

การออกแบบใบพัดกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำ
ในประเทศไทย
WIND TURBINE BLADE DESIGN FOR LOW WIND VELOCITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบใบพัดกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำ
ในประเทศไทย

WIND TURBINE BLADE DESIGN FOR LOW WIND VELOCITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIND TURBINE BLADE DESIGN FOR LOW WIND VELOCITY



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ **ACADEMIC YEAR 2016** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบใบกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำในประเทศไทย
WIND TURBINE BLADE DESIGN FOR LOW WIND VELOCITY

ผู้จัดทำ นายอินทรชิต อินทร์รังษี 56011466
นายสมบุรณ์ แก้วอุดร 56011267


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ศิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบใบกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำ ในประเทศไทย

โดย

นายอินทรชิต อินทะรังษี 56011466

นายสมบุรณ์ แก้วอุดร 56011267

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และออกแบบใบกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าชนิดความเร็วลมต่ำ โดยใช้ CFD วิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลและช่วยจำลองการไหลของอากาศผ่านใบกังหันลมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS โดยแบบจำลองใบกังหันลมที่ได้ทำการศึกษานั้นเป็นแบบชนิดกังหันลมแนวนอน แบบ 3 ใบพัดและแบบ 2 ใบพัด โดยจะมีการออกแบบของสามมูบิตใบกังหันลมที่เหมาะสม และทดสอบเปรียบเทียบผลลัพธ์ในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ โดยการสร้างใบกังหันลมจริงขนาดย่อส่วนด้วยเครื่องพิมพ์ 3D และทำการทดสอบจริงในอุโมงค์ลมจำลองความเร็วลมแบบปรับค่าได้ตามความเร็วลมตามธรรมชาติ จากผลการทดลองพบว่าสามารถที่จะทำงานได้ในช่วงความเร็วลมต่ำได้ดี โดยผลจากการศึกษานี้จะนำไปสร้างเครื่องต้นแบบกังหันลมความเร็วลมต่ำขนาด 100-300 วัตต์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIND TURBINE BLADE DESIGN FOR LOW WIND VELOCITY

BY

Mr. Intarachit Intarungsee 56011466

Mr. Somboon Kaewudon 50611267

Advisor

Dr. Sirichai Tammaruckwattana

Academic Year 2016

ABSTRACT

The objective of this research is to study and design the Characteristics of wind turbine blade type low wind velocity. The commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) with ANSYS program is used as the numerical tools to the investigation process. The CFD technique is applied to the SolidWorks model, which are difference in geometries and design. The model is the blade of horizontal axis wind turbine is type 2 blade and 3 blades. The relation for an appropriate blade twist can be carried out. Its results when compared to experimental data form 3D printer are very good. And the results of the investigation and study could be applied to the experimental and modeling to the prototypes wind turbine of 100W-300W.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์
ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ อาจารย์ และพี่ๆ ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ทุกคน ที่ให้
คำแนะนำคำติชม และให้กำลังใจ ในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา

และขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ สอบถามสารทุกข์สุขดิบเสมอมา มอบ
แรงกระตุ้นในการทำงานตลอดจนให้คำปรึกษาในยามต้องการ

สุดท้ายต้องขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุน
สนับสนุนการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่ง
เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และ
ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลังงานลม	4
2.2 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย	6
2.3 การคำนวณพลังงานและกำลังลม	7
2.4 ประสิทธิภาพกังหันลม	8
2.5 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด	9
2.6 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ	9
2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบพัดกังหันลม	10
2.7.1 การออกแบบโดยใช้ Momentum Theory	10
2.7.2 การออกแบบโดยใช้ Blade Element Theory	11
2.7.3 การออกแบบโดยใช้ Blade Element-Momentum Theory	11
2.7.4 การออกแบบโดยใช้ Strip Theory	12
2.7.5 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	15
3.1 กล่าวนำ	15
3.2 หลักการวิเคราะห์ห่ออกแบบกึ่งหั่นลมความเร็วลมต่ำ	15
3.3 การวิเคราะห์การออกแบบใบพัดกึ่งหั่นลม	16
3.4 ขั้นตอนการออกแบบและประมวลผลด้วยโปรแกรม ANSYS 16	16
3.5 การออกแบบใบพัดกึ่งหั่นลมโดยใช้โปรแกรม Solid Works	25
3.6 การเขียนโปรแกรม LabVIEW	32
บทที่ 4 การทดสอบการทำงานของใบพัดกึ่งหั่นลม	36
4.1 กล่าวนำ	36
4.1 เซนเซอร์	36
4.3 โปรแกรม LabVIEW	37
4.4 ใบกึ่งหั่นลมแบบต่างๆ ที่นำมาทดสอบ	38
4.5 ผลการทดลองผ่าน LabVIEW	40
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	66
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	66
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	66
5.3 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	67
ภาคผนวก	68
ภาคผนวก ก	69
ภาคผนวก ข	79
ภาคผนวก ค	81
ภาคผนวก ง	87

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กิ่งหันลม	5
2.2 การเทียบความเร็วลมที่มีในประเทศไทยกับตาราง Power Class	6
2.3 ลักษณะสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกิ่งหันลมชนิดต่างๆ	8
3.1 เปิดโปรแกรม ANSYS16	17
3.2 หน้าต่างใช้งานเริ่มต้น	18
3.3 เปิดใช้ฟังก์ชัน Geometry	18
3.4 เลือก New DesignModeler Geometry	19
3.5 หน้าต่างที่ได้มาหลังจากกด	19
3.6 สร้างแบบร่าง Air Foil	20
3.7 เชื่อมจุดด้วยเส้น	20
3.8 ทำเป็นพื้นที่ข้างใน Air Foil	21
3.9 กำหนดขอบเขตการวัด	21
3.10 Mesh Generation	22
3.11 Simulation Scope	22
3.12 Simulation Pressure 3 m/s	23
3.13 Simulation Pressure 1 m/s	23
3.14 Simulation Velocity 3 m/s	24
3.15 Simulation Velocity 1 m/s	24
3.16 การเริ่มสร้างหน้าต่างสำหรับออกแบบของโปรแกรม Solid Works	25
3.17 การเลือกออกแบบชิ้นงานแบบ 3 มิติแบบเป็นส่วน	25
3.18 หน้าต่างสำหรับการออกแบบชิ้นงาน	26
3.19 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 1	26
3.20 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 2	27
3.21 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 3	27
3.22 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 4	28
3.23 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 5	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 6	29
3.25 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 7	29
3.26 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 8	30
3.27 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 9	30
3.28 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 10	31
3.29 Air Foil S1223 ออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works	31
3.30 หน้าต่างเริ่มต้น LabVIEW	32
3.31 หน้าต่างการใช้งานเริ่มต้น	32
3.32 ฟังก์ชันต่างๆ	33
3.33 เลือกตัว Input	33
3.34 While Loop	34
3.35 ทำตัวจับเวลา	34
3.36 ทำตัวนับ Count	35
3.37 โปรแกรม LabVIEW พร้อมใช้งาน	35
4.1 Photo Sensor EE-SX673A	36
4.2 LabVIEW 1	37
4.3 LabVIEW 2	37
4.4 ไบพัดแบบ A	38
4.5 ไบพัดแบบ B	38
4.6 ไบพัดแบบ C	39
4.7 ไบพัดแบบ D	39
4.8 Flowchart แสดงขั้นตอนการทดลอง	40
4.9 เตรียมการทำการทดลอง 1	41
4.10 เตรียมการทำการทดลอง 2	41
4.11 โมเดลจำลองการทดลอง	42
4.12 ไบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 1 m/s	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 1.5 m/s	43
4.14 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 2 m/s	44
4.15 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 2.5 m/s	44
4.16 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 3 m/s	45
4.17 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 3.5 m/s	45
4.18 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 4 m/s	46
4.19 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 4.5 m/s	46
4.20 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 5 m/s	47
4.21 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 5.5 m/s	47
4.22 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 1 m/s	48
4.23 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 1.5 m/s	49
4.24 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 2 m/s	49
4.25 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 2.5 m/s	50
4.26 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 3 m/s	50
4.27 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 3.5 m/s	51
4.28 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 4 m/s	51
4.29 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 4.5 m/s	52
4.30 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 5 m/s	52
4.31 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 5.5 m/s	53
4.32 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 1 m/s	54
4.33 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 1.5 m/s	54
4.34 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 2 m/s	55
4.35 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 2.5 m/s	55
4.36 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 3 m/s	56
4.37 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 3.5 m/s	56
4.38 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 4 m/s	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 4.5 m/s	57
4.40 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 5 m/s	58
4.41 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 5.5 m/s	58
4.42 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 1 m/s	59
4.43 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 1.5 m/s	60
4.44 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 2 m/s	60
4.45 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 2.5 m/s	61
4.46 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 3 m/s	61
4.47 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 3.5 m/s	62
4.48 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 4 m/s	62
4.49 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 4.5 m/s	63
4.50 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 5 m/s	63
4.51 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 5.5 m/s	64
4.52 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบ	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579	4
4.1 ค่าความเร็วลมที่ระยะต่างๆ	42
4.2 สรุปผลแบบ A	48
4.3 สรุปผลแบบ B	53
4.4 สรุปผลแบบ C	59
4.5 สรุปผลแบบ D	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนและพลังงานสะอาด มีต้นกำเนิดมาจากการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยอากาศในส่วนที่ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ จะมีความหนาแน่นลดลง จึงเบาและลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน ขณะเดียวกันอากาศที่เย็นกว่าจะมีน้ำหนักมากกว่า จึงเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ ก่อให้เกิดกระแสลมพัดผ่าน กระจายอยู่ทั่วไปในชั้นบรรยากาศ

พลังงานลมถูกนำมาใช้ในการเดินเรือในหลายๆ ศตวรรษ ที่ผ่านมาหลายๆ ประเทศมีความรู้เรื่องการเดินทาง โดยใช้พลังงานลมเป็นอย่างดี จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงของการเดินเรือในศตวรรษที่ 18 เมื่อวัตต์ (Watt) ได้คิดค้นเครื่องจักรไอน้ำขึ้นมาใช้ในการเดินเรือ มีการค้นพบหลักฐานว่าในศตวรรษที่ 17 กษัตริย์ของชาวบาบิโลนได้นำกังหันลมมาใช้ในการเกษตร

กังหันตัวแรกเกิดขึ้นในกลางศตวรรษที่ 7 โดยการสร้างของ Persians เป็นกังหันลมชนิดแกนตั้ง ซึ่งใช้แรงลมมาปะทะในแนวนอนมีประสิทธิภาพต่ำ เป็นกังหันที่ทำจากวัสดุและแรงงานในท้องถิ่น การบำรุงรักษาค่อนข้างจะมีปัญหา เนื่องจากต้องใช้แรงงานจำนวนมาก กังหันลมตัวแรกที่ถูกนำมาใช้ในการบดข้าวโพดถูกสร้างขึ้นในประเทศฮอลแลนด์ เมื่อปี ค.ศ. 1439 โดยได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเรื่อยมาจนในปี ค.ศ. 1600 กังหันลมที่สร้างขึ้นจะเป็นโรงโม่แบบหอคอยแบบนี้จะสร้างรูปทรงกรวยหรือรูปหลายเหลี่ยมทำด้วยอิฐ หรือไม้

ในช่วงกลางศตวรรษที่ 18 ได้มีการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กเพื่อนำมาใช้ในการสูบน้ำในพื้นที่อเมริกาตะวันตก ซึ่งมีทุ่งหญ้ากว้างใหญ่แต่น้ำผิวดินน้อย น้ำที่มีส่วนใหญ่มักจะเป็นน้ำใต้ดินกังหันลมที่ถูกพัฒนาขึ้นมากจะมีหลายใบ ซึ่งจะให้แรงบิดเริ่มหมุนสูงมีประสิทธิภาพดี เหมาะที่จะนำมาใช้ในการสูบน้ำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งมีการประมาณว่าในระหว่างปี ค.ศ. 1880-1930 มีการสร้างกังหันชนิดนี้ประมาณ 6.5 ล้านตัว

เดนมาร์ค เป็นประเทศแรกที่มีการนำพลังงานลมมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยได้ติดตั้งกังหันลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 23 เมตร ผลิตไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1890 และในปี ค.ศ. 1910 กังหันลมขนาด 5-25 kw ได้ถูกติดตั้งเพิ่มขึ้นอีกจำนวนมากในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณปี ค.ศ. 1925 กังหันลมชนิดสองใบและสามใบได้ถูกผลิตขาย โดยใช้ชื่อ Wincharger มีขนาด 200-1200 kw และ Jacobs มีขนาด 1.5-3 kw ทั้งสองผู้ผลิตเป็นกังหันลมแบบไม่เชื่อมต่อสายส่งเพื่อจ่ายไฟให้กับวิทยุและแสงสว่าง โดยมีขนาดแรงดันไฟฟ้า 12, 32 V หรือ 110 V ในช่วงปลายปี ค.ศ. 1941 กังหันลมขนาดใหญ่ได้ถูกผลิตขึ้นมา มีขนาด 1250 kw โดย Palmer c. Putnam ซึ่งได้รับเงินช่วยเหลือจาก S. Morgan Smith Company of York, Pennsylvania กังหันลมตัวนี้มีความสูง 34 เมตร โดยจะจ่ายไฟ 1250 kw ที่มีความเร็วลม 13 เมตรต่อวินาที ในประเทศอื่นๆ ได้มีการศึกษาวิจัยการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมมาเป็นระยะยาวนาน โดยในปี ค.ศ. 1957 เดนมาร์คได้ติดตั้งกังหันลมขนาด 200kw ทำงานที่ความเร็ว 15 เมตรต่อวินาที เสามีความสูง 26 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ 24 เมตร โดยจ่ายไฟเข้าระบบจำหน่ายประมาณ 400,000 หน่วยต่อปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ 1957 ประเทศเยอรมนีได้สร้างกังหันลมขนาด 100kw ทำงานที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที มีเส้นผ่าศูนย์กลางของโรเตอร์ 35 เมตร เทคโนโลยีกังหันลม กังหันลมเป็นเครื่องมือในการเปลี่ยนพลังงานจลน์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของลม เป็นพลังงานกลเพื่อนำมาใช้ประโยชน์โดยตรง เช่น การผลิตไฟฟ้า หรือสูบน้ำ การแบ่งประเภทของกังหันลมสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการวางตัวของแกนหมุน เป็นวิธีที่เด่นชัด สามารถเข้าใจง่ายจึงนิยมมากกว่าการแบ่งประเภทตามลักษณะของแรงขับที่กระแสมกระทำต่อไปกังหัน ซึ่งต้องพิจารณาโดยใช้ความรู้เกี่ยวกับ Aerodynamics ประกอบด้วย นอกจากนี้ยังมีกังหันลมที่ไม่เข้าประเภททั้ง 2 ชนิดดังกล่าว อาทิ กังหันลมเทอร์นาโด หรือกังหันลมที่เพิ่มดีฟิวเซอร์หรือคอนเซนเตรเตอร์ (Diffuser or Concentrator) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะลักษณะการวางตัวของแกนหมุน

ในยุคสมัยนี้ พลังงานเป็นหนึ่งในปัจจัยในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เช่น การคมนาคมขนส่ง การใช้ชีวิตประจำวัน และระบบเศรษฐกิจ เป็นต้น ล้วนแต่มีพลังงานเป็นส่วนขับเคลื่อนสำคัญทั้งสิ้น เป็นผลให้มีการใช้พลังงานอย่างมากมาย ส่งผลให้แหล่งพลังงานหลักอย่างฟอสซิล ซึ่งนำมาแปรรูปเป็นพลังงานเกือบทุกชนิดมีปริมาณลดน้อยและใกล้หมดลงทุกที จากการใช้พลังงานอย่างฟุ่มเฟือยของมนุษย์ ทำให้มนุษย์ต้องมองหาแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้ได้ไม่มีวันหมด เป็นผลให้พลังงานทดแทนเริ่มมีบทบาทสำคัญในการเป็นพลังงานทางเลือก และได้รับการตอบรับที่ดีจากประชาชน เนื่องจากพลังงานทดแทนที่นำมาใช้ต้องปลอดภัยกว่า เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า พลังงานจากฟอสซิลและสามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม พลังงานจากน้ำ ทำให้เป็นพลังงานที่ได้รับความนิยม เพราะเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ต้องซื้อ ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกศึกษาการใช้พลังงานทดแทนจากพลังงานลมจากกังหันลม โดยงานวิจัยเน้นที่การศึกษาและการออกแบบใบพัดกังหันลมความเร็วลมต่ำ จึงคิดที่จะพัฒนาใบกังหันลมที่มีมุมบิดใบ 8 องศา ที่ได้มีการศึกษาวิจัยมาก่อนหน้าแล้วว่าเหมาะสมกับศักยภาพความเร็วลมต่ำ จากงานวิจัยการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ทางผู้วิจัยมีความสนใจเรื่องแพนดัดอากาศบริเวณปลายใบกังหันลม หากมีการเพิ่มแพนดัดอากาศปลายใบโค้งงอ (Wing-Tip Blade) ที่บริเวณปลายใบแล้วจะสามารถช่วยลดการสูญเสียพลังงานจากการหมุนวนของอากาศ บริเวณปลายใบกังหันลม (Vertex) และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใด ระหว่างใบกังหันลมที่มีแพนดัดอากาศ (Wing-Tip Blade) และใบกังหันลมที่มีปลายใบตรง (Non-Wing Tip Blade)

กังหันลมที่นำมาศึกษาเป็นชนิดแนวแกนนอนมีข้อดีคือ สามารถเริ่มต้นทำงานเองได้ (Self-Start) โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยในการเริ่มต้นการทำงาน อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกังหันลมชนิดอื่น อาทิเช่น กังหันลมแบบแนวตั้งถึงจะรับลมได้ดีกว่ากังหันลมแบบแนวนอน แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานลมมาใช้ได้น้อยกว่าแบบแนวนอน

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเทคนิควิเคราะห์และจำลองใบกังหันลมได้
2. สามารถออกแบบใบกังหันลมจริงเพื่อใช้ทดสอบกับความเร็วลมต่ำได้จริง
3. สามารถใช้โปรแกรมทางวิศวกรรมระดับสูงวิเคราะห์ปัญหาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขต

1. ศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดของใบพัดกังหันลม (C_p) และอัตราส่วนความเร็วสูงสุด (TRS)
2. ใช้โปรแกรมพลศาสตร์การไหล (CFD) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบพัดกังหันลม
3. วิเคราะห์เปรียบเทียบการทำงานของใบพัดกังหันลมแต่ละชนิด ที่ออกแบบในช่วงความเร็วลม 1-5.5 m/s

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ปรึกษาหารือถึงหัวข้อและความเป็นมาของโครงการ
2. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลและเทคนิคในการออกแบบใบพัดกังหันลม
3. ศึกษาทฤษฎีการใช้โปรแกรม Solid Works, ANSYS, LabVIEW
4. ออกแบบใบพัดกังหันลม
5. ทดสอบใบพัดกังหันลมโดยใช้ LabVIEW ในการแสดงผล
6. สรุปผลการทดสอบ
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์
8. นำเสนอผลงาน

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ
 บทที่ 1 บทนำเป็นการกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการดำเนินงาน และขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการดำเนินงาน การออกแบบและในส่วนการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 4 เป็นการพิมพ์ใบพัดกังหันลมและทดลอง

บทที่ 5 เป็นบทสุดท้ายที่กล่าวถึงการสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก การวัดระยะทางที่ความเร็วลมต่างๆ

ภาคผนวก ข การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม

ภาคผนวก ค การติดตั้งใบพัดกังหันลมในอุโมงค์ลม

ภาคผนวก ง ดาต้าชีท Photo Sensor

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานลม

พลังงานลม เป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความกดดันของบรรยากาศและแรงจากการหมุนของโลก สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเร็วลม และกำลังลม เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าลมเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีอยู่ในตัวเอง ซึ่งในบางครั้งแรงที่เกิดจากลมอาจทำให้บ้านเรือนที่อยู่อาศัยพังทลาย ต้นไม้ หักโค่นลง สิ่งของวัตถุต่างๆ ล้มหรือปลิวลอยไปตามลม ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำพลังงานจากลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น

เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป ไม่ต้องซื้อหา เป็นพลังงานที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จำกัดสิ้น พลังงานลมก็เหมือนกับพลังงานแสงอาทิตย์คือไม่ต้องซื้อ ในยุคสมัยนี้ได้มีการนำเอาพลังงานลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น พื้นที่ยังมีปัญหาในการวิจัยพัฒนานำเอาพลังงานลมมาใช้งาน เนื่องจากปริมาณของลมไม่สม่ำเสมอตลอดปี แต่ก็ยังคงมีพื้นที่บางพื้นที่สามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ เช่น พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเล เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยในการเปลี่ยนจากพลังงานลมออกมาเป็นพลังงานในรูปอื่นๆ เช่น ใช้กังหันลม (Wind Turbine) เพื่อเปลี่ยนให้เป็นพลังงานไฟฟ้า

ตาราง ที่ 2.1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579

พลังงานทดแทน	หน่วย	ผลการดำเนินงาน		
		2555	2556	2557
แสงอาทิตย์	(MW)	376.72	823.46	1,298.51
พลังงานลม	(MW)	111.73	222.71	224.47
พลังน้ำขนาดเล็ก	(MW)	101.75	108.8	142.01
ชีวมวล	(MW)	1,959.95	2,320.78	2,451.82
ก๊าซชีวภาพ	(MW)	193.4	265.23	311.5
ขยะชุมชน	(MW)	42.72	47.48	65.72

จากตารางจะเห็นได้ว่า 3 ปีที่เก็บผลมาล่าสุด (2555-2557) ทำให้รู้ว่าพลังงานทดแทนเป็นที่นิยมและใช้กันมากขึ้น และหนึ่งในพลังงานทดแทนนั้นคือ พลังงานลมซึ่งเห็นได้ว่าการพัฒนาให้ใช้มากขึ้น ดังนั้นพลังงานลมจึงเป็นพลังงานที่สำคัญพลังงานหนึ่งของประเทศไทย ที่ต้องพัฒนาต่อไป เพื่อให้ผลิตได้มากขึ้นกว่านี้ เพื่อรองรับการใช้งานไฟฟ้าที่มากขึ้นในอนาคตต่อไป และนั่นก็เป็นความท้าทายหนึ่งของคนไทยว่าจะพัฒนาพลังงานงานนั้นให้ผลิตได้มากขึ้นได้อย่างไรในอนาคต

พลังงานลมเป็นพลังงานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุขึ้นอยู่กับ 2 ตัวแปร มวล และความเร็ว ถ้ามวลของอากาศคงที่ ดังนั้นพลังงานลมจึงแปรผันตามความเร็วของลม สามารถเขียนพลังงานลมได้ในรูปของพลังงานจลน์ ดังสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

E_k = พลังงานจลน์ (J)

m = มวลของวัตถุ (kg)

v = อัตราเร็วของวัตถุ (m/s)

สำหรับหลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้คือ เมื่อมีลมมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล โดยการหมุน ใบพัดแรงจากการหมุนของใบพัดนี้ จะถูกส่งผ่านชุดกลไกที่ติดกับแม่เหล็กซึ่งขดลวดจะยึดอยู่กับที่ ทำให้แม่เหล็กหมุนตัดกับขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ด้วยหลักการนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ประสิทธิภาพของกังหันลมจะมากหรือน้อย นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน ดังรูปที่ 2.1



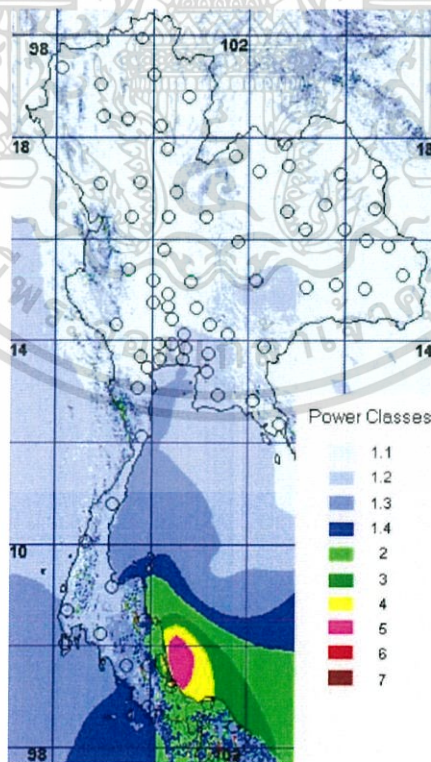
รูปที่ 2.1 กังหันลม

(<http://www.student.chula.ac.th/~56370490/page5.html>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตเส้นศูนย์สูตร ลมที่เกี่ยวข้องกับภูมิอากาศของไทยคือ ลมประจำปี ลมประจำฤดู และลมประจำเวลา ลมประจำปีเป็นลมที่พัดอยู่เป็นประจำตลอดทั้งปีในภูมิภาคส่วนต่างๆ ของโลกมีความแตกต่างกันไปในแต่ละเขตละติจูดของโลก เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในบริเวณเขตศูนย์สูตรอิทธิพลของลมประจำปีจึงไม่มีประโยชน์ในการนำมาใช้ลมประจำฤดู เป็นลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางตามฤดูกาล เรียกว่า ลมมรสุม ได้แก่ ลมมรสุมฤดูร้อนพัดในแนวทิศใต้ และตะวันตกเฉียงใต้ในช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม ลมมรสุมฤดูหนาวพัดในแนวทิศเหนือ และตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนธันวาคม-กุมภาพันธ์ ลมประจำเวลาเป็นลมที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความกดอากาศระหว่าง 2 บริเวณในระยะเวลายาวๆ ได้แก่ ลมบก ลมทะเล ลมภูเขา และลมหุบเขาบริเวณที่อยู่ตามชายฝั่งจะได้รับอิทธิพลของลมบก ลมทะเลสูงมาก จากภูมิประเทศของประเทศไทย ทำให้มีความเร็วลมเฉลี่ยของประเทศอยู่ในระดับปานกลาง-ต่ำ มีความเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า 4 เมตร/วินาที แต่เทคโนโลยีกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในยุโรปส่วนใหญ่ออกแบบให้ทำงานเหมาะสมกับความเร็วลมเฉลี่ยเกินกว่า 8 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในพื้นที่ของภูมิภาคแถบยุโรปเหนือ หรือประเทศอื่นๆ ในเขตหนาวที่มีศักยภาพลมเพียงพอ เมื่อเทียบความเร็วลมที่มีในประเทศไทยกับตาราง Power Class พบว่าลมในประเทศไทยส่วนใหญ่อยู่ในระดับที่ 1.1-1.4 มีเพียงพื้นที่ทางชายฝั่งทะเลภาคใต้ตอนล่างที่อยู่ Power Class ระดับ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเทียบความเร็วลมที่มีในประเทศไทยกับตาราง Power Class

(<http://www.reca.or.th/library-wind-power.aspx>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณพลังงานและกำลังลม

การคำนวณและวิเคราะห์ศักยภาพกำลังลมทั้งหมด พลังงานที่สะสมอยู่ในลมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_m V_i^3 \quad (2.2)$$

$$P_w = \text{กำลังลม (W)}$$

$$\rho = \text{ความหนาแน่นของลม (kg/m}^3\text{)}$$

$$A_m = \text{พื้นที่ของใบพัด (m}^2\text{)}$$

$$V_i = \text{ความเร็วลม (m/s)}$$

กำลังงานจากลมคือ งานที่ลมทำได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลา กำลังงานจากลมจึงเป็นไปตามสมการที่ (2.3)

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A_n V_\infty^3 \quad (2.3)$$

$$P_a = \text{กำลังงานที่ได้จากลม (W)}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นอากาศ (kg/m}^3\text{)}$$

$$A_n = \text{พื้นที่หน้าตัด (m}^2\text{)}$$

$$V_\infty = \text{ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)}$$

กำลังงานจากกังหันลม สำหรับค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลมสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a A_n V_\infty^3 C_p \quad (2.4)$$

$$P_w = \text{กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (W)}$$

$$\rho_a = \text{ความหนาแน่นอากาศ (kg/m}^3\text{)}$$

$$A_n = \text{พื้นที่หน้าตัด (m}^2\text{)}$$

$$V_\infty = \text{ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)}$$

$$C_p = \text{ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม}$$

คิดค่าประสิทธิภาพของกังหันลมด้วย เพราะในทางปฏิบัติแล้วยังต้องคิดค่าสูญเสียของระบบอีกด้วย ส่วนหลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้คือ เมื่อมีลมมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมให้อยู่ในรูปของพลังงานกล โดยการหมุนใบพัดแรงจากการหมุนของใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านชุดกลไกที่ติดกับแม่เหล็กซึ่งขดลวดจะยึดอยู่กับที่ ทำให้แม่เหล็กหมุนตัดกับขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าด้วยหลักการนี้เครื่องกำเนิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ประสิทธิภาพของกังหันลมจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างด้วยกัน

2.4 ประสิทธิภาพกังหันลม

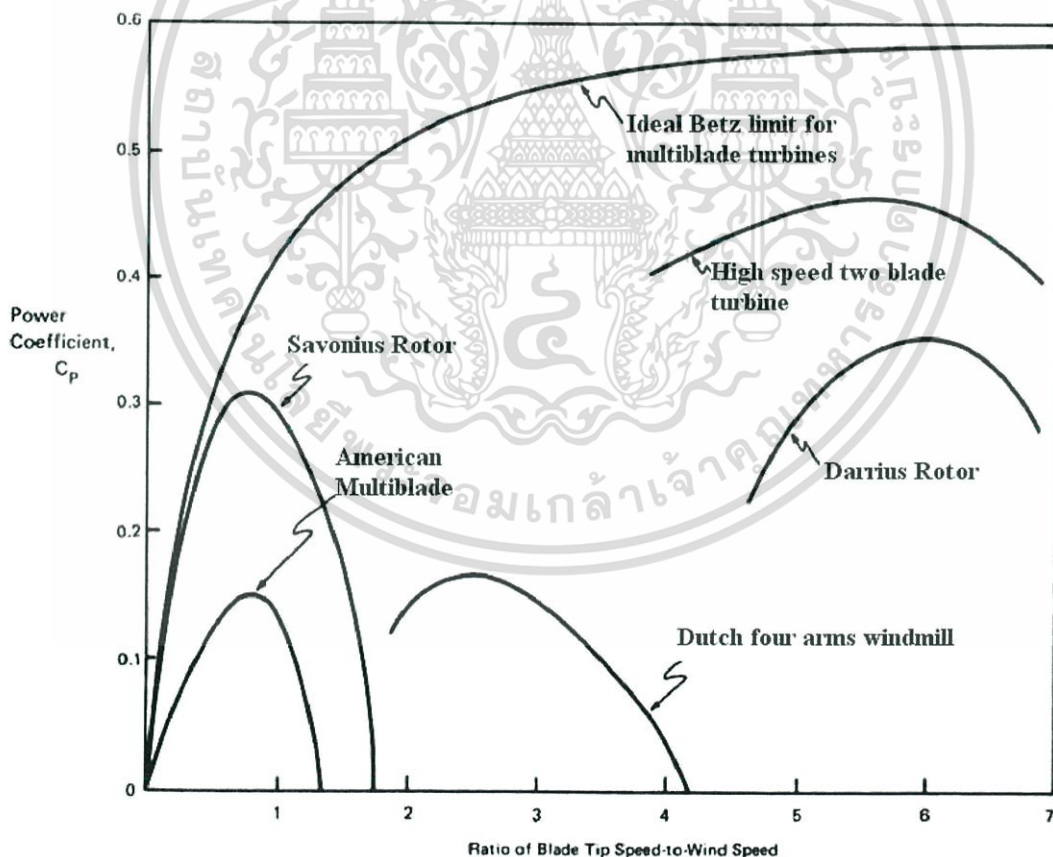
การวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพกังหันลม โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังงานที่ได้จากกังหันลมเปรียบเทียบกับกำลังงานจากลม ถ้าวิเคราะห์ทางกลก็ คือ กำลังงาน เท่ากับ พลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ดังสมการที่ (2.5)

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} \quad (2.5)$$

C_p = ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม

P_a = กำลังงานที่ได้จากลม (W)

P_w = กำลังงานที่ได้จากกังหันลม (W)



รูปที่ 2.3 ลักษณะสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ

(<http://technology.thaiza.com/การคำนวณ-Power-calculation-ของกังหันลม/311930/>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 อัตราส่วนความเร็วสูงสุด

เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในการหมุนที่ปลายใบกังหันต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันลม ในขณะที่กังหันผลิตกำลังไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด โดยที่ความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหันนั้นจะเป็นความเร็วลมที่ต้องการเพื่อให้กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้มากที่สุด ดังสมการที่ (2.6)

$$TRS = \frac{U}{V_\infty} = \frac{2\pi Nr}{V_\infty 60} \quad (2.6)$$

TRS	=	อัตราส่วนความเร็วสูงสุด
U	=	ความเร็วสัมผัส (m/s)
V_∞	=	ความเร็วลมที่มาปะทะ (m/s)
N	=	ความเร็วรอบของกังหันลม (rpm)
r	=	รัศมีใบกังหัน (m)

2.6 การเกิดแรงของรูปร่างหยดน้ำ (Air Foil)

รูปร่างหยดน้ำ (Air Foil) จะถูกนิยามเป็นวัตถุที่มีรูปร่างเพรียวตามกระแสการไหลซึ่งออกแบบเพื่อทำให้เกิดแรงยกขึ้น วัตถุรูปร่างอื่นที่ทำให้เกิดแรงยกนอกเหนือจากรูปร่างหยดน้ำ จะได้แก่ แผ่นดัดโค้ง เมื่อรูปร่างหยดน้ำเคลื่อนที่ผ่านของไหล หรือของไหลไหลผ่านรูปร่างหยดน้ำ ที่มุมปะทะค่าหนึ่งของไหลจะแยกเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านบนและด้านล่าง หากมุมปะทะมีค่าเป็นบวก และยังไม่ถึงค่าที่กำหนดให้เกิดปรากฏการณ์การแยกขึ้นของไหลจะเคลื่อนที่บนผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ด้วยความเร็วที่ผิวด้านล่างของรูปร่างหยดน้ำ ทำให้ความดันที่ผิวด้านล่างของรูปร่างหยดน้ำ มีค่าสูงกว่าความดันที่ผิวด้านบนของรูปร่างหยดน้ำ ผลลัพธ์ของความดันแตกต่างระหว่างผิวทั้งสองกระทำต่อรูปร่างหยดน้ำ จะทำให้เกิดแรงยกและแรงผลักรูปร่างหยดน้ำ

การเกิดขึ้นของแรงยก หมายถึง แรงที่กระทำต่อแพนอากาศแรงดังกล่าวที่อยู่ในทิศที่ตั้งฉากกับการไหลของอากาศ การเกิดขึ้นของแรงผลักร หมายถึง แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนผิวทั้งสองด้านของแพนอากาศซึ่งเกิดจากความเค้นเฉือนที่ผิว และแรงจากค่าความดันแตกต่างที่อยู่ในทิศที่ขนานกับการไหล ค่าแรงต่างดังกล่าวจะได้จากการทดสอบแพนอากาศในอุโมงค์ลม ซึ่งมักจะแสดงค่าแรงยก และแรงผลักรอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์แรงผลักร โดยที่นิยามของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสองจะเขียนได้ดังสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8)

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^3} \quad (2.7)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_a AV_\infty^3} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C_L	=	สัมประสิทธิ์แรงยก
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงผลัก
L	=	แรงยก (N)
D	=	แรงผลัก (N)
ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
A	=	พื้นที่กวาดของใบพัด (m^2)
V_∞	=	ความเร็วลมเข้าใบพัด (m/s)

2.7 ทฤษฎีการออกแบบใบพัดกังหันลม

การออกแบบใบพัดกังหันลมนั้นต้องใช้ทฤษฎีหลายทฤษฎีในการออกแบบ กังหันลมนั้นมี 2 แบบด้วยกันคือ แนวตั้งและแนวนอน และที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบใบพัดกังหันลมแบบแนวนอน ใบพัดกังหันลมแบบแนวนอนจะออกแบบให้มีกี่ใบก็ได้ แล้วแต่ความเหมาะสมของการใช้ เช่น 2 ใบ หรือ 3 ใบ เป็นต้น การออกแบบใบพัดกังหันลมนั้นก็จะมีทฤษฎีการออกแบบดังนี้

2.7.1 การออกแบบโดยใช้ Momentum Theory [1]

ในการศึกษาพลังงานจากลมนั้นสูตรการคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่วไป ในการนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยใช้ทฤษฎีของหลักการที่เรียกว่า Momentum Theory โดยการศึกษารายละเอียดของการวิเคราะห์ตามหลักการของ Momentum Theory ซึ่งในการออกแบบใบพัดกังหันลมผลิตไฟฟ้าฟ้านั้น ใบพัดกังหันลมผลิตไฟฟ้าย่อมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการคัดเลือกขนาดต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการทำงานของทั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบมีความผิดพลาด สูงก็ย่อมทำให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าผิดพลาด และอาจก่อให้เกิดการเสียหายตามมาได้

หลักการของทฤษฎี Momentum Theory ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องทำการตั้งสมมติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้

