

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบกังหันลมแกนนอนแบบหลายใบ

A DESIGN FOR HORIZONTAL AXIAL WIND TURBINE



T103997



โดย

นายคอน บุญเจือ

นายธงชัย ฐิติรัฐอมรกิจ

นายยุทธนา กงคาร์ตน์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. มณฑล ใจกุลสด

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน...103997...

วัน,เดือน,ปี...2.8.๓.๓...2552

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DESIGN FOR HORIZONTAL AXIAL WIND TURBINE



KORN BOONJUE
THONGCHAI TITIRATAMORNKIT
YUTTANA KONGCARAT

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACILTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบกังหันลมแกนนอนแบบหลายใบ

A DESIGN FOR HORIZONTAL AXIAL WIND TURBINE

คณะผู้จัดทำ

นาย กอน บุญเจือ

รหัสประจำตัว 49015479

นาย ธงชัย ฐิติรัฐอมรกิจ

รหัสประจำตัว 49015524

นาย ยุทธนา ทงคาร์ตัน

รหัสประจำตัว 49015537



(Signature)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. มณฑล ใจกุศล)

(Signature)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อ.สยาม สงวนรัมย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบกัณฑ์ลมนอนแบบหลายใบ

นาย กอน บุญเจือ
 นาย ธงชัย ฐิติรัฐอมรกิจ
 นาย ยุทธนา คงคาร์คณ์
 ผศ. มณฑล ใจกุศล อาจารย์ที่ปรึกษา
 อาจารย์ สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
 ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบกัณฑ์ลมนอนแบบหลายใบ ซึ่งการออกแบบจะพิจารณาจำนวน ใบพัดที่เหมาะสมสำหรับความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที, 4 เมตรต่อวินาที และ 5 เมตรต่อวินาที สำหรับแบบจำลองกัณฑ์ลมที่ใช้ในการทดลองจะมี 3 แบบ คือ 3 ใบพัด 4 ใบพัด และ 6 ใบพัด ซึ่งแต่ละแบบจะมีพื้นที่รวมของใบพัดเท่ากันคือ 0.026 ตารางเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการหมุน 0.34 เมตร การทดลองจะทดลองในอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมสม่ำเสมอ จากนั้นนำผลการทดลองมาคำนวณและเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ต่างๆ ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (λ) กับ ประสิทธิภาพ (C_p) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนจำนวนใบพัดมีผลต่อประสิทธิภาพ (C_p) ที่ได้ มีดังนี้ที่ 3 ใบพัดจะได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 0.1393 ที่ อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (λ) เท่ากับ 3.3845 ที่ 4 ใบพัด จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 0.1383 ที่ อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (λ) เท่ากับ 3.3392 และที่ 6 ใบพัด จะได้ประสิทธิภาพสูงสุดคือ 0.1320 ที่ อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลม (λ) เท่ากับ 3.0050 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ 3 ใบมีประสิทธิภาพสูงสุดรองมาจะเป็นที่ 4 ใบพัด และที่ 6 ใบพัดจะได้ประสิทธิภาพต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A DESIGN FOR HORIZONTAL AXIAL WIND TURBINE

KORN BOONJUE

THONGCHAI TITIRATAMORNKIT

YUTTANA KONGCARAT

Assis.Prof MONTOL JAIKUSOL Advisor

Mr. SAYAM SAGUANRUM Co. Advisor

Education Year 2008

Abstract

This thesis is about wind turbine multi blades designing method. The design approaches consider optimum number of blades at wind speed of 3 m/s, 4 m/s and 5 m/s. The model of wind turbine has 3 blades, 4 blades and 6 blades. Each model has the blades area of 0.026 m^2 with the diameter of 0.34 m. The experiment was carried out in a wind tunnel. Experimental results were transformed in to correlation factors indicated the relationship between tip speed ratio (λ) and efficiency (C_p). The graph explained that the numbers of blades play the important roles to the efficiency (C_p). With 3, 4 and 6 blades, the optimum efficiency was 0.1393, 0.1383 and 0.1320, and at the tip speed ratio of 3.3845, 3.3392 and 3.0050 respectively. From the experiment, the rank of the maximum efficiency was from 3 blades, 4 blades to 6 blades.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงการนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ มณฑล ใจกุลล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์สยาม สงวนรัมย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำต่างๆ ในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทั้งในด้านข้อมูลและการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ทุกๆ ท่านที่คอยชี้แนะ และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ระหว่างทำโครงการ ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต และกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการสืบค้นหาข้อมูล นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีอุปการะคุณทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและคอยเป็นกำลังใจ ตลอดจนช่วยเหลือด้านอื่น ทั้งนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงอีกครั้งหนึ่ง



กอน บุญเจือ

ชงชัย จิตร์ฐอมรกิจ

ยุทธนา คงคาร์ตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีการเกิดลม	4
2.2 การเก็บข้อมูล	6
2.3 การวิเคราะห์พลังงานลม	8
2.4 เครื่องเปลี่ยนพลังงาน	9
2.5 การแบ่งแบบต่างๆของกังหันลม	10
2.6 การทำงานและประสิทธิภาพของกังหันลมในแบบต่างๆ	11
2.7 พลังงานลมในประเทศไทย	20
บทที่ 3 ทฤษฎีและแนวคิดในการออกแบบกังหันลมแนวนอน	
3.1 ทฤษฎีพลังงานจลน์	26
3.2 ทฤษฎีกำลังลม	26
3.3 ทฤษฎีกำลังใบพัด	27
3.4 การคำนวณการออกแบบเพลลา	29
3.5 การคำนวณอายุการใช้งานของเบรค	31
3.6 การกำหนดขนาดพื้นที่ของใบพัด	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วัสดุอุปกรณ์และการทดลอง	
4.1 แบบจำลองกึ่งหุ่นลม	41
4.2 เครื่องวัดความเร็วลม	43
4.3 ชุดเครื่องมือวัดแรงบิด	44
4.4 เครื่องวัดความเร็วรอบ	44
4.5 อุโมงค์ลมและแหล่งกำเนิดลม	45
4.6 วิธีการทดลอง	45
บทที่ 5 ผลทดลอง	
5.1 ผลการทดลอง	46
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดลอง	50
6.2 ข้อเสนอแนะ	50
ภาคผนวก	
ก. สมการที่ใช้ในการคำนวณและตัวอย่างการคำนวณ	51
ข. ผลการทดลอง	55
บรรณานุกรม	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

สารบัญตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความเร็วลมที่ได้จากการสังเกตสิ่งแวดล้อม	7
ตารางที่ 2.2 สรุปลักษณ์ข้อมูลที่ทำให้การรวบรวม	21
ตารางที่ 3.1 ตารางมิติมาตรฐานและแรงประเมินของ โรลลิ่งแบร์ริง	34
ตารางที่ 3.2 ตารางตัวประกอบ V, X และ Y สำหรับ Rolling bearing	35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

สารบัญรูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเกิดลมประเภทต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของลมเมื่อผ่านภูมิประเทศต่าง ๆ	5
รูปที่ 2.3 ลักษณะของ “รถใบ” ซึ่งวิ่งบนรางวงจรปิด	10
รูปที่ 2.4 ชนิดของใบกังหันแบบนอนขนานกับทิศทางลม	12
รูปที่ 2.5 กังหันลมแบบสูบลม	13
รูปที่ 2.6 กังหันลมแบบตามลม	13
รูปที่ 2.7 กังหันลมแกนนอนขวางทิศทางลม	14
รูปที่ 2.8 กังหันลมซาโวนีเยส สร้างลักษณะต่าง ๆ กัน	15
รูปที่ 2.9 กังหันลมแดเรียส (Darrieus Rotors)	16
รูปที่ 2.10 กังหันแดเรียส ติดตั้งร่วมแกนกับแบบ ซาโวนีเยส	17
รูปที่ 2.11 หลักการของกังหันลมแมกนีส และการนำไปใช้ในการกำเนิดไฟฟ้า	17
รูปที่ 2.12 แบบต่าง ๆ ของอุปกรณ์เพิ่มความเร็วกับกังหันลม	18
รูปที่ 2.13 แสดงการหมุนตัวของลมเมื่อผ่านปีกรูปสามเหลี่ยม	18
รูปที่ 2.14 กังหันแบบหอลมวน แสดงชิ้นส่วนประกอบและการเคลื่อนที่ของลม	19
รูปที่ 2.15 กังหันลมอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์	19
รูปที่ 2.16 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน มกราคม	22
รูปที่ 2.17 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน กุมภาพันธ์	22
รูปที่ 2.18 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน มีนาคม	22
รูปที่ 2.19 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน เมษายน	22
รูปที่ 2.20 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน พฤษภาคม	23
รูปที่ 2.21 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน มิถุนายน	23
รูปที่ 2.22 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน กรกฎาคม	23
รูปที่ 2.23 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน สิงหาคม	23
รูปที่ 2.24 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน กันยายน	24
รูปที่ 2.25 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน ตุลาคม	24
รูปที่ 2.26 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน พฤศจิกายน	24
รูปที่ 2.27 แผนที่ศักยภาพพลังงานลม เดือน ธันวาคม	24
รูปที่ 2.28 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงลมสงบ – เฉลี่ยรายปี	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

สารบัญรูปภาพ	หน้า
รูปที่ 3.1 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ	27
รูปที่ 3.2 แสดงเวกเตอร์การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุดบนทรงกระบอก	28
รูปที่ 3.3 กราฟตัวประกอบของผิวสำเร็จสำหรับเหล็กกล้าเมื่อ ไม่มีรอยเจาะ	30
รูปที่ 3.4 รัศมีวงในและรัศมีวงนอกของแปรง	32
รูปที่ 3.5 แผนภาพวัตถุอิสระเมื่อพิจารณาที่กระทำต่อแปรง	32
รูปที่ 3.6 แสดงกราฟกำลังงานในการสูบน้ำ	36
รูปที่ 3.7 แสดงค่า Power Factor	37
รูปที่ 3.8 แสดงค่า E ในแต่ละอัตราส่วนความเร็วลมต่อความเร็วของใบพัด $\left(\frac{U}{V}\right)$	37
รูปที่ 3.9 แสดงการหาพื้นที่ของใบพัด	38
รูปที่ 3.10 กราฟ solidity	39
รูปที่ 3.11 wind angle	39
รูปที่ 3.12 ชนิดของใบพัด	40
รูปที่ 3.13 angle of attack	40
รูปที่ 4.1 แบบจำลองกังหันลม 3 ใบพัด	41
รูปที่ 4.2 แบบจำลองกังหันลม 4 ใบพัด	41
รูปที่ 4.3 แบบจำลองกังหันลม 6 ใบพัด	42
รูปที่ 4.4 ชิ้นส่วนประกอบของแบบจำลองกังหันลม	43
รูปที่ 4.5 เครื่องวัดความเร็วลม	43
รูปที่ 4.6 ชุดเครื่องมือวัดแรงบิด	44
รูปที่ 4.7 ไดนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัด	44
รูปที่ 4.8 เครื่องวัดความรอบ	44
รูปที่ 4.9 อุโมงค์ลม	45
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ	46
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วเชิงมุม	46
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงบิดเนื่องจากใบพัด	47
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังลม	47
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังใบพัด	48
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tip speed (λ) กับ ประสิทธิภาพ (C_p)	48
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังใบพัดและกำลังลมเทียบกับความเร็วลม	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ความพยายามในการคิดค้นเพื่อหาแหล่งพลังงานทดแทน ให้สอดคล้องกับคุณภาพทางเศรษฐกิจของประเทศไทยเรานั้น ต้องตระหนักถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและนิเวศวิทยาเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งทางผู้จัดทำได้ติดตามถึงความเป็นไปเพื่อนำความก้าวหน้าของพลังงานทดแทน ที่สามารถนำมาใช้แทนพลังงานในรูปแบบเก่าซึ่งนับวันมีแต่จะหมดไป

พลังงานที่เหมาะสมที่จะผลิตกระแสไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบซึ่งสามารถนำมาใช้และก็ไม่ทำลายระบบนิเวศวิทยาด้วยก็มี เช่น พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานน้ำ, พลังงานคลื่น, พลังงานลม ฯลฯ ซึ่งในประเทศไทยนั้น ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมมานานแล้ว เช่น กังหันลมที่บ้านที่เรารู้จักกันดีคือ กังหันลมแบบที่ใช้ในนาเกลือ, นาข้าว แถบจังหวัดฉะเชิงเทรา, ชลบุรีและบริเวณรอบนอกกรุงเทพ ความตื่นตัวด้านกังหันลมนั้นมีมาตั้งแต่ช่วงวิกฤตการณ์น้ำมันในปี พ.ศ. 2517 เป็นต้นมา ในขณะนี้ก็ได้มีอยู่หลายหน่วยงานที่ได้ทำการพัฒนากังหันลมแบบต่างๆขึ้นเพื่อนำมาใช้กับงานที่แตกต่างกันไป ช่วง 10 ปีที่ผ่านมาการพัฒนากังหันลมมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดประเทศที่มีกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมากที่สุดในประเทศคือประเทศเยอรมนี ในปี ค.ศ.2001 เยอรมนีผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมถึง 16,500 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 36 ของโลก [1] รองลงมาคือประเทศสเปนและประเทศสหรัฐอเมริกา มีกำลังผลิต 8,000 เมกะวัตต์ และ 6,800 เมกะวัตต์ ตามลำดับ ประเทศเดนมาร์กซึ่งมีกำลังการผลิต 3,121 เมกะวัตต์ หรือเป็นอันดับ 4 ของโลก และเป็นประเทศที่ส่งออกกังหันลมเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้ามากที่สุดในโลกนอกจากปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานจากลมจะเห็นว่ายุโรปเป็นกลุ่มประเทศที่มีการใช้พลังงานหมุนเวียนจากลมมาผลิตกระแสไฟฟ้า ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมที่สะอาด คาดว่าภายในปี ค.ศ. 2010 ทั้งยุโรปจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ 60,000 เมกะวัตต์ ในปี ค.ศ.1980 กังหันลม 1 ต้น ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 100 กิโลวัตต์ ถ้าอยู่ในแหล่งมีศักยภาพพลังงานลมสูงกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมจะมีราคาถูกกว่ากระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 8-10 เท่า ประเทศอินเดียจัดว่าเป็นประเทศที่มีศักยภาพและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและพลังงานลมมากที่สุดในเอเชีย โดยสามารถ ผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ 2,800 เมกะวัตต์ เนื่องจากรัฐบาลอินเดียมีนโยบายส่งเสริมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลมในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างจริงจัง นอกจากนี้ประเทศจีนก็เป็นอีกประเทศหนึ่งที่กำลังพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลมปัจจุบันผลิตได้ 760 เมกะวัตต์ กังหันลมโดยทั่วไปนั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดแต่ละ

ชนิดก็ใช้งานแตกต่างกันไป แต่ทางผู้จัดทำจะกล่าวถึงกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบ ซึ่งทางผู้จัดทำมีความสนใจเกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบว่า เมื่อใบของกัณฑ์เพิ่มมากขึ้นหรือแตกต่างกันจะทำให้ประสิทธิภาพของกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบแตกต่างกันไปได้อย่างไร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบ
- 2) วิเคราะห์ประสิทธิภาพของกัณฑ์ลมนวนอน

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

- 1) ออกแบบกัณฑ์ลมนวนอนโดยใช้ความรู้ทางด้านวิศวกรรม
- 2) สร้างแบบจำลองกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบ
- 3) ทดสอบกัณฑ์ลมนวนอนที่สภาวะต่างๆ
- 4) วิเคราะห์ประสิทธิภาพกัณฑ์ลมนวนอน

1.4 แผนการดำเนินงาน

- 1) รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่ใช้ในการทำโครงการ
- 2) ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
- 3) ออกแบบกัณฑ์ลมนวนอนโดยใช้ความรู้จากทฤษฎี
- 4) สร้างกัณฑ์ลมนวนอนแบบจำลองจากการออกแบบ
- 5) นำแบบจำลองมาทดลองและบันทึกผล
- 6) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1) สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของลมเป็นพลังงานกลที่ทำให้ใบพัดกัณฑ์ลมนวนอนแบบหลายใบหมุนได้
- 2) ได้เครื่องต้นแบบเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกันและพัฒนาต่อไป
- 3) เป็นรูปแบบในการประหยัดพลังงาน
- 4) ได้ทักษะในการเขียนเอกสารเชิงวิชาการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงาน	พ.ศ.2551							พ.ศ.2552		
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1) รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่ใช้ในการทำโครงการ	↔									
2) ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	↔									
3) ออกแบบกึ่งหัตถมโดยใช้ความรู้จากทฤษฎี		↔								
4) สร้างกึ่งหัตถมแบบจำลองจากการออกแบบ				↔						
5) นำแบบจำลองมาทดลองและบันทึกผล							↔			
6) สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง							↔			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ลมเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาดและสามารถนำมาใช้งานได้อย่างไม่หมด ได้มีการคาดคะเนกันว่าพลังงานลมใน โลกนี้มีประมาณ 10,000,000 เมกะวัตต์ ซึ่งจะมีอยู่อย่างกระจุกกระจายกัน มากบ้างน้อยบ้าง ตามลักษณะภูมิศาสตร์ของพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศ

2.1 ทฤษฎีการเกิดลม

ลมคืออากาศที่เคลื่อนที่ อากาศประกอบด้วยมวลสารที่มีความหนาแน่นน้อย ดังนั้นเมื่อมวลสารเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วจะมีพลังงานอยู่ในตัวพลังงานนี้เรียกว่า “พลังงานจลน์”

2.1.1 สาเหตุการเกิดลม

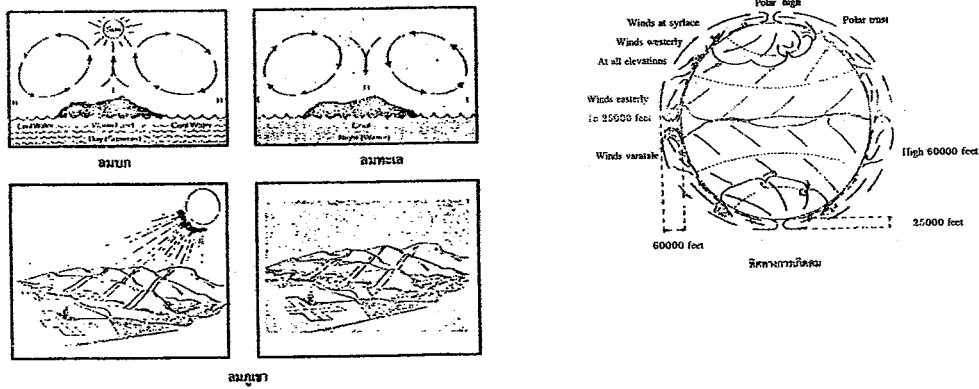
ลมตามธรรมชาติเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งได้จากพลังงานแสงอาทิตย์โดยทางอ้อม เนื่องด้วยความร้อนจากดวงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของผิว โลกแตกต่างกันเป็นสาเหตุให้อากาศที่เย็นกว่าไหล ไปแทนที่อากาศซึ่งร้อนกว่าและลอยตัวขึ้น นอกจากนี้การหมุนรอบตัวเองของโลก ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดลมด้วย

