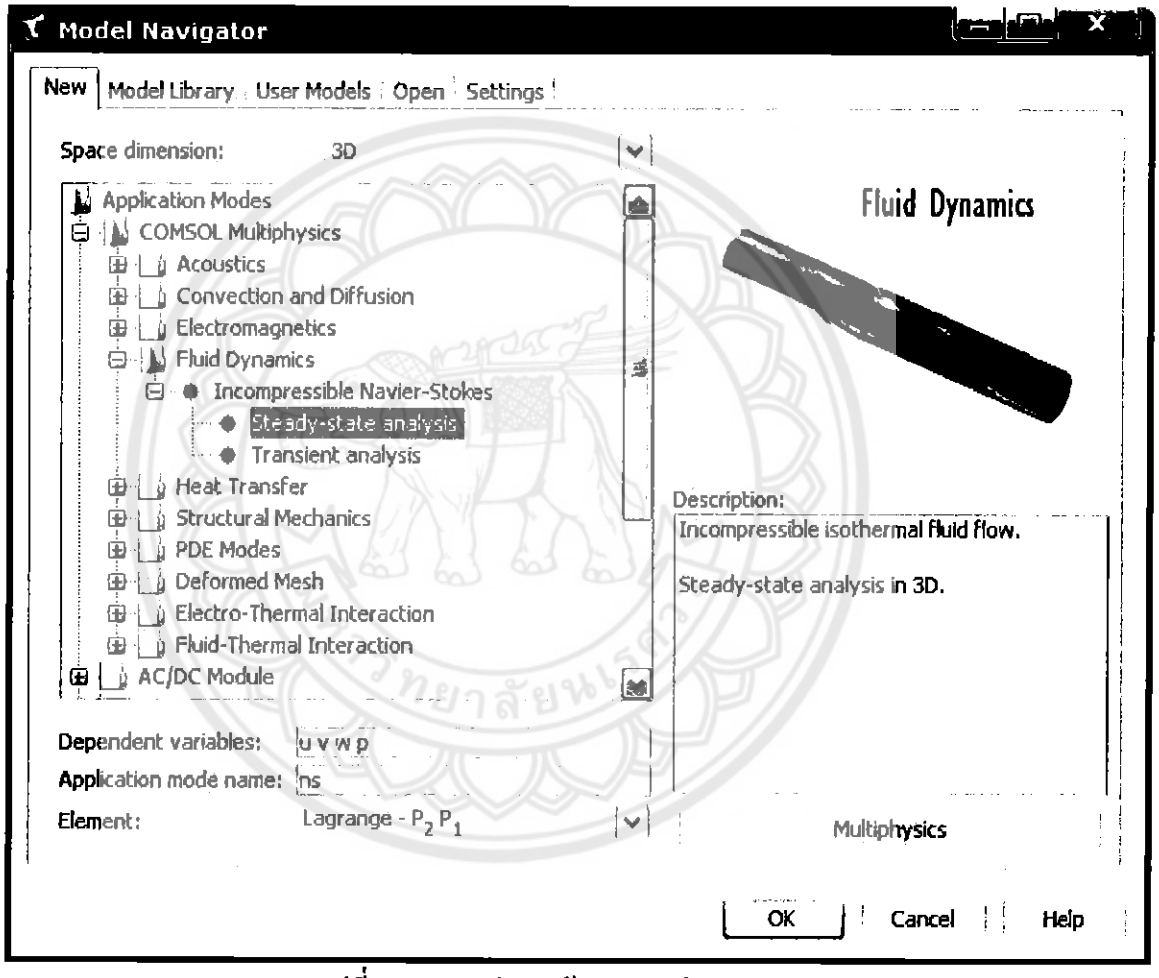
ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™ 3.2b

ข.1 การวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics™

การวิเคราะห์ผลแบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งด้วยโปรแกรมCOMSOL Multiphysics™ อุปกรณ์ที่ใช้ คอมพิวเตอร์ CPU : Pentium 4 3.06GHz, Ram : DDR2 2 GB, HDD : SATA 80 GB, OS Microsoft Windows XP Professional และใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics™ มีขั้นตอนดังนี้