- เป็นของไหลที่ไม่สามารถกดอัดได้
- ไม่เกิดความต้านทานต่อการหมุนของใบพัด
- ใบพัดพิจารณาให้เป็น Infinite Member
- การไหลของอากาศมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอด
- แรงที่กระทำตลอดแนวพื้นที่ใบพัดมีการกระจายแรงแบบ Uniform
- ไม่มีความดันย้อนกลับในขณะที่ใบพัดหมุน
- ความดันสถิตบริเวณด้านหน้าและด้านหลังใบพัด ไม่มีผลกระทบต่อการไหลของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 การออกแบบโดยใช้ Blade Element Theory [2]

เป็นการพิจารณาแรงที่กระทำบนใบกังหันในลักษณะสองมิติ โดยแบ่งใบกังหันเป็นส่วนๆ ตามความยาว (Span-wise) แล้วคำนวณค่าคุณลักษณะต่างๆ เช่น แรงยก แรงดูด ที่เป็นผลของมุมปะทะและความเร็ว ณ แต่ละส่วนของใบกังหันที่แบ่งไว้ สำหรับความเร็วในแนว Span จะไม่นำมาพิจารณาด้วย ไม่นำผลในสามมิติมาพิจารณา ดังสมการที่ (2.9) และสมการที่ (2.10)

$$dF_x = \sigma' \pi r \frac{V^2 (1-a)^2}{\cos^2 \beta} (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) r dr \quad (2.9)$$

$$dT = \sigma' \pi r \frac{V^2 (1-a)^2}{\cos^2 \beta} (C_L \cos \beta + C_D \sin \beta) r^2 dr \quad (2.10)$$

$$C_L = \text{สัมประสิทธิ์แรงยก}$$

$$C_D = \text{สัมประสิทธิ์แรงผลัก}$$

2.7.3 การออกแบบโดยใช้ Blade Element-Momentum Theory [3]

เป็นการนำเอา Momentum Theory มาผสมเข้ากับ Blade Element Theory สมมติฐานของทฤษฎี BEM คือ แรงกระทำบนใบกังหันเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอากาศที่วิ่งผ่านตลอดวงแหวนในแต่ละวงแหวนที่กำหนดขึ้น นั่นคือ ไม่คิดผลของการไหลในแนวรัศมีไปตาม Span หรือไม่มีการถ่ายเทการไหลในแต่ละวงแหวน เงื่อนไขนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อค่า a ไม่เปลี่ยนแปลงในแนวรัศมี และนำเอา BET รวมกับ MT $\frac{\partial T}{\partial T}|_{BET} = \frac{\partial T}{\partial T}|_{MT}$ และ $\frac{\partial Q}{\partial T}|_{BET} = \frac{\partial T}{\partial T}|_{MT}$

จะได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12)

$$\frac{a}{1-a} = \frac{N_C}{8\pi} \left(\frac{C_L \cos \phi + C_D \sin \phi}{\sin \phi^2} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{a}{1-a} = \frac{N_C}{8\pi} \left(\frac{C_L \sin \phi - C_D \cos \phi}{\sin \phi^2 \cos \phi} \right) \quad (2.12)$$

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

$$C_p = \frac{P}{P_{tot}} = \frac{\int_0^R \Omega \partial Q}{0.5 \rho \pi R^2 U^3} \quad (2.13)$$

เนื่องจากการสูญเสียที่ปลายใบ (Tip Loss) จึงต้องมีการปรับแก้ค่า C_p โดยคูณ Tip Loss Factor เข้าไป ซึ่ง Prandtl ได้เสนอไว้ และ Wilson ได้สรุปแรงที่เกิดสำหรับกังหันลมไว้ดังสมการที่ (2.14)

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\exp \left[-\frac{N(R-r)}{2r \sin \phi} \right] \right) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกระจายสมการออกมาใหม่จะได้ความสัมพันธ์ C_p เป็นดังสมการที่ (2.15)

$$C_p = \frac{2}{\lambda R} \int_H^R F \frac{\sigma' \lambda_r^2 (1-a) C_L}{\sin^2 \phi} \left[\sin \phi - \frac{C_D \cos \phi}{C_L} \right] dr \quad (2.15)$$

เมื่อ $\lambda = \frac{\Omega R}{U_0}$ คือ Tip Speed Ratio โดย R คือ รัศมีใบ ค่า H คือ $\sigma' = \frac{Nc}{2\pi r}$ ระยะรัศมี

ของ Hub เรียกว่า Local Solidity โดยใช้ทฤษฎี BEM นี้ทำให้สามารถคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหามุมบิดที่เหมาะสมที่หน้าตัดต่างๆ ของใบกังหันได้

2.7.4 การออกแบบโดยใช้ Strip Theory [4]

เป็นทฤษฎีที่นำค่าแรงที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีโมเมนตัมและทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันจับมาเท่ากัน นำไปคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันลมที่สนใจ อันได้แก่ ค่าแรง ทอร์สต์ ค่าแรงบิด และค่ากำลังงานทางทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันได้ ค่าสมรรถนะของกังหันลมคือ กำลังงาน แสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio)

จัดรูปสมการใหม่ดังสมการที่ (2.16)

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BcC_L \cos \phi}{8\pi r \sin^2 \phi} \quad (2.16)$$

หาค่าแพคเตอร์การเหนี่ยวนำ ตามแกน a ได้โดยกระบวนการทางจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สมมติค่า
2. คำนวณค่า $\phi : \phi = \tan^{-1} \left[\frac{(1-a)}{r\Omega} \right]$
3. คำนวณค่า $\alpha = \phi - \beta$
4. หาค่า C_n และ C_D จากข้อมูลอากาศพลศาสตร์ของใบกังหัน
5. คำนวณค่า C_n จากสมการ
6. คำนวณค่า a จากสมการ

7. เปรียบเทียบค่า a ที่คำนวณได้จากค่าใหม่กับค่าเก่า ถ้ามีค่าเท่ากันหรืออยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ก็จะหยุด ถ้าไม่เท่ากันก็เริ่มต้นข้อที่ 2 ใหม่จนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการหลังจากที่ได้ค่า a ในแต่ละตำแหน่งของใบกังหันแล้วนำไปคำนวณค่าสมรรถนะของกังหันลมที่สนใจ อันได้แก่ ค่าแรงทอร์สต์ ค่าแรงบิดและพลังงานทางทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกังหันได้ โดยนำเอาค่าแรงหน่วงไปคิดประกอบด้วย ค่าเหล่านั้นจะสามารถเขียนได้เป็นดังสมการที่ (2.17) ถึงสมการที่ (2.19)

$$T = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_n c dr \quad (2.17)$$

$$Q = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 C_t r c dr \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = Q\Omega = B \int_{R_H}^R \frac{1}{2} \rho W^2 \Omega C_t r c dr \quad (2.19)$$

โดยที่ค่า R คือ รัศมีของใบกังหันที่วัดจากจุดศูนย์กลางถึงปลายใบ และ r คือ ค่ารัศมีของใบกังหัน ค่าสมรรถนะของกังหันลมที่เป็นที่สนใจก็คือ กำลังงาน ซึ่งนำมาเสนอในรูปของเทอมไร้มิติ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของกำลังงาน C_p กับค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio) คำนวณหารัศมีของใบกังหันลม คำนวณหารัศมีของใบกังหันลม ดังสมการที่ (2.20) ถึงสมการที่ (2.22)

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \quad (2.20)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 V_i^3 \quad (2.21)$$

$$r = \sqrt{\frac{2P}{\rho \pi V_i^3}} \quad (2.22)$$

P = กำลังของกังหันลมเมื่อมีประสิทธิภาพ 100% (W)

ρ = ความหนาแน่นของลม (kg/m^3)

r = รัศมีใบกังหันลม (m)

V_i = ความเร็วลม (m/s)

แต่ในความเป็นจริงใบกังหันลมไม่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์จากลมทั้งหมดให้เป็นพลังงานทางกล ในการหมุนกังหันลมได้ 100 % การคำนวณหารัศมีของใบกังหันใหม่จะได้ดังสมการที่ (2.23) ถึงสมการที่ (2.25)

$$P = \frac{1}{2} \rho A_n V_i^3 C_p \quad (2.23)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 V_i^3 C_p \quad (2.24)$$

$$r = \sqrt{\frac{2P}{C_p \rho \pi V_i^3}} \quad (2.25)$$

2.7.5 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [5]

ในการออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์นั้นมีความสำคัญมาก ยิ่งมีการออกแบบกังหันลมโดยการใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) มาใช้ ซึ่งในหลักการทางวิศวกรรมของไหลแล้ว เรียกว่า Computational Fluid Dynamics, CFD อาจเห็นคำศัพท์ใหม่ในทางวิศวกรรมที่ยังไม่รู้จักแพร่หลายมากนักในอดีต แต่ในทางวิศวกรรมในปัจจุบันแล้ว CFD จะเข้ามามีบทบาทอย่างสำคัญในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ในทางวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของปัญหาในเรื่องของกลศาสตร์ของของไหล (Fluid Mechanics) ในปัจจุบัน CFD อาจจะต้องมีการบัญญัติขึ้นมาใหม่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางวิศวกรรมศาสตร์ว่าหมายถึงอะไรกันแน่ เพื่อจะได้ใช้เป็นบรรทัดฐานและเป็นมาตรฐานเดียวกัน แต่หลักการโดยทั่วไปของ CFD ซึ่งในที่นี้อาจจะกล่าวอ้างอิงนั้นก็คือ การใช้ข้อได้เปรียบทางด้านอุปกรณ์ทางด้าน Computer มาคำนวณปัญหาของของไหล โดยช่วยในการประมวลผลการทำงาน และวิเคราะห์การไหลของของไหลชนิดต่างๆ หรืออาจจะเรียกง่ายๆ ว่าการวิเคราะห์ของไหลโดยการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้ Computer เข้ามาช่วยในการคำนวณโดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว โดยมีความเร็วของชุดประมวลผล (CPU Speed) แล้วยังมีหน่วยความจำ (Memory) ที่มีประสิทธิภาพสูง จึงทำให้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) และการทำงานของโปรแกรมการคำนวณของ CFD สามารถทำได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย ในปัจจุบันนั้นในการวิเคราะห์ในเรื่องของของไหลที่มีความยุ่งยากซับซ้อนอาจจะแก้ได้โดยใช้

โปรแกรม หรือซอฟต์แวร์ (Software) ที่เรียกว่า CFD Package มาใช้ ทำให้แก้ปัญหาได้ง่ายขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้านของไหลต่างๆ เช่น

1. ของไหลที่สามารถอัดตัวได้ หรือ Compressible Fluid ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์การไหลในระบบท่อทางต่างๆ ของระบบการทำความเย็นหรือปรับอากาศ เป็นต้น
2. ของไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ หรือ Incompressible Fluid ตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำในระบบท่อทางต่างๆ ภายในอาคาร
3. ของไหลที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบหรือที่เราเรียกกันว่า Laminar Flow Problems
4. ของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วน หรือ Turbulent Fluid Flows

อ้างอิง

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Momentum_theory
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_theory
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_momentum_theory
- [4] http://www.wikiwaves.org/Strip_Theory_Of_Ship_Motions._Heave_%26_Pitch
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการสร้างโมเดลใบพัดกังหันลมในโปรแกรม Solid Work การ Simulation หาปริมาณเชิงกลทางฟิสิกส์ในรูปแบบของความเร็ว และความดันของลมเมื่อลมเข้ามาปะทะใบพัดกังหันลม ในโปรแกรม ANSYS16 และใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเชื่อมต่อค่าที่ได้ค่าจาก Sensor ในฝั่งของ Digital Input มาแสดงผลในรูปแบบของความเร็วในการหมุนของใบพัดกังหันลมในรูปแบบของหน่วย RPS

3.2 หลักการวิเคราะห์ออกแบบกังหันลมความเร็วลมต่ำ

ในการออกแบบกังหันลมให้ผลิตไฟฟ้าได้ที่มีความเร็วลมต่ำนั้นจำเป็นต้องหารูปร่าง และความสัมพันธ์ในเรื่องแรงยกตัวและแรงผลักรูปแบบต่างๆ ให้เหมาะสมต่อความเร็วลมที่ออกแบบไว้ โดยในเบื้องต้นนั้นใบกังหันลมที่จะนำมาใช้ต้องสามารถสร้างแรงยกตัวที่ความเร็วลมต่ำได้ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดก็ต้องมีความเหมาะสมต่อรอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) อย่างไรก็ตามใบกังหันลม ซึ่งถือว่าเป็นหัวใจหลักของการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ที่นำมาใช้ในการทำการวิจัยในครั้งนี้เป็นผลงานที่ศึกษาต่อเนื่องมาจากงานระดับปริญญาเอกทางวิศวกรรมเครื่องกล ณ ประเทศอังกฤษ ที่หัวหน้าโครงการได้ทำการศึกษามาเป็นเวลา 5 ปีเต็ม ในการคัดเลือกรูปร่างและมุมบิดของใบกังหันที่เหมาะสมต่อความเร็วลมในประเทศไทย จึงนำผลการศึกษาและวิจัยที่ได้กลับมาสร้างกังหันลมต้นแบบให้เกิดการใช้งาน นั่นคือได้กำหนดมุมบิดของใบกังหันให้มีองศาประมาณ 8 องศา และมีรูปร่างของรูปหยดน้ำเป็นไปตามรูปร่างของหยดน้ำรุ่น S1223 ซึ่งได้มาจากการทดลอง ณ ห้องอุโมงค์ลมในการคัดเลือกรูปร่างของหยดน้ำทั้งหมด 50 รูปร่าง[1]

และได้อธิบายขั้นตอนการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยทฤษฎีต่างๆ ไว้ในบทที่ 2 ดังนั้นรายละเอียดทางเทคนิคที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลจากการศึกษาอย่างต่อเนื่องมาจากงานที่หัวหน้าโครงการได้พิสูจน์มาแล้ว จึงสามารถออกแบบตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีความเร็วรอบไม่เกิน 260 รอบต่อนาที เนื่องจากความยาวของใบพัดเป็นข้อจำกัดในการหมุนของกังหันลมที่ความเร็วลมสูงสุดเพื่อผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมไม่เกิน 9.5 เมตรต่อวินาที

3.3 การวิเคราะห์การออกแบบใบพัดกังหันลม

การคำนวณหาค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดกังหันจากปลายใบกังหันลม ดังสมการที่ (3.1)

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_n V_i^3 C_p \quad (3.1)$$

เนื่องจากต้องการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ได้ 300 วัตต์ ที่จุด Maximum C_p ที่ความเร็วลมสูงสุดที่ 9.5 เมตรต่อวินาที ประมาณประสิทธิภาพของกังหันลม C_p ไว่ต่ำสุดที่ 0.32 (จากห้องทดสอบอุโมงค์ลมประเทศอังกฤษ) ดังนั้นจะได้ $300 = \frac{1}{2} \times$ ความหนาแน่นอากาศ $\rho_a \times$ พื้นที่ของกังหันลม $A_n \times$ ความเร็วลมยกกำลัง 3 $V_i^3 \times$ ประสิทธิภาพของกังหันลม C_p ดังนั้นแทนค่าในสูตรตัวอย่างจะได้

$$300 = \frac{1}{2} \times 1.225 \times A_n \times 9.5^3 \times 0.32$$

$$A_n = \frac{300}{168.05} = 1.79m^2$$

$$A_n = \pi \times R^2 = 1.79m^2$$

$$r = \sqrt{\frac{1.79}{\pi}} = 0.75m$$

ดังนั้นรัศมีต่ำสุดของกังหันลมที่ความเร็วลม 9.5 เมตรต่อวินาที ในการออกแบบคือ มีความยาวใบ 0.75 เมตร

3.4 ขั้นตอนการออกแบบและประมวลผลด้วยโปรแกรม ANSYS 16

จุดประสงค์หลักในการวิเคราะห์คือ ออกแบบใบพัดกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมต่ำ ด้วยโปรแกรมพลศาสตร์การไหล

ขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรม ANSYS 16

1. เลือก Air Foil รุ่น S1223
2. นำรูปแบบ Air Foil ที่เลือกมาออกแบบในโปรแกรม Solid Work ในรูปแบบ 3 มิติ
3. การกำหนด Material ต่างๆ เช่น กำหนดท่ออุโมงค์ลม
4. กำหนดความเร็วลมขาเข้า
5. กำหนด Mesh Size เพื่อให้โปรแกรม CFD ประมวลผล
6. กำหนดค่า Out Put ที่ต้องการ
7. เก็บข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักในการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ต้องคำนึงถึงการใช้งานตามความเหมาะสมความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละประเทศ สำหรับประเทศไทยได้มีการศึกษาปรากฏการณ์น้ำ Air Foil รุ่น S1223 มาใช้ที่ได้ศึกษาค้นคว้าแล้วว่าเหมาะสมกับศักยภาพความเร็วลมต่ำ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

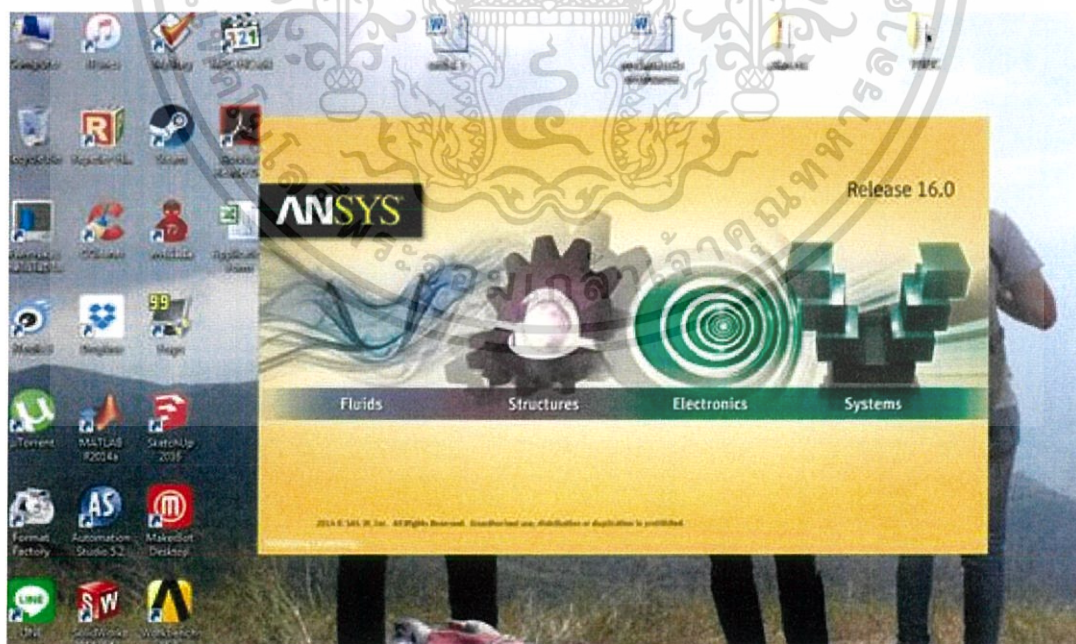
การใช้โปรแกรมทางด้าน CFD คือ การที่นำความรู้ด้านพลศาสตร์ของไหลมารวมกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสมการพลศาสตร์ของไหลที่นิยมนำมาใช้กันอยู่ก็จะเป็นสมการอนุรักษ์ ซึ่งสมการอนุรักษ์ที่นำมาใช้กันจะมี 3 สมการ คือ

1. สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)
2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equation)
3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equation)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเครื่องมือช่วยแก้ปัญหาที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหล โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) คำนวณเพื่อประมวลผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีความยุ่งยากในการหาค่าเฉลยด้วยวิธีแม่นยำ หลักสำคัญในการคำนวณพลศาสตร์ของไหลต้องเกี่ยวข้องกับสมการบังคับ ซึ่งสมการบังคับพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหล ได้แก่ สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

หลักการทำงานของโปรแกรม CFD สามารถที่จะอธิบายการทำงานตาม ขั้นตอนดังนี้

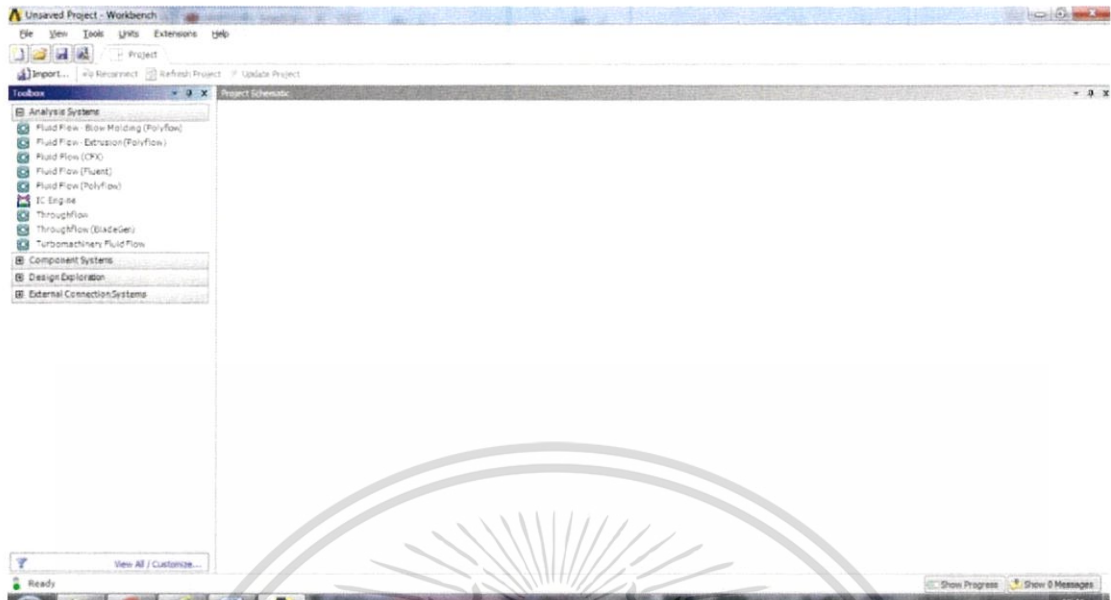
1. เปิดโปรแกรม ANSYS16 ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เปิดโปรแกรม ANSYS

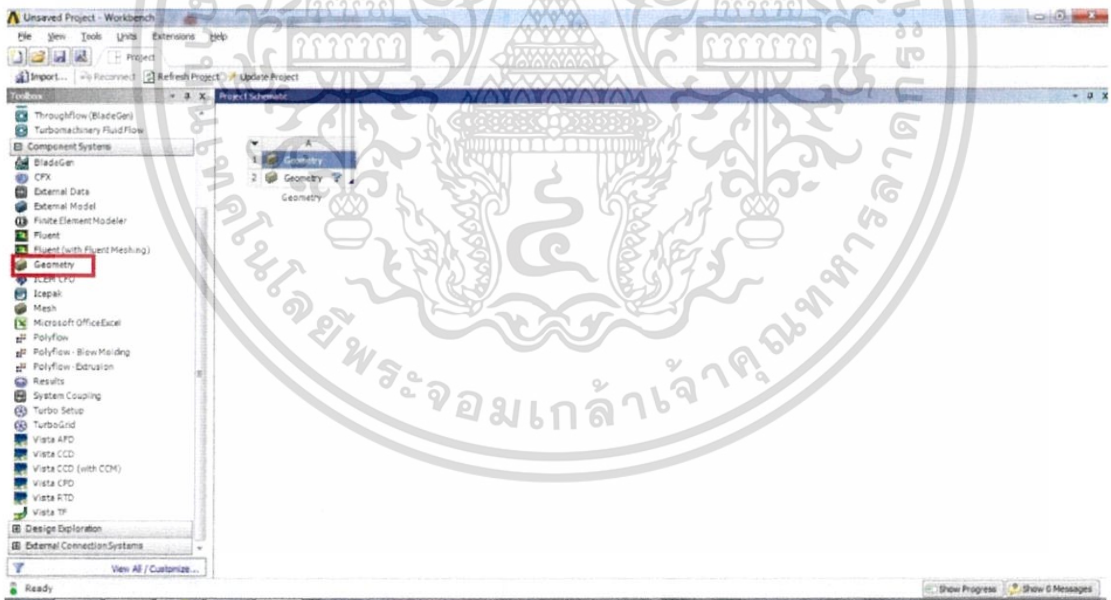
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หน้าต่างใช้งานเริ่มต้น ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 หน้าต่างใช้งานเริ่มต้น

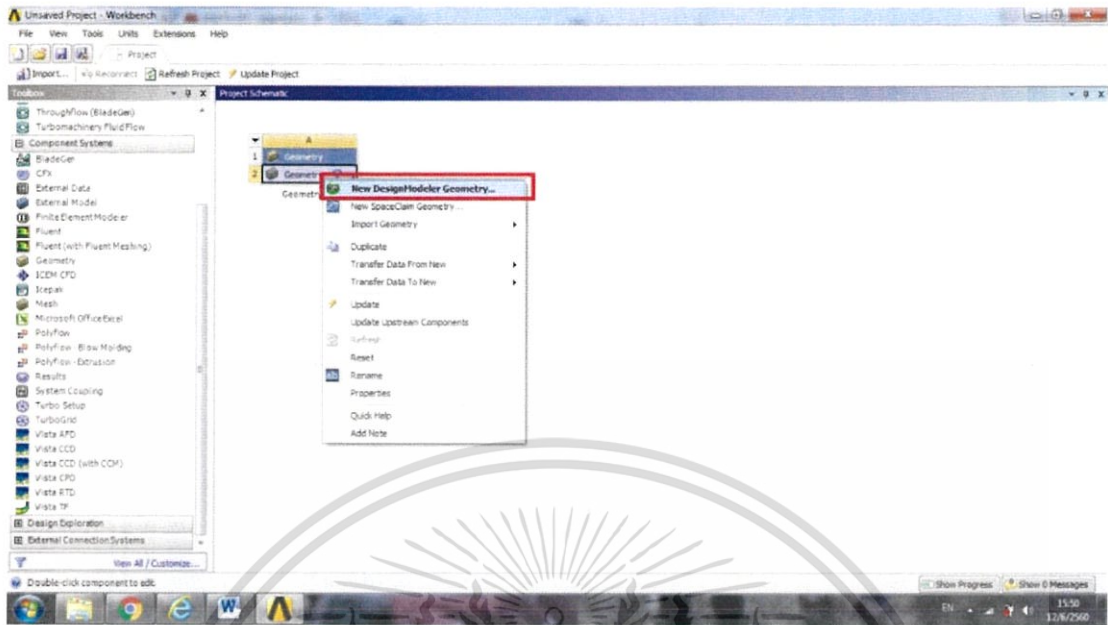
3. เปิดใช้ฟังก์ชัน Geometry ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เปิดใช้ฟังก์ชัน Geometry

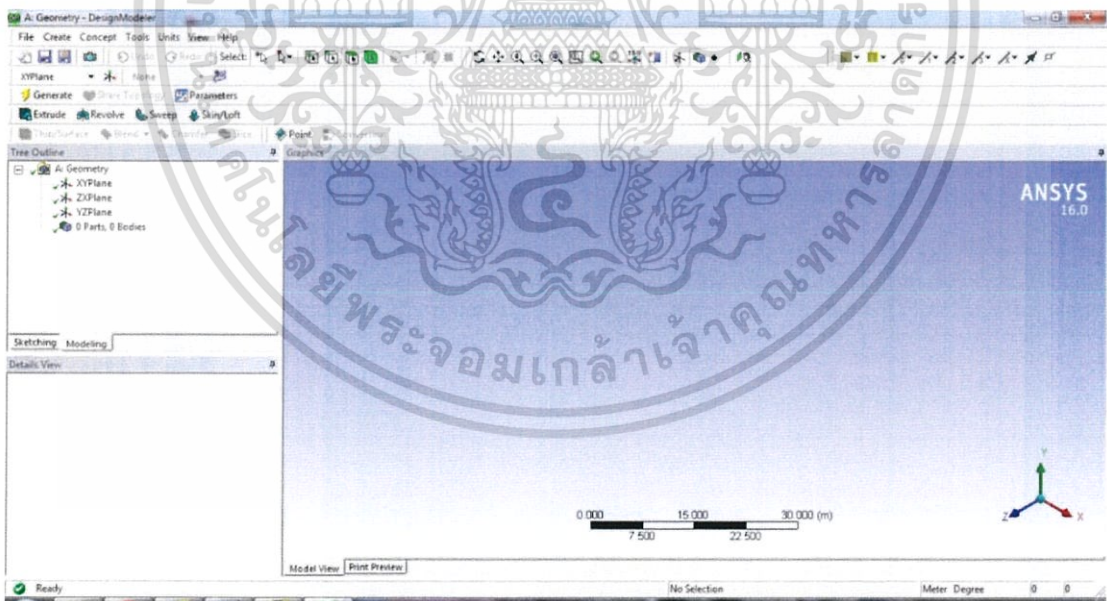
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คลิกขวาเลือก New DesignModeler Geometry ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เลือก New DesignModeler Geometry

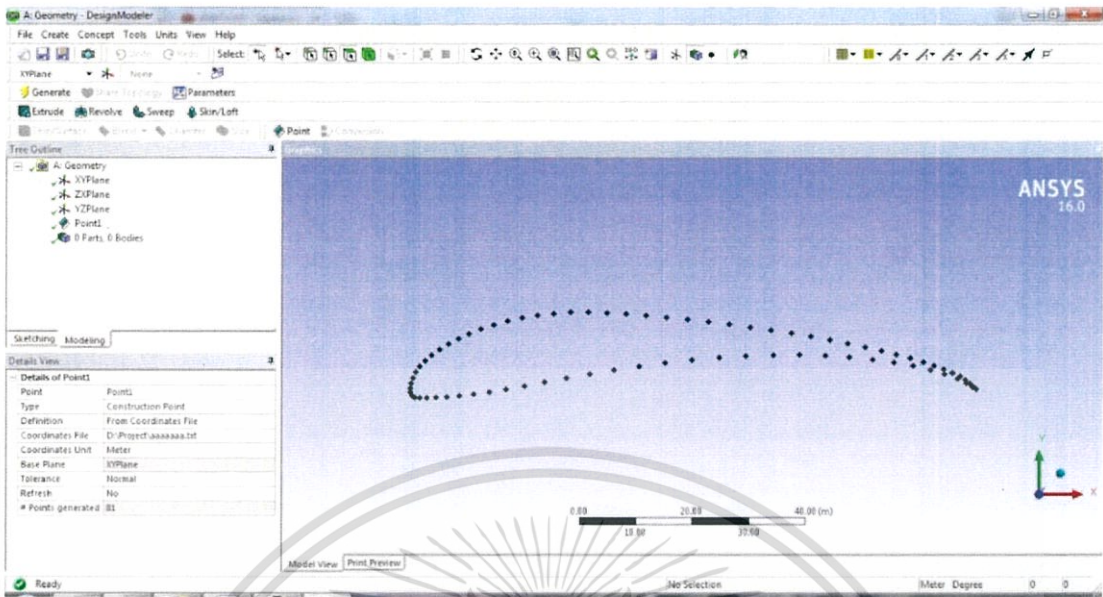
5. หน้าต่างที่ได้มาหลังจากกด ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หน้าต่างที่ได้มาหลังจากกด

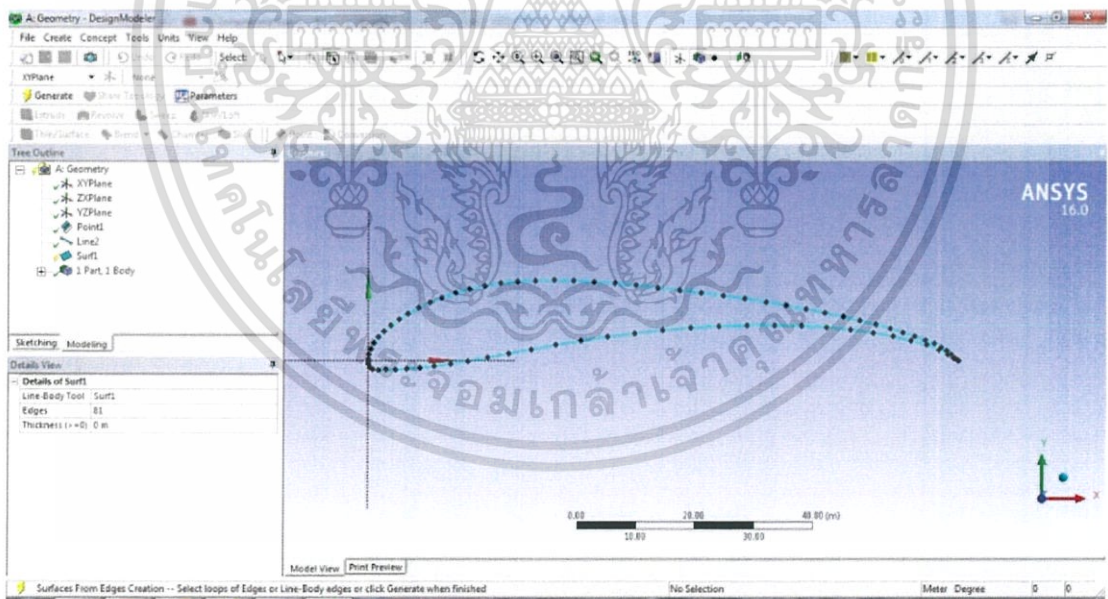
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้างแบบร่าง Air Foil ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สร้างแบบร่าง Air Foil

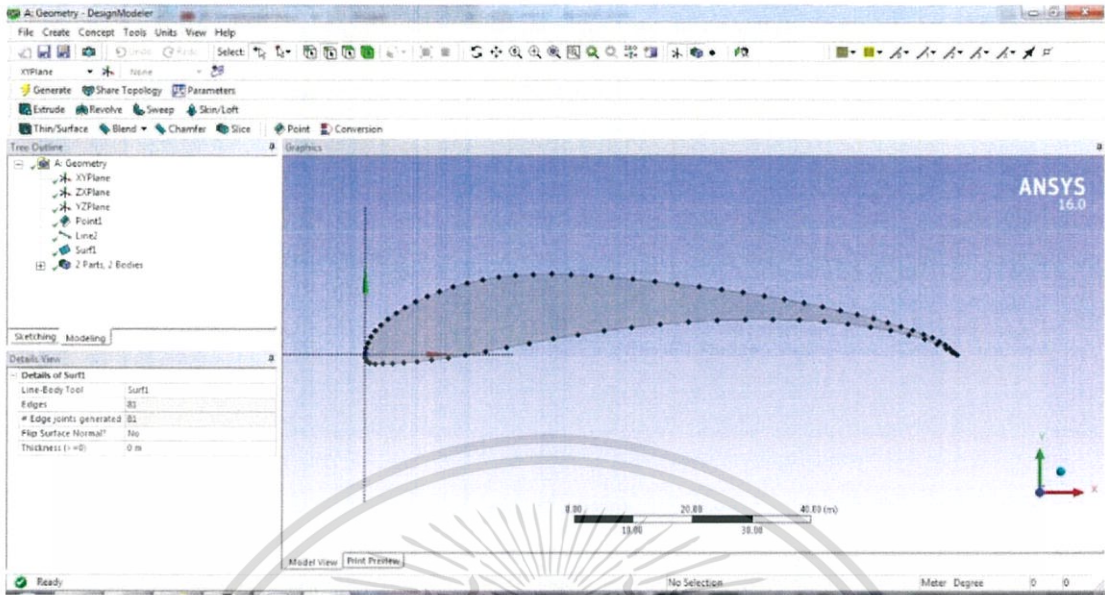
7. เชื่อมจุดด้วยเส้น ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เชื่อมจุดด้วยเส้น

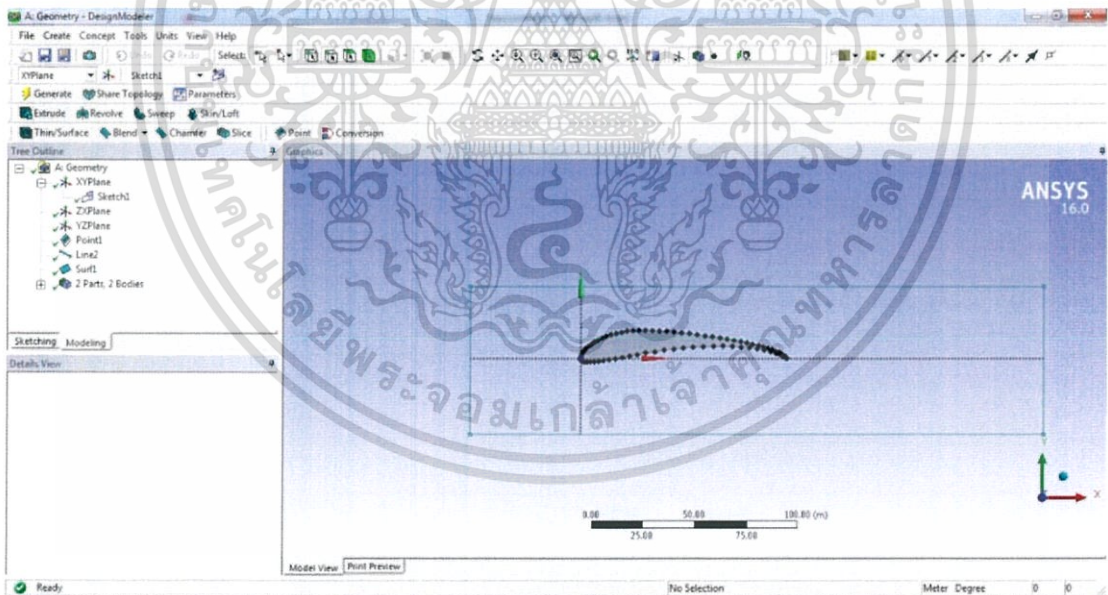
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำเป็นพื้นที่ข้างใน Air Foil ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ทำเป็นพื้นที่ข้างใน Air Foil

