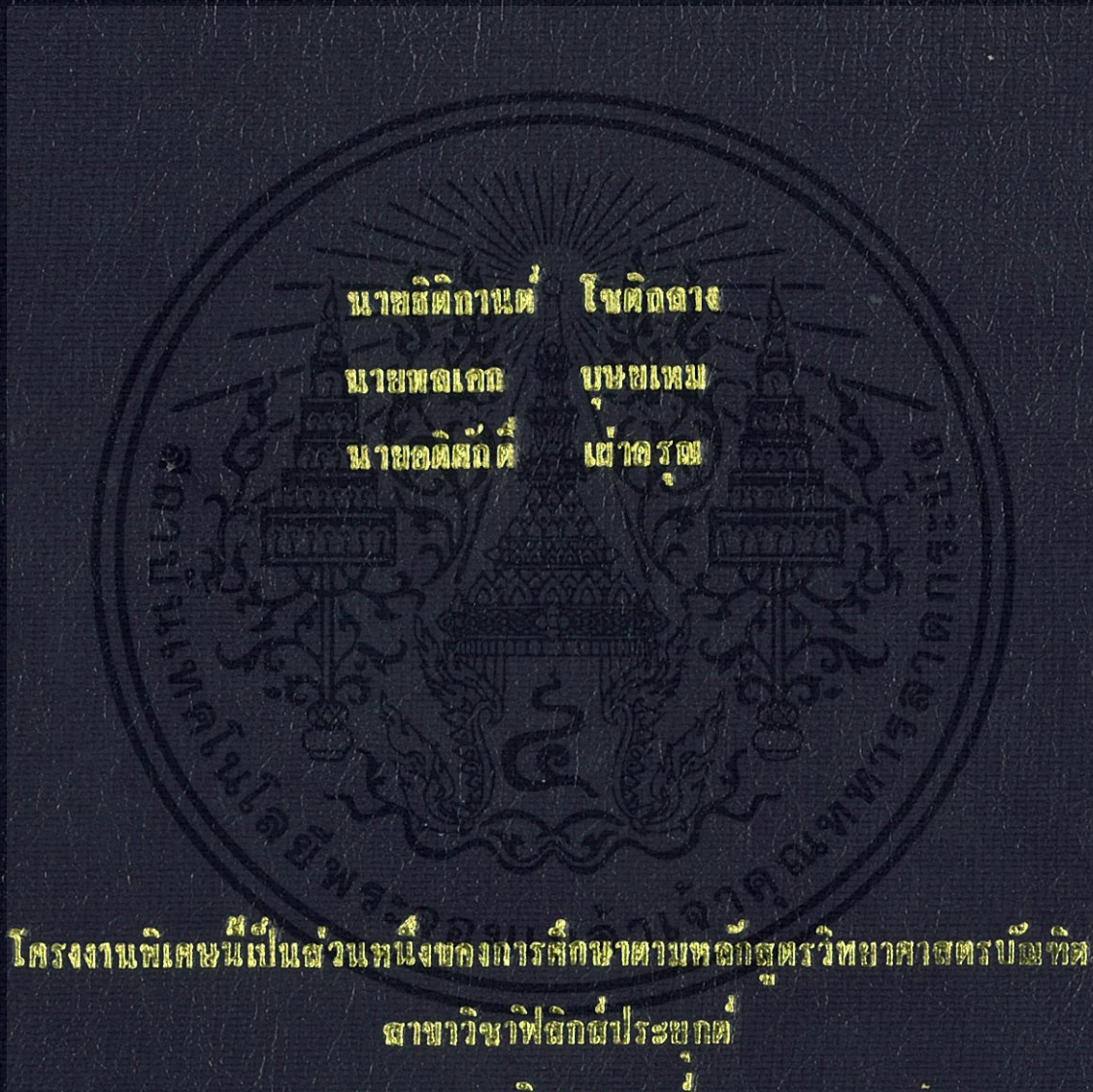


การออกแบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า
DESIGN WIND TURBINE FOR ELECTRIC ENERGY



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การออกแบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า

DESIGN WIND TURBINE FOR ELECTRIC ENERGY



นายธิตกานต์ โชติกกลาง

นายพลเอก บุญยเหม

นายอดิศักดิ์ เผ่าอรุณ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ คณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

DESIGN WIND TURBINE FOR ELECTRIC ENERGY



Mr. THITIKARN CHOTKLANG

Mr. POL-AKE BUDSAYAHEM

Mr. ADISAK PHOAROON

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE

IN APPLIED PHYSICS

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในสถาบันเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

DESIGN WIND TURBINE FOR ELECTRIC ENERGY

ชื่อนักศึกษา

นายธิดิกานต์ โชติกกลาง

นายพลเอก นุชยเหม

นายอดิศักดิ์ เผ่าอรุณ

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต


สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
ผศ.ดร.ภัทธีรยา กิตติเดชาชาญ	ภัทธีรยา กิตติเดชาชาญ
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์	
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบกังหันลมขนาดเล็กผลิตกระแสไฟฟ้า
ชื่อนักศึกษา	นายธิดิกานต์ โชติกลาง
	นายพลเอก บุญยhem
	นายอดิศักดิ์ เผ่าอรุณ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

การออกแบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าได้นำหลักของการเปลี่ยนแปลงจลน์ของลมให้เป็นพลังงานกลในการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดกำลัง 200 วัตต์ มีขนาดแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ที่ความถี่ 50 Hz โดยมีค่าความเร็วเชิงโคจรของการหมุน 1000 rpm เพื่อใช้ออกแบบในส่วนใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง โดยได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปมาเพื่อช่วยออกแบบและเขียนแบบให้มีขนาดของแขนส่งกำลังใบพัดกังหันลม คือ 60 เซนติเมตร หรือพื้นที่รับลมประมาณ 3 ตารางเมตร ที่ความเร็วลมประมาณ 5 เมตรต่อวินาที และ 100 เซนติเมตร หรือพื้นที่รับลมประมาณ 1.8 ตารางเมตร ที่ความเร็วลมประมาณ 6 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยการทดสอบใบพัดกังหันลมที่ออกแบบนั้นได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง และการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมของแหล่งกำเนิดกับค่ากำลังไฟฟ้า ผลการทดสอบพบว่าค่าที่เหมาะสมของแขนส่งกำลังคือขนาด 60 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเท่ากับ 0.54 และมีค่ากระแสเอาต์พุตเท่ากับ 0.26 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต 3.5 โวลต์ และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้นขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่รับผิดชอบต่อผลเสียหายใดๆ ทั้งสิ้น

คำสำคัญ : กังหันลมผลิตไฟฟ้า, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า, กำลังไฟฟ้า, ประสิทธิภาพ, สัมประสิทธิ์กำลัง, กังหันลมแนวแกนตั้ง

Title	DESIGN WIND TURBINE FOR ELECTRIC ENERGY	
Student	Mr. THITIKARN	CHOTKLANG
	Mr. POL-AKE	BUDSAYAHM
	Mr. ADISAK	PHOAROON
Degree	Bachelor of Science	
Program	Applied Physics	
Academic year	2012	
Advisor	Asst.Prof.SarraiLekchaum	

ABSTRACT

The design of small wind turbine for Electric energy generation has brought kinetic energy of wind change into mechanic energy in rotation of generator for electric generation. The generator has a power 200 watt with Voltage 220 volt at frequency 50 hertz and synchronous speed of rotation 1000 rpm for designing vertical axis wind turbine blade. This special project brought program to help designing and drawing Arm of wind turbine blade which Size 60 centimeters or area of wind about 3 square meters at wind speed 5 (m/s) And Size 1000 centimeters or area of wind 1.8 square meters at wind speed 6 (m/s). In testing of wind turbine consist 2 topic , First topic is finding power coefficient (C_p) and second topic is finding relation between wind speed with electric power. By the result of testing found at arm size 60 centimeter is value suitably which the power coefficient value is 0.54 , current output value is 0.26 A , voltage output value 3.5V and efficiency value about 2 percent.

Keyword : Wind turbine, Generator, Electric Power, Efficiency, Coefficient, Vertical

Axis wind turbine

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้จะสำเร็จลงได้ด้วยดีเนื่องจากผู้ศึกษาค้นคว้าได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก รองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษฉบับนี้ ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการ ตลอดจนข้อเสนอแนะข้อสงสัยต่างๆ และได้กรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องในการจัดทำโครงการพิเศษครั้งนี้ตั้งแต่ต้นจนจบ เพื่อให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจและแนวทางนำไปประยุกต์ใช้จัดทำโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้ศึกษาค้นคว้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์สาขาวิชาหลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้คำแนะนำช่วยเหลือผู้ศึกษาค้นคว้าด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สถาพร คุณิพงษ์ ที่ได้กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าและให้คำแนะนำเกี่ยวกับหลักการทางไฟฟ้า

ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตนักศึกษาสาขาวิชาหลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้ศึกษาค้นคว้าเป็นอย่างดี

ประโยชน์และคุณค่าของการศึกษาค้นคว้าโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้ศึกษาค้นคว้าขอขอบเป็นเครื่องแสดงความกตัญญูทเวทิตา แต่บิดา มารดาและบูรพาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

นายธิดิกานต์	โชติกลาง
นายพลเอก	บุญยhem
นายอดิศักดิ์	เผ่าอรุณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XI
คำย่อและสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความหมายและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 แนวทางดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลม	4
2.1.1 ความสัมพันธ์ของลมกับความกดอากาศ	4
2.1.2 การวัดลม	4
2.1.3 เครื่องวัดลม	7
2.1.4 ลมผิวพื้น	9
2.2 ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	10
2.2.1 ลมมรสุม	10
2.2.2 ลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลนี้ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ลมประจำถิ่น	11
2.3 ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย	13
2.4 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย	13
2.5 พลังงานลม	15
2.6 หลักการทำงานของกังหันลม	15
2.7 อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม	18
2.8 ประเภทของกังหันลม	19
2.9 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า	23
2.10 การหมุนควงตัวของอากาศ (Vortex)	30
2.11 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า	31
2.12 สัมประสิทธิ์กำลัง	36
2.13 สัมประสิทธิ์แรงบิด	36
2.14 อัตราส่วนความเร็วปลายใบ	36
2.15 ประสิทธิภาพกังหันลม	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	
3.1 ระบบกังหันลมแนวแกนตั้ง	37
3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)	38
3.1.2 เพลาส่งกำลัง (Main shaft)	40
3.1.3 ใบพัด (Blade)	40
3.2 การออกแบบใบพัดและส่วนประกอบของกังหันลม	42
3.2.1 ใบพัดกังหันลม	43
3.2.2 แขนส่งกำลังหลัก	47
3.2.3 เพลาส่งกำลัง (Transmission shaft)	48
3.2.4 โครงสร้างฐานรองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมแนวแกนตั้ง	50
บทที่ 4 ผลการทดสอบและอภิปราย	
4.1 การวัดและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดลม	55
4.2 การวัดและวิเคราะห์ชนิดใบหุ้มพลาสติกที่แกนส่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา	59
4.3 การวัดและวิเคราะห์ชนิดใบหุ้มพลาสติกที่แกนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 และ 100 องศา	66
4.4 การวัดและวิเคราะห์ใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แกนส่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา	71
4.5 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แกนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา	77
4.6 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แกนส่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศาใส่โหลด 10โอห์ม	83
4.7 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แกนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10โอห์ม	88
4.8การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลม	93
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 โครงใบพัด	106
5.2 ตัวยึดระหว่างใบพัดกังหันลมกับแกนส่งกำลังหลัก	107
5.3แกนส่งกำลังหลัก	107
5.4 แผ่นจานถือคแกนส่งกำลังหลักและเพลาส่งกำลัง	108
5.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	108
5.6 ฐานรองรับ	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุผลเบื้องหน้าและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.7 วจรเรียงกระแส	109
เอกสารอ้างอิง	112
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทิศลมเรียกมุมจริงเป็นองศา	5
2.2 ศรลม	7
2.3 แอนิโมมิเตอร์แบบรูปถ้วย	8
2.4 แอโรเวน	8
2.5 ลมผิวพื้นพัดข้ามและทำมุมกับไอโซบาร์	9
2.6 สภาพอากาศและทิศทางช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน	10
2.7 สภาพอากาศและทิศทางลมช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม	11
2.8 แสดงลมบกและลมทะเล	12
2.9 แสดงลมหุบเขาและลมภูเขา	12
2.10 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงลมสงบ – เฉลี่ยปี	14
2.11 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมไม่รวมช่วงลมสงบ – เฉลี่ยปี	14
2.12 แสดงลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ	16
2.13 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบต่างๆ	17
2.14 แสดงแรงจุดและแรงยกที่กระทำต่อวัตถุ	18
2.15 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งและกังหันลมแกนหมุนแนวนอน	19
2.16 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงจุด	20
2.17 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงยก	20
2.18 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรง	21
2.19 แสดงลักษณะของกังหันลมแกนตั้งแบบต่างๆ	21
2.20 แสดงจำนวนใบพัดกังหันลมแกนหมุนแนวนอน	22
2.21 แสดงลักษณะของกังหันลมแกนนอนแบบต่างๆ	22
2.22 แสดงส่วนประกอบกังหันลมแกนหมุนแนวนอน	23
2.23 แกนหมุนใบพัด	23
2.24 ใบพัดกังหันลมยาว 35 เมตรใช้กับกังหันลม 2.0 MW	24
2.25 แสดงเพลาแกนหมุนหลัก	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 แสดงห้องทอรอบกำลัง	26
2.27 แสดงเบรกและเพลากลมหุ่นเล็ก	26
2.28 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	27
2.29 แสดงเครื่องวัดความเร็วและทิศทางการไหล	27
2.30 แสดงเสาวัดลมแบบกลมกลวงและโครงถัก	28
2.31 แสดงระบบการขับเคลื่อนหมุนส่วนบนเสาเพื่อรับแรงลมตามทิศทางการไหล	29
2.32 แสดงฐานรากของกังหันลม	29
2.33 แสดงเครื่องจักรและอุปกรณ์ขนย้ายและติดตั้งกังหันลม	30
2.34 แสดงการไหลที่เป็น Streamline ที่ผ่านวัตถุชั้นขีดผิว	30
2.35 แสดงการไหลที่เป็น Trailing vortex	30
2.36 แสดงหลักการของทฤษฎี Momentum theory	31
2.37 แสดงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ	35
3.1 ส่วนประกอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง	37
3.2 แสดงลักษณะของสเตเตอร์และส่วนประกอบ	38
3.3 แสดงภาพฉายฝาครอบ	38
3.4 แสดงภาพฉายของแม่เหล็กถาวร	39
3.5 แสดงลักษณะของโรเตอร์	39
3.6 แสดงภาพฉายลักษณะของโรเตอร์	40
3.7 แสดงลักษณะของเพลาส่งกำลัง	40
3.8 แสดงภาพฉายลักษณะของเพลาส่งกำลัง	40
3.9 แสดงลักษณะของจานหมุน	41
3.10 แสดงลักษณะของแกนส่งกำลัง	41
3.11 แสดงลักษณะของใบพัดกังหันลม	42
3.12 แสดงแบบใบกังหันที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดงภาพถ่ายแบบใบกึ่งหันที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป	43
3.14 แสดงแบบงานหมุนส่วนบนที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป	44
3.15 แสดงภาพถ่ายแบบงานหมุนส่วนบนที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป	44
3.16 แสดงแบบงานหมุนส่วนล่างที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป	44
3.17 แสดงภาพถ่ายแบบงานหมุนส่วนล่างที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป	45
3.18 แสดงแบบที่วาดไว้ นำขึ้นแบบจริง	45
3.19 แสดงลักษณะของใบพัดกึ่งหันลมแนวแกนตั้ง	46
3.20 แสดงภาพถ่ายลักษณะของใบพัดกึ่งหันลมแนวแกนตั้ง	47
3.21 แสดงแขนส่งกำลังหลัก แขนส่งกำลังหลักยาว 60 และ 100 เซนติเมตร	47
3.22 แสดงภาพถ่ายแขนส่งกำลังหลัก แขนส่งกำลังหลักยาว 60 และ 100 เซนติเมตร	48
3.23 แสดงโครงสร้างฐาน	49
3.24 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างฐาน	49
3.25 Multimeter	50
3.26 Anemometer	50
3.27 นาฬิกาจับเวลา	50
3.28 วัดระดับน้ำ	51
3.29 ตลับเมตร	51
3.30 พัดลมแหล่งกำเนิด	51
3.31 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทดสอบระบบ	53
3.32 แสดงการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ขณะทดสอบ	54
4.1 แอนิเมเตอร์ อยู่ตรงกลางใบ	55
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm) กับความเร็วแหล่งกำเนิดลม	58
4.3 การเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบ	59
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารระดับที่ 1, 2, 3 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา	71
4.6 ใบหุ้มเปลี่ยนจากพลาสติกเป็นอะลูมิเนียม	72
4.7 จัดเตรียมอุปกรณ์และเตรียมการวัด	72
4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก ยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา	77
4.9 ทำการเปลี่ยนแขนส่งกำลังหลักจาก 60 cm เป็น 100 cm	78
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก ยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา	83
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก ยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	88
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก ยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	93
5.1 โครงใบพัดกึ่งหันลม	106
5.2 ข้อต่อใบพัดกับแกนส่งกำลัง	107
5.3 แขน 100 cm เกิดการงอ	107
5.4 แผ่นจานเหล็กสี่ล้อ	108
5.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	108
5.6 ฐานรองรับ	109
5.7 วงจรทำกระแสตรงแบบบริดจ์เชิงทฤษฎี	109
5.8 วงจรทำกระแสตรงแบบบริดจ์ที่ใช้งานจริง	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินการ	3
2.1 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ด	6
2.1 (ต่อ) เทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ด	7
2.2 ภาพรวมการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่งทั่วโลก	18
4.1 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมเบอร์1	56
4.2 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมเบอร์2	57
4.3 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมเบอร์3	57
4.4 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 องศา	62
4.5 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 90 องศา	63
4.6 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 95 องศา	64
4.7 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 100 องศา	65
4.8 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 85 องศา	67
4.9 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 90 องศา	68
4.10 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 95 องศา	69
4.11 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 100 องศา	70
4.12 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 องศา	73
4.13 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 90 องศา	74
4.14 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 95 องศา	75
4.15 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 100 องศา	76
4.16 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 85 องศา	79
4.17 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 90 องศา	80
4.18 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 95 องศา	81
4.19 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 100 องศา	82
4.20 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 85 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	84
4.21 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำมีหน้าที่ดูแลเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.22 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 60 cm มุม 95 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	86
4.23 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 60 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	87
4.24 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 100 cm มุม 85 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	89
4.25 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 100 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	90
4.26 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 100 cm มุม 95 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	91
4.27 ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีไบพัด 100 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	92
4.28 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 60 cm มุม 85 องศา	94
4.29 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 60 cm มุม 90 องศา	94
4.30 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 60 cm มุม 95 องศา	95
4.31 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 60 cm มุม 100 องศา	95
4.32 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 100 cm มุม 85 องศา	96
4.33 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 100 cm มุม 90 องศา	96
4.34 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 100 cm มุม 95 องศา	97
4.35 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยพลาสติกแกน 100 cm มุม 100 องศา	97
4.36 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 85 องศา	98
4.37 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 90 องศา	98
4.38 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 95 องศา	99
4.39 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 100 องศา	99
4.40 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 85 องศา	100
4.41 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 90 องศา	100
4.42 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 95 องศา	101
4.43 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 100 องศา	101
4.44 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ไบฮู่มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 85 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.45 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด10 โอห์ม	102
4.46 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 95 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	103
4.47 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด10โอห์ม	103
4.48 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 85 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	104
4.49 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	104
4.50 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 95 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	105
4.51 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
VAWT	กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง
HAWT	กังหันลมแกนหมุนแนวนอน
v	ความเร็วลม
W	วัตต์
MW	เมกะวัตต์
m ²	ตารางเมตร
m/s	เมตรต่อวินาที
km/m ³	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
HZ	เฮิรตซ์
m ³ /s	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
C _P	สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient)
C _T	สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient)
TSR	อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio)
η	ประสิทธิภาพกังหันลม
C _m	เซนติเมตร
A	แอมแปร์
V	โวลต์
Ω	ความเร็วเชิงมุม (Rad/s)
S	วินาที
AC	กระแสสลับ
DC	กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความหมายและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลังงานทางเลือกเริ่มเข้ามามีบทบาทที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ ทั้งในส่วนของประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศที่กำลังพัฒนา จึงจำเป็นต้องอาศัยพลังงานที่ได้จากธรรมชาติ เช่น พลังงานจากลม พลังงานจากน้ำ พลังงานจากแสงอาทิตย์หรือเชื้อเพลิงที่ได้มาจากธรรมชาติ เช่น น้ำมันถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ มาผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจ

การผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมขนาดเล็ก เริ่มได้รับความสนใจและมีบทบาทเพิ่มมากขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานทางเลือกอื่นๆที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยได้มีการพัฒนาลักษณะของกังหันลมให้มีรูปร่างในแบบต่างๆ เพื่อให้มีลักษณะที่เหมาะสมกับความเร็วลมเร็วลมและสามารถให้กำลังเอาต์พุตจากตัวกังหันลมมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยในปัจจุบันนี้ได้มีการแบ่งลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้าออกเป็นสองลักษณะใหญ่ๆ ได้แก่ กังหันลมแนวแกนนอน และกังหันลมแนวแกนตั้ง สำหรับลักษณะของกังหันลมแนวแกนนอน การหมุนของใบพัดรับลมจะตั้งฉากกับทิศการไหลของกระแสลม โดยมีหางเสือคอยควบคุมทิศทางใบพัดให้หมุนในแนวราบได้ 360 องศา และกังหันลมแนวแกนตั้ง มีลักษณะการหมุนของใบพัดรับลมขนานไปกับทิศทางการไหลของกระแสลม โดยกังหันลมลักษณะนี้จะไม่มีการหันเพื่อบังกับทิศทางของใบพัด ดังนั้นกังหันลมทั้งสองลักษณะจึงมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันตามลักษณะที่ออกแบบ เช่น ความเร็วลมเริ่ม ความเร็วรอบในการหมุนของใบพัด กำลังเอาต์พุต (output power) ลักษณะอากาศพลศาสตร์ (aerodynamic characteristics) เป็นต้น

ในประเทศไทยเริ่มมีการนำกังหันลมเข้ามาใช้เพิ่มมากขึ้นเพื่อเป็นพลังงานทดแทนในบ้านหรือสำนักงานขนาดเล็ก ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้กังหันลมแนวแกนนอนที่สามารถออกแบบ และมีการสร้างที่ค่อนข้างง่ายกว่ากังหันลมแนวแกนตั้ง แต่กังหันลมในแนวแกนนอนนั้นต้องใช้ความเร็วลมในการหมุนของใบพัดที่มากกว่ากังหันลมแนวแกนตั้ง จึงเป็นข้อแตกต่างกับกังหันลมแนวแกนตั้งที่ออกแบบมาเพื่อให้มีการหมุนได้ในกระแสลมที่ความเร็วที่ต่ำ จึงมีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งในประเทศไทย ซึ่งมีลักษณะของความเร็วลมที่ค่อนข้างต่ำ รวมถึงลักษณะของกังหันลมที่ออกแบบมาเพื่อให้สามารถติดตั้งในพื้นที่จำกัดได้สะดวก โดยไม่ต้องการพื้นที่มากเกินไป

โครงการพิเศษนี้ ได้ศึกษาลักษณะของกังหันลมขนาดเล็กแนวแกนตั้งเพื่อออกแบบใบพัดของกังหันลม รวมถึงส่วนประกอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง ให้สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูงได้โดยใช้ความเร็วลมที่ต่ำ โดยได้เน้นศึกษาไปที่เรื่องการออกแบบลักษณะของใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง การทดสอบค่าแรงดันและกระแสเอาต์พุต กำลังเอาต์พุต ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ที่ได้จากตัวกังหันลมโดยใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้า (generator) ขนาดประมาณ 200 วัตต์ เพื่อใช้ต้นแบบของกังหันลมขนาดเล็กผลิตไฟฟ้าและสามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้เพิ่มมากขึ้นในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างส่วนประกอบของกังหันลมขนาดเล็กแนวแกนตั้งผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดประมาณ 200 วัตต์
2. เพื่อทดสอบค่ากำลังเอาต์พุตและค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วลมที่แตกต่างกัน
3. เพื่อวิเคราะห์รูปร่างลักษณะของใบพัดที่มีขนาดแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะของกังหันลมแนวแกนตั้งรูปแบบต่างๆ
2. ศึกษาความเร็วลมเริ่มต้นที่ทำให้กังหันลมหมุนและผลของอัตราเร็วลมในค่าที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาการออกแบบและ โครงสร้างของกังหันลมแนวแกนตั้ง
4. ศึกษาเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมและความเร็วรอบในการหมุนของใบพัดกังหันลม
5. ออกแบบใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้งและส่วนประกอบของกังหันลม
6. ทดสอบค่ากำลังเอาต์พุตที่ได้จากกังหันลม
7. วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง และวิเคราะห์รูปร่างลักษณะใบพัดของกังหันลมที่มีขนาดแตกต่างกัน
8. สรุปผลการทดสอบจากการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 แนวทางดำเนินการ

โครงการมีระยะเวลาในการจัดทำ รวมทั้งสิ้น 9 เดือน โดยเริ่มดำเนินการตั้งแต่ช่วงเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2555 ถึง กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2556 จากแนวทางการดำเนินการข้างต้นสามารถแสดง ระยะเวลาดำเนินงานได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินการ

แผนการดำเนินงาน	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. เสนอ Project									
2. ศึกษาข้อมูล									
3. รวบรวมข้อมูล									
4. ออกแบบและจัดหาอุปกรณ์									
5. ดำเนินการสร้างระบบ									
6. ทดสอบระบบการทำงาน									
7. สรุปผลการทดสอบ									

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการและการออกแบบใบพัดกังหันลม
2. รู้จักวิธีการทดสอบกำลังค่าเอาต์พุตของกังหันลม
3. รู้จักหลักการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสม
4. เพื่อเผยแพร่ให้เกิดประโยชน์ต่อผู้สนใจและสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1) ลม

ลม คือ กระแสอากาศที่เคลื่อนที่ในแนวนอน ส่วนความกดอากาศ คือ อากาศที่เคลื่อนที่ในแนวตั้ง การเรียกชื่อลมนั้นเรียกตามทิศทางที่ลมนั้นๆพัดมา เช่น ลมที่พัดมาจากทิศเหนือ เรียกว่าลมเหนือ และลมที่พัดมาจากทิศใต้ เรียกว่าลมใต้ เป็นต้น

2.1.1 ความสัมพันธ์ของลมกับความกดอากาศ

การเกิดลม เกิดจากอากาศที่เคลื่อนที่จากสาเหตุต่างๆ ดังนี้

1. ความแตกต่างของอุณหภูมิในที่สองแห่ง อากาศเมื่อได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ความหนาแน่นของอากาศจะลดลง อากาศจึงลอยตัวขึ้น อากาศเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นของอากาศมากกว่าจากบริเวณใกล้เคียงจะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ทำให้เกิดลม

2. ความแตกต่างของความกดอากาศ อากาศเมื่อได้รับความร้อนจะมีความกดอากาศต่ำลง ความหนาแน่นลดลงจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศเย็นที่มีความหนาแน่นมากกว่าและมีความกดอากาศสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาหาบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ ทำให้เกิดลม

พื้นที่ความกดอากาศ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

1. พื้นที่ความกดอากาศสูง (High pressure areas) หมายถึง บริเวณที่มีความกดอากาศสูงกว่าบริเวณข้างเคียง กระแสลมจะพัดเวียนออกจากศูนย์กลางในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ในซีกโลกด้านเหนือเส้นศูนย์สูตร) บริเวณที่มีความกดอากาศสูงนี้จะมีสภาพท้องฟ้าแจ่มใส อากาศเย็น

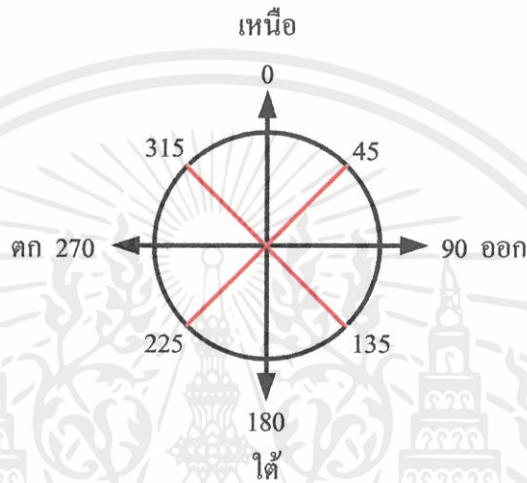
2. พื้นที่ความกดอากาศต่ำ (Low pressure areas) หมายถึง บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่าบริเวณข้างเคียง กระแสลมจะพัดเวียนเข้าหาศูนย์กลางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ในซีกโลกด้านเหนือเส้นศูนย์สูตร) บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำท้องฟ้าจะมีเมฆมาก ถ้าหากมีความกดอากาศต่ำมากจะเกิดพายุต่างๆขึ้น

2.1.2 การวัดลม

การวัดลมมีค่าที่ต้องการวัด 2 ค่า คือการวัดทิศทางลม และวัดความเร็วลม

1. **ทิศทางลม** อาจเรียกชื่อตามทิศต่างๆ ของเข็มทิศ หรือเรียกเป็นองศาจากทิศเหนือ ปัจจุบันการวัดทิศทางนิยมวัดตามเข็มทิศ และวัดเป็นองศา ถ้าวัดทิศทางด้วยเข็มทิศเข็มทิศจะถูกแบ่งออกเป็นทิศใหญ่ๆ 4 ทิศ คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก ทิศตะวันตก ซึ่งทิศทั้ง 4 ทิศ เมื่อแบ่งย่อยอีกจะเป็น 8 ทิศ โดยจะเพิ่มทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันตกเฉียงใต้ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งจาก 8 ทิศ ให้อยู่เป็น 16 ทิศ หรือ 32 ทิศ ได้อีก

แต่การรายงานทิศทางนั้น มักนิยมรายงานจำนวนทิศเพียง 8 หรือ 16 ทิศ เท่านั้น ส่วนการวัดทิศลมที่บอกมุมของลมเป็นองศาในลักษณะที่เวียนตามเข็มนาฬิกา ใช้สเกลจาก 0 องศา ไปจนถึง 360 องศา โดยลมทิศ 0 องศา หรือ 360 องศา เป็นทิศเหนือ , ลมทิศ 45 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงเหนือ , ลมทิศ 90 องศา เป็นทิศตะวันออก , ลมทิศ 135 องศา เป็นทิศตะวันออกเฉียงใต้ , ลมทิศ 180 องศา เป็นทิศใต้ , ลมทิศ 225 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงใต้ , ลมทิศ 270 องศา เป็นทิศตะวันตก และ ลมทิศ 315 องศา เป็นทิศตะวันตกเฉียงเหนือ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 ทิศลมเรียกมุมจริงเป็นองศา

2. ความเร็วลม คือ อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีพลังงานจลน์ ทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัตถุใดๆที่ปะทะลมได้ และแรงในรูปความดันเป็นสัดส่วนกับความเร็วมยกกำลัง 2 ดังอธิบายในรูปสมการเป็น

$$P = 0.5\rho u^2 \quad \dots\dots(2-1)$$

เมื่อ P = ความดันที่เกิดจากการกระทำของลม

u = ความเร็วลม

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ

ด้วยเหตุที่มีแรงเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของลม ทำให้สามารถหาความเร็วลมได้ โดยที่ไม่ต้องอาศัยเครื่องมือใดๆ แต่ใช้การสังเกตจากปรากฏการณ์ของวัตถุที่อยู่รอบตัว ดังนั้นเพื่อใช้งานตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวจึงได้มีการกำหนดมาตราความเร็วลมขึ้น เรียกว่ามาตราโบฟอร์ด

เอกสารนี้เป็น (Beaufort Scale) โดยพลเรือเอกเซอร์ฟรานซิส โบฟอร์ (Admiral Sir Francis Beaufort) ชาวอังกฤษ เป็นผู้คิดขึ้นใช้สำหรับตรวจลมในทะเล ต่อมาได้ถูกดัดแปลงนำมาใช้ทั้งบนบกและในทะเลมาตราโบฟอร์ด จะใช้การสังเกตจากสิ่งกีดขวางไม่ว่าจะอยู่บนบกหรืออยู่ในทะเล ได้แก่ ใบไม้ กิ่งไม้ สายโทรเลข สายโทรศัพท์ ชง สิ่งปรักหักพังต่างๆ และคลื่นในทะเล

เกณฑ์ที่ใช้ในกำหนดความเร็วลม ได้มาจากการสังเกตกำลังลมเหนือพื้นดินและในทะเล มาตราโบฟอร์ตเริ่มต้นจากมาตรา 0 ไปจนถึงมาตรา 17 ตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น คือ ที่มาตรา 0 จะเป็นเขตลมสงบ ไปจนถึงมาตรา 17 ที่ลมมีกำลังแรงจัดเป็นพายุเฮอริเคน ปัจจุบันมาตราโบฟอร์ตถูกนำมาใช้น้อยลง โดยเฉพาะสถานีบนบก เนื่องจากมีการใช้เครื่องมือวัดลมเพิ่มมากขึ้น ตารางที่ 2.1 เป็นตารางเพื่อเทียบความเร็วลมและชนิดลมตามมาตราโบฟอร์ต และปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 2.1 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ต

มาตรา โบฟอร์ต	ความเร็วลม		ชนิดลม	ปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน
	นอต	กม./ชม.		
0	1	1.6	ลมสงบ	ลมสงบ คิว้นลอยขึ้นตรง
1	1-3	1.6-4.8	ลมเบา	ทิศทางลมสังเกตได้จากควันที่ลอยแต่ ไม่ใช่จากศรลม
2	4-6	6.4-8.6	ลมอ่อน	รู้สึกมีลมปะทะหน้า ใบไม้เคลื่อนไหว ศรลมเริ่มหันทิศทางไปตามลม
3	7-10	12.8-19.2	ลมเฉื่อย	ใบไม้และกิ่งไม้เล็ก ๆ เคลื่อนไหวตลอด เวลา ธงเคลื่อนออกตามลม
4	11-21	20.8-28.8	ลมปาน กลาง	ฝุ่นฟุ้ง กระดาษปลิว กิ่งไม้เล็ก ๆ โยก
5	17-21	30.4-38.4	ลม กระโชก	ต้นไม้เล็ก ๆ เริ่มโยก แหล่งน้ำบนบก เช่น แม่น้ำลำคลอง หนองบึงเป็นระลอก
6	22-27	40.0-38.4	ลมแรง	กิ่งไม้ใหญ่โยก สายโทรเลขคังหือ ๆ ไม่ สะดวกที่จะใช้รั่ม
7	28-33	51.2-60.8	พายุปาน กลาง	ต้นไม้โยก เดินต้านลมไม่สะดวก
8	34-40	62.4-73.6	พายุ กระโชก	กิ่งไม้หัก เดินไปข้างหน้าไม่สะดวก
9	41-47	75.2-86.4	พายุแรง	สิ่งก่อสร้างเสียหายเล็กน้อย
10	48-55	88.0-100.8	พายุจัด	ต้นไม้ถอนราก สิ่งก่อสร้างเสียหายมาก
11	56-63	102.4-115.2	พายุจัด	สิ่งก่อสร้างเสียหายเป็นบริเวณกว้าง
12	64-71	116.8-131.2	ฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตรา โบฟอร์ด์

มาตรา โบ ฟอร์ด์	ความเร็วลม		ชนิดลม	ปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน
	นอต	กม./ชม.		
13	72 – 80	132.8 – 147.3	ฮอว์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
14	81 – 89	148.8 – 164.8	ฮอว์ริเคน	
15	90-99	166.4- 182.4	ฮอว์ริเคน	
16	100 – 108	184.0 – 200.0	ฮอว์ริเคน	
17	109 – 118	201.6 – 217.6	ฮอว์ริเคน	

2.1.3 เครื่องวัดลม

1. เครื่องวัดทิศทาง เรียกว่า ศรลม (Wind Vane) ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นลูกศรยาวมีหางเป็นแผ่นแนวตั้งเป็นตัวบังคับให้หัวศรลมชี้ไปในทิศทางที่ลมพัดเข้ามา โดยแกนของศรลมหมุนได้โดยรอบ และนำมาต่อเข้ากับระบบวงจรไฟฟ้าทำให้สามารถอ่านทิศทางลมตามที่ปลายศรลมชี้ได้ที่หน้าปัดของเครื่องวัด (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ศรลม

2. เครื่องวัดความเร็วลม เรียกว่าแอนนิโมมิเตอร์ (Anemometer) แอนนิโมมิเตอร์แบบเก่าแก่ที่สุด คือ แบบแผ่นกระดก (Pressure Plate Anemometer) ประดิษฐ์โดยโรเบิร์ต ฮุก (Robert Hook) เมื่อปี พ.ศ. 2210 ประกอบด้วยแผ่นโลหะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแขวนติดอยู่กับแกน และแกนนี้ติดอยู่กับเสาในแนวตั้ง แผ่นโลหะนี้หมุนรอบแกนได้อย่างอิสระและตั้งฉากกับทิศทางลมเสมอ เมื่อมีลมพัดปะทะกับแผ่นโลหะ ปลายด้านหนึ่งของแผ่นโลหะจะกระดกขึ้น มุมที่แผ่นโลหะทำกับแนวตั้ง

จะขึ้นอยู่กับความแรงของลม ถ้าลมนั้นแรงมากมุมที่ทำจะใหญ่ขึ้น ความเร็วลมอ่านได้จากสเกลที่ทำไว้บนโลหะโค้งที่ติดอยู่กับแกนของแผ่นโลหะ ปัจจุบันแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ แบบลูกถ้วย (Cup Anemometer) ประกอบด้วยลูกถ้วยรูปครึ่งทรงกลม 3 หรือ 4 ใบ ติดอยู่กับเพลาในแนวตั้ง



รูปที่ 2.3 แอนิโมมิเตอร์แบบรูปถ้วย

ความดันอากาศจากกระแสลมที่แตกต่างกันบนลูกถ้วย เป็นเหตุให้ลูกถ้วยหมุนไปรอบเพลา (รูปที่ 2.3) อัตราที่ลูกถ้วยหมุนจะเป็นสัดส่วนตรงกับความเร็วลม สามารถอ่านความเร็วลมได้จากหน้าปัด หรือส่งไปยังเครื่องบันทึก

เครื่องวัดที่วัดได้ทั้งความเร็วลมและทิศทางลม เรียกว่า แอโรเวน (Aerovane) เป็นชุดรวมแอนิโมมิเตอร์และครลมเข้าด้วยกัน เครื่องวัดนี้ใช้ใบพัดจำนวน 3 ใบ วัดความเร็วลม ใบพัดหมุนเป็นอัตราส่วนกับความเร็วลม รูปร่างของเครื่องมีรูปทรงของอากาศพลศาสตร์ดีและมีหางเสืออยู่ในแนวตั้งช่วยให้ใบพัดหันเข้าหาลม (รูปที่ 2.4) ครลมจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ บอกทิศทางลมและช่วยให้แกนของใบพัดชี้เข้าหาทิศทางลม ทั้งแอนิโมมิเตอร์และครลมเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล



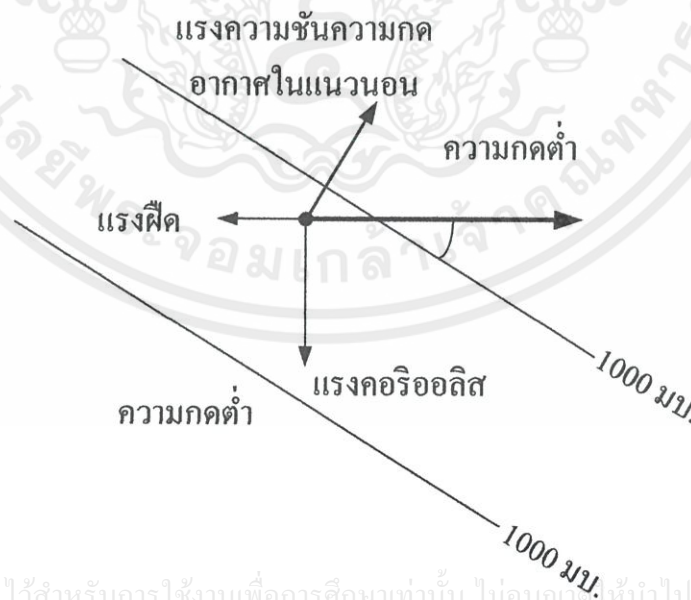
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 แอโรเวน