ข.2 การเรียกใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics™



รูปที่ ผค.1 การเรียกหน้าแรกของโปรแกรม

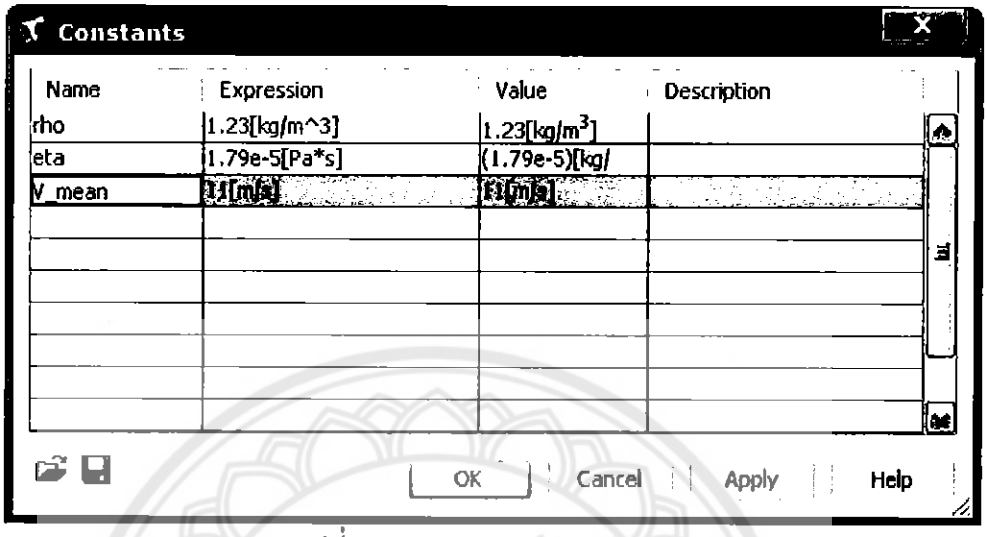
2.1 เปิดโปรแกรมขึ้นมาที่ Tab space Dimension เลือก 3D และที่ Tab Application Modes เลือก COMSOL Multiphysics --> Fluid Dynamics --> Incompressible Navier-Stokes --> Steady-state analysis

2.2 ที่ Settings เลือกหน่วย SI

2.3 คลิก OK เพื่อปิด Model Navigator และเข้าสู่หน้าต่างการทำงาน

ข.3 การเลือกตัวเลือกและการตั้งค่าใช้งาน

3.1 คลิกที่ Option --> Constants... และทำการกำหนดค่าต่าง ตามรูปที่ ผค.2



รูปที่ ผค.2 การกำหนดค่า Constants

ข.4 การ Import โมเดลวัตถุ

สำหรับการวิเคราะห์นี้จะเป็นการ Import แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลม จากโปรแกรมเขียนภาพ 3 มิติ โดยเซฟเป็นไฟล์นามสกุล .STEP มีขั้นตอนดังนี้

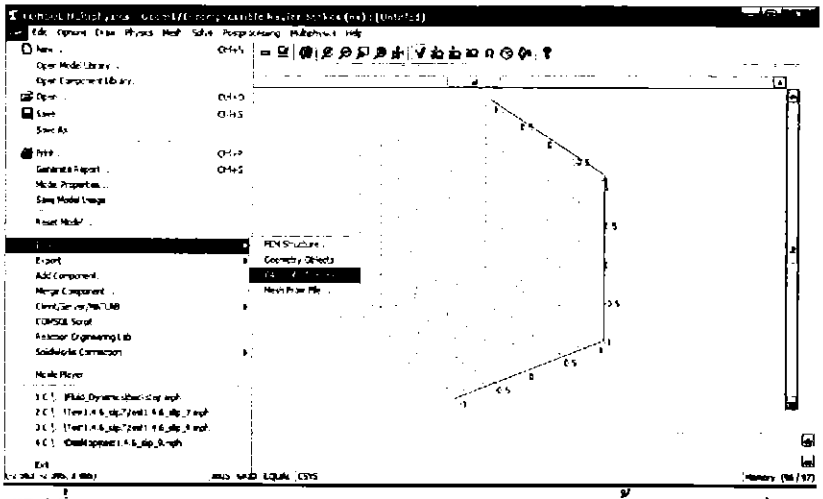
4.1 ที่ File Menu เลือก File --> Import --> CAD Data From File