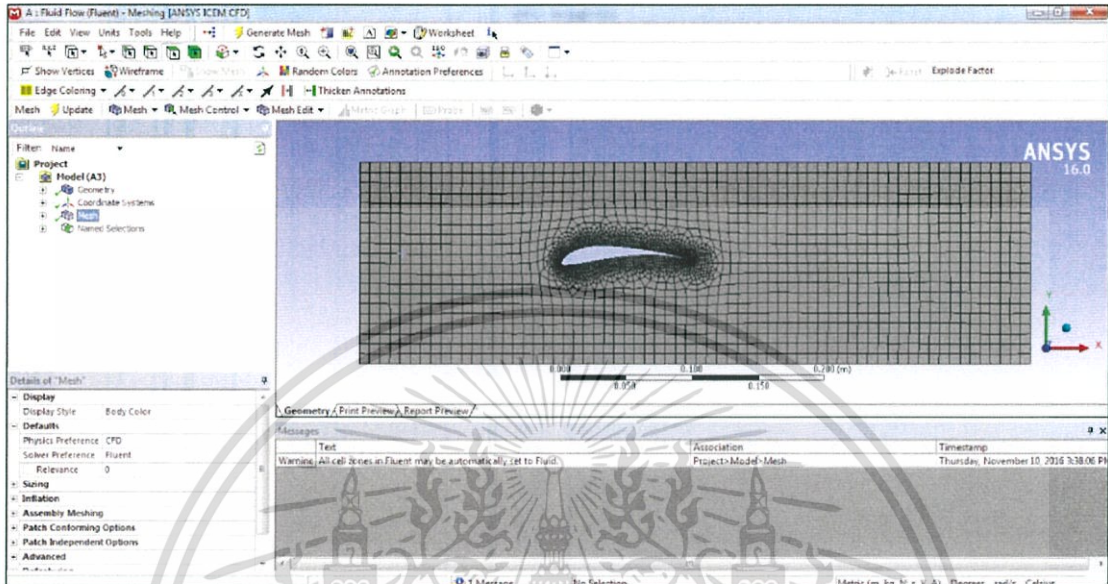
9. กำหนดขอบเขตการวัด ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กำหนดขอบเขตการวัด

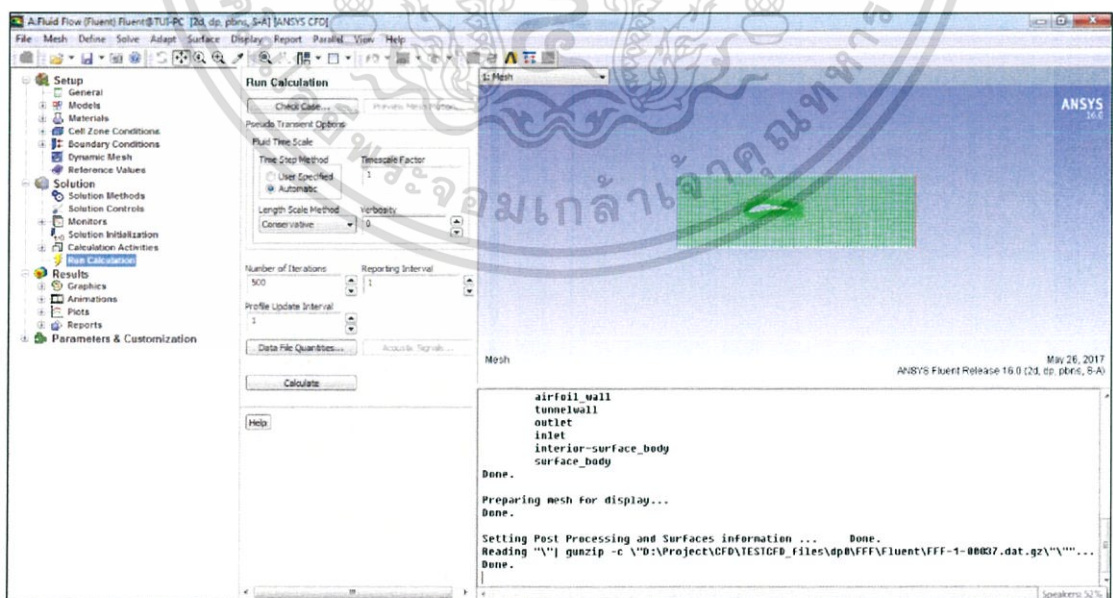
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. Mesh Generation คือ การกำหนด Mesh ให้กับระบบที่จะใช้ในการทดสอบ ซึ่ง Mesh ที่ใช้ในแต่ละส่วนของระบบอาจมีขนาดเท่ากัน หรือไม่เท่ากันก็ได้ แต่ส่วนมากแล้วจะให้ขนาด Mesh ที่ไม่เท่ากันในแต่ละส่วนของระบบ ซึ่งส่วนมากจะให้ชิ้นส่วนที่สนใจศึกษามีความละเอียดมาก ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 Mesh Generation

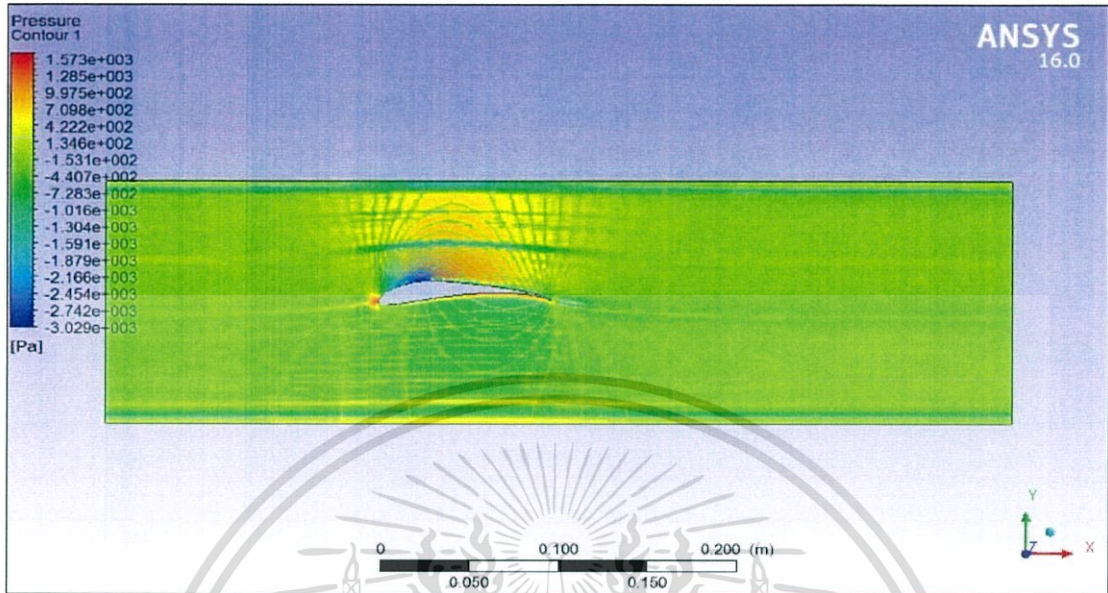
11. Simulation Scope คือ การกำหนดค่าของเขตในการคำนวณ หรือกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับระบบการคำนวณทดสอบของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.11



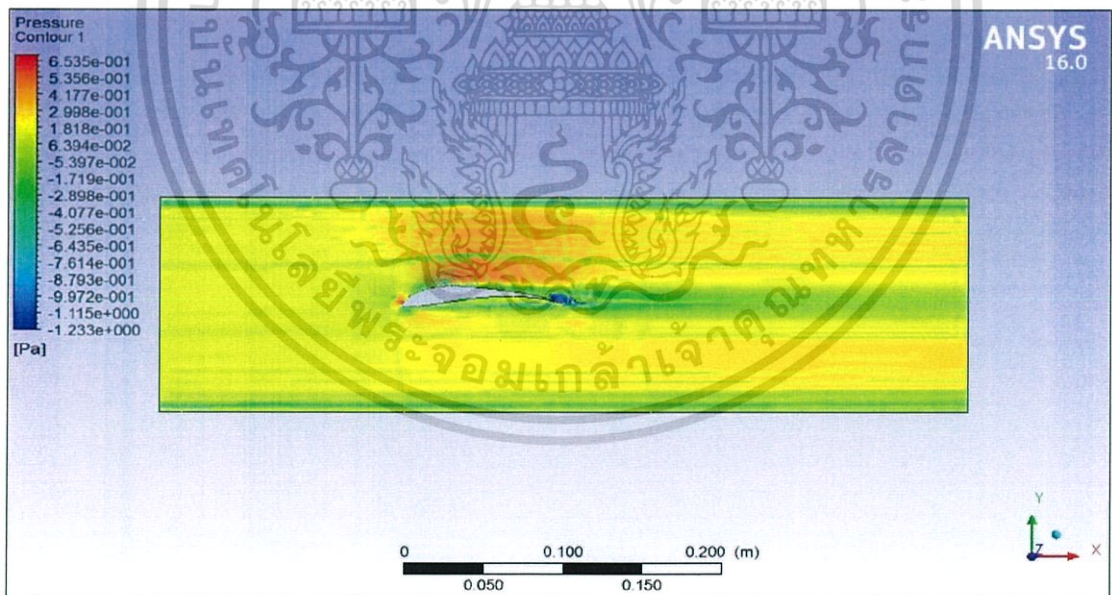
รูปที่ 3.11 Simulation Scope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Simulation คือ การดูผลการการ Simulation ที่เกิดขึ้นว่ามีผลลัพธ์เป็นอย่างไร ดังรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.15

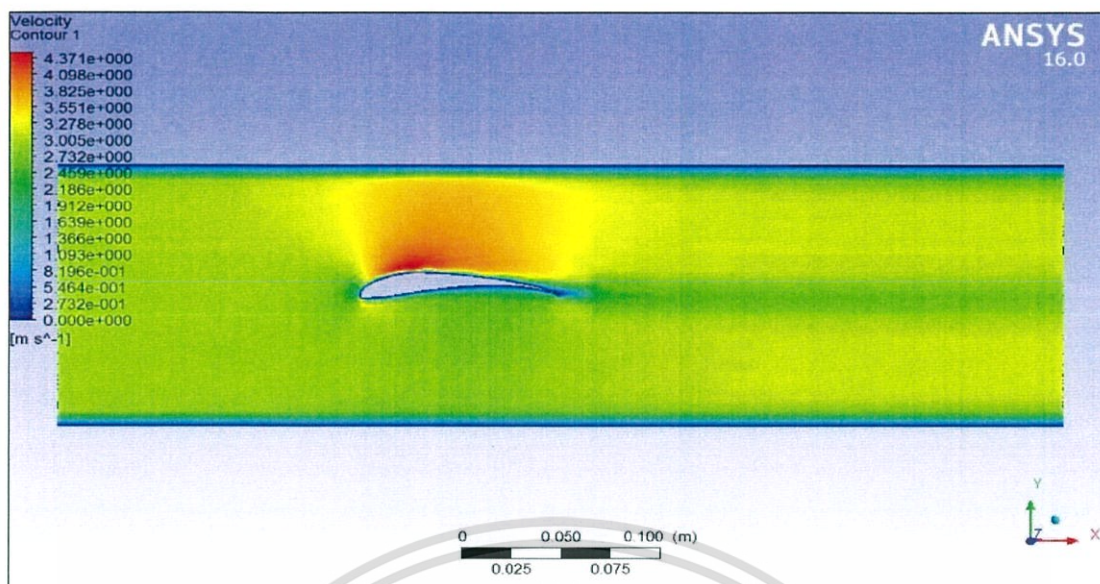


รูปที่ 3.12 Simulation Pressure 3 m/s

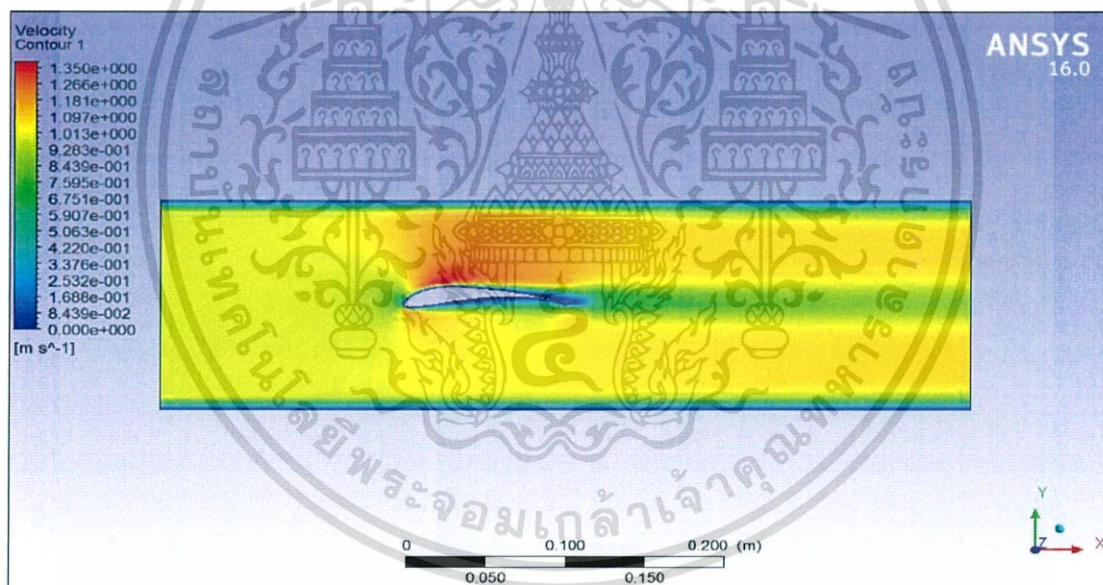


รูปที่ 3.13 Simulation Pressure 1 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 Simulation Velocity 3 m/s



รูปที่ 3.15 Simulation Velocity 1 m/s

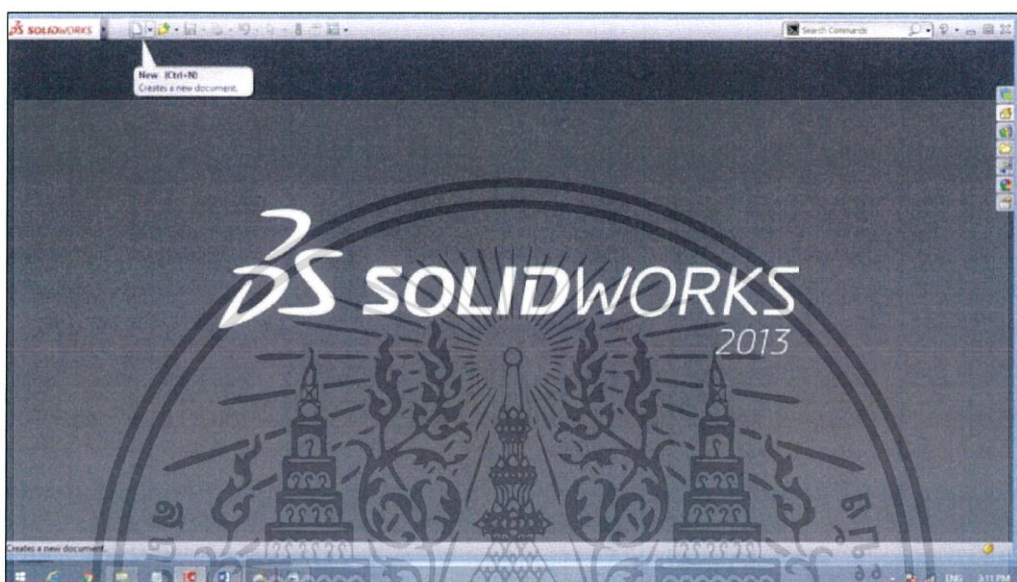
จากการ Simulation เห็นได้ชัดว่าที่ความเร็วลม 1 m/s ไบแก๊งหันยังไม่ทำงาน และเมื่อเปลี่ยนเป็น
ที่ความเร็วลม 3 m/s ไบแก๊งหันลมทำงาน แสดงว่าไบแก๊งหันเริ่มทำงานในช่วงความเร็ว 1-3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การออกแบบใบพัดกังหันลมโดยใช้โปรแกรม Solid Works

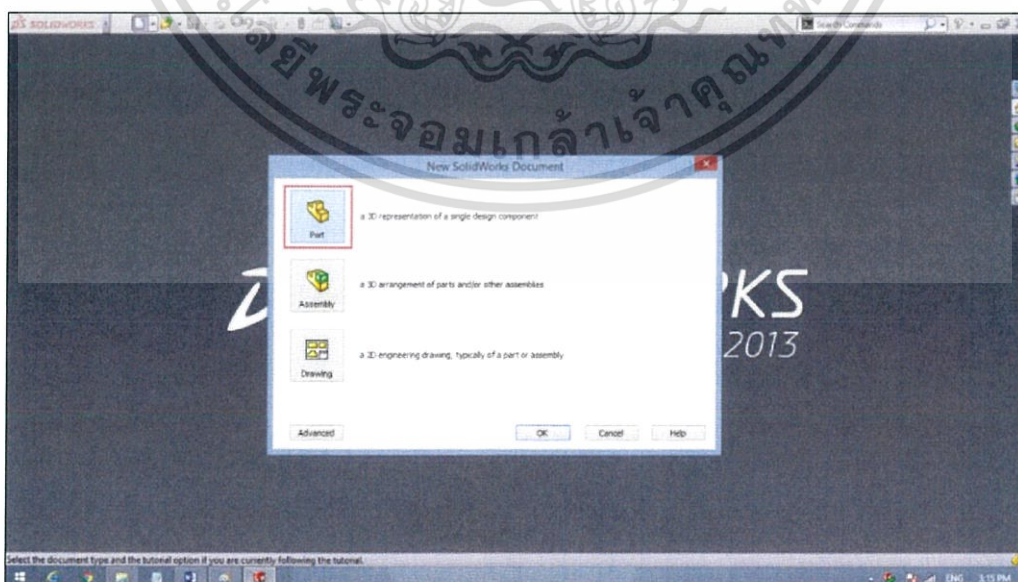
หลังจากที่ทำการ Simulation และวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS16 แล้ว ขั้นตอนต่อไปจึงทำการออกแบบใบพัดกังหันลมโดยใช้โปรแกรม Solid Work ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เข้าโปรแกรม Solid Works ไปที่ New สำหรับเลือกรูปแบบการออกแบบชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การเริ่มสร้างหน้าต่างสำหรับออกแบบของโปรแกรม Solid Works

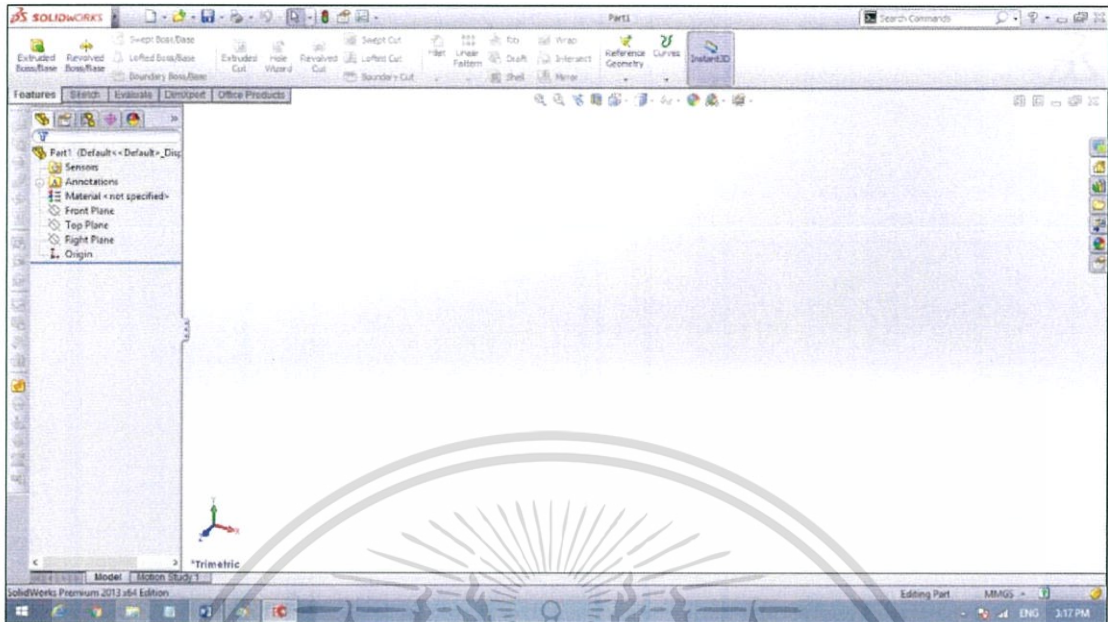
2. เลือก Part เพื่อเข้าหน้าต่างในการสร้างชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การเลือกออกแบบชิ้นงานแบบ 3 มิติแบบเป็นส่วน

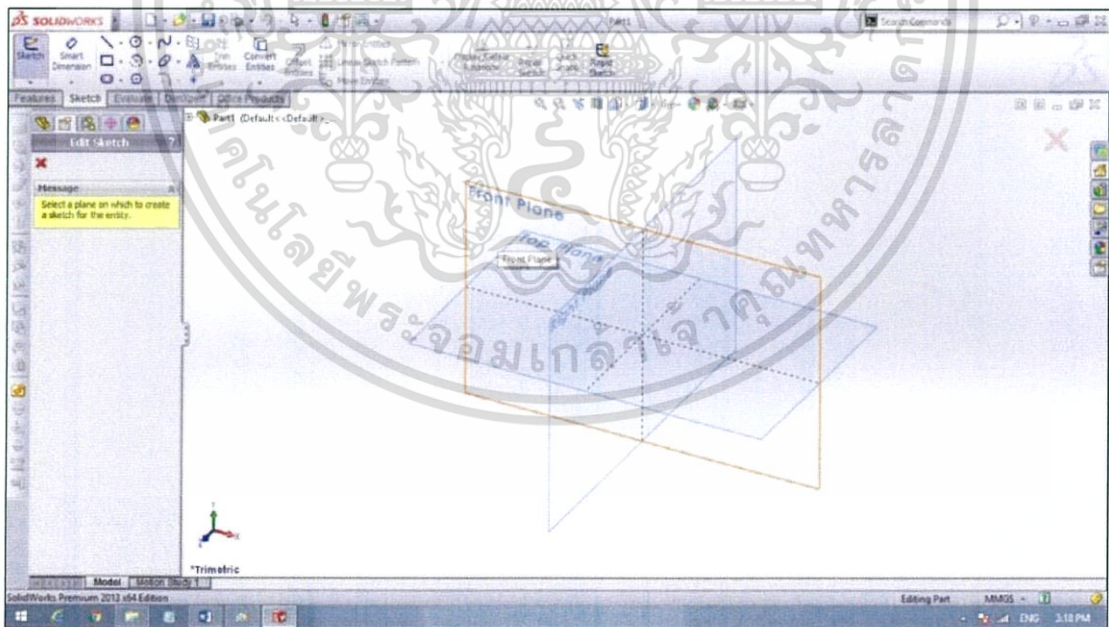
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ภาพแสดงแถบหน้าต่างสำหรับออกแบบชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 หน้าต่างสำหรับการออกแบบชิ้นงาน

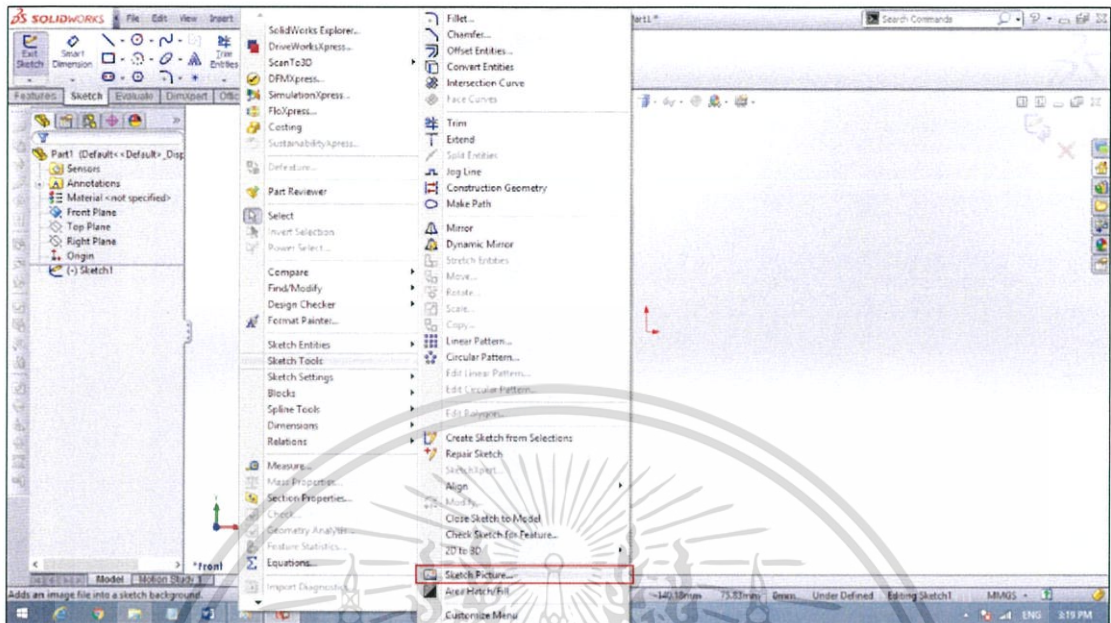
4. เลือกเมนู Sketch จากเลือก Front Plane ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 1

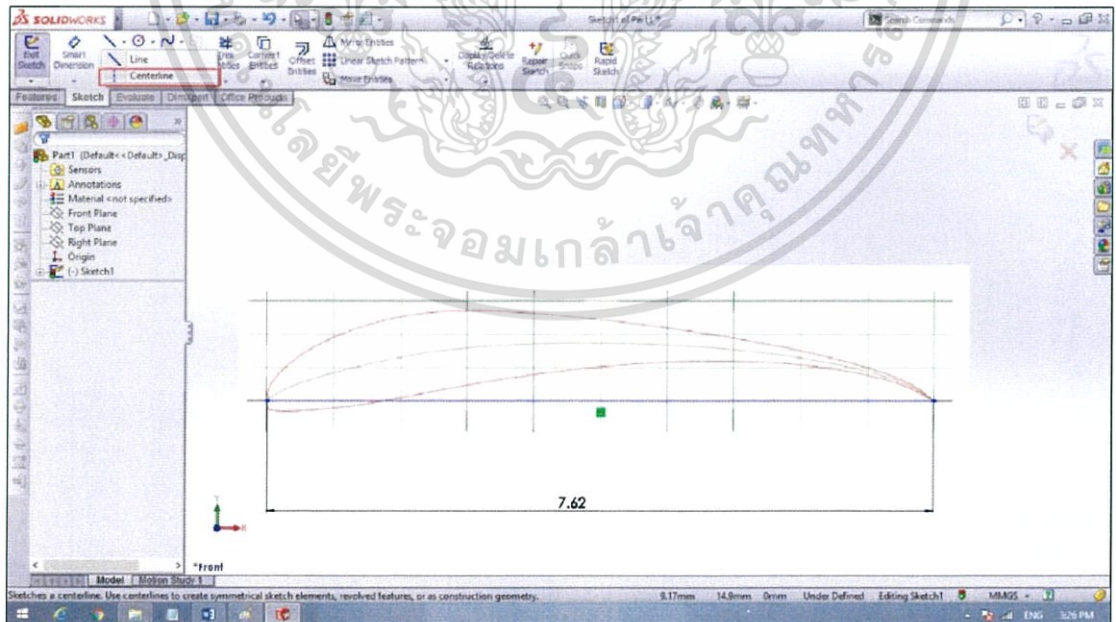
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ไปที่ Tool เลือกหัวข้อ Sketch Tools จากนั้นเลือก Sketch Picture... เลือกภาพ Air Foil ที่เตรียมไว้ในที่นี้ใช้ Air Foil S1223 ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 2

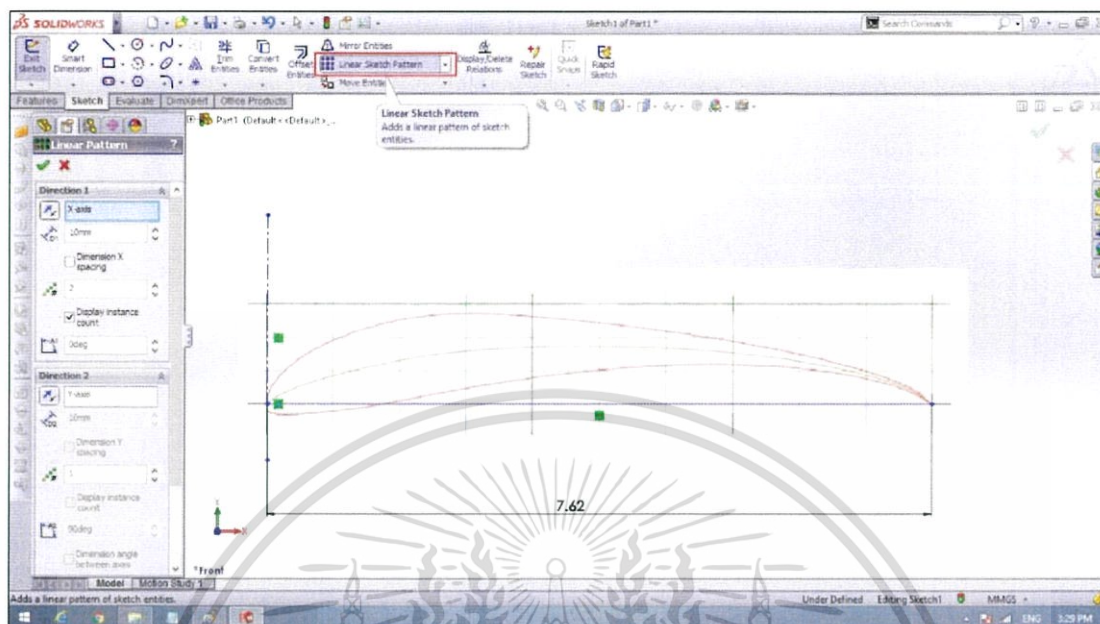
6. ปรับขนาดภาพตามที่ได้ออกแบบไว้ จากนั้นเลือก Centerline เพื่อสร้างเส้นปะ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 3

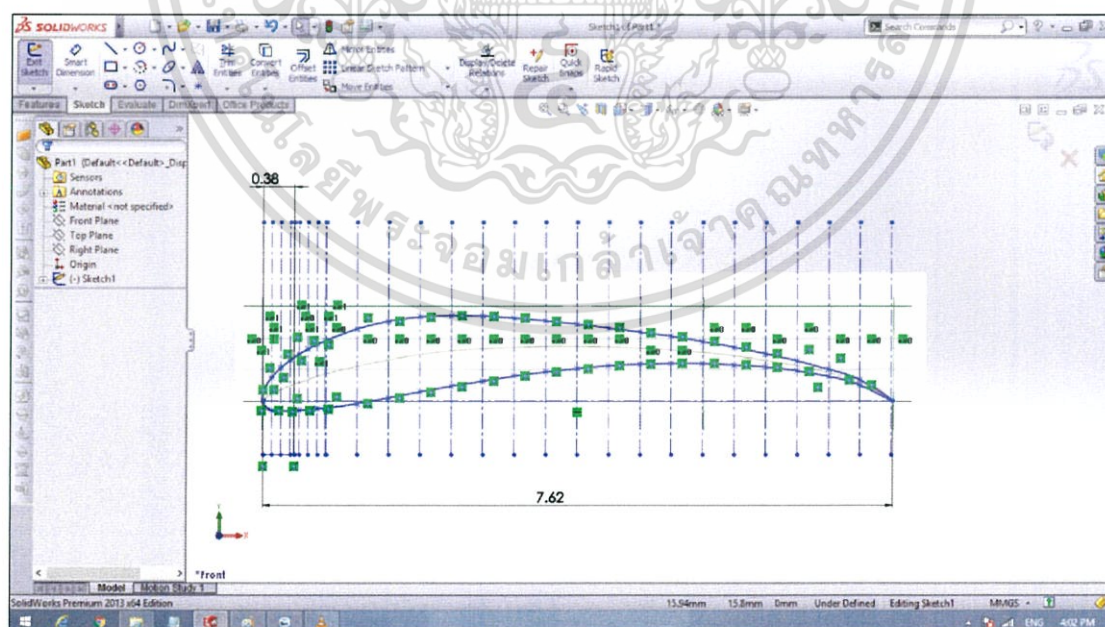
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สร้างเส้นปะในแนวแกน y ตามค่าที่ได้ออกแบบโดยไปที่ Linear Sketch Pattern เพื่อ กำหนดค่าเส้นปะ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 4

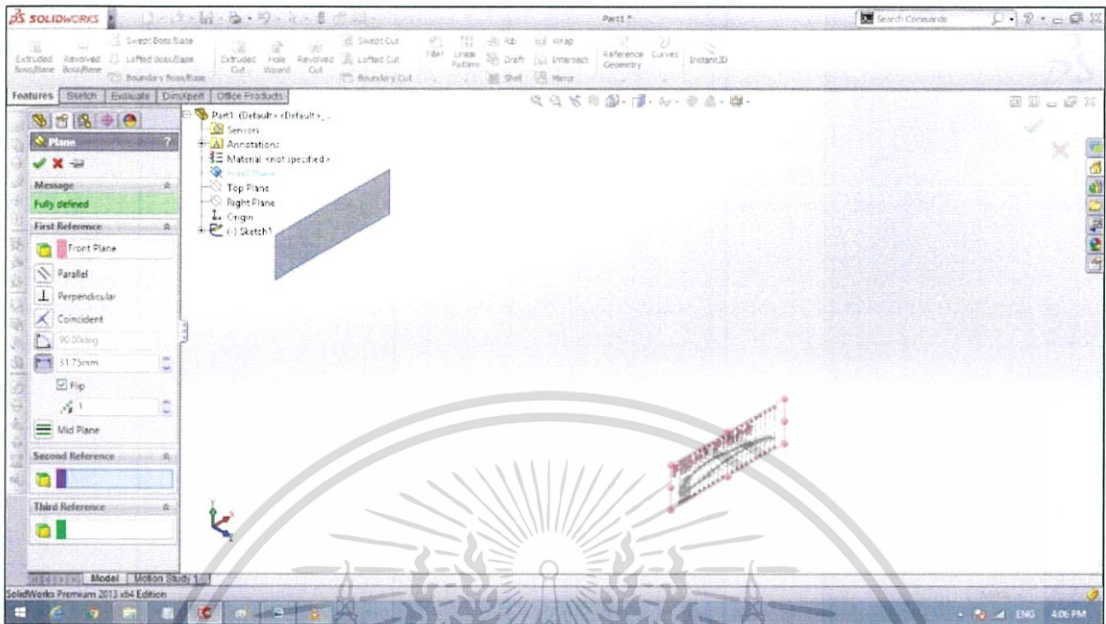
8. สร้างเส้นปะให้สอดคล้องกับแบบ Air Foil ที่ออกแบบมาแล้วเลือกที่เครื่องหมายลูก จากนั้น เลือกที่เมนู Sketch แล้วเลือก Spline เพื่อเชื่อมจุดสร้างรูปทรง Air Foil ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 5

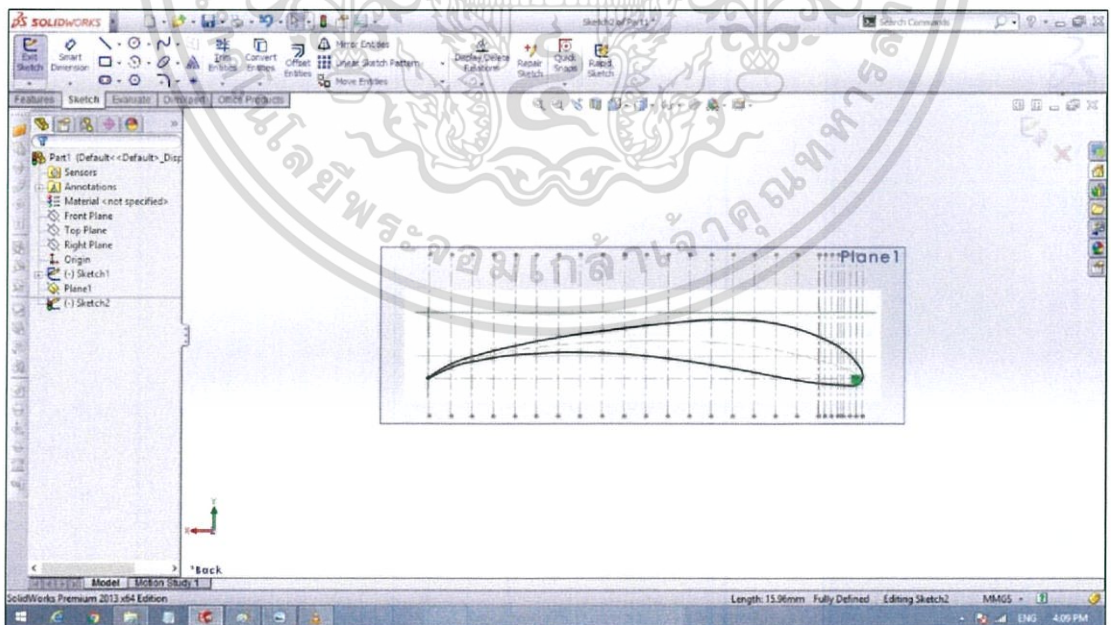
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. หลังจากที่ได้รูปทรง Air Foil ไปที่ Features เลือกหัวข้อ Reference Geometry เลือก Plane กำหนดค่าตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 6