เครื่องวัดลมที่กล่าวมานี้ใช้วัดลมเหนือพื้นดิน เพื่อบอกทิศทางและความเร็วลมของจุดที่ติดตั้ง แต่เนื่องจากสิ่งกีดขวางต่างๆมีอิทธิพลต่อความเร็วและทิศทางลม เช่น อาคาร ต้นไม้ และอื่นๆ โดยที่ความเร็วลมจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นพ้นจากสิ่งกีดขวาง ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้วัดลมควรตั้งอยู่ในที่โล่งที่ลมไหลได้สะดวก และควรอยู่สูงกว่าหลังคาอาคาร แต่ในทางปฏิบัตินั้นเครื่องวัดลมจะถูกติดตั้งวางไว้ในระดับความสูงแตกต่างกัน ทำให้ข้อมูลการวัดลมที่ได้ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้านพลังงานลม

2.1.4 ลมผิวพื้น

ลมผิวพื้น (Surface Winds) เป็นลมที่พัดบริเวณผิวพื้นในระดับความสูงไม่เกิน 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศ และมีแรงฝัดอันเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วยในระดับที่ต่ำแรงความดันจากความกดอากาศในแนวนอนจะไม่สมดุลกับแรงคอริโอลิส และแรงฝัดทำให้ความเร็วลมลดลงมีผลให้แรงคอริโอลิสลดลงไปด้วย ลมผิวพื้นจึงไม่พัดขนานกับไอโซบาร์ (เส้นแนวความดันเท่า) แต่พัดข้ามไอโซบาร์จากความกดอากาศสูงไปยังความกดอากาศต่ำ และทำมุมกับไอโซบาร์ (รูปที่ 2.5) มุมที่ลมพัดทำกับไอโซบาร์ในระดับความสูงต่ำกว่า 10 เมตรเหนือพื้นดินนั้นขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวพื้น ถ้าเป็นทะเลที่ราบเรียบแรงฝัดต่ำจะทำมุม 10 ถึง 20 องศา ถ้าเป็นพื้นดินจะทำมุม 20 ถึง 40 องศา และบริเวณที่เป็นป่าไม้หนาที่บอาจทำมุมถึง 90 องศา ส่วนที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไป แรงฝัดลดลงและความเร็วลมสูงขึ้น มุมที่ทำกับไอโซบาร์จะน้อยลง โดยที่ระดับความสูง 1 กิโลเมตรนั้นเกือบไม่มีแรงฝัด ดังนั้นลมจึงพัดขนานกับไอโซบาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 ลมผิวพื้นพัดข้ามและทำมุมกับไอโซบาร์

2.2) ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

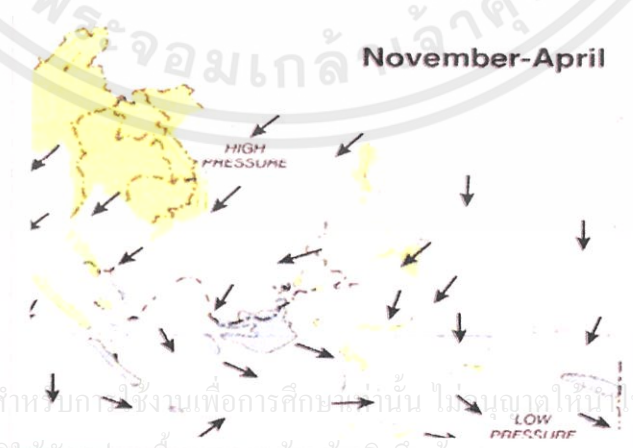
2.2.1 ลมมรสุม

ลมมรสุม (Monsoon) มาจากคำในภาษาอาหรับว่า Mausim แปลว่า ฤดู ดังนั้นลมมรสุมจึงหมายถึง ลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางพร้อมกับการเปลี่ยนฤดู เช่น ฤดูร้อนจะพัดในทิศทางหนึ่ง และจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว การเรียกลมนี้ใช้ครั้งแรกในบริเวณทะเลอาหรับ ซึ่งพัดในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นระยะเวลา 6 เดือน และพัดในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้ เป็นระยะเวลา 6 เดือน ส่วนลมมรสุมที่เห็นชัดเจนที่สุดในส่วนอื่นๆของโลกคือ ลมมรสุมที่เกิดขึ้นในเอเชียตะวันออก และเอเชียใต้

2.2.2 ลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย

ภูมิอากาศของประเทศไทยจัดอยู่ภายใต้อิทธิพลของระบบลมสำคัญ ซึ่งพัดตามฤดูกาล คือ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ลมมรสุมที่เป็นลมที่เกิดเนื่องจากความแตกต่างของความกดอากาศที่มีอยู่ในทวีปกับที่มีอยู่เหนือมหาสมุทรจึงทำให้เกิดมีลมพัดจากบริเวณความกดอากาศสูงไปยังบริเวณความกดอากาศต่ำเปลี่ยนตามฤดูดังนี้

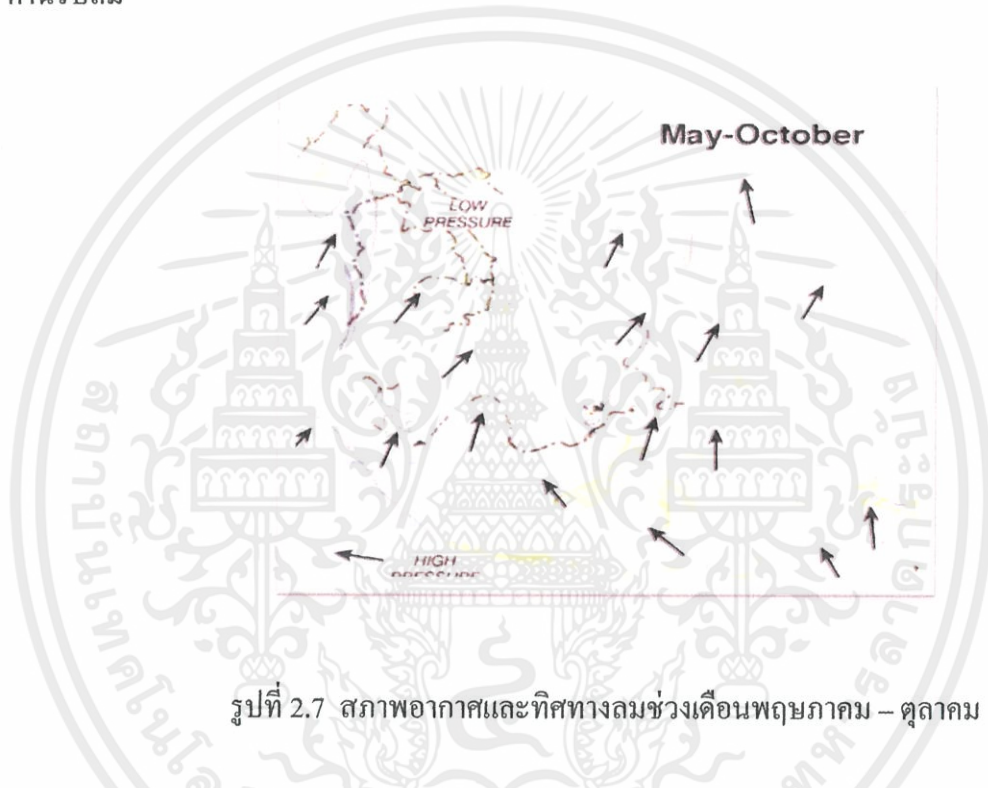
1. **มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ** ปกติจะเริ่มประมาณช่วงของกลางเดือนตุลาคมหรือเดือนพฤศจิกายน ไปจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ แต่บางปีอาจจะเลยไปถึงกลางเดือนมีนาคมหรือเดือนเมษายนในช่วงนี้ทางตอนในของทวีปเอเชียแถบประเทศจีน เป็นบริเวณความกดอากาศสูง จึงเกิดมีลมหนาวเย็น และค่อนข้างแห้งพัดเข้าสู่ ประเทศไทยซึ่งเป็นเขตความกดอากาศต่ำกว่า จัดเป็นช่วงฤดูหนาวของประเทศไทยที่มีอากาศเย็นและแห้งโดยทั่วไป แต่อุณหภูมิจะไม่ลดต่ำลงมาถึงจุดเยือกแข็ง ตามยอดเขาสูงๆอาจเกิดเกล็ดน้ำแข็งได้แต่ไม่บ่อยมาก ยกเว้นในทางภาคใต้ฝั่งตะวันออกเมื่อระลอกมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือมีกำลังแรงก็จะพัดผ่านอ่าวไทยมาก่อน ทำให้ท้องฟ้ามีเมฆมากและมีฝนตกชุกตามชายฝั่งทะเลด้านนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 สภาพอากาศและทิศทางช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน

2. **มรสุมตะวันตกเฉียงใต้** ปกติจะพัดตั้งแต่ช่วงกลางเดือนพฤษภาคม ไปจนถึงกลางเดือนกันยายนหรือเดือนตุลาคม ส่วนภาคใต้มรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเริ่มประมาณต้นเดือนพฤษภาคม และไปสิ้นสุดกลางเดือนตุลาคม ลมนี้มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ในมหาสมุทรอินเดียและทวีปออสเตรเลีย ซึ่งเดิมเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้แต่เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตรจะเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้ ลมนี้มีความชุ่มชื้นเนื่องจากพัดผ่านทะเล เมื่อพัดเข้าสู่ประเทศไทย ซึ่งเป็นเขตความกดอากาศต่ำกว่าจะทำให้มีเมฆมากและฝนตกทั่วไป จัดเป็นช่วงฤดูฝนของประเทศไทย บริเวณที่มีฝนตกมากกว่าบริเวณอื่น คือ บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันตกและตามเทือกเขาคันรับลม



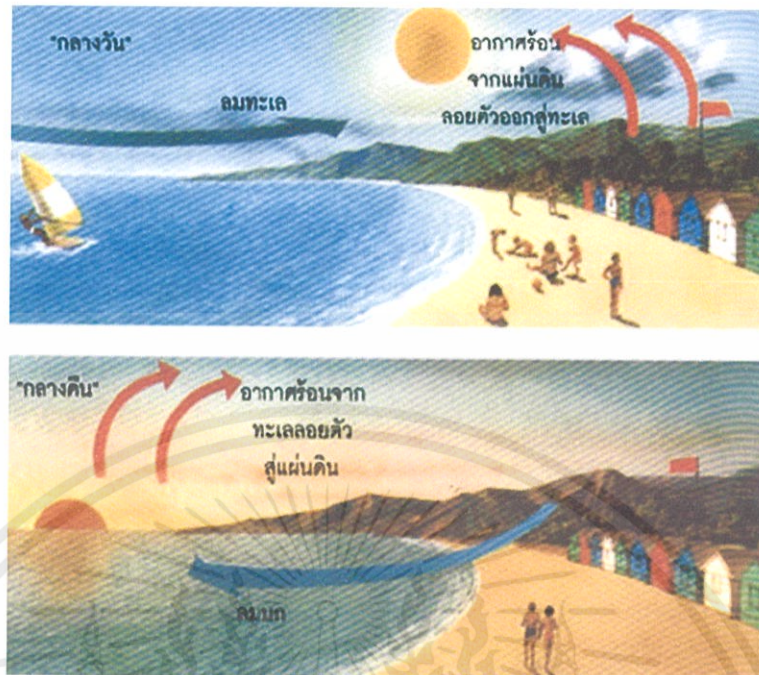
รูปที่ 2.7 สภาพอากาศและทิศทางการลมช่วงเดือนพฤษภาคม – ตุลาคม

2.2.3 ลมประจำถิ่น

ลมประจำถิ่น เป็นลมที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น สืบเนื่องจากอิทธิพลความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศและภูมิประเทศแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. **ลมทะเล (Sea Breeze)** ในเวลากลางวัน เมื่อพื้นดินได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นดินที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะขยายตัวลอยขึ้นสู่เบื้องบน (ความกดอากาศต่ำ) อากาศเหนือพื้นน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความกดอากาศสูง) ก็จะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดลมทะเลพัดเข้าหาชายฝั่ง เรียกว่า ลมทะเล

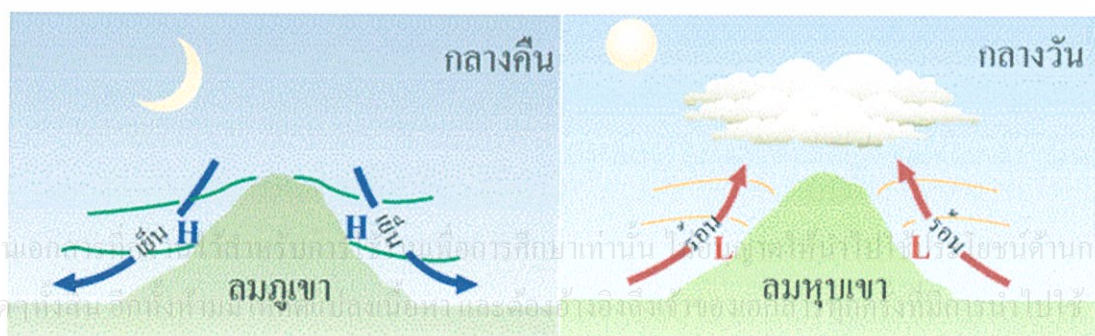
2. **ลมบก (Land Breeze)** ในเวลากลางคืน เมื่อพื้นดินคายความร้อน โดยการแผ่รังสีออกมา และจะคายความร้อนออกได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้พื้นดินมีอุณหภูมิต่ำ (ความกดอากาศสูง) กว่าพื้นน้ำอากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งร้อน (ความกดอากาศต่ำ) กว่าจึงลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นดินซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดเป็นลมที่พัดจากฝั่งไปสู่ทะเล จึงเรียกว่า ลมบก



รูปที่ 2.8 แสดง ลมบกและลมทะเล

3. **ลมหุบเขา (Valley Breeze)** ในเวลาช่วงกลางวัน อากาศตามไหล่เขาได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เต็มที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นที่ลาดหุบเขาจะขยายตัวและลอยขึ้นสู่เบื้องสูง (ความกดอากาศต่ำ) ส่วนอากาศที่อยู่ในหุบเขาเบื้องล่างที่มีอุณหภูมิต่ำ (ความกดอากาศสูง) กว่า จะไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้มีลมเย็นจากหุบเขาเบื้องล่างพัดไปตามลาดเขาขึ้นสู่เบื้องบน เรียกว่า ลมหุบเขา

4. **ลมภูเขา (Mountain Breeze)** ในเวลากลางคืน อากาศตามไหล่เขาและลาดเขาจะคายความร้อนออกได้อย่างรวดเร็วกว่าหุบเขาจึงมีอุณหภูมิต่ำ (ความกดดันสูง) อากาศตามหุบเขาที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะขยายตัวและลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน (ความกดดันต่ำ) อากาศที่อยู่ตามลาดเขาที่มีอุณหภูมิต่ำและหนักกว่าบริเวณใกล้เคียงจึงไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้มีลมพัดตามลาดเขาลงสู่หุบเขาเบื้องล่าง เรียกว่า ลมภูเขา



รูปที่ 2.9 แสดง ลมหุบเขาและลมภูเขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องขออภัยล่วงหน้าไว้ด้วย

2.3) ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

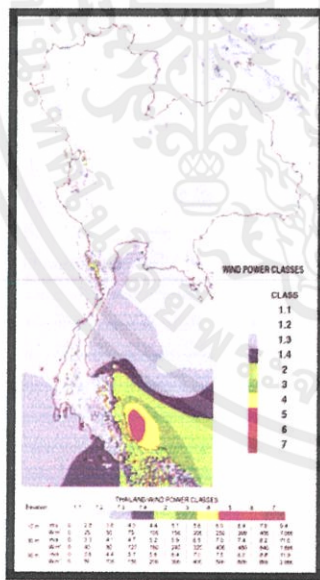
พื้นที่ที่มีศักยภาพในการพัฒนาใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในประเทศไทย จากแผนที่ศักยภาพพลังงานลม การตรวจวัดจริงจากภาคสนามและการประโยชน์จากพลังงานลมดั้งเดิมของคนไทยในอดีต นำมาวิเคราะห์เบื้องต้นด้านพื้นที่และความเร็วลมแล้ว พื้นที่ที่มีศักยภาพและความเหมาะสมในการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง (Micrositing) เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์จากพลังงานลม ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่อยู่ติดชายฝั่งทะเลด้วยได้รับลมทั้งจากลมบกลมทะเล และลมประจำฤดู

พื้นที่บริเวณแนวชายฝั่ง จ.นครศรีธรรมราชและ จ.สงขลา ตามแนวถนนทางหลวง 4013 และ 408 นับตั้งแต่ อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช ถึง อ.สิงหนคร จ.สงขลา ระยะทางประมาณ 140 กิโลเมตร มีลักษณะพื้นที่กว้างประมาณ 2 กิโลเมตร (280 ตารางกิโลเมตร) มีลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบชายฝั่งและการทำบ่อเลี้ยงกุ้ง ถนนลาดยางตลอดสาย ซึ่งได้รับลมเป็นระยะยาวนานใน หนึ่งปี ทั้งลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีความเร็วลมเฉลี่ยในช่วง 4.5-5.0 เมตร/วินาที (กำลังลม 100-150 วัตต์/ตารางเมตร) พื้นที่ในบริเวณ อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช จะดำเนินโครงการสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลม ขนาด1.5เมกะวัตต์ และ 250 กิโลวัตต์ ในปี พ.ศ.2549-2550 และพื้นที่ในบริเวณ จ.สงขลา ได้ดำเนินโครงการศึกษาศักยภาพ พลังงานลมเฉพาะแหล่งซึ่งผลการศึกษาพบว่าบริเวณเกาะใหญ่ อ.กระแสสินธุ์ มีศักยภาพในการ พัฒนาติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในรูปแบบทุ้งกังหันลมได้ประมาณ 5-10 เมกะวัตต์ ซึ่งสามารถ นำไปส่งเสริมการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมได้ในอนาคต

2.4) แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย

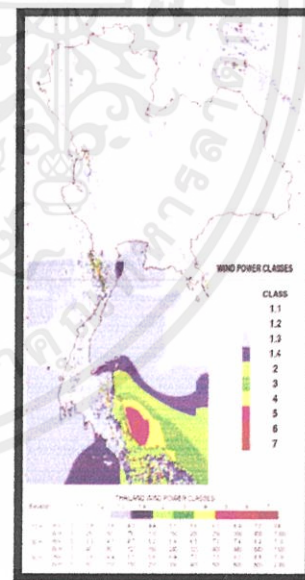
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้จัดทำขึ้นเมื่อปี พ.ศ.2544 ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนเพื่อการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยมีบริษัทเฟลโลว์ เอ็นจิเนียร์ส คอนซัลแตนต์ จำกัด เป็นที่ปรึกษาการจัดทำประกอบด้วยข้อมูลลมจากกรมอุตุนิยมวิทยากรมพัฒนาพลังงานทดแทน (พพ.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) กองทัพอากาศ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กลองทัพอเรือ บริษัท UNOCAL เรือเดินทะเล และดาวเทียม ข้อมูลที่ได้ทั้งหมดนำมาวิเคราะห์และจัดทำแผนที่ด้วยโปรแกรม Wind Map ซึ่งอ้างอิงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้แผนที่ศักยภาพพลังงานลมเฉลี่ยรายปี ทั้งที่รวมความเร็ว ลมช่วงลมสงบ และไม่รวมช่วงลมสงบ แสดงถึงความเร็วลม (Wind Speed) และกำลังลม

ประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งพัดผ่านประเทศไทยจากทะเลจีนใต้ ในเดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม ทำให้มีคลื่นลมแรงทางภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย ทิศทางของลมพัดจากทะเลเข้าสู่ฝั่ง ทำให้พื้นที่บริเวณชายฝั่งตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และปัตตานี มีกำลังลมแรงความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 6.4 เมตร/วินาที ส่วนอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งพัดผ่านประเทศไทยจากจากทะเลอันดามันในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม ทำให้เทือกเขาในจังหวัดเพชรบุรี กาญจนบุรี และตาก ที่เป็นรอยต่อกับประเทศพม่า มีกำลังลมแรงบนยอดเขามีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 5.6 เมตร/วินาที นอกจากนี้ในบริเวณพื้นที่สูงที่เป็นเทือกเขาในบริเวณภาคใต้มีลมเกือบตลอดปี ซึ่งเป็นผลมาจากการได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งสองสลับกันตลอดปี มีกำลังลมบนยอดเขามีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 5.6 เมตร/วินาที รวมทั้งพื้นที่สูงในเขตอุทยานแห่งชาติคอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ แหล่งที่มีศักยภาพพลังงาน ลมรองลงมาพบว่าอยู่บริเวณพื้นที่ชายฝั่งอ่าวไทยจังหวัดชลบุรี ระยอง เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามัน จังหวัดสตูล ตรัง กระบี่ ภูเก็ต พังงา และบริเวณที่สูงบางพื้นที่บนยอดเขาในภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ และทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่จังหวัดเพชรบูรณ์ และเลย มีความเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 4.4 เมตร/วินาที



รูปที่ 2.10 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม

รวมช่วงลมสงบ - เฉลี่ยปี



รูปที่ 2.11 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม

ไม่รวมช่วงลมสงบ - เฉลี่ยปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5) พลังงานลม

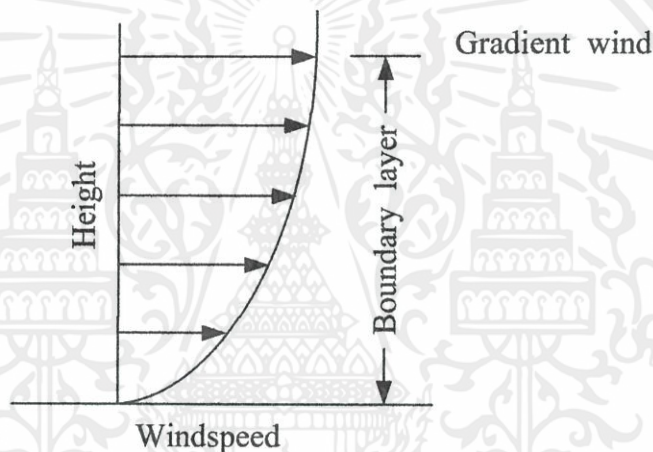
พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม กล่าวคือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในภาคตัดขวางของโลกประมาณ 178,000 ล้านล้านวัตต์ มีเพียง 0.2% เท่านั้นที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศที่เรียกว่าพลังงานลม และส่วนนี้ก็ยังเป็นผลให้เกิดคลื่นในมหาสมุทรด้วย ลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่มีอยู่อย่างมหาศาลและสามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น ซึ่งได้มีการนำมาใช้ประโยชน์กันเป็นเวลานานแล้ว ด้วยการประกอบใช้กับเครื่องจักรต่างๆ เช่น เครื่องสีข้าว ระหัดวิดน้ำ ฯลฯ โดยในการนำพลังงานที่ได้จากลมออกมาใช้ประโยชน์นั้น เครื่องมือสำคัญคือ กังหันลม (Wind Mill) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากลมมาเป็นพลังงานกลโดยตรง การใช้ประโยชน์จากกังหันลมในระยะแรกๆจะเป็นการประยุกต์ใช้กับงานกลเป็นส่วนใหญ่ และในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนาใช้ประโยชน์ในลักษณะกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind Turbine Generator) จึงเริ่มขยายตัวมากขึ้นเพื่อทดแทนการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยพลังงานจากซากพืชซากสัตว์หรือพลังงานเชื้อเพลิงที่นับวันจะมีต้นทุนที่สูงขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

การพัฒนาการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมนั้นมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในแถบทวีปยุโรป ซึ่งได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามแม้จะมีการใช้และพัฒนาพลังงานลมมาช้านาน แต่ก็ยังมีจุดสะดุดในหลายๆด้าน ไม่ว่าจะเป็นการขาดการสนับสนุนด้านเงินทุน การหันไปใช้พลังงานรูปแบบอื่นที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและมีต้นทุนถูกกว่ากังหันลม รวมไปถึงการขาดการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อราคาพลังงานเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการคำนึงถึงผลกระทบจากการใช้พลังงานที่มีต่อสภาวะแวดล้อม โดยเฉพาะผลกระทบจากภาวะก๊าซเรือนกระจกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโลกได้ทำให้ความสนใจในการใช้พลังงานลมจากประเทศต่างๆเพิ่มสูงขึ้นมาอีกครั้ง เพราะพลังงานลมนั้นเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่มีวันหมด ไม่สร้างมลพิษ และไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสภาพแวดล้อม

2.6) หลักการทำงานของกังหันลม

ลมที่เกิดขึ้นถูกใช้ประโยชน์จากส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลกหรือที่เรียกว่าลมผิวพื้นซึ่งหมายถึงลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีการผสมผสานของอากาศกับอนุภาคอื่นๆ และมีแรงเสียดทานในระดับต่ำ โดยเริ่มต้นที่ระดับความสูงมาก

กว่า 10 เมตรขึ้นไป แรงเสียดทานจะลดลง ทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.12 จนกระทั่งที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบ ไม่มีแรงเสียดทาน (นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. 2547 : 65) ความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับระดับความสูงรวมถึงสภาพทางภูมิประเทศ เช่นเดียวกันกับทิศทางของลม จากประสบการณ์ที่ผ่านมามีพบว่ากังหันลมจะทำงานได้ดีหรือไม่นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งสองนี้ที่ความเร็วลมเท่าๆกัน แต่มีทิศทางลมที่แตกต่างกัน เมื่อลมเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาแกนหมุนของกังหันลมแล้วจะส่งผลต่อแรงบิดของกังหันลมเป็นอย่างมาก ผลคือแรงลัพท์ที่ได้ออกมาจากกังหันลมแตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยเบื้องต้นที่จะเป็นตัวกำหนดในการใช้พลังงานลมคือความเร็วและทิศทางของลมนั่นเอง



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ

พลังงานที่ได้รับจากกังหันลมจะมีเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงที่ความเร็วลมต่ำในช่วง 1–3 เมตรต่อวินาที เป็นผลให้กังหันลมยังไม่ทำงาน จึงยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5–5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงานเรียกช่วงนี้ว่าช่วงเริ่มความเร็วลม (cut in wind speed) และที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12–15 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงที่เรียกว่าช่วงความเร็วลม (nominal หรือ rate wind speed) ซึ่งจะเป็นช่วงที่กังหันลมทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวเอง ในช่วงที่ความเร็วลมมีการเริ่มไต่ระดับไปสู่ช่วงความเร็วลมเป็นการทำงานของกังหันลมด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (maximum rotor efficiency) ซึ่งค่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการกระตุ้นความเร็ว (tip speed ratio) (Siegfried. 1998 : 67) และในช่วงเลขความเร็วลม (cut out wind speed) เป็นช่วงที่ความเร็วลมสูงกว่า 25 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะหยุดทำงานเนื่องจากความเร็วลมสูงเกินไปซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้

การหาค่ากำลังของลมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v ผ่านพื้นที่หน้าตัด A หาได้จาก

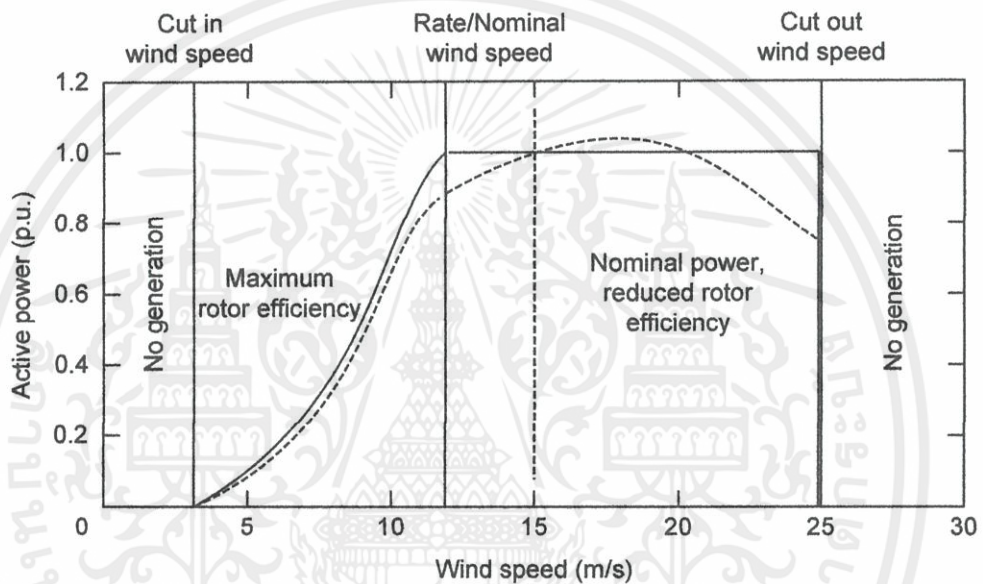
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

เมื่อ P_w คือ กำลังของลม (W)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1.225 kg/m^3

A คือ พื้นที่หน้าตัด (m^2)

v คือ ความเร็วลม (m/s)



รูปที่ 2.13 แผนภูมิแสดงกำลังไฟฟ้าและช่วงการทำงานของกังหันลมแบบต่างๆ

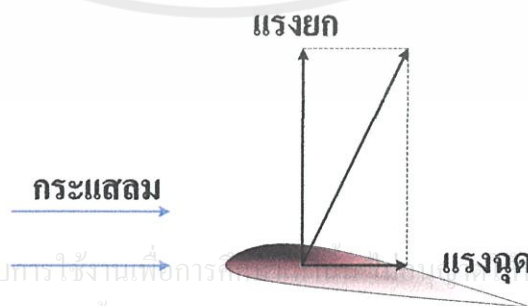
สำหรับหลักการทั่วไปในการนำพลังงานลมมาใช้ คือ เมื่อมีลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล โดยการหมุนของใบพัด แรงจากการหมุนของใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านแกนหมุนทำให้เฟืองเกียร์ที่ติดอยู่กับแกนหมุนเกิดการหมุนตามไปด้วย พลังงานกลที่ได้จากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้เองที่จะถูกประยุกต์ใช้ประโยชน์ตามความต้องการ เช่น ในกรณีที่ต้องการใช้กังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าจะต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไป ซึ่งเมื่อเฟืองเกียร์ของกังหันลมเกิดการหมุนจะไปขับเคลื่อนให้แกนหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนตามไปด้วย ด้วยหลักการนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ ส่วนในกรณีของการใช้กังหันลมในการสูบน้ำหรือสีข้าวสามารถนำเอาพลังงานกลจากการหมุนของเฟืองเกียร์นี้ไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรง

ตารางที่ 2.2 ภาพรวมการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่งทั่วโลก

Region	Installed capacity (MW)				
	End 1995	End 1997	End 1999	End 2000	End 2001
Europe	2,518	4,766	9,307	12,972	16,362
North America	1,676	1,611	2,619	2,695	4,440
South & Central America	11	38	87	103	103
Asia & Pacific	626	1,149	1,403	1,795	2,162
Region	Installed capacity (MW)				
	End 1995	End 1997	End 1999	End 2000	End 2001
Middle East & Africa	13	24	39	141	203
Total world-wide	4,844	7,588	13,455	17,706	23,270

2.7) อากาศพลศาสตร์ของกังหันลม

กังหันลมหมุนได้เนื่องจากขณะที่กระแสลมเคลื่อนที่จะมีพลังงานจลน์เกิดขึ้น เมื่อกระแสลมพัดผ่านใบพัดจะผลักดันทำให้ใบพัดหมุนรอบแกน แรงที่กระทำต่อใบพัดประกอบด้วยแรงสองแรงกระทำในทิศทางที่ตั้งฉาก ซึ่งเรียกว่าแรงฉุดหรือแรงหน่วง (drag force) และแรงยก (lift force) ขนาดของแรงฉุดและแรงยกจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุ มุมของวัตถุต่อทิศทางของกระแสลมและความเร็วของกระแสลม



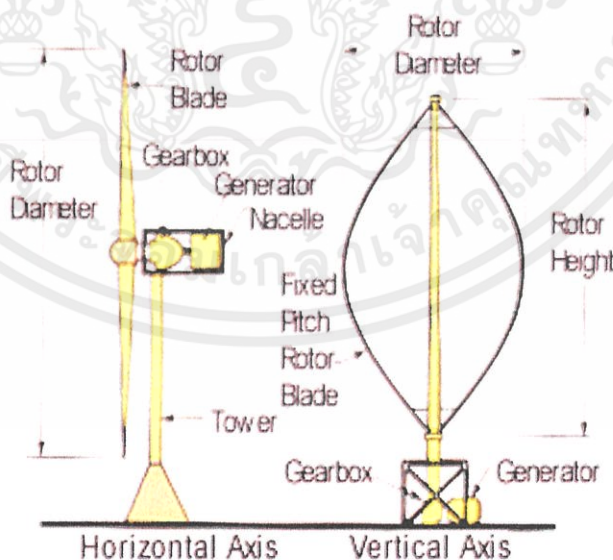
รูปที่ 2.14 แสดงแรงฉุดและแรงยกที่กระทำต่อวัตถุ

แรงจลน์คือแรงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของไหล และทิศทางของแรงอยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ถ้าวัตถุวางอยู่ในแนวที่พื้นที่ด้านข้างตั้งฉากกับกระแสลมแรงจลน์ที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่ามากที่สุด แต่ถ้าพื้นที่ด้านข้างอยู่ในแนวเดียวกับทิศทางกระแสลมแรงจลน์จะมีค่าต่ำ ซึ่งกั้นหันลมแกนตั้งถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงจลน์

แรงยกคือแรงที่กระทำต่อวัตถุที่อยู่ในของไหล โดยทิศทางของแรงอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่ ถ้าวัตถุวางอยู่ในแนวที่พื้นที่ด้านข้างขนานกับทิศทางของกระแสลมแรงยกที่กระทำต่อวัตถุจะมีค่ามากที่สุด แต่ถ้าพื้นที่ด้านข้างวางตัวในแนวตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลมแรงยกจะมีค่าต่ำสุด ซึ่งกั้นหันลมแกนนอนถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงยก

2.8) ประเภทของกังหันลม

กังหันลม คือ ชุดเครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกล และนำพลังงานกลมาใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปกังหันลมแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ตามแกนหมุนของกังหันลม ได้แก่ กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) และกังหันลมแกนหมุนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) ซึ่งทั้งสองชนิดจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ในการทำงานผลิตไฟฟ้าที่คล้ายกัน เช่น ชุดใบพัด ชุดห้องเกียร์ทดกำลัง ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และชุดเสา จะมีความแตกต่างกันตรงการวางชุดแกนหมุนใบพัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะ Wind Turbine Configurations

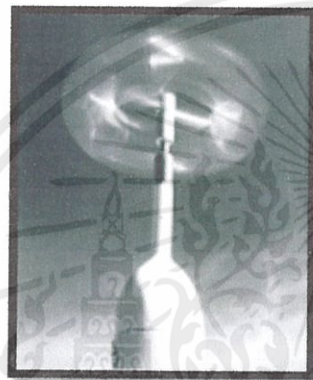
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งและกังหันลมแกนหมุนแนวนอน

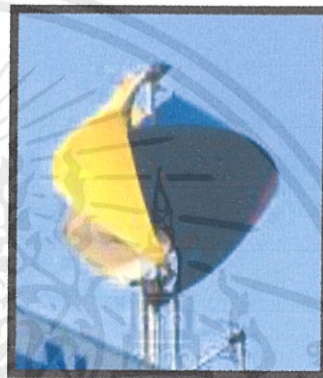
1 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นราบ หรือตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม นั่นเอง โดยมีใบพัดยึดติดขนานกับแกนหมุนทำหน้าที่รับแรงลมที่เคลื่อนตัวมากระทบ ทำให้เกิดการหมุนของใบพัด กังหันลมชนิดนี้สามารถรับแรงลมในแนวอนได้ทุกทิศทาง สามารถแยกได้ตามลักษณะแรงขับเคลื่อนที่เกิดจากกระแสลมได้ดังนี้

1.1 ชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงดูด (Primarily Drag-type) เช่น กังหันลมแบบใบโค้งตัวเอสหลายใบ (S Multi-bladed) แบบกระดานใบจักรเรือ (Screened Paddlewheel) แบบลูกถ้วย (Cupped)



S Blades



Cupped

รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงดูด

1.2 ชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงยก (Primarily Lift-type) เช่น กังหันลมแบบแดร์เรีย (Darrieus) แบบแนวตั้งรูปเอช (H-VAWT) แบบแนวตั้งรูปวี (V-VAWT) แบบกังหันบังกี (Banki Turbine)



H-VAWT



Darrieus



Banki

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงยก

1.3 ชนิดขับเคลื่อนด้วยแรงผสม (Combination) เช่น กังหันลมแบบซาโวเนียส(Savonius) แบบซาโวเนียสแดร์เรียส (Savonius Darrieus)



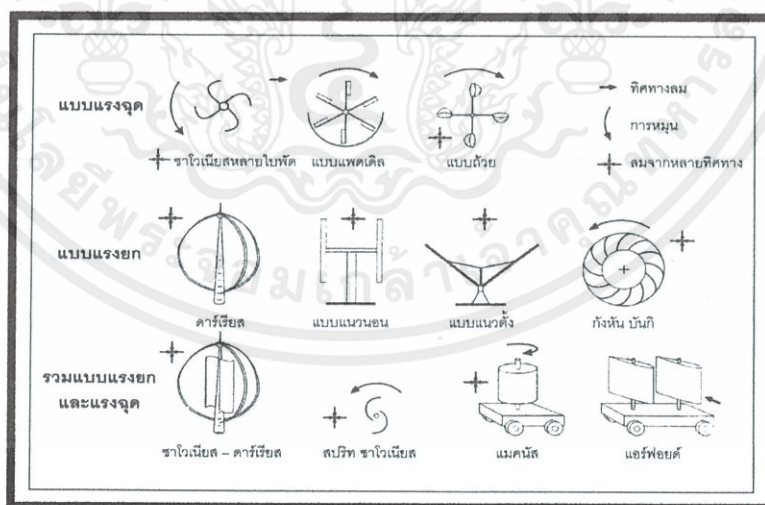
Savonius-Darrieus

Savonius

Savonius

รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งชนิดขับเคลื่อนด้วยแรง

ปัจจุบันมีการพัฒนากังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้งที่มีขนาดเล็กสำหรับใช้งานขนาดใหญ่ ไม่ได้รับการพัฒนาให้มีการใช้งานแพร่หลาย และมีใช้งานน้อยมาก จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมและแพร่หลายในเชิงพาณิชย์มีการใช้งานอยู่ประมาณร้อยละ 25 ของกังหันลมที่มีใช้งานในปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของกังหันลมแกนตั้งแบบต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นราบ หรือขนานไปกับทิศทางเคลื่อนที่ของลม นั่นเอง โดยมีใบพัดยึดติดตั้งฉากกับแกนหมุน ทำหน้าที่รับแรงลมที่เคลื่อนตัวมากระทบทำให้เกิด การหมุนของใบพัด เช่น กังหันลม แบบใบเดี่ยว (Single Blade) แบบใบคู่ (Double Blade) แบบ สามใบ (Three Blade) แบบหลายใบ (Multi Blade) แบบใบพัดหลายชุด (MultiRotor) แบบอัป วินด์ (Up-wind) แบบดาวนัวินด์ (Down-wind) เป็นต้น ปัจจุบันนี้กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบสาม ใบพัดชนิดแกนหมุนแนวนอนมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ได้รับความนิยมในการใช้งาน และแพร่หลายในเชิงพาณิชย์ และมีการใช้มากถึงร้อยละ 75 ของกังหันลมที่มีใช้งานในปัจจุบัน

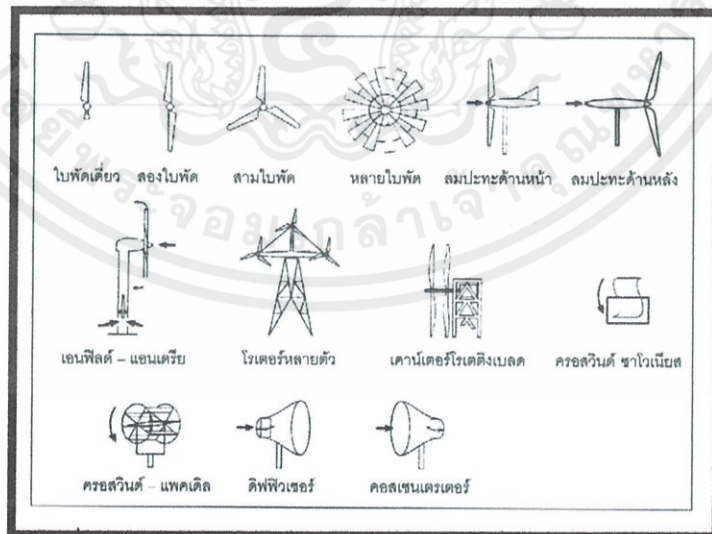


Three Blade

Double Blade

Multi Blade

รูปที่ 2.20 แสดงจำนวนใบพัดกังหันลมแกนหมุนแนวนอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของกังหันลมแกนหมุนแนวนอนแบบต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