2.2.2 ประเภทของลม

จากลักษณะการเกิดลม สามารถแบ่งลมเป็นประเภทต่าง ๆ คือ ลมบก ลมทะเล เป็นลมที่เกิดในบริเวณชายฝั่ง เนื่องจากความจุความร้อนของน้ำและพื้นดินแตกต่างกัน ทำให้อุณหภูมิระหว่างผิวดินและผิวน้ำต่างกัน เป็นผลทำให้เกิดลม

ลมภูเขาและลมหุบเขา เกิดเนื่องจากระดับความสูงแตกต่างกันของภูมิประเทศ ทำให้ลักษณะการรับและคายความร้อนที่ได้จากดวงอาทิตย์แตกต่างกัน อันเป็นผลทำให้เกิดลม

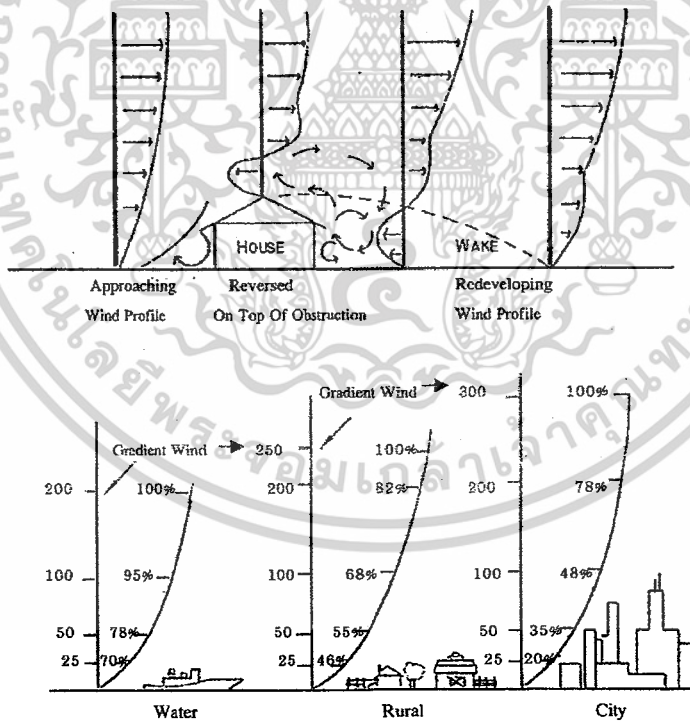
ลมมรสุมเป็นลมที่เกิดเนื่องจากตำแหน่งการ โคจรของดวงอาทิตย์ เปลี่ยนแปลงไป เช่น ในตอนที่ดวงอาทิตย์เอียงเคลื่อนไปทางทิศใต้ (มุมเดคลิเนชันเป็นลบ) บริเวณซีกโลกเหนือเป็นฤดูหนาว แต่ซีกโลกใต้เป็นฤดูร้อน ทำให้เกิดลมพัดจากซีกโลกเหนือลงมาทางซีกโลกใต้ ในทำนองเดียวกัน ถ้าดวงอาทิตย์เคลื่อนไปทางทิศเหนือ เป็นเหตุให้เกิดลมพัดจากซีกโลกใต้ไปเหนือ



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการเกิดลมประเภทต่างๆ

2.1.3 ลักษณะของลม

ลมที่เกิดขึ้นในแต่ละท้องถิ่นย่อมแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศและฤดูกาล ดังได้กล่าวมาแล้ว แต่ลักษณะการเกิดลม โดยทั่วไปมิได้มีลมพัดอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งลมท้องถิ่นส่วนใหญ่จะพัฒนาเป็นครั้งคราวในระยะเวลาสั้นๆ บางครั้งจะมีความเร็วสูงในลักษณะของลมกรรโชก นอกจากนี้ลักษณะของภูมิประเทศในแต่ละท้องถิ่นมีอิทธิพลต่อทิศทางและความเร็วของลมในระดับพื้นผิว (10 เมตร) เช่น ลมที่พัดผ่านในบริเวณที่เต็มไปด้วยอาคารสิ่งก่อสร้างย่อมแตกต่างกันในบริเวณท้องทุ่งนา หรือบริเวณที่เป็นพื้นน้ำ



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของลมเมื่อผ่านภูมิประเทศต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การเก็บข้อมูล

จากลักษณะการเกิดลมในแต่ละท้องถิ่น ซึ่งบางท้องถิ่นมีลมพัดตามฤดูกาล เป็นลมที่พัดค่อนข้างสม่ำเสมอเกือบตลอดเวลา แต่บางท้องถิ่นลมที่เกิดจะเป็นลมกรรโชกมาเป็นครั้งคราวในระยะเวลาอันสั้น เป็นผลทำให้ยุ่งยากต่อการเก็บข้อมูลลมในลักษณะนี้ นอกจากนี้ความเร็วลมที่วัดได้ในระดับความสูงต่าง ๆ จากพื้นดินย่อมได้ค่าแตกต่างกัน จากสาเหตุดังกล่าวจึงมีการกำหนดมาตรฐานในการวัดความเร็วลมขึ้น โดยทั่วไปการตรวจวัดความเร็วลมที่พื้นผิว ได้กำหนดความสูงของเครื่องวัดความเร็วลมประมาณ 10 เมตรจากพื้นดิน และการติดตั้งเครื่องวัดลมนี้จะต้องอยู่ในที่โล่ง ห่างจากอาคารหรือสิ่งก่อสร้างโดยรอบอย่างน้อย 2 เท่าของความสูงอาคารหรือสิ่งก่อสร้างนั้น ๆ สำหรับการอ่านค่าเพื่อการจดบันทึก จะทำการอ่านค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นก่อน และหลังเวลาที่ทำการวัดประมาณ 3 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยประมาณ ซึ่งเป็นลักษณะการเก็บข้อมูลลมของสถานีตรวจอากาศต่าง ๆ ทั่วประเทศ กระทำกัน

2.2.1 เครื่องวัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลมในปัจจุบันมีบริษัทต่าง ๆ ผลิตออกจำหน่ายหลายชนิดด้วยกัน พอที่จะจำแนกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท คือ

- 1) แบบใช้ไฟฟ้า
- 2) แบบใช้กลไก
- 3) แบบใช้ความดัน

แบบใช้ไฟฟ้า ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากอยู่ภายในตัวเครื่อง โดยแกนของเครื่องนี้จะต่อกับใบพัดหรือถ้วย เมื่อมีลมพัดผ่านใบพัดหรือถ้วยนี้จะหมุนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดผ่าน ดังนั้นเมื่อติดสายไฟกับเครื่องวัดทำให้สามารถอ่านความเร็วลมที่เกิดขึ้นในขณะนั้นได้

แบบใช้กลไก แบบวิธีนี้โดยมากการบันทึกจะเป็นกราฟซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่กับการหมุนของลูกเบี้ยวซึ่งจะกดลงบนกราฟ การหมุนของลูกเบี้ยวนี้เกิดจากลูกเบี้ยวซึ่งใช้วัดลมความเร็วในการหมุนของลูกเบี้ยวนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ดังนั้นตำแหน่งต่าง ๆ ที่ลูกเบี้ยวกดลงบนกราฟก็สามารถอ่านค่าเป็นความเร็วลมได้

แบบใช้ความดัน แบบนี้มีลักษณะคล้ายกับการวัดอัตราการไหลของของไหล ประกอบด้วยคอยอดให้ลมพัดผ่านสายยางเล็ก ๆ ต่อมายังเครื่องวัดความดัน เมื่ออากาศไหลผ่านคอยอดจะทำให้ความดันตรงคอยอดลดลงตามอัตราการไหลของลม ดังนั้นค่าความดันที่แตกต่างกับอากาศภายนอกนี้สามารถวัดผ่านได้

นอกจากนี้ยังอาศัยการสังเกตจากลักษณะการลอยของควันไฟ, ฝุ่น, ใบไม้, กิ่งไม้ และ ต้นไม้ โดยนำลักษณะดังกล่าวมาเทียบกับตารางที่ 2.1 จะทราบค่าความเร็วลมโดยประมาณได้

ชนิดของลม	ความเร็วลมบนพื้นฐานที่ระดับความสูง 10 m จากพื้นดิน				ผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วลมพัดผ่าน
	Knots	Ms-1	Km/hr	Miles/hr	
ลมสงบ (Calm)	1	0.2	1	1	ลมสงบคลื่นลอยขึ้นตรงๆ
ลมแผ่ว (Lighhtair)	1.0-3.0	0.3-1.5	1.0-5.0	1.0-3.0	คลื่นไหลไปแต่ศรลมยังไม่ขยับ
ลมเฉื่อย(Light breeze)	4.0-6.0	1.6-3.3	6.0-11.0	4.0-7.0	รู้สึกมีลมปะทะหน้า, ใบไม้เริ่มไหว, ศรลมเริ่มขยับ
ลมอ่อน (Gentle breeze)	7.0-10.0	3.4-5.4	12.0-19.0	8.0-12.0	กิ่งไม้เล็กๆเคลื่อนไหวไม่หยุด
ลมค่อนข้างจัด (Moderate breeze)	11.0-16.0	5.5-7.9	20-28	13.0-18.0	ธงที่เบาถูกลมพัดให้เคลื่อนไหว ฝุ่นและเศษกระดาษ พุ้งขึ้นกิ่งไม้เล็กๆโยก
ลมจัด(Fresh breeze)	17.0-21.0	8.0-10.7	29-38	19-24	ต้นไม้เล็กๆเริ่มโอนเอียงไปมาน้ำในแผ่นดินเป็นระลอก
ลมแรง(Strong breeze)	22-27	10.8-13.8	39-49	25-31	กิ่งไม้ใหญ่โยกไปมา กางร่มชกสาย โทรเลขมีเสียงครวญ
เกือบเป็นพายุ (Near bale)	28-38	13.9-17.1	50-61	32-38	ต้นไม้โอนเอียง เดินตามลมรู้สึกไม่สะดวก
พายุ(Gale)	34-40	17.2-20.7	62-74	39-46	กิ่งไม้หักระเนระนาดทั่วไป เกิดความเสียหายขึ้นต่อสิ่งก่อสร้างเล็กๆน้อยๆ หลังคาเปิด
พายุกล้า (Strong gale)	41-47	20.8-28.4	75-88	47-54	
พายุจัด (Strom)	48-55	24.5-28.4	89-102	55-63	ต้นไม้ถอนรากสิ่งก่อสร้างเสียหาย
พายุรุนแรง (Violent storm)	56-63	28.5-32.6	103-117	64-72	เกิดความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง
ไต้ฝุ่น (Typhoon)	64	32.7	118	73	ความเสียหายหนัก

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความเร็วลมที่ได้จากการสังเกตสิ่งแวดล้อม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ช่วงเวลาการเก็บข้อมูล

สำหรับข้อมูลลมที่ได้จากสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาส่วนใหญ่แล้วจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 3 ชั่วโมง เป็นเวลาที่ค่อนข้างแน่นอนคือ 01.00, 04.00, 07.00, 10.00, 13.00, 16.00, 19.00, และ 22.00 น. รวม 8 ครั้งต่อวัน นอกจากสถานีซึ่งมีสนามบินจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมง การอ่านค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ ที่กำหนดไว้นั้น จะทำการอ่านในช่วง 3 นาที แล้วเฉลี่ยเป็นค่าความเร็วในช่วงนั้น

ข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้เป็นข้อมูลซึ่งเป็นข้อมูลซึ่งจะอยู่ในบัตรคอมพิวเตอร์ ประมาณ 2 แสตนไบเศษ เป็นข้อมูลลมซึ่งบันทึกจากสถานีตรวจอากาศทั่วประเทศประมาณ 53 สถานี ตั้งแต่ปี ค.ศ .1966 ถึง 1978 รวม 12 ปี

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจอากาศส่วนใหญ่จะมีช่วงลมสงบมาก ซึ่งในการออกแบบกังหันลมเพื่อใช้ในงานนั้นจะทำงานในช่วงที่มีลมเท่านั้นและจุดสำคัญในการออกแบบกังหันคือ ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด หมายถึงการนำค่าความเร็วลมเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงมาใช้ในการออกแบบด้วยเหตุนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูลลมเพื่อใช้ในการออกแบบกังหันลมนั้น จะใช้เฉพาะช่วงเวลาที่เกิดลมเท่านั้นมาใช้วิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ข้อมูลลม ก่อนอื่นต้องทราบวิธีการหรือทฤษฎีที่ใช้ในการหาค่าของพลังงานลม เนื่องจากลมคือมวลของอากาศซึ่งเคลื่อนที่ พลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ก็คือ พลังงานจลน์ซึ่งหาได้จากทฤษฎีโมเมนตัมได้

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

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปพลังงานต่อปริมาตรคือ

$$EV = \frac{1}{2}\left(\frac{mv^2}{v}\right) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ความหนาแน่นของอากาศ และ พื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลางการหมุนของกังหันก็มีส่วนต่อพลังงานที่ได้รับ

$$P_{air} = \frac{1}{2}(\rho Av_i^3) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) พบว่ากำลังของลมขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) พื้นที่รับลมหรือพื้นที่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางการหมุน (A) และ ความเร็วลมกำลัง 3 นอกจากนี้ อุณหภูมิและความสูงซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของอากาศ แต่มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3.1 การประมาณค่ากำลังงานลมเพื่อใช้งาน

ในการประมาณค่ากำลังงานลมสุทธิเพื่อใช้งานนั้น จะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่ใช้ (C_p) ค่าประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังและอุปกรณ์ใช้งาน (No) ก่อนแต่ในการประมาณค่านี้ได้ใช้ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์หรือประสิทธิภาพของกังหันลมและอุปกรณ์ใช้งานที่มีจำหน่ายเป็นส่วนใหญ่ คือ ใช้ค่า $No = 0.6$ และค่า $C_p = 0.3$ ส่วนค่า $P=1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ใช้ค่าความหนาแน่นของอากาศที่ 15°C

2.3.2 ค่าประมาณที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบกังหันลมจำเป็นต้องทราบศัพท์เทคนิคต่าง ๆ คือ

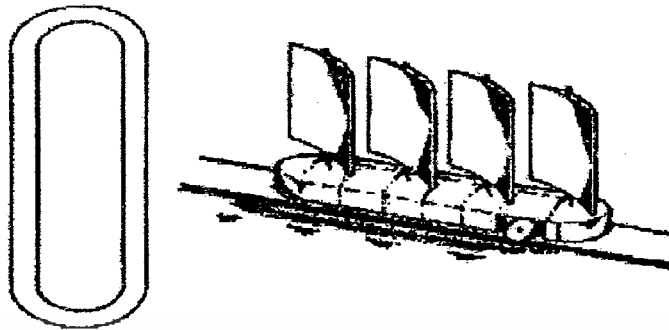
- Cut - in speed คือ ค่าความเร็วลมต่ำสุดที่กังหันเริ่มทำงาน จากที่ทดลองมานิยมใช้ค่าประมาณ 0.7 V มีไว้เพื่อให้กังหันเริ่มทำงานที่จุดนี้ ค่าแรงบิดเริ่มต้นก็คิดที่จุดนี้
- Rated - speed คือ ค่าความเร็วที่ใช้ในการออกแบบในการทำงานของกังหันลมจริง โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 1.5 V
- Cut - out speed คือ ค่าความเร็วสูงสุดที่กังหันลมยังทำงานอยู่ มีไว้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเร็วลมสูงขึ้นเกินกว่าที่กำหนด โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 3V
- ออกแบบกังหันให้ใช้ค่า (C_p) สูงสุด ซึ่งจะไม่เกิน 0.45 และไม่ควรถ่ำกว่าค่า 0.3 สำหรับในการผลิตไฟฟ้า
- ถ้าค่า $\lambda > 5$ ต้องออกแบบให้ใบกังหันมี Aerodynamic shape ที่ดี
- นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงเรื่อง Technology, initial cost และการ maintenance ประกอบไปด้วยค่า (v) ที่ใช้คำนวณ มีค่าอยู่ประมาณ 4 m/s มีลักษณะลมพัดอ่อน ๆ อยู่ตลอดเวลา

2.4 เครื่องเปลี่ยนพลังงานจากลม

แบบต่าง ๆ ของเครื่องเปลี่ยนพลังงานลม เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลม ให้มาเป็นพลังงานกล หรือ พลังงานในรูปแบบอื่น เพื่อนำมาใช้ประโยชน์นั้นมีอยู่หลายลักษณะ เช่น ทำให้เกิดการหมุน, การกระพือและการเคลื่อนที่การหมุน เช่น กังหันลมแบบต่าง ๆ

การกระพือ เช่น ใบรับลมซึ่งมีน้ำหนักถ่วงเมื่อมีลมพัดจะดันให้ใบรับลมโยกกระพือขึ้นจนถึงจุดที่ใบรับลมได้น้อย แรงลมไม่สามารถยกน้ำหนักของมันได้อีกก็จะกระพือ หรือ โยกลงเนื่องจากน้ำหนักของมัน การกระพือนี้เราสามารถต่อกลไกเพื่อใช้งานได้ เช่น ใช้สูบน้ำ เป็นต้น

การเคลื่อนที่ ที่เห็นได้ชัดที่สุด คือ เรือใบ หรือ รถใบ ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ “รถโม” ซึ่งวิ่งบนรางวงจรปิด [3]

2.5 การแบ่งแบบต่าง ๆ ของกังหันลม

กังหันลม คือ เครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนพลังงานลมซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ให้มาเป็นพลังงานกลโดยนำไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ ใช้ในการสูบน้ำ กังหันลม โดยทั่ว ๆ ไป ที่ได้มีการสร้าง และพบเห็นกันอยู่บ่อย ๆ นั้น มีรูปแบบปลีกย่อยอยู่มากมายหลายรูปแบบ ซึ่งมักแตกต่างกันในรายละเอียด และการดัดแปลงผสมผสาน เพื่อความเหมาะสมในการใช้ในการใช้งาน

2.5.1 กังหันลมถูกแบ่งตามลักษณะดังต่อไปนี้

1. แบ่งตามขนาด
2. แบ่งตามลักษณะการสร้าง

2.5.1.1 แบ่งตามขนาด แบ่งได้ 3 ขนาด คือ

ขนาดเล็ก ส่วนมากใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือใช้ในการปั้มน้ำ วัดกำลังงานออกมาได้ไม่เกิน 1 kW

ขนาดกลาง ถ้าใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้ค่าพลังงานระหว่าง 1-100 kW ขนาดใหญ่ ถ้าใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ให้ค่าพลังงานระหว่าง 100 kW ขึ้นไป

2.5.1.2 แบ่งตามลักษณะการสร้าง แบ่งได้ 4 ลักษณะ คือ

กังหันลมแกนนอนขนานกับทิศทางลม (Horizontal – Axis Rotors Head on) แกนหมุนของกังหันอยู่ในแนวระดับ และมีแนวขนานกับทิศทางลม

กังหันลมแกนนอนขวางทิศทางลม (Cross-Wind Horizontal Axis Rotors) แกนหมุนของกังหันอยู่ในแนวระดับแต่มีแนวแกนตั้งฉากกับทิศทางลม

กังหันลมแนวตั้ง (Vertical – Axis Rotors) แกนหมุนของกังหันอยู่ในแนวตั้ง ตั้งฉากกับพื้น และทิศทางของลม