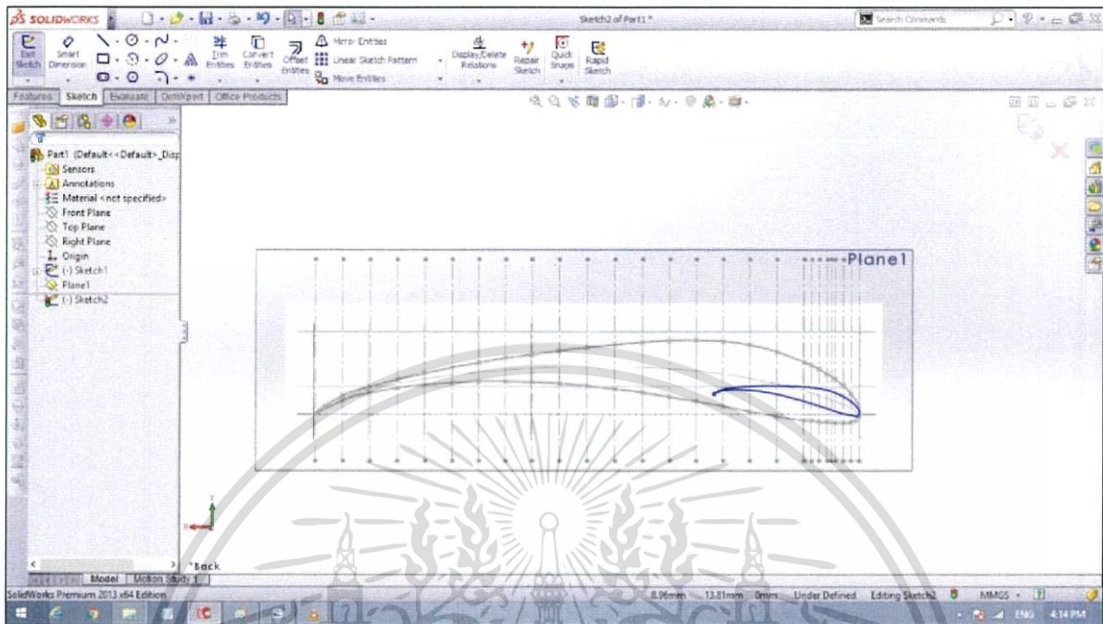
10. จากนั้นสร้าง Air Foil ขึ้นมาจากแบบที่สร้างไว้โดยไปที่ Convert Entities แล้วเลือกเครื่องหมายถูก ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 7

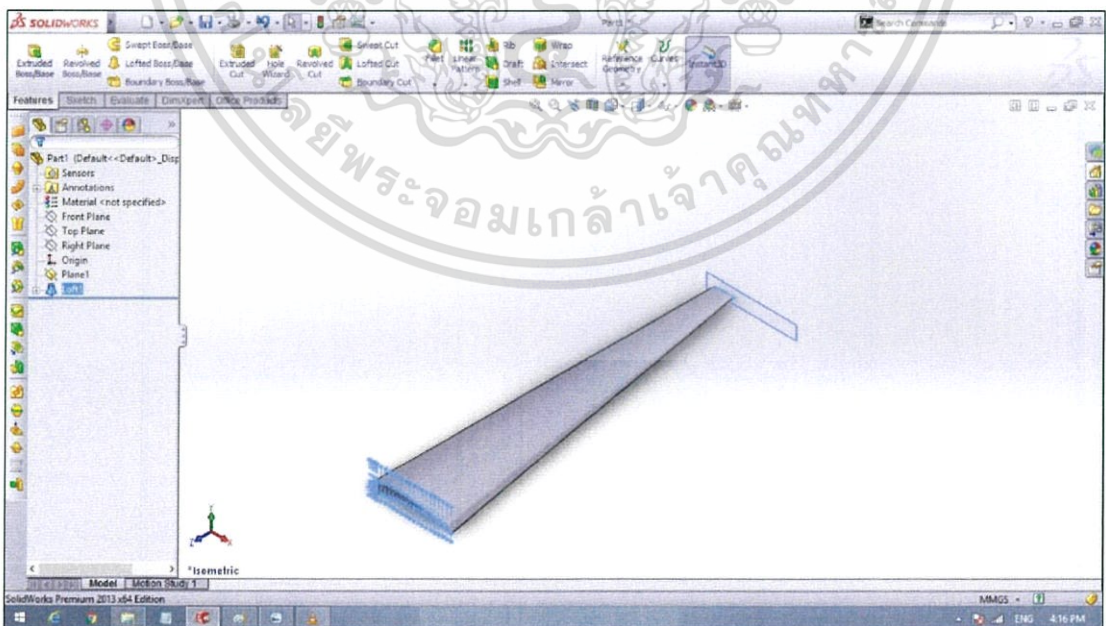
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. จากนั้นสร้างแบบ Air Foil ขนาดเล็กขึ้นมาเพื่อสร้างใบพัดกังหันลมโดยไปที่ Sketch เลือกหัวข้อ Move Entities แล้วเลือก Scale Entities จะได้ Air Foil ขนาดเล็กต่อมาไปที่ Move Entities เลือก Rotate Entities เพื่อกำหนดมุมการบิดของ Air Foil ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 8

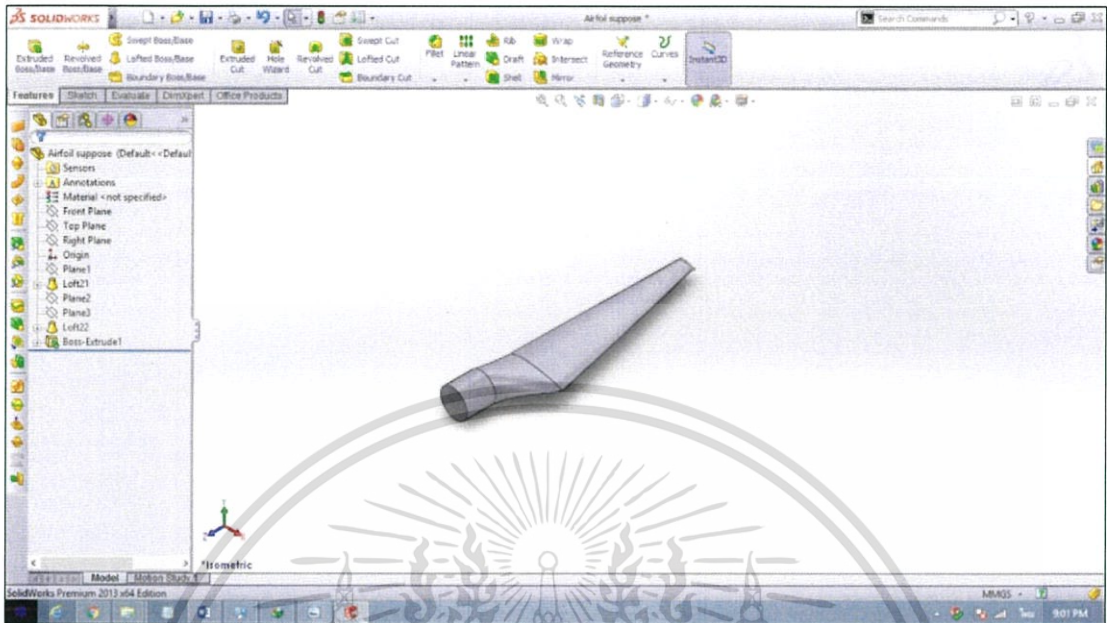
12. ไปที่ Features เลือก Lofted Boss/Base แล้วเชื่อม Air Foil ทั้งสองเข้าด้วยกัน จะได้ ใบพัดกังหันลมออกมา ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 9

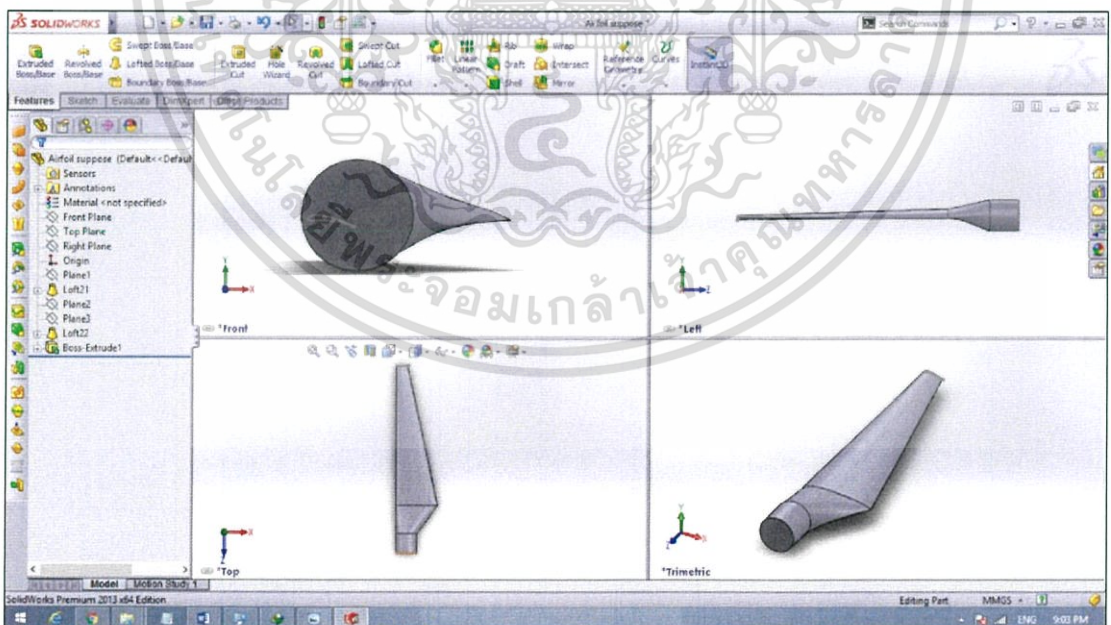
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. จากนั้นนำมาสร้างด้านใบพัดกันหันลมตามที่ออกแบบมา ปรับแต่งตามความต้องการ ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ขั้นตอนการออกแบบชิ้นงานส่วนที่ 10

14. จากการออกแบบมาจะได้ใบพัดกังหันลมดังรูปที่ 3.29



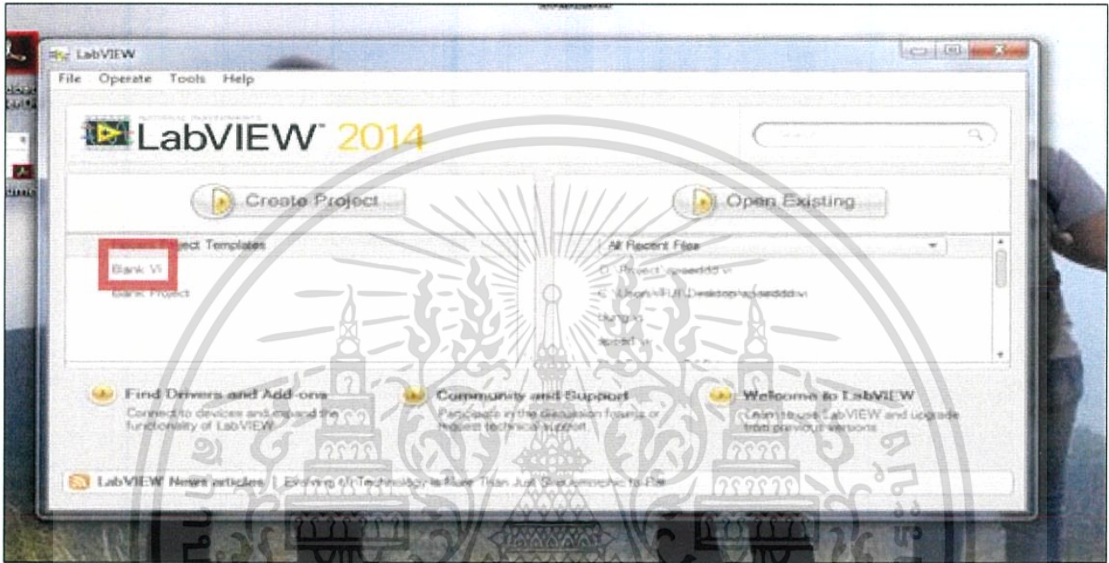
รูปที่ 3.29 Air Foil S1223 ออกแบบโดยโปรแกรม Solid Works

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การเขียนโปรแกรม LabVIEW

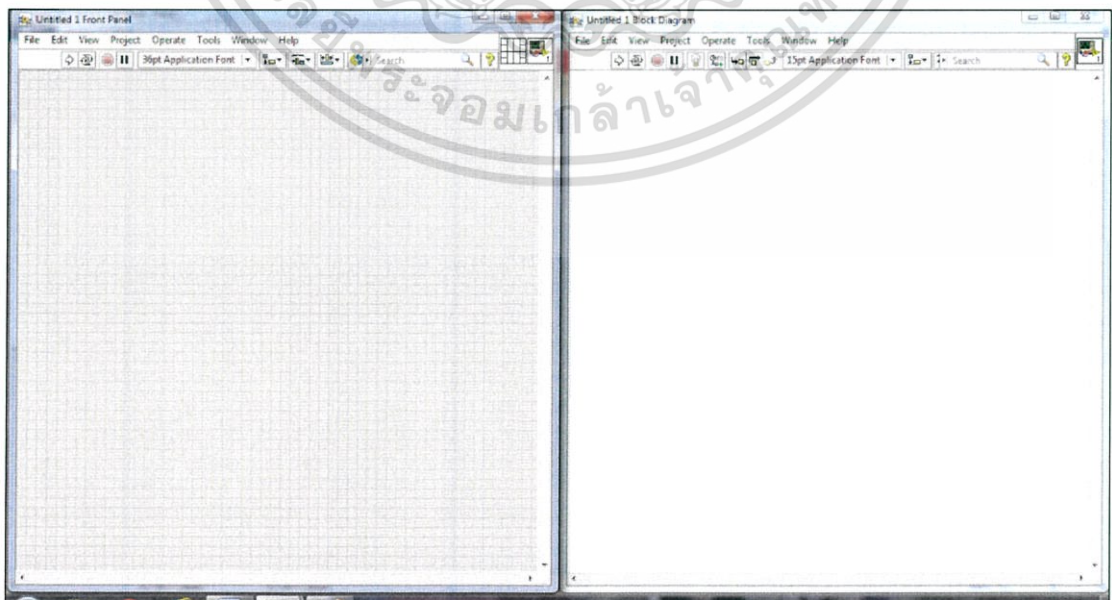
การใช้โปรแกรม LabVIEW นั้นเป็นการนำค่าที่ได้มาจาก Sensor มาแสดงผลตามที่ได้เขียนโปรแกรมลงไป ในที่นี้เป็นการเขียนโปรแกรมที่นำค่าจาก Photo Sensor มาแสดงผลในรูปแบบของรอบต่อนาที (RPM) ของใบพัดกังหันลม และขั้นตอนในการเขียนนั้นมีดังนี้

1. เปิดโปรแกรม LabVIEW พอเปิดแล้วจะขึ้นหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 3.30 แล้วกดที่ Blank V



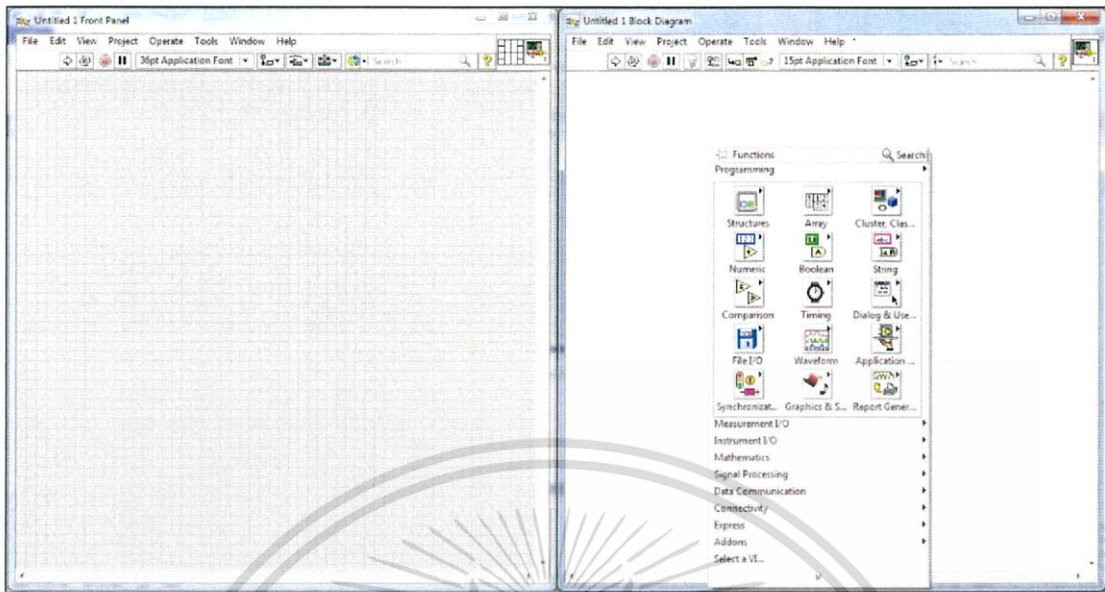
รูปที่ 3.30 หน้าต่างเริ่มต้น LabVIEW

2. หลังจากนั้นโปรแกรมจะขึ้นหน้าจอมา ดังรูปที่ 3.31



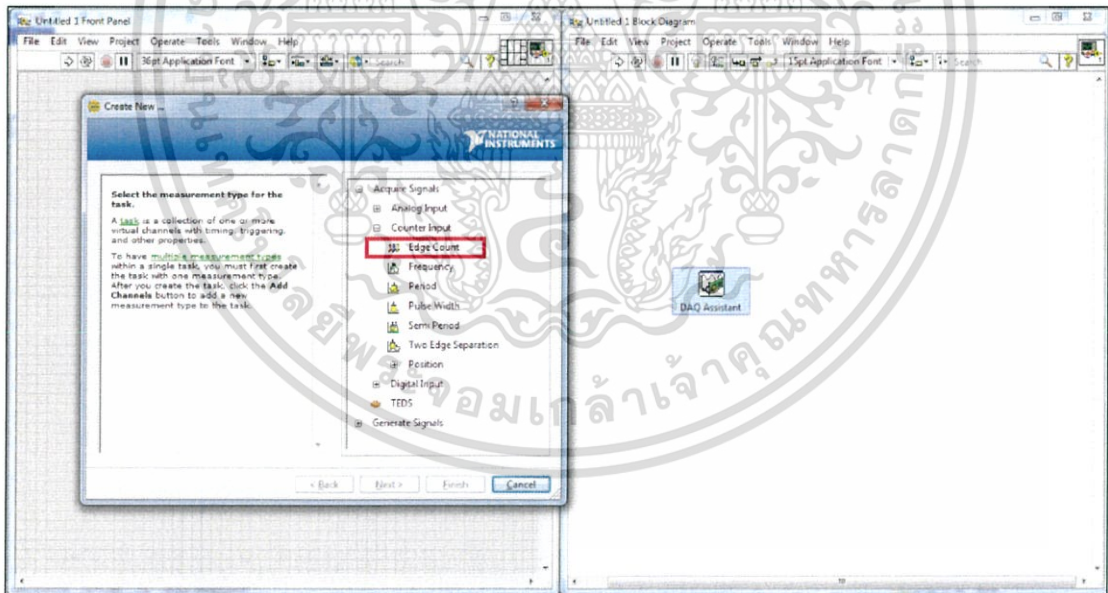
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.31 หน้าต่างการใช้งานเริ่มต้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หลังจากนั้นคลิกขวาที่หน้าจอจะแสดงฟังก์ชันต่างๆ ให้เลือกใช้งาน ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ฟังก์ชันต่างๆ

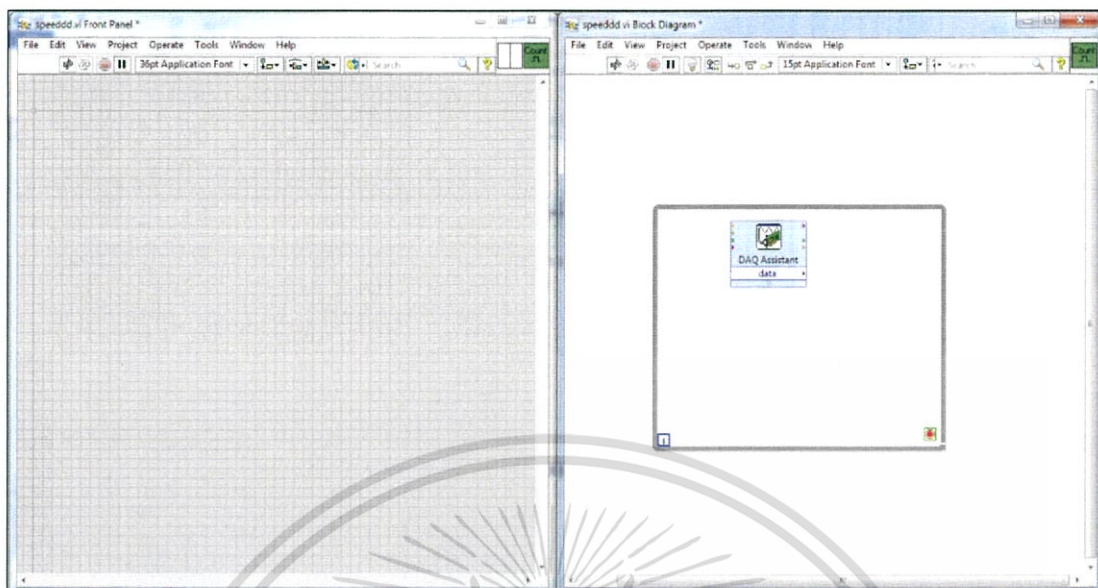
4. เลือก Express>Input>DAQ Assist>Counter Input>Edge Count ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 เลือกตัว Input

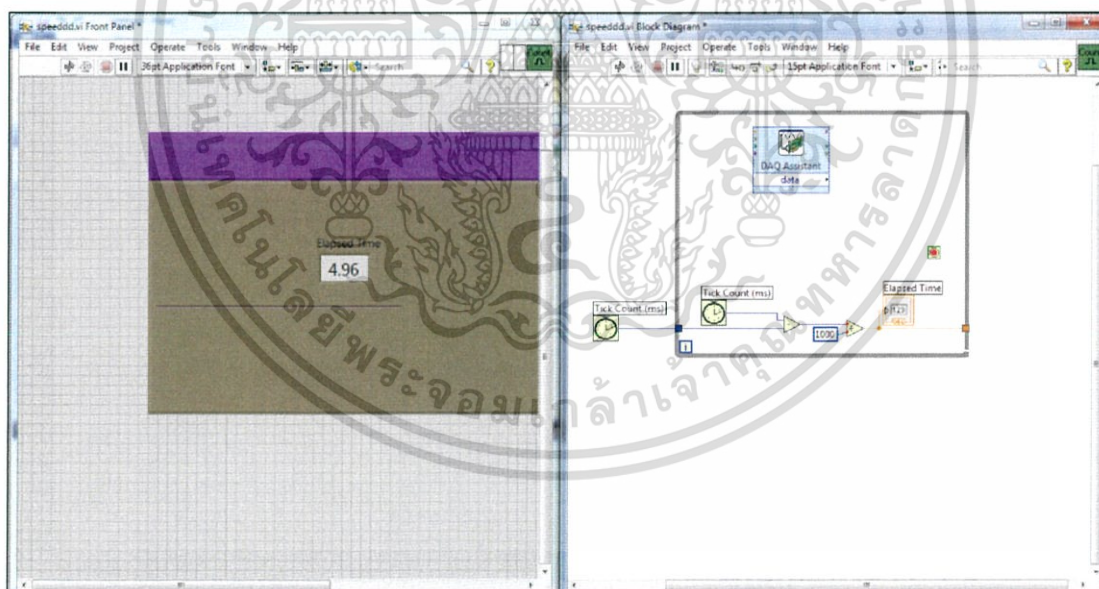
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใส่ While Loop เข้าไป ดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 While Loop

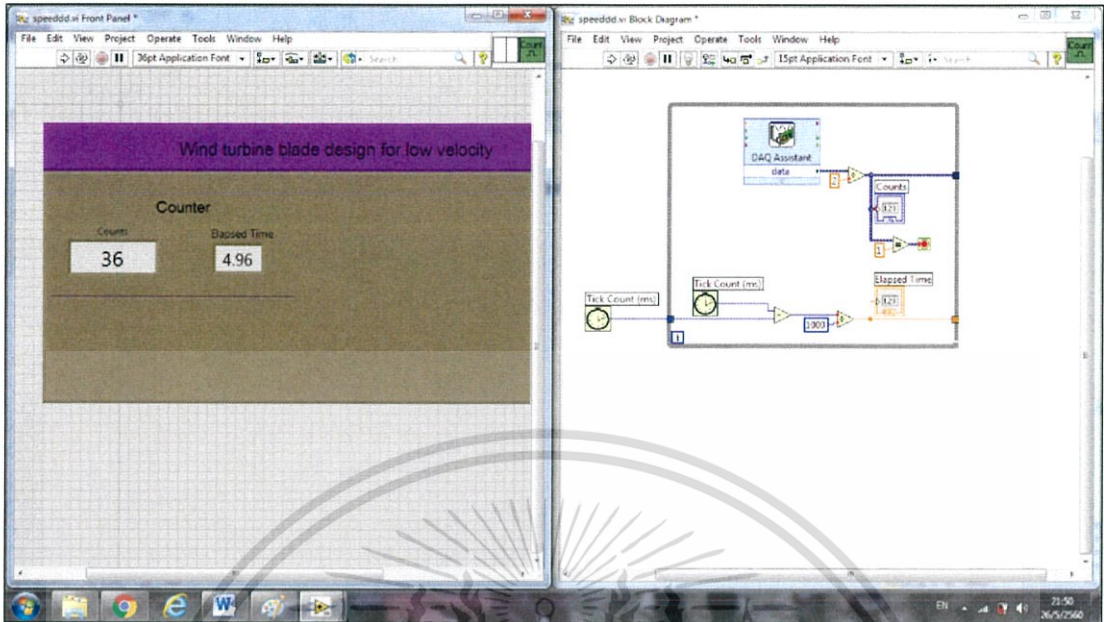
6. ทำตัวจับเวลา ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ทำตัวจับเวลา

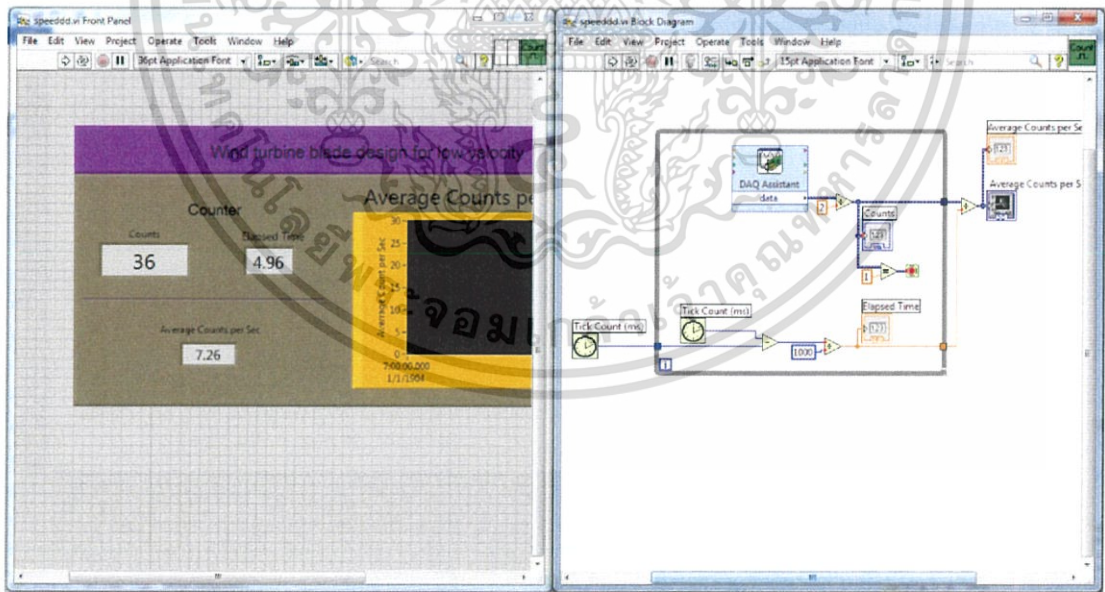
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำตัวนับ Count ดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 ทำตัวนับ Count

8. ทำการนำ Count หาค่าด้วยเวลาเพื่อหาความเร็วของใบพัดกังหันลม และตกแต่งหน้าจอ แสดงผล ดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 โปรแกรม LabVIEW พร้อมใช้งาน

อ้างอิง

[1] <http://www.repository.mutt.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/1064/1271>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบการทำงานของใบพัดกังหันลม

4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบการทำงานของใบพัดกังหันลม โดยมีการทดลองที่ความเร็วลมต่างๆ และใบพัดแบบต่างๆ โดยใช้ Photo Sensor เพื่อวัดความเร็วรอบของใบพัดกังหันลม และเขียนโปรแกรมเพื่อนำผลของ Photo Sensor มาแสดงผลผ่านทางโปรแกรม LabVIEW

4.2 เซนเซอร์

ในการวัดความเร็วรอบของใบพัดกังหันลมนั้นสามารถที่จะวัดได้หลายแบบ ในที่นี่ได้เลือกใช้ Photo Sensor แล้วนำมาต่อวงจรต่อเข้ากับ DAQ เพื่อมาต่อดูผลในโปรแกรม LabVIEW ต่อไปตัวอย่างเซนเซอร์แสดงดังรูปที่ 4.1



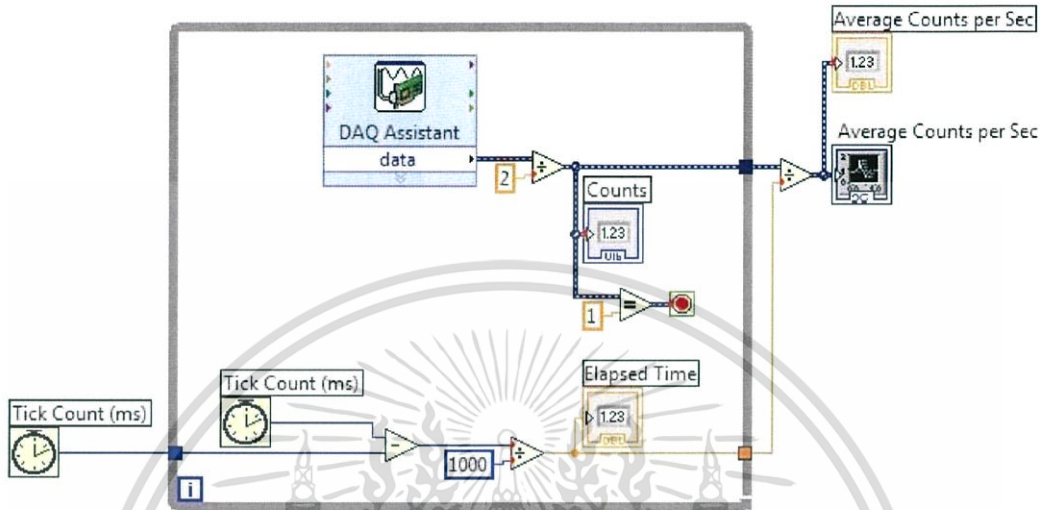
รูปที่ 4.1 Photo Sensor EE-SX673A

(<https://www.digikey.com/product-detail/en/omron-automation-and-safety/EE-SX673/OR549-ND/40895>)

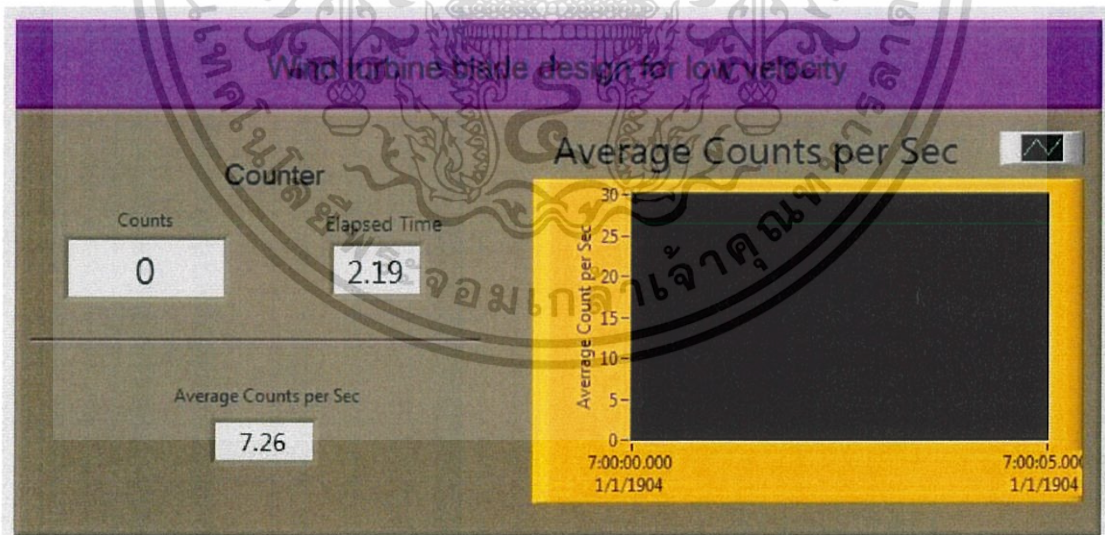
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 โปรแกรม LabVIEW

นำค่าที่ได้จาก Photo Sensor มาแสดงผลในโปรแกรม LabVIEW ที่ทำการเขียนโปรแกรมไว้ ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 LabVIEW 1



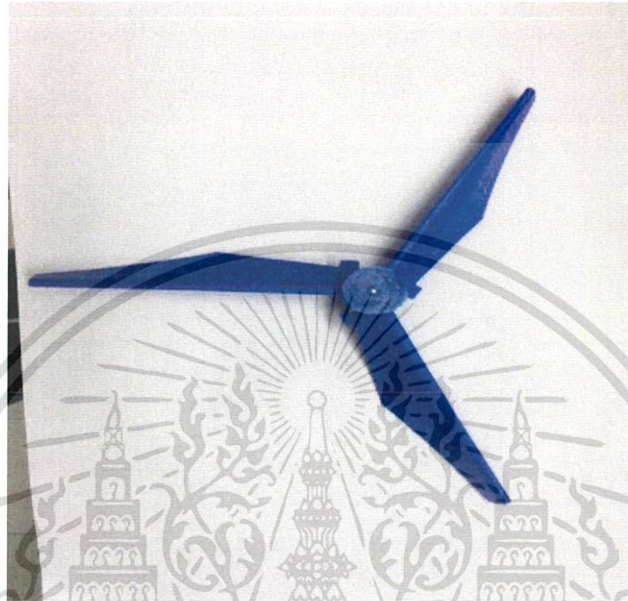
รูปที่ 4.3 LabVIEW 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ใบกังหันลมแบบต่างๆ ที่นำมาทดสอบ

ใบพัดที่นำมาทดสอบทั้งหมดมี 4 ชนิด ดังต่อไปนี้

ใบพัดแบบ A [1]



รูปที่ 4.4 ใบพัดแบบ A

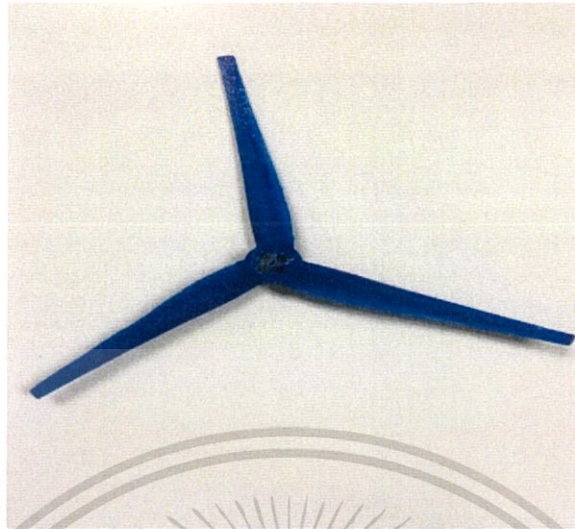
ใบพัดแบบ B [2]



รูปที่ 4.5 ใบพัดแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบพัดแบบ C [3]