4.2 CAD Data From File เลือก Files of types นามสกุล .STEP ตามที่ได้ทำการวาดไว้ โดยเลือกไฟล์ของกล่องครอบ และอุโมงค์ลมก่อน

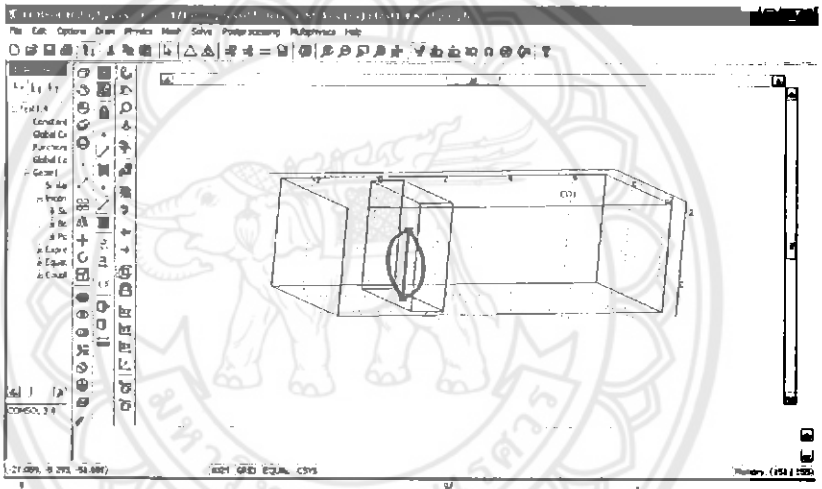
4.3 คลิกที่กล่องครอบแล้วกดแป้นพิมพ์ Shift ค้างไว้แล้วคลิกอุโมงค์ลม หลังจากนั้นคลิก เพื่อรวมเป็นวัตถุเดียวกัน

4.4 CAD Data From File เลือก Files of types นามสกุล .STEP ตามที่ได้ทำการวาดไว้ โดยเลือกไฟล์ของกังหันลมชนิดแกนตั้ง

4.5 คลิกที่กังหันลม แล้วกดแป้นพิมพ์ Shift ค้างไว้แล้วคลิกอุโมงค์ลม หลังจากนั้นคลิก เพื่อแยกกังหันลมออก



รูปที่ ผค.3 การ Import แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลม



รูปที่ ผค.4 แบบจำลองกังหันลมชนิดแกนตั้งและอุโมงค์ลมที่ได้จากการ Import

ข.5 การตั้งค่าในการวิเคราะห์

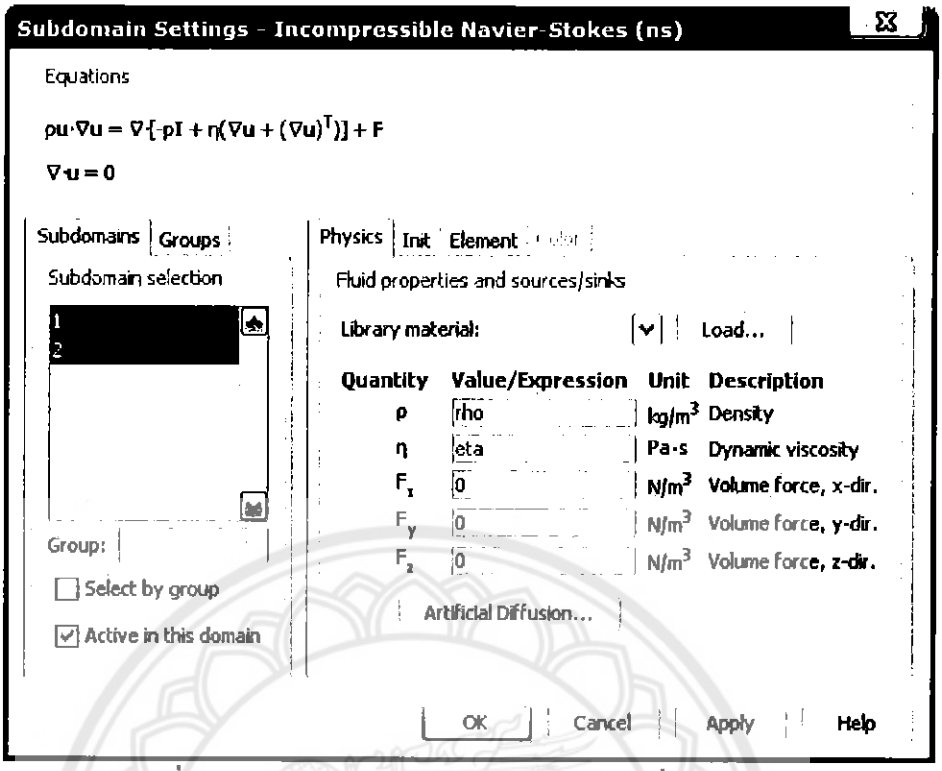
การกำหนดค่า Subdomain Settings โดยไปที่ Tab Physics --> Subdomain Settings…