กังหันลมแบบมีอุปกรณ์ช่วย (Rotors With Special Attachments) เป็นกังหันแบบธรรมดาทั่ว ๆ ไป แต่มีอุปกรณ์เพิ่มซับซ้อนยิ่งขึ้น

2.6 การทำงานและประสิทธิภาพของกังหันแบบต่าง ๆ

ในการทำงานของกังหันลมแบบต่าง ๆ จะทำงานในลักษณะเดียวกันก็คือการหมุน แต่ประสิทธิภาพที่ได้ออกมาจะไม่เท่ากัน เนื่องจากองค์ประกอบในการสร้าง ลักษณะของการหมุน ขนาด และ รูปทรง รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาติดตั้งเพิ่มเติมด้วย ก็มีช่วยเป็นอย่างมากที่จะเพิ่มความเร็วในการหมุน ขึ้นอยู่กับชนิดของกังหันแบบต่าง ๆ ด้วย

2.6.1 กังลมแกนนอนขนานกับทิศทางลม

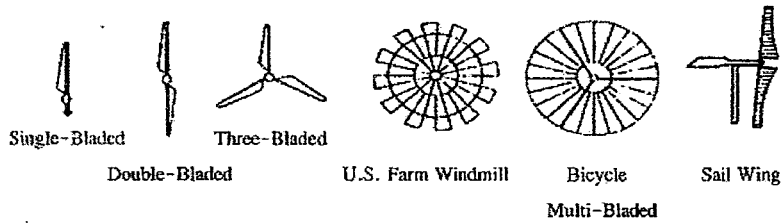
เป็นกังหันชนิดที่พบเห็นกันมากที่สุด เกือบทั้งหมดของกังหันลมที่เห็นกันทั่วไปเป็นกังหันประเภทนี้

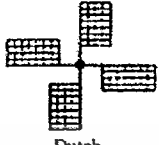


การหมุนของใบกังหัน มี 2 ลักษณะ คือ การหมุนโดยอาศัยแรงยกเป็นหลัก และการหมุนโดยอาศัยแรงต้าน

แบบอาศัยแรงยกจะมีความเร็วที่ปลายใบพัดสูงกว่าความเร็วลมได้มาก ส่วนแบบอาศัยแรงต้านหรือแรงปะทะ มักมีความเร็วปลายใบเท่า ๆ กับความเร็วลม แต่แบบอาศัยแรงยก จะเริ่มหมุนด้วยตัวเองได้ยากกว่า เมื่อความเร็วลมต่ำจำนวนใบของกังหันชนิดนี้ มีตั้งแต่ 1 ใบจนถึง 50 หรือมากกว่า ซึ่งจำนวนใบมากหรือใบน้อยนั้น ให้คุณสมบัติต่าง ๆ กันดังนี้

จำนวนใบน้อย	จำนวนใบมาก
ความเร็วรอบสูง	ความเร็วรอบต่ำ
แรงบิดต่ำ	แรงบิดสูง
เริ่มหมุนด้วยตัวเองยาก	เริ่มหมุนด้วยตัวเองง่าย
ประสิทธิภาพสูงกว่า	ประสิทธิภาพต่ำกว่า

คุณสมบัติที่กล่าว เป็นคุณสมบัติโดยทั่วไป ซึ่งแปรผันตามจำนวนใบกังหัน โดยถ้าเปรียบเทียบใบกังหันที่มีลักษณะเดียวกัน แต่มีจำนวนใบไม่เท่ากัน เราสามารถนำคุณสมบัติดังกล่าวมาใช้พิจารณาเปรียบเทียบใบ ในเบื้องต้นได้ เช่น กังหันที่มีใบแบบเดียวกัน ชนิด 2 ใบ ย่อมมีรอบหมุนสูงกว่าชนิด 4 ใบ เป็นต้น



Rotor Type	C_p Max	Comments
 Dutch	0.17	High Torque - Low RPM
 Farm	0.15	High Torque - Low RPM High Losses
 Modern Propeller	0.47	Low Torque - High RPM

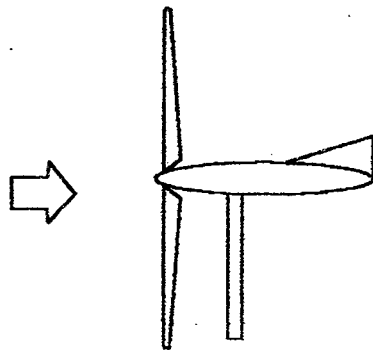
รูปที่ 2.4 ชนิดของใบกังหันแบบนอนขนานกับทิศทางลม [4]

กังหันชนิดนี้ บางแบบจะออกแบบให้อยู่นิ่ง ไม่สามารถหันหาทิศทางลมได้ แต่โดยมากมักจะออกแบบให้หันทิศทางลมได้เอง กังหันแบบเล็ก ๆ มักมีหางเพื่อช่วยในการหันหาลม ถ้าเป็นขนาดใหญ่ ๆ มักมีชุดเคลื่อนให้กังหันได้แนวกับทิศทางลม โดยอาศัยอุปกรณ์ควบคุมคอยบังคับตัวกังหันได้แนวกับทิศทางลม โดยอาศัยอุปกรณ์ควบคุมคอยบังคับตัวกังหันให้หันตามทิศที่ถูกต้อง

เมื่อความเร็วลมสูงมาก ๆ กังหันจะมีความเร็วรอบสูง แรงหนีศูนย์กลาง และ แรงต้านจะเกิดขึ้นอย่างมาก จนสามารถทำให้กังหันหรือชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ เกิดการเสียหายอย่างร้ายแรงได้ จึงมักต้องมีระบบควบคุมรอบหมุนไม่ให้สูงเกินไป โดยจะปรับมุมของใบกังหันให้รับลมน้อยลง หรือ มีระบบพับหางเพื่อให้ใบกังหันหลบลม ฯลฯ สุดแต่แต่วิธีใดจะเหมาะสมกับกังหันแบบใด การมีชุดป้องกันนี้ นับเป็นสิ่งจำเป็นซึ่งไม่ควรมองข้าม

กังหันลมแกนนอนประเภทนี้ยังแบ่งตำแหน่งของใบกังหันออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

แบบสูบลม (Up-Wind-Rotors) ชุดใบพัดจะหมุนอยู่ทางด้านเหนือลม หรือ หน้าหอ แบบนี้มีหางอยู่ทางด้านใต้ลม เพื่อช่วยในการหันทิศ

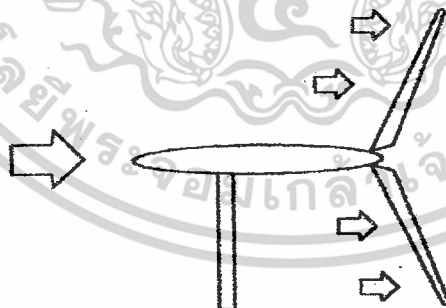


รูปที่ 2.5 กังหันลมแบบสูบลม [4]

ข้อดีคือ ลมจะพัดผ่านตัว ใบพัดก่อน แล้วจึงเลยผ่านไปถูกหอก และหางของมัน กระแสลมที่กระทำกับใบพัดจึงค่อนข้างสม่ำเสมอ ข้อเสียคือ ถ้าลมแรงมาก ๆ และใบกังหันอ่อนตัวได้หรือมีช่องว่างระหว่างใบพัดกับหอน้อยเกินไป ปลายใบพัดอาจกระทบกับหอกเกิดการเสียหายได้ จึงต้องเพื่อระยะห่างไว้พอสมควร

แบบตามลม (Down-Wind Rotors) ตัวใบพัดอาจจะหมุนอยู่ทางด้านหลังลม เนื่องจากแรงต้านที่เกิดจากตัวใบพัดจะคอยผลักดันให้กังหันอยู่ในแนวทิศทางลมเสมอ

ข้อดี คือ ใบพัดจะมีโอกาสน้อยมากที่จะปะทะกับหอก แต่เนื่องจากใบพัดหมุนอยู่ด้านหลังหอกลมจึงพัดผ่านหอกก่อน ทำให้กระแสลมพัดเข้าหาใบพัดไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะบริเวณที่หอบังอยู่ เป็นต้นเหตุให้เกิดการสั่นได้ กังหันลมแกนนอนขนานกับทิศทางลม มีแบบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 2.6 กังหันลมแบบตามลม [4]

2.6.1.1 แบบหลายใบ (multi – Blade Rotors)

ใบมักสร้างด้วยโลหะแผ่น มีใบในราวตั้งแต่ 5 ใบ ขึ้นไปก็สามารถจัดเป็นหลายใบได้ ที่แพร่หลายที่สุด เป็นชนิด American Multi-Bladed หรือ U.S.Farm Multi-Bladed มีกำเนิดในสหรัฐอเมริกา แล้วจึงแพร่หลายไปทั่วโลก แบบอื่น ๆ มีลักษณะต่างกันไปบ้างแต่มีใบเป็นโลหะแผ่นหลาย ๆ ใบ ก็จัดเข้าเป็นกังหันลมแบบหลายใบ คุณสมบัติของมัน มีรอบหมุนไม่จัด แรงบิดสูง สามารถหมุนได้เองง่าย เมื่อความเร็วลมต่ำ ประสิทธิภาพไม่สูงนัก แต่ทนทาน จึงนิยมใช้ในการสูบน้ำ เป็นกังหันชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ได้อย่างจริงจัง และคุ้มค่าพอสมควร มักพบเห็นกันอยู่บ่อย ๆ

2.6.1.2 แบบใบพัดเครื่องร่อน (Propeller Rotors)

ใบพัดชนิดนี้มีลักษณะของแพนอากาศ (Air – Foil) หมุนโดยอาศัยแรงยกเป็นหลัก มักมีใบไม่เกิน 4 ใบ ชนิด 2 และ 3 ใบ เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด มีรอบหมุนสูงมาก จึงมักเกิดปัญหาทางด้านความสั่นสะเทือน (Vibration) เนื่องจากความไม่สมดุล ปัญหาทางด้านแรงหนีศูนย์กลาง (centrifugal force) ปัญหาแรงไจโร (Gyro force) และปัญหาอื่น ๆ อีกหลายอย่าง การออกแบบสร้างจึงต้องแข็งแรง ประณีต และต้องให้น้ำหนักเบาที่สุด ควรที่จะต้องมีอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบ เช่น governor เพื่อความปลอดภัย ไม่ให้กังหันหมุนด้วยความเร็วรอบจัดเกินไปจนเกิดอันตราย การออกแบบและการสร้างจึงเกิดความยุ่งยากกว่าแบบอื่น ๆ ข้อได้เปรียบของมัน คือ มีรอบจัด และมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในบรรดากังหันลมทุกชนิด จึงนิยมใช้ในการกำเนิดไฟฟ้า แต่มีข้อเสียคือ เริ่มหมุนด้วยตัวเองยากเมื่อความเร็วลมต่ำ ฉะนั้นจึงอาจพบว่ากังหันชนิดนี้ไม่ยอมหมุนเมื่อความเร็วลมต่ำ ๆ แต่ถ้าใช้มือช่วยผลักให้เริ่มหมุนแล้วมันกลับหมุนไปได้เรื่อย ๆ ทั้งนี้ก็เพราะมันต้องการความเร็วค่าหนึ่งเพื่อให้เกิดแรงพอที่มันจะหมุนได้

2.6.1.3 แบบใบผ้า (Sail rotor)

ตัวใบจะทำด้วยผ้า มีลักษณะต่างกัน หลายแบบ เนื่องจากมีราคาถูก และสร้างได้ง่าย วัสดุที่ใช้ก็หาได้ในที่ห่างไกลความเจริญจึงมักเห็นกังหันชนิดนี้อยู่ตามชนบท เช่นตามนาเกลือ ใช้สูดระเหยน้ำ รอบหมุนไม่สูงแรงบิดดี เริ่มหมุนได้ง่าย ค่าบำรุงรักษาค่า ใช้จ่ายเทคโนโลยีแบบง่าย ๆ

2.6.2 กังหันลมแกนนอนขวางทิศทางลม

มีลักษณะเช่นเดียวกับกังหันน้ำ หรือน้ำ แต่แทนที่จะใช้น้ำกลับใช้ลมมาขับเคลื่อนลักษณะคล้ายกังหันแกนตั้งแบบ ซาโวนีอุส แต่ตั้งแกนในแนวนอน



Cross-Wind Savonius



Cross-Wind Paddles

รูปที่ 2.7 กังหันลมแกนนอนขวางทิศทางลม [5]

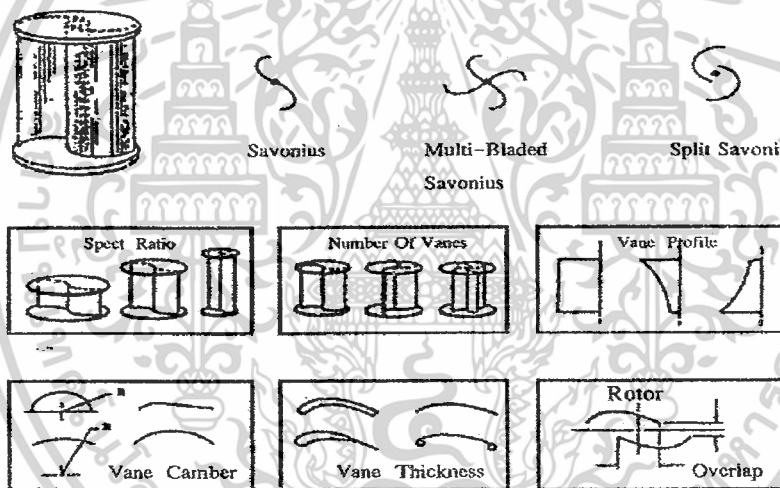
ปัญหาความยุ่งยากในการหันทิศทางลม เพราะต้องให้แกนหมุนตั้งฉากกับทิศทางลมเสมอ เนื่องจากว่าต้องหันทั้งชุดของกังหัน ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่เป็นการสะดวก ทำให้เกิดปัญหายุ่งยากและประสิทธิภาพต่ำ จึงไม่นิยมใช้กัน มีการพัฒนาน้อยมากเพราะขีดจำกัดดังกล่าว

2.6.3 กังหันลมแนวตั้ง

มีหลักการคล้ายกับกังหันลมแนวอนขวางทิศทางลมแต่ตั้งแกนหมุนในแนวตั้งแทนจึงกลับทำให้กังหันลมแบบนี้มีคุณสมบัติเด่นได้เปรียบเทียบกับกังหันแบบอื่น ๆ คือ สามารถรับลมได้จากทุกทิศทาง เป็นการตัดปัญหาในการหันหาลมได้อย่างสิ้นเชิง เมื่อตัวกังหันไม่มีการส่ายหาลม แรงใจโรก็ไม่เกิดขึ้น แรงกระทำกับชิ้นส่วน และ คลับลูบป็นก็น้อยลงทำให้เกิดความทนทานยิ่งขึ้นใบของกังหันแนวตั้ง มีหลายลักษณะ มีทั้งเป็นแผ่น เป็นรูปถ้วย หรือรูปถ้วยทรงพิเศษต่าง ๆ แบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

2.6.3.1 กังหันลมซาโวเนียส (Savonius Rotors)

ซึ่งมีลักษณะคล้ายถังผ่าซีกมาประกอบกันขึ้นเป็นใบ โดยจัดให้มีหน้าตัดของใบเป็นรูปตัว S มีจำนวนใบตั้งแต่ 2 ใบขึ้นไป บางครั้งจะต่อกันเป็นชั้น ๆ หลายชั้น ทำให้กังหันมีความสูง

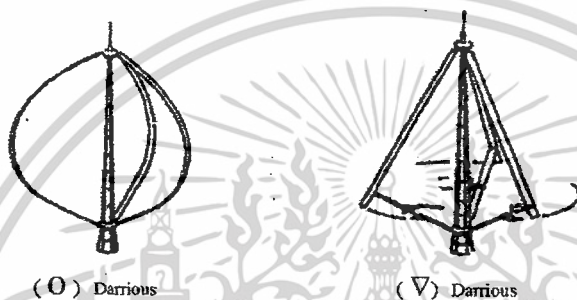


รูปที่ 2.8 กังหันลมซาโวเนียส สร้างลักษณะต่าง ๆ กัน [5]

กังหันลมซาโวเนียส หมุนโดยอาศัยแรงต้านจึงมีความเร็วรอบไม่สูง แต่แรงบิดสูงเริ่มหมุนด้วยตัวเองง่ายมากเมื่อความเร็วลมต่ำ มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ จึงนิยมใช้ในการสูบน้ำ มักตั้งบนแท่นเตี้ย ๆ ไม่สูงนัก มีการพัฒนาไปพอสมควร โดยเน้นในการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น จึงมีรูปแบบปลีกย่อย ต่าง ๆ กันหลายลักษณะ

2.6.3.2 กังหันลม แดเรียส (Darrieus Rotors)

ค้นพบโดย G.J.M. Darrieus ประเทศฝรั่งเศส ในปี พ.ศ. 2463 ได้รับการพัฒนามา โดยตลอด จนในปัจจุบัน กำลังเป็นคู่แข่งที่สำคัญของกังหันลมแบบใบพัดเครื่องบิน กังหันลมแดเรียส อาศัยแรงยกเป็นตัวขับเคลื่อน ใบกังหันที่มีภาคตัดเป็นแพนอากาศ มีประสิทธิภาพสูงเกือบเท่าแบบใบพัดเครื่องบิน อีกทั้งยังมีรอบสูง ทำให้กำลังต่อน้ำหนักต่อค่าใช้จ่ายสูง รับลมได้ทุกทิศทางโดยไม่ต้องสายหาลม จากคุณสมบัติที่ดีเหล่านี้เอง ส่งผลให้กังหันแดเรียสได้รับความสนใจพอ ๆ กับกังหันลมแบบใบพัดเครื่องบิน โดยเฉพาะในการกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 กังหันลมแดเรียส (Darrieus Rotors) [5]

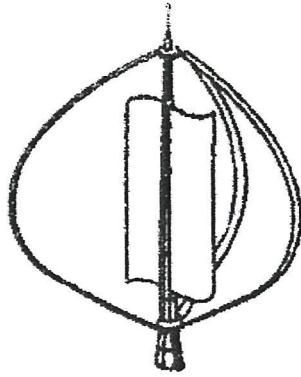
ลักษณะการสร้าง คล้ายกับใบของเครื่องบิน จึงมักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า กังหันลมแบบเครื่องบิน ใบของมันมักสร้างในรูป พาราโบลา (parabolic shape) หรือ ลักษณะของวงกลม ϕ , สามเหลี่ยม Δ , รูปตัว Y และ สี่เหลี่ยม มีจำนวนใบตั้งแต่ 1 ใบ, 2 ใบ, 3 ใบหรือมากกว่า

เนื่องจากเป็นกังหันแบบอาศัยแรงยก การเริ่มต้นด้วยตัวเอง จึงเป็นไปได้ยากเขาจึงใช้กังหันลมที่สามารถเริ่มหมุนด้วยตัวเองได้ง่ายมาติดพ่วงร่วมแกนกับแบบแดเรียส เพื่อช่วยหมุนในช่วงเริ่มต้น กังหันซาโวนีเยสมีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ และนิยมติดคู่กับแบบแดเรียส หรือมีฉะนั้น ก็ต้องใช้ต้นทุนกำลังจากภายนอกมาช่วยในการเริ่มหมุน ทำให้ราคาของกังหันสูงขึ้น

2.6.3.3 กังหันลมแบบ แมกนัส (Magnus Effect Rotors)

รูปร่างที่ไม่น่าเรียกกันว่าเป็นกังหันลม มีหลักการค่อนข้างแปลก คือ จะประกอบไปด้วยทรงกระบอกหมุนติดตั้งบนล้อเลื่อน การหมุนของทรงกระบอกก็โดยอาศัยกำลังจากการหมุนของล้อเลื่อนเมื่อรถวิ่งผ่านกระแสลม กระแสลมที่วิ่งผ่านทรงกระบอกจะมีการไหลหักเหไป เป็นผลให้เกิดความดันแตกต่างรอบทรงกระบอก จึงเกิดเป็นผลให้รถวิ่งและทรงกระบอกหมุนไปเรื่อย ๆ เราสามารถนำกำลังมาใช้โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้กับเพลลาของรถ และให้รถวิ่งไปบนรางหลักการนี้เป็นหลักการของ มาดราส

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



Savonius / Darrius

รูปที่ 2.10 กังหันแควเรียส ติดตั้งร่วมกับแบบ ซาโวเนียส[5]
 ส่วนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับทรงกระบอกหมุนในกระแสลม แล้วทำให้เกิดแรง
 ขยับเคลื่อนนั้น เรียกว่า The Magnus Effect.