รูปที่ 4.6 ใบพัดแบบ C

ใบพัดแบบ D (ออกแบบเอง)



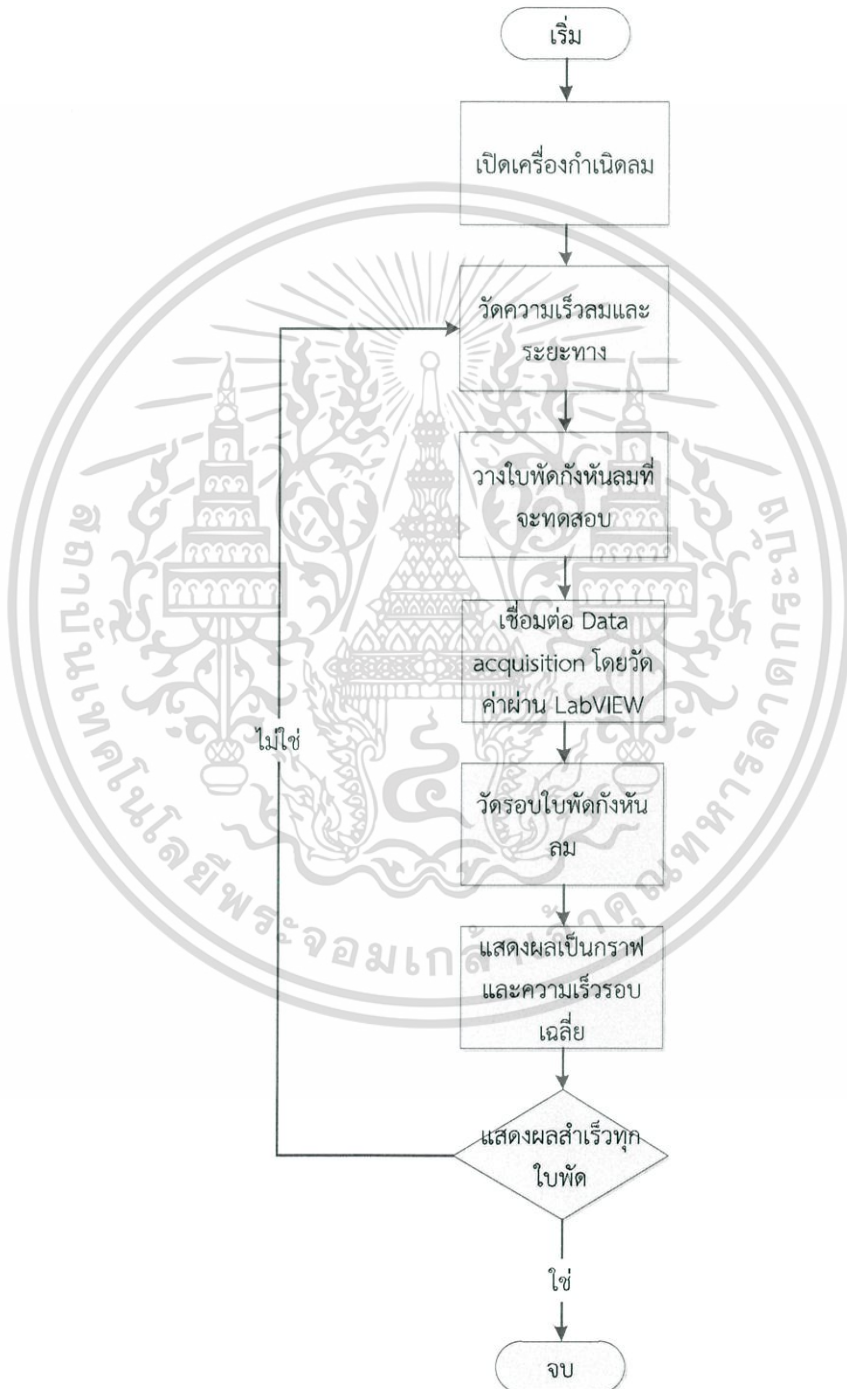
รูปที่ 4.7 ใบพัดแบบ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการทดสอบผ่าน LabVIEW

การต่อ LabVIEW เป็นการนำค่าจาก Photo Sensor มาแสดงผล

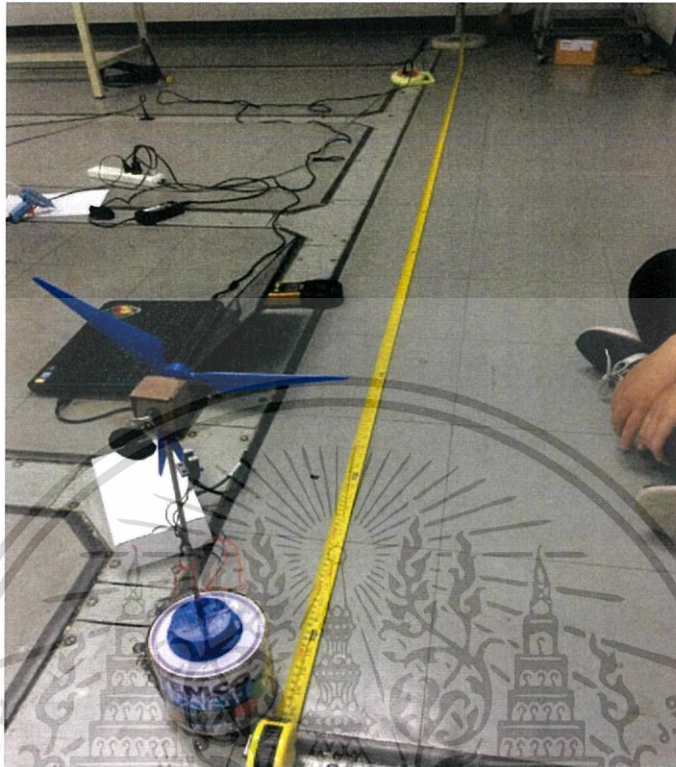
Flowchart แสดงขั้นตอนการทดสอบ



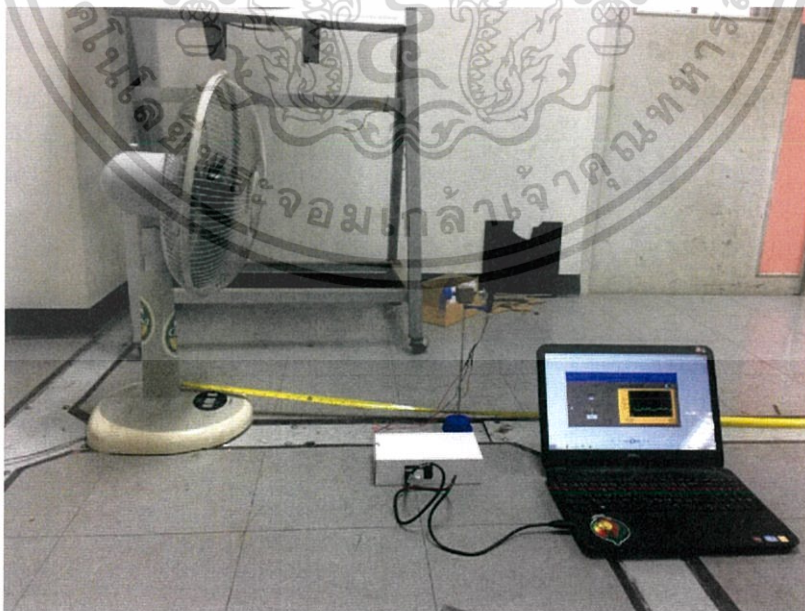
รูปที่ 4.8 Flowchart แสดงขั้นตอนการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเตรียมการอุปกรณ์และสถานที่



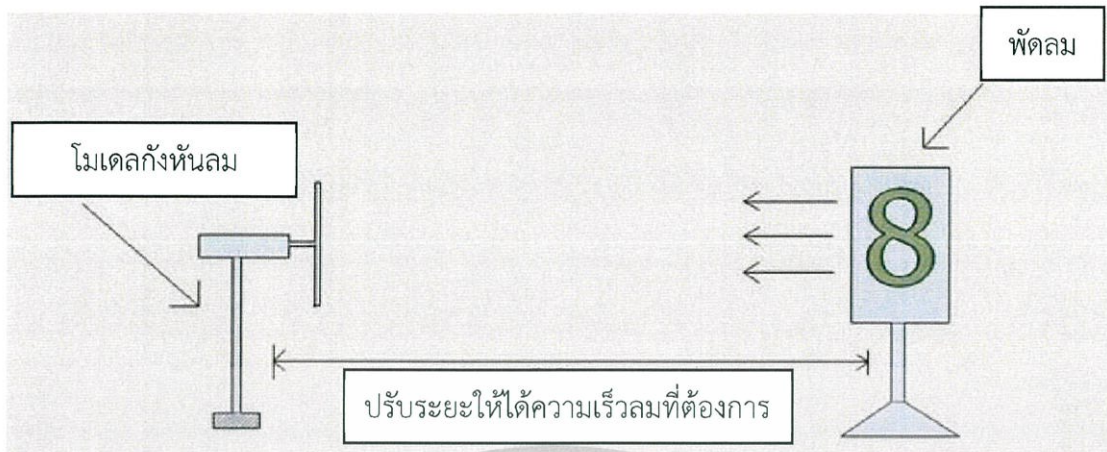
รูปที่ 4.9 เตรียมการทำการทดสอบ 1



รูปที่ 4.10 เตรียมการทำการทดสอบ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดความเร็วลมที่ระยะทางต่างๆ ได้ผลตามตารางนี้การวัดค่าจะอยู่ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.11 โมเดลจำลองการทดสอบ

จากรูปที่ 4.11 แสดงขั้นตอนการทดสอบใบพัดกังหันลมแต่ละชนิดที่ความเร็วลมตั้งแต่ 1-5.5 m/s แสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าความเร็วลมที่ระยะต่างๆ

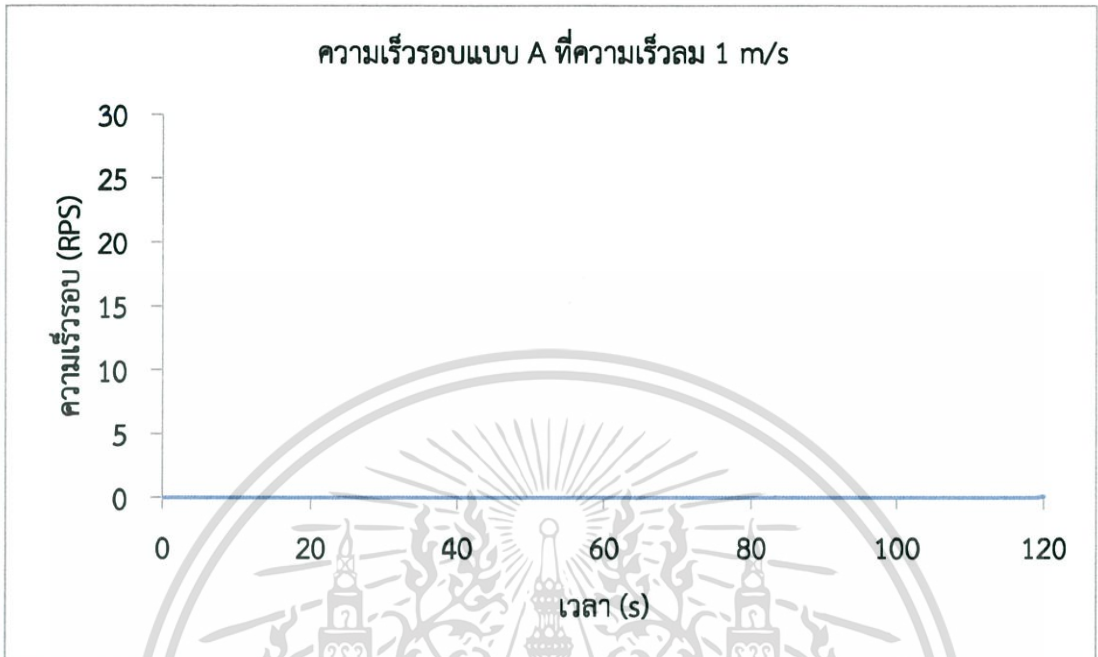
ระยะทาง	470 cm	370 cm	250 cm	210 cm	160 cm	110 cm	80 cm	70 cm	50 cm	40 cm
ความเร็ว ลม	1 m/s	1.5 m/s	2 m/s	2.5 m/s	3 m/s	3.5 m/s	4 m/s	4.5 m/s	5 m/s	5.5 m/s

ตารางที่ 4.1 แสดงช่วงความเร็วลมที่ใช้ทดสอบใบพัดกังหันลม (1-5.5 m/s) ซึ่งเป็นช่วงความเร็วลมในพื้นที่ส่วนมากของประเทศไทย

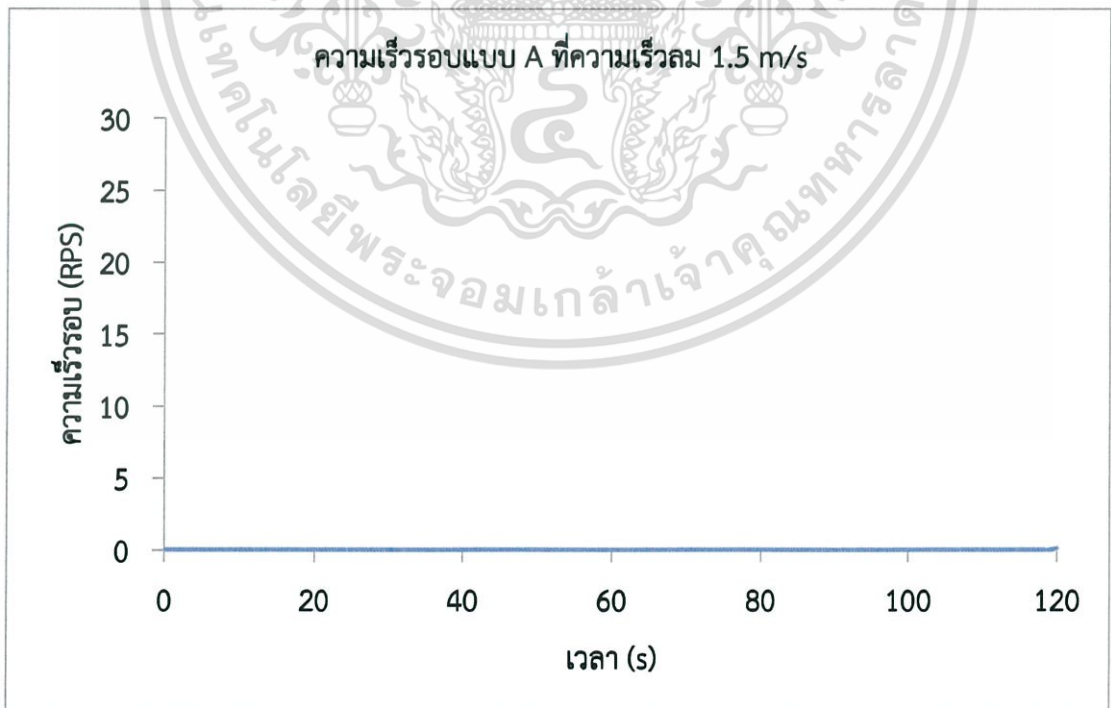
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลการทดสอบการทำงานของใบพัดกังหันลมดังต่อไปนี้

- ใบพัดกังหันลมแบบ Type A

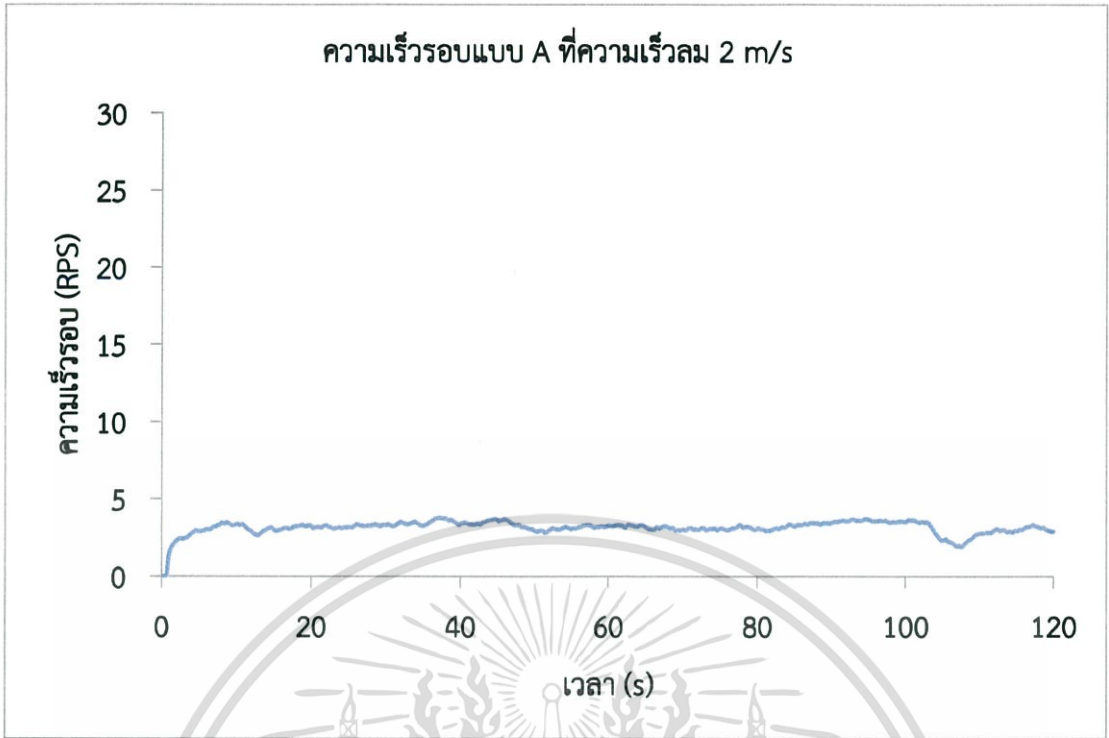


รูปที่ 4.12 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 1 m/s

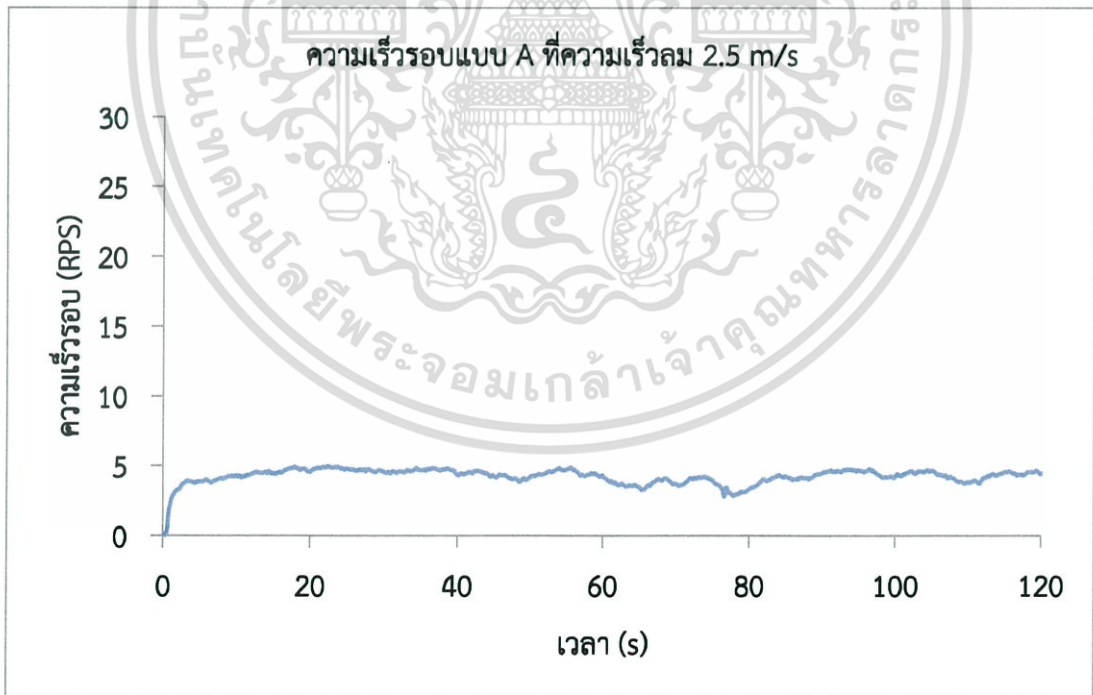


รูปที่ 4.13 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

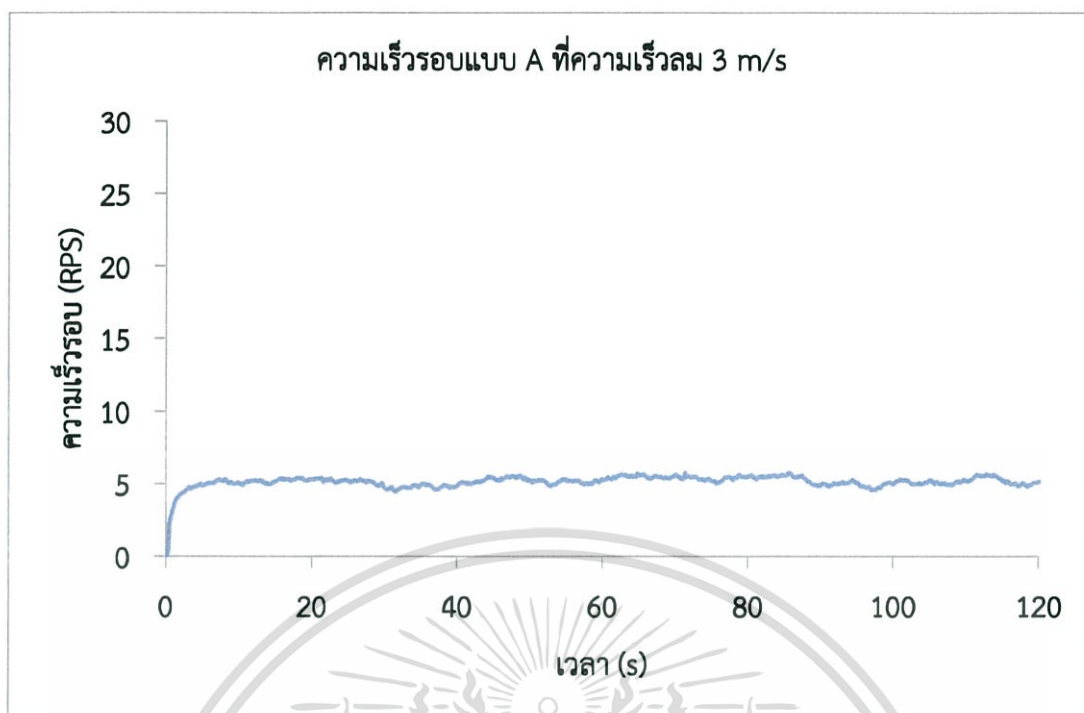


รูปที่ 4.14 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 2 m/s

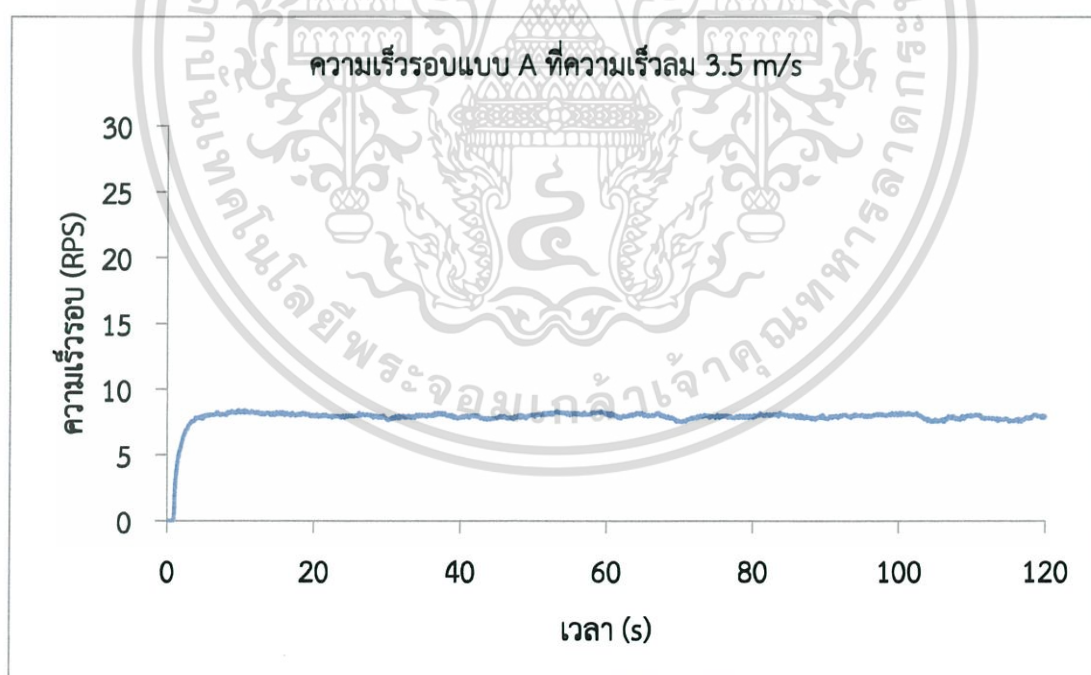


รูปที่ 4.15 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 2.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

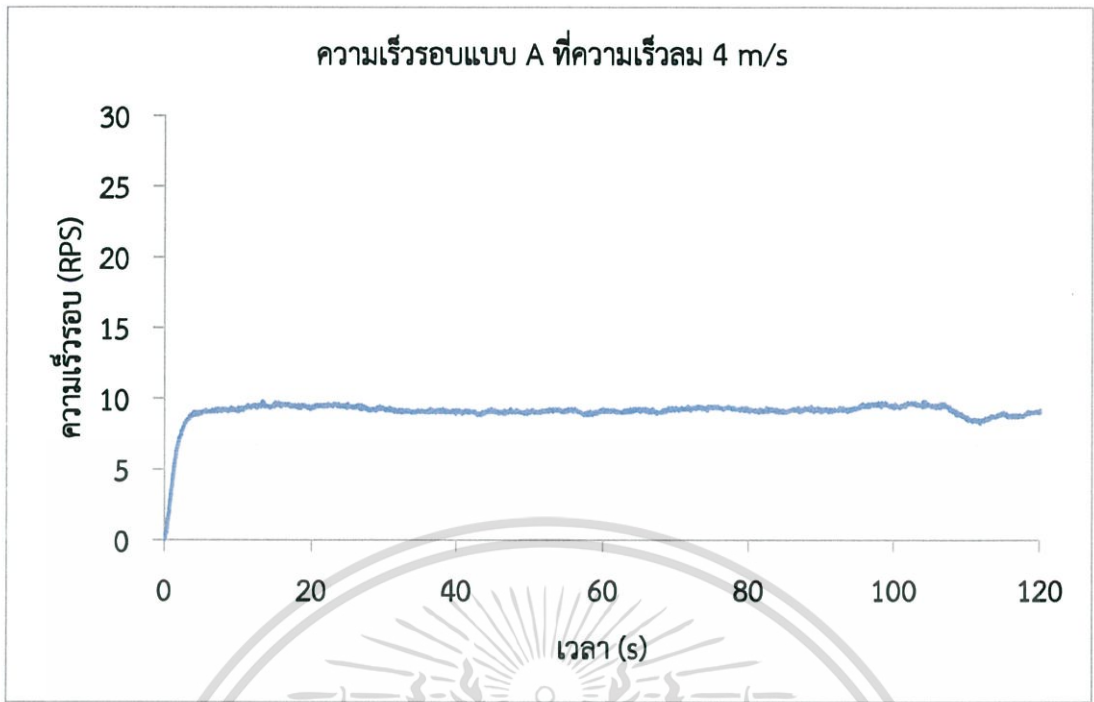


รูปที่ 4.16 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 3 m/s

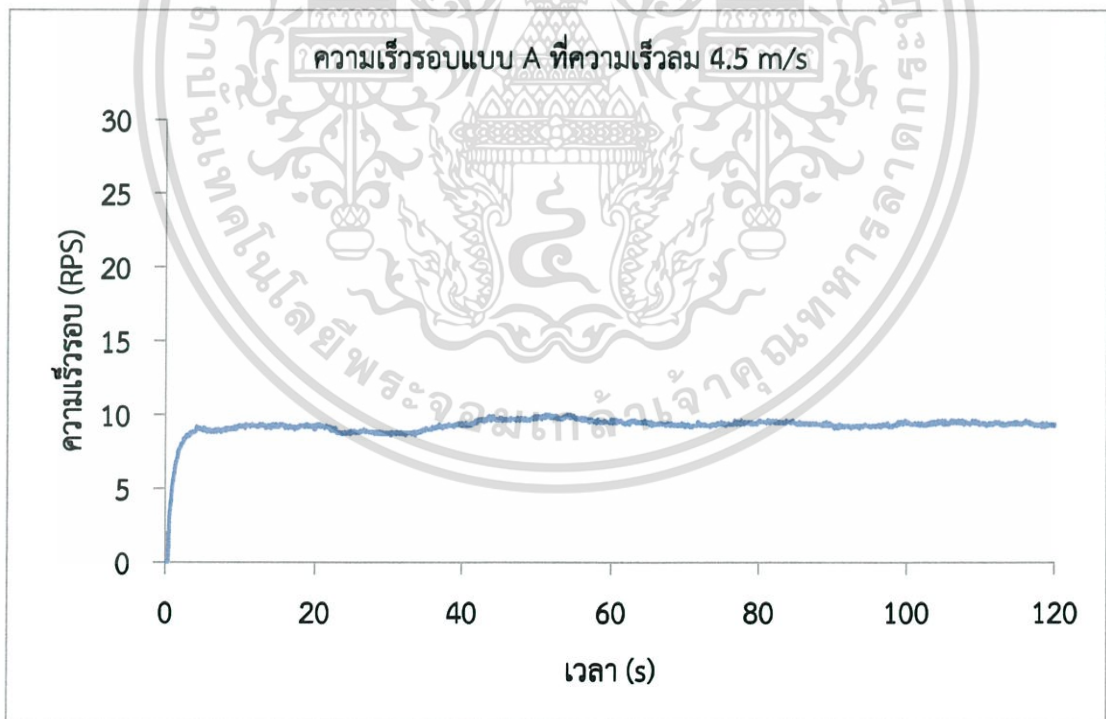


รูปที่ 4.17 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 3.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

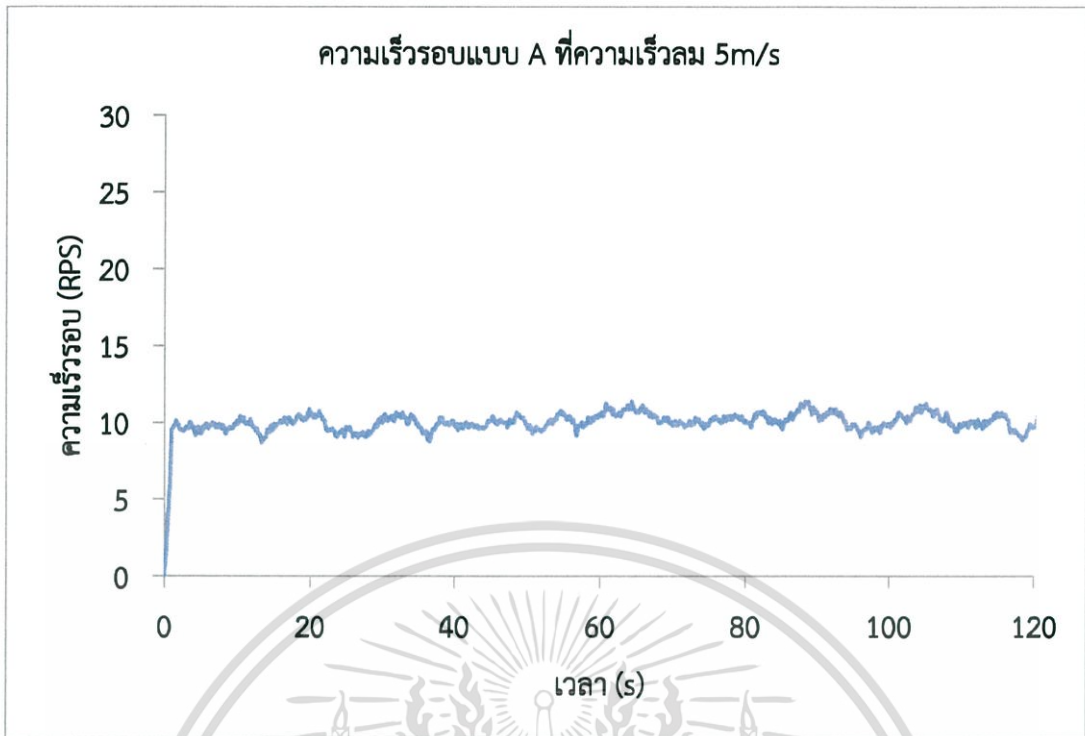


รูปที่ 4.18 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 4 m/s

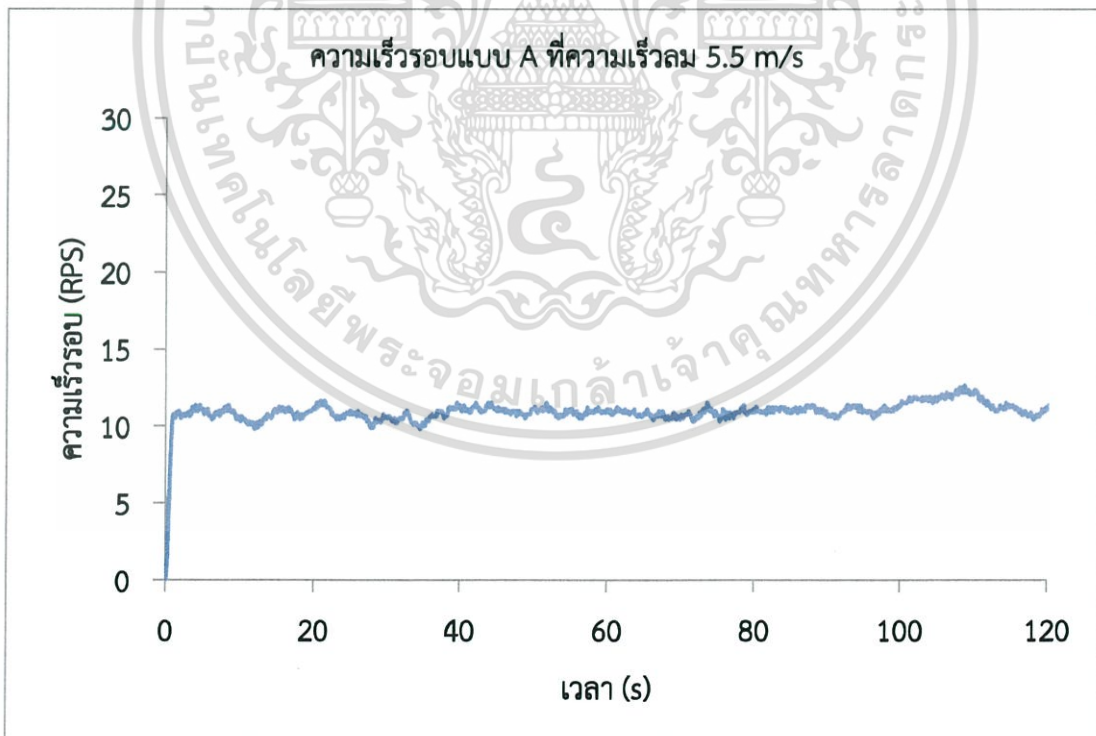


รูปที่ 4.19 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 4.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 5 m/s



รูปที่ 4.21 ใบพัดแบบ A ที่ความเร็วลม 5.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบใบพัดกังหันลมแบบ Type A ใบพัดกังหันลมเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 2 m/s ด้วยความเร็วรอบประมาณ 2.92 RPS และหมุนเร็วขึ้นไปเรื่อยๆ ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 สรุปผลแบบ A

ความเร็วลม (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
ความเร็วรอบ (RPS)	0.00	0.00	2.92	4.46	5.13	7.87	9.01	9.35	10.53	11.11

