



## รายงานฉบับสมบูรณ์

### โครงการวิจัยเรื่อง กังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius หลายใบที่มีส่วนบังค้ำลม สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ  
รองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ ไชยเทพ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภาพ แววศักดิ์  
นายสุประดิษฐ์ ยวนทอง  
นายอานัฐ พริกเล็ก  
นายไกรสร เอียดเนตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยทักษิณ

มีนาคม 2558

สัญญาเลขที่ 2557A10502052

# รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง  
กังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius หลายใบที่มีส่วนบังคับลม  
สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ  
รองศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ ไชยเทพ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภาพ แววศักดิ์  
นายสุประดิษฐ์ ยวนทอง  
นายอาณัฐ พริกเล็ก  
นายไกรสร เอียดเนตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2557  
มหาวิทยาลัยทักษิณ

มีนาคม 2558



## คำรับรองคุณภาพ

รายงานวิจัยเรื่อง กังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius หลายใบที่มีส่วนบังคับลมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้า

ขนาดเล็ก

ผู้วิจัย ธีรเดช ไชยชนะ และคณะ

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ ขอรับรองว่ารายงานวิจัยฉบับนี้ได้ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว มีความเห็นว่าผลงานวิจัยฉบับนี้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์

- ดีมาก
- ดี
- ปานกลาง
- พอใช้
- ต่ำ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพันธุ์ เขมกฤษาศัย)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

24 กรกฎาคม 2558

## บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง ทดสอบคุณลักษณะการทำงานของกังหันลม แกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius โดยทำการสร้างกังหันที่มีใบพัดจำนวน 12 ใบพัด รัศมี 15 cm ใบพัดยาว 30 cm เพื่อทำการสอบในอุโมงค์ลมแบบเปิด และทำการสร้างกังหันลมรูปแบบ เดียวกันที่มีรัศมี 100 cm ใบพัดยาว 95 cm เพื่อทำการทดสอบการผลิตไฟฟ้า ผลการทดสอบในอุโมงค์ ลมพบว่า อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนมีค่าเท่ากับ 2.36 m/s และเวลาที่พิจารณาจากกังหันลม เริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่มีค่าระหว่าง 10 - 39s กังหันลมมีสัมประสิทธิ์ กำลังสูงสุดที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมเท่ากับ 8.06% ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.09 และ ค่า  $F/A$  เท่ากับ 44.690 N/m<sup>2</sup> of swept area โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.50% ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อ  $F/A$  ลดลง สัมประสิทธิ์ กำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากรณีไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม และกรณีมีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 2.46% และ 4.37% ตามลำดับ กังหันลมผลิตไฟฟ้าเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลมประมาณ 3.5-4.0 m/s และเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจานจะเริ่มประจุไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบของกังหันลมเท่ากับ 24.6 RPM หรือที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากับ 4.65 m/s

## Abstract

The objective of this study was to design, build and tested of Multi blades Savonius vertical axis wind turbine. The 12 blade prototype wind turbine with 15 cm diameter and 30 cm blade length were design, build and tested in the open type wind tunnel. Same type wind turbine with 100 cm diameter and 95 cm blade length was construed and tested for power generation. It was found that cut in speed of the prototype wind turbine was tested in the wind tunnel is 2.36 m/s and Rep up speed is 10 - 39s. The maximum power coefficient is 8.06% of tip speed ration 2.09,  $F/A$  44.690 N/m<sup>2</sup> of swept area and the average power coefficient is 5.50%. The power coefficient of wind turbine without sheet for increase wind speed is 2.46%. The power coefficient of wind turbine with a sheet for increase wind speed is 4.37%. The wind power turbine is rotating at 3.5-4.0 m/s of wind speed and generating electricity at 4.65 m/s of wind speed of 24.6 RPM of rotational speed.

## สารบัญ

	หน้า
ปกนอก	
ปกใน	
บทคัดย่อ	3
สารบัญ	4
สารบัญรูป	6
สารบัญตาราง	7
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>8</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	8
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	10
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	10
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	10
1.5 ประเภทการวิจัย	11
1.6 สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย	11
1.7 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย	11
1.8 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ	11
1.9 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	12
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>13</b>
2.1 ลม (Wind)	13
2.2 พลังงานจากลม (Energy from the wind)	15
2.3 กังหันลม (Wind Turbine)	16
2.4 แพนอากาศ (Airfoil)	21
2.5 สมรรถนะของแพนอากาศ (Airfoil Coefficient)	22
2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	23
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน</b>	<b>28</b>
3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
3.2 การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมอุโมงค์ลม	31
3.3 การออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius สำหรับทดสอบในอุโมงค์ลม	33 34
3.4 การออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก	35
3.5 การสร้างกังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius สำหรับผลิตไฟฟ้า	36
3.6 การทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลม	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การทดสอบการทำงานของกังหันลมในอุโมงค์ลม	36
3.8 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก	38
3.9 การทดสอบการทำงานของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า	39
3.10 จัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์	39
3.11 เผยแพร่งานวิจัย	39
<b>บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน</b>	<b>40</b>
4.1 การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม	40
4.2 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed)	40
4.3 เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time)	43
4.4 ความเร็วรอบทำงานของกังหัน (Rated rotation)	45
4.5 สัมประสิทธิ์กำลัง ( $C_p$ ) และสัมประสิทธิ์แรงบิด ( $C_T$ )	46
4.6 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน	48
4.7 การทดสอบการทำงานของกังหันลม	49
4.8 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม	51
<b>บทที่ 5 สรุปผล</b>	<b>52</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>52</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>56</b>
- ข้อมูลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม	
- ข้อมูลการทดสอบกังหันลมที่สร้างขึ้นกรณีไม่มีแผนเพิ่มอัตราเร็วลม	
- ข้อมูลการทดสอบกังหันลมที่สร้างขึ้นกรณีมีแผนเพิ่มอัตราเร็วลม	
- ผลการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	
- เอกสารการเผยแพร่งานวิจัย	

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน สถานีวิจัยลมท่าพญา อ.ปากพั้ง จ.นครศรีธรรมราช	8
2.1	ลมบก – ลมทะเล	13
2.2	ลมหุบเขา – ลมภูเขา	14
2.3	ลมประจำฤดู (Monsoon wind)	14
2.4	การไหลของอากาศผ่านกังหัน	16
2.5	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ	19
2.6	เปรียบเทียบกังหันชนิดต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากัน ( $3.2 \text{ m}^2$ ) ที่ความเร็วลม $5.6 \text{ m/s}$	19
2.7	รูปแสดงตัวอย่างกังหันลมแกนตั้ง และกังหันลมแกนนอน	20
2.8	แผนอากาศแบบต่าง ๆ	21
2.9	ลักษณะการกระจายของความดันที่กระทำต่อใบพัด	21
2.10	ลักษณะการทำงานของแผนอากาศ	23
2.11	แผนที่ความเร็วลมนอกชายฝั่งทะเล	27
2.12	โครงสร้างของกังหันหมุนสวนทาง	29
3.1	อุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบกังหันลม	32
3.2	กังหันลมแกนตั้ง แบบ Savonius 12 ใบ	33
3.3	ชุดวัดแรงบิดแบบ Horse Brake Power	34
3.4	เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน	34
3.5	กังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius (ไม่ติดตั้งแผงเพิ่มอัตราเร็วลม)	35
3.6	กังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius (ติดตั้งแผงเพิ่มอัตราเร็วลม)	36
3.7	จุดที่ทำการวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ	37
3.8	มุมใบพัด (มุมระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกระทำกับรัศมีของกังหัน)	38
3.9	การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า	38
4.1	การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม	40
4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับ $F/A$ ที่อัตราเร็วลมต่างๆ	41
4.3	แสดงค่า Cut-in Speed ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.1	42
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับอัตราเร็วลมที่ $F/A$ ต่างๆ	42
4.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่กับ $F/A$ ที่อัตราเร็วลมต่างๆ	44
4.6	แสดงค่า Rev up time ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.3	44
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบของกังหันกับ $F/A$ ที่อัตราเร็วลมต่างๆ	45
4.8	แสดงค่า Rated Speed ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.4	46
4.9	สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient, $C_p$ ) ของ Multi blades Savonius	47
4.10	สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient, $C_T$ ) ของ Multi blades Savonius	47
4.11	ผลการทดสอบผลิตไฟฟ้าต่อขดลวดทองแดงแบบอนุกรม 2 ขด ขนาด 4 ชุด	49
4.12	อัตราเร็วรอบของกังหันลมที่อัตราเร็วลมต่างๆ	50

## สารบัญตาราง

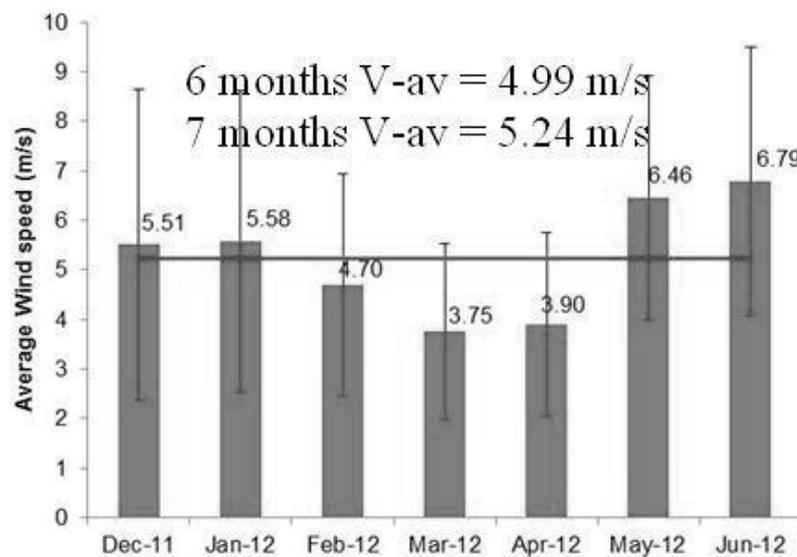
ตารางที่		หน้า
1.1	เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอนบางประการ	9
2.1	เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอนและแกนตั้งที่มีพื้นที่กังหันเท่ากับ $100 \text{ m}^2$	20
2.2	คุณสมบัติของกังหันลมชนิดต่าง ๆ	20
4.1	สมการความสัมพันธ์และค่า Cut-in Speed จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.4	43
4.2	สมการความสัมพันธ์จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.5	43
4.3	สมการความสัมพันธ์จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.7	45
4.4	สัมประสิทธิ์กำลังและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยที่ $F/A$ ต่างๆ	48
4.5	ผลการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน	48
4.6	ผลต่างของอัตราเร็วรอบของกังหันลมกรณีมีและไม่มีแผนเพิ่มอัตราเร็วลม	50
4.7	สัมประสิทธิ์กำลังและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม	50
4.8	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่อัตราเร็วลมอิสระค่าต่างๆ	51