รูปที่ 2.11 หลักการของกังหันลมแมกนัส และการนำไปใช้ในการกำเนิดไฟฟ้า [6]

เนื่องจากแนวความคิดในการนำมาใช้งานจริงนั้น มีปัญหาเกิดขึ้นมากในทางปฏิบัติยากที่จะทำให้มีประสิทธิภาพสูง และ มีความสะดวกในการใช้งาน แนวความคิดของกังหันลมแบบแมกนัสนี้ จึงเป็นเพียง แนวความคิดหรือทฤษฎีที่เป็นไปได้ แต่ไม่อาจนำมาใช้ให้เกิดประสิทธิผลเป็นอย่างดีได้

2.6.4 กังหันลมแบบมีอุปกรณ์ช่วย

กังหันลมชนิดนี้ เป็นกังหันลมแบบธรรมดาทั่ว ๆ ไป เพียงแต่มีอุปกรณ์ หรือ ชิ้นส่วนเพิ่มเติมเพื่อช่วยให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เป็นความก้าวหน้าหนึ่งของกังหันลม ซึ่งเป็นความพยายามของวิศวกร และนักวิทยาศาสตร์ ที่พยายามนำเอาความรู้ในด้านต่าง ๆ มาประยุกต์เข้าด้วยกันจะสังเกตเห็นได้ว่ากังหันประเภทนี้เป็นการนำเอาความรู้พื้นฐานมาดัดแปลงแก้ไขประกอบกันขึ้นในแนวทางที่ผู้ออกแบบแต่ละคนจะเห็นว่า เป็นวิธีที่ดี

หลักการและตัวอย่างกังหันประเภทนี้ มีดังนี้ คือ

2.6.4.1 ใช้อุปกรณ์ที่ใช้ มักเป็นพวก Diffuser, Concentrator หรือ Venturi ลักษณะเป็นปล่องรับลม ปลายบานออก หรือลู่เข้า ตัวกังหันจะติดตั้งในตำแหน่งที่มีความเร็วลมสูงภายในปล่องหรือช่องทางผ่านของลม

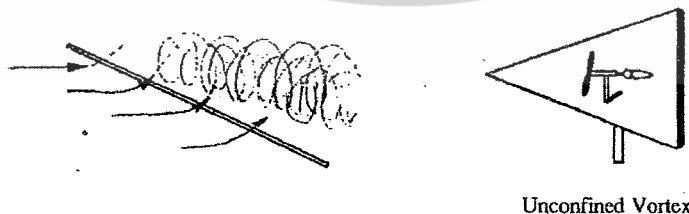


รูปที่ 2.12 แบบต่าง ๆ ของอุปกรณ์เพิ่มความเร็วให้กับกังหันลม[6]

2.6.4.2 ใช้อุปกรณ์เพิ่มการหมุนวน (Vortex)

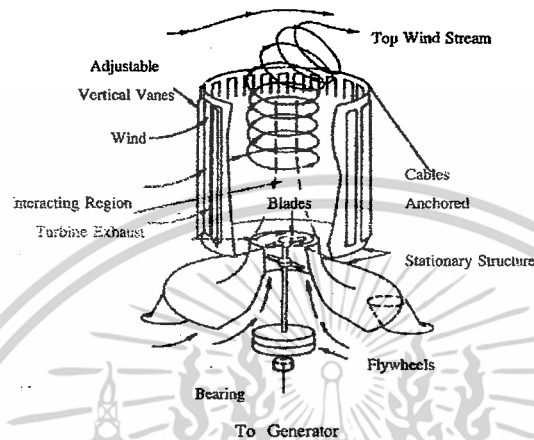
ลมที่ผ่านกังหัน จะช่วยเสริมให้ใบกังหันมีการหมุนที่แรงขึ้น การกำเนิดลมวนมีวิธีการอยู่หลายวิธีด้วยกัน คือ

ใช้แผ่นปีกสามเหลี่ยม (Delta) ติดตั้งให้ทำมุมกับทิศทางลมแตกต่างระหว่างผิวปีกด้านที่ปะทะลม และด้านที่ไม่โดนลมปะทะ จะทำให้กระแสลมที่ผ่านปีก เกิดการหมุนวนขึ้น ถ้านำกังหัน ไปติดตั้งไว้ที่บริเวณที่เกิดลมวน จะทำให้กังหันมีกำลังเพิ่มขึ้นอีก



รูปที่ 2.13 แสดงการม้วนตัวของลมเมื่อผ่านปีกรูปสามเหลี่ยม [6]

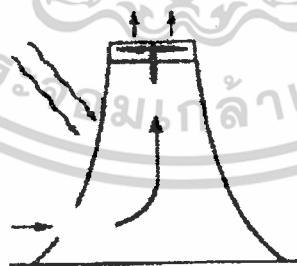
แบบทอลมวน (Vortex Tower) ลมจะพัดผ่านช่องของหอ ซึ่งจะเปิดทางด้านที่ลมเข้า ได้สะดวกที่สุด และมีครีบบังคับให้ลมผ่านเข้าในหออยู่ในอาคารหมุนวนด้านล่างของหอก็มีทางให้ลมผ่าน ขึ้น ไปยังด้านบนของหอ เมื่อประกอบกันเข้าจะทำให้กระแสลมวนภายในหอหมุนตัวขึ้นสู่ด้านบน เกิดเป็นแรงดูดวน ดูดึงกังหันที่อยู่ใต้อาคารด้านล่างหมุนด้วยความเร็วสูง



รูปที่ 2.14 กังหันแบบทอลมวน แสดงชิ้นส่วนประกอบและการเคลื่อนที่ของลม [6]

2.6.4.3 อาศัยพลังงานรูปแบบอื่นมากระตุ้นให้เป็นพลังงานลม

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ ตามปกติแล้ว พลังงานลมก็เกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่แน่นอนแต่ในระบบนี้ เราใช้แสงอาทิตย์โดยตรง คือ จะทำให้ปล่องที่สามารถรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ดี จากนั้นภายในปล่องจะมีช่องให้ลมผ่านทางด้านล่าง อากาศภายในปล่องจะรับความร้อนผ่านผนังปล่องและขยายตัวลอยขึ้นสู่ยอดปล่อง ผ่านใบกังหัน ทำให้กังหันหมุน



Sunlight

รูปที่ 2.15 กังหันลมอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ที่เพิ่มเติมให้กับกังหันจะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันเพิ่มสูงขึ้นมากก็ตาม แต่ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ประกอบเหล่านี้ก็มีราคาสูงมากเช่นกันเพราะอุปกรณ์ที่ใช้มีโครงสร้างที่ใหญ่โตเสียยิ่งกว่าตัวกังหัน จึงทำให้กังหันประเภทนี้ไม่ได้เปรียบกังหันแบบธรรมดา

2.7 พลังงานลมในประเทศไทย [8]

2.7.1 การจัดทำแผนที่แหล่งศักยภาพพลังงานลมประเทศไทย

ลมเป็นทรัพยากรธรรมชาติ ชนิดหนึ่งที่สามารถแปรรูปเป็นพลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานอื่นได้สำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตลมมรสุมที่มีลมตะวันออกเฉียงเหนือ และ ลมตะวันตกเฉียงใต้พัดผ่านในเดือน พฤศจิกายน – กุมภาพันธ์และ เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม จึงถือว่ามีลมแรงเกือบทั้งปีการจัดทำแผนที่แหล่งศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทยได้เคยทำการศึกษาและจัดทำอย่างเป็นทางการมาแล้วจำนวน 3 ครั้งดังนี้

(1) ปีพ.ศ 2518 จัดทำโดย กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน (สำนักงานพลังงานแห่งชาติ) ในการจัดทำใช้ความเร็วลมเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อแสดงศักยภาพพลังงานลมที่มีกำลังสูงและกำลังปานกลางทั่วประเทศไทย

(2) ปีพ.ศ 2524 จัดทำโดยความร่วมมือจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี) โดยใช้ข้อมูลลมจากกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 53 สถานี ที่มีช่วงเวลาเก็บข้อมูล 13 ปี (ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2509 – 2521) ในการจัดทำใช้ข้อมูลความเร็วเฉลี่ยและปรับระดับความสูงให้เป็นความสูงมาตรฐานที่ 10 เมตร โดยใช้กฎของกำลัง (Power Law)

(3) ปี พ.ศ. 2527 จัดทำโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี) [3] โดยได้รับทุนสนับสนุนจาก USAID ตรวจสอบและกำกับโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ในการจัดทำใช้ข้อมูลความเร็วลมจากกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 62 สถานี ที่มีระยะเวลาเก็บข้อมูล 17 ปี (พ.ศ. 2509 – 2525) แผนที่ศักยภาพพลังงานลมแสดงความเร็วและกำลังลมซึ่งปรับระดับโดยใช้ Logarithmic Law ที่ความสูง 10 เมตร รวมช่วงลมสงบและไม่รวมช่วงลมสงบ

แผนที่ศักยภาพพลังงานลมนี้เป็นการวิเคราะห์และจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลม โดยใช้โปรแกรม WindMapTM ซึ่งอ้างอิงแบบจำลองคณิตศาสตร์ Numerical Objective Analysis of Boundary Layer (NOABL) ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลความถี่ทิศทางและความเร็วลม (Wind Rose) ข้อมูลแบบจำลองดิจิทัลความสูงของภูมิประเทศ (Digital Elevation Model Data - DEM) ความขรุขระของผิวพื้นที่ความละเอียด 1 x 1 กิโลเมตร ตัวแปรความทรงตัวของสภาพอากาศรวมทั้งข้อมูลลมชั้นบนร่วมในการวิเคราะห์ด้วย ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ก็คือความเร็วและกำลังลมที่ความสูงระดับ

10 30 และ 50 เมตรตามลำดับ ผลที่ได้จากโปรแกรม WindMapTM จะถูกปรับแต่ง (Reclass) โดยโปรแกรม IDRISITM ให้สามารถแสดงแผนที่ศึกษาภาพพลังงานลมของประเทศไทย

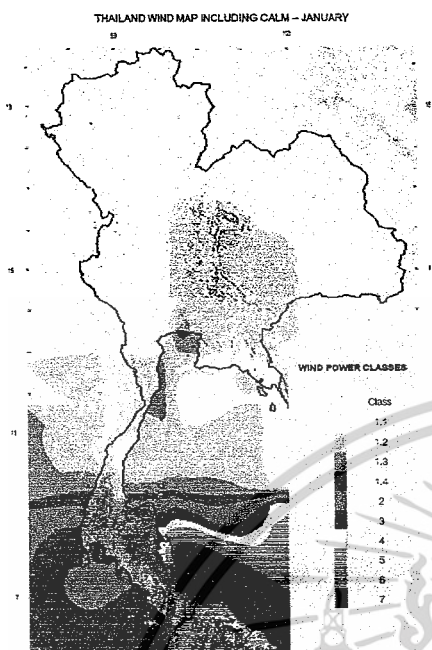
2.7.2 ข้อมูลความเร็วลมในประเทศไทย

ตารางที่ 2.2 สรุปแหล่งข้อมูลที่ทำการรวบรวม

ประเภทข้อมูล	หน่วยงาน	จำนวนสถานี	วิธีการบันทึกข้อมูล	ประเภทข้อมูล	จำนวนปี ค.ศ.*
สถานีตรวจอากาศผิวพื้น	กองตรวจอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา	76	Manual	ดิจิทัล	15 ปี (1983-1998)
	กองอุตุนิยมวิทยาอุทก กรมอุตุนิยมวิทยา	10	Manual	ดิจิทัล	15 ปี (1983-1998)
	กองอากาศเกษตร กรมอุตุนิยมวิทยา	14	Manual	ดิจิทัล	15 ปี (1983-1998)
	กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน	18	Automatic	ดิจิทัล	2 ปี (1998-1999)
	กองทัพอากาศ	15	Manual	ดิจิทัล	1-3 ปี (1996-1998)
	กฟผ.	1	Automatic	ดิจิทัล	1-3 ปี (1996-1998)
สถานีตรวจอากาศชั้นบน	กองตรวจอากาศ กรมอุตุนิยมวิทยา	11	Manual/Auto	ดิจิทัล	15 ปี (1983-1998)
เรือเคินทะเล US NAVY MARINE	NCDC	18**	Manual	ดิจิทัล	115 ปี (1854-1969)
ข้อมูลดาวเทียม DMSP	JPL, NOAA	28**	Automatic	ดิจิทัล	6 ปี (1990-1996)
หุ่นลอยในทะเล	สถานีวิจัยแห่งชาติ (NRCT)	11	Automatic	ดิจิทัล	3-6 ปี (1993-1998)
สถานีจุดเจาะก๊าซธรรมชาติในทะเล	UNOCAL (THAILAND) LTD.	1	Automatic	ดิจิทัล	9 ปี (1990-1999)
สถานีประกาศการ	กรมอุตุนิยมวิทยา (กองทัพอากาศ)	9	Manual	สมุดบันทึก	11 ปี (1988-1999)

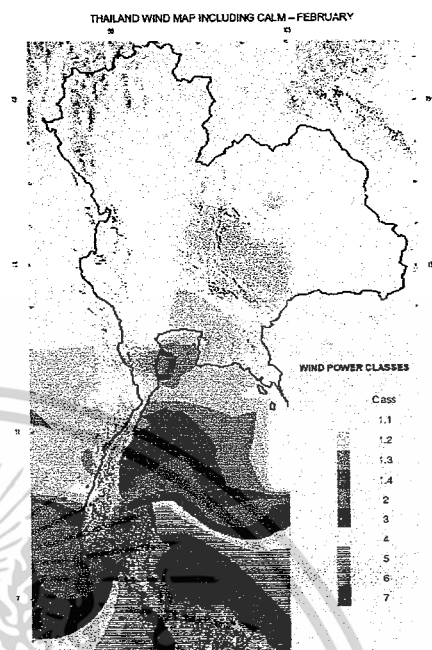
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยในแต่ละเดือน



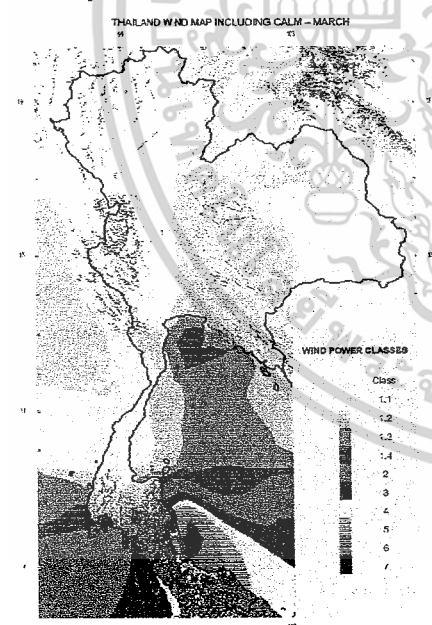
รูปที่ 2.16 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงมกราคม - มกราคม

รูปที่ 2.16 เดือน มกราคม



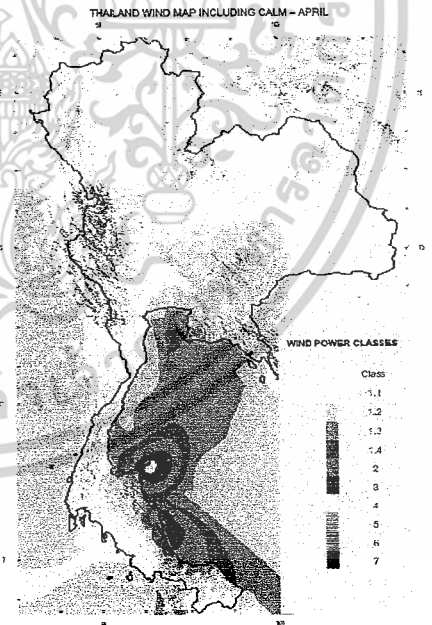
รูปที่ 2.17 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงกุมภาพันธ์ - กุมภาพันธ์

รูปที่ 2.17 เดือน กุมภาพันธ์



รูปที่ 2.18 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงมีนาคม - มีนาคม

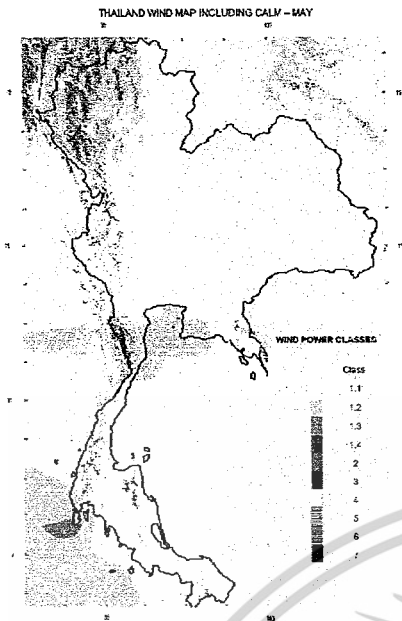
รูปที่ 2.18 เดือน มีนาคม



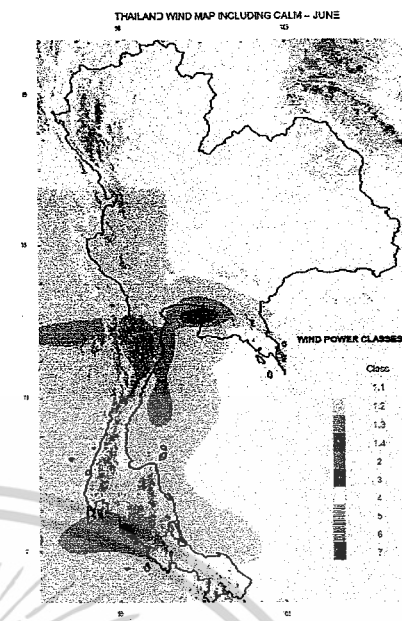
รูปที่ 2.19 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงเมษายน - เมษายน