• ใบพัดกังหันลมแบบ Type B

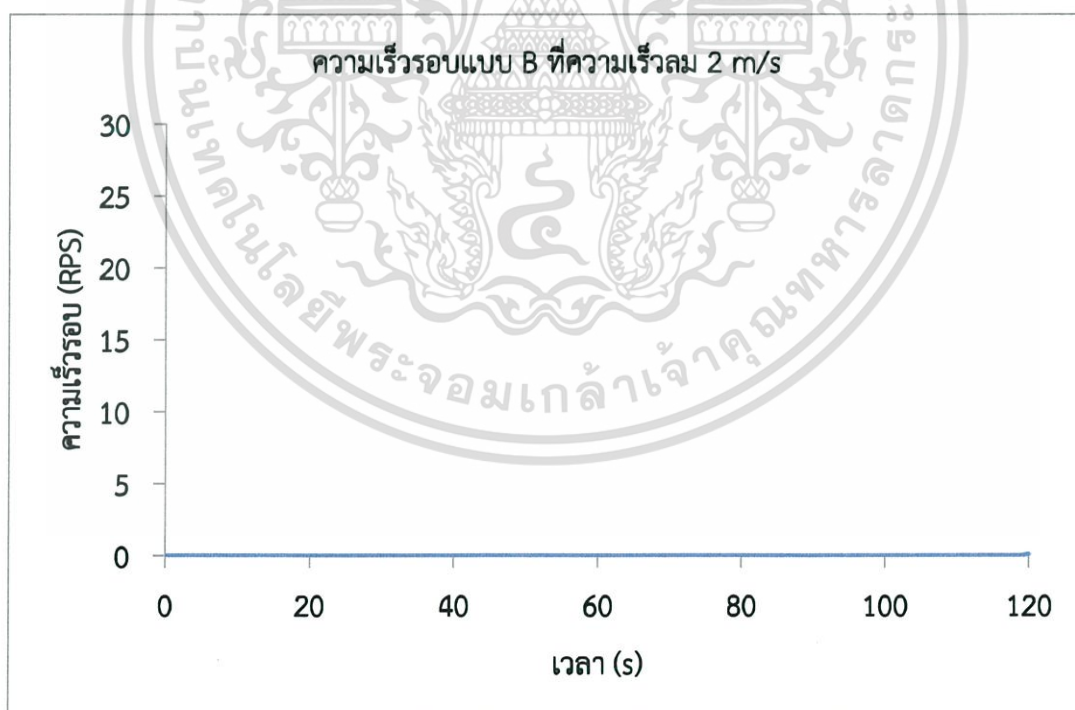


รูปที่ 4.22 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 1 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

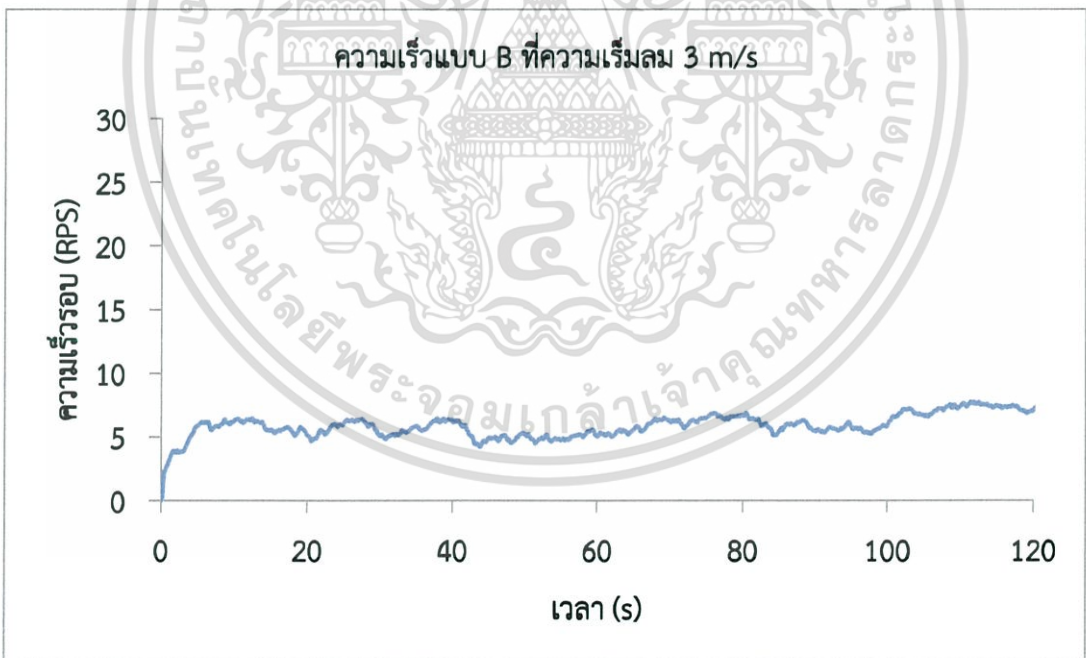
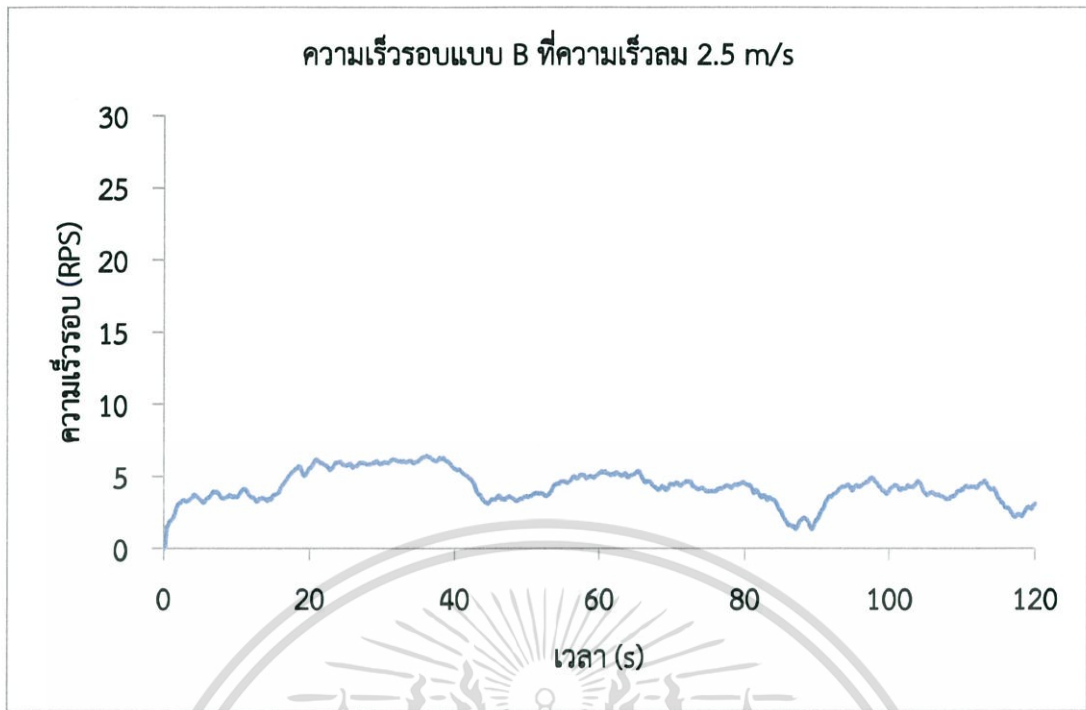


รูปที่ 4.23 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 1.5 m/s



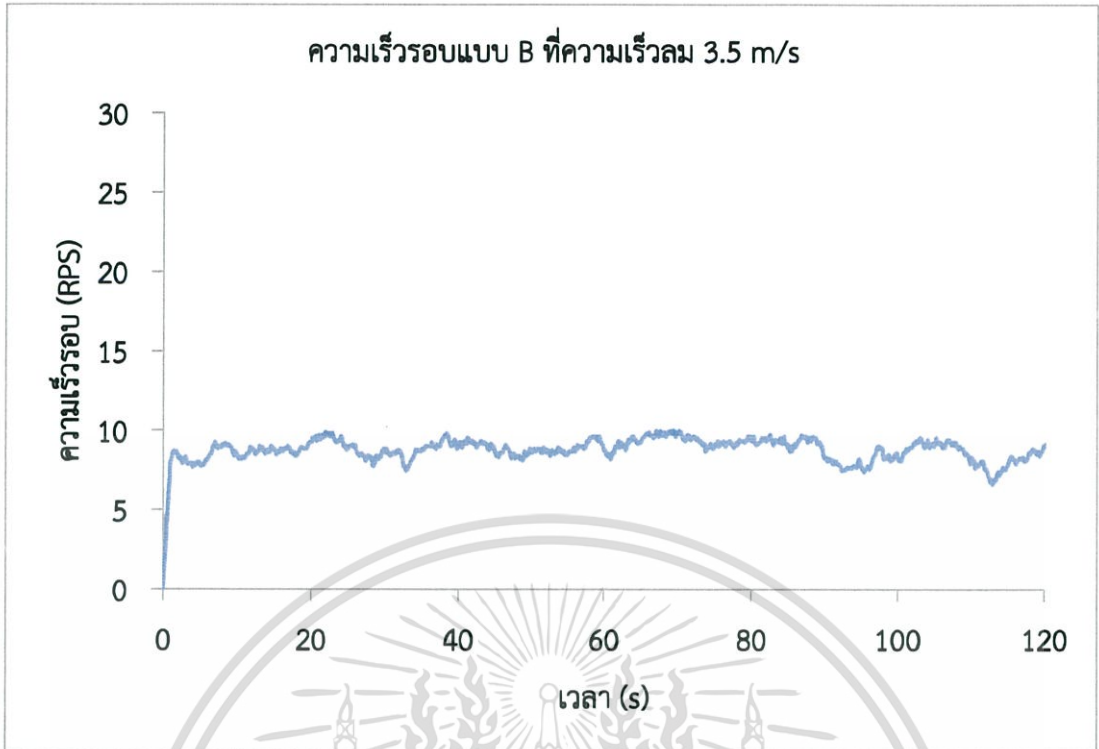
รูปที่ 4.24 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 2 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

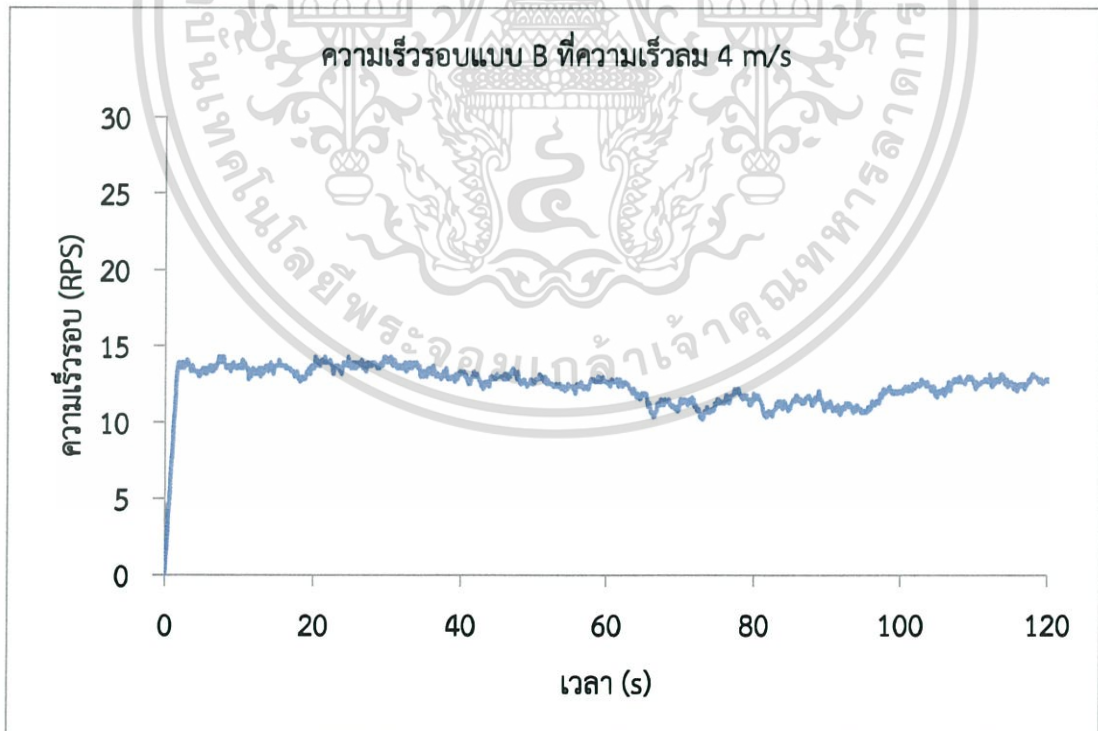


รูปที่ 4.26 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

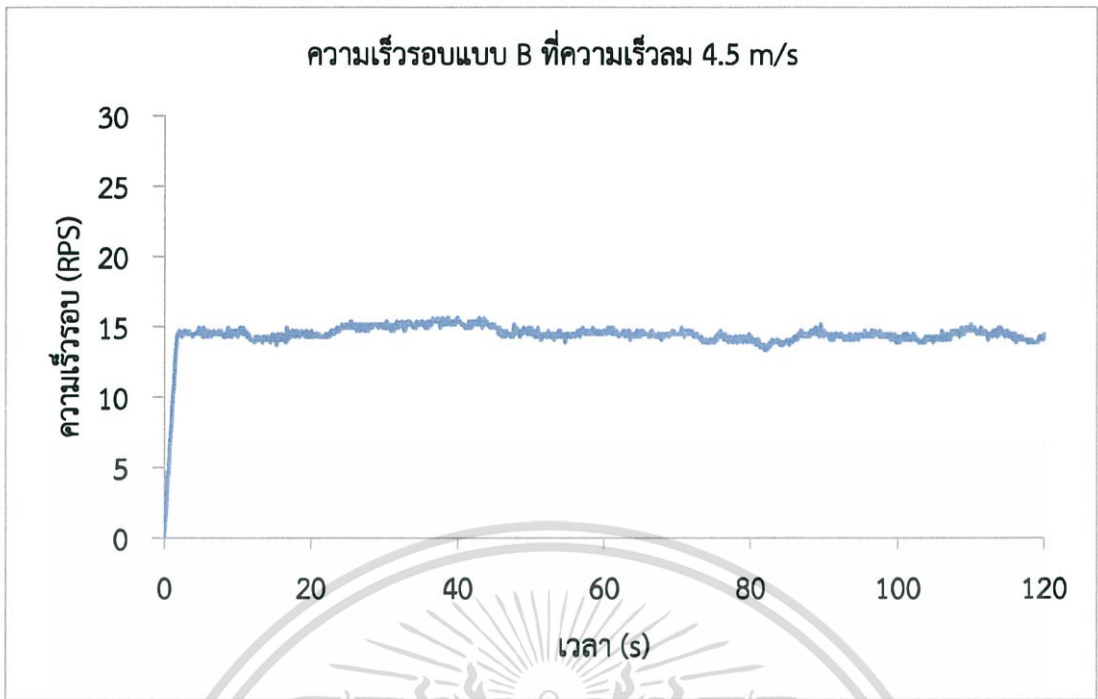


รูปที่ 4.27 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 3.5 m/s

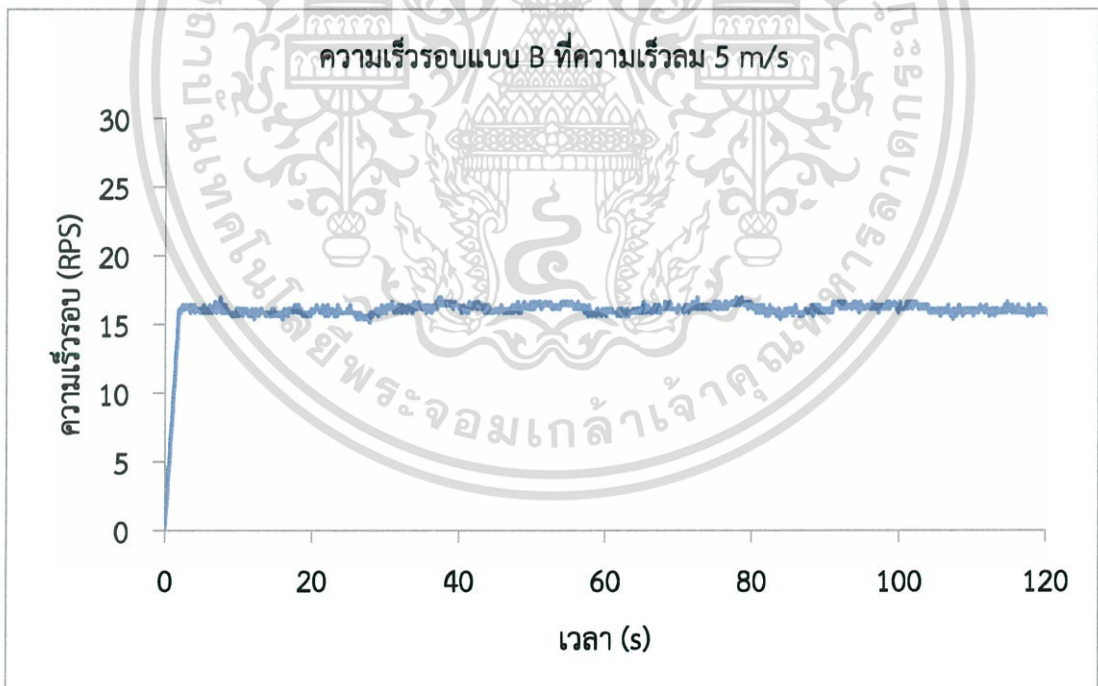


รูปที่ 4.28 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 4 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

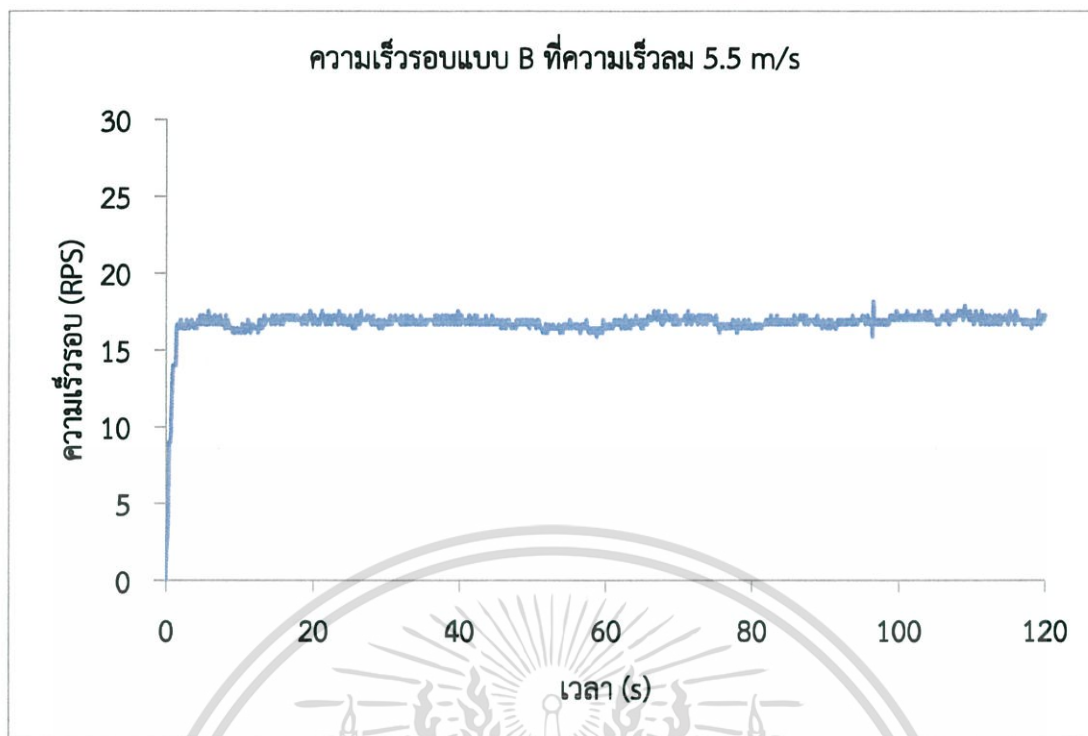


รูปที่ 4.29 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 4.5 m/s



รูปที่ 4.30 ใบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ไบพัดแบบ B ที่ความเร็วลม 5.5 m/s

สรุปผลการทดสอบไบพัดกึ่งหันลมแบบ Type B ไบพัดกึ่งหันลมเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 2.5 m/s ด้วยความเร็วรอบประมาณ 3.11 RPS และหมุนเร็วขึ้นไปเรื่อยๆ ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตามตารางต่อไปนี้

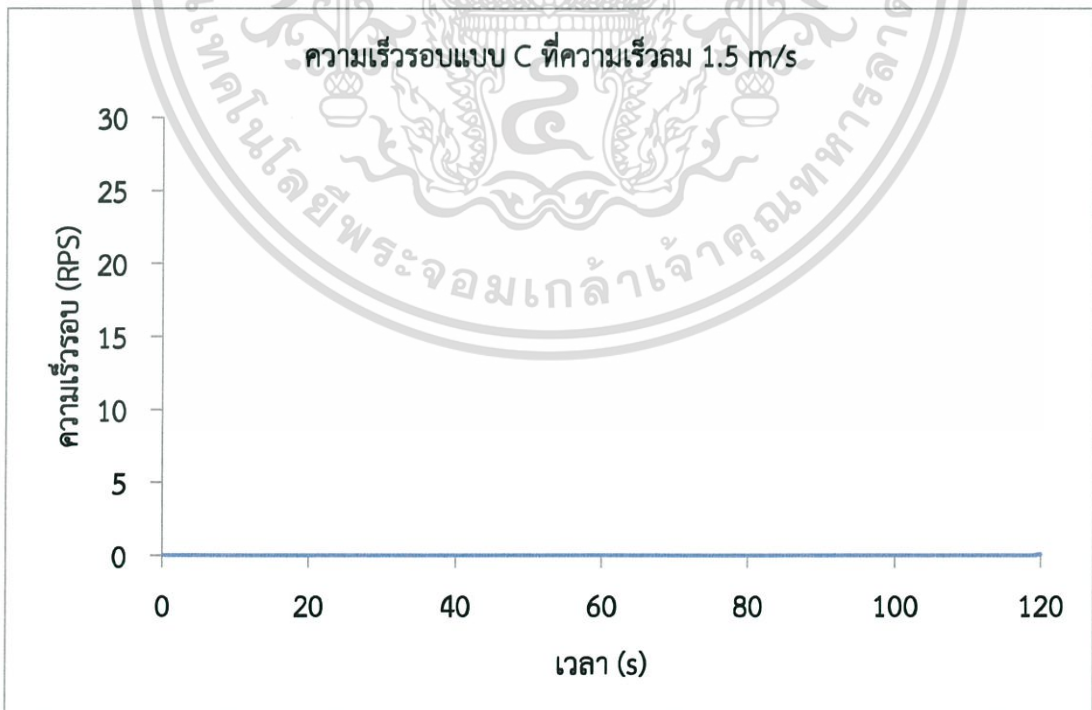
ตารางที่ 4.3 สรุปผลแบบ B

ความเร็วลม (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
ความเร็วรอบ (RPS)	0.00	0.00	0.00	3.11	7.30	9.17	12.66	14.08	16.13	16.95

- ไบพัตกึ่งทันสมัยแบบ Type C

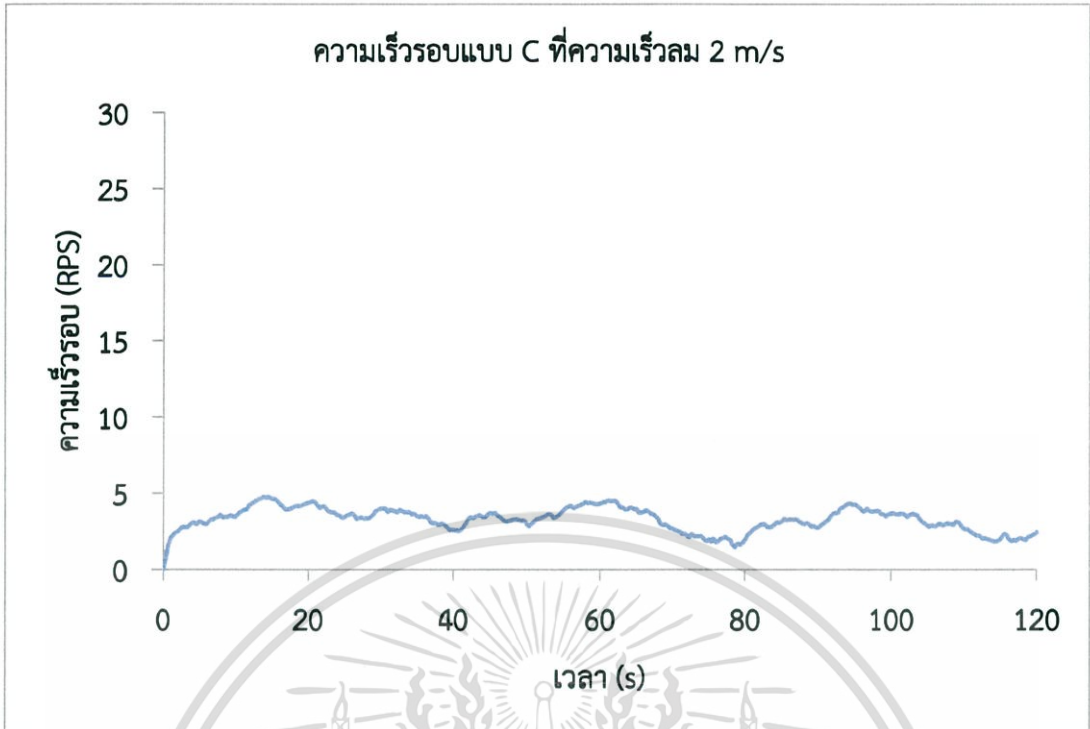


รูปที่ 4.32 ไบพัตแบบ C ที่ความเร็วลม 1 m/s

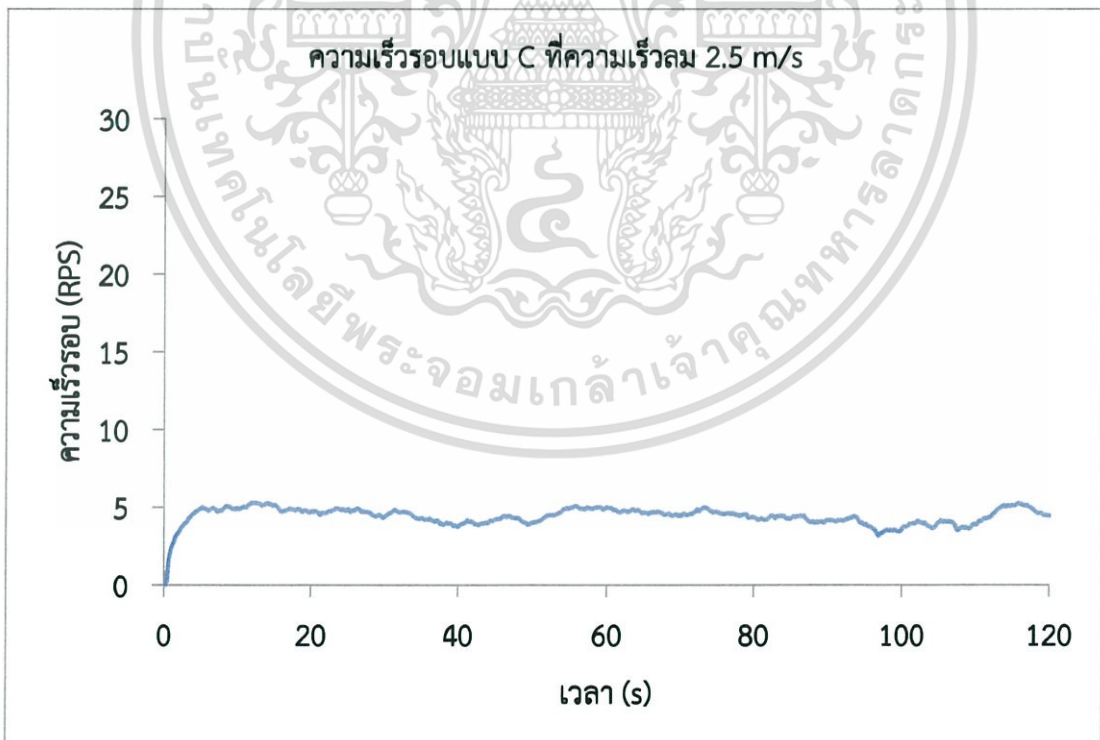


รูปที่ 4.33 ไบพัตแบบ C ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

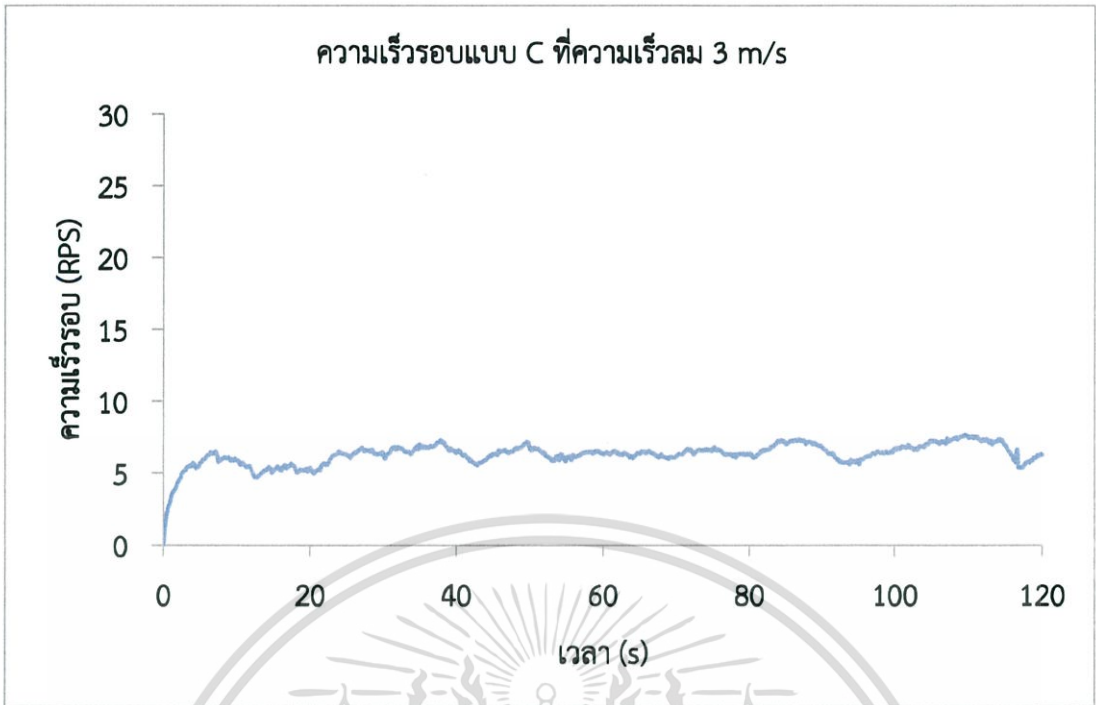


รูปที่ 4.34 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 2 m/s

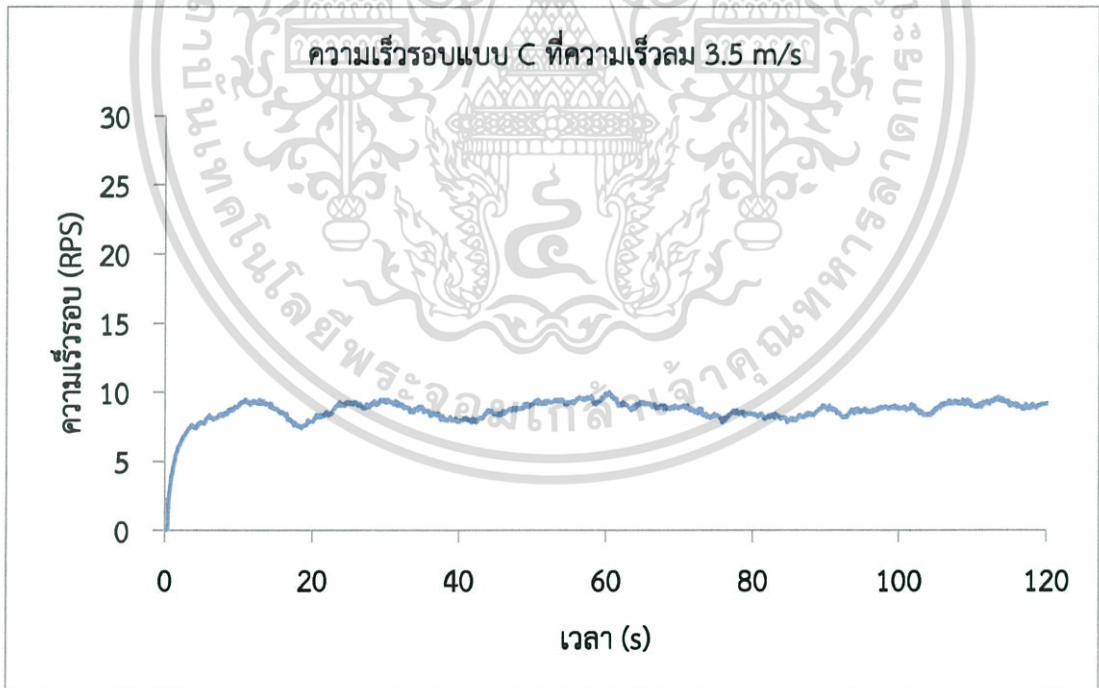


รูปที่ 4.35 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 2.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

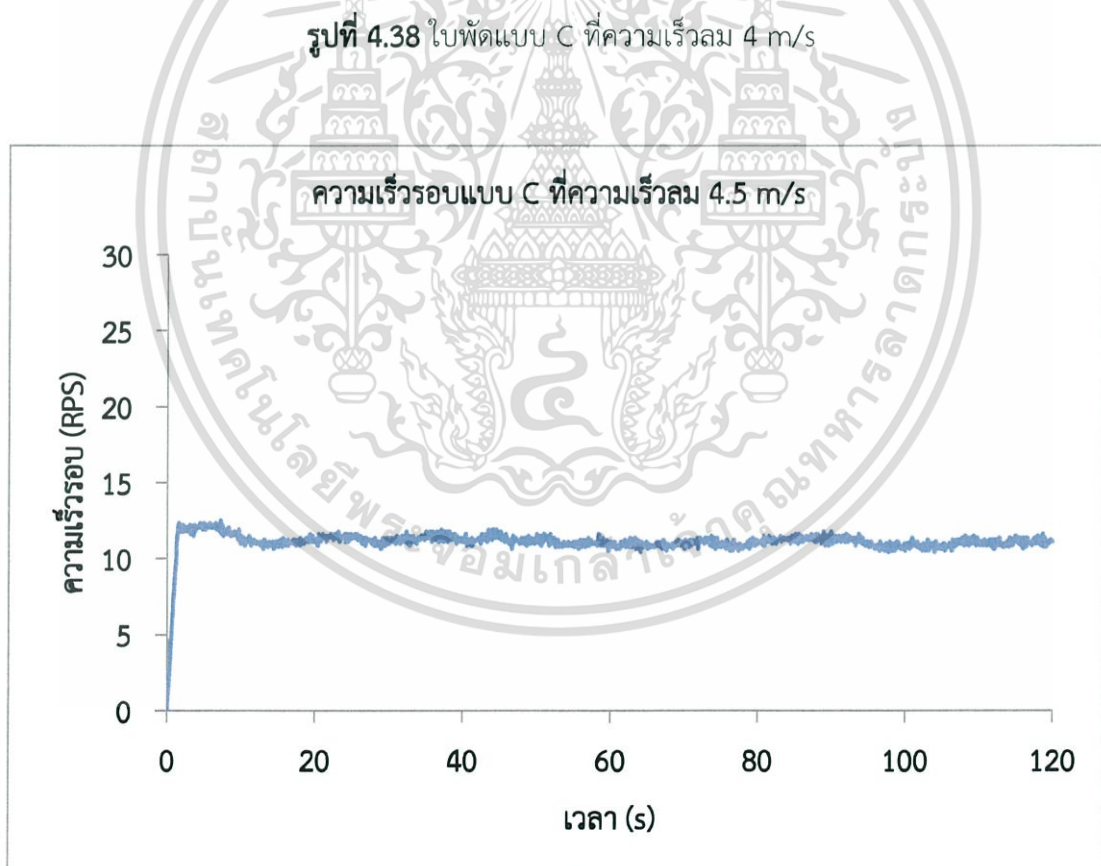
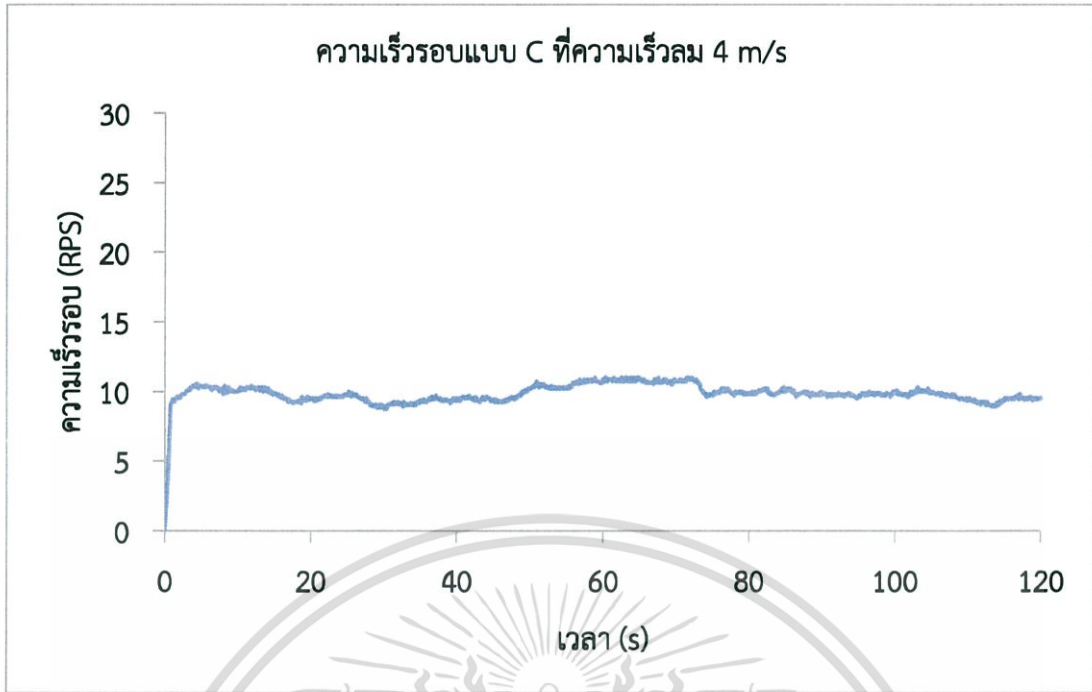