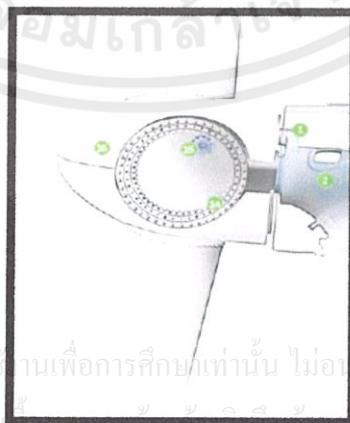
2.9) ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

องค์ประกอบที่ประกอบขึ้นเป็นกังหันลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในหนึ่งชุด จะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบหลักใหญ่ๆ ได้แก่ ชุดแกนหมุนใบพัด (Rotor Blade) ชุดห้องเครื่อง (Nacelle) ชุดเสา (Tower) และฐานราก (Foundation) ซึ่งภายในขององค์ประกอบหลักจะประกอบด้วยของค์ประกอบย่อยลงไปอีกเพื่อให้กังหันลมมีความสมบูรณ์ในการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบกังหันลมแกนหมุนแนวนอน

- แกนหมุนใบพัด (Rotor Blade) (หมายเลข 2 รูปที่ 2.22) ซึ่งเป็นส่วนแรกของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ทำหน้าที่รับหรือปะทะกับแรงลม ดังรูปที่ 2.23

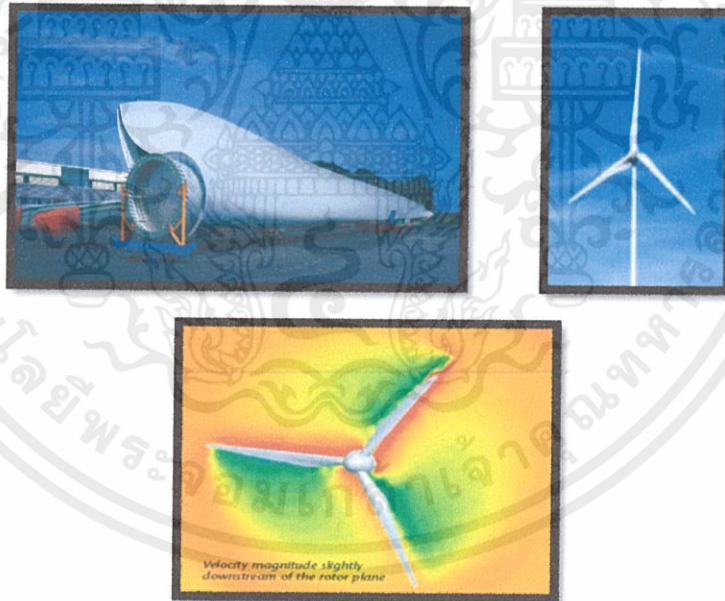


รูปที่ 2.23 แกนหมุนใบพัด

- **คุมแกนหมุน (Nose Cone)** เป็นตัวครอบแกนหมุนที่อยู่ส่วนหน้าสุด ทำจากโลหะหรือไฟเบอร์กลาสอย่างดีมีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายไข่ (Spheroid) เพื่อการลู่ลมและมองดูสวยงาม

- **ใบพัด (Blade)** (หมายเลข 1 รูปที่ 2.22) ซึ่งยึดติดกับแกนหมุน (Rotor Hub) หน้าที่ในการรับพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) จากการเคลื่อนที่ของลม และหมุนแกนหมุนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก (Mainshaft) มีรูปทรงคล้ายกับปีกของเครื่องบิน ถูกออกแบบโดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของอากาศ ขึ้นรูปด้วยแบบ (Mold) ประกอบด้วยแกนโครงร่างเพื่อความแข็งแรงด้านนอก ปิดทับขึ้นรูปที่ทำจากไฟเบอร์กลาสโพลีเอสเตอร์อย่างดี เพื่อให้มีน้ำหนักเบาพอเหมาะและเหนียวทนทานรับกับแรงลมได้ดี

กังหันลมผลิตไฟฟ้าอาจจะมีใบพัดตั้งแต่จำนวนหนึ่งใบพัดถึงหลายใบพัดขนาด 3 ใบพัดจัดว่าดีที่สุดในการกวาดรับแรงลมและนิยมใช้กันมากที่สุดในขณะนี้ใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าถือว่าเป็นหัวใจของกังหันลมผลิตไฟฟ้าและมีความละเอียดสูงในการออกแบบ ดังนั้นใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าจึงมีความสำคัญมากต่อการทำงานและต่อประสิทธิภาพของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เพราะหากสามารถออกแบบใบพัดกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูง ก็จะทำให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าก็จะทำงานได้เป็นอย่างดีที่ความเร็วลมเปลี่ยนไป



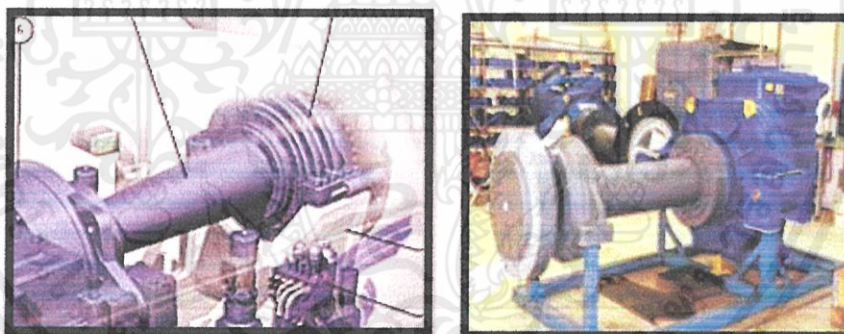
รูปที่ 2.24 ใบพัดกังหันลมยาว 35 เมตร ใช้กับกังหันลม 2.0 MW

เอกสารนี้เป็นเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม
- **จุดปรับหมุนใบพัด (Pitch Drive)** (หมายเลข 3 รูปที่ 2.22) อยู่ระหว่างช่วงรอยต่อระหว่างก้านใบกับแกนหมุน ทำหน้าที่ในการปรับใบพัดให้มีความพร้อม และเหมาะสมเมื่อเริ่มรับแรงลมต่ำๆ เพื่อการเริ่มหมุนของใบพัด (Cut In) และปรับใบพัดให้ลู่ลมโดยอัตโนมัติเพื่อช่วยในการหยุดหมุนของแกนหมุนเมื่อได้รับแรงลมเกินพิกัด (Cut Out) หรือในกรณีซ่อมบำรุงรักษากังหันลม

- **ชุดปรับยึดแกนหมุน (Rotor Lock)** เป็นแกนหมุนที่ยึดติดส่วนท้ายของแกนหมุน มีระบบยึดแน่นไม่ให้แกนหมุนมีการขับเคลื่อนหมุนเมื่อได้รับแรงลมเกินพิกัดหรือในกรณีซ่อมบำรุงรักษา กังหันลม

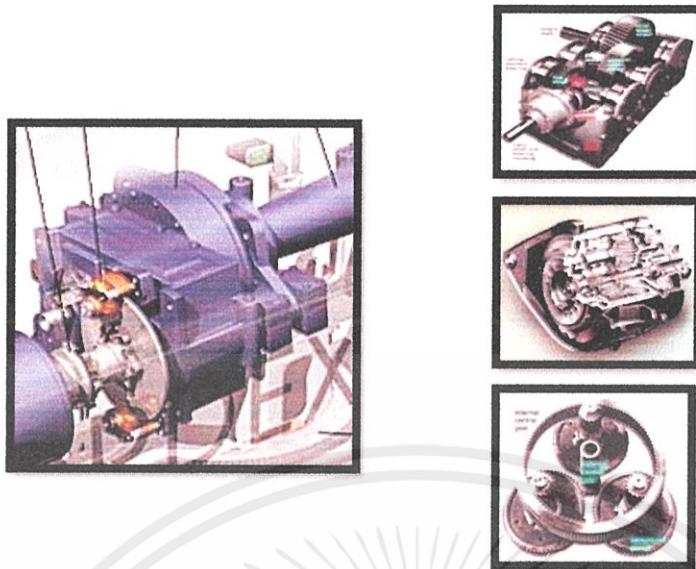
- **ห้องเครื่อง (Nacelle)** (หมายเลข 11 รูปที่ 2.22) จัดว่าเป็นส่วนที่สำคัญของกังหันลมเพราะมีองค์ประกอบย่อยของกังหันลมมากที่สุด มีลักษณะคล้ายกล่องใส่ของขนาดใหญ่ที่ถูกออกแบบมาให้มีความเหมาะสม เพื่อเป็นตัวป้องกันสภาพอากาศภายนอก เช่น ฝน หิมะ ให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ภายใน โครงสร้างแบ่งออกเป็นสองส่วนประกบติดกัน ส่วนที่เป็นโครงช่วงล่าง หรือฐานทำมาจากเหล็กผ่านความร้อนสูง ทนต่อสภาวะแรงดึง แข็งแรงทนทานสามารถลดการสั่นสะเทือนและเสียงได้ดี ส่วนที่เป็นช่วงบนหรือตัวฝาครอบทำมาจากไฟเบอร์กลาสโพลีเอสเตอร์อย่างดี มีพื้นที่ภายในพอสำหรับคนที่จะขึ้นไปติดตั้งและทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ได้ องค์ประกอบย่อยที่ติดตั้งอยู่ภายใน ได้แก่ชิ้นส่วนสำคัญต่างๆดังอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- **เพลาแกนหมุนหลัก (Main Shaft หรือ Low Speed Shaft)** (หมายเลข 5 รูปที่ 2.22) ทำจากโลหะเหล็กคุณภาพสูง ที่สามารถทนต่อแรงกระแทก การสึกกร่อนและอุณหภูมิสูงได้ดี ทำหน้าที่รับแรงจากแกนหมุนใบพัด (Rotor Blades) และส่งผ่านเข้าสู่ห้องปรับเปลี่ยนทอร์บกำลัง (Gear Box) ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงเพลาแกนหมุนหลัก

- **ห้องทอร์บกำลัง (Gear Box)** (หมายเลข 6 รูปที่ 2.22) กล่องและเฟืองทอร์บกอร์บขนาดต่างๆ ทำจากโลหะคุณภาพสูง ที่สามารถทนต่อแรงบิด การเสียดสีและการสึกกร่อนได้ดี หน้าที่เป็นตัวควบคุมปรับเปลี่ยนทอร์บการหมุนและถ่ายแรงของเพลาแกนหมุนหลัก (Main Shaft) ที่มีความเร็วรอบต่ำ ไปยังเพลาแกนหมุนเล็ก (Small Shaft) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้มีความเร็วรอบที่สูงขึ้นและมีความเร็วสม่ำเสมอในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) การทอร์บกอร์บมีตั้งแต่ 3 - 5 ระดับ (3 - 5 Stage) ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงห้องทรงรอบกำลัง

- เบรก (Brake) (หมายเลข 4 รูปที่ 2.22) เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ในการควบคุมและยึดการหยุดหมุนอย่างสิ้นเชิงของใบพัดและเพลากลมหุนของกังหันลมเมื่อต้องการให้กังหันลมหยุดหมุนทำงานและในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา ส่วนใหญ่ทำลักษณะจานเบรก (Disc Brake) ด้วยโลหะอย่างดี
- เพลากลมหุนเล็ก (Small Shaft หรือ High Speed Shaft) (หมายเลข 12 รูปที่ 2.22) ทำมาจากโลหะคุณภาพสูง ที่สามารถทนต่อแรงกระแทก แรงเหวี่ยงจากการหมุน การสั่นกระดอนและอุณหภูมิสูงได้ดี ทำหน้าที่รับแรงที่มีความเร็วรอบสูงจากห้องทรงรอบกำลัง (Gear Box) เพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.27

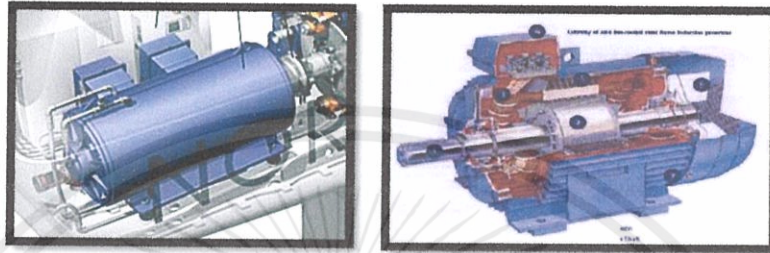


รูปที่ 2.27 แสดงเบรกและเพลากลมหุนเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

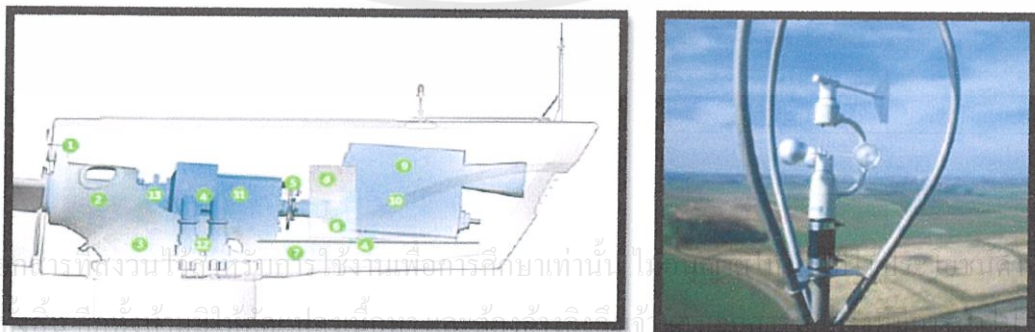
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น - เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) (หมายเลข 7 รูปที่ 2.22) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลที่ได้รับเป็นพลังงานไฟฟ้า มีใช้ 2 ประเภท คือ Synchronous Generator ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนด้วยความเร็วคงที่คือความเร็ว Synchronous Speed (50 Hz) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีความถี่และแรงดัน

ไฟฟ้าเท่ากับควมดีและแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่ง และ Induction Generator เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีโครงสร้างเหมือนกับ Induction Motor โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ชุดสเตเตอร์ทำให้เกิดฟลักซ์เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสภาวะกระแสสลับ จะไปเหนี่ยวนำยังแกนโรเตอร์ให้หมุนตามในตอนเริ่มต้นและเมื่อมีแรงมาขับโรเตอร์ให้หมุนเกินกว่า Synchronous Speed จะเกิดการเหนี่ยวนำที่ย้อนกลับทำให้เกิดกระแสไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายย้อนกลับเข้าระบบสายส่ง



รูปที่ 2.28 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- ระบบควบคุมไฟฟ้า (Controller System) (หมายเลข 8 รูปที่ 2.22) เป็นระบบควบคุมการทำงานและการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกสู่ระบบ ซึ่งใช้การควบคุมการทำงานด้วยระบบคอมพิวเตอร์
- ระบบระบายความร้อน (Cooling) เป็นระบบเพื่อใช้ระบายความร้อนจากการทำงานของกลไกภายในห้องทรอบกำลังและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีการทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งอาจระบายด้วยลมหรือน้ำแล้วแต่ระบบและการออกแบบของผู้ผลิต
- เครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม (Anemometer and Wind Vane) (หมายเลข 9 และ 10 รูปที่ 2.22) เป็นส่วนเดียวที่ติดตั้งอยู่ภายนอกห้องเครื่อง ซึ่งได้รับการเชื่อมต่อสายสัญญาณให้เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อเป็นตัววัดและชี้ถึงปริมาณความเร็วและทิศทางลม เพื่อคอมพิวเตอร์ได้คอยควบคุมกลไกการทำงานของส่วนอื่นๆ ของกังหันลม เช่น การหมุนของแกนคอกหมุนเพื่อรับแรงลมตามทิศทางลมที่พัดมาได้ อย่างถูกต้องดูจากรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงเครื่องวัดความเร็วและทิศทางลม

-เสาคู่ (Tower) (หมายเลข 15 รูปที่ 2.22) เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นชุดแกนหมุนใบพัด (Rotor blade) และตัวห้องเครื่อง (Nacelle) ที่อยู่ข้างบน ปัจจุบันมีใช้งาน 2 แบบ ได้แก่ แบบเสาคกลมกลวง (Tubular) ทำจากเหล็กที่ได้มาตรฐานตามเกณฑ์กำหนด (Modular Steel Tower) และแบบเสาโครงถัก (Lattice) ทำจากเหล็กผสม กาลวาไนซ์ (Hot-dip Galvanized) ป้องกันสนิมด้วยระบบฉีดทรายขัดสนิม (Sand Blasting) และเคลือบด้วยสี Epoxy ซึ่งทั้งสองแบบจะต้องได้รับการออกแบบในเชิงวิศวกรรมมาเป็นอย่างดีในการรับน้ำหนัก และแรงปะทะของลมต่อพื้นที่กวาดใบพัดก่อนการติดตั้ง ในปัจจุบันนิยมใช้เป็นแบบเสาคกลมกลวงมากกว่าแบบ เสาโครงถัก เนื่องจากการมองเห็นมีผลต่อสิ่งแวดล้อมด้านภูมิทัศน์ ความสูงของเสามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระยะความสูงในการรับแรงลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัดและขนาดของกังหันลม ในอดีตและการพัฒนาในยุคแรกๆ กังหันลมขนาด 30 kW เสาสูงประมาณ 30 เมตร ขนาด 80 kW เสาสูงประมาณ 40 เมตร ขนาด 250 kW เสาสูงประมาณ 50 เมตร ขนาด 600 kW เสาสูงประมาณ 70 - 80 เมตร ปัจจุบันนั้นกังหันลมขนาด 1,500 - 2,000 kW เสาสูงประมาณ 90 - 100 เมตร และในอนาคตกังหันลมจะถูกพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น 4,000 - 5,000 kW เสาสูงประมาณ 120 เมตร องค์ประกอบย่อยที่ติดตั้งอยู่ภายใน ได้แก่ ชั้น ส่วนที่มีรายละเอียดคือ



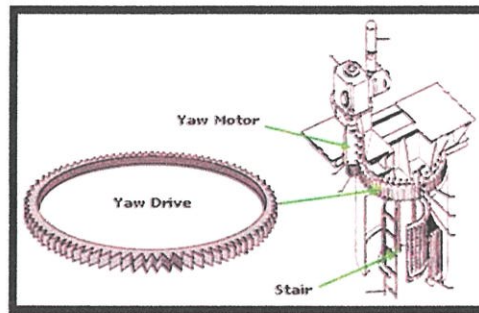
Lattice Tower



Tubular Tower

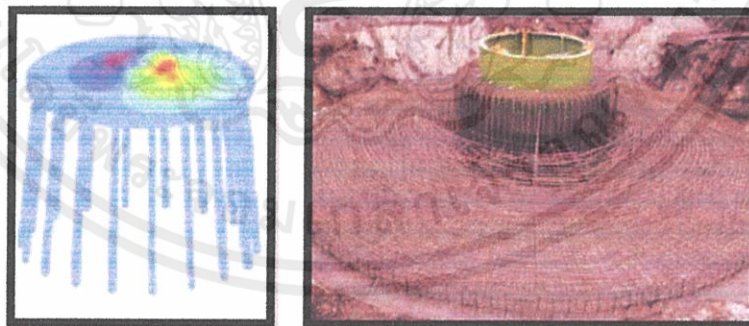
รูปที่ 2.30 แสดงเสาคกลมแบบกลวงและโครงถัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ - แกนคอหมุนรับทิศทางลม (Yaw Drive) (หมายเลข 13 รูปที่ 2.22) เป็นตัวขับเคลื่อนหมุน แกนหมุนใบพัดเพื่อให้ใบพัดรับแรงลมตามทิศทางลมที่เปลี่ยนที่ของลม ควบคุมการหมุนโดยระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับความสัมพันธ์กับหางเสารับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่องคู่ส่วนขยายที่รูป 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงระบบการขับเคลื่อนหมุนส่วนบนบนเสาเพื่อรับแรงลมตามทิศทางลม

- ระบบควบคุมการหมุน (Yaw Motor หรือ Hydraulic System) เป็นตัวบังคับและคอยควบคุมกลไกการขับเคลื่อนการหมุน เพื่อให้ใบพัดรับแรงลมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลม และชะลอการหยุดหมุนและหยุดหมุนของใบพัด
- บันไดหรือลิฟต์ (Stair or Lift) มีไว้และจัดทำขึ้นภายในต้นเสาเพื่อใช้ขณะขึ้นลงสำหรับการตรวจหรือซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่อยู่ด้านบนเสา
- ระบบอุปกรณ์ควบคุมและจอภาพ ติดตั้งอยู่ด้านล่างสุดของเสา มีไว้สำหรับเจ้าหน้าที่ในการติดต่อตรวจสอบและตรวจดูข้อมูลต่างๆ ของระบบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า
- ฐานราก (Foundation) เป็นส่วนที่รับน้ำหนักทั้งหมดของชุดกังหันลม ทำเป็นฐานคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่บนเสาเข็มที่ได้รับการคำนวณออกแบบ และก่อสร้างอย่างถูกวิธีตามหลักของวิศวกรรมโยธา ดังแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.32



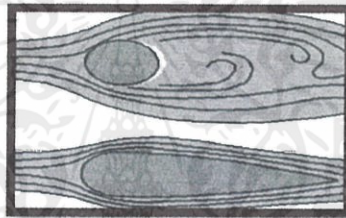
รูปที่ 2.32 แสดงฐานรากของกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารการติดตั้งกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ ต้องมีเครื่องมือเครื่องจักรขนาดใหญ่เพื่อช่วยในการขนถ่าย ไม่ว่าจะเป็นการขนย้ายอุปกรณ์ชิ้นส่วนของกังหันลม เช่น รถบรรทุก รถลากจูงขนาดใหญ่ การติดตั้งเสาและชุดกังหันลม เช่น รถยกแม่แรง (รถเครน) ขนาดใหญ่ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกพัฒนา และจัดหาให้มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาพลังงานลมเช่นกัน



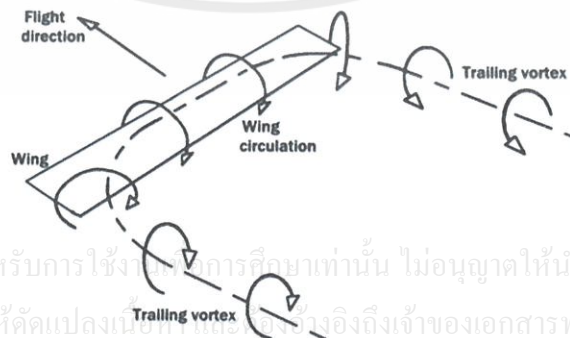
รูปที่ 2.33 แสดงเครื่องจักรและอุปกรณ์ขนย้ายและติดตั้งกังหันลม

2.10) การหมุนควงตัวของอากาศ (Vortex)



รูปที่ 2.34 แสดงการไหลที่เป็น Streamline ที่ผ่านวัตถุชั้นขีดผิว

รูป 2.34 การไหลที่เป็น Streamline ซึ่งกระแสอากาศชั้นที่ติดกับผิวไหลราบเรียบโค้งตามรูปทรงของปีกนั้น ไม่ว่าจะเพิ่มมุมปะทะหรือเพิ่มมุมแคมเบอร์ก็ตาม หากมากไปจะทำให้การไหลที่เป็น Streamline เสียไป เกิดเป็นการไหลปั่นป่วน (Turbulent) ทำให้ขอบเขตของ Streamline แยกห่างออกไป เรียกว่า เกิดการไหลเป็น Separation flow ดังแสดงในรูป 2.34 ซึ่งเป็นการไหลที่เกิด Separation บางส่วน ในการเกิด Separation นั้นมีผลทำให้เกิดแรงต้านขึ้นอย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข หรือทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 2.35 แสดงการไหลที่เป็น Trailing vortex

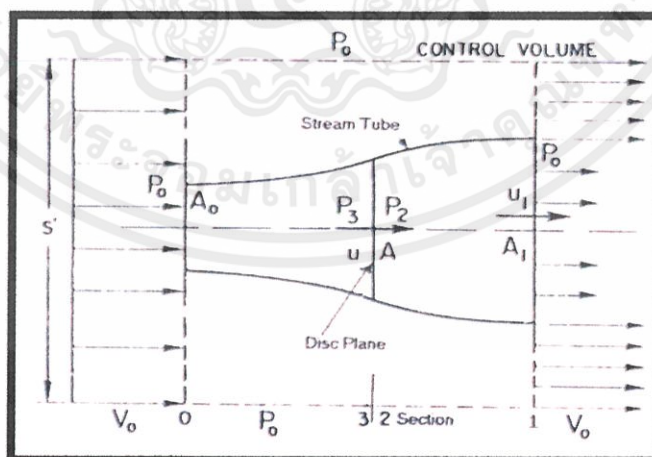
จากรูป 2.35 การหมุนควงตัวของอากาศเกิดเป็น Trailing vortex เป็นการเร่งอากาศหมุนรอบแกน vortex ที่มีความเร็วต่างกันออกไปตามแนวรัศมีที่ห่างจากแกน vortex ลักษณะเช่นนี้เกิดแรงเฉือนระหว่างชั้นการหมุนของอากาศนั้นเป็นอย่างมาก ซึ่งทำให้เกิดแรงรวมแล้วเป็นแรงต้านเหนี่ยวนำ (Induced drag)

ในการทดลองจริงๆ ได้พิสูจน์มาแล้วว่า การหมุนของทรงกระบอกในการเคลื่อนที่ขวางไปในลำอากาศทำให้เกิดแรงยกขึ้นมาได้ ซึ่งการหมุนนั้นจะทำให้เกิดการหมุนวอร์เทค การเกิดแรงยกของปีกใดๆ นั้นสามารถอธิบายและคำนวณโดยใช้กำลังในการหมุนของวอร์เทคที่สมมติให้แทนที่ปีกนั้น การหมุนของกระบอกวอร์เทคที่สมมติว่ามีติดอยู่กับปีกและเคลื่อนที่ไปกับปีกนั้น เรียกว่า Boundvortex กล่าวโดยสรุปในเรื่องปรากฏการของวอร์เทคในที่นี้ว่า Boundvortex จะเป็นลักษณะในทางจินตภาพ ที่จะใช้แทนตัวปีก

2.11) ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้า

การออกแบบโดยใช้ Momentum Theory

ในการศึกษาพลังงานจากลมนั้น สูตรการคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่วไป ในการนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยใช้ทฤษฎีของหลักการที่เรียกว่า Momentum Theory โดยศึกษารายละเอียดของการวิเคราะห์ตามหลักการได้จากรูปที่ 2.36 ซึ่งในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น ใบกังหันลมผลิตไฟฟ้ายังมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการคัดเลือกขนาดต่างๆ ให้มีเหมาะสมต่อการทำงานของทั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบมีความผิดพลาดสูงก็ย่อมทำให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าผิดพลาดและอาจเกิดการเสียหายตามมาได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีรูปที่ 2.36 แสดงหลักการของทฤษฎี Momentum theory รั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้

- 1) ลมที่พัดเข้ามาวิเคราะห์จะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Steady, Homogeneous Wind Flow)
- 2) ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ลมที่นำไปใช้ในการทดสอบ (No obstruction to wind flow either upstream or downstream)
- 3) การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ตัวใบกังหันลม (Uniform Flow Velocity at Rotor)
- 4) ลมที่ไหลเข้ามาวิเคราะห์ต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) จึงไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

วิเคราะห์รูปที่ 2.36 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุกๆชนิด ตัวแปรต่างๆที่จำเป็นต้องทราบคือ S' เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume)

V_0	คือ ความเร็วลมทางด้านเข้าและทางด้านออกของ Control volume (m/ s)
U	คือความเร็วลมก่อนที่จะถึงด้านหน้าของใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m/ s)
U_1	คือ ความเร็วลมหลังจากผ่านตัวใบกังหันหรือแผ่นดิสก์ทดสอบ (m/ s)
P_0	คือ ความดันบรรยากาศทั่วไป (N/ m ²)
P_2	คือ ความดันของอากาศที่ไหลผ่านตัวใบกังหันแล้ว (N/ m ²)
P_3	คือ ความดันของอากาศก่อนที่จะปะทะตัวใบกังหัน (N/ m ²)
A	คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวใบกังหัน (m ²)
A_0	คือ พื้นที่หน้าตัดทางเข้าของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m ²)
A_1	คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m ²)
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์ (m ³ /s)

ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้องฟ้าปกคมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.225 kg/m³ และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ $Q=AV$ จะได้ $V_0A_0 = uA = u_1A_1$ และจากกฎของเบอร์นูลลี โดยวิเคราะห์ในส่วนของความดันอย่างเดีวตั้งแต่ ส่วนที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของรูปที่ 2.36

กล่าวถึงตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุกๆชนิดซึ่งจะมีผลการวิเคราะห์ได้คือ

$$\frac{1}{2}\rho V_0^2 + P_0 = \frac{1}{2}\rho u^2 + P_3 \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + P_2 = \frac{1}{2}\rho U_1^2 + P_0 \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

ดังนั้นแรงผลัก (Thrust) T_a ที่เกิดขึ้นในใบกังหันจะได้

$$T_a = PA \quad \text{นั่นคือ} \quad A(P_3 - P_2) \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

$(P_3 - P_2)$ คือ การที่พลังงานจากลมได้ถ่ายทอดให้กับแผ่นดิสก์เรียบร้อยแล้ว พลังงานก็จะถูกสะสมอยู่ในใบกังหันนั่นเอง หรือถ้าจะวิเคราะห์ส่วนของความเร็วลมก็จะได้ว่าแรงผลักที่เกิดในใบกังหันคือ

$$T_a = \frac{\rho A (V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

สมการที่ 2-10 ได้มาจากพลังงานจลน์ของลม นั่นเอง คือ $KE = \frac{1}{2}AV^2$ แต่จากสมการที่ 2-10 จะเห็นว่าพลังงานได้ถ่ายทอดให้กับใบกังหันไปแล้ว มาถึงจุดนี้เราจะได้ว่า

$$AU = A_1u_1 \quad \text{ดังนั้น}$$

$$U = \left(\frac{V_0 + u_1}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

U คือ ความเร็วลมเฉลี่ยทั้งหมดของระบบที่เรากำลังวิเคราะห์ในการวิเคราะห์นั้น สมมุติว่าระบบจะต้องมีการสูญเสียโดยกำหนดให้เป็นค่าที่เรียกว่า Axial Interference Factor โดยค่านี้คือค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลม ในระหว่างลมที่เข้ามาอย่างอิสระและลมที่ปะทะตัวใบกังหัน นั่นคือ

$$a = \frac{v}{V_0} \quad \text{และจาก} \quad v = V_0 - u \quad \text{ดังนั้นเราแทนค่า} \quad v = V_0 - u \quad \text{เป็นค่าของการสูญเสีย}$$

$$\text{จะได้} \quad u = V_0(1 - a) \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ 2.10 จะได้ u_1 คือ

$$u_1 = V_0(1 - 2a) \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันนั้นถ้าค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมมีค่าเท่ากับ 1 ไม่ว่ากรณีใด นั่นคือไม่มีการรบกวนของระบบ คือ ลมที่ทางเข้าและทางออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลมเลย ซึ่งเป็นไปไม่ได้และขณะเดียวกันค่าสัดส่วนการลดลงของพลังงานลม

มีค่าเท่ากับ 1 นั่นก็คือ ไม่มีการถ่ายเทพลังงานของลมให้แก่ใบกังหันเลยซึ่งเราก็ไม่ต้องการ ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ เราสามารถกำหนดว่าพลังงานจากลมถูกถ่ายเทให้กับใบกังหันต่อหน่วยเวลาใดๆ

นั่นคือ P_w โดย

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A u V_0^2 - \frac{1}{2}\rho u_1^2 A u \quad \dots\dots(2-10)$$

และแทนค่า a ลงไปจะได้ว่า

$$P_w = \frac{1}{2}\rho A V_0^3 4a (1 - a)^2 \quad \dots\dots(2-11)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมโดยทั่วไปนั้น เราคิดพลังงานลมที่เกิดจากการไหลอิสระนั้น เราจะมีสูตรการคำนวณคือ P_a ผ่านพื้นที่รับลมใดๆ จะได้ว่า

$$P_a = (\text{ปริมาตรของการไหล}) \times (\text{พลังงานจลน์ของลมต่อปริมาตรการไหล})$$

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมนั้น ตัวแปรที่เราจะต้องใช้ เราเรียกว่าค่า C_p (Power coefficient) โดยจะได้จากการเปรียบเทียบระหว่างพลังงานที่ตัวกังหันลมได้ดึงเอาไว้ P_w เปรียบเทียบกับตัวพลังงานที่สมควรจะได้จริงจากลมที่มีการไหลอิสระ P_a นั่นคือ ถ้าวิเคราะห์กันทางกล ก็คือ กำลังงานเท่ากับพลังงานที่ผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าให้สู่ระบบนั่นเอง ในทางวิศวกรรมของพลังงานลมนั้นเราสามารถหาค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมได้คือ

$$C_p = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\frac{1}{2}\rho A V_0^3 4a (1 - a)^2}{\frac{1}{2}\rho A V_0^3} \quad \dots\dots(2-12)$$

$$\text{ดังนั้นค่า} \quad C_p = 4a (1 - a)^2 \quad \dots\dots(2-13)$$

ดังนั้น ถ้าเราอยากจะรู้ว่าถ้าออกแบบให้ดีที่สุดแล้วตัวกังหันลมสามารถมีประสิทธิภาพสูงสุดได้เท่าไรนั้น โดยการ Differentiate สมการที่ 2.17 นั่นคือ

$$C_p = 4a - 8a^2 + 4a^3 \text{ และเมื่อทำการ Differentiate เปรียบเทียบกับค่า } a \text{ แล้วเราจะได้}$$

$$\frac{dC_p}{da} = 4 - 16a + 12a^2 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$3a^2 - 4a + 1 = 0$$

ดังนั้นจะได้ว่า a คือ

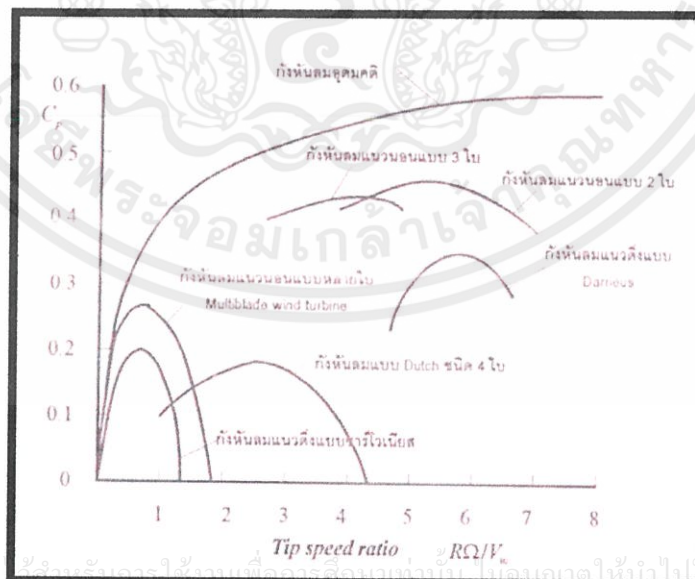
$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4 \times 3 \times 1}}{2 \times 3}, \quad a = \frac{4 \pm \sqrt{4}}{6}$$

$$\text{นั่นคือจะได้ค่า } a = \frac{2}{3} \pm \frac{1}{3}$$

สมการจะเป็นจริงได้มีค่า a แค่ 2 ค่า คือ

$$a = 1 \quad \text{และ} \quad a = \frac{1}{3}$$

ดังนั้นถ้าเราแทนค่า $a = \frac{1}{3}$ ลงในสมการที่ 2-17 เราจะทราบได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมซึ่งเราเรียกว่า C_{Pmax} นั้นจะมีค่าไม่เกิน 0.5926 นั่นคือถ้าลมให้พลังงานมา 100 % กังหันที่ดีที่สุดจะทำการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานทางกลได้สูงสุดไม่เกิน 59.26 % เนื่องด้วยปัจจัยในหลายๆ อย่างที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไป โดยสามารถดูได้จากรูปที่ 2.14 จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ ว่าไม่มีกังหันลมชนิดใดที่สามารถออกแบบให้มีประสิทธิภาพได้ถึง 45% ด้วยซ้ำไปแต่อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบชุดกังหันลมให้มีประสิทธิภาพรวมได้ถึง 30-35 % ก็ถือว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างสูงแล้วเนื่องจากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่ไม่ใช่การสันดาปเหมือนกับเครื่องยนต์ความร้อน ทำให้ไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมจะเป็นพลังงานที่สะอาดและจะไม่มีวันหมดไปเหมือนพลังงานจากเชื้อเพลิงสารไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นต้องใช้การเผาไหม้ในการได้งานมานั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.37 แสดงประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ

2.12) สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient, C_p)

สัมประสิทธิ์กำลัง คือ อัตราส่วนกำลังงานของกังหันลมต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่ไหลผ่านช่วงหน้าตัดการทำงานของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_p = \frac{P_0}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad \dots\dots(2-14)$$

2.13) สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient, C_T)

สัมประสิทธิ์แรงบิด เป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_T = \frac{C_p}{(U/V)} \quad \dots\dots(2-15)$$

2.14) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip Speed Ratio, TSR)

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ คือ อัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายใบที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองกับความเร็วลมอิสระ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$TSR = \frac{V_T}{V} \quad \dots\dots(2-16)$$

2.15) ประสิทธิภาพกังหันลม (Efficiency, η)

ประสิทธิภาพ คือ อัตราส่วนของพลังงานที่กังหันลมเปลี่ยนได้จริงต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่ไหลผ่านช่วงหน้าตัดการทำงานของกังหันลม ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานของลมให้เป็นพลังงานเพลของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_0}{P_{Ii}} \times 100 \quad \dots\dots(2-17)$$

โดยที่ P_{Ii} คือ กำลังลมที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์ลม (W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

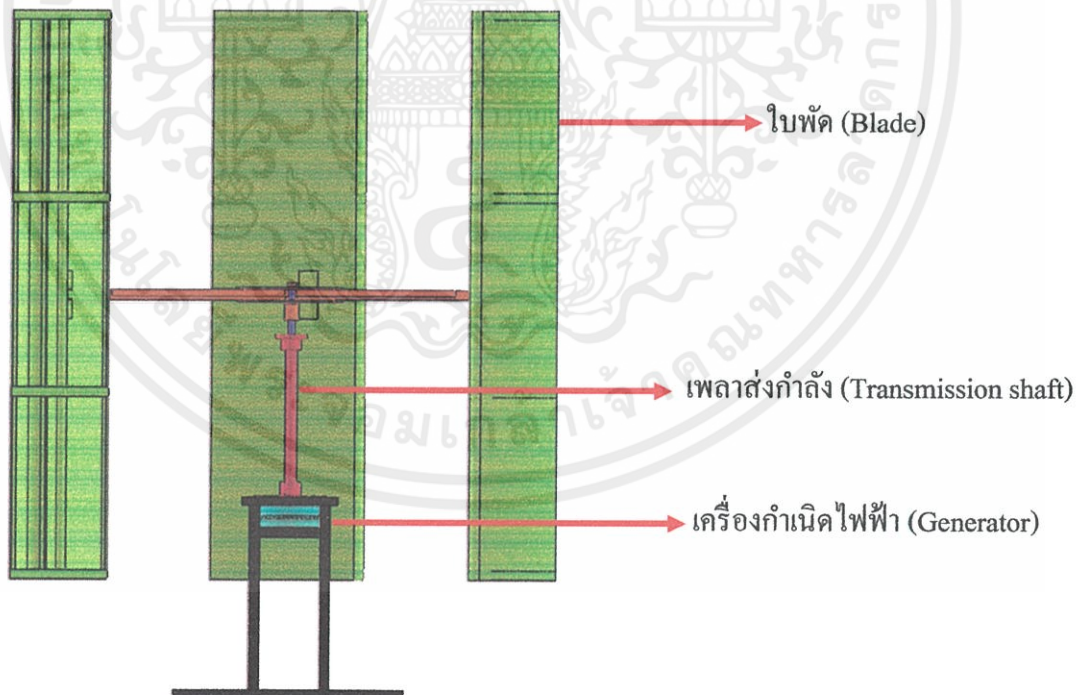
วิธีดำเนินงาน

การดำเนินงานศึกษาโครงการการออกแบบและการทดสอบใบพัดกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีขั้นตอนการดำเนินงานศึกษาดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาข้อมูลของใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้งรวมถึงลักษณะความเร็วลม
- ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบใบพัดและส่วนประกอบของกังหันลม
- ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมแนวแกนตั้ง