รูปที่ 2.19 เดือน เมษายน

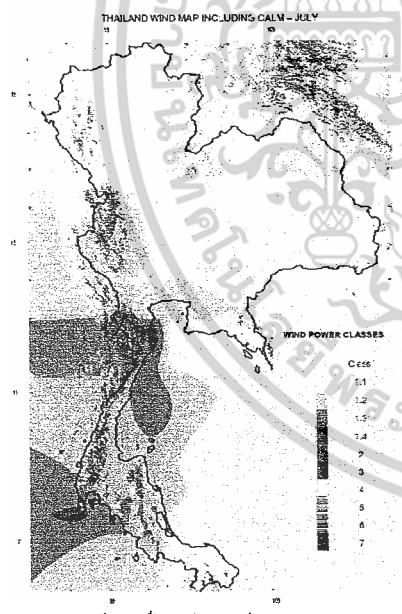
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



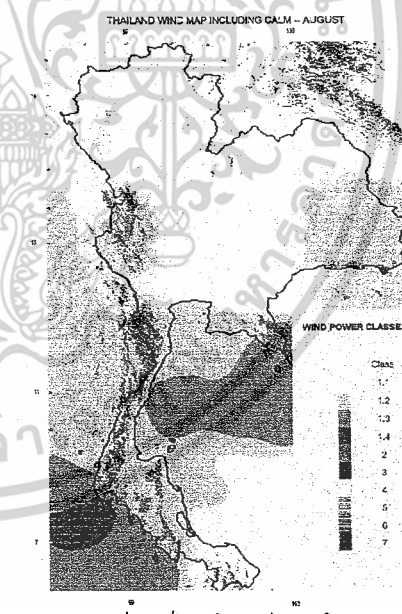
รูปที่ 2.20 เดือน พฤษภาคม



รูปที่ 2.21 เดือน มิถุนายน

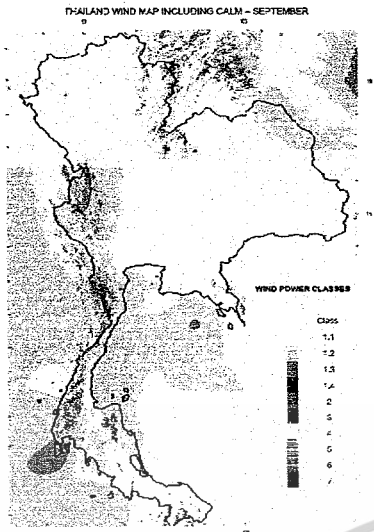


รูปที่ 2.22 เดือน กรกฎาคม



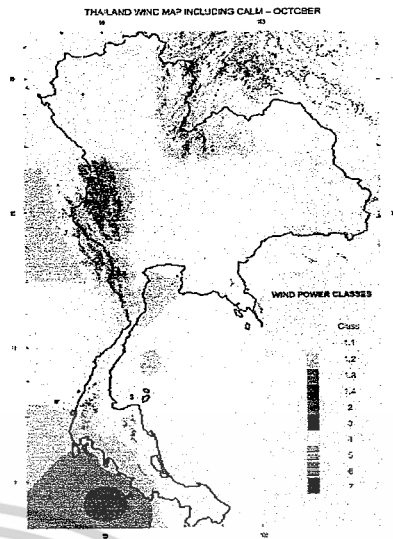
รูปที่ 2.23 เดือน สิงหาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แผนที่แสดงกำลังลมในประเทศไทย - กันยายน

Screen	THAILAND WIND POWER CLASSES						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2	3
10 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
20 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
30 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
40 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
50 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8

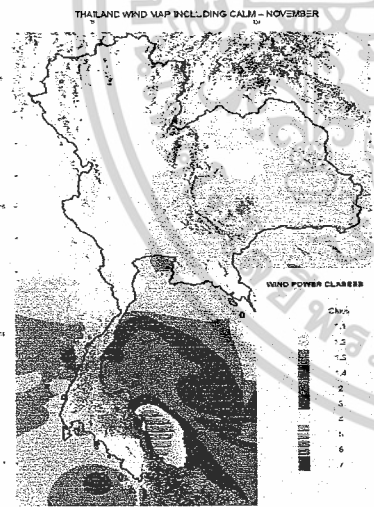


รูปที่ 2.25 แผนที่แสดงกำลังลมในประเทศไทย - ตุลาคม

Elevation	THAILAND WIND POWER CLASSES						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2	3
10 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
20 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
30 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
40 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
50 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8

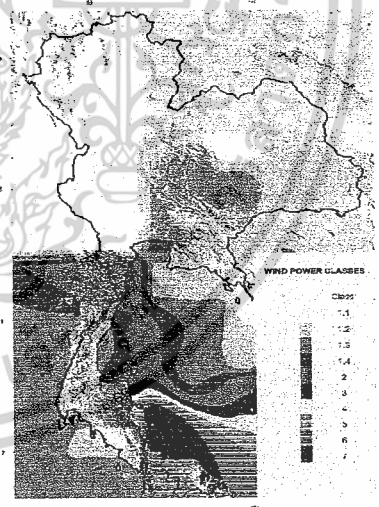
รูปที่ 2.24 เดือน กันยายน

รูปที่ 2.25 เดือน ตุลาคม



รูปที่ 2.26 แผนที่แสดงกำลังลมในประเทศไทย - พฤศจิกายน

Elevation	THAILAND WIND POWER CLASSES						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2	3
10 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
20 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
30 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
40 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
50 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8



รูปที่ 2.27 แผนที่แสดงกำลังลมในประเทศไทย - ธันวาคม

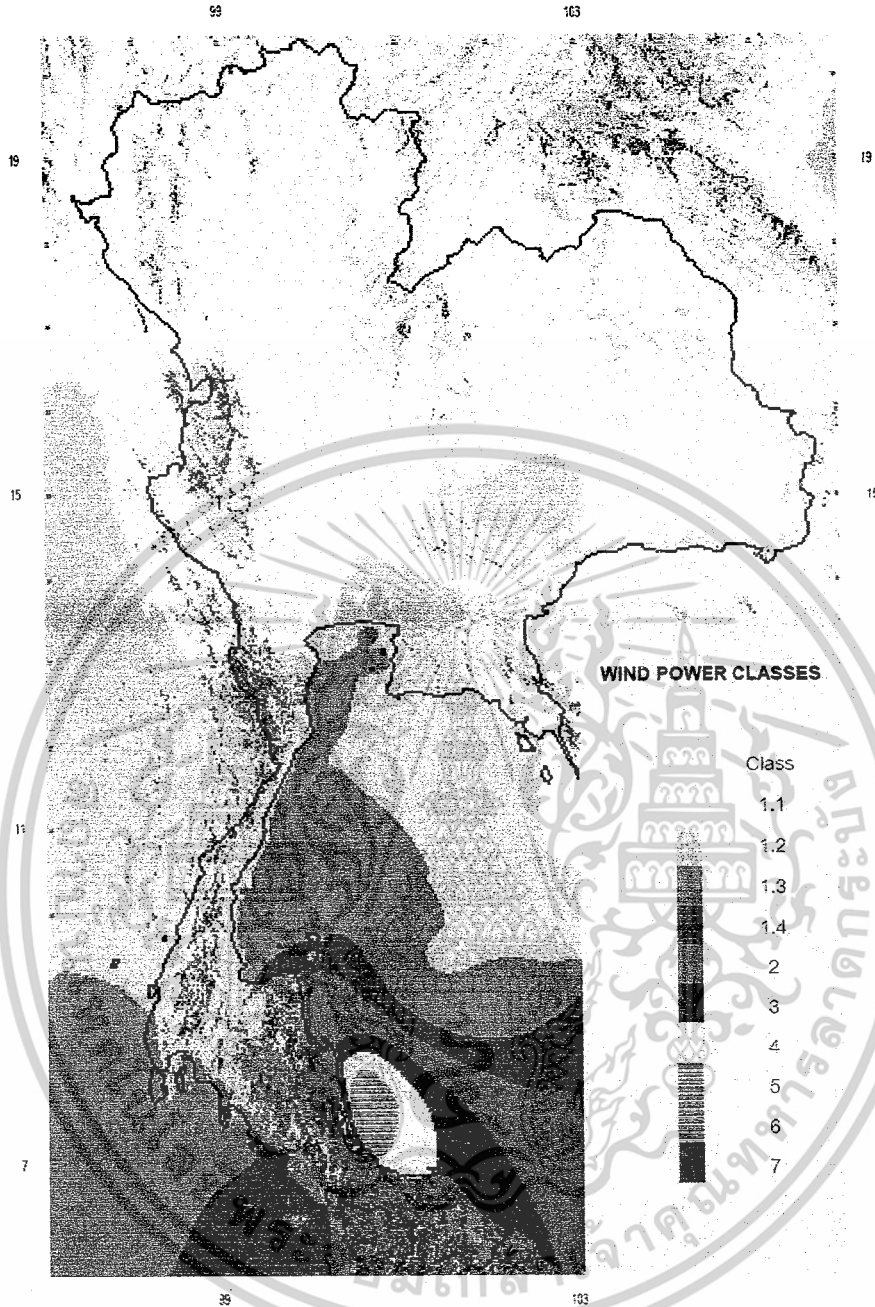
Elevation	THAILAND WIND POWER CLASSES						
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2	3
10 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
20 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
30 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
40 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8
50 m	0.0	2.5	3.0	4.0	5.1	6.6	8.8

รูปที่ 2.26 เดือน พฤศจิกายน

รูปที่ 2.27 เดือน ธันวาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THAILAND WIND MAP INCLUDING CALM – ANNUAL



THAILAND WIND POWER CLASSES

Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0
	W/m ²	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2
	W/m ²	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640
50 m	m/s	0	3.5	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8
	W/m ²	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800

รูปที่ 2.28 แผนที่ศักยภาพพลังงานลมรวมช่วงลมสงบ – เฉลี่ยรายปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวคิดในการออกแบบกังหันลมแนวนอน

3.1 ทฤษฎีพลังงานจลน์

ลมคืออากาศที่เคลื่อนที่โดยมีค่าของความหนาแน่นค่าหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วทำให้เกิดเป็นพลังงานลม พลังงานลมเป็นพลังงานจลน์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศ เมื่อพิจารณาในรูปแบบของสมการพลังงาน โดยพิจารณาว่ามวลถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะก่อให้เกิดพลังงานดังนี้

$$KE_{wind} = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

3.2 ทฤษฎีกำลังลม

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศมีหน่วยเป็นมวลต่อหน่วยเวลาดังนั้นในสมการ(3.1) อาจเขียนในรูปแบบของกำลังได้เป็น

$$P_{wind} = \frac{1}{2} m V_i^2 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

จากสมการความต่อเนื่องของการไหล

$$m = \rho A V_i \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

พื้นที่หน้าตัดของวงกลม

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

ความหนาแน่นของอากาศสามารถหาได้จากความดันบรรยากาศ ค่าคงที่ของแก๊สและอุณหภูมิ [9]

$$\rho = p/(RT) \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

ถ้ากังหันทำงานที่ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ ($1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) อุณหภูมิ 30 องศา และค่าคงที่ของก๊าซสำหรับอากาศเป็น 0.2869 kJ/kg.K ความหนาแน่นของอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$\rho = 1.165 \text{ kg/m}^3$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.2) จะได้

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

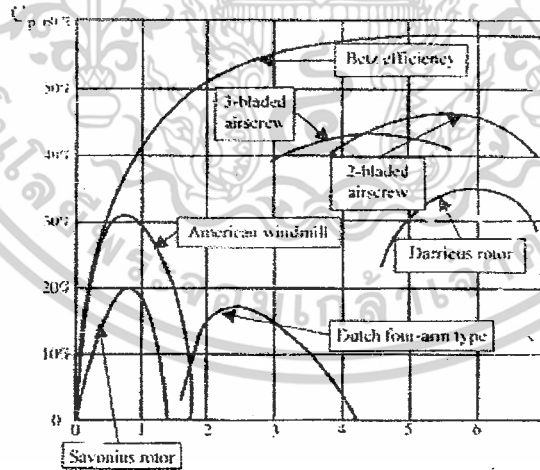
3.3 ทฤษฎีกำลังใบพัด

กำลังใบพัดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ใบพัด ดังนั้นความเร็วลมที่เข้าและออกจากใบพัดมีค่าน้อยกว่าความเร็วลมที่เข้าสู่ใบพัดสมมติว่าลมที่ไหลเข้าและไหลออกจากใบพัดเป็นแบบลามินาร์สามารถสรุปได้สมการ(3.7)

$$P_{blade} = \frac{1}{2} m_{av} V_i^2 - \frac{1}{2} m_{av} V_e^2 \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

เมื่อ m_{av} คืออัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยที่ผ่านใบพัดโดย

$$m_{av} = \rho A \frac{(V_i - V_e)}{2} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$



รูปที่ 3.1 ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดต่างๆ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทน m_{av} ลงในสมการ(3.7)ได้

$$P_{blade} = \frac{1}{4} \rho A (V_i - V_e)(V_i^2 - V_e^2) \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

อย่างไรก็ตามพลังงานลมถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้เพียงบางส่วนเท่านั้นเนื่องจากแรงเสียดทานและลักษณะการไหลของอากาศภายในใบพัดเป็นแบบปั่นป่วนดังนั้นจึงต้องมีการทดลองเพื่อหาค่าตัวบ่งชี้สัดส่วนของกำลังที่ได้จากใบพัดหรือเรียกว่า“สัมประสิทธิ์กำลัง”(Cp) โดยสามารถคำนวณได้โดย

$$C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}} \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

เมื่อแทนสมการ (3.6)ลงในสมการที่ (3.10)จะได้

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho C_p A V_i^3 \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

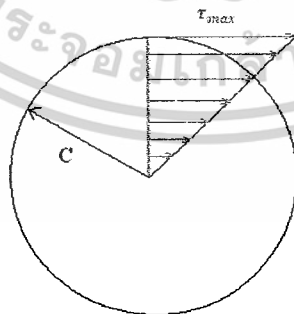
นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังอาจหาได้จากการทดลองกักกันในอุโมงค์ลมด้วยความเร็วลมต่างๆหรืออาจได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังและอัตราส่วนความเร็วใบพัดต่อความเร็วลม, λ [11] ดังแสดงในรูปที่ 3.1

อัตราส่วนความเร็วใบพัดต่อความเร็วลม, λ หาได้จาก

$$\lambda = \frac{U}{V_i} = \frac{\omega(D/2)}{V_i} \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

นอกจากนี้กำลังของใบพัดอาจคำนวณได้จาก

$$P_{blade} = T_{blade} \omega \quad \dots\dots\dots(3.13)$$



รูปที่ 3.2แสดงเวกเตอร์การกระจายความเค้นเฉือนสูงสุดบนทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบเพลลา

คำนวณความเสียหายบนเพลลาแกนหมุนจากรูปที่ 3.2

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max} c}{J} : T_{\max} = T_{\text{blade}} \quad \text{.....(3.14)}$$

โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วของทรงกระบอกตันสามารถหาได้โดย

$$\begin{aligned} J &= \int_A \rho^2 dA = \int_0^c \rho^2 (2\pi\rho d\rho) \\ &= 2\pi \int_0^c \rho^3 d\rho = 2\pi \left(\frac{\rho^4}{4} \right) \Big|_0^c \\ &= \frac{\pi}{2} c^4 \end{aligned}$$

เมื่อเพลลารับแรงบิดภายใต้การเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0 ถึง T_{\max} การคิดค่าความปลอดภัยจะใช้ทฤษฎีของไซลเดอร์เบิร์ก [12] คือ

$$\frac{1}{N} = \frac{\tau_m}{\tau_y} + \frac{k f_s \tau_a}{\tau_n} \quad \text{.....(3.15)}$$

โดยที่ $\tau_y = 0.6\sigma_y$ = ความแรงเฉือนครากจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด [13]

$$\tau_m = \frac{T_m c}{J} = \text{ความเค้นเฉือนเฉลี่ย}$$

$$\tau_a = \frac{T_a c}{J} = \text{ความเค้นเฉือนส่วนเปลี่ยนแปลง}$$

$$k f_s = 1 + q(k_r - 1) = \text{ตัวประกอบความหนาแน่นของความเค้นเฉือนจริง}$$

$$T_m = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \text{แรงบิดเฉลี่ย}$$

$$T_a = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} = \text{แรงบิดส่วนเปลี่ยนแปลง}$$

$$q = 0 = \text{ความไวรอยเงจะมีค่าเท่ากับศูนย์}$$

$$\tau_n = k_a k_b k_c \sigma'_n = \text{ความต้านแรงทนทานสำหรับแรงเฉือนซึ่งสามารถหาได้}$$

$$\text{เมื่อ } \sigma'_n = 0.5\sigma_u = \text{ขีดจำกัดความทนทานสำหรับเหล็กกล้าเหนียว}$$

$$\text{ซึ่ง } \sigma_u < 1380 \text{MPa}$$

$$k_a = \text{ตัวประกอบผิวหาได้จากรูปที่ 3.3}$$

$$k_b = \text{ตัวประกอบของขนาด}$$

$$k_c = \text{ตัวประกอบของแรง}$$

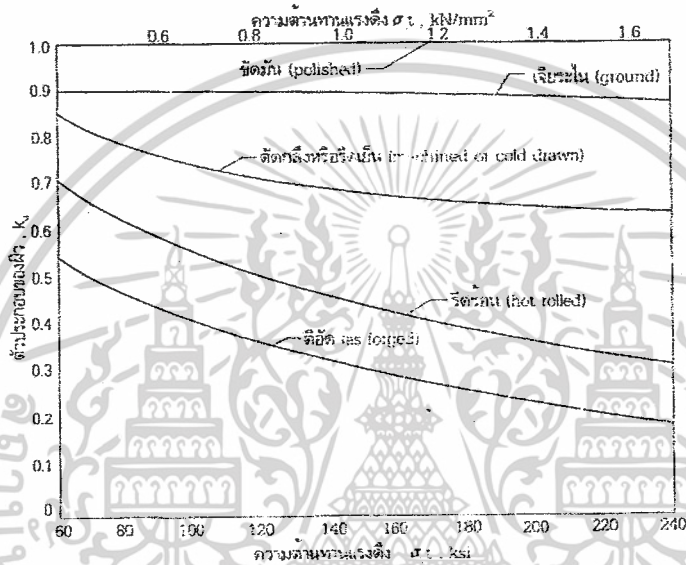
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบของขนาดมีดังนี้

- $k_b = 1.00$ สำหรับ $2c < 8$ มิลลิเมตร
- $k_b = 0.85$ สำหรับ $8 < 2c < 50$ มิลลิเมตร
- $k_b = 0.75$ สำหรับ $2c > 50$ มิลลิเมตร

ตัวประกอบของแรงมีค่าดังนี้

- $k_c = 1.00$ สำหรับการตัด
- $k_c = 0.80$ สำหรับการดึงหรือกด
- $k_c = 0.60$ สำหรับการเลื่อน