รูปที่ 4.36 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 3 m/s



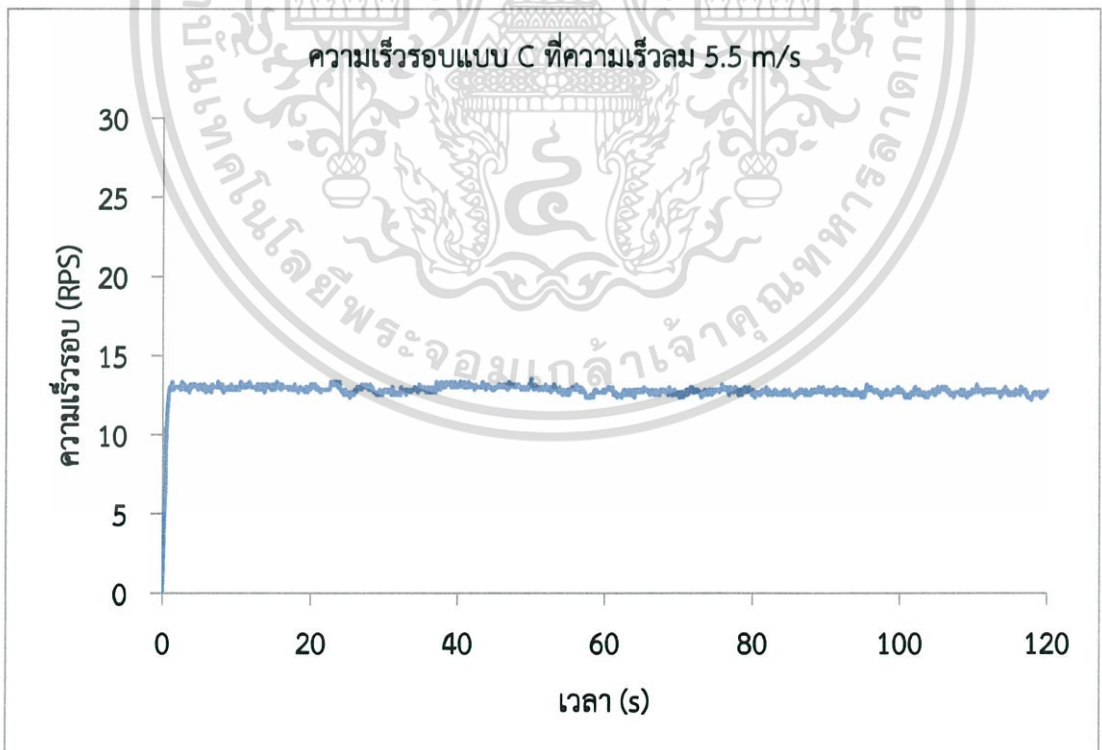
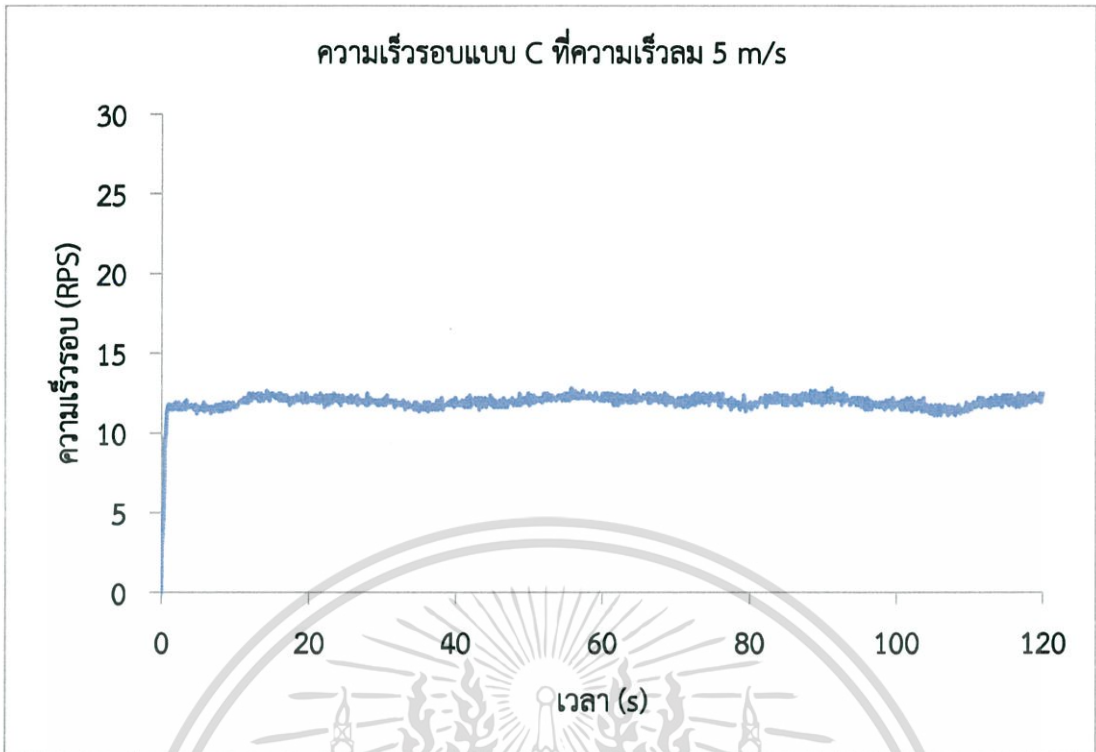
รูปที่ 4.37 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 3.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 4.5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ใบพัดแบบ C ที่ความเร็วลม 5.5 m/s

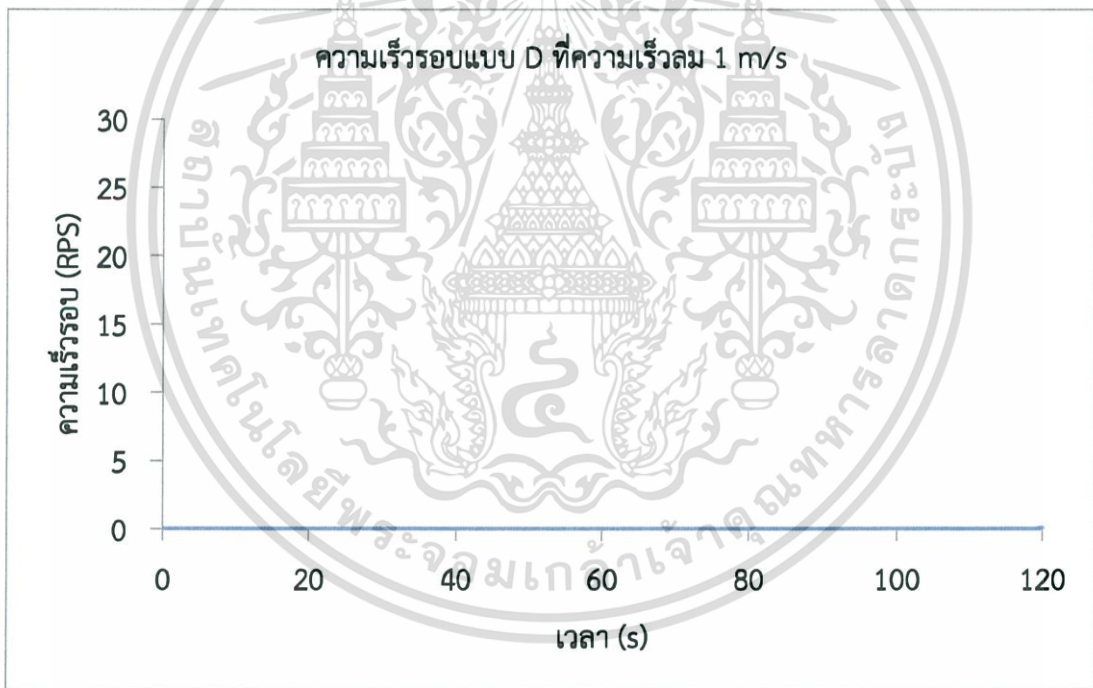
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดสอบใบพัดกังหันลมแบบ Type C ใบพัดกังหันลมเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 2 m/s ด้วยความเร็วรอบประมาณ 2.51 RPS และหมุนเร็วขึ้นไปเรื่อยๆ ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 สรุปผลแบบ C

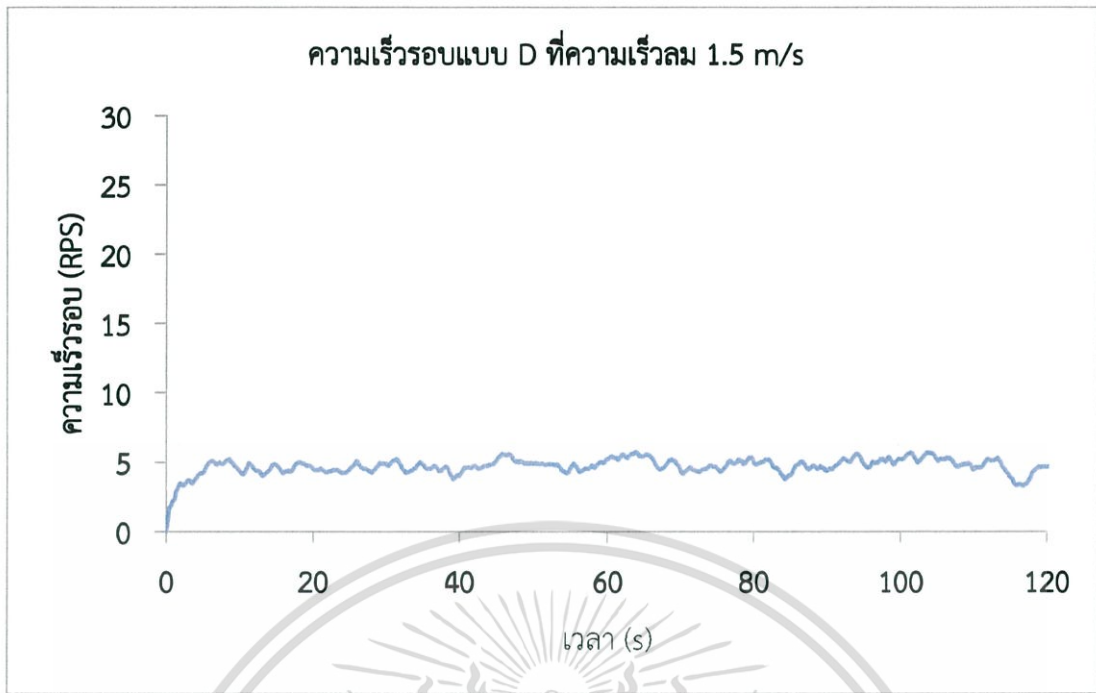
ความเร็วลม (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
ความเร็วรอบ (RPS)	0.00	0.00	2.51	4.44	6.37	9.17	9.62	11.36	12.05	12.82

- ใบพัดกังหันลมแบบ Type D (ออกแบบเอง)

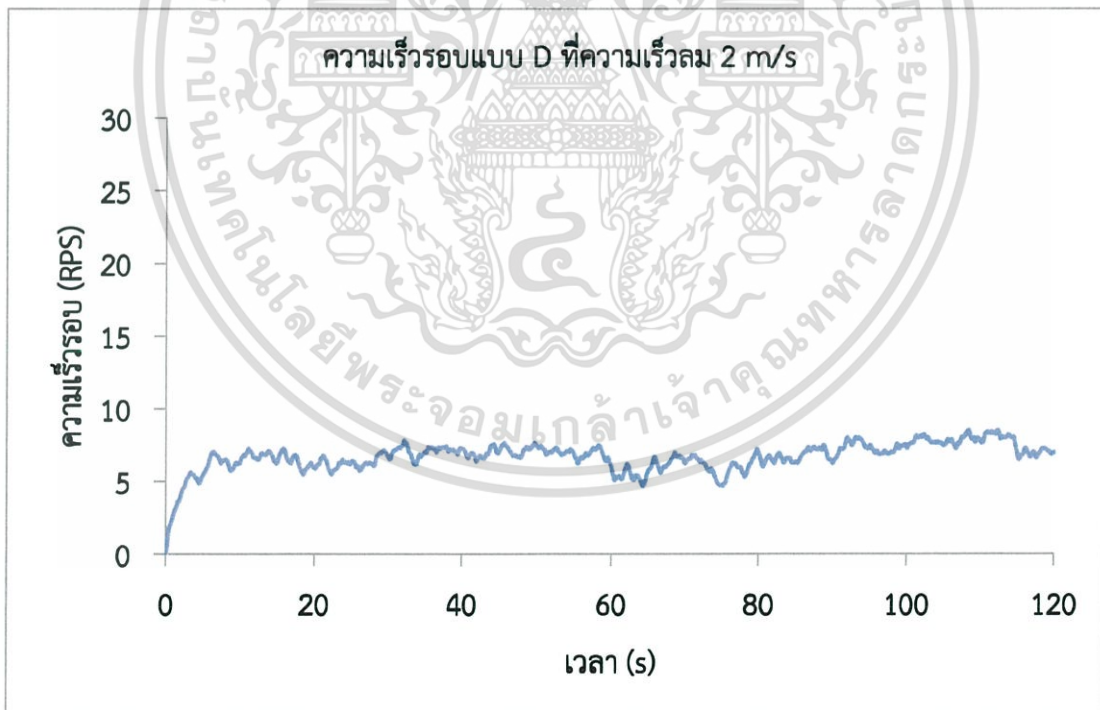


รูปที่ 4.42 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 1 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

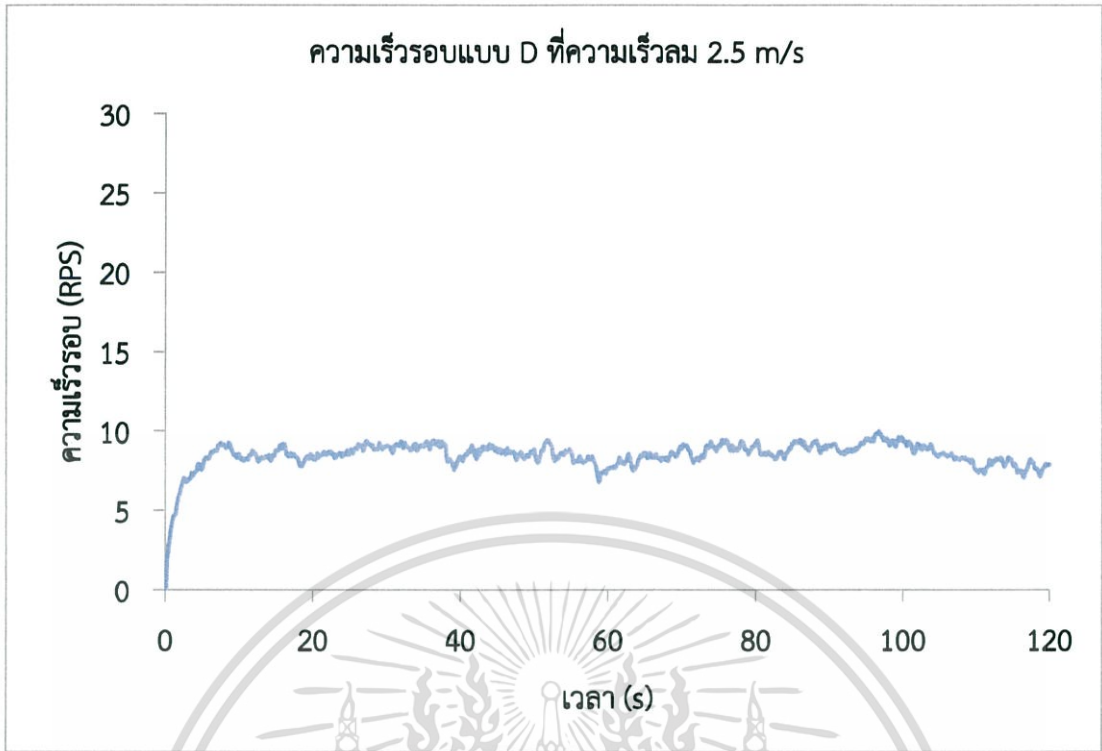


รูปที่ 4.43 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 1.5 m/s

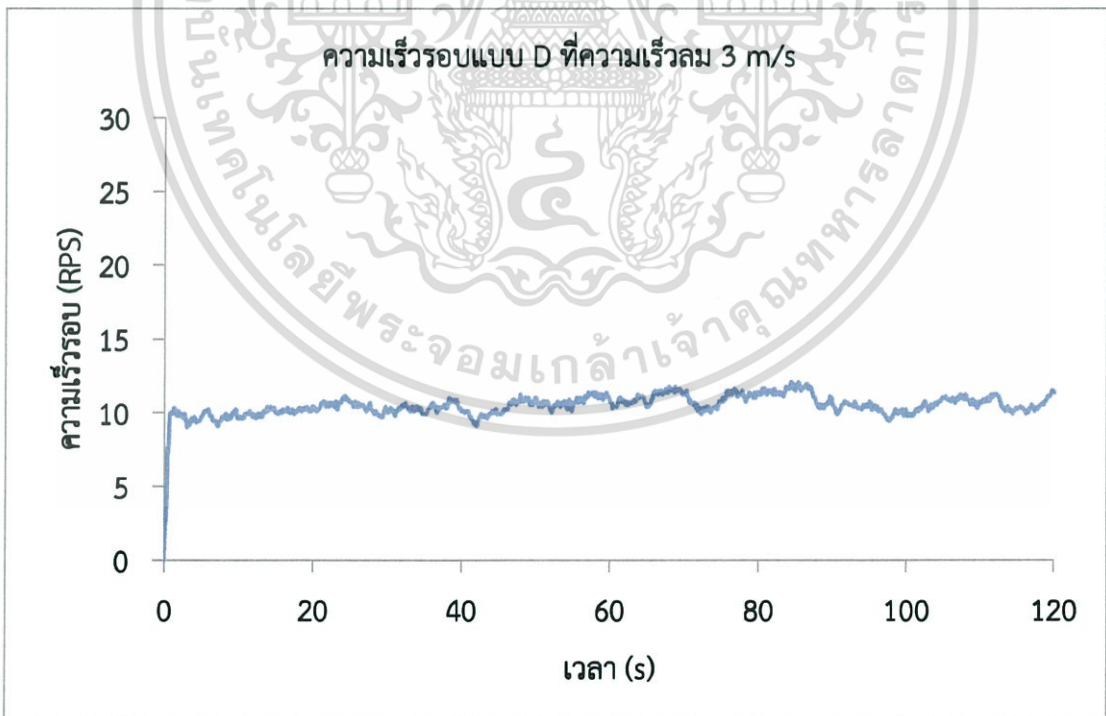


รูปที่ 4.44 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 2 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

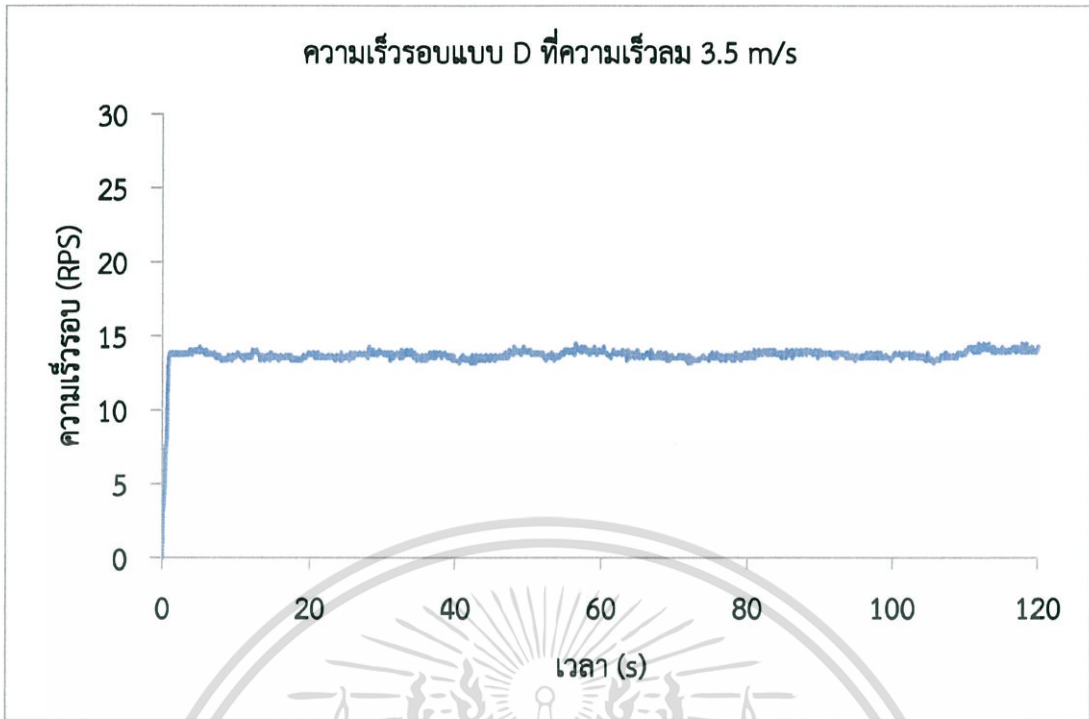


รูปที่ 4.45 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 2.5 m/s

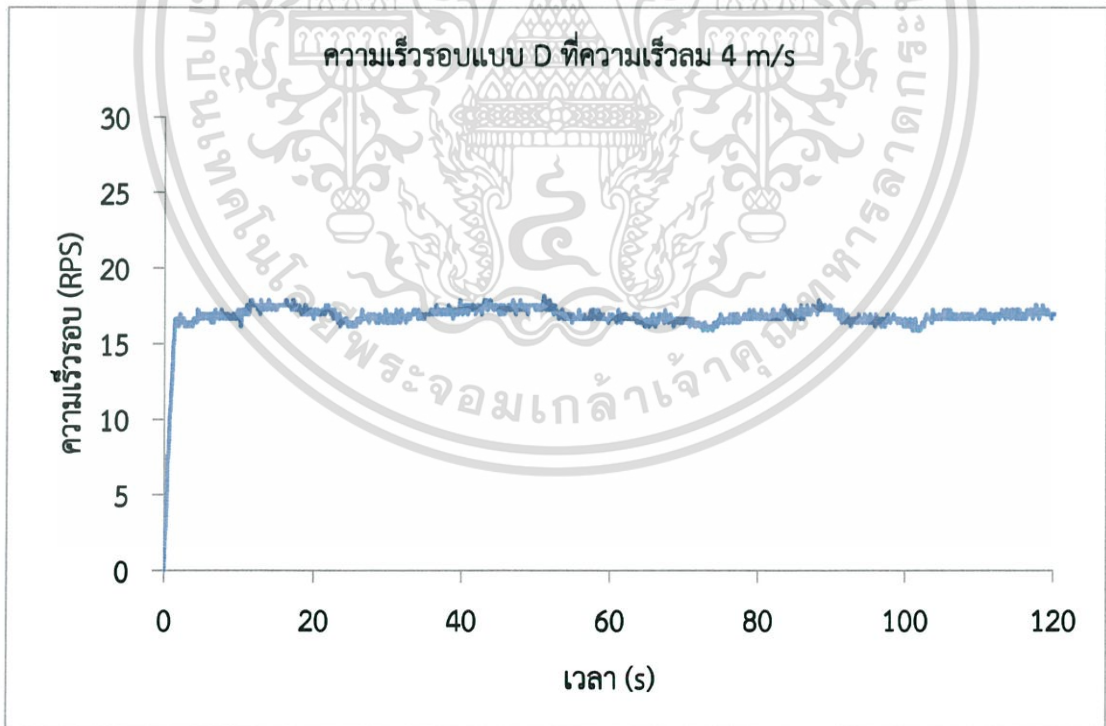


รูปที่ 4.46 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 3 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

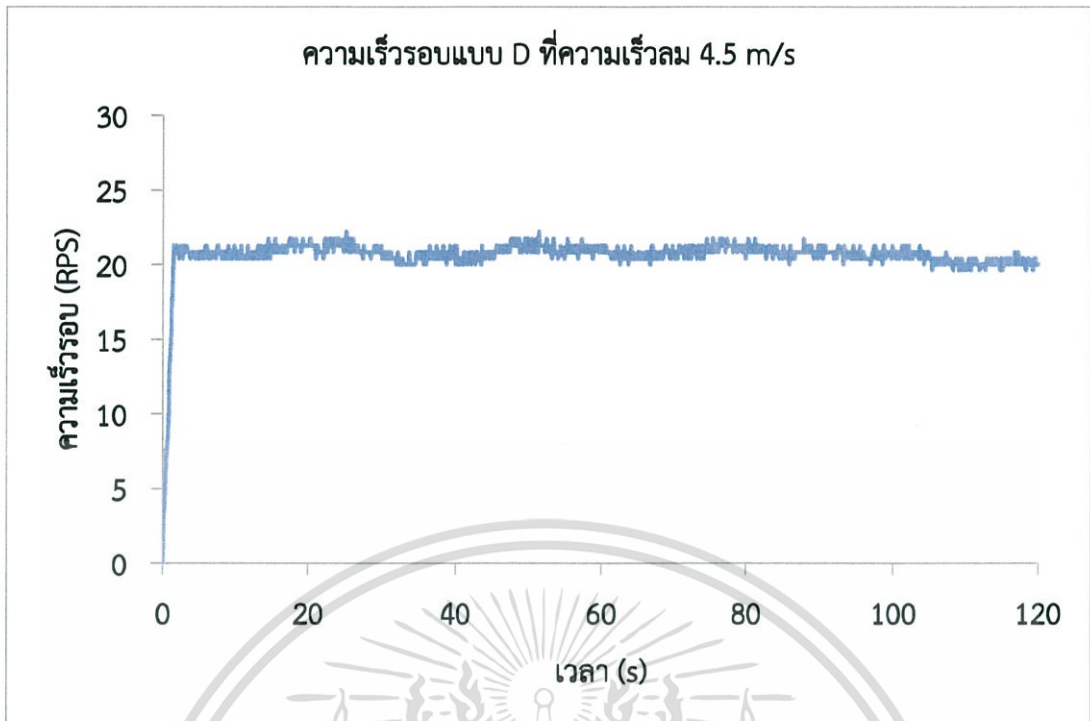


รูปที่ 4.47 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 3.5 m/s

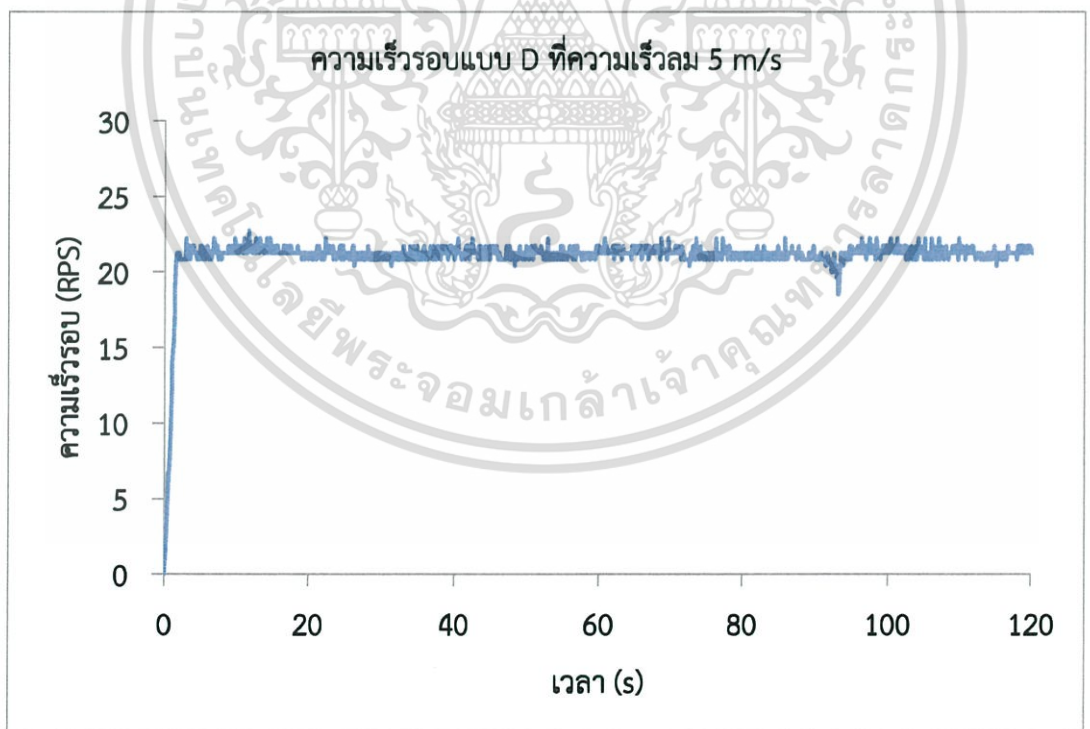


รูปที่ 4.48 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 4 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

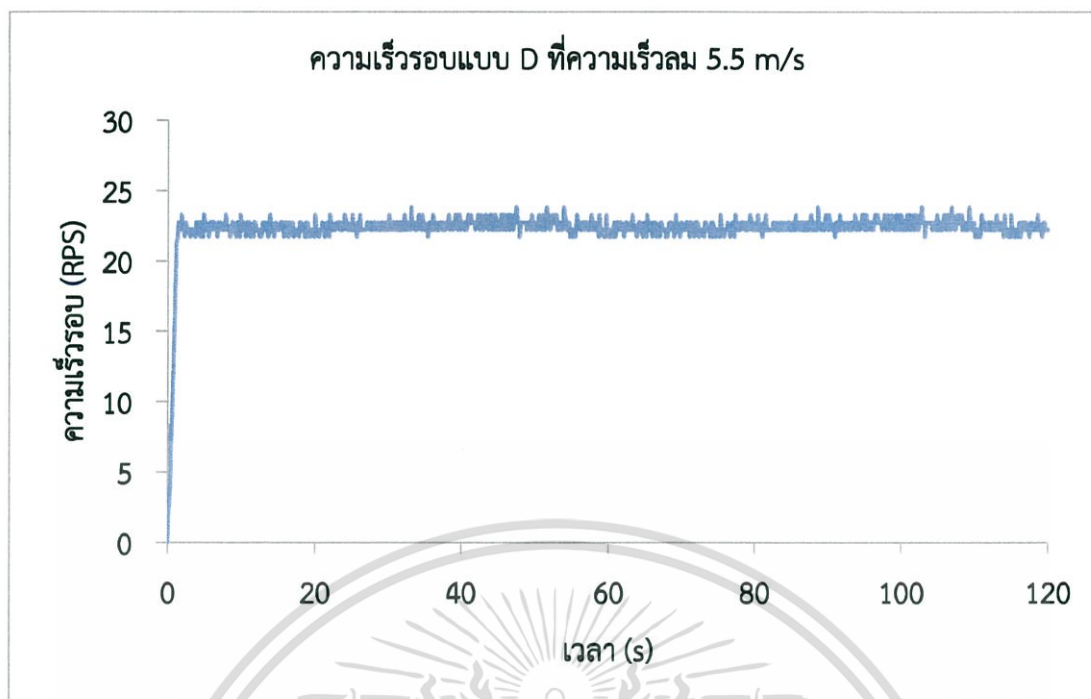


รูปที่ 4.49 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 4.5 m/s



รูปที่ 4.50 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 5 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



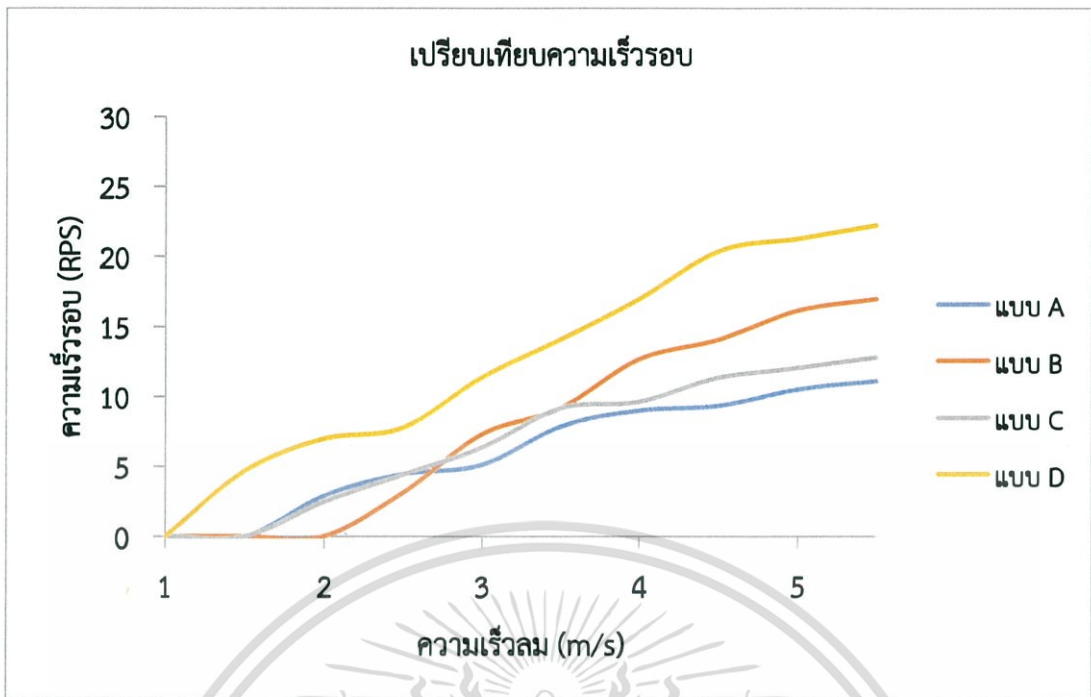
รูปที่ 4.51 ใบพัดแบบ D ที่ความเร็วลม 5.5 m/s

สรุปผลการทดสอบใบพัดกังหันลมแบบ Type D ใบพัดกังหันลมเริ่มหมุนที่ความเร็วลม 1.5 m/s ด้วยความเร็วรอบประมาณ 4.69 RPS และหมุนเร็วขึ้นไปเรื่อยๆ ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นตามลำดับตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 สรุปผลแบบ D

ความเร็วลม (m/s)	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
ความเร็วรอบ (RPS)	0.00	4.69	6.99	7.75	11.36	14.08	16.95	20.41	21.28	22.22

จากผลการทดสอบเมื่อนำกราฟมาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการทำงานของใบพัดกังหันลมแต่ละชนิดแสดงได้ดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 กราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบ

จากรูปที่ 4.52 พบว่าใบพัดกังหันลมชนิด Type D ช่วงเริ่มทำงานที่ความเร็วลมต่ำที่สุด และใบพัดกังหันลมชนิด Type A และ Type C ช่วงเริ่มทำงานใกล้เคียงกัน และใบพัดกังหันลมชนิด Type B ช่วงเริ่มทำงานช้าที่สุด จากผลการทดสอบจึงพบว่าใบพัดกังหันลมชนิด Type D สามารถที่จะทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

อ้างอิง

- [1] <https://www.thingiverse.com/thing:1767153>
- [2] <https://www.thingiverse.com/thing:318777>
- [3] <https://www.thingiverse.com/thing:1857298>

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอถึงการออกแบบและจำลองโมเดลใบพัดกังหันความเร็วลมต่ำ โดยในการทดสอบแบบจำลองใบพัดกังหันความเร็วลมที่ทดสอบอยู่ในช่วง 1.0-5.5 m/s ซึ่งเป็นช่วงความเร็วลมที่เหมาะสมกับประเทศไทย จากการทดสอบเก็บค่าความเร็วรอบโดยแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW

การดำเนินงานของโครงการเรื่องการออกแบบใบพัดความเร็วลมต่ำ เริ่มโดยการเลือกแบบโครงสร้างแพนอากาศ (Air Foil) รุ่น S1223 มาจากนั้นนำแพนอากาศที่เลือกมาจำลองการไหลผ่านโปรแกรม ANSYS เพื่อทดสอบว่าแบบที่ได้เลือกมาเหมาะสมสภาพความเร็วลมต่ำหรือไม่ จากนั้นนำโครงสร้างแพนอากาศสร้างแบบจำลองขึ้นงานผ่านโปรแกรม Solid Works แล้วนำแบบจำลองในโปรแกรมมาพิมพ์ชิ้นงานออกมาโดย 3D Printer นำชิ้นงานแบบจำลองมาทดสอบโดยมี Photo Sensor รุ่น EE-SX673A ในการเก็บค่าความเร็วรอบในการหมุนส่งไปยัง DAQ (Data Acquisition) เพื่อแปลงค่าส่งไปคอมพิวเตอร์แสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจากผลการทดสอบในบทที่ 4 ได้ทดสอบเก็บค่าการหมุนของใบพัดกังหันลมแบบต่างๆ ผลที่ได้คือ ใบกังหันลมที่ออกแบบมาสามารถทำงานในช่วงความเร็วลมต่ำได้ดีกว่าแบบอื่นที่นำมาเปรียบเทียบ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ในส่วนขั้นตอนการพิมพ์ใบพัดกังหันลมด้วย 3D Printer ผู้วิจัยยังขาดความชำนาญในการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับแบบจำลองทำให้ใช้เวลาค่อนข้างนาน ในส่วนนี้ในการหาค่าพารามิเตอร์จึงสามารถพิมพ์ชิ้นงานออกมาได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการใช้งานจริงยังมีปัจจัยหลายๆ อย่างที่มีผลต่อการทำงานของใบพัดกังหันลม เพื่อให้ใบพัดกังหันลมทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จำเป็นต้องออกแบบพัฒนาต่อ ยอดต่อไปให้เหมาะสมกับสภาพลมในบริเวณนั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] **ลักษณะสัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient) ของกังหันลมชนิดต่างๆ**
<http://technology.thaiza.com/การคำนวณ-Power-calculation-ของกังหันลม/311930>
- [2] **การออกแบบโดยใช้ Momentum Theory**
https://en.wikipedia.org/wiki/Momentum_theory
- [3] **การออกแบบโดยใช้ทฤษฎี Blade Element Theory**
https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_theory
- [4] **การออกแบบโดยใช้ Blade Element-Momentum Theory**
https://en.wikipedia.org/wiki/Blade_element_momentum_theory
- [5] **การออกแบบโดยใช้ทฤษฎีสตริป (Strip Theory)**
http://www.wikiwaves.org/Strip_Theory_Of_Ship_Motions._Heave_%26_Pitch
- [6] **การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์**
https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics
- [7] **รูปร่างของหยดน้ำรุ่น S1223**
<http://www.repository.rmutt.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/1064104.pdf?sequence=1>
- [8] **การวิเคราะห์ประสิทธิภาพใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 ด้วย CFD**
<http://www.repository.rmutt.ac.th/bitstream/handle/123456789/2220/143579.pdf?sequence=1>
- [9] **Datasheet ของ EE-SX673A**
http://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/ee-sx47_67_ds_e_13_1_csm483.pdf



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
การวัดระยะทางที่ความเร็วลมต่างๆ

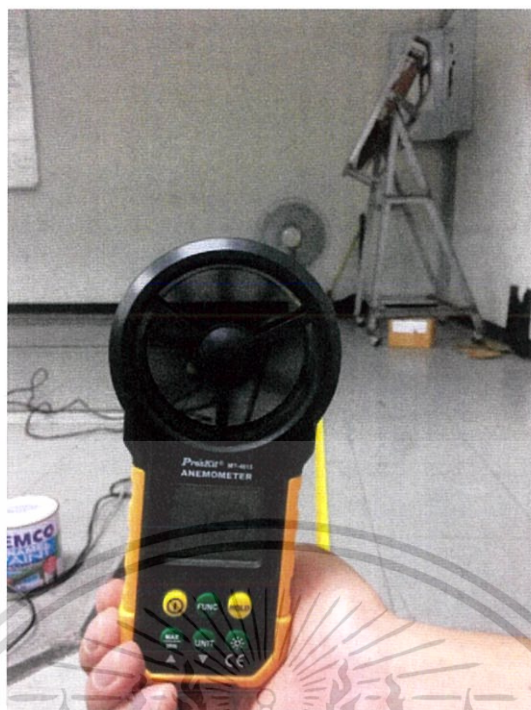


รูปที่ 1ก วัดความเร็วลม 1 m/s

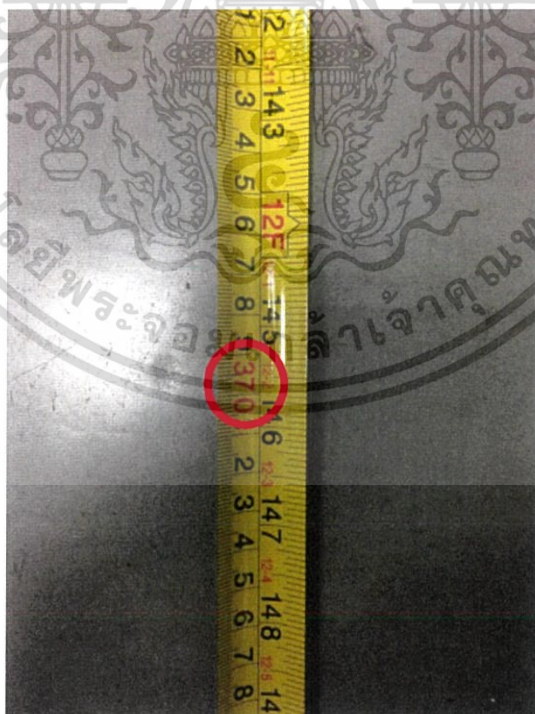


รูปที่ 2ก วัดระยะทางที่ความเร็วลม 1 m/s ระยะ 470 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3ก วัดความเร็วลม 1.5 m/s

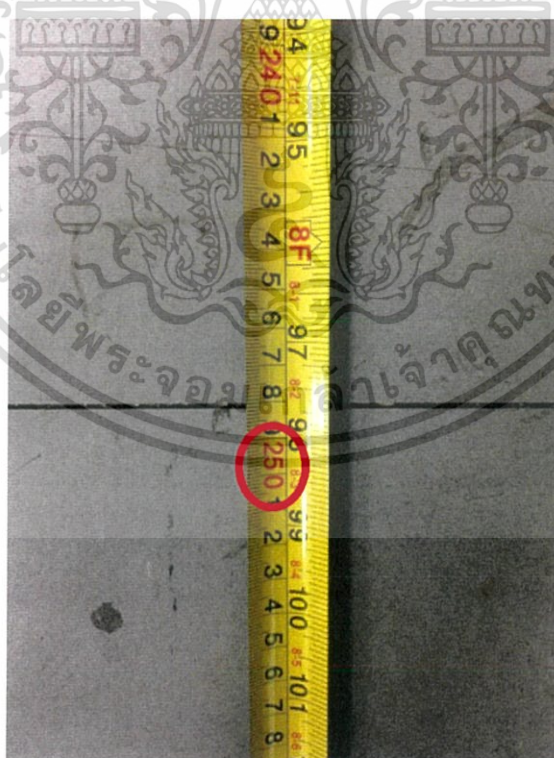


รูปที่ 4ก วัดระยะทางที่ความเร็วลม 1.5 m/s ระยะ 370 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

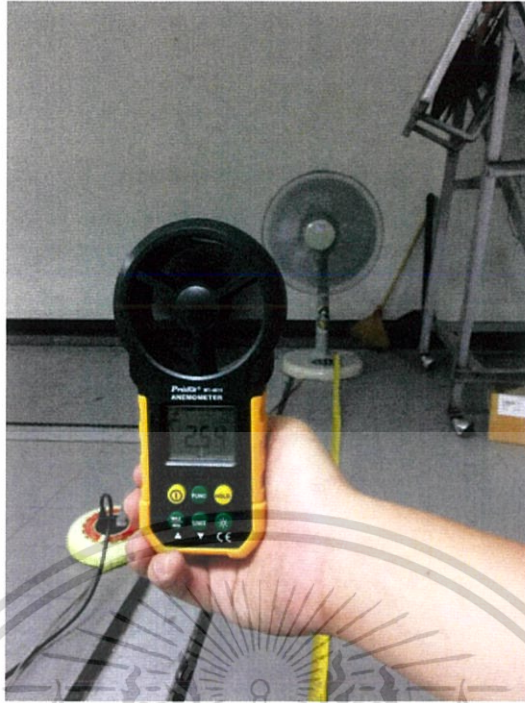


รูปที่ 5 ก วัดความเร็วลม 2 m/s

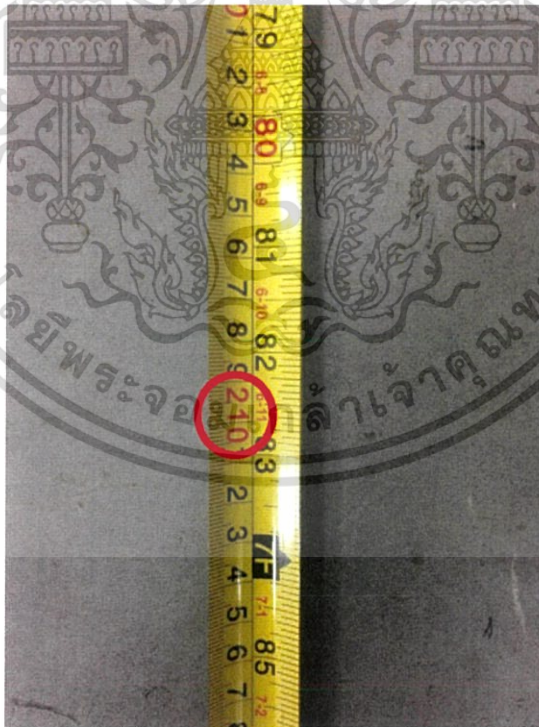


รูปที่ 6 ก วัดระยะทางที่ความเร็วลม 2 m/s ระยะ 250 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7ก วัดความเร็วลม 2.5 m/s



รูปที่ 8ก วัดระยะทางที่ความเร็วลม 2.5 m/s ระยะ 210 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9ก วัดความเร็วลม 3 m/s

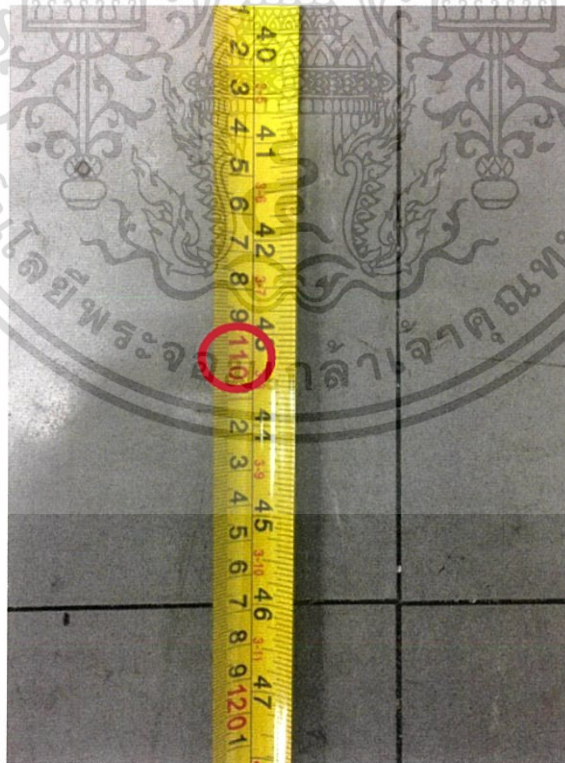


รูปที่ 10ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 3 m/s ระยะ 160 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11ก วัดความเร็วลม 3.5 m/s

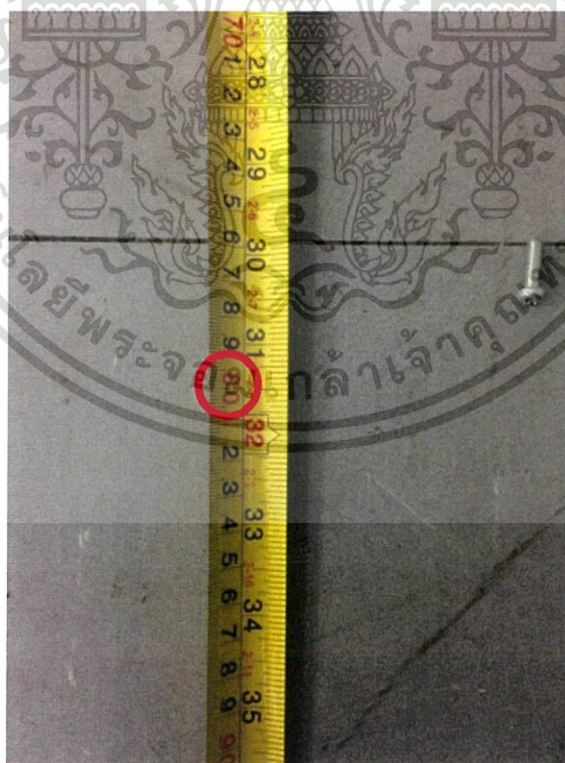


รูปที่ 12ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 3.5 m/s ระยะ 110 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13ก วัดความเร็วลม 4 m/s

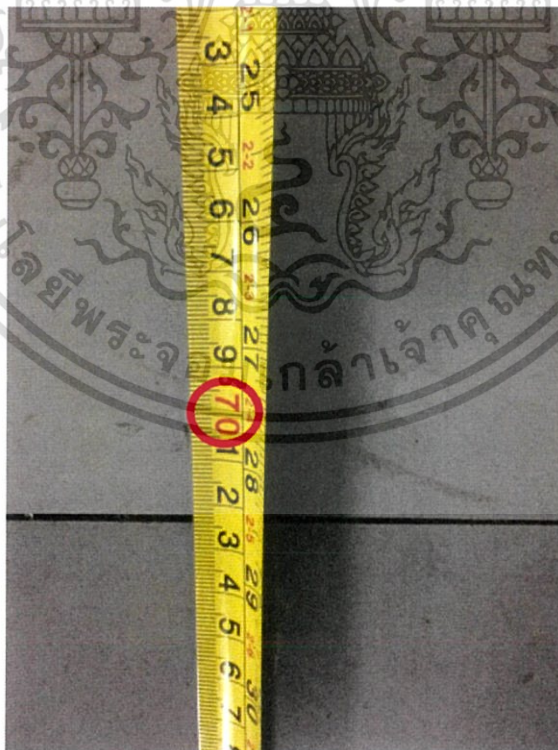


รูปที่ 14ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 4 m/s ระยะ 80 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15ก วัดความเร็วลม 4.5 m/s

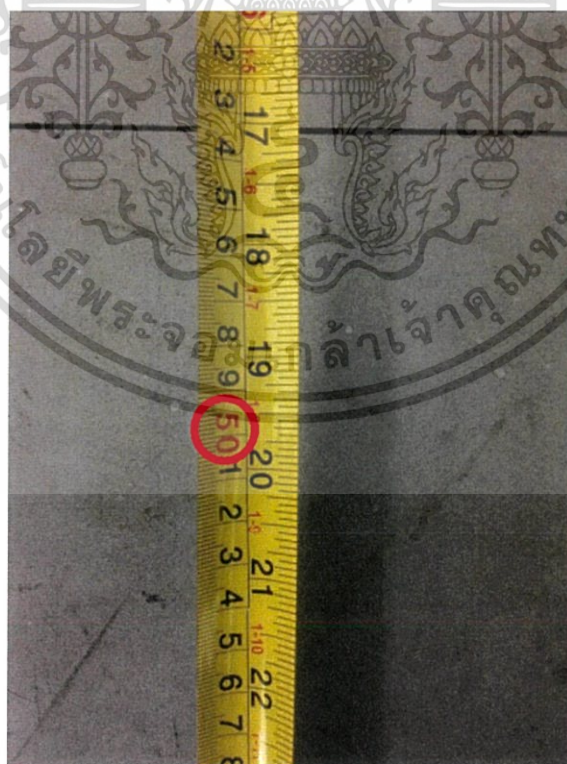


รูปที่ 16ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 4.5 m/s ระยะ 70 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17ก วัดความเร็วลม 5 m/s



รูปที่ 18ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 5 m/s ระยะ 50 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



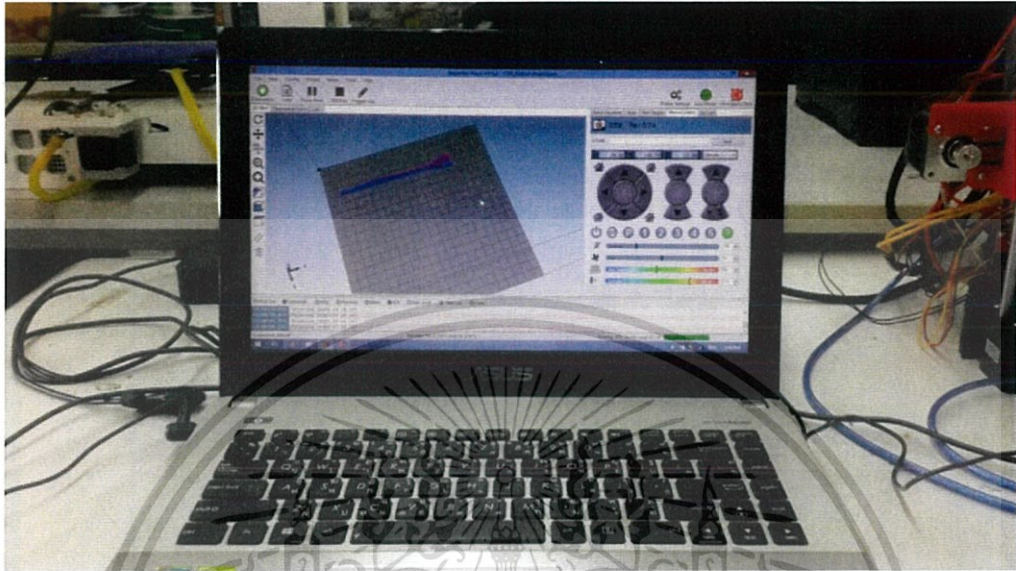
รูปที่ 19ก วัดความเร็วลม 5.5 m/s



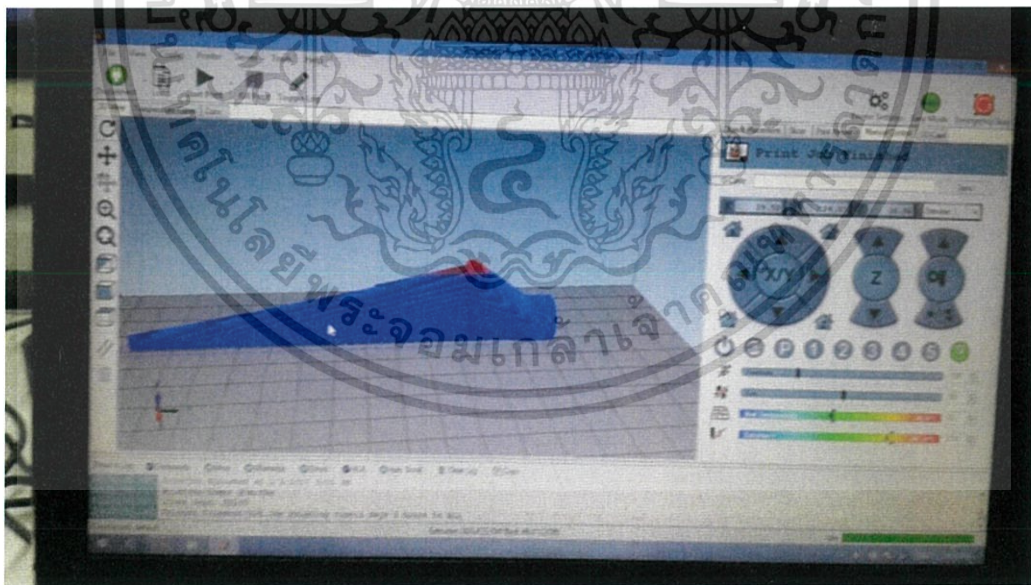
รูปที่ 20ก วัดระยะทางที่ความเร็ว 5.5 m/s ระยะ 40 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม

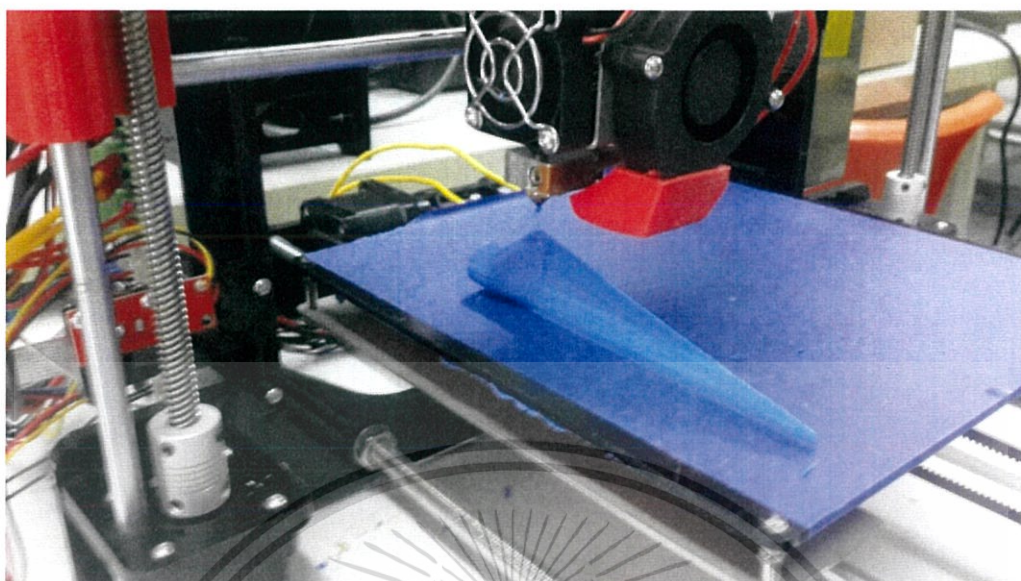


รูปที่ 1x การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม 1



รูปที่ 2x การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3ข การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม 3

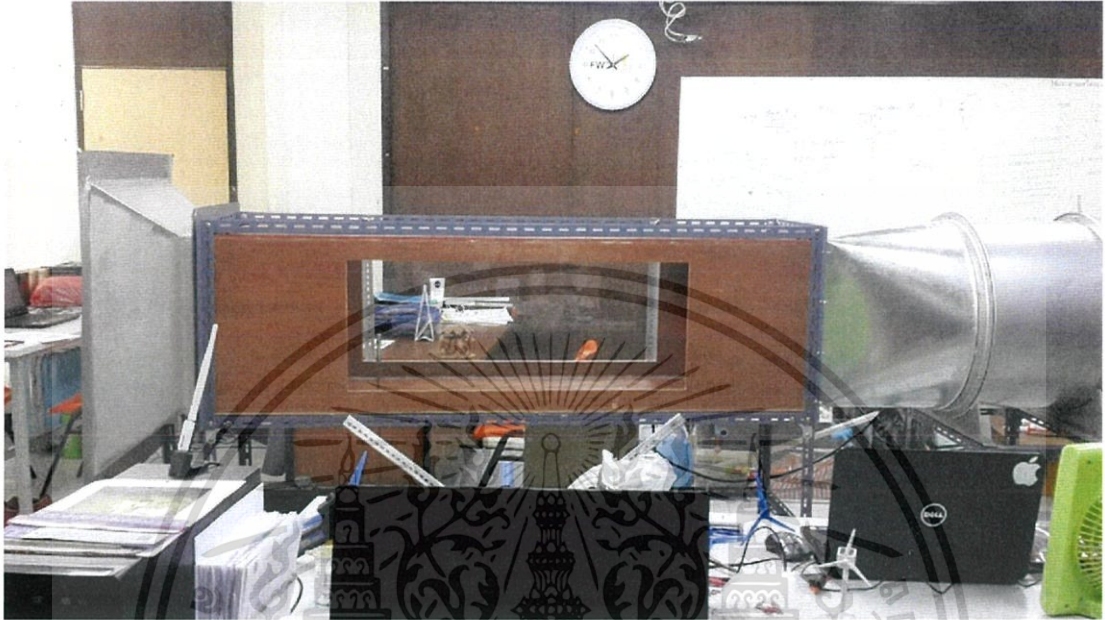


รูปที่ 4ข การพิมพ์โมเดล 3D ของใบพัดกังหันลม 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การติดตั้งใบพัดกังหันลมในอุโมงค์ลม

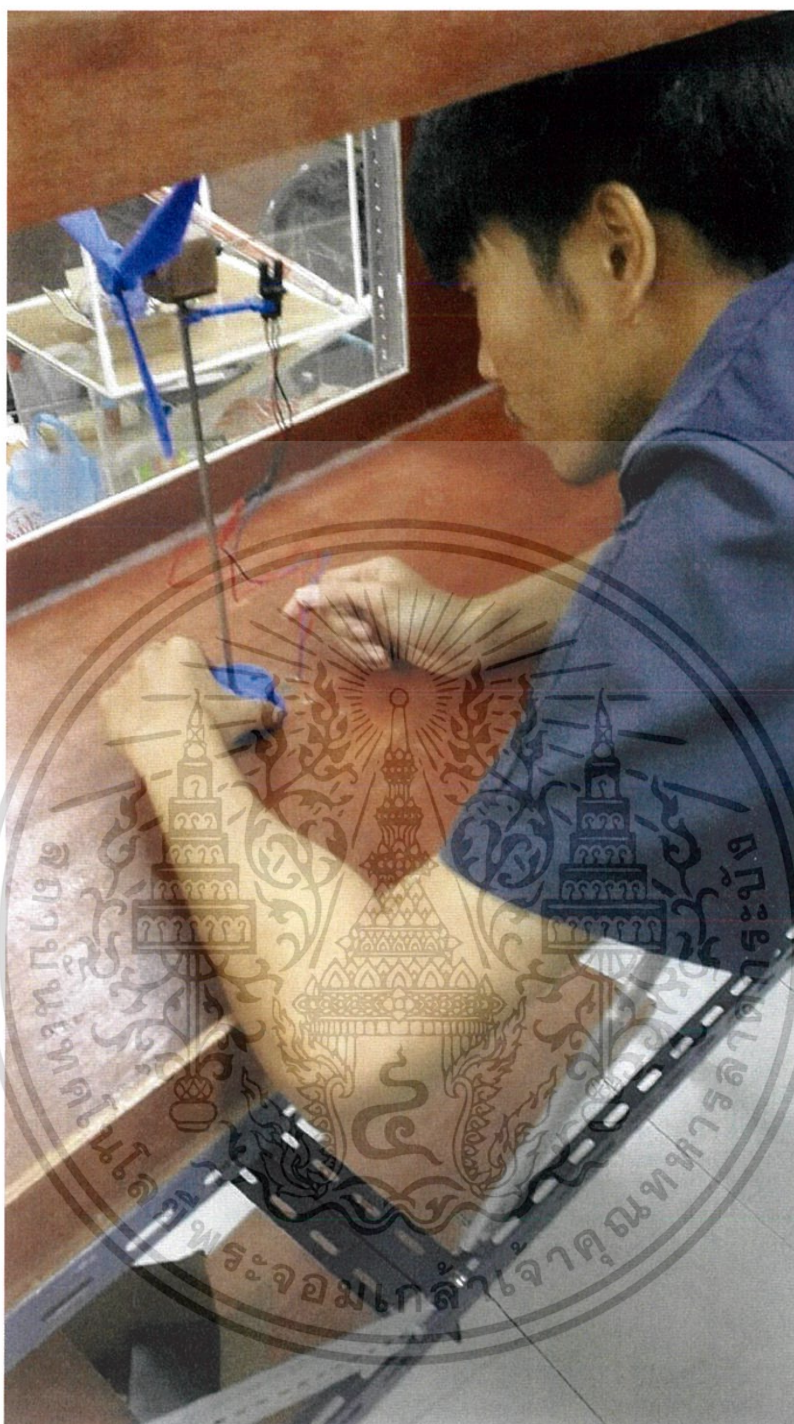


รูปที่ 1ค การติดตั้งใบพัดกังหันลมในอุโมงค์ลม 1



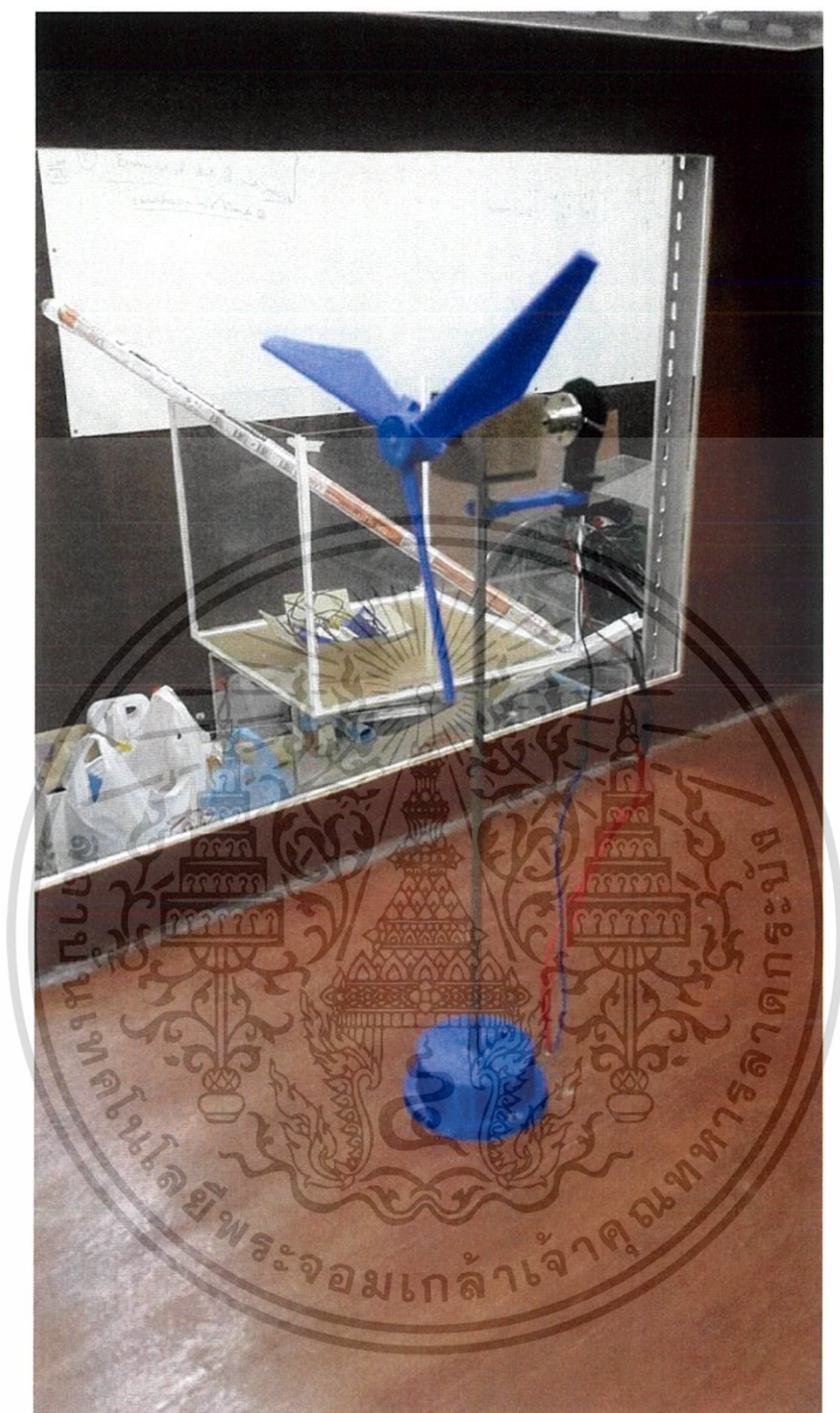
รูปที่ 1ค การติดตั้งใบพัดกังหันลมในอุโมงค์ลม 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2ค การติดตั้งใบพัดกังหันลมในอุโมงค์ลม 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



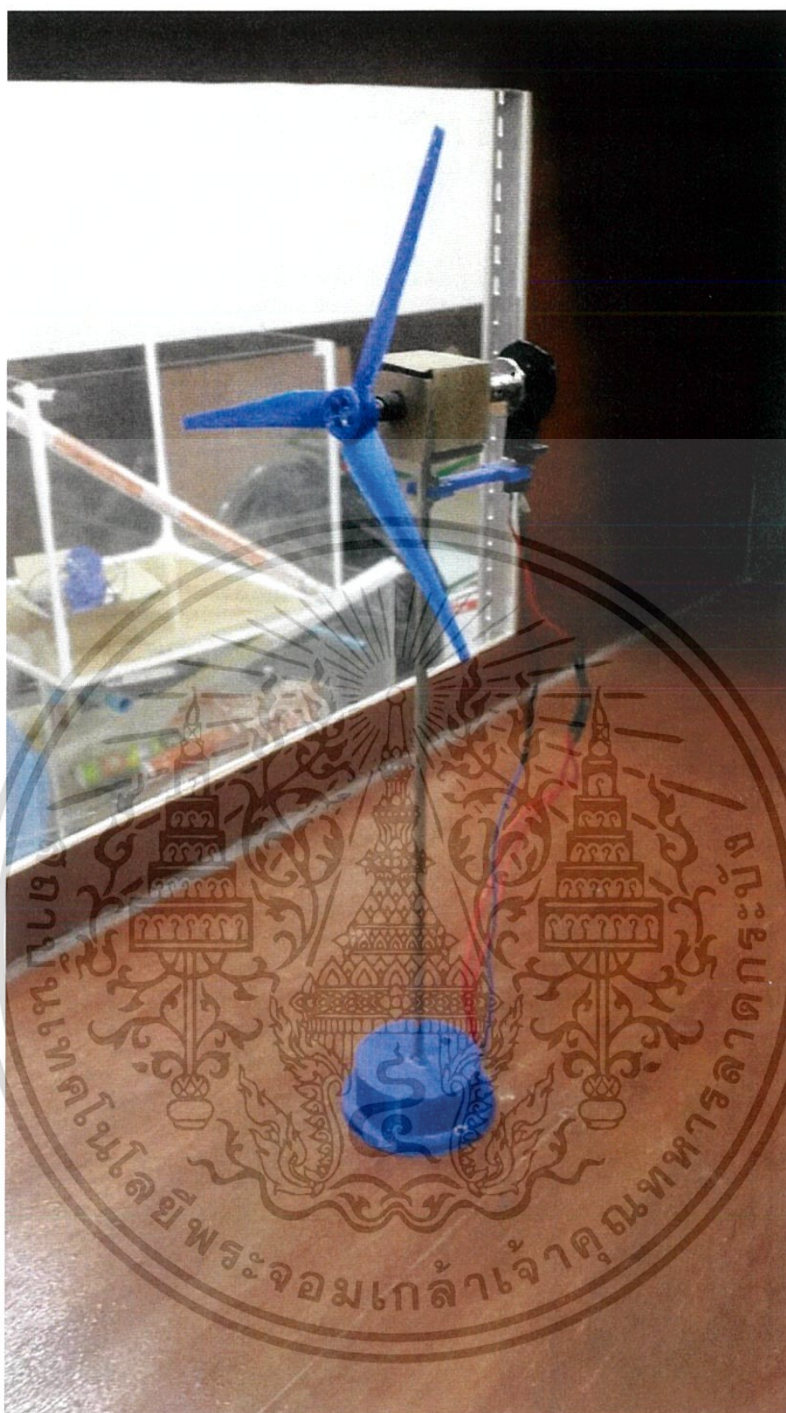
รูปที่ 3ค การติดตั้งใบพัดกังหันแบบ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4ค การติดตั้งใบพัดกังหันแบบ B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5ค การติดตั้งใบพัดกังหันแบบ C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6ค การติดตั้งใบพัดกังหันแบบ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ดาต้าชีท Photo Sensor

Slot-type Photomicrosensor (Non-modulated) *1

EE-SX47/67

CSM_EE-SX47/67_DS_E_18_1

Global Standard Slot-type photomicrosensors with 50- to 100-mA direct switching capacity.



- Series includes models that enable switching between dark-ON and light-ON operation.
- Response frequency as high as 1 kHz.
- Easy operation monitoring with bright light indicator.
- Wide operating voltage range: 5 to 24 VDC
- Models in which the light indicator turns ON for dark-ON operation are also available.
- A wide range of variations in eight different shapes.
- Flexible robot cable is provided as a standard feature. *2



Be sure to read Safety Precautions on page 5.

*1. Pre-wired Models are available only in the EE-SX67 Series.
*2. Only for Pre-wired Models.

For the most recent information on models that have been certified for safety standards, refer to your OMRON website.

Ordering Information

Connector

Infrared light

Appearance	Sensing method	Connect-ing method	Sensing distance	Output configuration	Indicator mode	Model	
						NPN output	PNP output
Standard	Through-beam type (with slot)	Connector (4 poles)	5 mm (slot width)	Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX670	EE-SX670P
				No incident light	EE-SX670A	EE-SX670R	
Light-ON				Incident light	EE-SX470	---	
L-shaped				Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX671	EE-SX671P
				No incident light	EE-SX671A	EE-SX671R	
Light-ON				Incident light	EE-SX471	---	
T-shaped, slot center 7 mm				Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX672	EE-SX672P
				No incident light	EE-SX672A	EE-SX672R	
Light-ON				Incident light	EE-SX472	---	
Close-mounting				Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX673	EE-SX673P
				No incident light	EE-SX673A	EE-SX673R	
Light-ON				Incident light	EE-SX473	---	
Close-mounting				Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX674	EE-SX674P
				No incident light	EE-SX674A	EE-SX674R	
Light-ON				Incident light	EE-SX474	---	
T-shaped, slot center 10 mm				Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX675	EE-SX675P
F-shaped	Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX676	EE-SX676P			
	No incident light	EE-SX676A	EE-SX676R				
Light-ON	Incident light	EE-SX476	---				
R-shaped	Dark-ON/Light-ON (selectable) *3 *4	Incident light	EE-SX677	EE-SX677P			

รูปที่ 1ง ดาต้าชีท Photo Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้