5.1 เลือก Subdomain 1 และ2

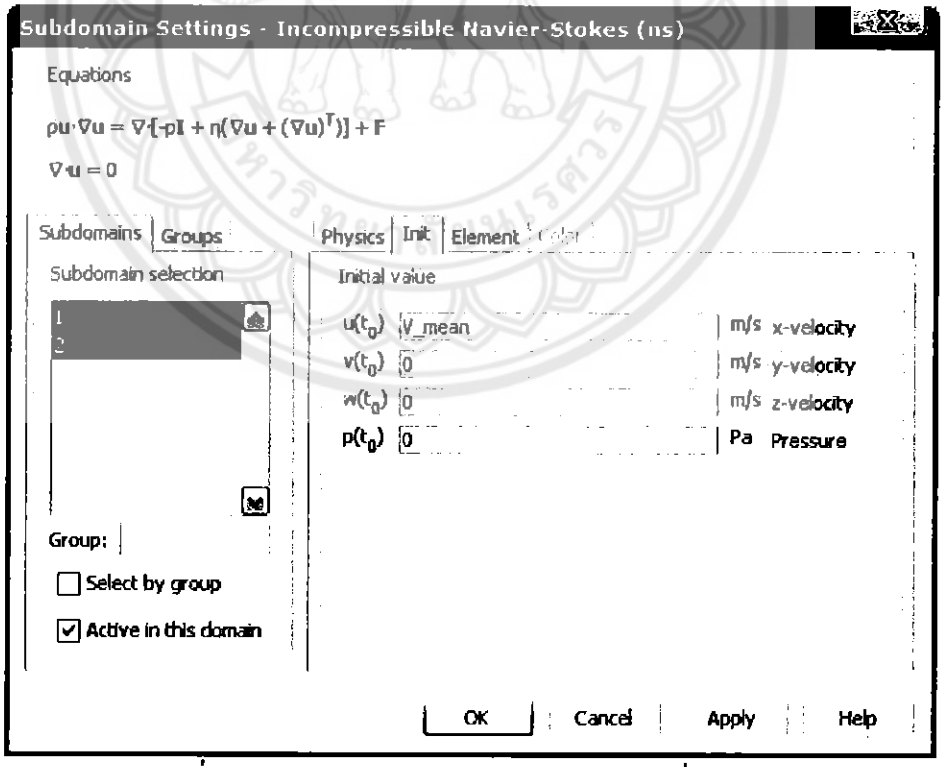
5.2 ที่ Density พิมพ์คำว่า rho

5.3 ที่ Dynamic viscosity พิมพ์คำว่า eta

5.4 คลิกที่ Tab Init เปลี่ยนค่า $u(t_0)$ โดยพิมพ์คำว่า V_mean แล้วกด OK



รูปที่ ผค.5 การกำหนดค่า Subdomain Settings ที่ Tab Psysics



รูปที่ ผค.6 การกำหนดค่า Subdomain Settings ที่ Tab Init

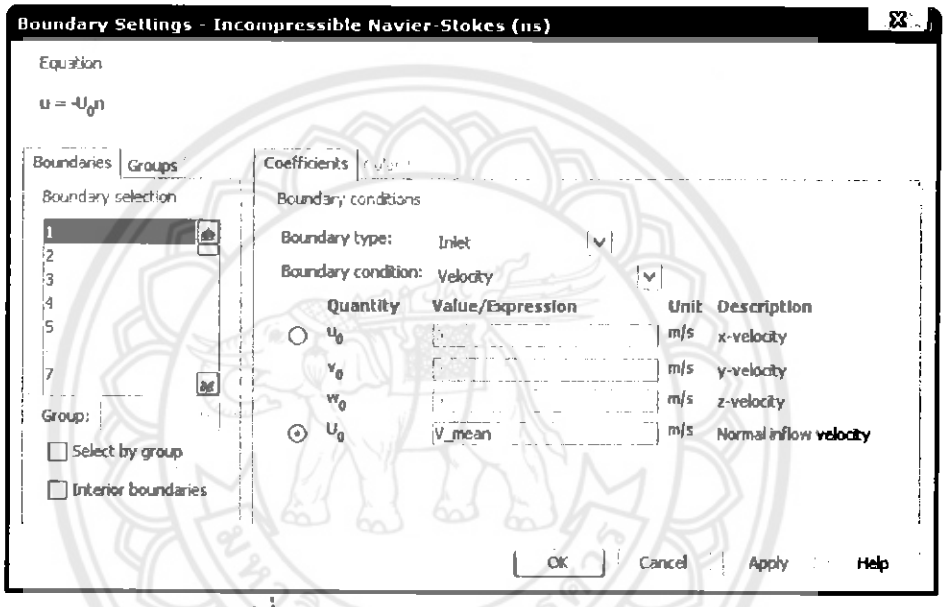
การกำหนดค่า Boundary settings โดยไปที่ Tab Physics --> Boundary settings...