3.1 ระบบกังหันลมแนวแกนตั้ง (vertical axis wind turbine system)

ส่วนประกอบหลักของกังหันลมแนวแกนตั้งมี 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่ 2 เพลาส่งกำลัง (Transmission shaft) ส่วนที่ 3 ใบพัด (Blade) ดังรูปที่ 3.1



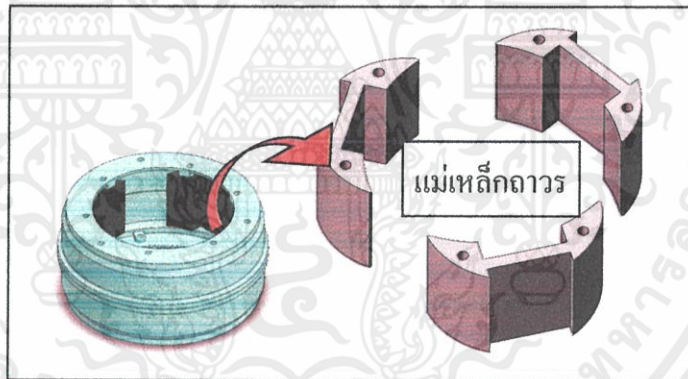
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator)

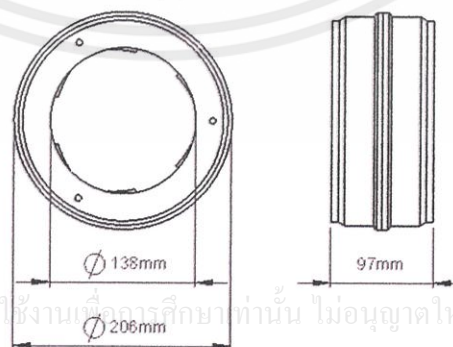
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมจะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับออกมา โดยใช้พลังงานที่ได้จากลมมาขับเคลื่อนให้แม่เหล็กฐาวรหมุนตัดขดลวดเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าออกมา ประกอบด้วย สเตเตอร์หรือตัวอยู่กับที่ (stator) ซึ่งเป็นส่วนที่มีโครงหุ้มเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) รวมถึงขดลวดทองแดง และโรเตอร์หรือตัวหมุน (rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีแม่เหล็กถาวร (permanent magnet)

ก. สเตเตอร์หรือตัวอยู่กับที่

สเตเตอร์หรือตัวอยู่กับที่ เป็นส่วนที่ไม่มีภาระหมุนของชิ้นส่วนองค์ประกอบในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยประกอบไปด้วยส่วนของโครงหุ้มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งจะทำด้วยเหล็กหล่อหรืออะลูมิเนียมขึ้นรูปเป็นลักษณะทรงกระบอกกลวง ทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กสเตเตอร์ให้แน่นอยู่กับผิวด้านนอกของโครง ส่วนถัดมาคือแกนขดลวดทองแดง ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอัดซ้อนกันจนมีความหนาตามการออกแบบ และส่วนของขดลวดที่พันอยู่รอบของแกนเหล็กสเตเตอร์ ดังรูป 3.2

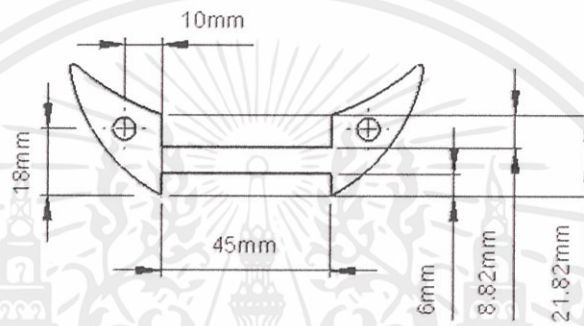
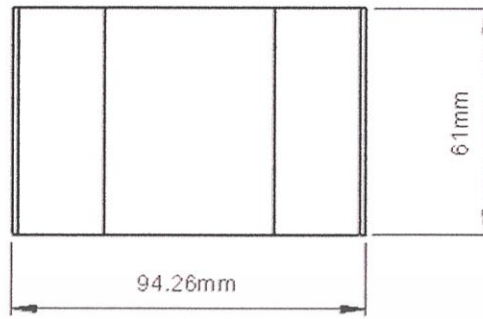


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของสเตเตอร์และส่วนประกอบ



รูปที่ 3.3 แสดงภาพฉายฝักรอบ

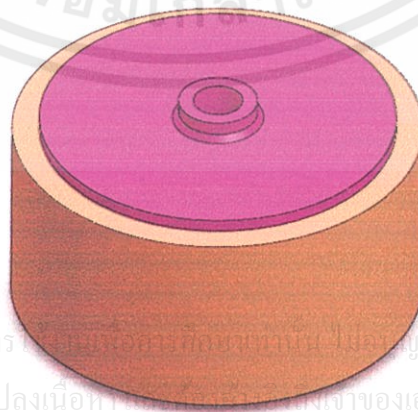
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงภาพฉายของแม่เหล็กถาวร

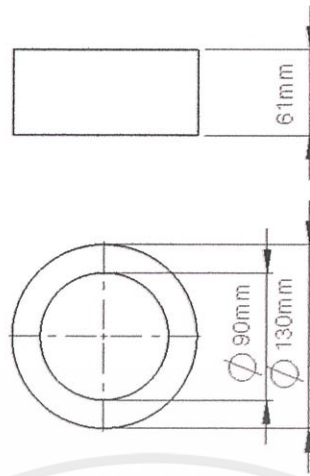
ข. โรเตอร์หรือตัวหมุน

โรเตอร์หรือตัวหมุน เป็นส่วนที่มีแม่เหล็กถาวรรูปทรงกระบอก ซึ่งมีขั้วแม่เหล็กอยู่ 6 ขั้ว โดยแม่เหล็กถาวรจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆตัวมันเอง โดยมีเส้นแรงแม่เหล็กพุ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำทำให้แม่เหล็กถาวรเกิดการหมุน แล้วนำไปตัดกับขดลวด จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf) ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของ โรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของหน่วยงานที่ผลิตเอกสารนี้ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อที่เอกสารนี้เพื่อใช้ในการผลิตเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



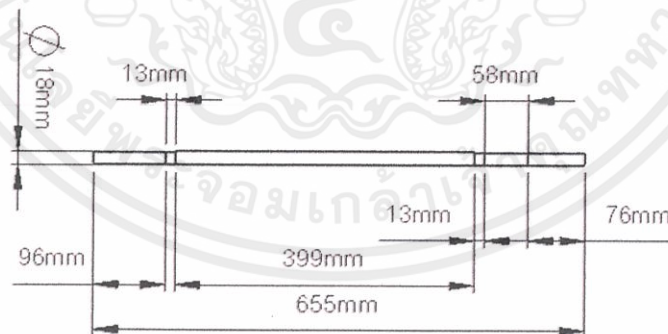
รูปที่ 3.6 แสดงภาพฉายลักษณะของโรเตอร์

3.1.2 เพลาส่งกำลัง (Main shaft)

คือส่วนที่หมุนเคลื่อนที่เมื่อมีแรงจากภายนอกกระทำ โดยขันน็อตยึดกับแม่เหล็กถาวร เพื่อเป็นเพลาส่งกำลังให้แม่เหล็กถาวรภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถหมุนได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 18 มิลลิเมตร ดังรูป 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของเพลาส่งกำลัง



รูปที่ 3.8 แสดงภาพฉายลักษณะของ เพลาส่งกำลัง

3.1.3 ใบพัด (Blade)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงน เว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ใบพัดถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับปีกของเครื่องบิน โดยมีช่องเปิดอยู่ด้านบนเพื่อให้สามารถรับลมที่พัดเข้ามา และสามารถปรับองศาให้ได้มุมที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในการทดสอบระบบ โดยส่วนของใบกังหันประกอบไปด้วย จานหมุน (rotating disks) เป็นส่วนที่

ต่อมาจากเพลาลูก คาน (beam) เป็นส่วนที่ใช้ยึดระหว่างใบกังหันกับจานหมุนให้ติดเข้าด้วยกัน และส่วนใบกังหันเป็นส่วนที่รับแรงปะทะจากลมที่เข้ามา

ก. จานหมุน

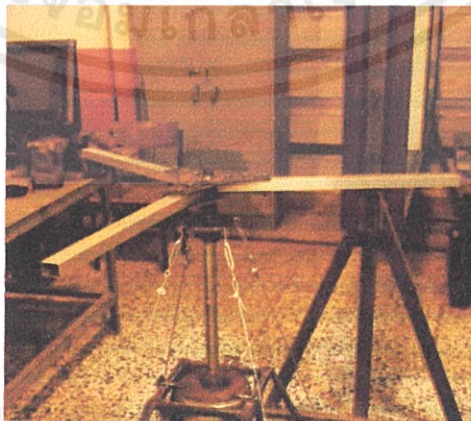
คือส่วนที่เชื่อมต่อกับเพลาลูก มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายรูปสามเหลี่ยมแต่เว้าเข้าด้านใน โดยทำมาจากเหล็กแผ่นหนา 4.5 มิลลิเมตร ในแต่ละส่วนจะเจาะรูไว้ยึดกับคานซึ่งห่างกัน 120 องศา และมีเพลาลูกที่ใช้เชื่อมต่อกับเพลาลูก ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของจานหมุน

ข. แขนส่งกำลังหลัก

คือส่วนที่เชื่อมต่อกับจานหมุน เป็นส่วนที่คอยรับน้ำหนักของใบพัดกังหันลมและยังเป็นส่วนที่กำหนดครัมของเพือที่รับลมกังหัน ซึ่งทำมาจากท่ออะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมกลวงเพื่อให้มีน้ำหนักเบาและเสริมด้วยอะลูมิเนียมฉากอีกชั้นเพื่อความแข็งแรง ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของแขนส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัด

หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หรือทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ไบพัต

คือส่วนที่ใช้ในการรับลมที่เข้ามาปะทะกังหันลม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับปีกของเครื่องบิน และมีช่องเปิดอยู่ด้านบนให้สามารถรับลมที่พัดเข้าในตัวไบพัต เพื่อให้เกิดแรงดูดที่ไบพัตกังหันลม ส่งกำลังไปยังเพลาลูก โดยทำมาจากอะลูมิเนียมเส้นแบนขนาด 1 นิ้ว 1 หุน แล้วดัดขึ้นโครงตาม ออกแบบ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะของไบพัตกังหันลม

3.2 การออกแบบไบพัตและส่วนประกอบของกังหันลม

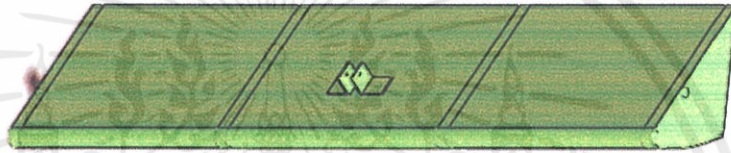
ในการออกแบบไบพัตและส่วนประกอบของกังหันลมนั้นต้องมีการคำนึงถึงส่วนต่างๆด้วย เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งาน เพราะต้องใช้กับความเร็วที่ต่ำและปานกลาง โดยวิเคราะห์ การออกแบบที่คำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังนี้

- 1) เป็นการประยุกต์นำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากน้ำที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาใช้ใหม่ให้เกิด ประโยชน์สูงสุด โดยการประยุกต์กับการใช้งานด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากน้ำมาเป็นเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าจากลมที่มีลักษณะคล้ายกัน
- 2) ไบพัตได้ออกแบบให้มีลักษณะที่ใช้งานได้กับลมที่มีความเร็วต่ำและปานกลาง
- 3) ควรเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน ราคาไม่แพงซึ่งหาได้ทั่วไป และที่สำคัญที่สุด บุคคลทั่วไปก็สามารถที่จะลงมือทำเองได้
- 4) การออกแบบฐานเพื่อง่ายต่อการติดตั้งถอดประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสามารถ ไม่ว่ากรณีใดๆนั้น อีกทั้งยังมีไม่ได้อุปกรณ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เคลื่อนย้ายไปที่ไหนก็ได้ ซึ่งง่ายต่อการทำการทดสอบ

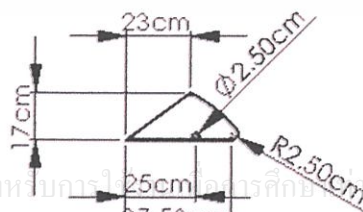
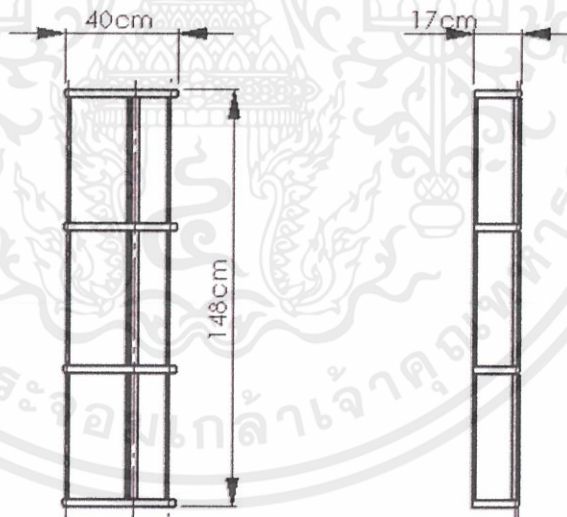
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานับเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆนั้น อีกทั้งยังมีไม่ได้อุปกรณ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ เคลื่อนย้ายไปที่ไหนก็ได้ ซึ่งง่ายต่อการทำการทดสอบ

3.2.1 ใบกั๊กหันลม

การออกแบบลักษณะของใบกั๊กหันลมได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อให้มีความสะดวกในการออกแบบและเหมาะสมกับความเร็วลมของประเทศไทย โดยการออกแบบให้มีลักษณะที่หัวด้านหน้าของใบกั๊กมีลักษณะเรียวเพื่อให้ใบด้านหน้าลดการปะทะกับลมโดยตรงและด้านหลังของใบกั๊กหันจะเปิดโล่งรับลมให้มีแรงจุดที่ดีในการเริ่มต้น ถ้าเป็นใบกั๊กมีลักษณะเรียวใบกั๊กหันลมจะหมุนได้ดีกว่า แต่ถ้าด้านหน้ามีลักษณะไม่เรียวจะทำให้ใบกั๊กของกั๊กหันลมจะต้านลมและหมุนได้ช้า เมื่อวาดภาพด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเสร็จสิ้นแล้ว เราจึงนำภาพไปขึ้นแม่แบบตามที่ได้กำหนดไว้ในโปรแกรม

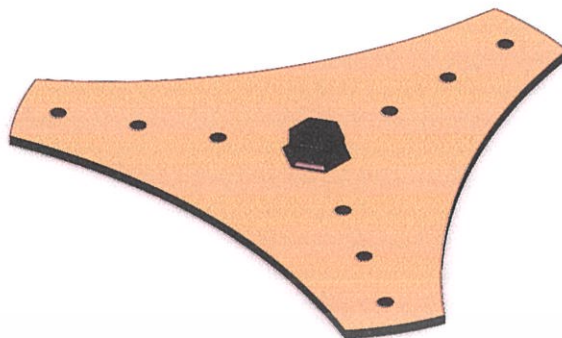


รูปที่ 3.12 แสดงแบบใบกั๊กหันที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบส่งเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

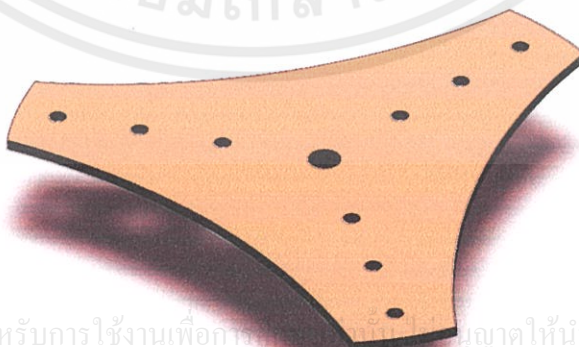
รูปที่ 3.13 แสดงภาพฉาย แบบใบกั๊กหันที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.14 แสดงแบบงานหมุนส่วนบนที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป

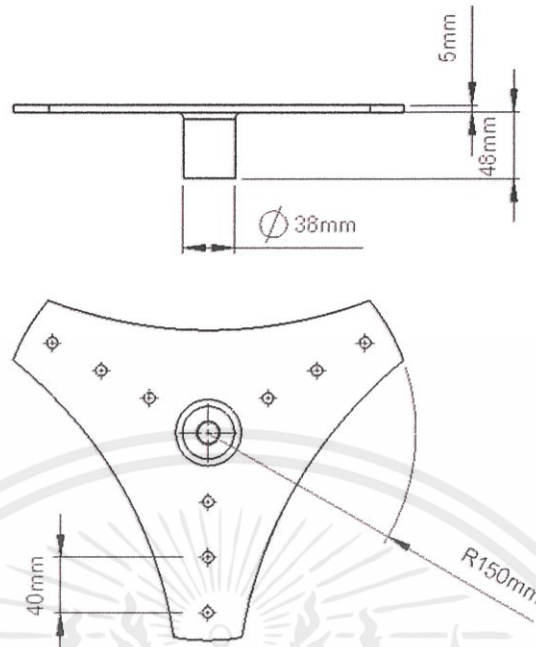


รูปที่ 3.15 แสดงภาพฉายแบบงานหมุนส่วนบนที่วาดใน โปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.16 แสดงแบบงานหมุนส่วนล่างที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขอสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงภาพฉาย แบบงานหมุนส่วนล่างที่วาดในโปรแกรมสำเร็จรูป



รูปที่ 3.18 แสดงแบบที่วาดไว้ นำขึ้นแบบจริง

ค่า Parameters ต่างๆที่คำนึงใช้หลักในการออกแบบต่อไปนี้

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ค่า C_p (ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง) ยังไม่นำมาคิดพิจารณาในตอนี้ โดยเราจะพิจารณาเฉพาะกำลังที่ผลิต (P หน่วย วัตต์) , ความสูงของใบพัด \times เส้นผ่านศูนย์กลาง (A หน่วย ตารางเมตร) และความเร็วลม (V หน่วย เมตรต่อวินาที)

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3$$

ในตอนนี้เรามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่รู้แล้วแน่นอนว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 200 วัตต์ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของอากาศมีค่า 1.1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\rho=1.1 \text{ kg/m}^3$) และสามารถออกแบบได้ว่าควรให้ใบพัดพื้นที่รับลมเท่าใด เพื่อให้มีความเหมาะสมกับความเร็วลมที่เราต้องการได้จาก

$$A = h \times d$$

h คือ ความสูงของใบพัด (เมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)

แขนส่งกำลังหลักได้ออกแบบเพื่อทดสอบด้วยกัน 2 ระยะ คือ ที่ความยาว 60 เซนติเมตร และ 100 เซนติเมตร

ที่ 60 cm ;

$$A = 1.48 \times 1.2 = 1.776 \text{ m}^2$$

จาก

$$P = \frac{1}{2}\rho AV^3$$

$$200 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 1.48 \times 0.6 \times V^3$$

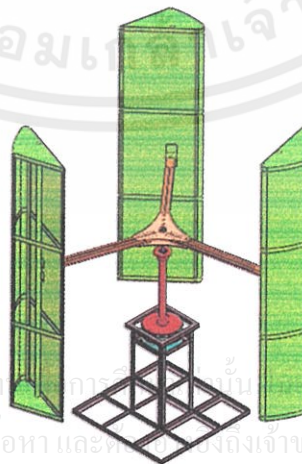
$$V = 5.8939 \text{ m/s}$$

ที่ 100 cm ;

$$A = 1.48 \times 2 = 2.96 \text{ m}^2$$

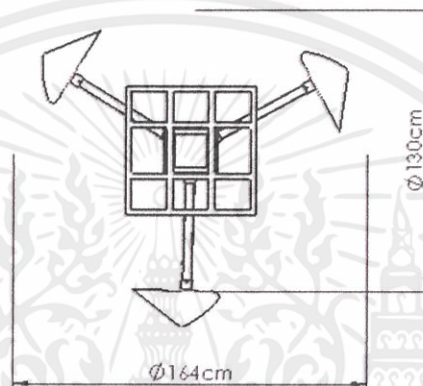
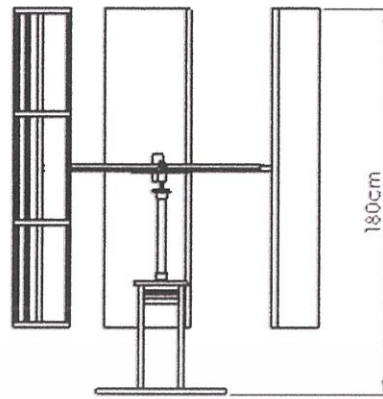
$$200 = \frac{1}{2} \times 1.1 \times 1.48 \times 1 \times V^3$$

$$V = 4.9711 \text{ m/s}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดทอนข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.19 แสดงลักษณะของใบพัดกังหันลมแนวแกนตั้ง

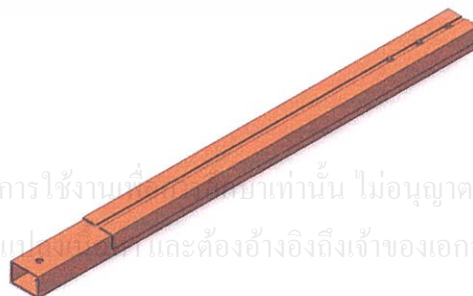


รูปที่ 3.20 แสดงภาพฉายลักษณะของโคมไฟตั้งพื้นแนวแกนตั้ง

3.2.2 แขนส่งกำลังหลัก

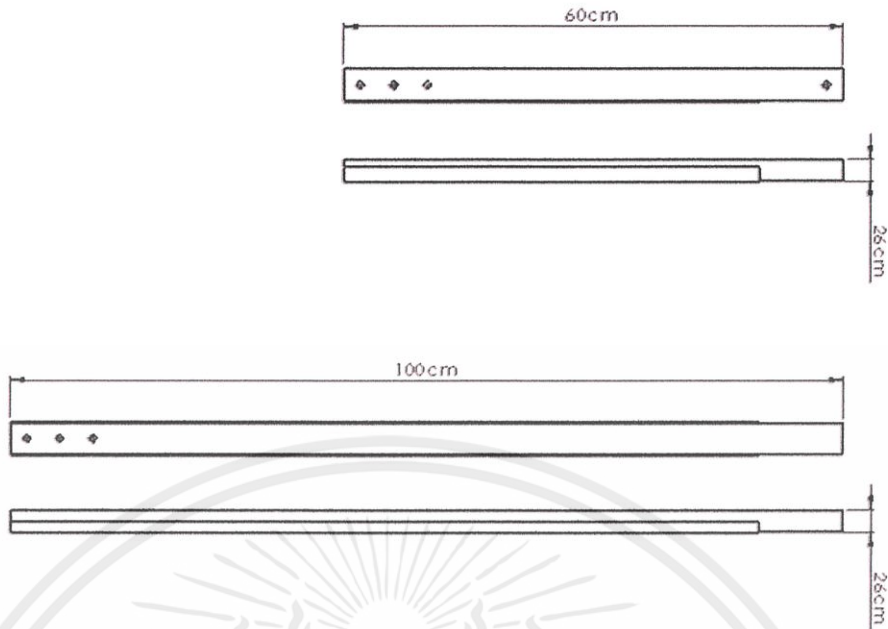
แขนส่งกำลังหลักเป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับแรงผลัดจากโคมไฟตั้งพื้นมาสู่ชุดเพลาส่งกำลังเพื่อส่งต่อไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

แขนส่งกำลังหลักจะทำด้วยอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมกลวงที่มีความยาว 60 เซนติเมตร และ 100 เซนติเมตร โดยได้นำอะลูมิเนียมฉากมาเสริมความแข็งแรงด้วยการยึดติดกับเข้าเหลี่ยมด้านบนทั้งสองข้างของอะลูมิเนียมสี่เหลี่ยมกลวงช่วยให้แขนส่งกำลังหลักนั้นสามารถรับน้ำหนักของโคมไฟได้ดียิ่งขึ้นและมีความแข็งแรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.21 แสดงแขนส่งกำลังหลักแขนส่งกำลังหลักยาว 60 และ 100 เซนติเมตร



รูปที่ 3.22 แสดงภาพฉายแขนส่งกำลังหลักแขนส่งกำลังหลักยาว 60 และ 100 เซนติเมตร

3.2.3 เพลาส่งกำลัง (Transmission shaft)

เพลาส่งกำลังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อจากแขนส่งกำลังหลัก โดยหน้าที่หมุนตัวโรเตอร์ (แม่เหล็กถาวร) ให้ตัดกับขดลวดเกิดการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กให้ได้ไฟฟ้าออกมา

ในการคำนวณค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นกับเพลา เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มาจากน้ำ การทดสอบที่ความเร็วรอบที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าออกมามีค่าสูงสุดคือ ที่ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ 766 รอบต่อวินาที และขนาดกำลังที่สามารถผลิตออกมาได้มีค่าเท่ากับ 198 วัตต์ ดังนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นกับเพลา มีค่าเท่ากับ 2.468 นิวตัน-เมตร

ในการคำนวณค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ นำมาติดตั้งใบพัดเพื่อใช้กับพลังงานลม ซึ่งกั้นหลวมผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดที่แขนส่งกำลังหลักมีความยาวที่ 60 เซนติเมตร มุมของใบพัดตั้งฉากกับแขนส่งกำลังหลักที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 40 เซนติเมตร ให้แรงดัน 13.48 V (โวลต์) ให้กระแสไฟฟ้า 0.26 A (แอมแปร์) มีความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที (m/s) มีความเร็วปลายใบ $\frac{1}{1.65} = 0.606$ รอบต่อวินาที เท่ากับ 36.3636 รอบต่อวินาที และขนาด

กำลังที่สามารถผลิตออกมาได้มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = IV$$

$$= 0.26 \times 13.48$$

$$= 3.5048 \text{ วัตต์}$$

ดังนั้น เราสามารถหาแรงบิดได้ คือ

$$P = \frac{2\pi NT}{60}$$

แทนค่า

$$T = \frac{3.5048 \times 60}{2\pi \times 36.3636}$$

$$T = 0.9203 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

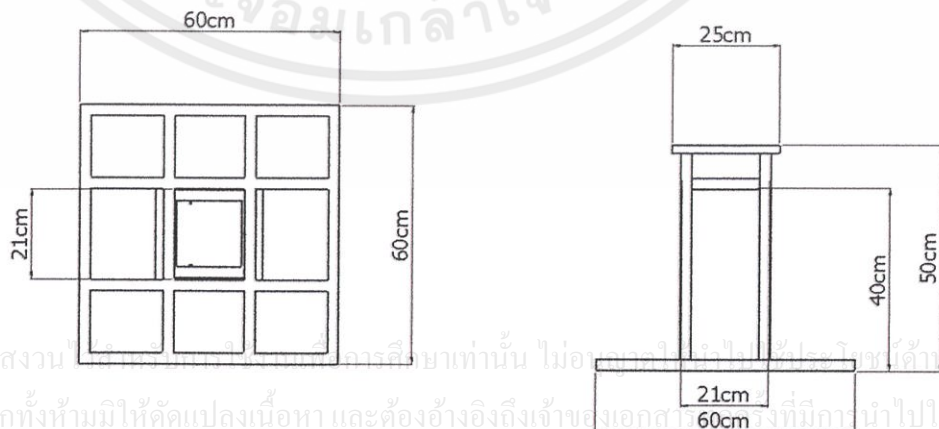
∴ แรงบิดที่เกิดขึ้นกับเพลา มีค่าเท่ากับ 0.9203 นิวตัน-เมตร

3.2.4 โครงสร้างฐานรองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงสร้างฐานออกแบบโดยคำนึงถึงความสะดวกในการถอดประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกเพื่อนำไปทดสอบ และมีความแข็งแรงรองรับน้ำหนักได้ดี จึงได้นำเหล็กฉากมาเป็นส่วนประกอบหลักในการทำโครงสร้างฐานซึ่งใช้เหล็กฉากหนา 1 หุน ขนาดความกว้างแต่ละด้านยาว 1 นิ้ว นำมาเชื่อมประกอบกันเป็นโครงสร้างฐาน



รูปที่ 3.23 แสดงโครงสร้างฐาน



รูปที่ 3.24 แสดงภาพฉายโครงสร้างฐาน

3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลมแนวแกนตั้ง อุปกรณ์การทดสอบ

1. Multimeter ใช้สำหรับวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 Multimeter

2. Anemometer ใช้วัดความเร็วลม



รูปที่ 3.26 Anemometer

3. เครื่องมือวัดความเร็วรอบในการหมุนของกังหันลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา... ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.27 นาฬิกาจับเวลา

4. วัดระดับน้ำ ใช้ทาบกับแนวระนาบต่างๆ เพื่อวัดความเอียงในขั้นตอนการติดตั้ง



รูปที่ 3.28 วัดระดับน้ำ

5. ตลับเมตร ใช้วัดระยะของแหล่งกำเนิดลม



รูปที่ 3.29 ตลับเมตร

6. พัดลม ใช้เป็นแหล่งกำเนิดลมเพื่อทดสอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้เพื่อใช้ในการเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.30 พัดลมแหล่งกำเนิด

ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมได้ออกแบบดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 ข้างต้น โดยใช้วัสดุ 2 ชนิดมาทำใบพัดกังหันลม คือ แผ่นพลาสติกบางและแผ่นอะลูมิเนียมบาง ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหาความเร็วลมของแหล่งกำเนิด

- 1.1 จัดวางตำแหน่งของ Anemometer ให้อยู่ในระดับตรงใบของพัดลม
- 1.2 ใช้ตลับเมตรวัดระยะการทดสอบในระยะคือ 40 , 60 , 80 , 100, 120 , 140 , 160 , 180 และ 200 cm ตามลำดับ
- 1.3 เริ่มวัดว่าความเร็วลมโดยเปิดพัดลมเบอร์สามที่ระยะ 40 cm ให้ Anemometer หมุน
- 1.4 รอให้ความเร็วลมที่หน้าจอแสดงผลเริ่มคงที่แล้วบันทึกค่าความเร็วลมที่ได้ บันทึกค่าความเร็วลมจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
- 1.5 เปลี่ยนระยะการทดสอบเป็นระยะ , 60 , 80 , 100, 120 , 140 , 160 , 180 และ 200 cm ตามลำดับแล้วทำการทดลองตามข้อ 1.4 จะได้ค่าความเร็วลมต่างๆกัน

ขั้นตอนที่ 2 การหาความเร็วลมเริ่มต้นที่ทำให้ใบพัดหมุน

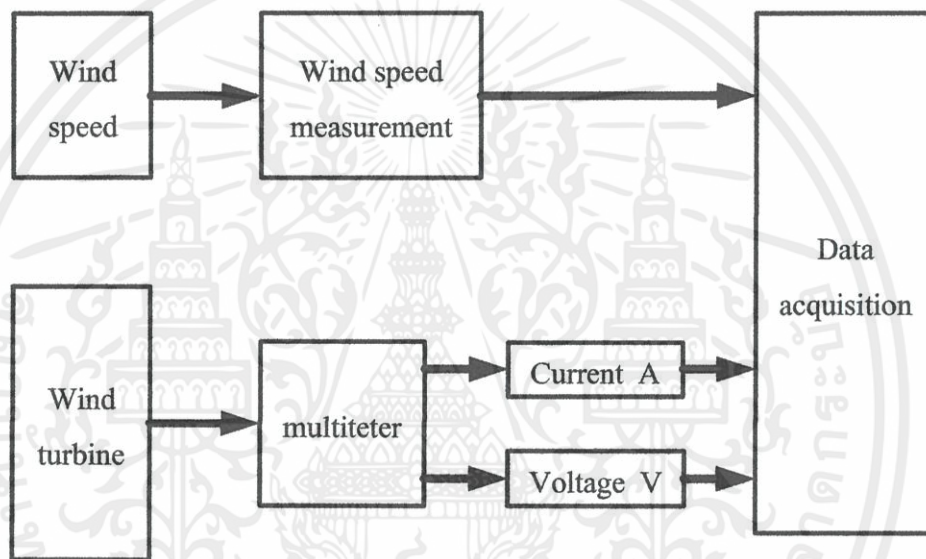
- 2.1 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับฐานรองรับ ตั้งระดับของเพลาหลักให้อยู่ในแนวตั้ง โดยใช้วัดระดับน้ำทาบกับเพลาหลักแล้วสังเกตระดับน้ำให้อยู่กึ่งกลาง
- 2.2 ติดตั้งจานหมุนและคานขนาดความยาวรัศมี 60 cm เข้ากับเพลาหลัก
- 2.3 นำใบพัดที่ใช้วัสดุเป็นแผ่นพลาสติกบางมาติดตั้งเข้ากับคานก่อน โดยให้ใบพัดอยู่ในลักษณะตั้งตรงในแนวตั้ง
- 2.4 จัดวางตำแหน่งเครื่องมือทดสอบคือ Anemometer ให้อยู่หน้าของกังหันลมโดยห่างออกมาเล็กน้อย และจัดตำแหน่งพัดลมแหล่งกำเนิดโดยใช้ตลับเมตรวัดระยะต่างๆคือ 40 , 60 , 80 , 100, 120 , 140 , 160 , 180 และ 200 cm ตามลำดับ
- 2.5 เปิดพัดลมเบอร์สามที่ระยะ 200 cm ที่มุมเอียง 85° แล้วค่อยๆขับพัดลมเข้ามาในระยะจนพัดกังหันลมเริ่มหมุน บันทึกค่าระยะห่างและช่วงความเร็วลม
- 2.6 เปลี่ยนมุมเป็น 90° , 95° และ 100° ตามลำดับ แล้วทำการทดลองตามข้อ 2.5 จนครบ
- 2.7 เปลี่ยนคานขนาดความยาวรัศมีเป็น 100 cm แล้วทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 2.2 ถึง 2.6

ขั้นตอนที่ 3 การวัดค่ากระแส แรคตัน ค่าช่วงความเร็วลม และความเร็วในการหมุนของใบพัด

3.1 จากขั้นตอนที่ 2 เปิดพัดลมเบอร์สามที่ระยะ 40 cm ที่มุมเอียง 85° บันทึกค่ากระแส แรคตัน ค่าช่วงความเร็วลม และความเร็วในการหมุนของใบพัด จากนั้นขยับพัดลมออกไป 40 , 60 , 80 , 100, 120 , 140 , 160 , 180 และ 200 cm ตามลำดับจนครบทุกระยะห่าง

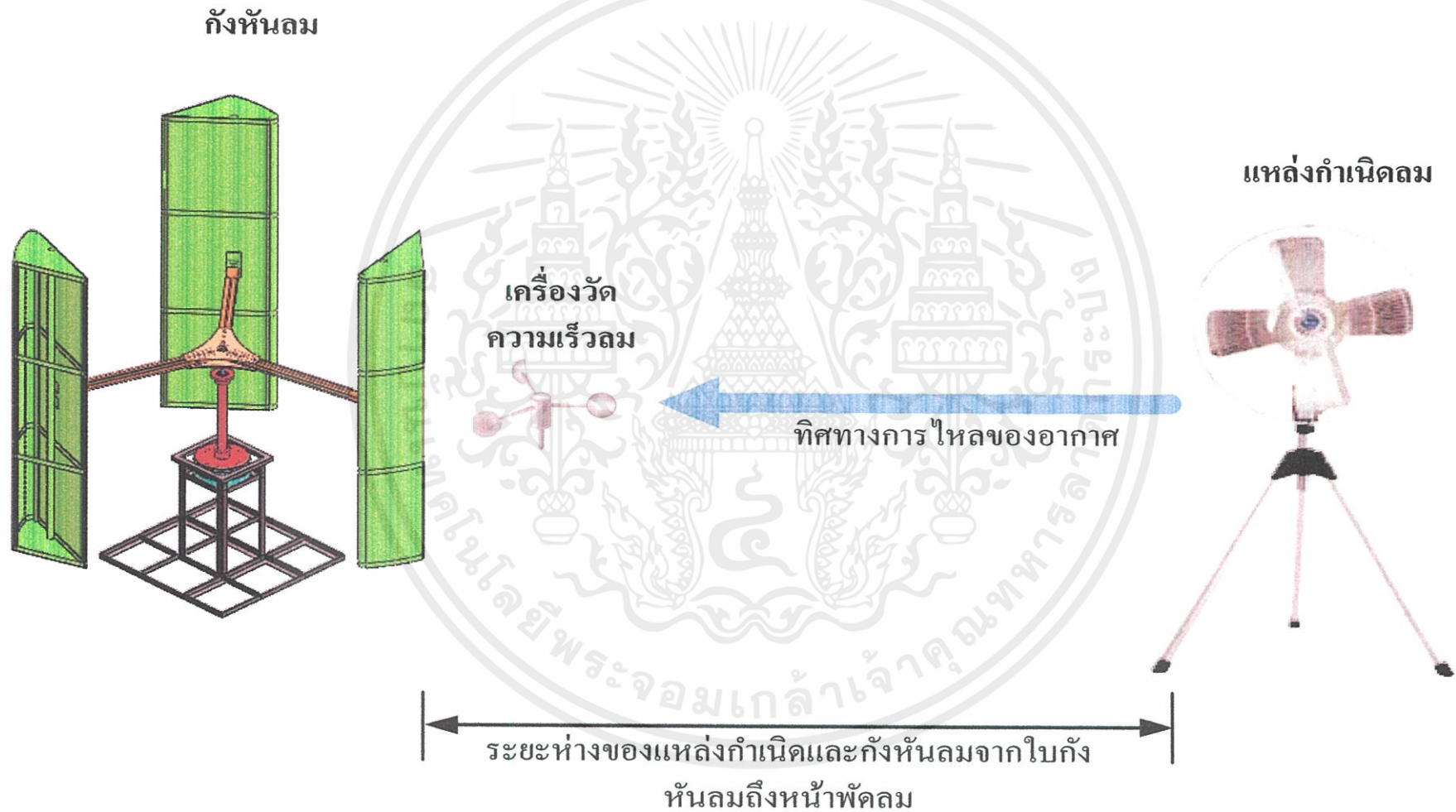
3.2 เปลี่ยนมุมเป็น 90° , 95° และ 100° ตามลำดับ แล้วทำตามข้อ 3.1 จนครบทุกมุม

3.3 เปลี่ยนวัสดุใบพัดเป็นแผ่นอะลูมิเนียมบางแทนแผ่นพลาสติก แล้วทำการทดลองตามข้อ 2.2 ถึงข้อ 3.2 ทั้งหมด



รูปที่ 3.31 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทดสอบระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.32 แสดงการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ขณะทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

ผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลมจากกังหันลมขนาดเล็กแบบแกนตั้ง (VAWT) โดยทำการทดสอบการวัดเชิงกลและการวัดทางไฟฟ้า แล้วนำผลทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาคำนวณหา กำลังงานที่เกิดจากการไหลของลม ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (TSR) ของแขนส่งกำลังหลักที่มียาว 60 cm และ 100 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ต่างๆ และการวิเคราะห์แหล่งกำเนิดลม ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การวัดและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดลม

ในการหาแหล่งกำเนิดเพื่อมาเทียบกับแหล่งกำเนิดลมจริงนั้นได้ใช้พัดลมขนาดใหญ่ ซึ่งทำการทดลองทั้ง 3 ระดับของพัดลม และนำมาข้อมูลมาเปรียบเทียบกัน ดังการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) วางแอนนิโมมิเตอร์ในลักษณะที่อยู่กลางใบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 แสดงการจัดวางตำแหน่งของ Anemometer

- 2) เริ่มเปิดพัดลมระดับที่ 1 ซึ่งวางแอนิโมมิเตอร์ห่างจากพัดลมที่ระยะห่าง 40 , 60 , 80 , 100 , 120 , 140 , 160 , 180 และ 200 cm และบันทึกค่า

ตารางที่ 4.1 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมระดับที่ 1

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ครั้งที่ 1 (m/s)	ครั้งที่ 2 (m/s)	ครั้งที่ 3 (m/s)	ครั้งที่ 4 (m/s)	ครั้งที่ 5 (m/s)	เฉลี่ย (m/s)
40	4.0	4.5	4.5	4.9	4.0	4.38
60	4.9	4.9	4.5	4.9	4.5	4.74
80	4.0	4.0	4.5	4.5	4.5	4.30
100	4.0	3.6	4.0	3.6	4.0	3.84
120	4.0	4.0	3.6	3.6	3.6	3.76
140	3.6	3.6	3.1	3.6	3.1	3.40
160	3.1	3.6	3.6	3.1	3.1	3.30
180	2.7	2.7	2.2	2.2	2.7	2.50
200	2.7	3.1	2.7	2.7	2.7	2.78