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทย มีลักษณะภูมิประเทศที่เป็นชายฝั่งทะเลและภูเขาสูง ดังนั้นจึงมีศักยภาพของพลังงานลม โดยได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานลมและพบว่าในพื้นที่ทั้งสองฝั่งทะเลคือฝั่งอ่าวไทย และฝั่งอันดามัน เป็นบริเวณที่มีศักยภาพพลังงานลมระดับปานกลาง คือมีความเร็วลมโดยเฉลี่ย 3-6 m/s เช่นในพื้นที่อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่ามีความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 5.24 m/s (ข้อมูลระหว่างเดือนธันวาคม 2554- กรกฎาคม 2555) ดังแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ความเร็วลมเฉลี่ยรายเดือน สถานีวิจัยลมท่าพญา อ.ปากพนัง จ.นครศรีธรรมราช [1]

อีกทั้งได้มีการศึกษาเพื่อประเมินศักยภาพพลังงานในพื้นที่ต่างๆ ของประเทศไทยก็พบว่ามีความเร็วลมเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน (ประมาณ 3-6 m/s) ยกเว้นบางพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานสูง เช่น ยอดดอยอินทนนท์ เป็นต้น [2]

กังหันลมในปัจจุบันสามารถแบ่งโดยใช้แกนหมุนของกังหันเป็นเกณฑ์ได้ 2 ชนิดคือ กังหันลมแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWTs) และกังหันลมแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWTs) ลักษณะทั่วไปของ VAWTs จะมีใบติดกับเพลลาที่อยู่ในแนวตั้ง ใบอาจเป็นแผ่นเรียบบาง หรือโค้งตามลักษณะที่ดีทางอากาศพลศาสตร์ จำนวนใบไม่จำกัด ตั้งแต่ 1 ใบขึ้นไป สามารถเริ่มทำงานได้เองที่ ความเร็วลมต่ำ ประมาณ 2 เมตร/วินาที [3] และสามารถทำงานได้เองไม่ว่าลมจะมาจากทิศทางใด แต่จะมีความเร็วรอบช้ากว่ากังหันแบบแกนนอน คือ มีความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบสูงสุดไม่เกิน 2 เท่าของความเร็วลม และมีสัมประสิทธิ์ 17 – 30 % ของพลังงานสูงสุดตามทฤษฎี [4] และสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์โดยการติดตั้งกังหันแบบ Savonius เพื่อให้เริ่มหมุนที่ความเร็วลมต่ำ [5] และสามารถหดรอบให้มากกว่า 1,200 รอบ/นาที เพื่อใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (12V 40A และ 12V

70A) ของรถยนต์ได้ [6] กังหันลมแกนนอน (Horizontal axis windmill) จะมีใบติดกับปลายเพลลาที่อยู่ในแนวนอน กังหันลมแบบแกนนอนจะหมุนด้วยความเร็วเชิงเส้นที่ปลายใบตั้งแต่ 2.1 เท่าของความเร็วลมและมีสัมประสิทธิ์ 21 – 38 % ของพลังงานสูงสุดตามทฤษฎี [4] กังหันลมแบบแกนนอนต้องมีหางเสือเพื่อเปลี่ยนทิศกังหันเข้ากับทิศทางของลม จากข้อกำหนดนี้ ถ้าลมเปลี่ยนทิศอย่างรวดเร็ว จะก่อให้เกิด แรงหนีศูนย์กลาง และแรงคัต ได้ ซึ่งแรงดังกล่าวจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวกังหัน จากการศึกษาสามารถเปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยเสียของกังหันลมทั้ง 2 ประเภทได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอนบางประการ [3,7,8]

กังหันลมแกนตั้ง (VAWTs)	
ข้อดี	ข้อด้อย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้บนพื้นดินง่ายต่อการบำรุงรักษา มีความเหมาะสมในพื้นที่บางพื้นที่มากกว่า HAWTs เช่น พื้นที่ยอดเขา เป็นต้น</li> <li>2. สามารถทำงานได้ที่ทุกทิศทางของลมโดยไม่ต้องมีระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบกังหัน</li> <li>3. ใบของกังหัน สร้างได้ง่ายกว่า HAWTs โดยสามารถเป็นใบแบบสมมาตรตลอดทั้งใบได้</li> <li>4. มีเสียงรบกวนน้อย กระทบต่อระบบ Radar น้อย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. มีสัมประสิทธิ์โดยเฉลี่ยต่ำกว่า HAWTs</li> <li>2. น้ำหนักทั้งหมดของกังหันจะกระทำที่ตลับลูกปืนตลอดเวลา ต้องออกแบบตลับลูกปืนอย่างเหมาะสม</li> <li>3. เสียความได้เปรียบด้านความเร็วลมที่ระดับความสูง</li> <li>4. ต้องใช้วัสดุทำใบและโครงสร้างประกอบใบที่ใหญ่กว่า HAWTs หากต้องการพื้นที่รับลมที่เท่ากัน</li> </ol>
กังหันลม แกนนอน (HAWTs)	
ข้อดี	ข้อด้อย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. มีสัมประสิทธิ์โดยเฉลี่ยสูงกว่า VAWTs</li> <li>2. สามารถติดตั้งเสาสูงเพื่อรับลมชั้นบนที่มีความเร็วสูงกว่าได้</li> <li>3. มุมของใบพัดสามารถปรับได้จึงมีช่วงการทำงานที่คงที่</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เสาที่สูงทำให้ยากในการติดตั้ง และการขนส่งในพื้นที่ภูเขา และฐานรากต้องมีขนาดใหญ่</li> <li>2. ส่งผลกระทบต่อระบบ Radar</li> <li>3. ต้องการระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบกังหัน</li> <li>4. อาจเกิดการล้าของใบเนื่องจากการรับลมที่มีความเร็วที่ต่างกันระหว่างด้านบนและด้านล่าง</li> </ol>

จากการศึกษาข้อมูลต่างๆ ประกอบด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย พบข้อมูลที่สำคัญประกอบด้วย

- ความเร็วลมเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3-6 m/s
- พื้นที่ที่มีความเร็วลมสูงจะเป็นพื้นที่สูงและอยู่ในพื้นที่ป่าสมบูรณ์
- กังหันลมที่มีขายในปัจจุบัน มีค่า Cut in 3.0-4.5 m/s ค่า Rated speed อยู่ที่ประมาณ 7 – 9 m/s และ ค่า Cut out ที่ 25 m/s

- ข้อดีของกังหันลมแกนตั้งที่มีจุดเด่น คือ มี Cut in ต่ำ (ประมาณ 2 m/s) สามารถทำงานได้ในทุกทิศทางของลม โครงสร้างติดตั้งง่าย ใบกังหันสามารถสร้างได้ง่ายแต่ทั้งนี้ก็มีข้อเสียคือเมื่อเทียบสัมประสิทธิ์ก็พบว่าสัมประสิทธิ์ที่ต่ำกว่ากังหันลมแกนนอน ดังนั้นโครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบ และสร้างกังหันลมแกนตั้ง และลดข้อด้อยเรื่องสัมประสิทธิ์โดยการติดตั้งส่วนบังคับลมทั้งในส่วนทิศทางลมให้ตรงเข้าสู่ใบกังหัน และความเร็วลมก่อนที่จะปะทะใบของกังหัน โดยเลือกกังหันลมแบบ Savonius ที่มีใบพัดแบบหลายใบ (Multi blades) เนื่องจากใบของกังหันลมชนิดนี้สามารถสร้างได้ง่ายโดยใช้วัสดุในพื้นที่

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius ที่มีส่วนบังคับลม สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก
- 1.2.2 เพื่อทดสอบสัมประสิทธิ์ และคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius ที่มีส่วนบังคับลม สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 กังหันลมที่สร้างเป็นแบบ Savonius ที่มีหลายใบพัด (มากกว่า 4 ใบพัด) ซึ่งเป็นกังหันลมแกนตั้ง
- 1.3.2 การออกแบบกังหันลมจะพิจารณาว่าลมกระทำต่อกังหันอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของกังหัน
- 1.3.3 การออกแบบจะไม่พิจารณาผลของแรงเสียดทานภายในที่เกิดกับชิ้นส่วนต่าง ๆ เช่นตลับลูกปืน เพลา สายพาน เป็นต้น
- 1.3.4 ออกแบบให้ใช้วัสดุที่หาได้ในพื้นที่ที่ทำการศึกษ (ภายในประเทศ)
- 1.3.5 อุโมงค์ลมที่สร้างเป็นแบบเปิด และดูดลมเข้าสู่พื้นที่ทดสอบ
- 1.3.6 ขนาดพื้นที่ทำการทดสอบของอุโมงค์ลมต้องไม่น้อยกว่า กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร และสูง 1 เมตร
- 1.3.7 ทำการสร้างและติดตั้งกังหันลมที่ผ่านการออกแบบและทดสอบในอุโมงค์ลม ณ พื้นที่ที่เหมาะสม โดยเลือกพื้นที่ในมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง เป็นพื้นที่แรก และอาจจะพิจารณาพื้นที่อื่นหากมีความจำเป็น
- 1.3.8 ระบบผลิตไฟฟ้าที่ออกแบบและผลิตขึ้นจะเป็นแบบจาน ใช้แม่เหล็กถาวร และมีระบบควบคุมการประจุ และจ่ายไฟฟ้า
- 1.3.9 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะใช้กับระบบส่องสว่างแบบกระแสดตรงเท่านั้น