5.5 คลิกเลือก Boundary 1 --> Boundary type เลือกเป็น Inlet และช่อง U_0 พิมพ์คำว่า V_mean

5.6 คลิกเลือก Boundary 101 --> Boundary type เลือกเป็น

5.7 คลิกเลือก Boundary 2,3,4,5,7 และ10 --> Boundary type เลือกเป็น Wall และช่อง Boundary condition เลือกเป็น Slip

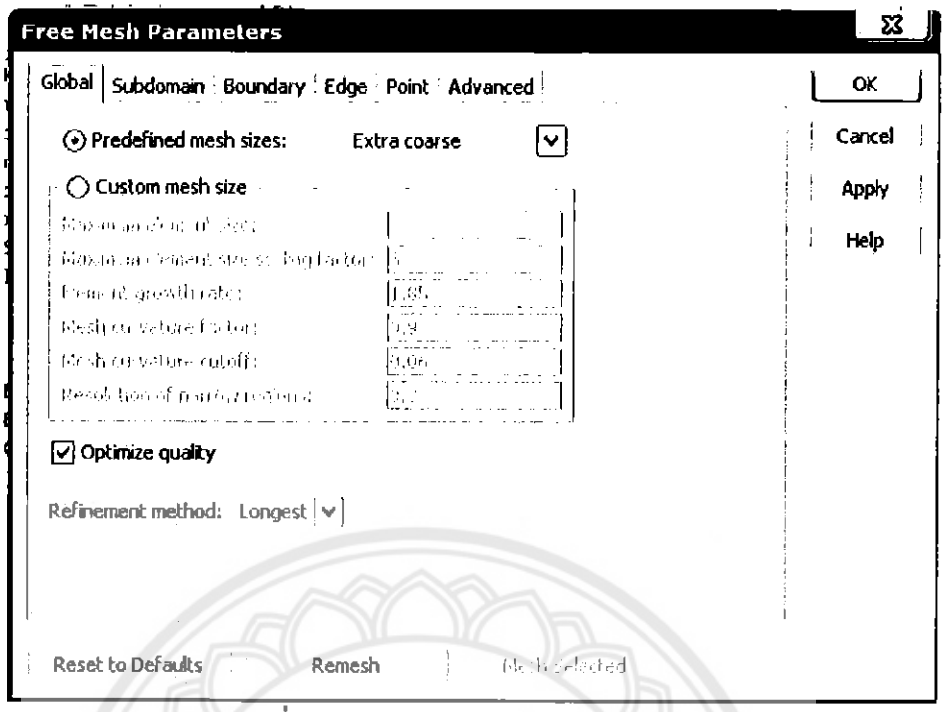
5.8 คลิกเลือก Boundary 11-99 --> Boundary type เลือกเป็น Wall และช่อง Boundary condition เลือกเป็น No Slip แล้วกด OK