การวัดความเร็วลม

ความเร็วลมเฉลี่ย บันทึกค่าความเร็วลม 5 ครั้ง ทุกๆ 1 ระยะห่างแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย เช่น ที่ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม 40 cm วัดได้ 4 , 4.5 , 4.5 , 4.9 , 4 m/s

$$\text{จาก } \bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{4+4.5+4.5+4.9+4}{5}$$

$$\bar{X} = 4.38 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทำการทดลองระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับและคำนวณเช่นเดียวกับข้อ 3 และบันทึกค่า

ตารางที่ 4.2 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมระดับที่ 2

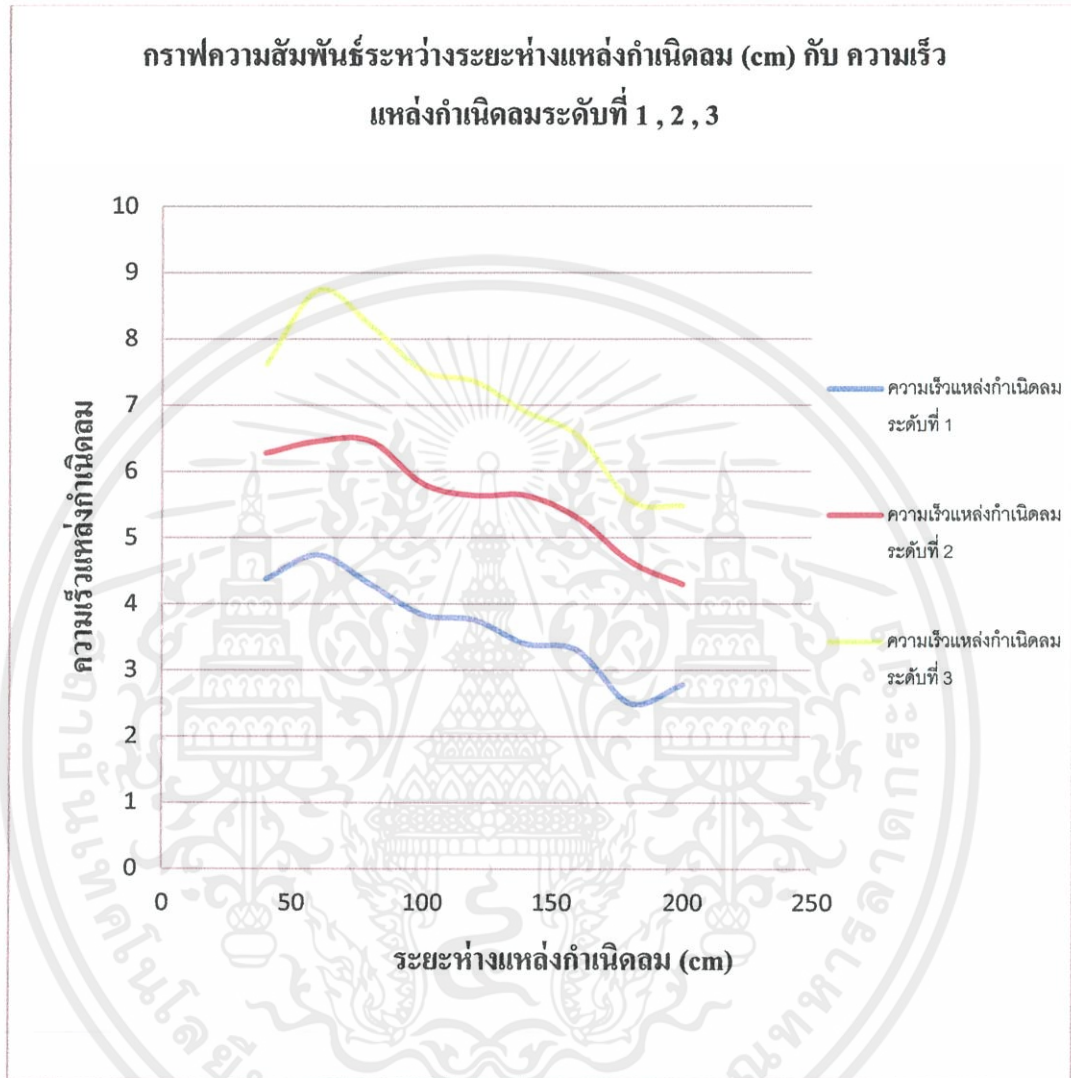
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ครั้งที่ 1 (m/s)	ครั้งที่ 2 (m/s)	ครั้งที่ 3 (m/s)	ครั้งที่ 4 (m/s)	ครั้งที่ 5 (m/s)	เฉลี่ย (m/s)
40	6.7	6.3	6.3	5.8	6.3	6.28
60	6.7	6.3	6.3	6.7	6.3	6.46
80	6.7	6.3	6.7	6.3	6.3	6.46
100	5.8	5.4	5.8	6.3	5.8	5.82
120	5.8	5.4	5.8	5.4	5.8	5.64
140	5.8	5.8	5.4	5.4	5.8	5.64
160	4.9	5.4	5.4	5.4	5.4	5.30
180	4.0	4.9	4.9	4.9	4.5	4.64
200	4.5	4.0	4.5	4.5	4.0	4.30

ตารางที่ 4.3 ความเร็วแหล่งกำเนิดลมระดับที่ 3

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ครั้งที่ 1 (m/s)	ครั้งที่ 2 (m/s)	ครั้งที่ 3 (m/s)	ครั้งที่ 4 (m/s)	ครั้งที่ 5 (m/s)	เฉลี่ย (m/s)
40	8.5	7.2	7.2	8.0	7.2	7.62
60	8.9	8.9	8.5	8.9	8.5	8.74
80	8.0	8.5	8.0	8.0	8.5	8.20
100	7.2	8.0	7.2	7.2	8.0	7.52
120	7.2	8.0	7.2	7.2	7.2	7.36
140	7.2	6.7	6.7	7.2	6.7	6.90
160	6.7	6.3	6.7	6.3	6.7	6.54
180	5.8	5.4	5.8	5.4	5.4	5.56
200	5.4	5.4	5.8	5.4	5.4	5.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์จากที่อื่น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm) กับความเร็วแหล่งกำเนิดลมระดับที่ 1, 2, 3



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm) กับความเร็วแหล่งกำเนิดลมระดับที่ 1, 2, 3

เพื่อทำการวิเคราะห์ทั้ง 3 ระดับของพัดลมแล้วจึงเลือกใช้ระดับที่ 3 เป็นตัวทดสอบกับกังหันลมเพราะว่าในช่วงความเร็วลมอยู่ในช่วงที่ต้องการกับการออกแบบ (ช่วง 5-10 m/s) และมีแรงผลักใบกังหันที่เพียงพอ และสามารถนำไปเทียบกับแหล่งกำเนิดลมตามธรรมชาติได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาติให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวัดและวิเคราะห์ชนิดใบหุ้มพลาสติก ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา (เทียบกับไม้โปรแทคเตอร์) มีการทดสอบต่อไปนี้

- 1) จัดเตรียมอุปกรณ์ทดสอบ และกั้นห้ามลวดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 แสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่างๆในการทดสอบ

- 2) ในการจัดเตรียมอุปกรณ์นั้น เครื่องมือวัดความเร็วลมก่อนปะทะใบกั้นหันใช้แอนิเมเตอร์ในการวัด ซึ่งวางอยู่ด้านหน้าใบพัดซึ่งต้องให้ใกล้ตัวใบพัดให้มากที่สุด และพัดลมเราใช้ระดับที่ 3 ในการทดสอบทุกครั้ง
- 3) ในระยะแรกเราเริ่มนำแหล่งกำเนิดลมของเราห่างจากใบพัดกั้นลมเป็นระยะ 40 cm และทำการวัดความเร็วลม
- 4) ทำการจับเวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ ซึ่งทำการวัดด้วยกัน 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย เช่น จับเวลาได้ 2.59 , 2.57 , 2.45 วินาที

$$\text{จาก } \bar{X} = \frac{\sum X}{N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $\bar{X} = \frac{2.59+2.57+2.45}{3}$ เป็นอนุภาคให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{X} = 2.53 \text{ s}$$

ดังนั้น เวลาเฉลี่ยที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ เท่ากับ 2.53 วินาที

5) นำการแปลงหน่วยวินาที (S) ไปเป็น รอบต่อนาที

เช่น 1 รอบ หมุนใช้เวลา 2.53 วินาที

$$1 \text{ รอบ/นาที} \quad \text{หมุนใช้เวลา} \quad \frac{1}{2.53} \times 60 = 23.71 \text{ รอบ/นาที}$$

6) ทำการวัด แรงดันไฟฟ้า (V กระแสสลับ), กระแสไฟฟ้า (A)

7) หาค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลมที่ผลิตออกมาได้

เช่น ที่กระแสไฟฟ้า 0.22 แอมแปร์ (A) แรงดัน 9.36 โวลต์ (V) ที่แหล่งกำเนิดลมห่างจากกังหันลม 40 เซนติเมตร

จาก

$$P = IV$$

$$P = (0.22) \times (9.36)$$

$$P = 2.05 \text{ W}$$

ดังนั้น กังหันลมผลิตกำลังไฟฟ้า 2.05 W

8) นำการหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p)

จาก
$$C_p = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$P_{\max} = 200 \text{ W} \text{ (เครื่องเจเนอเรเตอร์สามารถผลิตได้สูงสุด)}$$

$$\rho = \text{ค่าความหนาแน่นของอากาศ } \text{Kg/m}^3$$

$$A = h \times d ; h = \text{ความสูงของใบพัดกังหันลม}, d = \text{เส้นผ่านศูนย์กลาง กังหันลม}$$

$$V = \text{ความเร็วลม}$$

$$\text{เช่น } P_{\max} = 200 \text{ W} ; \rho = 1.1 \text{ Kg/m}^3 ; A = h \times d$$

$$1.48 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} = 1.72 \text{ m}^2$$

$$V = 9.15 \text{ m/s} \text{ ที่ระยะแหล่งกำเนิดลม } 40 \text{ cm} \text{ มุม } 85 \text{ องศา}$$

$$\text{แทนค่า} \quad C_p = \frac{200}{\frac{1}{2} \times 1.1 \times 1.77 \times 9.15^3}$$

$$C_p = 0.26$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์กำลังมีค่าเท่ากับ 0.26 ซึ่งค่า C_p ขึ้นอยู่กับ A และ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) ทำการหาค่า อัตราส่วนความเร็วปลายใบจาก (TSR) จาก

$$TSR(\lambda) = \frac{R\Omega}{V_{\infty}}$$

R = รัศมีของกังหันลม (m)

Ω = ความเร็วเชิงมุม Rad /s

$$\Omega = \frac{\theta}{T} = \frac{2\pi}{T}$$

V_{∞} = ความเร็วลมก่อนปะทะใบพัด (m/s)

$$TSR(\lambda) = \frac{2\pi R}{T V_{\infty}}$$

$$TSR(\lambda) = \frac{2\pi R}{T V_{\infty}}$$

เช่น $R = 0.6$ m; $T = 2.53$ s, $V_{\infty} = 9.15$ m/s แทนค่า

$$TSR(\lambda) = \frac{2 \times \pi \times 0.6}{2.53 \times 9.15}$$

$$TSR(\lambda) = 0.16$$

ดังนั้น อัตราส่วนความเร็วปลายใบมีค่าเท่ากับ 0.16 ซึ่งค่า $TSR(\lambda)$ นั้นขึ้นอยู่กับ R, T, V_{∞}

10) ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3-9 แต่เปลี่ยนมุมความเร็วสัมพัทธ์ที่ 85, 90, 95, 100 องศา และแต่ละมุมนั้น ทำการตั้งแหล่งกำเนิดลมห่างจากใบกังหันลมที่ระยะ 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 cm ตามลำดับ จะได้ผลตามตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต (input)					เอาต์พุต (output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	2.59	2.57	2.45	2.53	23.71	9.36	0.22
60	8.5-8.9	2.64	2.70	2.66	2.66	22.55	8.36	0.21
80	8.5-8.9	2.36	2.46	2.44	2.42	24.79	8.66	0.20
100	8.5-8.9	2.44	2.54	2.64	2.54	23.62	7.40	0.19
120	8.0-8.5	2.69	2.61	2.59	2.63	22.81	7.99	0.19
140	7.2-8.0	2.51	2.42	2.56	2.49	24.09	7.76	0.20
160	5.8-6.3	2.52	2.49	2.34	2.45	24.48	7.45	0.20
#180	5.4-5.8	3.02	2.94	3.00	2.98	20.13	7.97	0.20
#200	5.4-5.8	2.51	2.60	2.78	2.63	22.81	7.68	0.20

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	2.05	0.26	0.16
60	8.70	1.75	0.31	0.16
80	8.70	1.73	0.31	0.17
100	8.70	1.40	0.31	0.17
120	8.25	1.51	0.36	0.17
140	7.60	1.55	0.46	0.19
160	6.05	1.49	0.92	0.25
#180	5.60	1.59	1.16	0.22
#200	5.60	1.53	1.16	0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... 160 ไว้สำหรับการ... 6.05... 1.49... 0.92... 0.25...
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น #180 ห้ามมิให้ตัดแป... 5.60... 1.59... 1.16... 0.22...
#200... 5.60... 1.53... 1.16... 0.25...

ตารางที่ 4.5 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 90 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต (input)					เอาต์พุต (output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.0	1.65	1.65	1.65	1.65	36.36	13.48	0.26
60	8.0	1.91	2.12	2.17	2.06	29.12	11.29	0.23
80	8.0	2.26	2.24	2.54	2.34	25.64	9.89	0.22
100	7.2	1.94	2.09	2.02	2.01	29.85	10.73	0.23
120	6.7	2.47	2.42	2.35	2.41	24.89	10.54	0.22
140	5.4	2.04	1.97	2.01	2.00	30.00	10.80	0.23
160	5.4	2.47	2.36	2.57	2.46	24.39	11.22	0.22
180	4.9	2.30	2.13	2.18	2.20	27.27	9.81	0.21
#200	4.9	2.29	2.27	2.25	2.27	26.43	8.78	0.21

#กักหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.00	3.50	0.39	0.28
60	8.00	2.59	0.39	0.22
80	8.00	2.17	0.39	0.20
100	7.20	2.46	0.54	0.26
120	6.70	2.31	0.68	0.23
140	5.40	2.48	1.30	0.34
160	5.40	2.46	1.30	0.28
180	4.90	2.06	1.74	0.34
#200	4.90	1.84	1.74	0.33

ตารางที่ 4.6 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 95 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต (input)					เอาต์พุต (output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	1.64	1.64	1.93	1.73	34.68	13.21	0.25
60	8.9-8.5	2.17	2.33	2.30	2.26	26.54	10.10	0.23
80	8.0-7.2	2.06	1.82	2.02	1.96	30.61	10.63	0.23
100	8.0-7.6	2.18	1.98	1.98	2.04	29.41	10.76	0.23
120	7.6-7.2	2.08	2	2.02	2.03	29.55	10.28	0.22
140	7.2-6.3	2.20	2.26	2.17	2.21	27.14	9.52	0.21
160	6.3	2.26	2.14	2.19	2.19	27.39	9.43	0.21
#180	5.8	2.14	2.20	2.10	2.14	28.03	9.74	0.21
#200	5.8-4.9	2.26	2.26	2.21	2.24	26.78	9.01	0.20

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	3.30	0.26	0.23
60	8.70	2.32	0.31	0.19
80	7.60	2.44	0.46	0.25
100	7.80	2.47	0.43	0.23
120	7.40	2.26	0.50	0.25
*140	6.75	1.99	0.66	0.25
*160	6.30	1.98	0.81	0.27
#180	5.80	2.04	1.04	0.30
#200	5.35	1.80	1.33	0.31

ตารางที่ 4.7 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 100 องศา

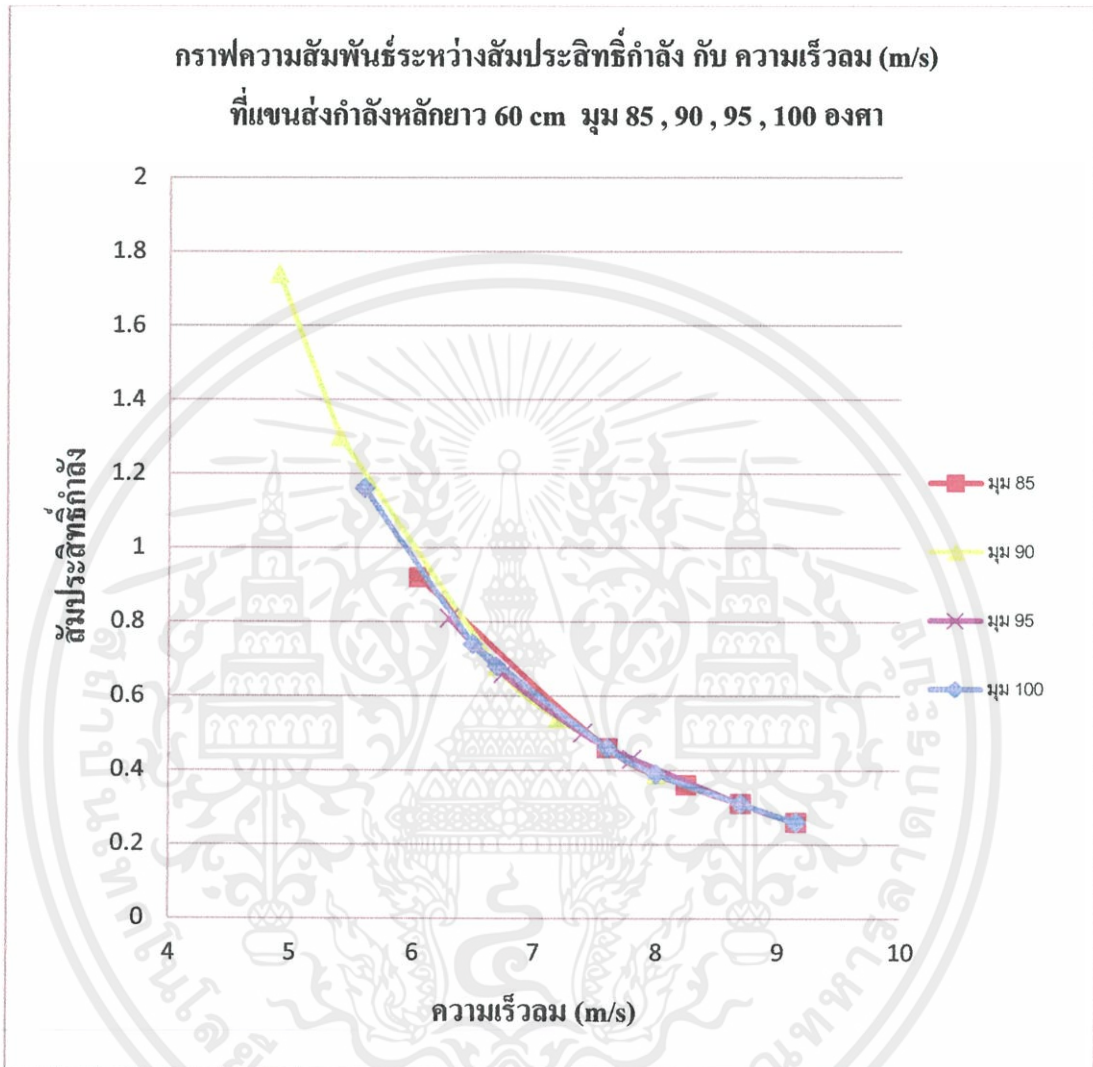
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	1.72	1.68	1.71	1.70	35.29	12.92	0.26
60	8.5-8.9	1.87	1.85	1.71	1.81	33.14	12.32	0.25
80	8.0	1.97	1.95	1.89	1.93	31.08	11.31	0.23
100	7.2-8	2.13	2.05	2.17	2.11	28.43	10.04	0.22
120	6.7-6.3	2.09	2.11	2.07	2.09	28.70	9.84	0.21
140	6.7	2.22	2.22	2.39	2.27	26.43	9.34	0.21
160	6.3-6.7	2.30	2.30	2.21	2.27	26.43	9.10	0.20
180	5.8-5.4	2.37	2.28	2.21	2.28	26.31	9.40	0.18
#200	5.4-4.9	2.50	2.52	2.46	2.49	24.09	7.87	0.18

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	3.35	0.26	0.24
60	8.70	3.08	0.31	0.23
80	8.00	2.60	0.39	0.24
100	7.60	2.20	0.46	0.23
120	6.50	2.06	0.74	0.27
140	6.70	1.96	0.68	0.24
*160	6.50	1.82	0.74	0.25
*180	5.60	1.69	1.16	0.29
#200	5.15	1.41	1.49	0.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

- 11) พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่
แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา

4.3 การวัดและวิเคราะห์ชนิดใบหุ้มพลาสติก ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุม ความเร็วลมพัทธ์ 85 , 90 , 95 และ 100 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปจำหน่ายให้ประโยชน์ด้านอื่น ถ้า
ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ และกึ่งहनลมเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 แต่ต่างกันตรงที่
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เราทำการเปลี่ยนแขนส่งกำลังหลักจากตอนแรกเป็น 60 cm เป็น 100 cm ซึ่งมีผลข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีใบพัด 100 cm มุม 85 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	3.05	3.17	3.14	3.12	19.23	5.47	0.18
60	7.2-8.0	3.07	3.14	3.07	3.09	19.41	5.34	0.18
80	6.3-6.7	3.24	3.29	3.33	3.28	18.29	5.17	0.17
100	6.3-6.7	3.37	3.31	3.37	3.35	17.91	4.98	0.17
120	6.3-6.7	3.74	3.50	3.58	3.60	16.66	4.50	0.16
140	5.8-6.3	3.77	3.64	3.71	3.70	16.21	4.39	0.16
160	4.9-5.4	3.70	3.93	3.73	3.78	15.87	4.56	0.16
180	4.5-4.9	4.17	4.10	4.11	4.12	14.56	4.40	0.16
200	4.0-4.5	4.13	4.18	4.32	4.21	14.25	4.11	0.16

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR(\lambda) = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	0.98	0.16	0.22
60	7.60	0.96	0.27	0.26
80	6.50	0.87	0.44	0.29
100	6.50	0.84	0.44	0.28
120	6.50	0.72	0.44	0.26
140	6.05	0.70	0.55	0.28
160	5.15	0.72	0.89	0.32
180	4.70	0.70	1.18	0.32
200	4.25	0.65	1.60	0.35

ตารางที่ 4.9 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีใบพัด 100 cm มุม 90 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	3.14	3.17	3.50	3.27	18.34	5.23	0.18
60	8.5-8.0	3.44	3.43	3.30	3.39	17.69	4.91	0.17
80	7.2-8.0	3.74	3.98	3.97	3.89	15.42	4.64	0.16
100	6.7-7.2	3.97	3.78	3.67	3.80	15.78	4.80	0.16
120	6.7-7.2	3.85	4.02	4.31	4.06	14.77	4.44	0.16
140	6.7-7.2	3.57	3.72	3.90	3.73	16.08	3.97	0.16
160	5.8-6.3	3.61	3.69	3.85	3.71	16.17	4.64	0.16
180	5.8-6.3	3.93	3.90	3.74	3.85	15.58	4.03	0.15
200	5.4-5.8	4.30	4.44	4.49	4.41	13.60	3.75	0.15

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเอง ไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 280 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	0.94	0.16	0.20
60	8.25	0.83	0.21	0.22
80	7.60	0.74	0.27	0.21
100	6.95	0.76	0.36	0.23
120	6.95	0.71	0.36	0.22
140	6.95	0.63	0.36	0.24
160	6.05	0.74	0.55	0.27
180	6.05	0.60	0.55	0.26
200	5.60	0.56	0.69	0.25

ตารางที่ 4.10 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีใบพัด 100 cm มุม 95 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-9.4	3.10	3.14	3.45	3.23	18.57	5.50	0.18
60	7.2-8.0	3.14	3.38	3.30	3.27	18.34	5.43	0.18
80	6.7-7.2	3.38	3.26	3.24	3.29	18.23	5.24	0.17
100	6.7-7.2	3.80	3.71	3.54	3.68	16.30	4.36	0.16
120	6.7-7.2	3.87	3.83	3.84	3.84	15.62	4.09	0.16
140	5.4-5.8	3.47	3.71	3.87	3.68	16.30	4.59	0.17
160	4.9-5.4	3.53	3.87	3.67	3.69	16.26	4.41	0.16
180	4.5-4.9	3.74	3.76	3.71	3.73	16.08	4.18	0.16
200	4.5-4.9	3.96	3.96	3.94	3.94	15.18	3.76	0.15

#กังหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 290 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	0.99	0.16	0.21
60	7.60	0.97	0.27	0.25
80	6.95	0.89	0.36	0.27
100	6.95	0.69	0.36	0.24
120	6.95	0.65	0.36	0.23
140	5.60	0.78	0.69	0.30
160	5.15	0.70	0.89	0.33
180	4.70	0.66	1.18	0.35
200	4.70	0.56	1.18	0.33

ตารางที่ 4.11 ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีใบพัด 100 cm มุม 100 องศา

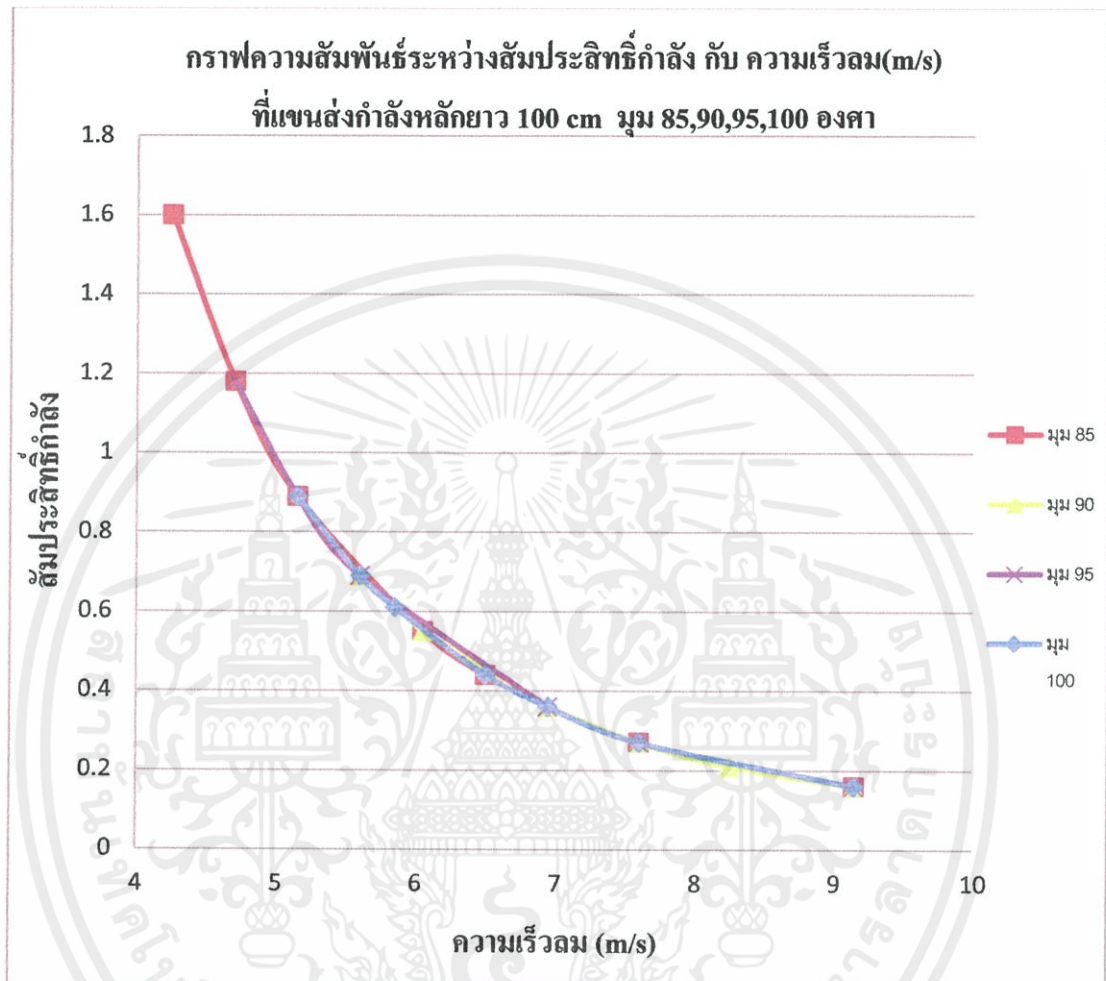
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
		40	8.9-9.4	2.98	2.97			
60	7.2-8.0	3.16	3.21	3.15	3.17	18.92	5.29	0.17
80	6.7-7.2	3.26	3.37	3.36	3.33	18.01	4.94	0.17
100	6.7-7.2	3.61	3.64	3.60	3.61	16.62	4.47	0.16
120	6.7-7.2	3.70	3.61	3.70	3.67	16.34	4.34	0.16
140	6.3-6.7	3.95	3.92	3.94	3.93	15.26	3.78	0.15
160	5.4-6.3	4.01	3.92	3.93	3.96	15.15	4.06	0.16
180	5.4-5.8	4.22	4.20	4.04	4.15	14.45	3.70	0.15
200	4.9-5.4	4.65	4.45	4.71	4.60	13.04	3.55	0.14

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 280 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.15	1.03	0.16	0.22
60	7.60	0.89	0.27	0.26
80	6.95	0.83	0.36	0.27
100	6.95	0.71	0.36	0.25
120	6.95	0.69	0.36	0.24
140	6.50	0.56	0.44	0.24
160	5.85	0.64	0.61	0.27
180	5.60	0.55	0.69	0.27
200	5.15	0.49	0.89	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขน
 สั่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85, 90, 95, 100 องศา



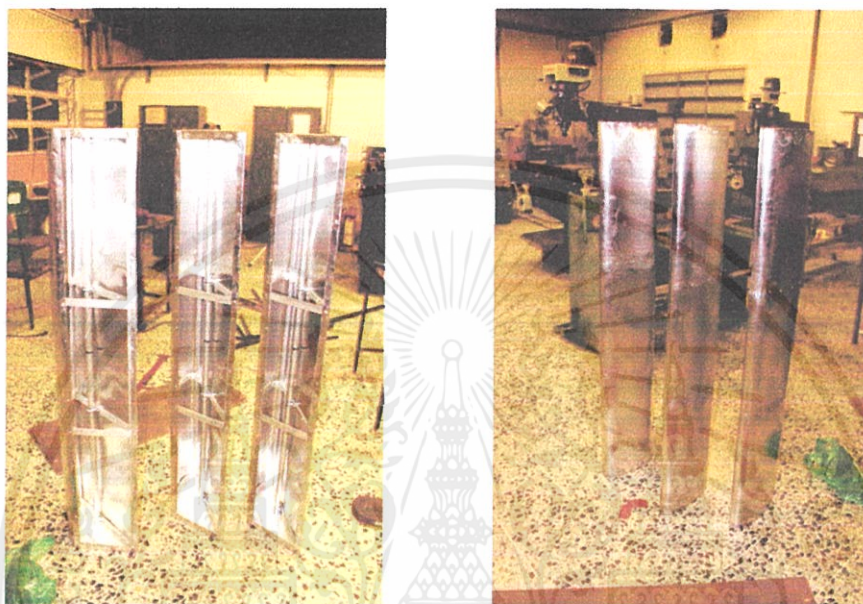
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ อัตราส่วนความเร็วปลายใบ ที่แขนสั่ง
 กำลังหลักยาว 100 cm มุม 85, 90, 95, 100 องศา

4.4 การวัดและวิเคราะห์ใบหุ้มอะลูมิเนียม ที่แขนสั่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุม ความเร็วสัมพัทธ์ 85, 90, 95, 100 องศา

ในการวัดและวิเคราะห์ในครั้งนี้เราทำการเปลี่ยนใบหุ้มจากเดิมเป็นพลาสติกมาเป็นใบหุ้ม
 อะลูมิเนียม ในตอนแรกที่เราใช้พลาสติกหุ้มนั้นเพราะว่า เราต้องการพิสูจน์ให้รู้ว่ากังหันลมที่เรา
 นำมานั้นหมุนได้จริงหรือไม่ ซึ่งพลาสติกเบากว่าอะลูมิเนียมสมมติว่าถ้าใบหุ้มที่เป็นพลาสติกนั้น
 ยังไม่สามารถทำให้กังหันลมหมุนได้ เราก็จะใช้อะลูมิเนียมไม่ได้เพราะว่า พลาสติกยังไม่หมุน

ซึ่งอะลูมิเนียมก็คงไม่หมุนเช่นกัน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายโดยสิ้นเปลือง แต่เมื่อมาทำการทดลองดูแล้วนั้น พลาสติกก็ทำให้ก้านกลมหมุนได้และอะลูมิเนียมก็ทำให้หมุนได้เช่นกัน

ทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ และก้านกลมเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 แต่ต่างกันตรงใบหุ้มเปลี่ยนจากพลาสติกเป็นอะลูมิเนียม ซึ่งมีผลข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 แสดงภาพใบหุ้มเปลี่ยนจากพลาสติกเป็นอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.7 จัดเตรียมอุปกรณ์และเตรียมการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... เติมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	8.5-8.9	1.44	1.54	1.66	1.54	38.96	15.51	0.26
60	8.5-8.9	2.04	2.02	2.00	2.02	29.70	12.22	0.25
80	8.5-8.9	1.86	1.89	1.20	1.65	36.36	10.71	0.23
100	7.2-8.0	1.92	1.91	2.02	1.95	30.76	11.44	0.24
120	7.2-8.0	2.02	2.02	2.00	2.03	29.55	11.98	0.25
140	6.7-7.2	2.04	2.07	2.05	2.05	29.26	10.29	0.22
160	6.3-6.7	2.34	2.30	2.36	2.33	25.75	9.31	0.21
180	6.3-6.7	2.60	2.47	2.57	2.54	23.62	7.69	0.20
#200	6.3-5.8	2.64	2.64	2.54	2.60	23.07	7.22	0.19

#กัณฑ์ลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	4.03	0.31	0.28
60	8.70	3.23	0.31	0.21
80	8.70	2.46	0.31	0.26
100	7.60	2.74	0.46	0.25
120	7.60	2.99	0.46	0.24
140	6.95	2.26	0.60	0.26
160	6.50	1.95	0.74	0.24
180	6.50	1.53	0.74	0.22
#200	6.05	1.37	0.92	0.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.13 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 90 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็วลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ วินาที (s)				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.5-8.9	1.56	1.58	1.54	1.56	38.46	15.33	0.26
60	8.0-8.5	1.72	1.74	1.82	1.76	34.09	12.73	0.25
80	8.0-7.9	1.70	1.74	1.87	1.77	33.89	14.74	0.25
100	7.2-8.0	1.73	1.91	2.13	1.92	31.25	12.66	0.25
120	7.2-8.0	2.04	2.02	2.26	2.10	28.57	10.34	0.22
140	6.7-7.2	2.23	2.22	2.46	2.32	25.86	10.24	0.22
160	6.3-6.7	2.24	2.37	2.30	2.30	26.08	9.90	0.22
180	6.3-5.8	2.44	2.33	2.38	2.38	25.21	8.53	0.19
200	6.3-5.8	2.43	2.44	2.68	2.51	23.90	8.23	0.19

#ก้านลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	3.98	0.31	0.27
60	8.25	3.18	0.36	0.25
80	7.95	3.68	0.40	0.26
100	7.60	3.16	0.46	0.25
120	7.60	2.27	0.46	0.23
140	6.95	2.25	0.60	0.23
160	6.50	2.17	0.74	0.25
180	6.05	1.62	0.92	0.26
200	6.05	1.56	0.92	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาไป

ตารางที่ 4.14 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 95 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-8.5	1.65	1.60	1.60	1.61	37.26	15.10	0.26
60	8.5-7.2	1.70	1.80	1.80	1.74	34.48	12.89	0.25
80	8.0-7.2	1.87	1.80	1.82	1.83	32.78	12.46	0.25
100	8.0-7.2	1.96	1.82	2.00	1.92	31.25	10.51	0.23
120	7.2-6.3	2.01	2.00	1.80	2.01	29.85	10.30	0.23
140	6.7-6.3	1.90	1.80	2.09	1.88	31.91	11.76	0.23
160	6.7-6.3	2.01	2.09	2.16	2.06	29.12	10.16	0.22
180	5.8-5.4	2.10	2.16	2.14	2.14	28.03	10.09	0.22
200	5.4-4.9	2.22	2.28	2.23	2.23	26.90	8.80	0.20

#กังหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	3.92	0.31	0.26
60	7.85	3.22	0.42	0.27
80	7.60	3.11	0.46	0.27
100	7.60	2.41	0.46	0.25
120	6.75	2.36	0.66	0.27
140	6.50	2.70	0.74	0.30
160	6.50	2.23	0.74	0.28
180	5.60	2.21	1.16	0.31
200	5.15	1.76	1.49	0.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4.15 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 100 องศา

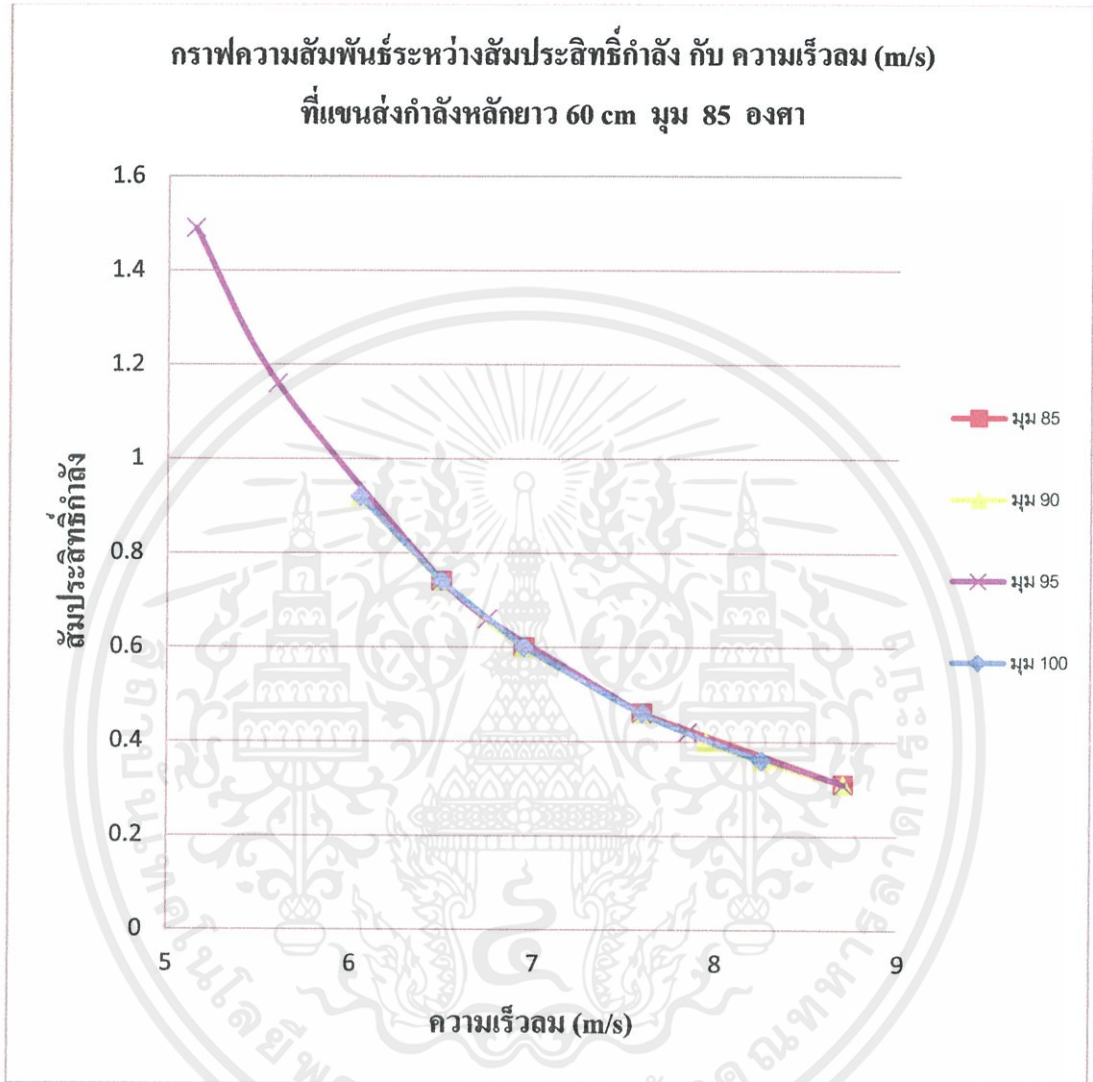
ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.5-8.0	1.48	1.49	1.49	1.48	40.54	15.01	0.25
60	8.5-8.0	1.52	1.50	1.57	1.53	39.21	14.69	0.25
80	8.0-7.2	1.78	1.83	1.83	1.81	33.14	11.40	0.24
100	7.2-6.7	1.90	1.94	1.91	1.91	31.41	10.86	0.23
120	7.2-6.7	1.97	2.00	2.02	1.99	30.15	10.37	0.23
140	6.7-6.3	2.04	2.05	2.00	2.03	29.55	10.57	0.23
160	6.7-6.3	2.10	2.04	2.12	2.08	28.84	10.85	0.21
180	6.7-6.3	2.24	2.27	2.26	2.25	26.66	9.77	0.20
200	6.3-5.8	2.32	2.28	2.38	2.32	25.86	9.60	0.20

#กังหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 220 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.25	3.75	0.36	0.30
60	8.25	3.67	0.36	0.29
80	7.60	2.73	0.46	0.27
100	6.95	2.49	0.60	0.28
120	6.95	2.38	0.60	0.27
140	6.50	2.43	0.74	0.28
160	6.50	2.27	0.74	0.27
180	6.50	1.95	0.74	0.25
200	6.05	1.92	0.92	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่
แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก
ยาว 60 cm มุม 85 องศา

4.5 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุม ความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ในการวัดและวิเคราะห์ในครั้งนี้ เราใช้ใบพัดตัวเดิมจากข้อ 4.4 ซึ่งเป็นแบบใบหุ้ม
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
อะลูมิเนียม และทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ และกั้นห้ามลมเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ซึ่งมี
ผลข้อมูลดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 ทำการเปลี่ยนแกนส่งกำลังหลักจาก 60 cm เป็น 100 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 85 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	8.9-8.5	2.58	2.66	2.62	2.62	22.90	7.75	0.21
60	8.5-8.0	2.70	2.75	2.68	2.71	22.14	6.32	0.19
80	6.7-7.2	2.89	3.02	2.94	2.95	20.33	5.99	0.19
100	6.7-7.2	3.10	3.14	3.15	3.13	19.16	5.40	0.18
120	6.7-6.3	3.44	3.55	3.35	3.44	17.44	4.65	0.17
140	6.3-5.8	3.27	3.19	3.29	3.25	18.46	5.27	0.18
160	5.8-4.9	3.55	3.52	3.53	3.53	16.99	4.48	0.17
180	5.4-4.9	3.78	3.77	3.74	3.74	16.04	4.02	0.16
200	5.4-4.9	4.07	3.93	4.02	4.02	14.92	3.71	0.15

#กักันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 260 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	1.62	0.18	0.27
60	8.25	1.20	0.21	0.28
80	6.95	1.13	0.36	0.30
100	6.95	0.97	0.36	0.29
120	6.50	0.79	0.44	0.28
140	6.05	0.94	0.55	0.31
160	5.35	0.76	0.80	0.33
180	5.15	0.64	0.89	0.32
200	5.15	0.55	0.89	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 4.17 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 90 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	8.9-8.5	2.65	2.72	2.73	2.7	22.22	7.01	0.21
60	8.9-8.5	2.64	2.68	2.62	2.64	22.72	6.95	0.20
80	8.9-8.5	3.28	3.35	3.31	3.31	18.12	5.05	0.17
100	8.5-7.2	3.55	3.56	3.65	3.58	16.75	4.38	0.16
120	7.2-6.7	3.83	3.73	3.80	3.78	15.87	4.11	0.16
140	6.7-6.3	3.36	3.38	3.47	3.40	17.64	4.94	0.17
160	6.3-5.8	3.47	3.36	3.44	3.42	17.54	4.77	0.17
180	6.3-5.8	3.94	3.98	3.95	3.95	15.18	3.90	0.17
200	5.4-4.9	4.18	4.06	3.96	4.06	14.77	3.90	0.17

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 280 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	1.47	0.18	0.26
60	8.70	1.39	0.18	0.27
80	8.70	0.85	0.18	0.21
100	7.85	0.70	0.25	0.22
120	6.95	0.65	0.36	0.23
140	6.50	0.83	0.44	0.28
160	6.05	0.81	0.55	0.30
180	6.05	0.62	0.55	0.26
200	5.15	0.66	0.89	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ใบหุ้มค้ววยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 95 องศา

ระยะห่าง แหล่งกำเนิด ลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	8.9-8.5	2.83	2.80	2.83	2.83	21.20	6.57	0.20
60	8.9-8.5	2.91	3.10	3.06	3.02	19.86	6.19	0.19
80	8.9-8.5	3.31	3.24	3.30	3.28	18.29	4.96	0.17
100	8.5-8.0	3.42	3.47	3.43	3.44	17.44	4.50	0.17
120	8.0-7.2	3.64	3.52	3.63	3.59	16.71	4.26	0.16
140	8.0-7.2	3.96	3.91	3.85	3.90	15.38	3.98	0.16
160	7.2-6.7	3.63	3.59	3.72	3.64	16.48	4.30	0.16
180	6.7-5.4	3.79	3.70	3.81	3.76	15.95	4.08	0.16
200	5.4-4.9	3.78	3.88	3.86	3.86	15.62	4.06	0.16

#กั้นหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 280 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	1.31	0.18	0.25
60	8.70	1.17	0.18	0.23
80	8.70	0.84	0.18	0.22
100	8.25	0.76	0.21	0.22
120	7.60	0.68	0.27	0.23
140	7.60	0.63	0.27	0.21
160	6.95	0.68	0.36	0.24
180	6.05	0.65	0.55	0.27
200	5.82	0.64	0.62	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 100 องศา

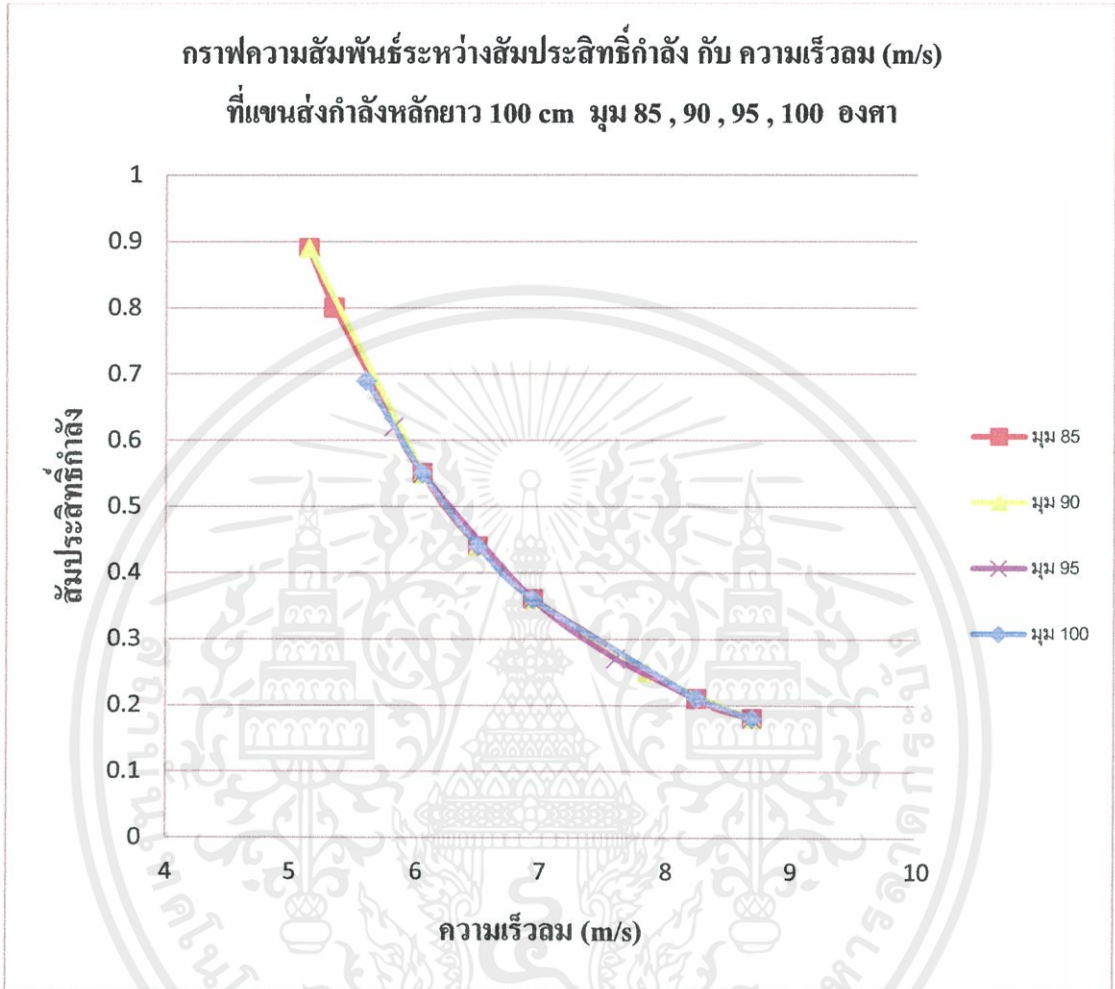
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	8.9-8.5	2.64	2.71	2.60	2.65	22.64	7.15	0.20
60	8.9-8.5	2.72	2.90	2.84	2.82	21.27	6.56	0.19
80	8.5-8.0	3.31	3.34	3.30	3.31	18.12	4.93	0.17
100	8.5-8.0	3.49	3.44	3.52	3.48	17.24	4.44	0.17
120	7.2-6.7	4.01	3.97	4.02	4	15	3.76	0.15
140	6.7-6.3	3.51	3.54	3.68	3.37	16.80	4.50	0.16
160	6.3-5.8	3.68	3.70	3.66	3.68	16.30	3.82	0.16
180	5.8-5.4	3.78	3.90	3.81	3.83	15.66	3.76	0.15
200	5.8-5.4	3.89	3.91	4.01	3.93	15.26	3.60	0.15

#กักันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 260 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลายใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	8.70	1.43	0.18	0.27
60	8.70	1.24	0.18	0.25
80	8.25	0.83	0.21	0.23
100	8.25	0.75	0.21	0.21
120	6.95	0.56	0.36	0.22
140	6.50	0.72	0.44	0.27
160	6.05	0.61	0.55	0.28
180	5.60	0.56	0.69	0.29
200	5.60	0.54	0.69	0.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา

4.6 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

ในการวัดและวิเคราะห์ในครั้งนี้เราใช้ใบพัดเดิมจากข้อ 4.4 ซึ่งเป็นแบบใบหุ้มอะลูมิเนียม

ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มีการใส่โหลดตัวต้านทาน 10 โอห์ม แล้วจึงทำการวัดทั้งแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

และกระแสที่ผ่านโหลดตัวต้านทาน และทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ และกึ่งहनลม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ และต้องอ้างอิงถึงเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ซึ่งมีผลข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.20 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 85 องศา ไล่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	9.6	1.59	1.63	1.63	1.61	37.26	1.785	0.228
60	8.9	1.93	1.97	1.90	1.93	31.08	1.338	0.195
80	8.6	2.03	2.13	2.00	2.05	29.27	1.293	0.186
100	7.9	2.29	2.37	2.35	2.33	25.75	1.121	0.175
120	7.2	2.34	2.38	2.44	2.38	25.21	1.030	0.168
140	6.7	2.65	2.62	2.60	2.62	22.90	0.900	0.159
160	6.7	2.62	2.65	2.65	2.64	22.72	0.901	0.159
180	6.5	2.94	3.03	2.97	2.98	20.13	0.858	0.151
200	5.8	2.96	2.97	3.09	2.98	20.13	0.746	0.142

#กัณฑ์ลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 220 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.60	0.40	0.23	0.24
60	8.90	0.26	0.29	0.21
80	8.60	0.24	0.32	0.21
100	7.90	0.19	0.41	0.20
120	7.20	0.17	0.54	0.21
140	6.70	0.14	0.68	0.21
160	6.70	0.14	0.68	0.21
180	6.50	0.12	0.74	0.19
200	5.80	0.10	1.00	0.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและสงวนสิทธิ์ในเอกสารทุกครั้งที่มาไป

ตารางที่ 4.21 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	9.4	1.56	1.56	1.59	1.57	38.21	1.816	0.222
60	8.9	1.97	1.94	1.94	1.95	30.76	1.462	0.195
80	8.5	2.13	2.13	2.12	2.12	28.30	1.281	0.182
100	7.9	2.15	2.19	2.13	2.15	27.90	1.201	0.174
120	7.5	2.28	2.19	2.25	2.24	26.78	1.160	0.169
140	6.7	2.32	2.35	2.35	2.34	25.64	1.137	0.169
160	6.4	2.53	2.40	2.47	2.46	24.39	0.949	0.166
180	6.0	2.59	2.50	2.47	2.52	23.80	0.948	0.164
200	5.8	2.53	2.63	2.68	2.61	22.98	0.902	0.160

#กังหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 220 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.40	0.40	0.24	0.25
60	8.90	0.28	0.29	0.21
80	8.50	0.23	0.33	0.20
100	7.90	0.20	0.41	0.22
120	7.50	0.19	0.48	0.22
140	6.70	0.19	0.68	0.24
160	6.40	0.15	0.78	0.23
180	6.00	0.15	0.94	0.24
200	5.80	0.14	1.04	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และทำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 95 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่	ครั้งที่	ครั้งที่	เฉลี่ย					
1	2	3						
40	9.4	1.60	1.66	1.62	1.62	37.03	1.800	0.228
60	8.8	1.94	1.87	1.84	1.88	31.91	1.527	0.203
80	8.5	2.10	2.13	2.16	2.11	28.43	1.232	0.176
100	7.4	2.38	2.14	2.38	2.39	25.10	1.073	0.165
120	6.9	2.60	2.57	2.57	2.58	23.25	0.947	0.162
140	6.6	2.78	2.75	2.78	2.77	21.66	0.855	0.154
160	6.1	2.78	2.85	2.82	2.81	21.35	0.813	0.152
180	5.8	2.75	2.76	2.82	2.77	21.66	0.866	0.152
200	5.8	2.87	2.84	2.81	2.84	21.12	0.847	0.153

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 220 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.40	0.41	0.24	0.24
60	8.80	0.30	0.30	0.22
80	8.50	0.21	0.33	0.21
100	7.40	0.17	0.50	0.21
120	6.90	0.15	0.62	0.21
140	6.60	0.13	0.71	0.20
160	6.10	0.12	0.90	0.21
180	5.80	0.13	1.04	0.23
200	5.80	0.12	1.04	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากท่านมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาปรึกษา

ตารางที่ 4.23 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 60 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

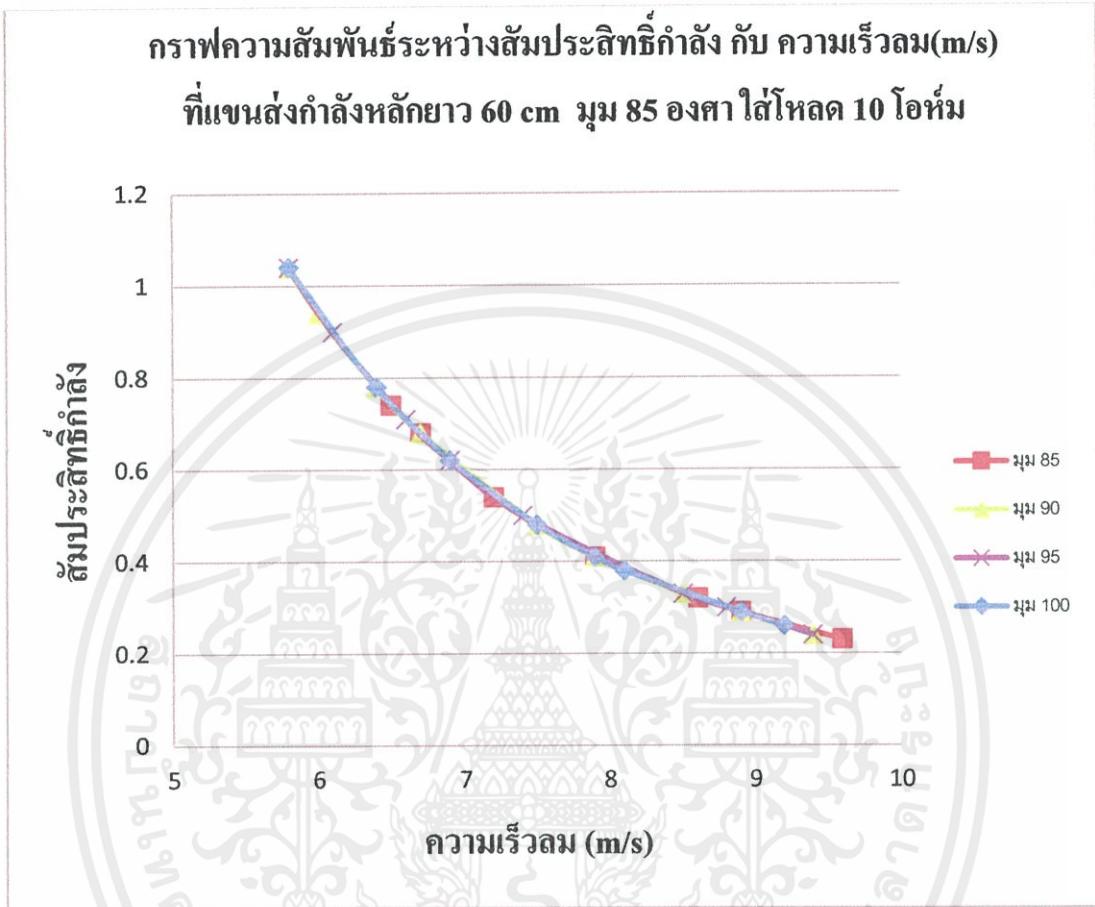
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	9.2	1.62	1.59	1.63	1.61	37.26	1.718	0.216
60	8.9	1.88	1.97	1.97	1.94	30.92	1.392	0.189
80	8.1	2.13	2.16	2.20	2.16	27.77	1.201	0.173
100	7.9	2.44	2.40	2.37	2.40	25.00	1.051	0.165
120	7.5	2.50	2.50	2.50	2.50	24.00	0.974	0.164
140	6.9	2.84	2.84	2.84	2.84	21.12	0.845	0.153
160	6.9	2.69	2.62	2.69	2.66	22.55	0.901	0.159
180	6.4	2.78	2.74	2.75	2.75	21.81	0.895	0.159
200	5.8	3.22	3.18	3.19	3.19	18.80	0.685	0.138

#กึ่งหนึ่งลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.20	0.37	0.26	0.22
60	8.90	0.26	0.29	0.21
80	8.10	0.20	0.38	0.21
100	7.90	0.17	0.41	0.19
120	7.50	0.15	0.48	0.20
140	6.90	0.12	0.62	0.19
160	6.90	0.14	0.62	0.20
180	6.40	0.14	0.78	0.21
200	5.80	0.09	1.04	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลัก ยาว 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

4.7 การวัดและวิเคราะห์ ชนิดใบหุ้มอะลูมิเนียมที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm ที่มุมความเร็วสัมพัทธ์ 85 , 90 , 95 , 100 องศา ใส่โหลด 10โอห์ม

ในการวัดและวิเคราะห์ในครั้งนี้ เราใช้ใบพัดตัวเดิมจากข้อ 4.4 ซึ่งเป็นแบบใบหุ้ม

อะลูมิเนียม ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 60 cm มีการใส่โหลดตัวต้านทาน 10 โอห์ม แล้วจึงทำการวัดทั้งแรงดันและกระแสที่ผ่านโหลดตัวต้านทาน และทำการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ และไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้นอีกทั้งหุ้มมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ กิ่งหันลมเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2 ซึ่งมีผลข้อมูลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.24 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 85 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	9.2	2.81	2.78	2.75	2.78	21.58	0.842	0.152
60	8.7	3.47	3.40	3.50	3.45	17.39	0.607	0.129
80	8.2	3.97	3.97	3.94	3.96	15.15	0.466	0.111
100	7.5	4.28	4.22	4.25	4.25	14.11	0.441	0.108
120	7.2	4.28	4.31	4.32	4.30	13.95	0.397	0.104
140	6.5	4.34	4.32	4.40	4.35	19.79	0.392	0.102
160	5.7	4.60	4.68	4.53	4.60	13.04	0.368	0.099
180	5.1	5.31	5.47	5.66	5.48	10.94	0.318	0.089
200	5.1	5.60	5.94	6.49	6.01	9.98	0.280	0.083

#กัณฑ์ลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.20	0.12	0.15	0.24
60	8.70	0.07	0.18	0.20
80	8.20	0.05	0.22	0.19
100	7.50	0.04	0.29	0.19
120	7.20	0.04	0.32	0.20
140	6.50	0.03	0.44	0.22
160	5.70	0.03	0.66	0.23
180	5.10	0.02	0.92	0.22
200	5.10	0.02	0.92	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 90 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	9.4	2.75	2.68	2.78	2.73	21.97	0.862	0.156
60	8.9	3.31	3.25	3.29	3.28	18.29	0.662	0.134
80	8.6	3.75	3.80	3.75	3.76	15.95	0.552	0.122
100	7.8	3.85	3.91	3.81	3.58	15.58	0.515	0.118
120	7.5	3.93	4.03	4.00	3.98	15.07	0.479	0.103
140	6.9	4.30	4.25	4.31	4.28	14.01	0.438	0.096
160	6.7	5.12	5.03	5.16	5.10	11.76	0.333	0.080
180	6.4	5.19	5.22	4.94	4.96	12.09	0.314	0.079
200	6.1	5.25	5.10	5.10	5.15	11.65	0.312	0.079

#กังหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.40	0.13	0.14	0.24
60	8.90	0.08	0.17	0.21
80	8.60	0.06	0.19	0.19
100	7.80	0.04	0.25	0.20
120	7.50	0.04	0.29	0.21
140	6.90	0.04	0.37	0.21
160	6.70	0.02	0.40	0.18
180	6.40	0.02	0.46	0.19
200	6.10	0.02	0.54	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับคณาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายเอกสารทุกครั้งที่มาขอไปใช้

ตารางที่ 4.26 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 95 องศา ใต้โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
40	9.4	2.66	2.58	2.59	2.64	22.72	0.905	0.159
60	8.5	3.34	3.38	3.34	3.35	17.91	0.629	0.131
80	7.9	3.72	3.72	3.81	3.75	16.00	0.563	0.125
100	7.2	3.97	4.00	4.45	3.96	15.15	0.485	0.113
120	6.8	4.25	4.38	4.35	4.36	13.76	0.456	0.110
140	6.5	4.32	4.37	4.35	4.43	13.82	0.420	0.105
160	6.5	4.44	4.43	4.38	4.41	13.60	0.414	0.103
180	5.9	4.59	4.35	4.48	4.47	13.42	0.389	0.100
200	5.7	4.84	4.75	4.93	4.84	12.39	0.362	0.095

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 260 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.40	0.14	0.14	0.25
60	8.50	0.08	0.20	0.22
80	7.90	0.07	0.24	0.21
100	7.20	0.05	0.32	0.22
120	6.80	0.05	0.39	0.21
140	6.50	0.04	0.44	0.22
160	6.50	0.04	0.44	0.21
180	5.90	0.03	0.59	0.23
200	5.70	0.03	0.66	0.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลของทั้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

ตารางที่ 4.27 ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีใบพัด 100 cm มุม 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

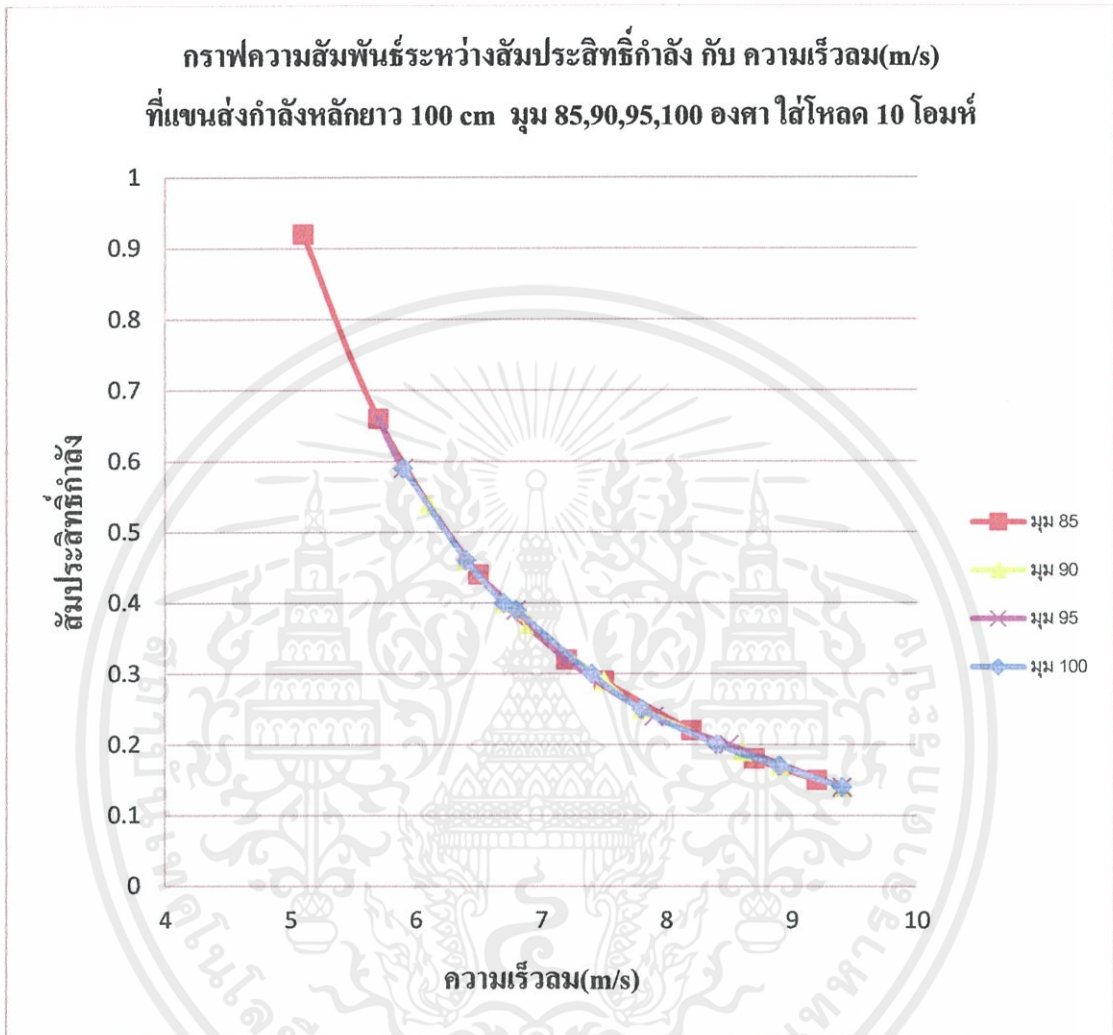
ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	อินพุต(input)					เอาต์พุต(output)		
	ความเร็ว ลม (m/s)	เวลาที่ใบพัดหมุนครบ 1 รอบ				ความเร็ว ปลาย ใบพัด (รอบต่อ นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
		วินาที (s)						
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย					
40	9.4	2.97	2.94	2.91	2.94	20.40	0.803	0.150
60	8.9	3.34	3.41	3.56	3.43	17.49	0.626	0.130
80	8.4	4.31	4.21	4.31	4.27	14.05	0.152	0.115
100	7.8	4.37	4.38	4.34	4.36	13.76	0.435	0.107
120	7.4	4.46	4.43	4.47	4.45	13.48	0.408	0.103
140	6.8	4.75	4.82	4.79	4.78	12.55	0.372	0.099
160	6.7	5.25	5.19	5.10	5.18	11.58	0.305	0.088
180	6.4	5.22	5.23	5.21	5.22	11.49	0.295	0.087
200	5.9	6.65	6.66	6.59	6.63	9.04	0.182	0.064

#กึ่งหันลมเริ่มหมุนด้วยตนเองไม่ได้ที่ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดลม 240 cm

ระยะห่าง แหล่งกำเนิดลม (cm)	ความเร็วลม (m/s)	กำลังไฟฟ้า $P=IV$	สัมประสิทธิ์ กำลัง $C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho Av^3}$	อัตราส่วน ความเร็วปลาย ใบ $TSR = \frac{R\Omega}{V_\infty}$
40	9.40	0.12	0.14	0.22
60	8.90	0.08	0.17	0.20
80	8.40	0.05	0.20	0.17
100	7.80	0.04	0.25	0.18
120	7.40	0.04	0.30	0.19
140	6.80	0.03	0.39	0.19
160	6.70	0.02	0.40	0.18
180	6.40	0.02	0.46	0.18
200	5.90	0.01	0.59	0.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาด กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไป

พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85, 90, 95, 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง กับ ความเร็วลม (m/s) ที่แขนส่งกำลังหลักยาว 100 cm มุม 85, 90, 95, 100 องศา ใส่โหลด 10 โอห์ม

4.8 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกังหันลม (Efficiency, η)

ประสิทธิภาพ คือ อัตราส่วนของพลังงานที่กังหันลมเปลี่ยนได้จริงต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่ไหลผ่านช่วงหน้าตัดการทำงานของกังหันลม ซึ่งสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานของลม
 เอกสารนี้
 ไม่ว่ากรณี ให้เป็นพลังงานของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$$

$$P_o = \text{กำลังเอาต์พุต}$$

$$P_{ii} = \text{กำลังลมที่ไหลผ่านอุโมงค์ลม(W)} = 200 \text{ W}$$

ซึ่งเราจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทั้งหมดตั้งแต่วัสดุที่หุ้มด้วยพลาสติก และ
อะลูมิเนียมที่แขนส่งกำลังหลักต่างๆ และมุมความเร็วสัมพัทธ์ต่างๆ

หุ้มใบด้วยพลาสติก

ตารางที่ 4.28 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยพลาสติก แขน 60 cm มุม 85 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{ii}} \times 100 \%$
40	2.05	1.02 %
60	1.75	0.87 %
80	1.73	0.86 %
100	1.40	0.70 %
120	1.51	0.75 %
140	1.55	0.77 %
160	1.49	0.74 %

ตารางที่ 4.29 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยพลาสติก แขน 60 cm มุม 90 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{ii}} \times 100 \%$
40	3.50	1.75 %
60	2.59	1.29 %
80	2.17	1.08 %
100	2.46	1.23 %
120	2.31	1.15 %
140	2.48	1.24 %
160	2.46	1.23 %
180	2.66	1.03 %

ตารางที่ 4.30 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยพลาสติก แขน 60 cm มุม 95 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Li}} \times 100 \%$
40	3.30	1.65 %
60	2.32	1.16 %
80	2.44	1.22 %
100	2.47	1.23 %
120	2.26	1.13 %
140	1.99	0.99 %
160	1.98	0.99 %

ตารางที่ 4.31 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยพลาสติก แขน 60 cm มุม 100 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Li}} \times 100 \%$
40	3.35	1.67 %
60	3.08	1.54 %
80	2.60	1.30 %
100	2.20	1.10 %
120	2.06	1.03 %
140	1.46	0.98 %
160	1.82	0.91 %
180	1.69	0.84 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.32 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใยหุ้มด้วยพลาสติก แขน 100 cm มุม 85 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{ii}} \times 100 \%$
40	0.98	0.49 %
60	0.96	0.48 %
80	0.87	0.43 %
100	0.84	0.42 %
120	0.72	0.36 %
140	0.70	0.35 %
160	0.72	0.36 %
180	0.70	0.35 %
200	0.65	0.32 %

ตารางที่ 4.33 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใยหุ้มด้วยพลาสติก แขน 100 cm มุม 90 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{ii}} \times 100 \%$
40	0.94	0.47 %
60	0.83	0.41 %
80	0.74	0.37 %
100	0.76	0.38 %
120	0.71	0.35 %
140	0.63	0.31 %
160	0.74	0.31 %
180	0.60	0.30 %
200	0.56	0.28 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใยหุ้มด้วยพลาสติก แขนง 100 cm มุม 95 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Ii}} \times 100 \%$
40	0.99	0.49 %
60	0.97	0.48 %
80	0.89	0.44 %
100	0.69	0.34 %
120	0.65	0.32 %
140	0.78	0.39 %
160	0.70	0.35 %
180	0.66	0.33 %
200	0.56	0.28 %

ตารางที่ 4.35 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใยหุ้มด้วยพลาสติก แขนง 100 cm มุม 100 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Ii}} \times 100 \%$
40	1.03	0.515 %
60	0.84	0.44 %
80	0.83	0.41 %
100	0.71	0.35 %
120	0.64	0.34 %
140	0.56	0.28 %
160	0.64	0.32 %
180	0.55	0.27 %
200	0.49	0.24 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หุ้มใบด้วยอะลูมิเนียม

ตารางที่ 4.36 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขนง 60 cm มุม 85 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	4.03	2.01 %
60	3.23	1.61 %
80	2.46	1.23 %
100	2.74	1.37 %
120	2.99	1.49 %
140	2.26	1.13 %
160	0.64	0.32 %
180	1.95	0.97 %
200	1.53	0.76 %

ตารางที่ 4.37 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขนง 60 cm มุม 90 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	3.98	1.99 %
60	3.18	1.59 %
80	3.68	1.84 %
100	3.16	1.58 %
120	2.27	1.13 %
140	2.25	1.12 %
160	2.17	1.08 %
180	1.62	0.81 %
200	1.56	0.78 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.38 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 60 cm มุม 95 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	3.92	1.96 %
60	3.22	1.61 %
80	3.11	1.55 %
100	2.41	1.20 %
120	2.36	1.18 %
140	2.70	1.35 %
160	2.23	1.11 %
180	2.21	1.10 %
200	1.76	0.88 %

ตารางที่ 4.39 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 60 cm มุม 100 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	3.75	1.87 %
60	3.67	1.83 %
80	2.73	1.36 %
100	2.49	1.24 %
120	2.38	1.19 %
140	2.43	1.21 %
160	2.27	1.13 %
180	1.95	0.97 %
200	1.92	0.96 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.40 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 100 cm มุม 85 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	1.62	0.81 %
60	1.20	0.60 %
80	1.13	0.56 %
100	0.97	0.48 %
120	0.74	0.39 %
140	0.94	0.47 %
160	0.76	0.38 %
180	0.64	0.32 %
200	0.55	0.27 %

ตารางที่ 4.41 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 100 cm มุม 90 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	1.47	0.73 %
60	1.39	0.64 %
80	0.85	0.42 %
100	0.70	0.35 %
120	0.65	0.32 %
140	0.83	0.41 %
160	0.81	0.40 %
180	0.62	0.31 %
200	0.66	0.33 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.42 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 100 cm มุม 95 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	1.31	0.65 %
60	1.71	0.85 %
80	0.84	0.42 %
100	0.76	0.38 %
120	0.68	0.34 %
140	0.63	0.31 %
160	0.68	0.34 %
180	0.65	0.32 %
200	0.64	0.32 %

ตารางที่ 4.43 วิเคราะห์ประสิทธิภาพ ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม แขน 100 cm มุม 100 องศา

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	1.43	0.71 %
60	1.24	0.62 %
80	0.83	0.41 %
100	0.75	0.37 %
120	0.56	0.28 %
140	0.72	0.36 %
160	0.61	0.36 %
180	0.56	0.28 %
200	0.54	0.27 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หุ้มใบด้วยอะลูมิเนียม ใส่โหลด 10 โอห์ม

ตารางที่ 4.44 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 85 องศา

ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	0.40	0.20 %
60	0.26	0.13 %
80	0.24	0.12 %
100	0.19	0.095 %
120	0.17	0.085 %
140	0.14	0.07 %
160	0.14	0.07 %
180	0.12	0.06 %
200	0.10	0.10 %

ตารางที่ 4.45 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 90 องศา

ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	0.40	0.20 %
60	0.28	0.14 %
80	0.23	0.11 %
100	0.20	0.10 %
120	0.19	0.09 %
140	0.19	0.09 %
160	0.15	0.07 %
180	0.15	0.07 %
200	0.14	0.07 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.46 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 95 องศา
ใส่ไหลลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	0.41	0.20 %
60	0.30	0.15 %
80	0.21	0.10 %
100	0.17	0.08 %
120	0.15	0.07 %
140	0.13	0.06 %
160	0.12	0.06 %
180	0.13	0.06 %
200	0.12	0.06 %

ตารางที่ 4.47 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 60 cm มุม 100 องศา
ใส่ไหลลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{li}} \times 100 \%$
40	0.37	0.18 %
60	0.26	0.13 %
80	0.20	0.10 %
100	0.17	0.08 %
120	0.15	0.07 %
140	0.12	0.06 %
160	0.14	0.07 %
180	0.14	0.07 %
200	0.09	0.04 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.48 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 85 องศา
ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	0.12	0.06 %
60	0.07	0.03 %
80	0.05	0.02 %
100	0.04	0.02 %
120	0.04	0.02 %
140	0.03	0.01 %
160	0.03	0.01 %
180	0.02	0.01 %
200	0.02	0.01 %

ตารางที่ 4.49 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 90 องศา
ใส่โหลด 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{i1}} \times 100 \%$
40	0.13	0.06 %
60	0.08	0.04 %
80	0.06	0.03 %
100	0.06	0.03 %
120	0.04	0.02 %
140	0.04	0.02 %
160	0.02	0.01 %
180	0.02	0.01 %
200	0.02	0.01 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.50 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 95 องศา
ใส่ไหลค 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Ii}} \times 100 \%$
40	0.14	0.07 %
60	0.08	0.04 %
80	0.07	0.03 %
100	0.05	0.02 %
120	0.05	0.02 %
140	0.04	0.02 %
160	0.04	0.02 %
180	0.03	0.01 %
200	0.03	0.01 %

ตารางที่ 4.51 วิเคราะห์ประสิทธิภาพใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแกน 100 cm มุม 100 องศา
ใส่ไหลค 10 โอห์ม

ระยะห่างแหล่งกำเนิดลม (cm)	P_o	$\eta = \frac{P_o}{P_{Ii}} \times 100 \%$
40	0.12	0.06 %
60	0.08	0.04 %
80	0.05	0.02 %
100	0.04	0.02 %
120	0.04	0.02 %
140	0.03	0.01 %
160	0.02	0.01 %
180	0.02	0.01 %
200	0.01	0.005 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงกล และทางไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้ง พบว่าการทดสอบประสิทธิภาพเป็นไปตามที่คาดหวัง โดยสามารถนำกังหันลมไปผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งได้มีการนำ Output มาผ่านวงจรเรียงกระแสก่อนจากเดิมที่เป็นกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่ากังหันลมในแนวแกนตั้งขนาดเล็กนั้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จริง

5.1 โครงใบพัด

ลักษณะของ โครงใบพัดนั้นเป็น โครงที่ทำด้วยอะลูมิเนียมเส้นสี่เหลี่ยมซึ่งนำมาประกอบกันเป็น โครงใบพัด และยึดด้วยการยิงรีเวต โดยภาพรวมแล้ว โครงค่อนข้างแข็งแรงดีเมื่อเทียบกับการหุ้มใบด้วยพลาสติกและอะลูมิเนียมพบว่า การหุ้มด้วยอะลูมิเนียมนั้นจะทำให้โครงใบพัดมีความแข็งแรงกว่าพลาสติก เพราะว่าอะลูมิเนียมมีความเป็นรูปทรงที่ดีกว่า



รูปที่ 5.1 โครงใบพัดกังหันลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ตัวยึดระหว่างใบพัดกังหันลมกับแกนส่งกำลังหลัก

ตัวยึดนั้นทำด้วยเหล็กฉาก 2 ชั้น ประกอบเพื่อยึดเข้ากับแกนส่งกำลังหลักและอีกด้านของเหล็กฉากจะประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมของโครงใบพัดกังหันลม ซึ่งจะยึดเข้ากันด้วยน็อต 4 ตัว ด้านบน 2 ตัว ล่าง 2 ตัว ซึ่งเมื่อทำการยึดแล้วมีลักษณะค่อนข้างแข็งแรงดี แต่ถ้าทำการยึดตัวล็อกแน่นเสียเกินไป อาจทำให้แกนหลักของโครงใบพัดกังหันลมงอได้ เพราะแกนหลักของโครงใบพัดทำด้วยอะลูมิเนียมกลมกลวง