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

### 1.4.1 ด้านงานเชิงวิชาการ

- มีองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก ที่สร้างได้ง่าย โดยสามารถใช้วัสดุที่มีภายในประเทศ

- ได้รูปแบบของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานเพื่อการผลิตไฟฟ้า
- ได้ข้อมูลในการพัฒนากังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กเพื่อใช้ประโยชน์จริงสำหรับการพัฒนาระบบเพื่อการผลิตไฟฟ้า
- สามารถเผยแพร่เอกสารการทำวิจัยในแต่ละขั้นตอนในการประชุมระดับชาติ หรือวารสารระดับชาติ หรือวารสารระดับนานาชาติได้ เพื่อหาแนวทางในการพัฒนาระบบ
- รายงานการทำการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ที่สามารถนำข้อมูลไปใช้ศึกษาพัฒนาต่อไปได้

#### 1.4.2 ด้านสังคม

เนื่องจากกังหันลมที่ทำการศึกษาคือ เป็นกังหันลมที่ใช้ลมความเร็วต่ำ จึงสามารถทำงานได้เกือบตลอดทั้งปี รวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการสร้างสามารถหาได้ภายในประเทศ ดังนั้นประชาชนในพื้นที่จึงสามารถใช้ประโยชน์ได้ โดยการแนะนำแนวทางในการนำมาใช้ประโยชน์ และยังสามารถสร้างความสัมพันธ์อันดีระหว่างชุมชน กับนักวิชาการ นักศึกษา จากสถาบันการศึกษา

#### 1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ

เนื่องจากระบบที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถผลิตไฟฟ้า และจ่ายเข้าสู่ระบบแสงสว่าง ดังนั้นจึงเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้

### 1.5 ประเภทการวิจัย

การพัฒนาทดลอง (experimental development)

### 1.6 สาขาวิชาการและกลุ่มวิชาที่ทำการวิจัย

สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

### 1.7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

ได้ดำเนินการเผยแพร่และถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่กลุ่มเป้าหมายแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ

1.7.1 ผ่านการประชุมวิชาการระดับชาติ จำนวน 1 ครั้ง

1.7.2 ผ่านการสาธิตเทคโนโลยี โดยสาธิตการทำงานจริงของระบบที่สร้างขึ้นทั้งอุโมงค์ลม และกังหันลม

### 1.8 ผลสำเร็จและความคุ้มค่าของการวิจัยที่คาดว่าจะได้รับ

ผลสำเร็จของโครงการ ผลสำเร็จตามเป้าประสงค์ (G)

โดยภายหลังจากสิ้นสุดโครงการ ฯ จะได้กังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้โดยเป็นกังหันลมที่ใช้วัสดุในการก่อสร้างที่หาได้ภายในประเทศ และสามารถสร้างได้ง่ายโดยช่างระดับชุมชน ได้ข้อมูลเพื่อพัฒนากังหันลมแกนตั้งที่เหมาะสมกับศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ และได้อุโมงค์ลมที่สามารถใช้ในการศึกษาทางอากาศพลศาสตร์ของชิ้นงานต่างๆ

### 1.9 สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

- โรงวิจัยของไหลประยุกต์ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทนเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรม ชุมชน ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง (อาคารปฏิบัติการพลังงานทดแทน 2, OTOP)
- โรงวิจัยเชื้อเพลิงชีวมวล ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทนเพื่อการเกษตรและอุตสาหกรรม ชุมชน ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
- อาคารปฏิบัติการพลังงาน 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

## บทที่ 2

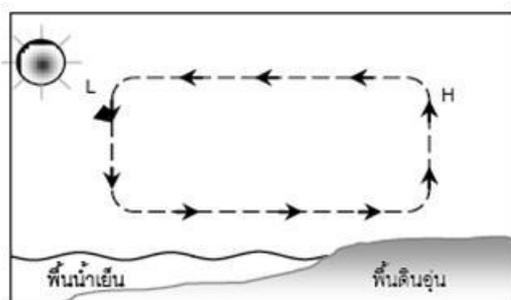
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลม (Wind)

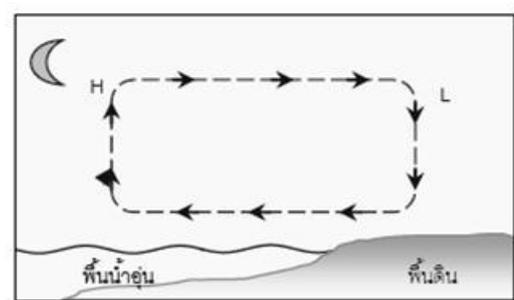
ลม คือการเคลื่อนที่หมุนเวียนถ่ายเทของอากาศในลักษณะเป็นวงรอบ (Circulation) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความกดอากาศเหนือพื้นผิวโลก เนื่องจากโลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงคุณสมบัติในการดูดและคายความร้อนที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ และช่วงเวลา เช่นในพื้นที่ที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ก็จะได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์สูงกว่า พื้นที่ขั้วโลก หรือ พื้นที่ที่เป็นพื้นน้ำ ก็จะสามารถดูดความร้อนได้ดีกว่าพื้นดิน ทำให้สามารถรักษาอุณหภูมิได้คงที่กว่า หรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่า ส่งผลต่ออุณหภูมิของอากาศเหนือบริเวณนั้น ๆ และทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของกระแสอากาศ หรือเรียกว่า การเกิดลม

**ลมท้องถิ่น (Local winds)** เป็นลมที่มีวงรอบของการเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ คือ เป็นช่วงวัน ครอบคลุมในภูมิภาคที่เฉพาะ โดยเกิดเนื่องจากลักษณะทางภูมิศาสตร์ และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในท้องถิ่น ตัวอย่างเช่น ลมบก-ลมทะเล ลมหุบเขา-ลมภูเขา

ลมบก - ลมทะเล เนื่องจากกลางวัน อากาศเหนือพื้นดินจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำเนื่องจากที่พื้นน้ำ (ทะเล) ความร้อนส่วนใหญ่ที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ จะถูกใช้ในการระเหยน้ำ และการดูดกลืนความร้อนของน้ำที่สูงกว่าดิน อากาศที่ร้อนกว่าเหนือพื้นดินจะลอยตัวขึ้น (ความกดอากาศต่ำ) อากาศเย็นที่อยู่เหนือพื้นน้ำ (ความกดอากาศสูง) ก็จะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดลมพัดจากพื้นน้ำเข้าสู่พื้นดิน เรียกว่าลมทะเล (Sea breeze) ในช่วงเวลากลางคืน เนื่องจากความสามารถในการเก็บความร้อนของดินน้อยกว่าน้ำ ทำให้ในเวลากลางคืน พื้นดินจะคายความร้อนเร็วกว่าน้ำ อากาศเหนือบริเวณพื้นดินจึงมีอุณหภูมิลดต่ำเร็วกว่าอากาศเหนือพื้นน้ำ ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศจากพื้นดินไปสู่ พื้นน้ำ เรียกว่าลมบก (Land breeze)



Sea breeze

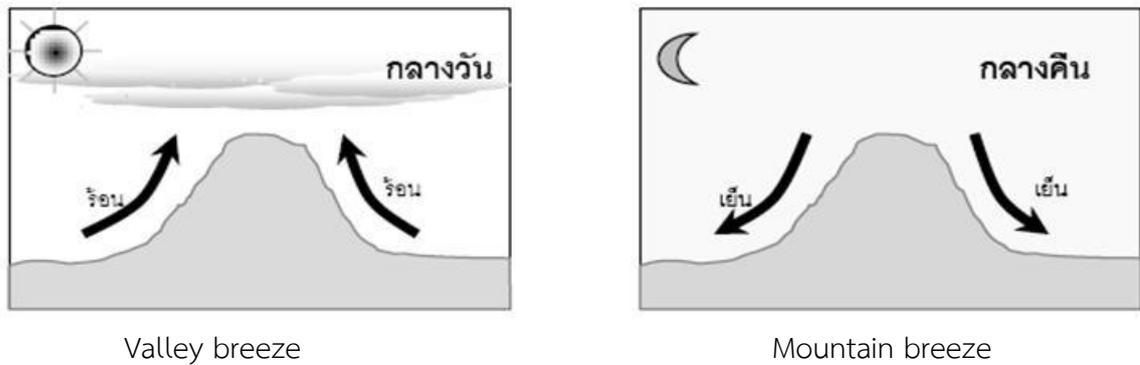


Land breeze

รูปที่ 2.1 ลมบก - ลมทะเล [9]

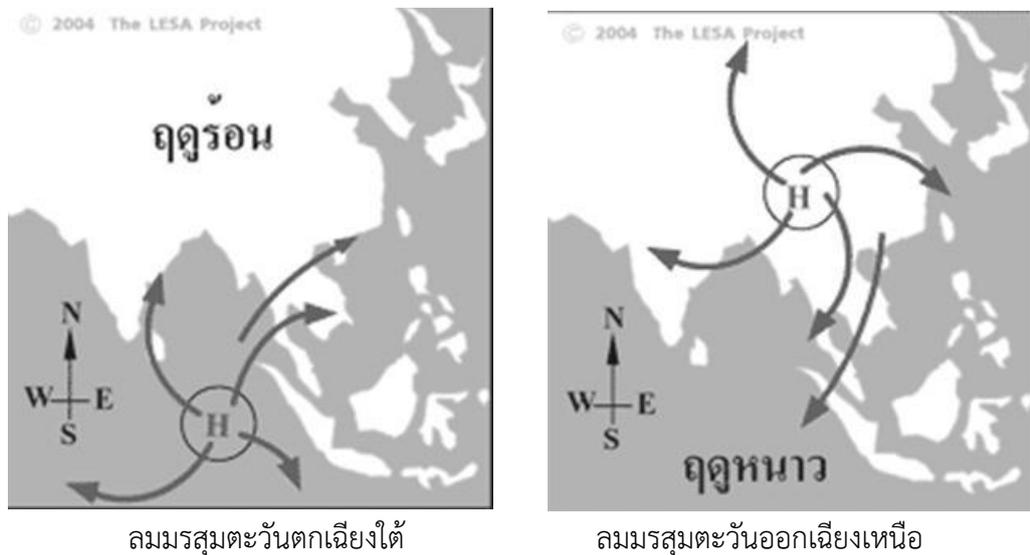
ลมหุบเขา - ลมภูเขา ในเวลากลางวัน เนื่องจากระดับความสูงที่ต่างกัน บริเวณไหล่เขาจะได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์สูงกว่าบริเวณหุบเขา ทำให้อากาศบริเวณไหล่เขาร้อนและลอยตัวสูงขึ้น อากาศในหุบเขาที่เย็นกว่าก็จะเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่ เกิด กระแสลมเรียกว่า ลมหุบเขา