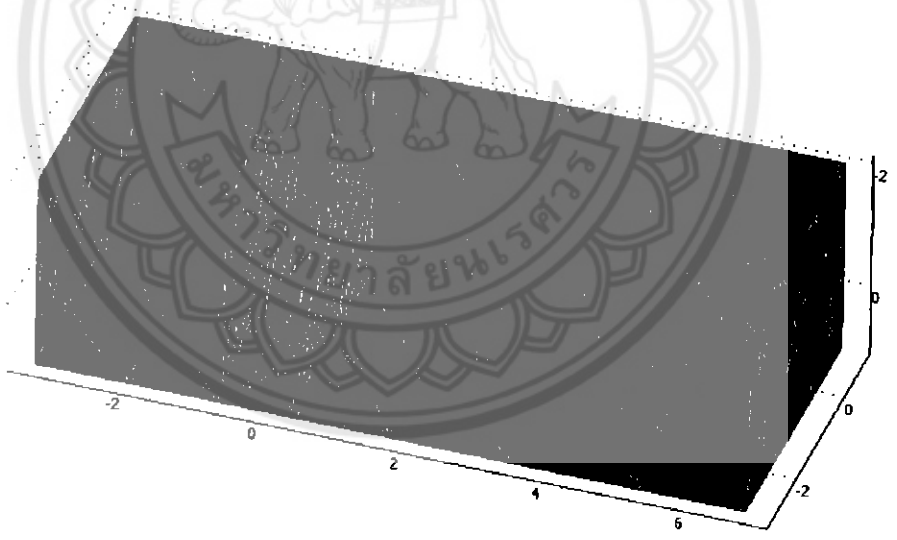
รูปที่ ผค.7 การกำหนดค่า Boundary Settings

ข.6 การแบ่งเอลิเมนท์

5.1 คลิกที่ Mesh Menu เลือก Mesh --> Free Mesh Parameters... ที่ช่อง Global Tab เลือก Predefined mesh sizes และ Extra coarse แล้วคลิก Remesh



รูปที่ ผค.8 การกำหนดขนาดของเอลิเมนท์

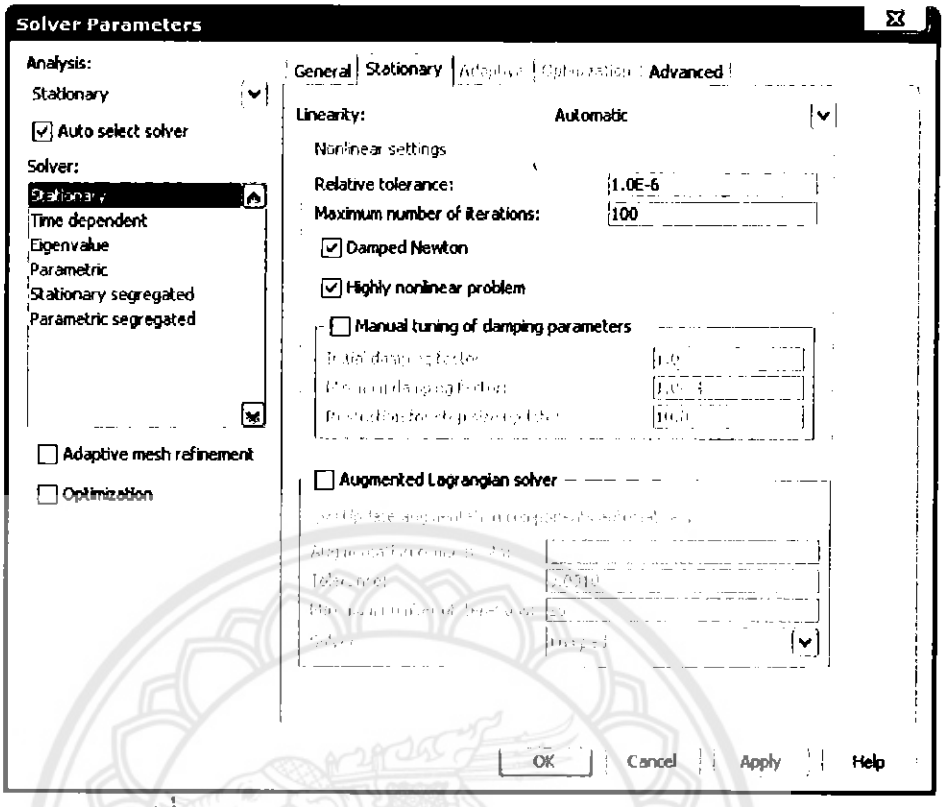


รูปที่ ผค.9 การแบ่งเอลิเมนท์เสร็จสมบูรณ์

ข.7 การคำนวณผลเฉลย

7.1 คลิกที่ Solve Menu เลือก Solve --> Solver Parameters... คลิกที่ Stationary Tab ในช่อง Maximum number of iterations เปลี่ยนค่าเป็น 100