รูปที่ 3.3 กราฟตัวประกอบของผิวสำเร็จสำหรับเหล็กกล้า [12] เมื่อไม่มีรอยเจาะ

โดยในที่นี้จะใช้ตัวประกอบของแรงเป็น 0.6 พิจารณาค่าความปลอดภัยเป็น $N=3$ ดังนั้นจะสามารถหาความเค้นเหนือนที่ยอมรับได้ดังนี้

$$\frac{1}{N} = \frac{\left(\frac{T_m c}{J}\right)}{0.6\sigma_y} + (1) \frac{\left(\frac{T_a c}{J}\right)}{k_a k_b k_c (0.5\sigma_u)} \tag{3.16}$$

$$\frac{1}{N} = \frac{\left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2}\right) c}{0.6\sigma_y} + (1) \frac{\left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2}\right) c}{k_a k_b k_c (0.5\sigma_u)} \tag{3.17}$$

เมื่อแรงบิดอยู่ในช่วง 0 ถึง T_{allow} จะสามารถคำนวณหา T_{allow} ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{N} = \frac{\left(\frac{T_{\max} + 0}{2}\right)c}{0.6\sigma_y J} + (1) \frac{\left(\frac{T_{\max} - 0}{2}\right)c}{k_a k_b k_c (0.5\sigma_u) J} \quad \text{.....(3.18)}$$

$$T_{\text{allow}} = \frac{1}{N} \times \frac{2}{\left(\frac{c}{0.6\sigma_y J} + \frac{c}{k_a k_b k_c (0.5\sigma_u) J}\right)} \quad \text{.....(3.19)}$$

สามารถหาความเค้นเฉือนได้โดย

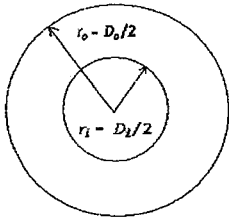
$$\tau_{\text{allow}} = \frac{T_{\text{allow}} C}{J} \quad \text{.....(3.20)}$$

เมื่อเปรียบเทียบความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนเพลลา แกนหมุนและความเค้นเฉือนที่ยอมรับได้จะสามารถพิจารณาความเสียหายได้ โดยโครงสร้างจะปลอดภัยเมื่อ $\tau_{\text{max}} < \tau_{\text{allow}}$

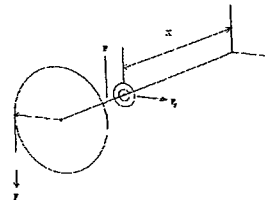
3.5 การคำนวณอายุการใช้งานของแบริ่ง

เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน Bearing จะต้องคำนวณช่วงอายุการใช้งานโดยสมมติว่าลมกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของใบพัดและติดตั้ง Bearing เพียงตัวเดียวดังรูปที่ 3.5 ซึ่งทำให้ Bearing รับแรงมากกว่าความเป็นจริงเพื่อคำนวณการใช้งานในช่วงที่ปลอดภัยที่สุดสามารถหาแรงที่กระทำ ตามแนวแกนและตามแนวรัศมีได้โดย

แรงตามแนวแกนสามารถคำนวณได้โดยการนำค่าแรงบิดที่ความเร็วลมสูงสุดมาหาค่าแรงที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเส้นรอบวงรอบนอกของ Bearing และสมมติว่าใบพัดหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ จะได้แรงตามแนวแกน



รูปที่ 3.4 รัศมีวงในและรัศมีวงนอกของแบริ่ง



รูปที่ 3.5 แผนภาพวัตถุอิสระเมื่อพิจารณาที่กระทำต่อแบริ่ง

$$F_a = \frac{T_{blade}}{\frac{D_o}{2}} \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

$$\text{Or } F_a = \frac{1}{2} C_d \rho A V_i^2 \quad \dots\dots\dots(3.22)$$

แรงตามแนวรัศมีที่กระทำต่อ Bearing หาได้โดยที่แรงตามแนวรัศมี

$$F_r = \frac{T_{wind}}{x} \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

จาก

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_i^3 = T_{wind} \omega \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$T_{wind} = \frac{1}{2} \frac{\rho A V_i^3}{\omega} = \frac{\rho A V_i^3}{4\pi n} \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

ในที่นี้เลือกใช้ Rolling Bearing เนื่องจาก

1. รับแรงตามแนวรัศมีและรับแรงตามแนวแกนได้ดี
2. ง่ายต่อการดูแล
3. ใช้สารหล่อลื่นน้อย
4. มีขนาดเล็กซึ่งเหมาะกับการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อายุการใช้งานสามารถคำนวณได้ [14]

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

เมื่อ L_{10} คือ อายุประเมินหมายถึงจำนวนรอบหรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วคงที่ (ซึ่งแปรถึง 90%จากจำนวนนี้สามารถหมุนได้โดยไม่เกิด ความเสียหายเนื่องจากการล้า)

C คือ ค่าคงที่ที่ที่เปรียบเสมือนมีแรงขนาด c มากระทำต่อ bearing เมื่อ bearing หมุนครบ 1 ล้านรอบ

ถ้าเป็น Ball Bearing; $a = 3$

ถ้าเป็น Roller Bearing; $a = 1/3$

- แรงสมมูล

ในการใช้งานจริง โรลลิ่งแบร์ริงอาจจะรับทั้งแรงในแนวรัศมีและแนวแกนและวงแหวนใน หรือวงแหวนนอกอาจจะเป็นอันที่หมุนก็ได้ ดังนั้น เราต้องคำนึงถึง “แรงสมมูล”(Equivalent Load) โดยมีสมการดังนี้

$$\text{Equivalent Load} = P = X F_r + Y F_a \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

เมื่อ F_r คือ แรงตามแนวรัศมี (Radial Load)

F_a คือ แรงตามแนวแกน (Thrust Load)

V คือ Rotation factor

$1=V$ สำหรับวงแหวนวงในหมุนได้

$V=1.2$ สำหรับวงแหวนวงนอกหมุนได้

X คือ Radial Factor

Y คือ Thrust Factor

ค่า X และ Y จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปร่างของ Rolling Bearing, จำนวนเม็ดของ ลูกปืนขนาดของ Rolling Bearing เป็นต้น

Notes: ก่อนที่หาค่า X และ Y จากตารางที่ 1 เราต้องทราบค่า C_0 จะขึ้นกับชนิดของ Rolling bearing และขนาดของ Rolling bearing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BEARING NUMBER*	BOUNDARY DIMENSIONS						SNAP RING DIMENSIONS (inches)			MAX. FILLET RADIUS Shaft & Hsg. inch	APPROX. WEIGHT lb.	C ₁ LIMITING SPEED I rpm	C DYNAMIC LOAD RATING lb.	C ₂ STATIC LOAD RATING lb.
	BORE		O. DIAM.		WIDTH		W	S	t					
	mm	inch	mm	inch	mm	inch								
6300	10	.3937	35	1.3780	11	.4331	.125	1.562	.044	.025	.13	22000	1400	850
6301	12	.4724	37	1.4567	12	.4724	.125	1.625	.044	.040	.15	20000	1700	1040
6302	15	.5906	42	1.6535	13	.5118	.125	1.821	.044	.040	.20	18000	1930	1200
6303	17	.6693	47	1.8504	14	.5512	.141	2.074	.044	.040	.25	16000	2320	1460
6304	20	.7874	52	2.0472	15	.5906	.141	2.276	.044	.040	.34	14000	3000	1930
6305	25	.9843	62	2.4409	17	.6693	.195	2.665	.067	.040	.58	11000	3800	2550
6306	30	1.1811	72	2.8346	19	.7480	.195	3.091	.067	.040	.83	9500	5000	3400
6307	35	1.3780	80	3.1496	21	.8268	.195	3.406	.067	.060	1.07	8500	5700	4000
6308	40	1.5748	90	3.5433	23	.9055	.226	3.799	.097	.060	1.41	7500	7350	5300
6309	45	1.7717	100	3.9370	25	.9843	.226	4.193	.097	.060	1.95	6700	9150	6700
6310	50	1.9685	110	4.3307	27	1.0630	.226	4.587	.097	.080	2.50	6000	10600	8150
6311	55	2.1654	120	4.7244	29	1.1417	.271	5.104	.111	.080	3.30	5300	12900	10000
6312	60	2.3622	130	5.1181	31	1.2205	.271	5.498	.111	.080	3.81	5000	14000	10800
6313	65	2.5591	140	5.5118	33	1.2992	.304	5.892	.111	.080	4.64	4500	16000	12500
6314	70	2.7559	150	5.9055	35	1.3780	.304	6.286	.111	.080	5.68	4300	18000	14000
6315	75	2.9528	160	6.2992	37	1.4567	.304	6.679	.111	.080	6.60	4000	19300	16300
6316	80	3.1496	170	6.6929	39	1.5354	.346	7.198	.122	.080	9.53	3800	21200	18000
6317	85	3.3465	180	7.0866	41	1.6142	.346	7.593	.122	.100	11.00	3400	21600	18600
6318	90	3.5433	190	7.4803	43	1.6929	.346	7.986	.122	.100	11.60	3400	23200	20000
6319	95	3.7402	200	7.8740	45	1.7717	.346	8.380	.122	.100	13.38	3200	24500	22400
6320	100	3.9370	215	8.4646	47	1.8504	-	-	-	.100	16.34	3000	28500	27000
6321	105	4.1338	225	8.8582	49	1.9291	-	-	-	.100	17.8	2800	30500	30000
6322	110	4.3307	240	9.4488	50	1.9685	-	-	-	.100	21.0	2600	32500	32500
6324	120	4.7244	260	10.2362	55	2.1654	-	-	-	.100	32.3	2400	36000	38000
6326	130	5.1181	280	11.0236	58	2.2835	-	-	-	.12	40.1	2200	39000	43000
6328	140	5.5118	300	11.8110	62	2.4409	-	-	-	.12	48.1	2000	44000	50000
6330	150	5.9055	320	12.5984	65	2.5590	-	-	-	.12	57.8	1900	49000	60000

ตารางที่ 3.1 ตารางมิติมาตรฐานและแรงประมินของโรลลิ่งเบริง[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bearing Type			In Relation to the Load the Inner Ring is		Single Row Bearings 1)		Double Row Bearings 2)				ϵ
					$\frac{F_a}{FF_r} > \epsilon$		$\frac{F_a}{FF_r} \leq \epsilon$		$\frac{F_a}{FF_r} > \epsilon$		
			Rotating	Stationary	X	Y	X	Y	X	Y	
3)	4)	5)	F	F	X	Y	X	Y	X	Y	ϵ
Radial Contact Groove Ball Bearings	0.014	25	1	1.2	0.56	2.30	1	0	0.56	2.30	0.19
	0.028	50				1.99				1.99	0.22
	0.056	100				1.71				1.71	0.26
	0.084	150				1.55				1.55	0.28
	0.11	200				1.45				1.45	0.30
	0.17	300				1.31				1.31	0.34
	0.28	500				1.15				1.15	0.38
	0.42	750				1.04				1.04	0.42
	0.56	1000				1.00				1.00	0.44
	20°										0.43
25°				0.41	0.87	0.92	0.67	1.44	0.68		
30°			1	1.2	0.39	0.76	1	0.78	0.63	1.24	0.80
35°					0.37	0.66		0.66	0.60	1.07	0.95
40°					0.35	0.57		0.55	0.57	0.93	1.14
Self-Aligning Ball Bearings			1	1	0.40	0.4 cot α	1	0.42 cot α	0.65	0.65 cot α	1.5 tan α
Self-Aligning and Tapered Roller Bearings			1	1.2	0.40	0.4 cot α	1	0.45 cot α	0.67	0.67 cot α	1.5 tan α

ตารางที่ 3.2 ตารางตัวประกอบ V, X และ Y สำหรับ Rolling bearing [14]

3.6 การกำหนดขนาดพื้นที่หน้าตัดของใบพัด

3.6.1 ข้อมูลการทดลองของ Jack Park

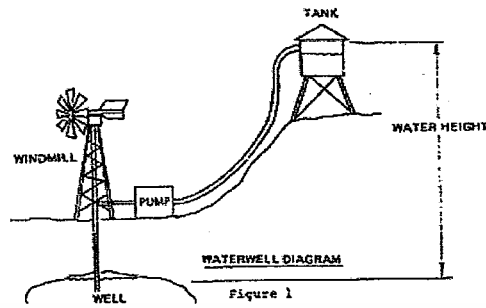
สำหรับกระบวนการขั้นตอนในการออกแบบของ jack park นี้ สามารถแบ่งออกได้เป็นวิธีพื้นฐาน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดพลังงานที่ต้องการ
2. กำหนดระดับความเร็วลมที่จะนำมาใช้ประโยชน์
3. กำหนดลักษณะรูปร่างต่าง ๆ ของกังหันที่ต้องการ จากพลังงานที่จะนำไปใช้
4. ทำการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ ของกังหันลม ให้ถูกต้องตามหลักการทางด้าน

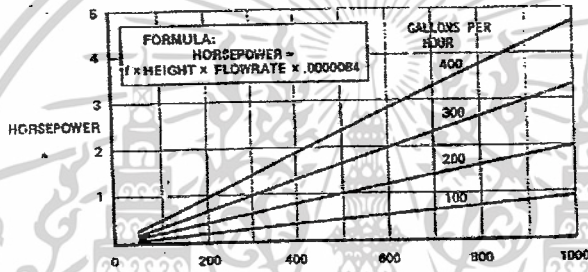
อากาศพลศาสตร์ และออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ

3.6.1.1 การออกแบบกังหันสำหรับปั้มน้ำ

กำหนดพลังงานที่ต้องการใช้ปั้มน้ำ โดยจะต้องรู้ว่าควรปั้มน้ำขึ้นไปสูงเท่าใด จากนั้นจึงทำการคำนวณหาพลังงานแรงม้าที่ต้องการ โดยในการหาพลังงานที่ต้องการในการปั้มน้ำจากการใช้ รูปที่ 3-6



	(1.1)	(1.2)	(1.3)	(1.4)
FLOW RATE	100	200	300	400
50	.05	.10	.18	.24
100	.09	.20	.33	.47
200	.18	.40	.65	.94
400	.36	.80	1.3	1.9
600	.54	1.2	1.9	2.8
800	.72	1.6	2.6	3.8
1000	.90	2.0	3.3	4.7



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟกำลังงานในการสูบน้ำ

3.6.1.2 การออกแบบกังหันลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

สำหรับการออกแบบนี้สามารถเลือกได้ว่าจะใช้ไฟฟ้าแบบ AC หรือ DC ถ้านำไปใช้กับงานทางด้านรถยนต์จะใช้กระแส DC ในขณะที่ต้องการนำไปใช้ภายในบ้านจะใช้กระแส AC ซึ่งเราสามารถคำนวณพลังงานได้จากสมการดังนี้

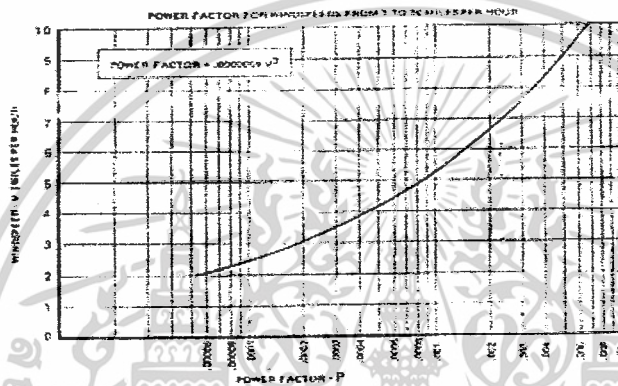
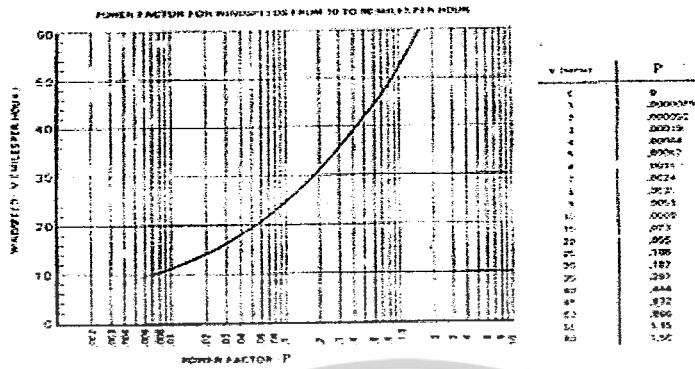
$$hp = PAE \dots\dots\dots(3.28)$$

ในขณะที่ P = Power Factor (จากรูปที่ 3.7)

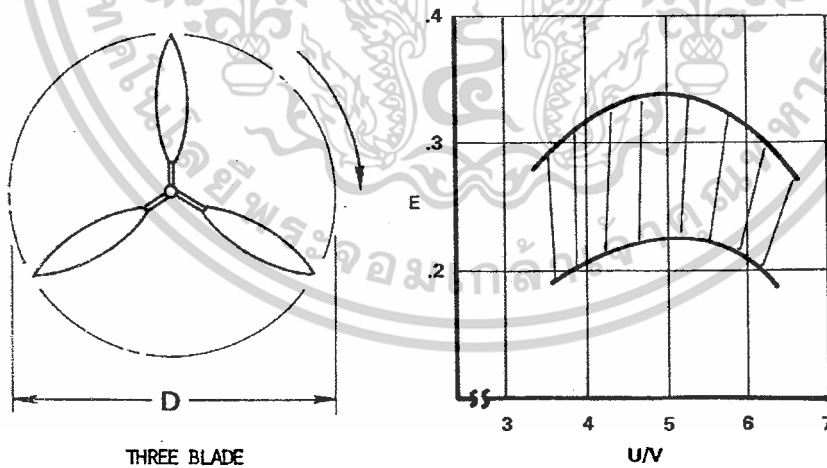
A = Frontal Area (ft²)

E = Efficiency (จากรูปที่ 3.8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

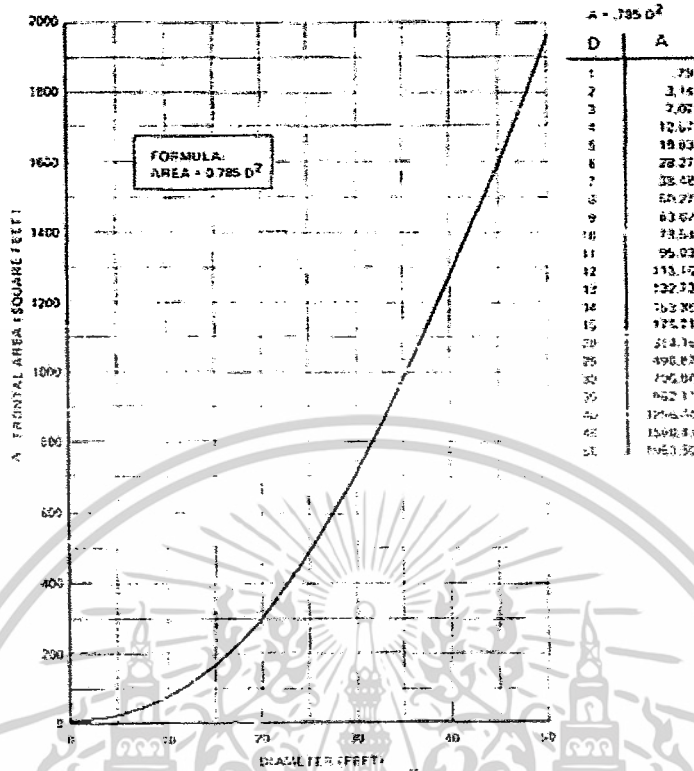


รูปที่ 3.7 แสดงค่า Power Factor



รูปที่ 3.8 แสดงค่า E ในแต่ละอัตราส่วนความเร็วลมต่อความเร็วของใบพัด $\left(\frac{U}{V}\right)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการหาพื้นที่ของใบพัด