(Valley breeze) ส่วนกลางคืน บริเวณไหล่เขาจะเกิดการคายความร้อนเร็วกว่าบริเวณหุบเขา ทำให้อุณหภูมิที่ไหล่เขา ต่ำกว่า หุบเขา อากาศจึงเคลื่อนที่จากไหล่เขาลงมาสู่หุบเขา เรียกว่า ลมภูเขา (Mountain breeze)



รูปที่ 2.2 ลมหุบเขา – ลมภูเขา [9]

**ลมประจำฤดู (Monsoon wind)** ลมประจำฤดู หรือ ลม มรสุม เกิดจากสาเหตุใหญ่ๆ คือ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นดิน และพื้นน้ำทำนองเดียวกับลมบก-ลมทะเล ในฤดูหนาวอุณหภูมิของอากาศภาคพื้นทวีปเย็นกว่าอุณหภูมิของอากาศในมหาสมุทรที่อยู่ใกล้เคียง อากาศเหนือพื้นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือทวีปซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดเป็นลมพัดออกจากพื้นทวีป พอถึงฤดูร้อนอุณหภูมิของอากาศภาคพื้นทวีปจะร้อนกว่าอากาศในมหาสมุทร เป็นเหตุให้เกิดลมพัดไปในทิศตรงกันข้าม คือ พัดจากมหาสมุทรเข้าสู่พื้นทวีป



รูปที่ 2.3 ลมประจำฤดู (Monsoon wind) [9]

ในเดือนพฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ อากาศแห้งจากบริเวณตอนกลางของพื้นทวีปมีอุณหภูมิต่ำกว่าอากาศเหนือมหาสมุทร กระแสลมพัดจากห่อมความกดอากาศสูงจากไซบีเรีย มาสู่ห่อมความกดอากาศต่ำในมหาสมุทรอินเดีย ทำให้เกิด ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ส่งผลให้เกิด

อากาศหนาวเย็น แห้งแล้ง ท้องฟ้าใส และในเดือนมีนาคม – ตุลาคม อากาศบริเวณตอนกลางของทวีปมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศเหนือมหาสมุทรอินเดีย อากาศร้อนยกตัวพัดเข้าหาแผ่นดินใจกลางทวีป ทำให้เกิด ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เกิด เมฆฝน และพายุฝนฟ้าคะนอง

## 2.2 พลังงานจากลม (Energy from the wind)

จากหลักของการดลและโมเมนตัม [15] นำมาพิจารณาของไหลมวล  $m$  (kg) ที่ถูกแรงกระทำ  $F$  (N) ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $V$  (m/s) ไปบนระนาบ  $x$ - $y$  จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันที่ว่า

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} \quad \text{หรือ}$$

$$Fdt = mdV \quad (2.1)$$

ในกรณีของไหลแบบคงที่ ในปริมาตรควบคุม สามารถทำการอินทิเกรต สมการที่ 1 ในช่วงเวลาหนึ่ง ได้เป็นสมการที่ 2.2 โดยไม่พิจารณาแรงเสียดทานของน้ำหนักรวมของของไหล และของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ความหนาแน่นของของไหลคงที่) คือ

$$F = m(V_2 - V_1) \quad \text{หรือ}$$

$$F = \rho VA(V_2 - V_1) \quad \text{เมื่อ } m = \rho VA \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\rho$	คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )
	$m$	คือ อัตราการไหล ( $\text{kg/s}$ )
	$A$	คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อการไหล ( $\text{m}^2$ )
	$V$	คือ ความเร็ว ( $\text{m/s}^2$ )

ทฤษฎีโมเมนตัมสำหรับกังหันลม พิจารณาของไหลที่ผ่านกังหันลม โดยพิจารณาที่ปริมาตรคงที่ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้นคือ [8,10]

- อากาศเป็นของไหลที่ไม่มีการยุบตัว และมีอัตราไหลผ่านกังหันคงที่
- ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับกังหัน
- จำนวนใบของกังหันมีจำนวนอนันต์
- ลักษณะการไหลผ่านระนาบการหมุนของกังหันเหมือนกันทุกจุด
- ความดันสถิต (Static pressure) ของอากาศ ก่อนและ หลังผ่านระนาบกังหัน ไม่ขึ้นกับความดันบรรยากาศ

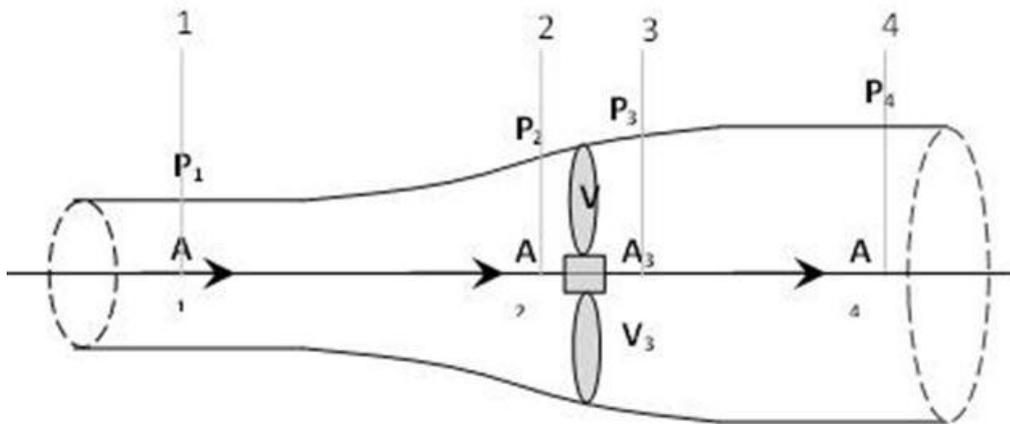
ดังนั้น จาก อัตราการไหล (Mass Flow Rate) ของอากาศคงที่ตลอดทั้งระบบ ก็จะได้ว่า

$$m = \rho V_0 A_0 = \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $V_x$  และ  $A_x$  คือ ความเร็วลม และพื้นที่ ณ จุดต่าง ๆ

แรงที่กระทำที่ระนาบการหมุนของกังหันสามารถพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม จากสมการที่ 2.2 และรูปที่ 2.4 คือ

$$F = \rho AV(V_1 - V_4) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.4 การไหลของอากาศผ่านกังหัน [10]

พิจารณาความดันที่จุด 2 และ 3 จะได้ ผลต่างของแรงที่กระทำอันเนื่องมาจากของไหลที่ระนาบ 2 และ 3

$$F = A(P_2 - P_3) \quad (2.5)$$

เขียนสมการที่ 2.4 และสมการที่ 2.5 ใหม่ ได้ คือ

$$P_2 - P_3 = \rho V(V_1 - V_4) \quad (2.6)$$

จากสมการ เบริร์นูลลี โดยพิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนระดับความสูงระหว่างการเคลื่อนที่ของของไหล คือ

$$\text{ก่อนเข้าสู่กังหัน} \quad P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.7)$$

$$\text{ผ่านจากกังหัน} \quad P_3 + \frac{1}{2} \rho V^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho V_4^2 \quad (2.8)$$

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 เขียนใหม่เป็น โดยสมมติ ว่า  $P_1 = P_4$  เท่ากับความดันบรรยากาศ  
จะได้

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (2.9)$$

สรุปความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จากสมการ 2.6 และ 2.9 ได้

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_4) \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 จะเห็นว่า ความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จะเท่ากับ  
ค่าเฉลี่ยของอากาศก่อนและหลังระนาบการหมุนของกังหัน ดังนั้น กำลังเนื่องจากลมที่มีความเร็ว  $V$   
กระทำต่อกังหันสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.11 คือ

$$P = FV \quad (2.11)$$

แทนค่า  $F$  และ  $V$  จากสมการ 2.4 และ 2.10 ลงในสมการที่ 11 จะได้ ก็จะได้สมการแสดงถึง  
กำลังที่กังหันลมได้รับจากกำลังของลม

$$P = \frac{1}{2} \rho VA (V_1^2 - V_4^2) \quad (2.12)$$

ซึ่ง กำลังของกระแสลม ที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ คือ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho AV_{wind}^3 \quad (2.13)$$

สมการที่ 2.12 แสดงถึงกำลังที่กังหันลมได้รับจากลมและสมการ 2.13 แสดงถึงกำลังทั้งหมด  
ของลม จะเห็นว่า กำลังที่สามารถนำมาใช้ได้โดยกังหันลม มีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดที่มีในลม  
จากขีดจำกัด เบตซ์ (Betz limit) ในทางทฤษฎี ความเร็วลมที่ผ่านกังหันลม ( $V_4$ ) จะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง  
 $V_1$  แต่ค่า  $V_4$  ที่ทำให้ได้กำลังจากกังหันลมมากที่สุดคือ เมื่อ

$$V_4 = \frac{1}{3} V_1 \quad (2.14)$$

นั่นคือทำการแทนค่า  $V_4$  จากสมการที่ 14 และ  $V$  จากสมการที่ 2.10 ลงในค่ากำลังของกังหัน  
ในสมการที่ 2.12 จะได้กำลังสูงสุดที่กังหันลมทำได้ คือ

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A \left( \frac{V_1 + \frac{1}{3}V_1}{2} \right) (V_1^2 - \frac{1}{3}V_1^2) \quad (2.15)$$