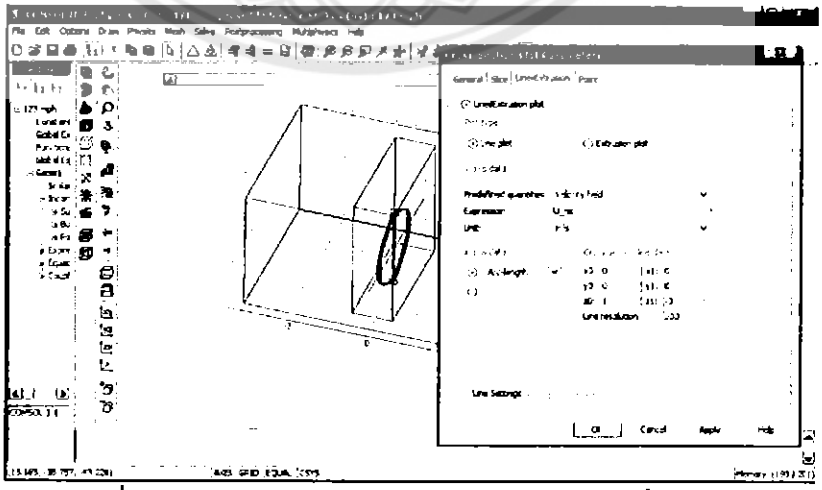
7.2 คลิกที่ Solve Menu เลือก Solve --> Solver Problem แล้วรอผลการคำนวณ



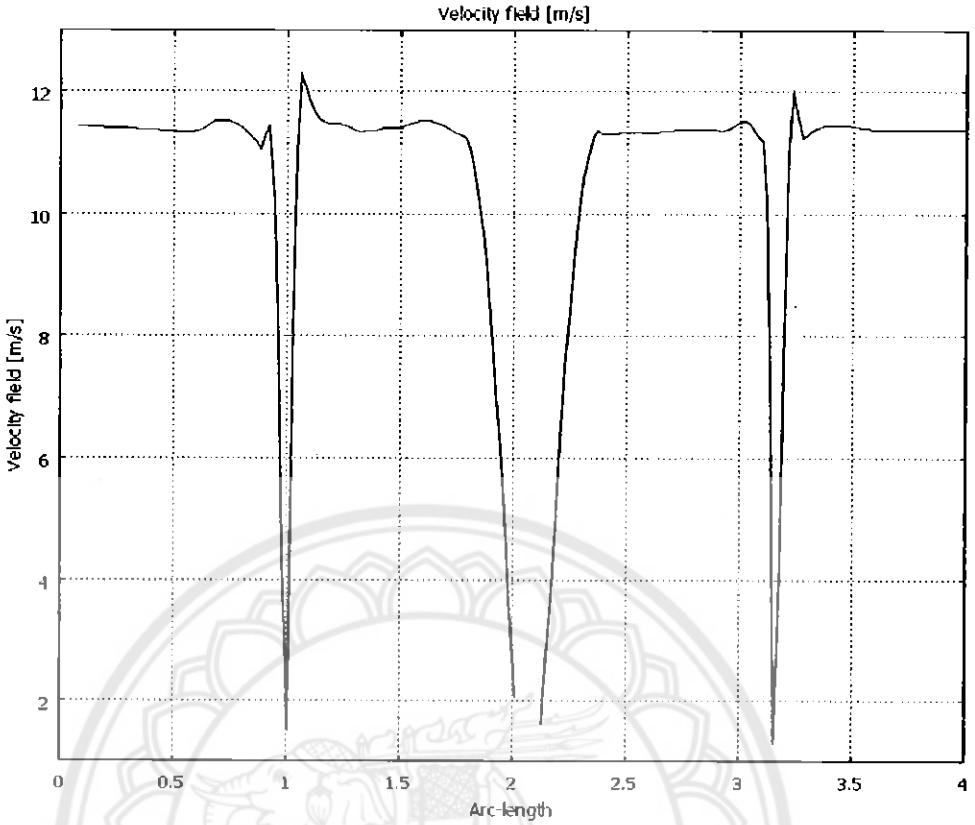
รูปที่ ผค.10 การกำหนดค่า Maximum number of iterations