รูปที่ 5.2 ข้อต่อใบพัดกับแกนส่งกำลัง

5.3 แกนส่งกำลังหลัก

แกนส่งกำลังหลักทำด้วยกัน 2 ความยาว คือ 60 cm 100 cm ซึ่งเมื่อเทียบดูแล้วว่าแกนส่งกำลังหลักที่มีความยาว 60 cm มีความแข็งแรงมากกว่าแกนส่งกำลังหลัก 100 cm เนื่องจากเมื่อนำใบพัดกังหันลมมาใส่กับแกนส่งกำลังหลักแล้ว ที่แกน 100 cm จะมีการงอตามแรงโน้มถ่วงโลก เล็กน้อย เนื่องจากใบพัดกังหันลมนั้นมีน้ำหนัก แต่ขณะใบพัดเริ่มทำงานก็ไม่พบปัญหา



รูปที่ 5.3 แกน 100 cm เกิดการงอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ

ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงนอกราย และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 แผ่นงานล๊อคแขนส่งกำลังหลักกับเพลาส่งกำลังหลัก

มีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กหนาประมาณ 4 mm ตัดเป็นรูปแบบที่ต้องการ และเจาะรูเพื่อยึดน๊อต ซึ่งแผ่นงานล๊อคนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แผ่น ซึ่งประกบกันบน-ล่าง กับแขนส่งกำลังหลักซึ่งแผ่นงานล๊อคนี้เมื่อนำไปใช้จริงแล้ว สามารถที่จะยึดแขนส่งกำลังหลักกับเพลาส่งกำลังหลักเข้าด้วยกันเป็นอย่างดีและแข็งแรง ตัวแผ่นงานล๊อคนี้เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญ เนื่องจาก ถ้าขาดชิ้นส่วนนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 5.4 แผ่นงานเหล็กล๊อค

5.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เป็นส่วนที่ผลิตกระแสไฟฟ้าออกมา ซึ่งตัวเครื่องนี้ค่อนข้างฝืดจึงได้มีการแก้ไขเบื้องต้น โดย มีการฉีดน้ำมันหล่อลื่นที่บริเวณแบร์ริง (ลูกปืน) พบว่าหลังจากการแก้ปัญหาเบื้องต้นแล้ว ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถหมุนได้ดีขึ้นกว่าเดิม

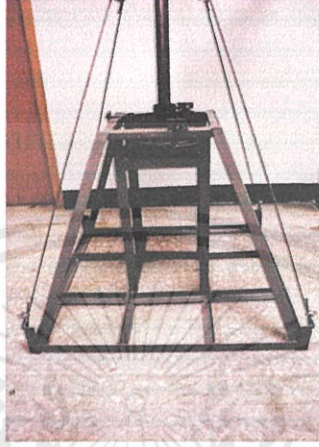


รูปที่ 5.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 ฐานรองรับ

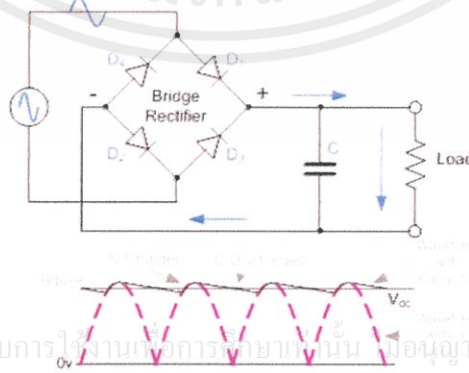
ฐานรองรับเป็นส่วนที่ทำการตัดเหล็กจากมาเชื่อมติดกัน ซึ่งเมื่อทำการเชื่อมแล้วโครงสร้างฐานค่อนข้างมีความแข็งแรงมาก และได้ทำการพ่นสีฐานเนื่องจากในเรื่องการป้องกันสนิม และเรื่องความสวยงาม



รูปที่ 5.6 ฐานรองรับ

5.7 วงจรเรียงกระแส

วงจรเรียงกระแส นั้น ได้นำไดโอด 4 ตัวมาเรียงกันต่อแบบบริดจ์ และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบขนาน ซึ่งจะได้อไฟกระแสตรงออกมา ในการใช้ตัวเก็บประจุนั้นเพราะมันจะช่วยกรองกรองกระแสให้เรียบขึ้น การทำวงจรเรียงกระแส เพื่อจะพิสูจน์ว่ากักเก็บพลังงานสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้จริงคือเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นผลิตเป็น AC ออกมา ผ่านวงจรเรียงกระแส เป็น DC และเข้าหลอดไฟ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น เป็นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อที่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.7 วงจรทำกระแสตรงแบบบริดจ์เชิงทฤษฎี



รูปที่ 5.8 วงจรทำกระแสตรงแบบบริดจ์ที่ใช้งานจริง

วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมในแนวแกนตั้งขนาดเล็กพบว่า ประสิทธิภาพมีค่าที่น้อยมาก มีค่าในช่วงไม่เกิน 2% แต่หลักในการทำโครงการพิเศษนี้คือการเน้นการออกแบบในส่วนของใบพัด โดยการออกแบบนั้น เราต้องออกแบบใบพัดกังหันลมในส่วน of พื้นที่รับลม ซึ่งกำหนดจากการคำนวณด้วยกำลังสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดลมที่ใช้ทดสอบ เพื่อออกแบบแขนส่งกำลังหลักให้มีความเหมาะสมจากสมการ
$$c_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} P_{max}$$
 นั้นได้

จากสเปคเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้กำลังมากที่สุดที่ 200 วัตต์ และได้ทำการทดสอบย้อนกลับเพื่อหาค่า c_p จากทฤษฎีที่กล่าวว่าพลังงานลมสามารถเปลี่ยนมาเป็นพลังงานกลโดยกังหันลมได้ดีที่สุดคือ 1/3 หรือ 0.593 ซึ่งเมื่อทำการทดสอบกับกังหันลมที่ทำการออกแบบไว้ ทำให้ทราบค่า c_p ที่มีความเหมาะสมตามทฤษฎี ที่ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ได้ค่า $c_p = 4.6 , 0.54 , 0.50 , 0.46$ ตามลำดับ ที่ใบหุ้มด้วยพลาสติก รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ได้ค่า $c_p = 0.55 , 0.55 , 0.36 , 0.44$ ตามลำดับ ที่ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 60 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ได้ค่า $c_p = 0.46 , 0.46 , 0.46 , 0.46$ ตามลำดับ ที่ใบหุ้มด้วยอะลูมิเนียม รัศมีแกนใบพัด 100 cm มุม 85 , 90 , 95 , 100 องศา ได้ค่า $c_p = 0.55 , 0.55 , 0.55 , 0.55$ ตามลำดับ และรวมทั้งในปัจจัยหลายประการ เช่น การออกแบบฐานรองรับ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะฉีดยาพิษอื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ส่วนนี้เป็นส่วนที่รับน้ำหนักทั้งหมด หัวใจหลักๆ คือ เรามิเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามา 1 เครื่อง แล้วต้องนำมาทำอย่างไรให้เป็นกังหันลม โดยใช้ความรู้จากทฤษฎีที่เราศึกษามาประยุกต์ และถ้าเราต้องการ

ที่จะให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมามากๆเราควรมีการปรับแต่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เช่นการใส่เฟืองทดรอบ , การเปลี่ยนแบร์ริง (ลูกปืน) , การเพิ่มรอบของขดลวดทองแดง และการหาแม่เหล็กที่มีคุณภาพดี ๆ

ข้อเสนอแนะ

- 1) เพื่อให้ได้กำลังการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ขึ้นอยู่กับการออกแบบส่วนใบพัดกังหันลม Generator และ ความเร็วของลม
- 2) การตั้งกังหันลมควรตั้งในบริเวณ ที่โล่งลมพัดผ่านได้ดีไม่มีอะไรกีดขวางเส้นทางลม และถ้าอยู่ในเมืองควรตั้งไว้ที่สูง เช่น บริเวณคาบฟ้าของตึก เพราะความเร็วลมที่แต่ละความสูงแตกต่างกัน
- 3) ถ้าสามารถปรับแต่งให้ Generator มีความเหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลมาเป็นพลังงานไฟฟ้าให้ได้ดีขึ้น ก็ความสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ดีกว่าเดิม
- 4) ถ้าต้องการให้สามารถใช้ได้ดีกับเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปนั้น เราควรมีวงจรเรียงกระแสที่ดีคือ แปลงจาก AC มาเป็น DC เก็บไว้ที่แบตเตอรี่ แล้วเมื่อถ้าต้องการใช้ไฟฟ้าก็ต้องมีวงจรแปลงจาก DC เป็น AC อีกครั้งหนึ่ง
- 5) เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นค่อนข้างที่จะหมุนฝืดมาก ซึ่งถ้าเราต้องการที่จะเปลี่ยนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำมาเป็นพลังงานลมนั้น เราต้องแก้ปัญหการหมุนที่ฝืดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน.

(สิงหาคม 2549). การศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง. สงขลา : คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวง

พลังงาน. โครงการศึกษา วิจัยพัฒนา สาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ความเร็วลมต่ำ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

กรมพลังงานทดแทนอนุรักษ์พลังงาน. (2546ก). พลังงานลม [ออนไลน์]. แหล่งที่มา

http://www.dede.go.th/dede/renew/wind_p.htm.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน). (พฤศจิกายน

2544). แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย. เช่น ทรัลการพิมพ์.

จารุวรรณ ตั้งคั่นสกุลวงศ์ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. ความสามารถในการเริ่มต้นหมุนด้วยตนเองของ

กังหันลมแกนตั้ง Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines. ครั้งที่ 47

พฤศจิกายน 2552. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีสุรนารี. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย.

จังหวัดเชียงใหม่.

วิศวกรรมสาร. (2553) เทคโนโลยีจากอดีตสู่ปัจจุบันและอนาคต. ปีที่ 63 ฉบับที่ 1 มกราคม-

กุมภาพันธ์ 2553. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กทม.

พรเทพ สุรมาตย์ และ ปรีชา เกรียงกรกฎ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองแผนอากาศใน

กังหันลมเพลาตั้ง ชนิด Lenz II ในอุโมงค์ลมจำลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง. วิจัย

ครั้งที่ 6 | 25-27 กรกฎาคม 2555. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์. (2548). เทคโนโลยีพลังงานลม. วิทยาลัยพลังงาน

ทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร.

จารุวรรณ ตั้งคั่นสกุลวงศ์ และ ทวิช จิตรสมบูรณ์. (2552). ความสามารถในการเริ่มต้นหมุนด้วย

ตนเองของกังหันลมแกนตั้ง. (การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย

ครั้งที่ 23 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงในสื่อฯ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการเริ่มต้นหมุนด้วยตนเองของกังหันลมแกนตั้ง

Self-Starting Capability of Vertical Axis Wind Turbines

จากรวรรณ ตั้งตันสกุลวงศ์^{1*} และ ทวีช จิตรสมบุญ^{2#}

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
*jacksut@hotmail.com, #tabon@sut.ac.th, 0-4422-4410

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์กังหันลมแกนตั้งสองประเภทคือกังหันแบบใบตั้งตรงและแบบใบบิดเกลียวในประเด็นของความสามารถในการเริ่มต้นหมุน โดยพิจารณาผลกระทบจากจำนวนใบกังหันร่วมด้วย การวิเคราะห์ทำโดยหาความสัมพันธ์ของทิศทางความเร็วลมกับตำแหน่งของใบกังหัน และเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับแรงต้านจากข้อมูลการทดลองหลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาแรงบิดเริ่มต้น ผลจากการวิเคราะห์กังหันใบตั้งตรงใบเดียวแสดงให้เห็นชัดเจนว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสของกังหันใบเดียวมีค่าน้อยที่บางมุม (Azimuth angle) และมีค่าเป็นลบที่มุมหันประมาณ 15° ถึง 50° และ 310° ถึง 345° การเพิ่มจำนวนใบกังหันมากขึ้นสามารถทำให้กังหันมีแรงบิดเริ่มต้นสูงขึ้นหรือศักยภาพในการเริ่มหมุนดีขึ้น รวมถึงมีค่าสม่ำเสมอมากขึ้นในแต่ละมุมหัน ส่วนกังหันแบบใบบิดเกลียวให้ค่าแรงบิดเริ่มต้นคงที่เท่ากับค่าเฉลี่ยของกังหันใบตรง โดยไม่มีค่าใดเป็นลบเลย จากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่ากังหันแบบใบบิดเกลียวอาจสามารถใช้แก้ปัญหาการไม่เริ่มต้นหมุนและแรงบิดที่ไม่สม่ำเสมอในขณะทำงานของกังหันแกนตั้งได้

คำหลัก: การเริ่มต้นหมุนของกังหันลมแกนตั้ง, กังหันลมแกนตั้ง, กังหันลมแกนตั้งแบบใบบิดเกลียว,

Abstract

This paper compares two vertical axis wind turbines, straight vertical blade and single helical blade types with respect to their self-starting capabilities. The effects of the number of blades are also included. Analyses are pursued by seeking the relation between the angle of attack of wind velocity and blade azimuth angle. Aerodynamics force coefficients are then obtained from experimental data and the starting torque can be calculated. The results indicate that the tangential force coefficients of a single vertical blade rotor are low in some regions and become negative in the ranges 13° to 35° and 325° to 347° of azimuth angles. Increase in blade numbers results in higher and smoother tangential force coefficients and starting torques. For the helical blade rotor, its starting torque equals to the average value of the vertical one and remains constant at all azimuth angles. This indicates that the helical blade might be able to overcome the starting problem and the problem of torque ripple in the vertical axis wind turbine.

Keywords: Self-Starting Capability; VAWT; Vertical axis wind turbine; Helical blade VAWT

1. ที่มาและความสำคัญ

กังหันลมแกนตั้งมีข้อดีที่น่าสนใจหลายประการ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและชุดเฟืองทดสามารถติดตั้งที่พื้นได้ และสามารถรับลมได้ทุกทิศทางทำให้ไม่ต้องใช้เครื่องมือหันกังหันเข้าหาลม ส่วนข้อเสียที่ชัดเจนได้แก่ แรงบิด มีค่าแปรปรวนตลอดมุมหันที่หมุนไป และที่สำคัญคือกังหันแกนตั้งมีความสามารถในการเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเองต่ำ ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน และเป็นส่วนหนึ่งที่ส่งผลให้กังหันแกนตั้งได้รับความนิยมต่ำอีกด้วย

“การเริ่มต้นหมุนด้วยตนเอง” (Self starting) หมายถึงการเริ่มต้นหมุนของกังหันจากหยุดนิ่งจนสามารถสกัดพลังงานจากลมได้ (Ebert และ Wood [1] และ Kirke [2]) นอกจากนี้ Lunt [3] กำหนดว่าหมายถึงการที่กังหันสามารถเร่งตัวเองจากสภาพหยุดนิ่งจนกระทั่งค่าอัตราส่วนความเร็วปลายปีกของกังหัน (Tip speed ratio; TSR) มีค่าเท่ากับ 1

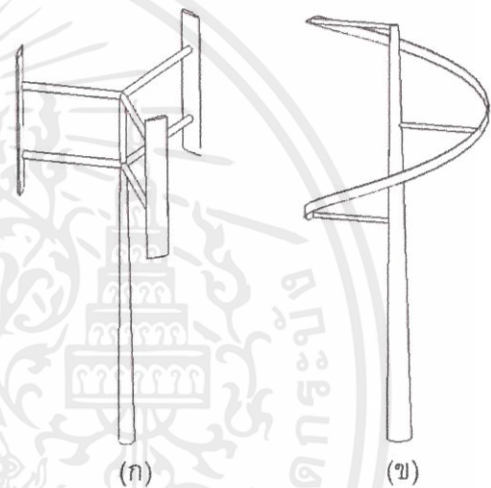
ปัญหาการไม่เริ่มหมุนของกังหันแกนตั้งมีความสำคัญในกรณีที่เป็นกังหันแกนตั้งขนาดเล็กที่ถูกติดตั้งใช้งานในชนบทที่ห่างไกล ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าหรือพลังงานอย่างอื่นมาช่วยหมุนกังหันในช่วงเริ่มต้นทำได้ลำบาก นักวิจัยจำนวนมากจึงพยายามแก้ปัญหาการไม่เริ่มหมุนดังกล่าวด้วยวิธีที่ต่างกันอย่างออกไป เช่น การใช้ใบกังหันแบบปรับมุมได้

(Variable pitch blade) (Kirke [2], Baker [4], Cooper [5], และ Pawsey [5]) แต่วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากกลไกที่ยุ่งยากซับซ้อนทำให้เพิ่มต้นทุนในการผลิตมากขึ้น อีกวิธีหนึ่งคือการผนวกกังหันแบบ Darrieus กับ Savonius เข้าด้วยกัน (Wakui [6], Gupta [7]) วิธีนี้ทำให้กังหันเริ่มหมุนได้ แต่ประสิทธิภาพลดลงเป็นอย่างมาก รวมถึงจุดทำงานของกังหันต่ำมาก ไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ในปี ค.ศ. 1995 Gorlov [8]

วิศวกรชาวอเมริกา ได้ออกแบบกังหันน้ำแบบใบคู่บิดเกลียวในแนวนอนซึ่งพบว่ากังหันสามารถเริ่มหมุนได้เอง และให้แรงบิดที่ราบเรียบ จากนั้นในปี ค.ศ.

2001 Van Bussel และคณะ [9] ได้ออกแบบกังหันลมขนาดเล็กแบบ 3 ใบที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันคือมีใบที่

บิดเกลียว กังหันดังกล่าวสามารถเริ่มต้นหมุนได้ อย่างไรก็ตามสาเหตุการสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตนเองของกังหันใบบิดเกลียวยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัด ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ศักยภาพการเริ่มต้นหมุนด้วยตนเองของกังหัน โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันแบบดั้งเดิม (คือแบบใบตั้งตรง) เปรียบเทียบกับแบบใบบิดเกลียว 360 องศาเพียงใบเดียว ซึ่งกังหันแบบนี้เป็นกังหันที่คิดค้นขึ้นใหม่ในการวิจัยนี้ (ต่างจากของ Gorlov ที่มีใบคู่) ลักษณะของกังหันทั้งสองดังรูปที่ 1



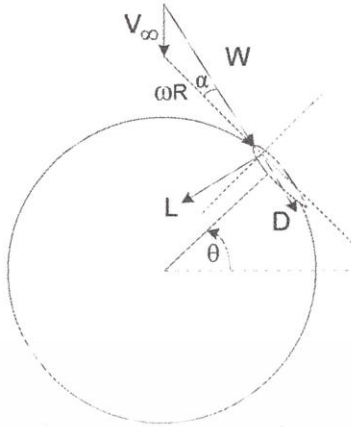
รูปที่ 1 กังหันแกนตั้ง 2 แบบ (ก) แบบใบตั้งตรง และ (ข) แบบใบบิดเกลียว 360 องศา

การบิดเป็นวงรอบ 360 องศาเชื่อว่าจะทำให้กังหันสามารถเริ่มหมุนได้ด้วยตนเอง แรงบิดมีความเรียบสม่ำเสมอตลอดมุมหัน การสูญเสียที่ปลายปีกมีค่าน้อยกว่าปกติ และลดผลกระทบของคลื่นสะบัดท้าย (wake) ซึ่งน่าจะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันเพิ่มขึ้นกว่ากังหันแบบใบตรงที่ถือเป็นกังหันแกนตั้งมาตรฐานในปัจจุบันนี้

2. ศักยภาพการเริ่มต้นหมุนของกังหันแกนตั้ง

เริ่มต้นด้วยการหามุมปะทะของความเร็วลมสัมพันธ์กับคอร์ดของใบกังหันโดยใช้หลักการทางเรขาคณิตดังรูปที่ 2

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของ ME-NETT23 และสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เชิงพาณิชย์หรือเพื่อการอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก ME-NETT23



รูปที่ 2 มุมปะทะและแรงที่กระทำกับหน้าตัดใบกังหันลมแกนตั้ง

เมื่อ V_∞ คือความเร็วลมที่เข้าสู่กังหัน จากระยะไกล ωR คือความเร็วเชิงเส้นของใบกังหัน W คือความเร็วสัมพัทธ์ α คือมุมปะทะ (angle of attack) หรือมุมที่ความเร็วสัมพัทธ์กระทำกับเส้นคอร์ด (chord) ในกรณีอุดมคติที่ไม่คำนึงถึงการขยายตัวของกาไหล อันเนื่องจากการดูดซับพลังงานของกังหัน จะได้ว่า ความสัมพันธ์ของมุมปะทะ (α) และความเร็วสัมพัทธ์ (W) นั้นสัมพันธ์กับมุมหัน (θ) ดังนี้

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\cos \theta}{\sin \theta + TSR} \quad (2)$$

$$W = V_\infty \left(\frac{TSR + \cos \theta}{\cos \alpha} \right) \quad (3)$$

เมื่อ TSR คือ อัตราส่วนความเร็วปลายปีก (tip speed ratio) ซึ่งนิยามโดย

$$TSR = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (1)$$

จะเห็นว่าถ้ากังหันหยุดนิ่ง ความเร็วสัมพัทธ์จะเท่ากับความเร็วลมที่วิ่งเข้าสู่กังหันนั่นเอง แรงยก (Lift force, L) และแรงต้าน (Drag force, D) สามารถหาได้ดังนี้

$$C_L = \frac{L}{0.5 \rho W^2 c} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{D}{0.5 \rho W^2 c} \quad (5)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) และสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) หาได้จากข้อมูลแผนอากาศที่มีการทดสอบไว้แล้ว ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวมีค่าแตกต่างกันตามคุณลักษณะของแผนอากาศ (airfoil) สำหรับแผน

อากาศที่นิยมใช้ทำใบกังหันแกนตั้ง คือแผนอากาศแบบสมมาตรเบอร์ NACA-00xx ซึ่ง xx คือตัวเลขบ่งบอกความหนาต่อความยาวคอร์ด ซึ่งควรมี

ค่าประมาณ 12-21

เมื่อแตกเวกเตอร์ทั้งสองให้อยู่ในทิศสัมผัสและตั้งฉากกับเส้นรอบวงกังหันจะได้

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (6)$$

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (7)$$

ซึ่งทำให้สามารถหาสัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสสัมผัสและในแนวตั้งฉากดังสมการต่อไปนี้

$$F_t = \frac{f_t}{0.5 \rho V_\infty^2 c} = C_t \left(\frac{W}{V_\infty} \right)^2 \quad (8)$$

$$F_n = \frac{f_n}{0.5 \rho V_\infty^2 c} = C_n \left(\frac{W}{V_\infty} \right)^2 \quad (9)$$

F_t เป็นตัวบ่งชี้แรงบิดที่กระทำต่อกังหัน ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการหมุนของกังหัน ส่วน F_n เป็นตัวชี้วัดแรงกระทำต่อแกนกังหัน หาก F_n มีค่าแกว่งมากอาจทำให้เกิดการเสียหายเนื่องจากความล้าได้ สุดท้ายแรงบิดของกังหันแกนตั้งที่มุมหันต่างๆ สามารถหาได้จาก

$$T = f_t h R \quad (10)$$

เมื่อ R คือรัศมีของกังหัน และ h คือความยาวใบกังหัน ในกรณีที่กังหันมีหลายใบ แรงบิดรวมหาจากการรวมแรงบิดของกังหันแต่ละใบ ส่วนกรณีกังหันแบบใบบิดเกลียวใบเดียว 360 องศาแรงบิดสามารถหาได้จากสมการ

$$T = \frac{h R^2 \pi}{2 \pi} \int_0^{2\pi} f_t d\theta \quad (11)$$

การเปรียบเทียบแรงบิดในบทความนี้จะเปรียบเทียบระหว่างกังหันแบบใบตั้งตรงกับแบบใบบิดที่มีความตัน (solidity) เท่ากันโดยความตันมีนิยามดังนี้

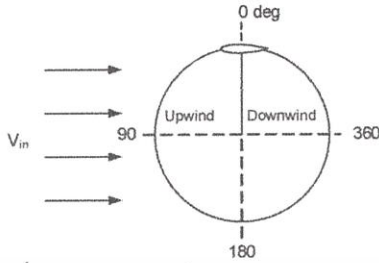
$$\sigma = \frac{Nc}{R} \quad (12)$$

เมื่อ N คือจำนวนใบกังหัน

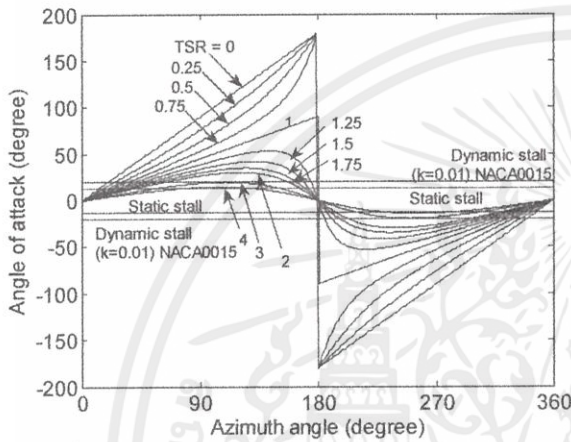
3. ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

เมื่อกำหนดตำแหน่งมุมหันและทิศทางลมที่เข้าสู่กังหันดังรูปที่ 3 สามารถใช้สมการในหัวข้อที่แล้ว

คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับมุมหัน ที่ TSR ต่าง ๆ และแสดงผลเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4

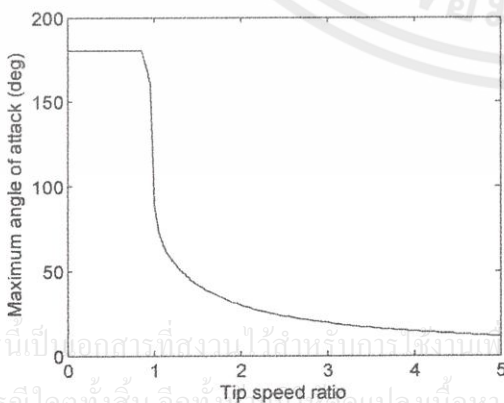


รูปที่ 3 ทิศทางมุมหันและทิศทางลมเข้า



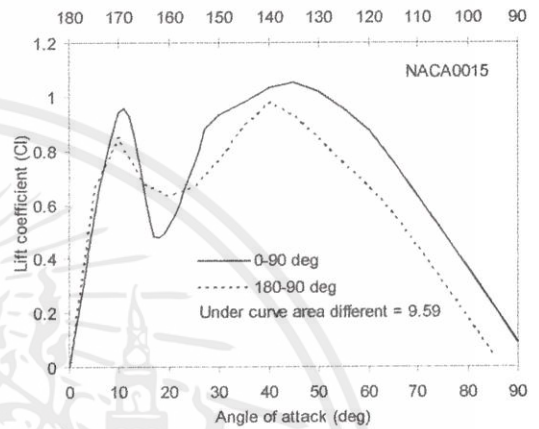
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะกับมุมหัน

ซึ่งจะเห็นว่าหากกังหันทำงานที่ TSR ต่ำกว่า 1 มุมปะทะจะแปรค่าจาก 0° ไปจนถึง 180° ที่ด้านต้นลม (upwind) และจาก -180° จนถึง 0° ที่ด้านปลายลม (downwind) เมื่อ TSR สูงขึ้น ช่วงของมุมปะทะในแต่ละรอบการหมุนจะแคบลง รูปที่ 5 แสดงมุมปะทะสูงสุดที่ TSR ต่าง ๆ



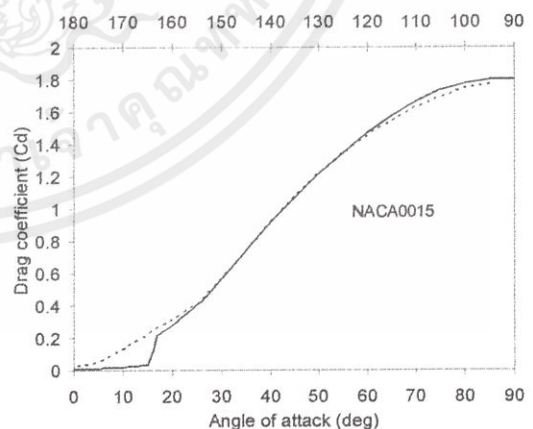
รูปที่ 5 มุมปะทะสูงสุดเป็นฟังก์ชันของ TSR

ในกรณีที่ TSR มีค่าต่ำกว่า 1 มุมปะทะสูงสุดคือ 180° ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของมุมปะทะจะต้องผ่านมุมป้อ (Stall angle) ซึ่งเป็นมุมวิกฤตที่จะเกิดปรากฏการณ์แรงยกลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่แรงดันเพิ่มสูงขึ้น รูปที่ 6 และ 7 แสดงสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านของแพนอากาศ NACA0015



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์แรงยกของ NACA 0015

ซึ่งพฤติกรรมการป้อ (Stall) นี้เป็นอุปสรรคต่อการหมุนของกังหัน สำหรับแพนอากาศแบบสมมาตรในตระกูล NACA 00XX เกิดการป้อ (Stall) ที่มุมปะทะประมาณ $12^\circ - 15^\circ$ หลังจากนั้นแรงยกจะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แต่แรงดันจะเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



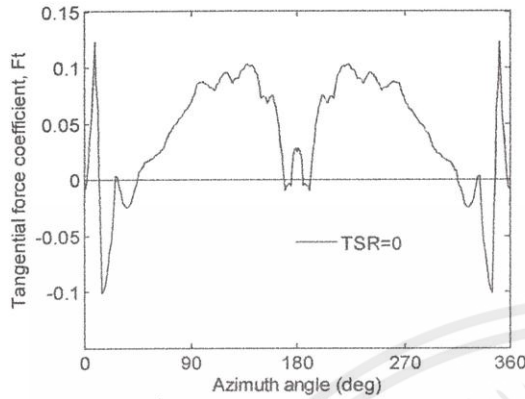
รูปที่ 7 สัมประสิทธิ์แรงต้านของ NACA 0015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

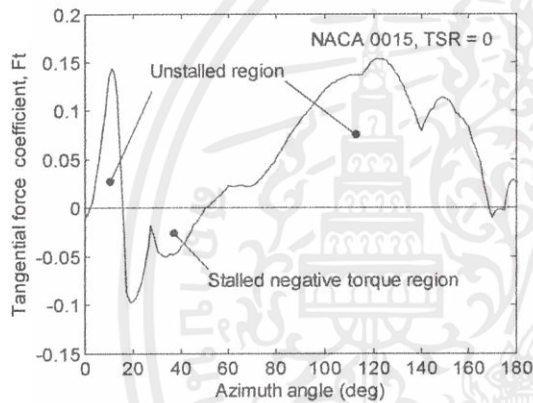
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งที่เผยแพร่โดยไม่ขอเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิง เมื่อทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนว

สัมผัสของกังหันใบเดียวที่มีความยาวคอร์ด 0.5 เมตร

ในสองมิติที่ค่า TSR = 0 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 8 โดยส่วนขยายในช่วงที่สัมประสิทธิ์มีค่าเป็นลบแสดงในรูปที่ 9



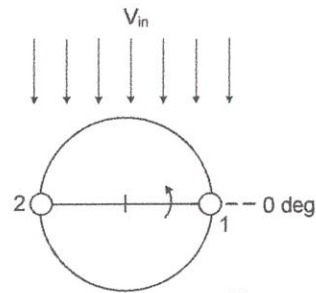
รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัส



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์แรงในแนวสัมผัสที่มุมหัน 0°-180°

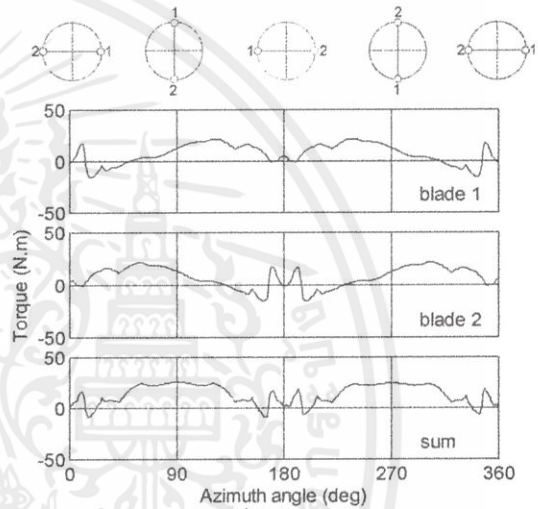
จากรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นว่าบริเวณที่ค่าแรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าเป็นลบอยู่ในช่วงมุมหันประมาณ 15°-50 องศา ซึ่งมุมหันในช่วงดังกล่าวให้มุมปะทะที่ทำให้เกิดการป้อ (Stall) ค่าแรงยกจึงต่ำและแรงต้านสูง ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นลบดังกล่าวนี้เป็นอุปสรรคต่อการเริ่มต้นหมุนของกังหัน

เมื่อพิจารณากรณีกังหันใบตั้งตรง 2 ใบ โดยแต่ละใบกังหันมีความยาวคอรีด 0.5 เมตร หน้าตัดใบกังหันคือ NACA 0015 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกังหันเป็น 3 เมตร ความยาวของใบกังหัน 6 เมตรความเร็วลมที่เข้าสู่กังหันเป็น 8 เมตร/วินาที และ TSR = 0 โดยทิศทางลมที่เข้าสู่กังหันและตำแหน่งมุมหันเป็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงทิศทางลมที่วิ่งเข้าสู่กังหัน

ผลการคำนวณแรงบิดเริ่มต้นจากใบกังหันทั้งสองใบที่มุมหันต่างๆ แสดงในรูปที่ 11

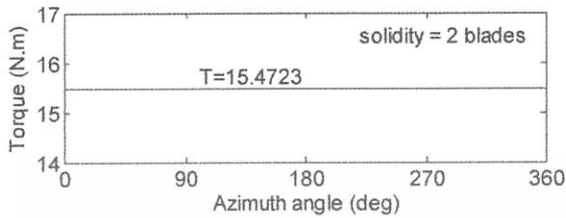


รูปที่ 11 แรงบิดเริ่มต้นของกังหัน 2 ใบ

ซึ่งพบว่าการใช้ใบกังหันเพิ่มขึ้นจากหนึ่งเป็นสองใบทำให้ช่วงมุมหันที่ใบกังหันมีค่าแรงบิดเป็นค่าลบ (จากเดิม 15° ถึง 50° และ 310° ถึง 345°) มีช่วงที่แคบลง โดยแต่ละช่วงครอบคลุมมุมหันเพียงแค่ว่าประมาณ 10° มีและจำนวนทั้งสิ้น 4 ช่วง และถึงแม้ว่าช่วงมุมหันที่ทำให้แรงบิดเป็นลบมีช่วงที่ลดลงมาก แต่ก็ไม่ได้หมดไป ซึ่งหมายความว่ากังหันแบบใบตั้งตรงสองใบไม่สามารถแก้ปัญหาการไม่เริ่มต้นหมุนด้วยตนเองได้อย่างแท้จริง กังหันอาจเริ่มขยับตัวเล็กน้อยในกรณีที่ใบกังหันวางตัวอยู่ในมุมหันที่มีแรงบิดเริ่มต้นเป็นบวกเท่านั้น แต่เมื่อใบกังหันกวาดผ่านมุมหันที่ให้ค่าแรงบิดเป็นลบก็จะเกิดการหน่วงให้กังหันกลับมาหยุดได้อีก หรือไม่สามารถเร่งตัวให้ความเร็วรอบสูงขึ้นได้

จากนี้จะพิจารณากังหันแบบใบบิดเกลียวที่ค่าความตัน (Solidity) เดียวกันกับกังหันสองใบตั้งตรงข้างต้น ผลลัพธ์

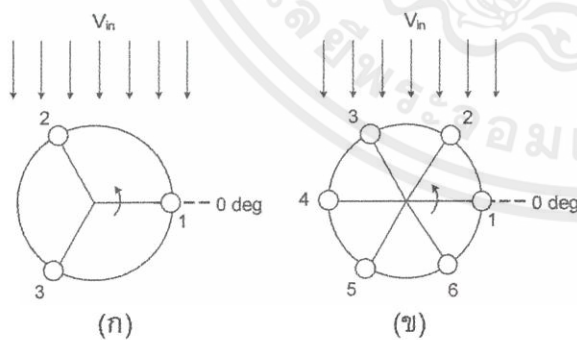
แสดงในรูปที่ 2 พบว่ากังหันแบบใบพัดเกลียวให้ค่าแรงบิดเริ่มต้นคงที่ทุกมุมหัน เท่ากับ 15.4723 N.m ค่าดังกล่าวนี้เท่ากับค่าแรงบิดเฉลี่ยของกังหันใบ



รูปที่ 12 แรงบิดของกังหันแบบใบพัดเกลียวที่มีความตัน (Solidity) เท่ากับกังหันแบบใบตั้งฉาก

การที่แรงบิดเริ่มต้นของกังหันแบบใบพัดเกลียวมีค่าคงที่ เช่นนี้เกิดเนื่องจากกังหันมีหน้าตัดที่รับลมอยู่ในทุกมุมหัน ดังนั้นถึงแม้จะมีบางช่วงมุมหันที่ใบพัดมีค่าแรงบิดเริ่มต้นน้อย แต่ก็จะมีบางช่วงมุมหันที่มีค่ามาก ทำให้กังหันอาจสามารถเริ่มต้นหมุนได้เอง และมีแนวโน้มว่าจะให้ค่าแรงบิดที่ราบเรียบขึ้น

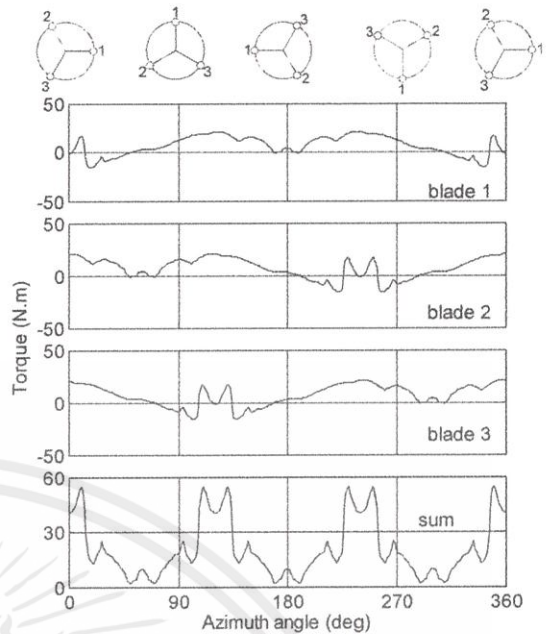
จากผลการวิเคราะห์กังหันสองใบ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่าความตัน (Solidity) โดยให้มีจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มว่าจะอาจทำให้กังหันสามารถเริ่มต้นหมุนเองได้ก็พิจารณาถึงกังหันแบบใบตั้งฉาก 3 ใบ และ 6 ใบ ซึ่งมีขนาดกังหันเท่ากับกังหันสองใบก่อนหน้านี้ แต่มีจำนวนใบที่เพิ่มขึ้น โดยมีทิศทางลมเข้าและทิศของมุมหันดังรูปที่



รูปที่ 13 ทิศทางลมเข้าและทิศของมุมหันของกังหัน (ก) กังหันใบตรง 3 ใบ (ข) กังหันใบตรง 6 ใบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ใบอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

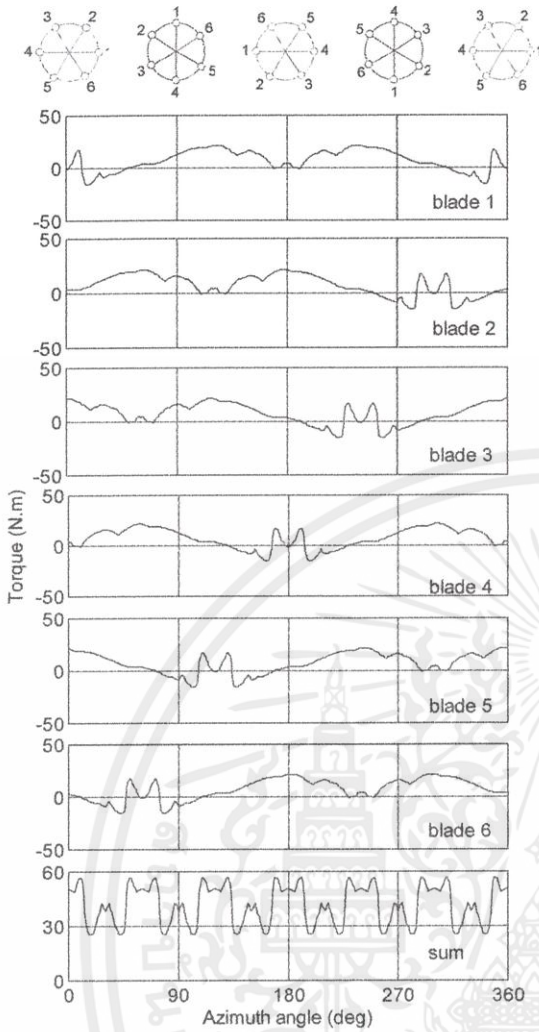
แรงบิดเริ่มต้นที่ได้จากการรวมแรงบิดเริ่มต้นของกังหัน 3 ใบ และ 6 ใบ เป็นดังรูปที่ 14 และ รูปที่ 15



รูปที่ 14 แรงบิดเริ่มต้นของกังหัน 3 ใบ

จะเห็นว่าการเพิ่มจำนวนใบพัดทำให้กังหันมีศักยภาพการเริ่มต้นหมุนที่ดีขึ้น นั่นคือมีแรงบิดเริ่มต้นที่ดีขึ้น โดยทั้งสองไม่มีค่าแรงบิดเป็นลบในช่วงมุมหันใดเลย อย่างไรก็ตามค่าแรงบิดเริ่มต้นของกังหันแบบ 3 ใบยังมีบางช่วงของมุมหันที่ให้ค่าแรงบิดเริ่มต้นต่ำ ซึ่งมีอยู่ทั้งสิ้น 3 ช่วง (ที่ 50, 180, 310 องศา) ซึ่งเป็นช่วงที่ค่อนข้างกว้าง ส่วนช่วงที่มีค่าแรงบิดเริ่มต้นสูงนั้นแคบกว่าช่วงที่มีแรงบิดต่ำ ในช่วงดังกล่าวหากค่าแรงบิดเริ่มต้นต่ำเกินกว่าที่จะเอาชนะแรงเสียดทานของแบริ่งอาจทำให้กังหันไม่สามารถเริ่มต้นหมุนได้ จึงไม่น่าแปลกใจว่าเหตุใดกังหันแกนตั้งแบบ 3 ใบทั่วไปจึงไม่สามารถเริ่มต้นหมุนด้วยตัวเองได้ทุกครั้ง

ส่วนกังหันแบบ 6 ใบ แม้ว่าแรงบิดเริ่มต้นที่ได้ค่อนข้างสูง (ดังในรูปที่ 15) และสามารถแก้ปัญหาแรงบิดที่ต่ำมากในบางช่วงของกังหัน 3 ใบได้ โดยแรงบิด มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 25 ถึง 55 N.m ในขณะที่กังหัน 3 ใบแรงบิดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 55 N.m แต่จำนวนใบที่มากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองวัสดุและน้ำหนักมาก ฐานรากจึงต้องแข็งแรงตามไปด้วย ทำให้ต้นทุนสูง

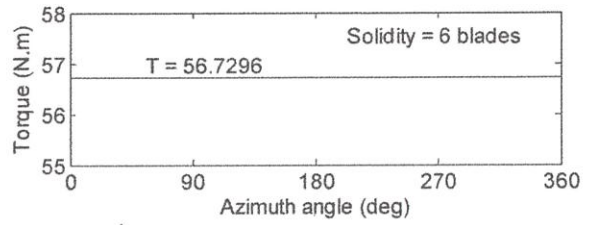


รูปที่ 15 แรงบิดเริ่มต้นของกังหัน 6 ใบ

ในขณะที่กังหันแบบใบบิดเกลียว มีแรงบิดที่สม่ำเสมอทุกมุมไม่ว่าจะมีค่าความตัน (Solidity) เท่าใด ยิ่งความตัน (Solidity) สูง แรงบิดก็ยิ่งสูงตามไปด้วย โดยค่าแรงบิดเริ่มต้นของกังหันแบบใบบิดเกลียวที่มีความตัน (Solidity) เท่ากับกังหัน 3 ใบ และ 6 ใบ มีค่า 24.69 นิวตันเมตร และ 56.73 นิวตันเมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17



รูปที่ 16 แรงบิดรวมของกังหันใบบิดเกลียวที่มีความตัน (Solidity) เท่ากับกังหัน 3 ใบ



รูปที่ 17 แรงบิดรวมของกังหันใบบิดเกลียวที่มีความตัน (Solidity) เท่ากับกังหัน 6 ใบ

4. สรุป

จากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่ากังหันแกนตั้งแบบใบตรงในแนวตั้งมีศักยภาพในการเริ่มต้นหมุนที่ดีขึ้นหากเพิ่มจำนวนใบกังหันมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่พบในทางปฏิบัติ ในขณะที่กังหันแบบใบบิดเกลียวใบเดียวมีศักยภาพในการเริ่มต้นหมุนที่ดีและคงที่ไม่ว่าใบกังหันจะวางตัวอยู่ในตำแหน่งใด ซึ่งอาจเกิดจากการที่กังหันมีหน้าตัดที่รับลมอยู่ในทุกมุมหัน ถึงแม้ว่าการผลิตใบกังหันใบเกลียวอาจมีความยุ่งยากกว่าการผลิตใบกังหันแบบใบตรงแต่ถ้ามีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้ดีขึ้นการใช้กังหันใบบิดเกลียวอาจเป็นทางเลือกในการแก้ไขปัญหาการไม่เริ่มต้นหมุนของกังหันแกนตั้งได้ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ในบทความนี้เป็นการวิเคราะห์โดยไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากปลายใบ (end effect) จึงถือว่าการวิเคราะห์หยาบ ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงขึ้นอาจวิเคราะห์โดยใช้ CFD ต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สนับสนุนโดยโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว)

7. เอกสารอ้างอิง

1. Ebert, P. and D. Wood, *Observations of the starting behaviour of a small horizontal-axis wind turbine*. Renewable energy, 1997. 12(3): p. 245-257.
2. Kirke, B., *Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications*. Griffith University, 2005.