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad (2.16)$$

นั่นคือ สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient,  $C_p$ ) หรือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่กังหันสามารถผลิตได้ (สมการที่ 2.12) กับกำลังทั้งหมดที่ ได้จากลม (สมการที่ 2.13) จะเท่ากับ

$$C_p = \frac{P}{P_{air}} = \frac{1/2 \rho A V (V_1^2 - V_4^2)}{1/2 \rho A V^3} \quad (2.17)$$

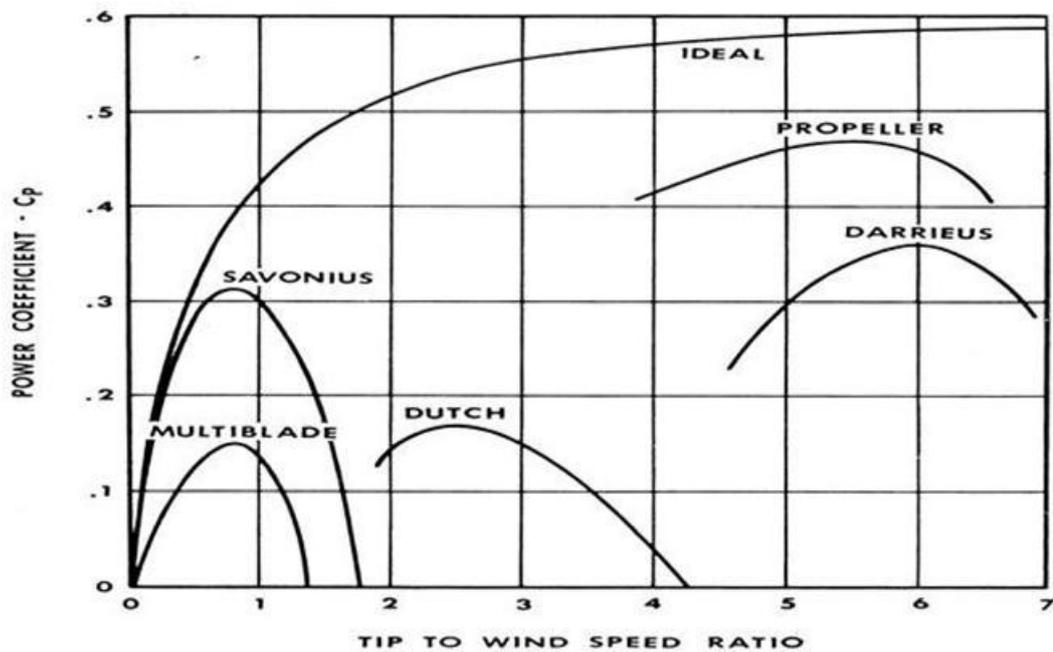
จาก ขีดจำกัดของ เบตซ์ (Betz limit) สามารถทำการพิจารณา สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient,  $C_p$ ) ใหม่ ได้คือ

$$C_p = \frac{P_{\max}}{P_{air}} = \frac{8/27 \rho A V^3}{1/2 \rho A V^3} = \frac{16}{27} \quad (2.18)$$

ดังนั้น ความสามารถในการดึงกำลังจากลมมาใช้โดยกังหันลมจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สูงสุดเท่ากับร้อยละ 59.26 ของกำลังทั้งหมดของลม ดังนั้นในการพิจารณากำลังที่กังหันลมผลิตได้สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.19 คือ

$$P_{turbine} = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \right) \quad (2.19)$$

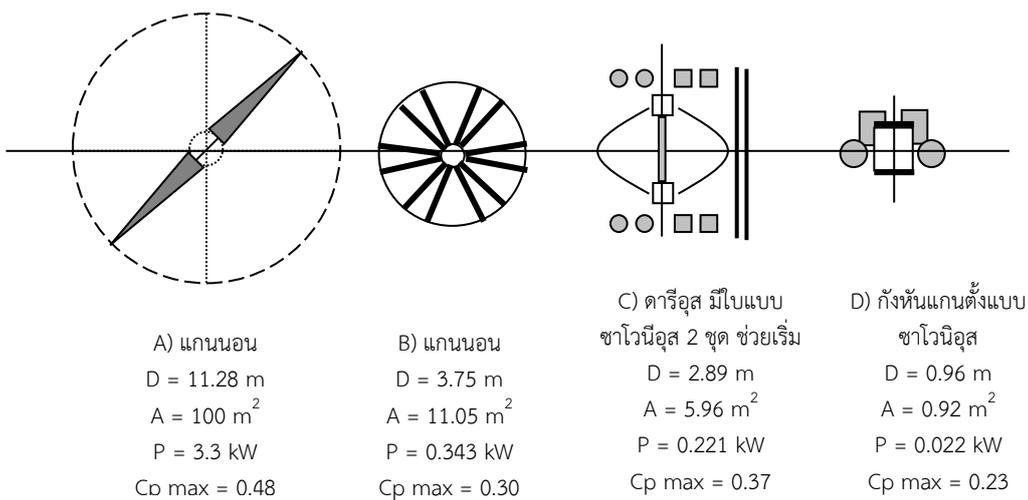
เมื่อ  $C_p$  คือ สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient or Coefficient of Performance) ของกังหันลมแต่ละประเภท



รูปที่ 2.5 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ [11]

### 2.3 กังหันลม (Wind Turbine)

โดยทั่วไป กังหันลมจะมี 2 ชนิด คือ กังหันลมแกนนอน และกังหันลมแกนตั้ง สำหรับกังหันลมแกนตั้ง จะมีข้อดีกว่ากังหันลมแกนนอน คือ สามารถทำงานได้อย่างอิสระ ไม่ขึ้นกับทิศทางของลม และไม่จำเป็นต้องมีระบบเสริมในการปรับกังหันให้เข้ากับทิศทางลม อย่างไรก็ตามกังหันลมแกนตั้ง จะไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแรงยก (Lift Force) ยกเว้นกังหันลมแบบดาร์ริอุส (Darrieus Roter)



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบกังหันชนิดต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากัน (3.2 m<sup>2</sup>) ที่ความเร็วลม 5.6 m/s [7]

รูปที่ 2.6 จะเห็นได้ชัดว่า กังหันลมแกนตั้งที่มีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากับกังหันลม 2 ใบแกนนอนจะให้ค่าพื้นที่รับลมน้อยกว่ามาก และย่อมจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่ำกว่าด้วย โดยทั่วไปกังหันลมแกนตั้งต้องใช้วัสดุที่มากกว่าเพื่อให้ได้กำลังเท่ากับกังหันลมแกนนอน เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอน (รูปที่ 2.6 กังหัน A) และแกนตั้งแบบดาร์ริอุส (รูปที่ 2.6 กังหัน C) ที่มีพื้นที่ใบกังหันรับลมเท่ากัน ที่ความเร็วลม 5.0 เมตร/วินาที กำลังที่ได้ที่เพลลาของกังหันลมแกนตั้งแบบดาร์ริอุสจะมีค่าน้อยกว่า กังหันลมแกนนอนประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทั้งนี้ คุณสมบัติของกังหันลมชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.2



กังหันลมแกนตั้ง [12]

กังหันลมแกนนอน [13]

รูปที่ 2.7 รูปแสดงตัวอย่างกังหันลมแกนตั้ง และกังหันลมแกนนอน

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอนและแกนตั้งที่มีพื้นที่กังหันเท่ากับ 100 m<sup>2</sup> [7]

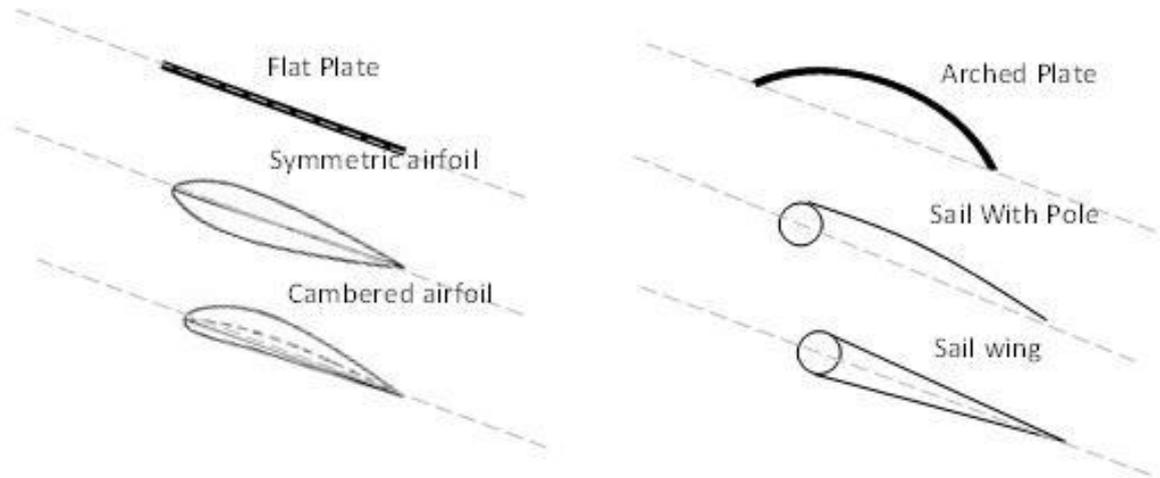
ประเภท	ความเร็วลม (m/s)	C <sub>p</sub>	กำลังเพลลา (kW)
แกนตั้ง	5.0	0.2	1.5
แกนนอน	5.0	0.42	3.1
	3.9	0.42	1.5

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [8]