ข.7 การแสดงผลการวิเคราะห์

7.1 คลิกที่ Postprocessing Menu เลือก Postprocessing Menu --> Cross-Section Plot Parameters คลิกที่ Line/Extrusion Tab ในช่อง Cross-Section line data สามารถใส่ค่าจุดที่ต้องการหาความเร็วลมตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน



รูปที่ ผค.11 การหาค่าความเร็วลมตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน



รูปที่ ผด.12 กราฟค่าความเร็วลมตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่าน

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณ

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม (c_p) ที่ความเร็วลมทางเข้า 11 m/s

ในการหาค่า c_p จะหาจากความเร็วลมก่อนและหลังปะทะใบพัดกังหันลมตามระดับความสูงต่างๆ ของจุด A และ B โดยค่าความเร็วลมที่ได้นำมาจากตารางที่ 4.2

1.1 ที่ระดับความสูงของกังหันลม 0.25 เมตร นำค่าที่ได้จากตาราง 4.2 มาแทนค่าในสมการที่ 18 ดังแสดงไว้ด้านล่าง

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right|\left|1 + \frac{v_2}{v_1}\right|$$

จะได้ดังนี้

$$c_{p,A} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{0.6558}{1.9715}\right)^2\right|\left|1 + \frac{0.6558}{1.9715}\right| = 0.5926$$

$$c_{p,B} = \frac{1}{2}\left|1 - \left(\frac{0.4536}{0.5240}\right)^2\right|\left|1 + \frac{0.4536}{0.2338}\right| = 0.2338$$

แล้วนำค่าที่ได้มาใส่ไว้ในตาราง ดังตารางที่ ง.1 และความสูงของกังหันลมจุดอื่นก็ทำเช่นเดิม ส่วนค่า total นั้นนำค่า $c_{p,A}$ ลบด้วยค่า $c_{p,B}$

ตารางที่ ง.1 ตารางค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) ของกังหันลมที่กระแสอากาศอิสระ 11 m/s

ระดับ (m)	c_p		
	A	B	total
0.25	0.5926	0.2338	0.3588
0.5	0.5284	0.0705	0.4579
0.75	0.5695	0.5766	-0.0071
1	0.5925	0.0096	0.5829
1.25	0.5852	0.5351	0.05
1.5	0.5925	0.0349	0.5576
1.75	0.57	0.19	0.38
ค่าเฉลี่ย	0.578	0.2358	0.34

จากตัวอย่างการคำนวณหาค่า c_p ของกังหันลมที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า 11 m/s ของแต่ละระดับความสูงนำมาหาค่าเฉลี่ยรวมได้เท่ากับ 0.34 ส่วนความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า 9 m/s ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยรวมตามวิธีการเดิม จะมีค่าเท่ากับ 0.27165

ง.2 การหาค่า tip speed rtio (X_∞) ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้า 11 m/s

2.1 ในการหาค่า tip speed ratio โดยใช้ความเร็วรอบของกังหันลมที่ความเร็วรอบ 180, 267, 350 และ 500 RPM และรัศมีของกังหันลมสูงสุดเท่ากับ 1.0798 เมตร ที่ความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้าคงที่ 11 m/s โดยใช้สมการที่ 20

$$X_\infty = \frac{R\omega}{V_\infty}$$

ค่า ω หาได้จาก $\omega = 2\pi N$

โดยเริ่มที่ความเร็วรอบของกังหันลม 180 RPM

$$\omega = 2\pi(180) = 1130.97 \text{ rad/min}$$

$$X_\infty = \frac{(1.0798)(1130.97)}{(11)(60)} = 1.85$$

ส่วนความเร็วรอบอื่น และความเร็วของกระแสอากาศอิสระทางเข้าที่ 9 m/s ค่า tip speed ratio หาได้ดังตารางที่ ง.2

ตารางที่ ง.2 ตารางค่า Tip speed ratio ที่ความเร็วรอบต่างๆ

Tip speed ratio	180 RPM	267 RPM	350 RPM	500 RPM
ที่ 9 m/s	2.2600	3.3500	4.3970	6.2820
ที่ 11 m/s	1.8500	2.7477	3.6000	5.1398