3. Lunt, P.A.V., *An Aerodynamic Model for a Vertical-Axis Wind Turbine*. 2005.
4. Baker, J., *Features to aid or enable self starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines*. Name: J. Wind Eng. Ind. Aerodyn, 1983.
5. Cooper, P. and O. Kennedy. *Development and Analysis of a Novel Vertical Axis Wind Turbine*. 2004.
6. Wakui, T., et al., *Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems*. Electrical Engineering in Japan, 2005. **150(4)**.
7. Gupta, R., R. Das, and K. Sharma. *Experimental study of a Savonius–Darrieus wind machine*. 2006.
8. Gorlov, A., *The helical turbine: A new idea for low-head hydro*. Hydro Review, 1995. **14(5)**.
9. van Bussel, G., et al., *TURBY[®]: concept and realisation of a small VAWT for the built environment*. Proceedings of the science of making torque from wind: p. 19-21.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองแพนอากาศในกังหันลมเพลาดั้ง ชนิด Lenz II

ในอุโมงค์ลมจำลองโดยใช้การออกแบบการทดลอง

Efficiency Comparison of Pan Type Model in the Vertical Axis Wind Turbines as

Lenz II Type in Wind Tunnel Model using Design of Experimental

พรเทพ สุรมาตย์ และ ปรีชา เกรียงกรกฎ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

E-mail : ice_oak825@hotmail.com

บทคัดย่อ

จุดประสงค์งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษา ออกแบบ สร้างและทดสอบสมรรถนะของกังหันลมชนิดเพลาดั้ง ในช่วงอัตราความเร็วลม 2.5 - 6 เมตร/วินาที ที่เหมาะกับการใช้งานในภูมิภาคของประเทศไทย เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ขาดแคลน แบบจำลองกังหันลมเพลาดั้งย่อส่วนลง 1:7 เท่า เพื่อให้สามารถทดสอบสมรรถนะภายในอุโมงค์ลมจำลองที่มีความเร็วลมไม่เกิน 6 เมตร/วินาที แบบจำลองกังหันลมเพลาดั้งที่สร้างขึ้นโดยใช้แพนอากาศ Lenz II มีความยาวคอर्ड 20 เซนติเมตรลำตัวใบยาว 21.4 เซนติเมตร รัศมีการหมุน 20 เซนติเมตร จำนวน 2,3,4 ใบพัด ในการทดสอบใช้เครื่องวัดรอบการหมุนชนิดใช้แสงวัดความเร็วรอบ จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภายในอุโมงค์ลมจำลอง ไปออกแบบการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 14 ใน ฟังก์ชัน DOE Factorial Design เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวัสดุประเภท Aluminium และ Zinc จากการประมวลผลการทดลอง พบว่า วัสดุประเภท Aluminium มีความเหมาะสมมากกว่า Zinc โดยมีจำนวนใบพัดที่เหมาะสมของวัสดุประเภท Aluminium เท่ากับ 4 ใบ ชนิด Lenz II ที่ความเร็วรอบ 439 รอบ/นาที ที่ระดับความเร็วลม 6 เมตร/วินาที

คำสำคัญ : กังหันลม การออกแบบ กระแสไฟฟ้า

Abstract

The purpose of this research study design, build and test the performance of wind turbines to the shaft. Wind speeds in the range 2.5 to 6 m/s for use in the region of the country. To generate electricity in Insufficient areas. Wind turbine shaft model is scaled down to 1:7 as performance testing in a wind tunnel model with wind speeds up to 6 m/s wind turbine shaft model is created using the pan for Lenz II has. Cord length is 20 cm long, 21.4 cm radius of the body of the 20 cm fan in the amount of 2,3,4 rotation of the instrument used to measure the speed of light. Then the data obtained from tests in a wind tunnel model to design of experimental. Using Minitab Release 14 functions in the DOE Factorial Design to compare efficiency between aluminium and zinc material. The evaluation result is aluminium material has suitable more than zinc material. It was found number blades optimum of aluminium material for wind turbines of this type is a type 4 Lenz II at 439 rpm / min at a wind speed of 6 m/s.

Keywords : Wind Turbine, Design, Electricity

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญและสนใจในการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น การผลิตพลังงานทดแทนจากพลังงานลมเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องด้วยในปัจจุบันการใช้ไฟฟ้ายังมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกวัน เพราะไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเป็นอยู่ และการพัฒนาประเทศในปัจจุบันยังมีประชาชนที่ยังไม่มีไฟฟ้าอีกเป็นจำนวนมากในท้องถิ่นทุรกันดาร และในชนบทห่างไกล โดยไฟฟ้าที่ได้ส่วนใหญ่มาจากเครื่องยนต์ดีเซล และการใช้น้ำมันหรือถ่านหินซึ่งนับวันจะมีปริมาณลดน้อยลงและมีราคาแพงขึ้น ที่สำคัญยังก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน กังหันลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดประเภทหนึ่ง การที่จะพัฒนาพลังงานลมเพื่อใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องมีศึกษา ว่ามีปริมาณลมเหมาะสมหรือไม่ สำหรับประเทศไทยการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านกังหันลมมีค่อนข้างน้อยมาก อาจจะเป็นเพราะว่าศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยยังไม่สูงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับประเทศอื่นๆ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานทำงานของกังหันลมเพื่อให้เหมาะสมกับพื้นที่ของจังหวัดอุบลราชธานี และยังเป็นทางเลือกใช้พลังงานสะอาดอีกทางเลือกหนึ่งด้วย เพื่อความมั่นคงทางด้านพลังงานไฟฟ้าและลดการนำเข้าแหล่งพลังงานจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่ง พร้อมทั้งการเลือกชนิดของแบบแผนอากาศให้เหมาะสมกับปริมาณลมของแต่ละพื้นที่ที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง [1]

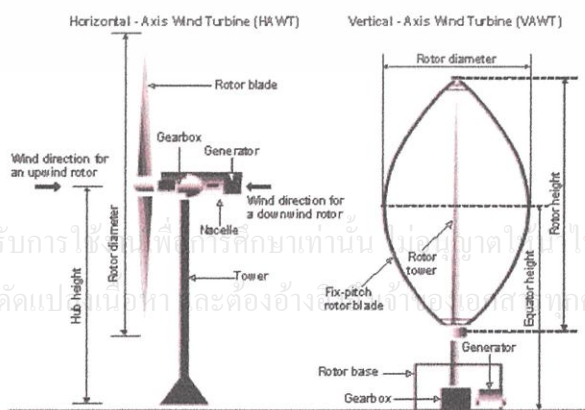
วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของกังหันลม
2. เพื่อพัฒนากังหันลมให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่เหมาะสม และยังสามารถลดขั้นตอนกระบวนการออกแบบในแต่ละพื้นที่
3. เพื่อหาวิธีเลือกชนิดของแบบแผนอากาศ ให้เหมาะสมกับปริมาณลมของแต่ละพื้นที่ เพื่อให้เหมาะสมกับสถิติลมในพื้นที่ขาดแคลน

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะกังหันลม

กังหันลมโดยทั่วไปจะมีรูปแบบพื้นฐานหลักๆ คล้ายๆ กัน แต่อาจแตกต่างกันบ้างในส่วนของรายละเอียด ดังนั้นการแบ่งประเภทของกังหันลมมักจะยึดเอาลักษณะการวางตัวของแกนเพลลาของกังหันลมเป็นหลัก ซึ่งประเภทหลักๆ ของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ กังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวนอนและกังหันลมที่มีแกนเพลลาอยู่ในแนวตั้ง ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 1 [2]



ภาพที่ 1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแบบแกนตั้ง [2]

ถึงแม้ผลจากการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับที่อื่น แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าพลังงานลมที่มีอยู่ไม่สามารถใช้ได้ จากผลการศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนในการลงทุนระหว่างพลังงานจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมพบว่า การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีต้นทุนถูกกว่าประมาณ 8-10 เท่า และยิ่งถ้าสามารถผลิตไบโอดีเซลของกังหันลมได้เองจะถูกกว่าถึง 10 เท่า [3]

การออกแบบและทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก[4] ซึ่งมีการนำภาคตัดปีกสองแบบรวมเข้าด้วยกัน คือ แบบ NACA 63-621 และ แบบ FX 66-S-196 ใบพัดมีขนาดความยาว 5 เมตร โดยที่ตำแหน่งระยะภาคตัดปีกที่ระยะห่างจากคมใบพัด 0.8 ถึง 4 เมตร นั้นเป็นภาคตัดปีก NACA และระยะตั้งแต่ 4 ถึง 5 เมตร จะเป็นภาคตัดปีก แบบ FX ใบพัดถูกสร้างขึ้นมาจาก ไฟเบอร์กลาส ได้ทดสอบแบบจำลองและเปรียบเทียบกับโปรแกรมคำนวณ พบว่า โปรแกรมคำนวณกำลังได้ คือ 15.05 กิโลวัตต์ที่ ความเร็วลม 10 เมตร/วินาที ดังนั้นจึงมีการติดตั้งเครื่องควบคุมขนาด 16 กิโลวัตต์ ลงในแบบจำลองแล้ว จากการทดสอบปรากฏว่า ความเร็วรอบ 10 เมตร/วินาที กำลังจะไปถึงค่าสูงสุด คือ 16 กิโลวัตต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ย 41.2 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบกังหันลมเพลาดัง ที่ใบพัดลมมีลักษณะแบบหัวลูกศร [5] ในอุโมงค์ลมขนาด (8 ม. x 500 ม. x 500 ม.ม.) ทำด้วยไม้ ใช้ความเร็วลม 7.4-19.75 เมตร/วินาที ผลการทดสอบ พบว่า สัมประสิทธิ์กำลังของภาคตัดปีกที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะมีค่าสูงกว่าภาคตัดปีกแบบ NACA 0012 ค่าของสัมประสิทธิ์กำลังทั้งสองจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่ามุมปะทะหรือลดอัตราส่วนความเร็วปลายใบและมุมพิทช์ สัมประสิทธิ์แรงบิดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนความเร็วปลายใบ เพิ่มมุมพิทช์ และเพิ่มอัตราส่วนความยาวปลายใบ สัมประสิทธิ์แรงบิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มมุมปะทะโดยเพล่าใบพัดจะมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด 0.0039

การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า [6] ผลการวิจัยกล่าวว่า อัตราเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี ที่สำนักงานเขตนุรักษ์พันธุ์สัตว์ป่าสะเมิง อำเภอสะเมิง จังหวัดเชียงใหม่มีค่า 4.1 m/s ซึ่งสูงกว่า 3 m/s เป็นอัตราเร็วลมเริ่มต้นที่สามารถนำไปผลิตไฟฟ้าได้ และมีอัตราเร็วลมกรรโชกสูงสุด 25 m/s โดยระบบกังหันลมจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 507,264 ยูนิต์/ปี เมื่อหันกังหันไปรับลมที่มาจากทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

เทคโนโลยีพลังงานลม ในวารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร [2] สรุปความว่า บทความนี้ได้นำเสนอวิวัฒนาการกว่า 100 ปี ของเทคโนโลยีพลังงานลมนับจากอดีตถึงปัจจุบันศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทย ทฤษฎีพลังงานลม ส่วนประกอบหลัก จุดเด่นจุดด้อย และผลกระทบของกังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบต่างๆ การที่จะให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าเข้ามาทดแทนการผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันทั้งหมดคงเป็นไปได้ เพราะในอนาคตภาพแบบการใช้พลังงานจะหลากหลายมากขึ้น การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลจะลดลงเนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สัดส่วนการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานมวลชีวภาพ และพลังงานลมจะสูงขึ้น ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีอัตราเร็วของลมไม่สูงนัก แต่ก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในระดับกิโลวัตต์ได้ ถ้าเริ่มวิจัยและพัฒนาตั้งแต่วันนี้ ในอนาคตประเทศไทยจะมีเทคโนโลยีพลังงานลมเป็นของตัวเอง ไม่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมดเหมือนเช่นเทคโนโลยีอื่น ๆ อย่างในปัจจุบัน

จากนั้น การกำหนดลักษณะใบกังหันลมเพื่อผลิตพลังงานให้ได้มากที่สุดโดยพิจารณาเฉพาะพื้นที่ [7] ผลการวิจัยกล่าวว่า กังหันลมมักจะถูกออกแบบให้เปลี่ยนพลังงานลมที่อัตราเร็วค่าหนึ่งไปเป็นพลังงานกลให้ได้มากที่สุด โดยคำนึงถึงตัวแปรออกแบบ (Design variable) หลายตัว เช่น ขนาดใบ อัตราเร็วรอบ ความสอบ (Taper) มุมบิดใบ (Twist angle) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) และมุมเดิน (Pitch angle) มุมเดินที่กำหนดเป็นสิ่งสำคัญยิ่งเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อค่ามุมปะทะ (Angle of attack) ที่ใบกังหันกระทำต่อลม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อแรงลมที่กระทำต่อกังหัน ดังนั้นมุมเดินที่ดีที่สุดในแต่ละพื้นที่หรือภูมิภาคย่อมแตกต่างกันแม้ว่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยจะเท่ากันก็ตาม

เพราะสถิติลมในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกัน ทำให้อัตราเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นพลังงานสูงสุดมีค่าต่างกัน งานวิจัยนี้มุ่งหามุมเงินที่ที่ดีที่สุดของใบกังหันโดยใช้วิธีการเชิงทฤษฎีร่วมกับสถิติลมเฉพาะพื้นที่เพื่อให้ได้งานรายปีสูงสุด ทฤษฎีสำคัญที่ใช้คือ ทฤษฎี Blade element momentum ร่วมกับแบบจำลองชดเชยการสูญเสียการไหลเพื่อปรับแก้การไหลเชิงอุดมคติให้สอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในภาษา MATLAB เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทำนายกับผลการทดลองของกังหันลมในสองลักษณะคือกังหันลมแบบใบตรงและกังหันลมแบบใบบิด ได้ใช้โปรแกรมค้นหาหามุมเงินที่ดีที่สุด สถิติลมอันหนึ่ง โดยการปรับมุมเงินไปจนกระทั่งได้งานรายปีสูงสุดจากนั้นได้คำนวณหามุมเงินที่ดีที่สุดในการเปลี่ยนไปจากเดิมโดยยังมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยเท่าเดิมแต่มีความเบ้ของสถิติลมต่างไปจากเดิม พบว่ามุมเงินที่ดีที่สุดเปลี่ยนไปจากเดิมทั้งนี้มาเป็นสาเหตุจากการที่ค่าอัตราเร็วลมที่ให้ความหนาแน่นกำลังงานลมสูงสุดเปลี่ยนไปตามความเบ้ของสถิติลม พบว่าการปรับมุมเงินเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้ได้งานรายปีต่างกันพอสมควรในสถิติลมที่มีความเบ้แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบของกังหันลมได้มากพอสมควร

อุปกรณ์และวิธีการ

วิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดสอบแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติเข้ามาช่วย ทดสอบสมรรถนะภายในอุโมงค์ลมจำลองที่มีความเร็วลมตั้งแต่ 2.5 - 6 เมตร/วินาที และจำลองกังหันลมเพลตั่งที่สร้างขึ้นโดยใช้แพนอากาศ Lenz II มีความยาวคอรัด 20 เซนติเมตรลำตัวใบยาว 21.4 เซนติเมตร รัศมีการหมุน 20 เซนติเมตร จำนวน 2,3,4 ใบพัด ในการทดสอบใช้เครื่องวัดรอบการหมุนชนิดใช้แสงวัดความเร็วรอบ จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบภายในอุโมงค์ลมจำลอง ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 14 ใน ฟังก์ชัน DOE Factorial Design เพื่อหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับความเร็วม ตามศักยภาพพลังงานลมของจังหวัดอุบลราชธานี

3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ทางสถิติ

3.1.1 โปรแกรม Minitab Release 14

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุโมงค์ลม (Wind tunnel)

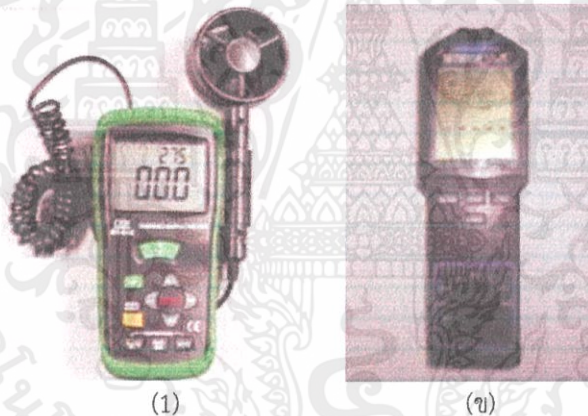
ใช้ทดสอบ และศึกษา ผลของลมในความเร็วต่างๆที่มีผลต่อสิ่งประดิษฐ์ โดยทำเป็นแบบจำลองนำไปวางไว้ในทิศทางลมภายในอุโมงค์ลม เพื่อทดสอบ ทิศทางการปะทะ แรงต้าน แรงบิด อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบเปิด อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบโดยมีการออกแบบจัดสร้างขึ้นมา ขนาดพื้นที่หน้าตัดการทำงาน 0.35 x 0.25 เมตร มีความยาว ตั้งแต่ปากทางเข้าจนถึงปากทางออกของอุโมงค์ลม 2.30 เมตร พื้นภายในอุโมงค์ลมเป็นแผ่นกระจกหนา 0.005 เมตรด้านบนปิดด้วยแผ่นพลาสติกหนา 0.004 เมตร ปากทางเข้ามีรังผึ้งช่องเล็ก ๆ (พื้นที่หน้าตัด x ความลึก) ขนาด 0.35 x 0.25 x 0.05 เมตร ทางออกของอุโมงค์ลมติดตั้งชุดพัดลมดูดอากาศ ดังภาพที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2 อุโมงค์ลมจำลองอากาศ (Wind Tunnel) เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของกังหันลมเพลลาตั้ง

3.2.2 เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Thermo anemometer รุ่น CEM DT-618 และ เครื่องมือวัดความเร็วรอบแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Chauvin arnoux รุ่น Tachymetre C.A 25 ดังภาพที่ 3



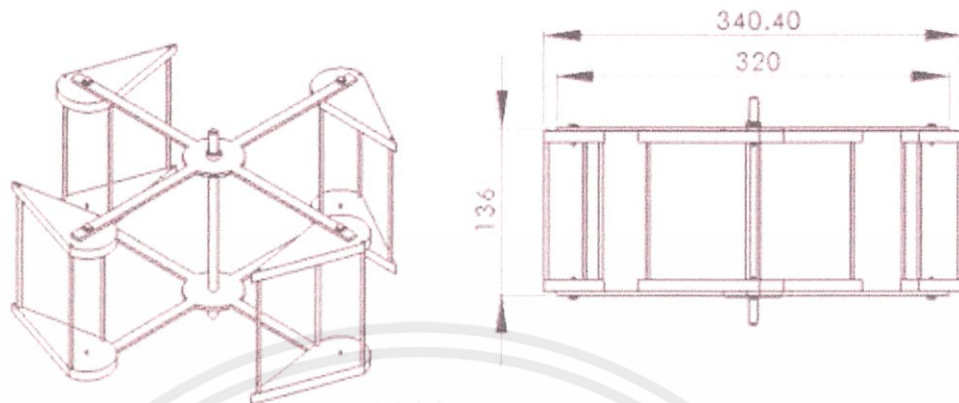
(1)

(ข)

ภาพที่ 3 เครื่องมือวัดความเร็วลม(ก) เครื่องมือวัดความเร็วรอบ(ข)

3.2.3 แบบจำลองแพนอากาศ Lenz II เพื่อช่วยในการศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเพลลาตั้ง โดยพิจารณาจากวัสดุที่ใช้สร้าง จำนวนใบพัด และระดับอัตราความเร็วลมแต่ละระดับ จึงทำการออกแบบและสร้างแบบจำลองกังหันลมเพลลาตั้งเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และเปรียบเทียบผลการทดลองของแบบจำลองกังหันลมเพลลาตั้ง ดังภาพที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4 การออกแบบจำลองกังหันลมเพลตั่งแบบแพนอากาศ Lenz II



ภาพที่ 5 แบบจำลองกังหันลมเพลตั่งชนิด 2 ใบพัด (ก) ชนิด 3 ใบพัด (ข) ชนิด 4 ใบพัด (ค)

3.3 วิธีการทดลอง

วิธีการศึกษาครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การศึกษาข้อมูลของอัตราความเร็วลมวัดของจังหวัดอุบลราชธานี

ทำการศึกษาข้อมูลจากระดับอัตราความเร็วลม และทิศทางของลมในจังหวัดอุบลราชธานี อุบลราชธานี ในแต่ละพื้นที่พร้อมทั้งข้อมูลศึกษา โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเฉลี่ยรายปีที่ระดับความสูง 90 เมตร ย้อนหลัง 15 ปี เพื่อนำมาหาปริมาณระดับอัตราความเร็วลมภายในพื้นที่ พบว่า ความเร็วลมของจังหวัดอุบลราชธานีอยู่ในช่วง 2.5-6.0 m/s [8]

2. การเก็บบันทึกข้อมูลของแบบจำลองกังหันลมในแต่ละระดับความเร็วลม

ทำการศึกษาเปรียบเทียบ การออกแบบการสร้างแบบจำลองกังหันลมเพลตั่ง เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพภายในอุโมงค์ลมจำลองในแต่ละอัตราความเร็วลมที่ระดับ 2.5 - 6 m/s มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมมุติฐานที่ตั้งไว้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเพลตั่ง ที่ระดับอัตราความเร็วลม จำนวนใบพัด และวัสดุ มีผลต่อการทำงานหรือไม่ โดยทำการทดสอบการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเพลตั่งทั้ง 3 ลักษณะ ในสภาวะอากาศในแต่ละระดับความเร็วลม พร้อมทั้งแยกการทดสอบในวัสดุแต่ละชนิดและจำนวนใบพัดที่แตกต่างกันภายใน

อุโมงค์ลมจำลองแล้วทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำผลการทดลองภายในอุโมงค์ลมจำลองมาทำการพยากรณ์ โดยใช้โปรแกรม Minitab Release 14 ใน ฟังก์ชัน DOE Factorial Design เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองกังหันลม เลาที่ตั้งว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานหรือไม่ ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เก็บข้อมูล ต้นแบบกังหันลมเลาตั้ง เพื่อใช้ในในการวิเคราะห์ และหาต้นแบบที่เหมาะสม

3.3.1 ขั้นตอนวิธีการค้นคว้าทดลอง วัสดุ aluminium , Zinc

- (1) นำแบบจำลองกังหันลมเลาตั้งที่ใช้วัสดุแต่ละชนิดและลักษณะที่แตกต่างก็นำมาทดสอบการทำงานและทำการบันทึกผล
- (2) นำแบบจำลองกังหันลมเลาตั้ง ทดสอบการทำงานภายในอุโมงค์ลมจำลอง
- (3) ปรับความเร็วรอบด้วยชุดควบคุม Voltage Regulator ในแต่ละระดับความเร็วลมที่กำหนด และทำการบันทึกประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเลาตั้ง
- (4) ทำการเปลี่ยนแบบจำลองกังหันลมเลาตั้งของแต่ละแบบจนครบทั้ง 3 แบบพร้อมทั้งบันทึกการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเลาตั้ง
- (5) นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองกังหันลมเลาตั้ง ตัวอย่างมาทดสอบหาประสิทธิภาพที่เหมาะสมในทั้ง 3 แบบ พร้อมทั้งทำการบันทึกข้อมูลการทดลอง
- (6) ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1- 5 โดยทำซ้ำให้ครบ 3 ครั้งและบันทึกผล
- (7) นำผลการทดลองไปประมวลผลหาจำนวนครั้งในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ ในฟังก์ชัน DOE Factorial Design เมื่อได้ค่าดังกล่าว ก็ทำการทดลองตามวิธีการทดลองข้างต้นจากข้อ 1- 7

หมายเหตุ : ในการทดลองจะสามารถเลือกแบบจำลองกังหันลมเลาตั้ง ที่เหมาะสมกับความเร็วลมแต่ละระดับให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับพื้นที่ พร้อมทั้งลดขั้นตอนการออกแบบและสร้างกังหันลมเลาตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลการวิจัยและอภิปรายผล ห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบจำลองกังหันลมเลาตั้งภายในอุโมงค์ลมจำลองโดยใช้โปรแกรมที่ทำการประมวลผล โดยใช้ Minitab Release 14 ใน ฟังก์ชัน DOE แบบ Factorial Design โดยเลือกใช้

ปัจจัยการทดลองแบบสองปัจจัยเพื่อทำการพยากรณ์ข้อมูล ว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลม เพลาดัง จากการพยากรณ์ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุประเภท Aluminium ในระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่า ปัจจัยทั้ง 2 คือ ความเร็วลมและจำนวนใบพัดมีผลต่อ อัตราความเร็วรอบของแบบจำลองกังหันลมที่ P-Value น้อยกว่า 0.05 และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-Sq = ร้อยละ 97.69 R-Sq(adj) = ร้อยละ 96.92 ซึ่งค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้นค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไปได้ [9] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 : ผลการพยากรณ์ข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเพลาดัง ชนิด Aluminium

Estimated Effects and Coefficients for RPM (coded units) Aluminium					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		311.11	3.714	83.77	0.000
Speed	97.55	48.77	3.714	13.13	0.000
Blade	97.72	48.86	3.714	13.16	0.000
Speed*Blade	61.05	30.53	3.714	8.22	0.000
Ct Pt		-66.71	6.848	-9.74	0.000
S = 12.8653 R-Sq = 97.69% R-Sq(adj) = 96.92%					

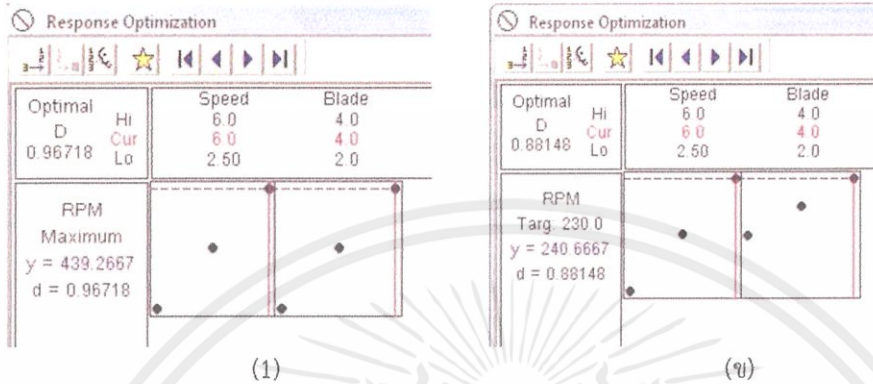
4.2 จากการพยากรณ์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวัสดุประเภท Zinc ในระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่า ปัจจัย ทั้ง 2 คือ ความเร็วลมและจำนวนใบพัดมีผลต่อ อัตราความเร็วรอบของแบบจำลองกังหันลมที่ P-Value น้อยกว่า 0.05 และมีความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-Sq = ร้อยละ 99.46 R-Sq(adj) = ร้อยละ 99.28 ซึ่งค่าที่ได้มากกว่าร้อยละ 80 ดังนั้นค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ นำไปใช้ในการดำเนินงานวิจัยต่อไปได้ [9] ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 : ผลการพยากรณ์ข้อมูลประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลมเพลาดัง ชนิด Zinc

Estimated Effects and Coefficients for RPM (coded units) Zinc					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		149.92	1.376	108.92	0.000
Speed	115.83	57.92	1.376	42.08	0.000
Blade	52.17	26.08	1.376	18.95	0.000
Speed*Blade	13.50	6.75	1.376	4.90	0.000
Ct Pt		-16.72	2.538	-6.59	0.000
S = 4.76795 R-Sq = 99.46% R-Sq(adj) = 99.28%					

4.3 ผลทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยโปรแกรม Minitab Release 14 ในการทดสอบ 2 ปัจจัย โดยในฟังก์ชัน DOE แบบ Factorial Design โดยพบว่าวัสดุประเภท Aluminium มีผลตอบที่เหมาะสม (Response Optimization) ที่จำนวนใบพัด 4 ใบพัด และอัตราความเร็วลม 6 m/s โดยมีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability) ที่ 0.96718 โดยทั่วไปหากค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับ 1 ถือว่าผลของข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ได้ [9] โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 7(ก) วัสดุประเภท Zinc มีผลตอบที่เหมาะสม (Response Optimization) ที่จำนวนใบพัด 4

ใบพัด และอัตราความเร็วลม 6 m/s โดยมีค่าความพึงพอใจรวม (Desirability) ที่ 0.88148 โดยทั่วไปหากค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับ 1 ถือว่าผลของข้อมูลมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ได้ [9] โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 7 (ข)



ภาพที่ 7 ผลทดลองได้ผลการพยากรณ์ข้อมูล Response Optimization ชนิดของวัสดุ Aluminium (ก) Zinc (ข)

4.4 เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของ Aluminium, Zinc ก็พบว่าความเร็วลมและจำนวนใบพัดต่างกันมีผลต่อความเร็วรอบของวัสดุทั้งสองประเภทแต่ความเร็วรอบของแบบจำลองกังหันลมที่ใช้วัสดุ Aluminium มีค่าผลตอบ(y) ที่ 439.2667 ซึ่งสูงกว่าค่าผลตอบ(y) ที่ใช้วัสดุจาก Zinc ซึ่งมีค่า 240.6667 จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลองกังหันลม ดังนั้นในการสร้างกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงควรใช้วัสดุประเภท Aluminium ที่จำนวนใบพัด 4 ใบพัด และอัตราความเร็วลม 6 m/s

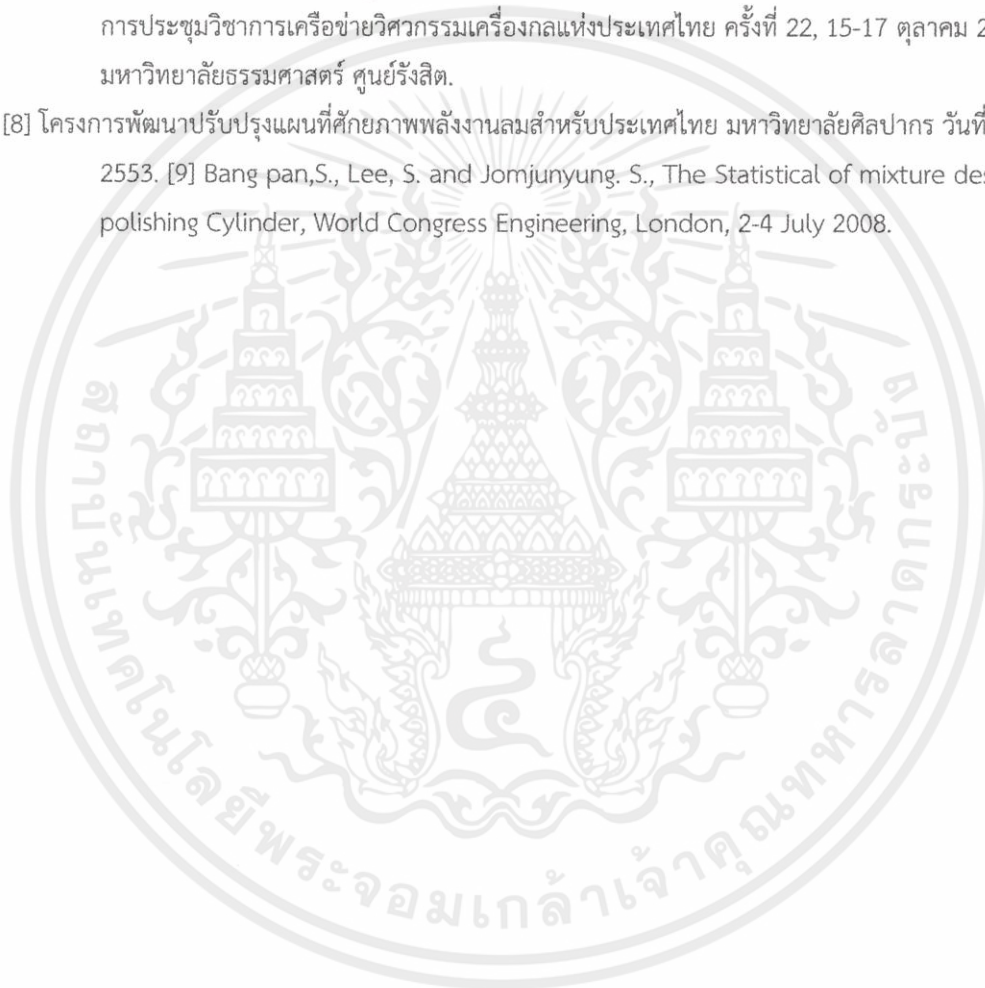
สรุปผล

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองแพนอากาศในกังหันลมเพลาดั้ง ชนิด Lenz II ในอุโมงค์ ลมจำลองโดยใช้โปรแกรม Minitab Release 14 ในการออกแบบการทดลองซึ่งมีวัสดุสองประเภทคือ Aluminium, Zinc โดยทดสอบปัจจัยทั้งสองปัจจัย คือความเร็วลมและจำนวนใบพัดซึ่งพบว่าทั้งสองปัจจัยต่างมีผลต่อวัสดุทั้งสองประเภท แต่ผลตอบของค่า (y) ของวัสดุประเภท Aluminium มีค่าที่สูงกว่าผลตอบของวัสดุประเภท Zinc ในอัตรา 1.83 เท่าซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพแบบจำลองกังหันลม ดังนั้น วัสดุประเภท Aluminium ที่จำนวนใบพัด 4 ใบพัด และอัตราความเร็วลม 6 m/s เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการสร้างกังหันลมเพลาดั้งสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] สว่าง ขาดทอง และ วีรชัย โยชนรินทร์, “การออกแบบระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาด 20 กิโลวัตต์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, จังหวัดอุบลราชธานี.
- [2] นิพนธ์ เกตุจ้อย และ อติพล ศศิธรานวัฒน์, (2547,กรกฎาคม-ธันวาคม), “เทคโนโลยี พลังงานลม” วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร, 12(2), 57-73.
- [3] กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2546ก), พลังงานลม, [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/renew/wind_p.htm.

- [4] Habali M. and Saleh L.A,“ Design and Testing of small Mixed Airfoil Wind Turbine Blades”.
Renewable Energy, 6:161-169, 1995.
- [5] V.H.Morcós and O.M.E Abdel-Hafez. “Testing of an arrow – head vertical – Axis wind Turbine Model”, Mechanical Engineering Department, Assiut University, Assiut ,Egypt. 1995.
- [6] เดช ดำรงค์ศักดิ์, “การวิเคราะห์ศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า” การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547.
- [7] วิกันดา ศรีเดช และ ทวีช จิตรสมบุญ, การออกแบบกังหันลมให้สอดคล้องกับสถิติลมจำเพาะพื้นที่,
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, 15-17 ตุลาคม 2551,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [8] โครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย มหาวิทยาลัยศิลปากร วันที่ 4 สิงหาคม
2553. [9] Bang pan,S., Lee, S. and Jomjunyung. S., The Statistical of mixture design of rice
polishing Cylinder, World Congress Engineering, London, 2-4 July 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้