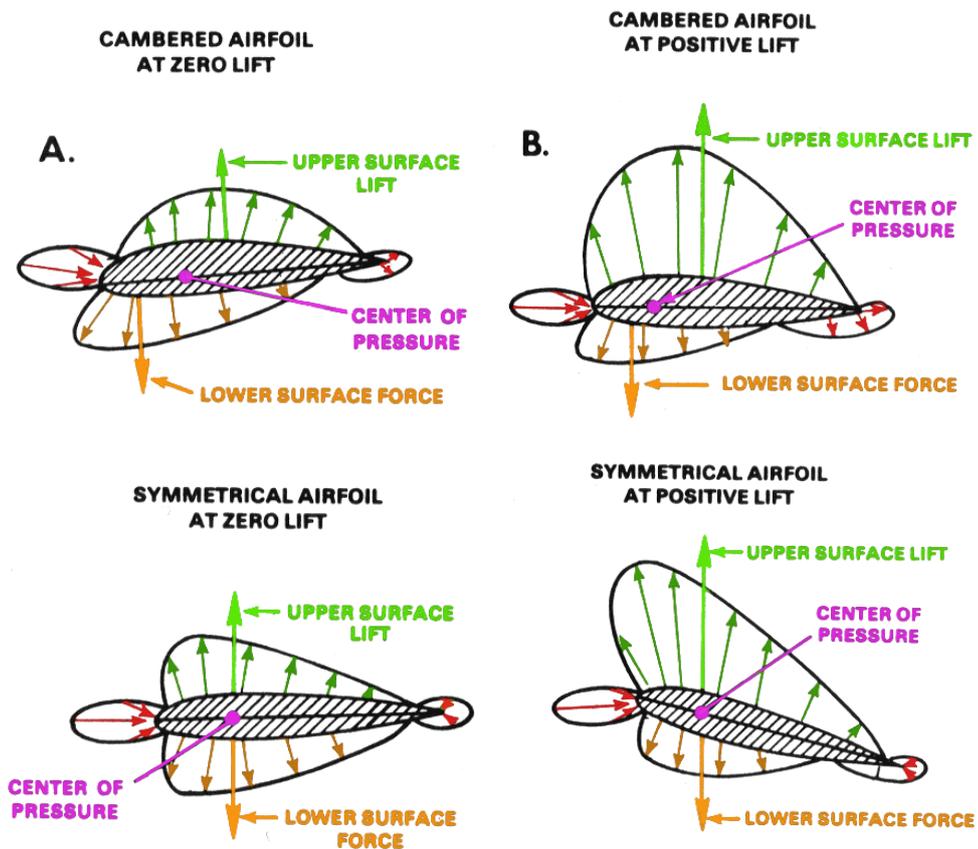
Rotor type	Typical Load	(RPM)	C <sub>p</sub>	Torque
Propeller	Electrical Generator	High	0.42	Low
Darrius	Electrical Generator	High	0.40	Low
Giromill (Cycrogiro)	Electrical Generator or Pump	Moderate	0.45	Moderate
Chalk Multi-blade	Electrical Generator or Pump	Moderate	0.35	Moderate
Sail Wing	Electrical Generator or Pump	Moderate	0.35	Moderate
Fan-type	Electrical Generator or Pump	Low	0.30	High
Savonius	Pump	Low	0.15	High
Dutch-type	Pump or millstone	Low	0.17	High

### 2.4 แพนอากาศ (Airfoil)

ลักษณะของใบพัดนั้นมีอยู่หลายแบบ ตั้งแต่แบบที่ง่ายที่สุดคือ เป็นแผ่นแบน จนกระทั่งแบบที่มีโค้งงอ ที่มีหลักการทางอากาศพลศาสตร์ที่สลับซับซ้อน แพนอากาศแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แพนอากาศแบบต่าง ๆ [10]



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายของความดันที่กระทำต่อใบพัด [14]

เมื่อ มีกระแสลมเคลื่อนที่ผ่านกังหัน จะทำให้เกิดความดันขึ้นที่ใบพัด โดยลักษณะการแจกแจงของความดัน จะขึ้นกับ มุมปะทะของลม กับเส้นสมมติของใบพัด (Chord) ลักษณะการกระจายของความดันบนใบพัดแสดงตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.9 จะก่อให้เกิดแรงกระทำต่อใบพัด 2 แรง คือ แรงยก (Lift forces) และ แรงต้าน (Drag forces) และเกิดทอร์ก คือ แรงบิดเนื่องจากการหมุน (Pitching Moment) แรงยก มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางสัมผัสของการไหลของอากาศเป็นแรงสนับสนุนการหมุนของใบพัด แรงต้าน คือแรงที่ต้านการหมุนของใบพัด มีทิศทางขนานกับทิศทางสัมผัสของการไหลของอากาศ และแรงบิด ซึ่งจะเป็นเป็นแรงที่เฉพาะ ณ จุดต่างๆ บนใบพัด โดยปรกติจะเท่ากับ 0.25 ที่เส้นสมมติ

## 2.5 สมรรถนะของแพนอากาศ (Airfoil Coefficient)

สมรรถนะของแพนอากาศ จะเขียนอยู่ในรูป สัมประสิทธิ์ ทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Coefficient) ที่ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ 3 รูป คือ สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient) และ สัมประสิทธิ์แรงบิด (Moment Coefficient) ซึ่งเขียนในรูปสมการดังนี้

$$C_L = \frac{L}{1/2\rho AV^2} \quad \text{Lift Coefficient} \quad (2.20)$$

$$C_D = \frac{D}{1/2\rho AV^2} \quad \text{Drag Coefficient} \quad (2.21)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2\rho c AV^2} \quad \text{Moment Coefficient} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $L$ ,  $D$ ,  $M$  และ  $c$  คือ แรงยก แรงต้าน แรงบิด และ ความยาวของเส้นสมมติ (Chord Length) ตามลำดับ แรงยกและแรงต้านจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของแพนอากาศและมุมปะทะของอากาศต่อแพนอากาศ ทำให้แพนอากาศแบบต่างๆ มีสมรรถนะที่แตกต่างกันไป ซึ่งนิยมแสดงสมรรถนะของแพนอากาศโดยรูปกราฟ Lift Coefficient - Attack Angle ( $C_L-\alpha$ ) และ กราฟ Lift Coefficient - Drag Coefficient ( $C_L-C_D$ ) ดังรูปที่ 2.10

การเลือกแพนอากาศในการสร้างกังหันลม นั้นควรพิจารณาค่า Lift Coefficient ( $C_L$ ) และ Attack Angle ( $\alpha$ ) ที่ทำให้ อัตราส่วน  $C_D / C_L$  มีค่าต่ำสุด จึงจะได้กำลังสูงสุดที่เป็นไปได้จากแพนอากาศแบบนั้นๆ ทั้งนี้ก็จะขึ้นกับ เลขเรโนลด์ (Re, Reynolds number) ที่เหมาะสมด้วย โดยมีวิธีการหา อัตราส่วน  $C_D / C_L$  มีวิธีการดังนี้

- รูป ข ลากเส้น 1 ไปสัมผัสกราฟ A อ่านค่า  $C_D$  และ  $C_L$
- ใช้ค่า  $C_L$  จากรูป ข ในรูป ก ลากเส้น  $C_L$  ไปชนกราฟ B แล้วอ่านค่า มุมปะทะ ( $\alpha$ ) จะได้ค่ามุมปะทะที่ทำให้  $C_D / C_L$  มีค่าต่ำสุด โดยค่านี้จะเป็นค่า มุมปะทะออกแบบ

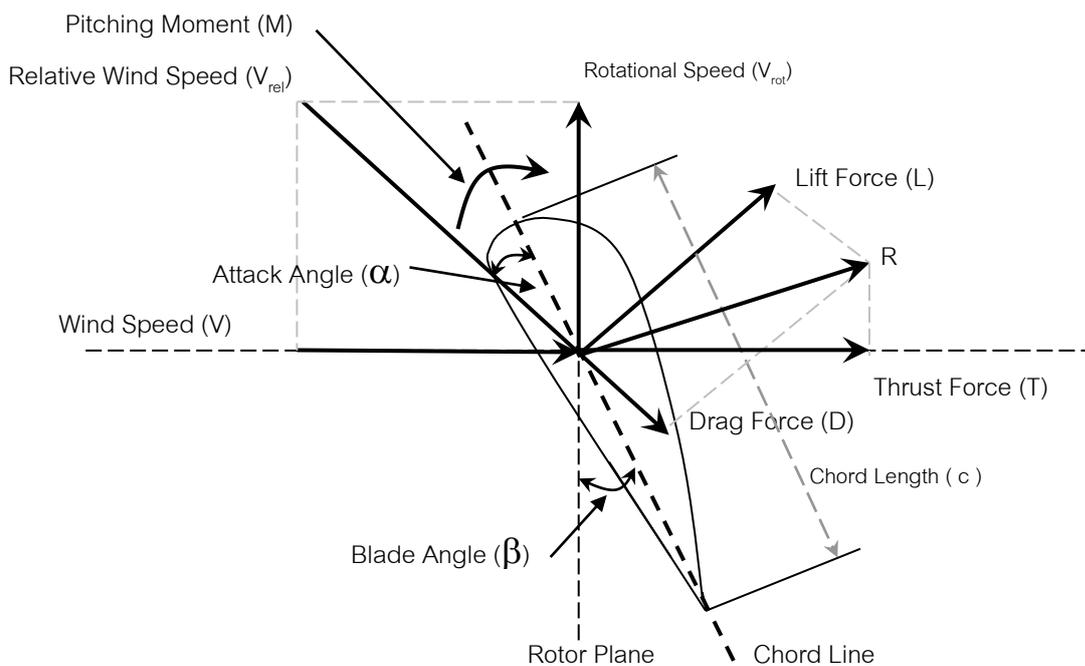
แรงที่เกิดขึ้นบนใบพัดนั้นเกิดจากแรงกระทำต่าง ๆ ที่กระทำต่อแพนอากาศเมื่อมีกระแสอากาศไหลผ่าน จากรูปที่ 2.10 พบว่า แรงที่เป็นองค์ประกอบหลักที่เกิดขึ้นบนใบพัด ประกอบด้วย แรงยก (L) แรงต้าน (D) และ แรงลัพท์ที่เกิดขึ้น (R) จากผลของแรงเหล่านี้ ทำการแตกเวกเตอร์ออกในทิศทางคือ

- แรงในแนวแกน ( $F_A$ ) ซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อลูกปืนของเพลลา และส่งต่อไปยังหอคอย
- แรงในแนวสัมผัส ( $F_T$ ) ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนของใบพัดให้พลังงานกล

$$F_A = \frac{1}{2} C_A \rho V^2 A \tag{2.23}$$

$$F_T = \frac{1}{2} C_M \rho V^2 A \tag{2.24}$$

เมื่อ  $C_A$  คือ สัมประสิทธิ์ในแนวแกน



รูปที่ 2.10 ลักษณะการทำงานของแพนอากาศ [8]