การคำนวณหาอัตราส่วนความเร็วของใบพัดกับความเร็วลม

$$\frac{U}{V} = \frac{0.105 \times N \times r}{k \times V} \dots\dots\dots(3.29)$$

ในขณะที่

N = ความเร็วรอบ (rpm)

r = ขนาดรัศมีของใบพัด (ft)

V = ความเร็วลม

k = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับ V โดยถ้า V(mph) ใช้ k = 1.47

V (fps) ใช้ k = 1.0

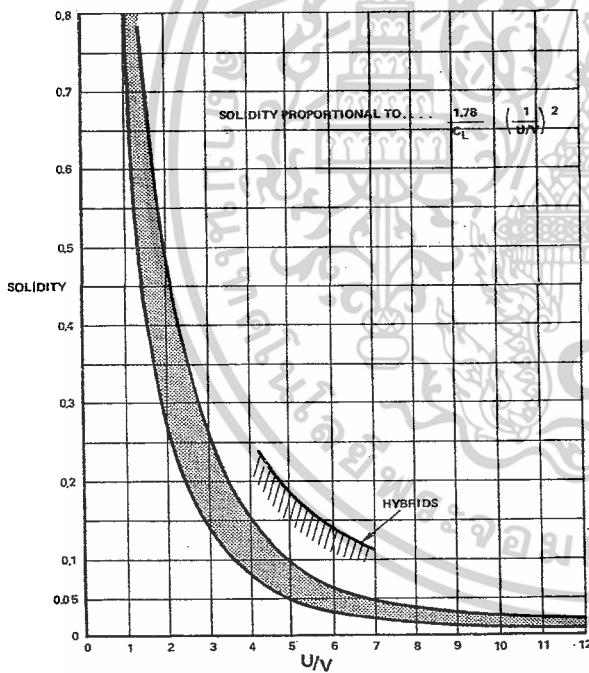
สิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือ ในการออกแบบกังหันลม จะมีพื้นที่ซึ่งใช้ในการออกแบบที่มีลักษณะต่างกันดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

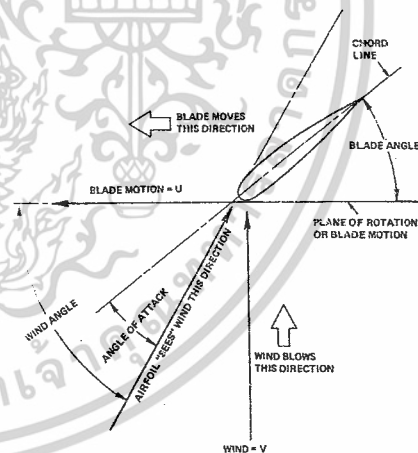
1. พื้นที่บริเวณพื้นผิวของใบพัด (Blade surface area) หมายถึง พื้นผิวทั้งหมดบนใบพัด
2. พื้นที่ซึ่งอยู่ด้านหน้าของใบพัด (Frontal area) หมายถึง พื้นที่ด้านหน้าทั้งหมดที่นำไปใช้ในการคำนวณพลังงานที่ได้จากกังหัน

$$SOLIDITY = \frac{BLADE AREA}{FRONTAL AREA} \dots\dots\dots(3.30)$$

ถ้าเรานำเอา Frontal area มาหาร Blade area ก็จะได้อัตราส่วนหนึ่งซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนความหนาแน่น (Solidity) หรือคิดในอีกทางหนึ่งคือในขณะที่ลมพุ่งชนใบพัดของกังหันนั้นเราไม่สามารถที่จะระบุได้อย่างชัดเจนว่า มีการพุ่งชนที่จุดใดบ้างและแต่ละความเร็วลมนั้นเราควรจะกำหนดให้มีจำนวนใบพัดเท่าใดจึงจะเหมาะสม ดังนั้นจึงได้มีการทดลองและเก็บข้อมูลเหล่านั้นมาซึ่งสามารถนำมาพล็อตรูปได้ดังรูปที่ 3.10



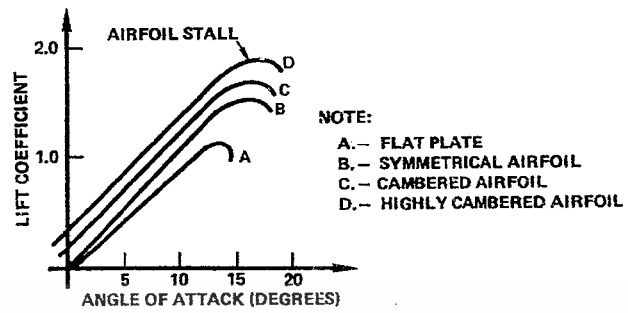
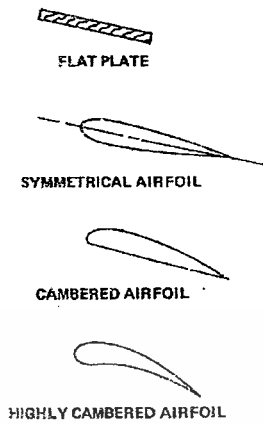
รูปที่ 3.10 กราฟ solidity



รูปที่ 3.11 wind angle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPES OF AIRFOILS



รูปที่ 3.12 ชนิดของใบพัด

รูปที่ 3.13 angle of attack



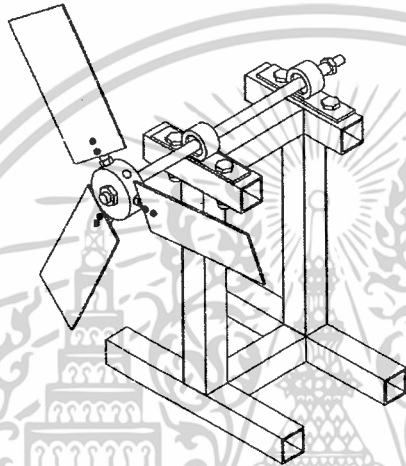
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วัสดุอุปกรณ์และการทดลอง

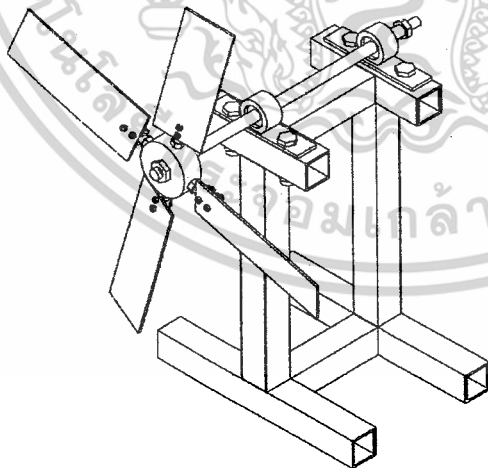
4.1 แบบจำลองกังหันลม

แบบจำลองกังหันลมแนวนอนที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 แบบ จะเป็นดังรูป
แบบ 3 ใบพัด



รูปที่ 4.1 แบบจำลองกังหันลม 3 ใบพัด

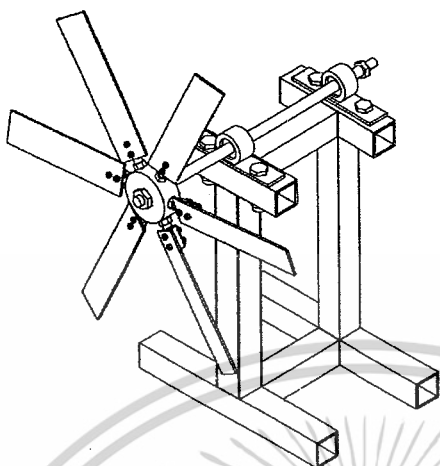
แบบ 4 ใบพัด



รูปที่ 4.2 แบบจำลองกังหันลม 4 ใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ 6 ใบพัด



รูปที่ 4.3 แบบจำลองกังหันลม 6 ใบพัด

วัสดุและอุปกรณ์

- อะลูมิเนียม
- เหล็ก
- โรลลิงแบร์ริง

ส่วนประกอบที่เป็นอะลูมิเนียมประกอบด้วย ใบกังหัน หน้าแปลนยึดเสาใบพัด และ ส่วนประกอบที่เป็นเหล็ก ประกอบด้วย เพลา โครงติดตั้ง เสายึดใบพัด เสือโรลลิงแบร์ริง ขนาดใบพัด ของแบบจำลองกังหันลมทั้ง 3 แบบ

แบบ 3 ใบพัด

ความกว้าง 0.062 เมตร

ความยาว 0.14 เมตร

แบบ 4 ใบพัด

ความกว้าง 0.047 เมตร

ความยาว 0.14 เมตร

แบบ 6 ใบพัด

ความกว้าง 0.031 เมตร

ความยาว 0.14 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการหมุนทั้ง 3 แบบจะมีขนาดเท่ากันทั้งหมด

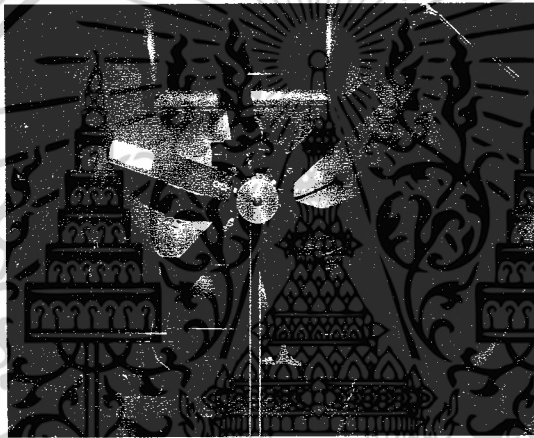
เส้นผ่านศูนย์กลางการหมุน $D = 0.34$ เมตร

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่หน้าตัดการหมุน} \quad A &= \frac{\pi D^2}{4} \\ &= 0.0907 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

เนื่องจากแบบจำลองกังหันลมนี้มีขนาดเล็กและความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงโครงสร้างของแกนเพลลา

การสร้างแบบจำลองกังหันลม

- ส่วนของใบพัดแบบจำลองกังหันลมจะใช้อะลูมิเนียมแผ่นเรียบ ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- ส่วนของโครงคัตติงจะใช้ ประกอบกันแล้วทำการเชื่อมติดกัน
- ส่วน โรลลิงแบร์ริง จะมีเสื่อแบร์ริงที่ทำขึ้นมาเพื่อเป็นตัวยึดติดกับ โครงคัตติง
- แล้วนำชิ้นส่วนต่างมาทำการพันสีและประกอบเข้าด้วยกันดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ชิ้นส่วนประกอบของแบบจำลองกังหันลม

4.2 เครื่องวัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมในขณะที่ลมไหลผ่านโดยเครื่องมือวัดนี้ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที ซึ่งอ่านได้เฉพาะความเร็วลมที่ไหลผ่านใบพัดของเครื่องวัด

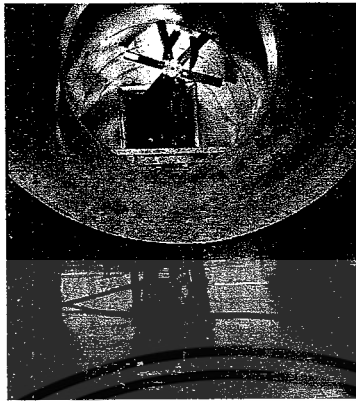


รูปที่ 4.5 เครื่องวัดความเร็วลม

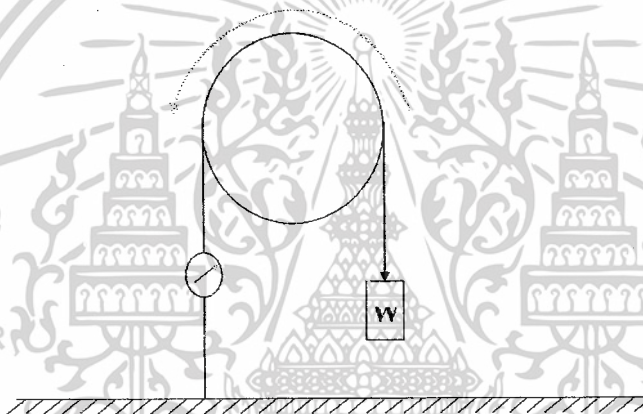
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ชุดเครื่องมือวัดแรงบิด

หลักการ ในการวัดแรงบิดใช้การวัดแบบ ไคนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัด



รูปที่ 4.6 ชุดเครื่องมือวัดแรงบิด



รูปที่ 4.7 ไคนาโมมิเตอร์แบบเชือกรัด

4.4 เครื่องวัดความเร็วรอบ

เครื่องวัดความเร็วรอบเป็นอุปกรณ์เพื่อวัดความเร็วรอบของใบพัด โดยจะอ่านค่าออกมาได้เป็นจำนวนรอบต่อนาที

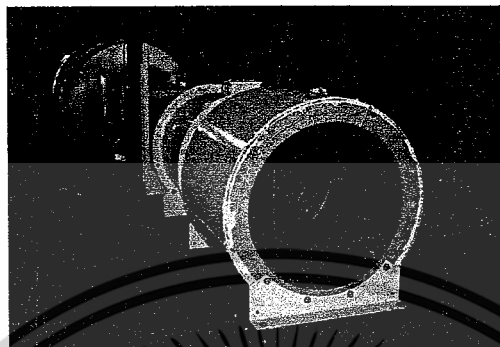


รูปที่ 4.8 เครื่องวัดความเร็วรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 อุโมงค์ลมและแหล่งกำเนิดลม

อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้ลมอยู่ในสถานะที่ไม่ให้ลมภายนอกเข้ามาผสม และสามารถกำหนดค่าให้ลมมีความเร็วคงที่ค่าหนึ่งได้ในขณะที่ทำการทดลอง โดยลมจะวิ่งในอุโมงค์ลมด้วยความเร็วคงที่ซึ่งออกมาจากแหล่งกำเนิดลม



รูปที่ 4.9 อุโมงค์ลม

4.6 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดบนเพลาแกนหมุนของกังหันลม
2. เดินเครื่องให้อุโมงค์ลมทำงาน
3. ทำการปรับค่าความเร็วลมโดยการวัดค่าความเร็วลมเฉลี่ยก่อนกระทบใบพัดเริ่มต้นที่ความเร็วลมเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที
4. ใส่โหนดทำการวัดแรงบิดและความเร็วรอบ
5. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 โดยการเพิ่มความเร็วลมขึ้นและทดลอง 3 ครั้งต่อความเร็วลมเฉลี่ยหนึ่งค่า
6. นำค่าที่วัดได้มาคำนวณและเขียนกราฟความสัมพันธ์
7. ทำการเปลี่ยนใบพัดเป็น 4 และ 6 ใบตามลำดับและทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1-6 อีกครั้ง

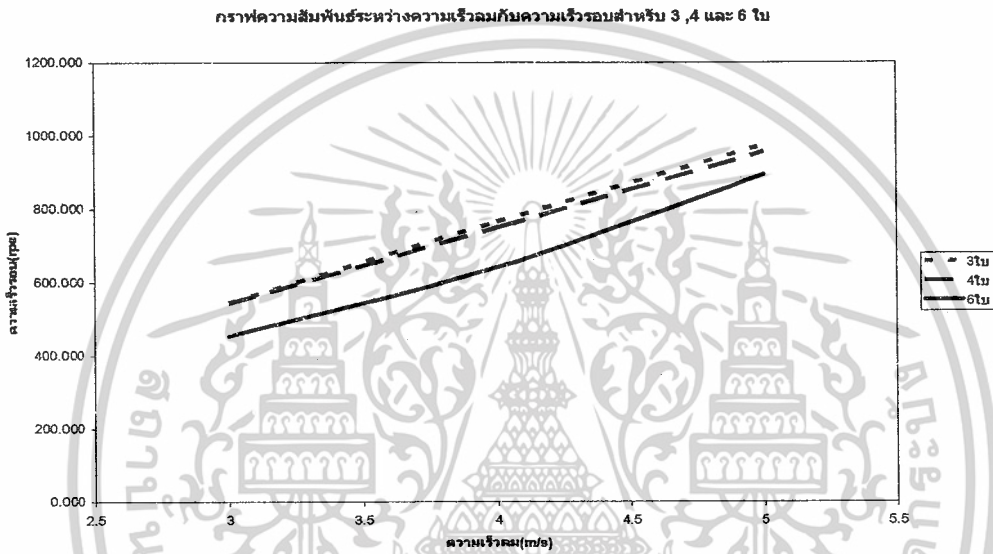
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

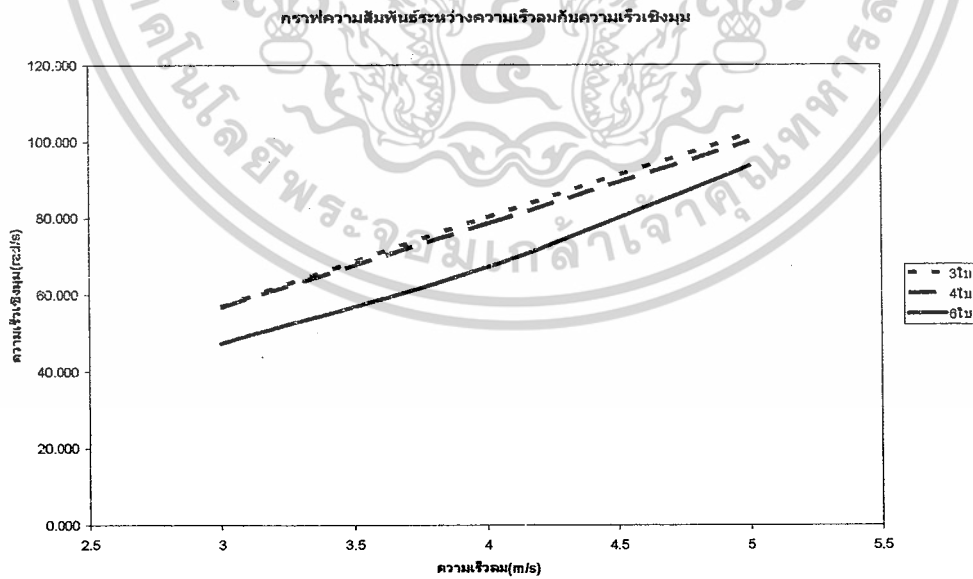
ผลทดลอง

5.1 ผลการทดลอง

นำผลที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วลมเฉลี่ยต่างๆกันมาหาความสัมพันธ์เทียบกับความเร็วลมจะได้ดังต่อไปนี้



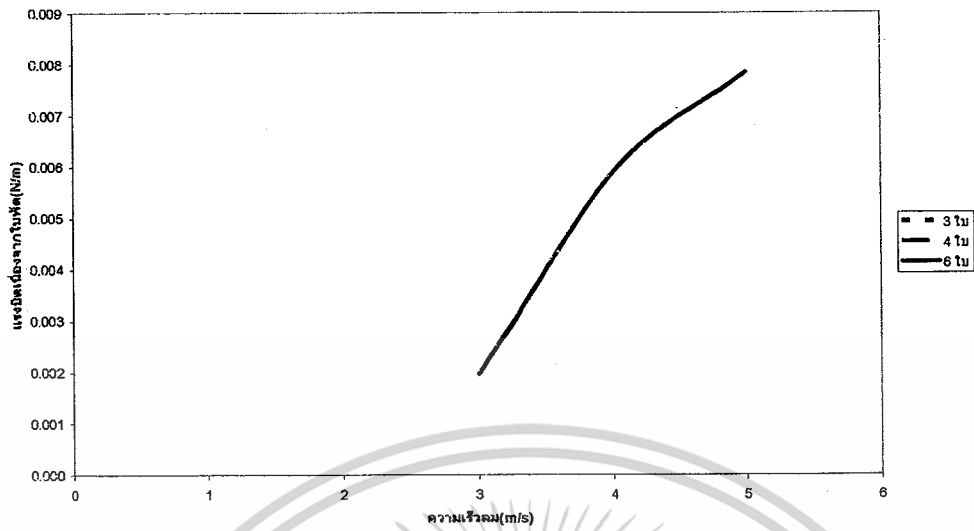
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบ



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วเชิงมุม

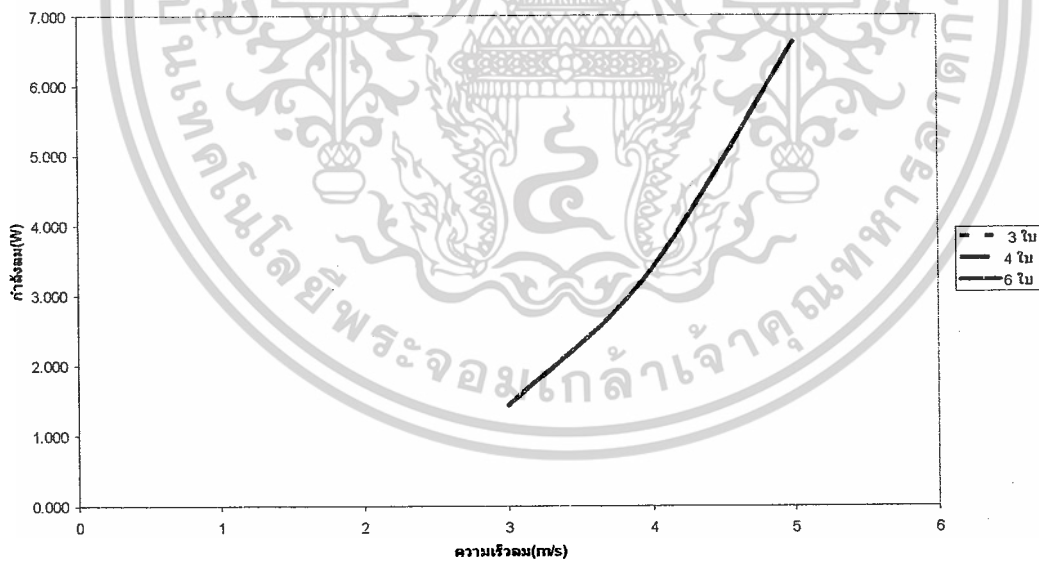
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงบิดเนื่องจากใบพัดสำหรับ 3,4 และ 6 ใบ



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงบิดเนื่องจากใบพัด

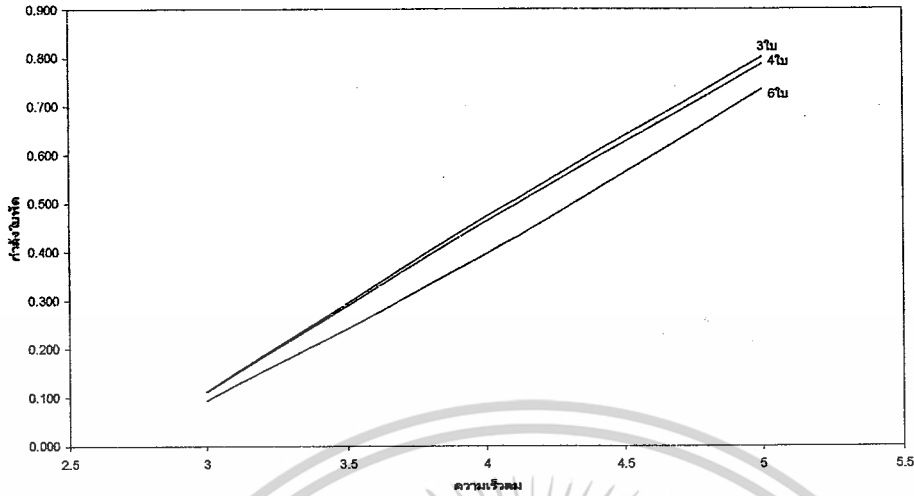
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังลม 3,4 และ 6 ใบ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังลม

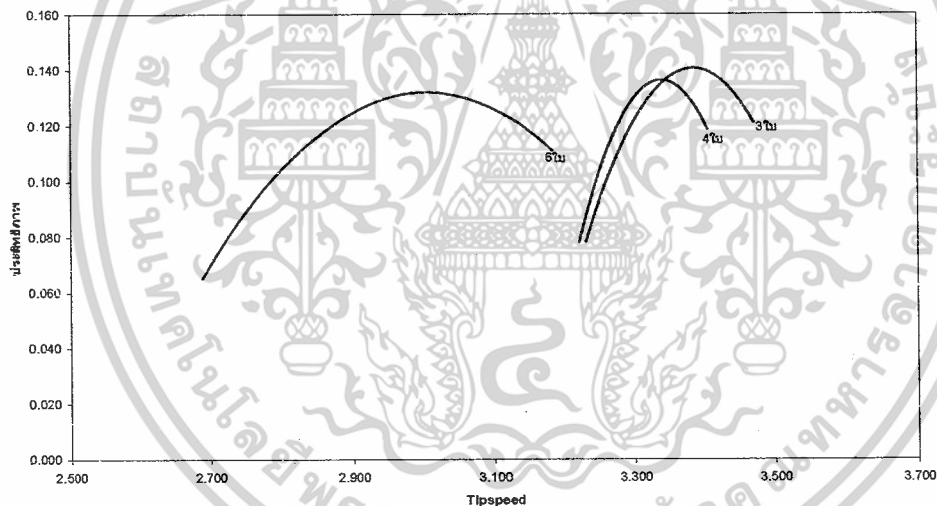
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังใบพัดสำหรับ 3, 4 และ 6 ใบ



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับกำลังใบพัด

ภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Tip speed กับ ประสิทธิภาพ



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tip speed (λ) กับ ประสิทธิภาพ (C_p)

จากรูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Tip speed (λ) กับ ประสิทธิภาพ (C_p) พบว่า ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อ Tip speed เพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วลดลง โดยมีแนวโน้มคล้ายกราฟพาราโบลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณหาค่า $C_{p,max}$ จะได้

สำหรับ 3 ใบพัด จะได้ $C_{p,max} = 0.1393$ ที่ $\lambda = 3.3845$

สำหรับ 4 ใบพัด จะได้ $C_{p,max} = 0.1383$ ที่ $\lambda = 3.3392$

สำหรับ 6 ใบพัด จะได้ $C_{p,max} = 0.1320$ ที่ $\lambda = 3.0050$

เมื่อเราพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่าง Tip speed (λ) กับ ประสิทธิภาพ (C_p) จากรูปที่ 5.6 นั้นจะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วลดลงมาซึ่งในความเป็นจริงนั้นกำลังใบพัดยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นแต่กำลังใบพัดกับกำลังลมที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆจนทำให้สัมประสิทธิ์กำลังลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังใบพัดและกำลังลมเทียบกับความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อนำกัณฑ์ลมแนวนอนแบบ 3 ใบ 4 ใบ และ 6 ใบ พัดทดลองในอุโมงค์ลมที่ความเร็วลมต่างๆ พบว่าจำนวนของใบพัดนั้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพของกัณฑ์ลมนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วลม จากรูปที่ 5.6 ซึ่งจะเห็นว่าที่ 3 ใบนั้นจะให้ประสิทธิภาพได้สูงสุดคือ จะได้ $C_{p,max} = 0.1393$ ที่ $\lambda = 3.3845$ รองลงมาที่ 4 ใบพัด คือ จะได้ $C_{p,max} = 0.1383$ ที่ $\lambda = 3.3392$ และสุดท้ายคือที่ 6 ใบพัดคือจะได้ $C_{p,max} = 0.1320$ ที่ $\lambda = 3.0050$ และจะเห็นได้ว่าที่ 6 ใบพัดนั้น ความเร็วลมที่ใช้ในการเริ่มหมุนของใบพัด (Cut in speed) นั้นมีค่าน้อย แสดงว่า ที่ความเร็วลมต่ำๆ นั้น สามารถหมุนได้ ต่างกับที่ 3 และ 4 ใบพัดซึ่งต้องการ Cut in speed สูงเพื่อจะทำให้ใบเริ่มหมุน เมื่อเราพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างนั้นจะพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วลดลงมาซึ่งในความเป็นจริงนั้นกำลังใบพัดยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตาม ความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นแต่กำลังใบพัดกับกำลังลมนั้นแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้สัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังใบพัดและกำลังลมลดลงดังแสดง ในรูปที่ 5.7

กัณฑ์ลมแนวนอนแบบหลายใบ นั้นก็น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับเกษตรกรคนไทย โดยในโครงการนี้เป็นเพียงการสร้างและทดลองแบบจำลองกัณฑ์ลมแนวนอนแบบหลายใบเท่านั้นและในการสร้างกัณฑ์ลมชนิดนี้สำหรับงานจริงนั้นสามารถนำผลการทดลองที่ได้ในการทดลองนี้มาประยุกต์ใช้งานได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การวัดแรงบิดควรวัดด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ค่าที่ละเอียดและถูกต้องยิ่งขึ้น
2. ในการทดลองควรมีอุโมงค์ลมที่แหล่งกำเนิดลมที่มีทิศทางความเร็วลมสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งหน้าตัดซึ่งต้องใช้ใบพัดที่ออกแบบมาโดยเฉพาะและมีขนาดอุโมงค์ลมที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบเนื่องจากผนังของอุโมงค์ลม
3. ในการทดลองขณะที่วัดความเร็วลมและความเร็วรอบนั้นควรทำการวัดอย่างน้อย 3 ครั้งแล้วมาเฉลี่ยกันเพื่อให้ได้ค่าที่คาดเคลื่อนน้อยที่สุด
4. ตัวโครงสร้างใช้ยึดในชุดการทดลองควรมีความแข็งแรงมากกว่านี้เพื่อป้องกันการสั่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณการหาค่า blade of angle

สมมติลมมีความเร็ว 4 เมตรต่อวินาที และค่า solidity มีค่า 0.28

1. เลือกใบพัดที่เป็น flat plate จากรูปที่ 3.13มุม angle of attack ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมากที่สุด ประมาณ 13°

2. จากรูปที่ 3.10กราฟ solidity ที่ค่า solidity มีค่า 0.28 จะได้ Tip speed ประมาณ 2

3. จาก

$$\text{Tip speed} = U/V \quad ; V = 4 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$U = \text{ความเร็วกังหันลม}$$

ดังนั้น

$$U = \text{Tip speed} \times V$$

$$= 2 \times 4$$

$$= 8 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

4. จากรูปที่ 3.11 wind angle

$$\text{wind angle} = \tan^{-1}(V/U)$$

$$= \tan^{-1}(4/8)$$

$$= 27^\circ$$

ดังนั้น

$$\text{blade angle} = \text{wind angle} - \text{angle of attack}$$

$$= 27 - 13$$

$$= 14^\circ$$

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณอัตราเร็วเชิงมุม

$$\omega = 2\pi n$$

การคำนวณ Tip speed ratio

$$\lambda = \frac{\omega r_1}{V_i}$$

โดยที่ r_1 = รัศมีของใบพัด

การคำนวณแรงบิดใบพัด

$$T_{blade} = (wg)r_2$$

โดยที่ r_2 = รัศมีของเพลาแกนหมุน

การคำนวณกำลังใบพัด

$$P_{blade} = T_{blade} \omega$$

การคำนวณกำลังลม

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_i^3$$

โดยที่ $\rho = 1.165 \text{ Kg/m}^3$ และ A = พื้นที่หน้าตัดการรับลมของใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ สัมประสิทธิ์กำลัง

$$C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}}$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด

สำหรับ 3 ใบพัด

$$C_{p,max} = -2.6252\lambda^2 + 17.77\lambda - 29.932$$

โดยจุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดหาได้จาก

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0$$

ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\frac{dC_{p,max}}{d\lambda} = 0 = -5.2504\lambda + 17.77$$

จะได้ $\lambda = 3.3845$

แทนค่า λ ลงในสมการได้

$$C_{p,max} = -2.6252(3.3845)^2 + 17.77(3.3845) - 29.932$$

จะได้

$$C_{p,max} = 0.1393$$

สำหรับ 4 ใบพัด

$$C_{p,max} = -4.1443\lambda^2 + 27.678\lambda - 46.074$$

โดยจุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดหาได้จาก

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0$$

ซึ่งจะได้ดังนี้

$$\frac{dC_{p,max}}{d\lambda} = 0 = -8.2886\lambda + 27.678$$

จะได้ $\lambda = 3.3392$

แทนค่า λ ลงในสมการได้

$$C_{p,max} = -4.1443(3.3392)^2 + 27.678(3.3392) - 46.074$$

จะได้

$$C_{p,max} = 0.1383$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ 6 ไม้พัด

$$C_{p,\max} = -0.6691\lambda^2 + 4.0213\lambda - 5.91$$

โดยจุดที่มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดหาได้จาก

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = 0$$

ซึ่งจะได้ดังนี้ $\frac{dC_{p,\max}}{d\lambda} = 0 = -1.3382\lambda + 4.0213$

จะได้ $\lambda = 3.0050$

แทนค่า λ ลงในสมการได้

$$C_{p,\max} = -0.6691(3.0050)^2 + 4.0213(3.0050) - 5.91$$

จะได้

$$C_{p,\max} = 0.1320$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของใบพัดแบบ 3 ใบ

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	556.000	9.893	3.298	58.195	0.002	0.114	1.431	0.080
4	0.120	765.000	13.612	3.403	80.070	0.006	0.471	3.392	0.139
5	0.160	970.000	17.260	3.452	101.527	0.008	0.797	6.626	0.120

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	540.000	9.608	3.203	56.520	0.002	0.111	1.431	0.077
4	0.120	763.000	13.576	3.394	79.861	0.006	0.470	3.392	0.139
5	0.160	976.000	17.366	3.473	102.155	0.008	0.802	6.626	0.121

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	538.000	9.573	3.191	56.311	0.002	0.110	1.431	0.077
4	0.120	770.000	13.701	3.425	80.593	0.006	0.474	3.392	0.140
5	0.160	980.000	17.437	3.487	102.573	0.008	0.805	6.626	0.121

แสดงผลการทดลองโดยเฉลี่ย

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	544.667	9.691	3.230	57.008	0.002	0.112	1.431	0.078
4	0.120	766.000	13.630	3.407	80.175	0.006	0.472	3.392	0.139
5	0.160	975.333	17.354	3.471	102.085	0.008	0.801	6.626	0.121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของใบพัดแบบ 4 ใบ

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	544.000	9.680	3.227	56.939	0.002	0.112	1.431	0.078
4	0.120	748.000	13.309	3.327	78.291	0.006	0.461	3.392	0.136
5	0.160	950.000	16.904	3.381	99.433	0.008	0.780	6.626	0.118

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	540.000	9.608	3.203	56.520	0.002	0.111	1.431	0.077
4	0.120	759.000	13.505	3.376	79.442	0.006	0.468	3.392	0.138
5	0.160	960.000	17.082	3.416	100.480	0.008	0.789	6.626	0.119

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	545.000	9.697	3.232	57.043	0.002	0.112	1.431	0.078
4	0.120	743.000	13.220	3.305	77.767	0.006	0.458	3.392	0.135
5	0.160	960.000	17.082	3.416	100.480	0.008	0.789	6.626	0.119

แสดงผลการทดลองโดยเฉลี่ย

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	543.000	9.662	3.221	56.834	0.002	0.112	1.431	0.078
4	0.120	750.000	13.345	3.336	78.500	0.006	0.462	3.392	0.136
5	0.160	956.667	17.022	3.404	100.131	0.008	0.786	6.626	0.119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองของใบพัดแบบ 6 ใบ

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	480.000	8.541	2.847	50.240	0.002	0.099	1.431	0.069
4	0.120	651.000	11.583	2.896	68.138	0.006	0.401	3.392	0.118
5	0.150	904.000	16.085	3.217	94.619	0.007	0.696	6.626	0.105

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	435.000	7.740	2.580	45.530	0.002	0.089	1.431	0.062
4	0.120	629.000	11.192	2.798	65.835	0.006	0.388	3.392	0.114
5	0.160	893.000	15.889	3.178	93.467	0.008	0.734	6.626	0.111

แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	445.000	7.918	2.639	46.577	0.002	0.091	1.431	0.064
4	0.120	644.000	11.459	2.865	67.405	0.006	0.397	3.392	0.117
5	0.170	886.000	15.765	3.153	92.735	0.008	0.773	6.626	0.117

แสดงผลการทดลองโดยเฉลี่ย

V_i , m/s	m, Kg	n, rps	U, m/s	Tip	ω , rad/s	T_{blade} , N.m	P_{blade} , W	P_{wind} , W	C_p
3	0.040	453.333	8.066	2.689	47.449	0.002	0.093	1.431	0.065
4	0.120	641.333	11.411	2.853	67.126	0.006	0.395	3.392	0.116
5	0.160	894.333	15.913	3.183	93.607	0.008	0.734	6.626	0.111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Ezio S, Cludio C., "Exploitation of wind as an energy source to meet the world's electricity demand," Wind Eng 1998;74-76;375-87.
- [2] Beurkens, J., Houet, M., P.v.dv "Wind energy" (in Dutch), diktaat no 3323, Eindhoven University of technology, Eindhoven Netherlands, April 1974.
- [3] H.J. Hengeveld, E.H. Lysen and L.M.M. Paulissen. "Matching of wind rotor to low power electrical generators" SWD 78-3, December 1978.
- [4] W.A.M jansen. "Horizontal-axis fast wind turbines for developing countries" SWD 76-3, June 1976.
- [5] W.A.M jansen. and P.T. Smulder. "Rotor design for horizontal-axis windmills" SWD 77-1, May 1977.
- [6] Robert E. Wilson. "Aerodynamics performance of wind turbine" Oregon State University, Corvallis, Oregon, June, 1974
- [7] Wilson Re, Lissaman PBS., "Applied Aerodynamics of wind power machines" Oregon State University, 1974.
- [8] <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=97>
- [9] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles., "Thermodynamics An engineering Approach," 5th ed. : McGraw – Hill, 2006.
- [10] Fung KT, Scheffler RL, Stolpe J., "Wind energy – a utility perspective," IEEE Trans Power Appar System 1981;100:1176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Le Gourieres D. Energie eolienne, "Wind Power Plant, Theory and Design," Paris: Eyrolles; 1980

[12] วรวิทย์ อิงภากรณ์ และ ชาญณัดงาน. ,“การออกแบบ เครื่องกลเล่ม 2,” หน่วย SI : ซีเอ็ดยูเคชั่น ,2003.

[13] William D. Callister., “Materials Science and Engineering: An Introduction,” 7th Ed.: John Wiley and Sons, 2007

[14] Robert L. Norton., “Machine Design An Intergrated Approach” 3th Ed.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้