## 2.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทย

ในปี พ.ศ.2531 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้กำหนดแผนงานเชื่อมโยงระบบกังหันลมมาผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในลักษณะการใช้งานจริงและเพื่อศึกษาหาประสบการณ์ในการเชื่อมต่อเข้าระบบไปพร้อมๆ กัน โครงการดังกล่าวดำเนินไปด้วยดีตามแผนงาน โดยได้รับความร่วมมือจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และสามารถพัฒนาฟาร์มกังหันลมนอกชายฝั่งทะเลในต่างประเทศ

การตรวจวัดศักยภาพพลังงานลมในอดีตจะอยู่ภายใต้การดำเนินการของกรมอุตุนิยมวิทยา แต่เป็นการตรวจวัดเพื่อวัตถุประสงค์ทางอุตุนิยมวิทยาเท่านั้น ดังนั้นการวัดจึงกระทำที่ระดับ 10 เมตร โดยทำการตรวจวัดวันละ 8 ครั้ง ห่างกันช่วงละสามชั่วโมง แต่การวัดดังกล่าวไม่เที่ยงตรงมากนักสำหรับใช้ประเมินกระแสลมเพื่อพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังงานลม ซึ่งต้องอาศัยการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาด้วยอัตราเฉลี่ยทุกนาที สิบนาที และทุกหนึ่งชั่วโมงตลอด 24 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามการศึกษาศักยภาพของพลังงานลมในประเทศไทยได้มีการศึกษากันอย่างเป็นทางการโดยหน่วยงานของรัฐจำนวน 6 ครั้ง คือ

1. ปี พ.ศ. 2518 กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน ใช้ความเร็วลมเฉลี่ยจากกรมอุตุนิยมวิทยาเพื่อแสดงศักยภาพพลังงานลมที่มีกำลังสูงและกำลังปานกลางทั่วประเทศไทย

2. ปี พ.ศ. 2524 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยร่วมมือกับ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในการจัดทำข้อมูลความเร็วลมเฉลี่ยของกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 53 สถานี ที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2509-2521 และปรับระดับความสูงให้เป็นความสูงมาตรฐานที่ 10 m โดยอาศัยกฎของกำลัง (power law)

3. ปี พ.ศ. 2527 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้รับทุนสนับสนุนจาก USAID ในการจัดทำข้อมูลความเร็วลมจากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา จำนวน 62 สถานี ที่มีระยะเวลาเก็บข้อมูล 17 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2509-2525 และจัดทำแผนที่ศักยภาพของพลังงานลม แสดงความเร็วและกำลังลมซึ่งปรับระดับโดยใช้กฎลอการิทึม (logarithmic law) ที่ความสูง 10 m รวมช่วงลมสงบและไม่รวมช่วงลมสงบ รวมทั้งตารางแสดงค่า K-Shape และ C-Scale ของสถานีตรวจวัดต่างๆ

4. ปี พ.ศ. 2544 กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน โดยกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานได้จัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยโดยอาศัยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กองทัพอากาศ ศูนย์ศึกษาสมุทรศาสตร์ บริษัท Unocal (Thailand), Ltd. เนื่องจากในการศึกษาที่ผ่านมามีข้อจำกัดด้านปริมาณข้อมูลโดยเฉพาะข้อมูลในทะเล โดยเตรียมข้อมูลความเร็วลมพื้นผิวเพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อมูลความถี่ทิศทางความเร็วลม (wind rose) ในรูปของกราฟและสถิติ ซึ่งจากการศึกษาศักยภาพของพลังงานลมของประเทศไทย ทำให้ได้แผนที่รายเดือนและเฉลี่ยทั้งปีของกำลังลมและอัตราเร็วลมรวมช่วงลมสงบและไม่รวมช่วงลมสงบ และฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์กำลังลม

5. ในปี พ.ศ. 2544 ธนาคารโลกได้ทำการประเมินศักยภาพพลังงานลมในเขตพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

6. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ทำการศึกษาศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ในจังหวัดสงขลาและพัทลุงโดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ซึ่งได้ทำการตรวจวัดอัตราเร็วและทิศทางของลมที่ระดับความสูง 10 30 และ 40 m และใช้โปรแกรม WASP 8.3 สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลและประเมินพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี ผลการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาว 1 ปี พบว่าบริเวณเกาะใหญ่ อ.กระแสดินธุ์ จ.สงขลา เป็นบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงพอสำหรับการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยได้ทำการเสนอการติดตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานลมแบบฟาร์มกังหันลมขนาด 5 MW

7. หลังจากนั้นการศึกษาด้านศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยก็ได้หยุดชะงักลงจนถึงปี 2549 จึงได้มีการศึกษากันอีกรอบอันเนื่องมาจากกระแสของการแสวงหาพลังงานทดแทนภายในประเทศ โดยมีตัวอย่างงานวิจัยดังนี้

**ปี พ.ศ. 2549** สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ได้สนับสนุนงบประมาณในการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในพื้นที่ภาคเหนือ แก่ ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่และให้มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ร่วมดำเนินการศึกษาศักยภาพพลังงานลมเฉพาะแหล่ง โครงการประเมินศักยภาพของพลังงานเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย ผลการศึกษาได้พื้นที่ๆ มีศักยภาพพลังงานลมดีเหมาะสมที่จัดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ภาคเหนือจำนวน 3 แห่งคือ บริเวณบ้านดอยม่อนล้าน อ.พร้าว จ.เชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.73 m/s บริเวณบ้านกัวลม อ.ปาย จ.แม่ฮ่องสอน ความเร็วลมเฉลี่ย 6.24 m/s บริเวณบ้านแม่แฮ อ.สะเมิง จ.เชียงใหม่ ความเร็วลมเฉลี่ย 5.72 m/s

ส่วนทางภาคใต้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ที่ระดับความสูง 60 m ซึ่งเป็นระดับความสูงของศูนย์กลางส่วนหมุนของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 1.5 MW มีสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยมากกว่า 6 m/s จำนวน 3 สถานี ได้แก่ ท่าศาลา ปากพั้งและระโนด ส่วนสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-6 m/s จำนวน 5 สถานี ได้แก่ หัวไทร สทิงพระ 1 สทิงพระ 2 จะนะ และสิงหนคร โดยในกรณีของแหล่งลมดีนั้นได้พิจารณาแบ่งออกเป็นสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูง (> 8 m/s) ปานกลาง (5-8 m/s) และต่ำ (< 5 m/s) ซึ่งพบว่ามีสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงจำนวน 5 สถานี ได้แก่ ขนอม ท่าชนะ ท่าศาลา ลิขลและกาญจนดิษฐ์ สำหรับสถานีวิจัยพลังงานลมที่มีศักยภาพของพลังงานลมปานกลางจำนวน 8 สถานี ได้แก่ ระโนด ทุ่งหว้า จะนะ เกาะลันตา สทิงพระ 1 ปากพั้ง เหนือคลอง และหัวไทร

**ปี พ.ศ. 2549** บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ศึกษาศักยภาพพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย พบว่าศักยภาพพลังงานลมผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมีประมาณ 1,454 MW บริเวณที่มีศักยภาพสูง พบว่า เป็นบริเวณอ่าวไทยภาคใต้ ตั้งแต่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา ปัตตานี และบริเวณบ้านแหลม จ.เพชรบุรี ความเร็วลมเฉลี่ย 3.0-4.2 m/s กังหันลมที่เหมาะสมขนาด 140 ถึง 320 kW

**เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ และคณะ (2553)** ได้มีการศึกษาพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมที่ความละเอียด 1 กิโลเมตร ครอบคลุมทั่วประเทศไทย ที่ระดับความสูงต่างๆ รวมถึง 100 m เหนือพื้นดิน ควบคู่กับแผนที่ภูมิศาสตร์สารสนเทศเพื่อประกอบการคัดเลือกพื้นที่ติดตั้งกังหันลม โดยใช้ระยะเวลาการพัฒนาทั้งสิ้น 3 ปี (พ.ศ. 2550-2552) โดยวัตถุประสงค์ของแผนที่ดังกล่าวคือ ใช้เป็นฐานข้อมูลพื้นฐานที่มีความทันสมัยและน่าเชื่อถือมากขึ้นกว่าในอดีตและเข้าถึงได้โดยสาธารณะ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย การพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมนี้ได้อาศัยเทคนิคการจำลองแบบเมโสสเกล-ไมโครสเกลรวมกัน ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมสำหรับสเกลพื้นที่ใหญ่ๆ จากการศึกษาพบว่า ผลโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แต่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูงกว่าค่าที่ตรวจวัด โดยแสดงแผนที่ความเร็วลมเฉลี่ยที่ระดับความสูง 100 m

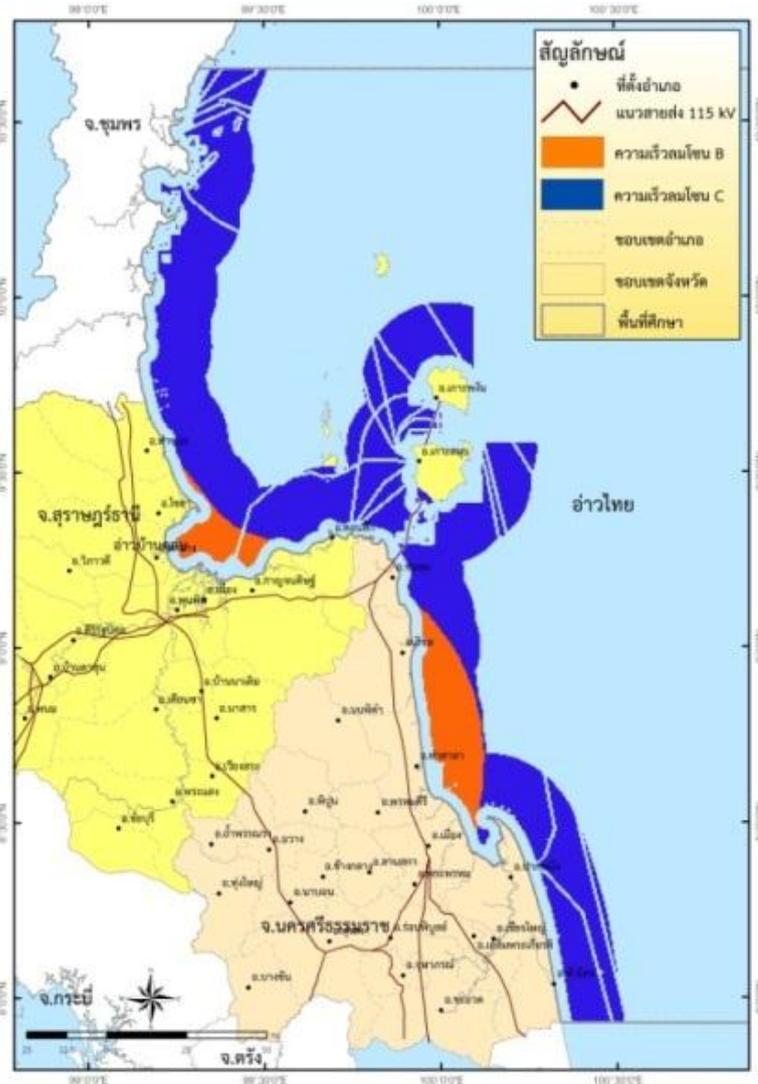
**รัตเกล้า พันธุ์ร่ำม และคณะ (2553)** ทำการประเมินศักยภาพพลังงานลมโดยอาศัย three-dimensional meso-scale meteorological model มาใช้งาน โดยแบบจำลองดังกล่าว ทำการคำนวณหาผลลัพธ์จากชุดสมการของ atmospheric physic process ซึ่งสัมพันธ์กับ หลักการด้านพลศาสตร์ (dynamic) เทอร์โมไดนามิก (thermodynamic) ไมโครฟิสิกส์ (microphysic) และการเปลี่ยนสถานะของความชื้นในบรรยากาศ (moisture phase change) ผลลัพธ์ที่ได้จาก three-dimensional meso-scale meteorological model คือ ข้อมูลด้าน อุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความเร็วลม ทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้น ในพื้นที่ที่ระดับความสูงต่างๆ ในแต่ละ ชั่วโมง ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือวัด ไม่ต้องเสียเวลาในการ เก็บข้อมูลตรวจวัดจริง และค่าที่ได้ยังสามารถใช้ทวนสอบกับค่าตรวจวัดจริงได้ด้วย โดยได้ ทำการศึกษาข้อมูลลมของปี 2548-2550 ซึ่งถือได้ว่าเป็นปีปกติ หรือ ปีที่สภาพอุตุนิยมวิทยาของ ไทยไม่ได้รับอิทธิพลสูงจากปรากฏการณ์เอลนีโญ และลานีญา ผลจากการคำนวณทำให้ได้ข้อมูล ความเร็วลมรายชั่วโมงที่มีความละเอียดขนาด  $10 \times 10 \text{ km}^3$  หรือระบุพื้นที่ได้ถึงระดับอำเภอ ซึ่ง เป็นการคำนวณที่ละเอียดที่สุดเท่าที่เคยทำในประเทศไทย

**เสริม จันทร์ฉาย และคณะ (2553)** ได้ทำการพัฒนาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับ ประเทศไทยฉบับใหม่ โดยในการจัดทำแผนที่ได้ทำการคัดเลือกแบบจำลองบรรยากาศสเกลปาน กลางสำหรับคำนวณความเร็วลมในประเทศไทย และทำการจัดหาข้อมูลสถานะพื้นฐานของ บรรยากาศ พร้อมทั้งข้อมูลระดับความสูงของพื้นที่และความหยาบของพื้นที่ (roughness) ของ ประเทศไทยสำหรับเป็นอินพุทของแบบจำลองจากนั้นใช้ระบบดังกล่าวทำการคำนวณความเร็วลม รายชั่วโมงครอบคลุมช่วงระยะเวลา 15 ปี (ค.ศ. 1995-2009) โดยใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แล้วนำ ผลมาหาค่าเฉลี่ยระยะยาวรายเดือนและรายปี แล้วได้นำค่าจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่ ได้วัดแต่ละภูมิภาค ผลการเปรียบเทียบพบว่า ความเร็วลมจากการคำนวณส่วนใหญ่สอดคล้อง กับค่าที่ได้จากการวัด มีค่าความแตกต่างในรูป root mean square difference เท่ากับ 12.9 % และจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยที่ระดับความสูง 10 40 70 90 และ 110 m พบว่าบริเวณที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 6-7 m/s อยู่ในพื้นที่ภูเขาในภาคใต้ และภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ

**อาปีดิน จิตลา (2009)** ได้ทำการวิจัยการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการ สร้างแผนที่ศักยภาพพลังงานลม: กรณีศึกษาจังหวัดชัยภูมิ งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม WindSim และเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ใช้ข้อมูลลมที่วัดที่สถานีวัดลมสองสถานีที่ห่างกัน 10 กิโลเมตร คือที่ตำบลท่ามะไฟหวานและตำบลเก่ายาดิ อำเภอแก้งคร้อ จังหวัดชัยภูมิ พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง 10 45 60 และ 90 m มีค่าเท่ากับ 3.19 4.55 4.95 และ 5.33 m/s ตามลำดับ ส่วนที่เก่ายาดิมีค่าเท่ากับ 3.41 4.70 5.24 และ 5.57 m/s

**ปี 2554-2555** มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ ให้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณภาคใต้ตอนกลางของประเทศไทย โดยเป็นโครงการแรกที่ทำการศึกษาพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเล โดยพบว่าในพื้นที่ อ่าวบ้านดอนของจังหวัดสุราษฎร์ธานีและบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลอำเภอขนอม อำเภอสิชลและอำเภอท่า

ศาลาของจังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นบริเวณที่มีศักยภาพของพลังงานลมสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนที่ความเร็วลมนอกชายฝั่งทะเล [22]

**2.6.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมขนาดเล็ก**

สมาน เสนงาม (2525) ได้ทำการวิจัยออกแบบ สร้างเพื่อทดสอบสมรรถนะต้นแบบ กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ต้นแบบที่สร้างขึ้นเป็นแบบแกนราบ แบบ 3 ใบพัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.36 m ใบพัดทำด้วยไม้สยา เป็นรูปแพนอากาศหมายเลข NACA 2312 ทำมุม 6 องศา สำหรับรับความเร็วลมที่ 4 m/s ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการทำงานให้คงที่ที่ 200 RPM ใช้สายพานและล้อสายพาน 2 ชุด ทดสอบความเร็วเป็น 1,600 RPM สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของรถยนต์ ผลการติดตั้งและทดสอบปรากฏว่า อุปกรณ์ควบคุมความเร็วแบบโมเมนตัม ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถควบคุมการทำงานของกังหันลมได้อย่างสมบูรณ์ จากปัญหาทางด้านสมดุล ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเมื่อหมุนด้วยความเร็วรอบสูง จนทำให้ใบพัดเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้า หลังจากทำงานไป

แล้ว 360 ชั่วโมง จึงสรุปปัญหาที่เกิดในการสร้างกังหันลมคือ ความไม่สมดุลของกังหัน ความประณีตในการสร้าง ความแข็งแรงของโครงสร้าง การสูญเสียเนื่องจากความผิด

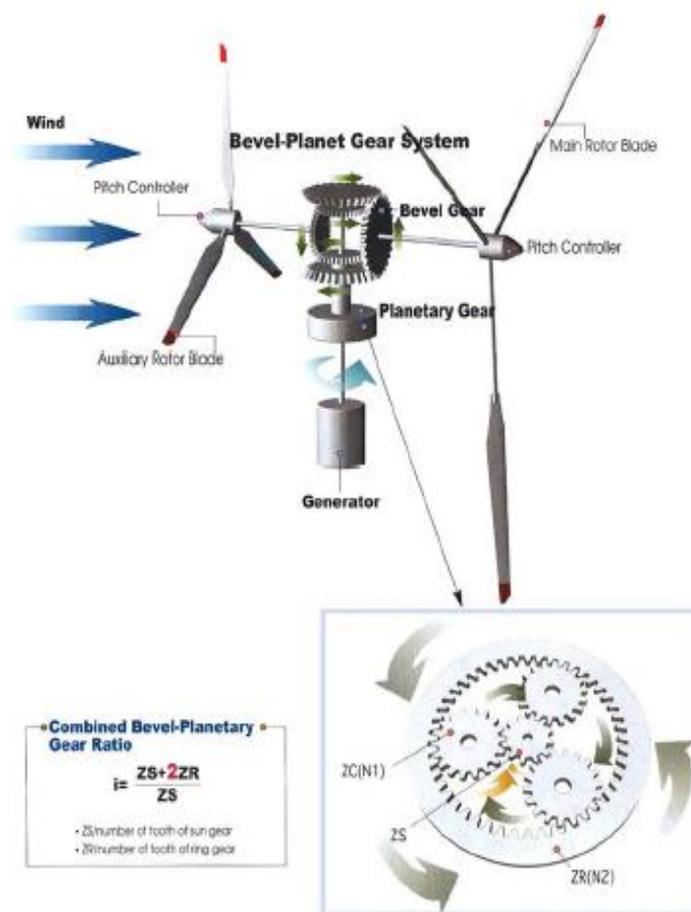
**เสถียร วงศ์สารเสริฐ (2520)** ทดสอบสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้ง 3 ชนิดคือ Savonious, Hybrid และ Modified Savonious พบว่ากังหันลมแบบ Savonious มีสัมประสิทธิ์สูงสุด 6.58-13.84 % ที่ความเร็วลม 7 – 10 m/s รวมทั้งสร้างง่าย ราคาถูก แต่ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ส่วนแบบ Modified Savonious จะเป็นแบบที่ควบคุมความเร็วรอบได้ แต่สัมประสิทธิ์จะต่ำกว่าคือ 3.55-4.21% และทำการสร้างได้ยากกว่าด้วย ส่วนกังหันแบบ Hybrid มีสัมประสิทธิ์ต่ำที่สุด คือ 0.49-1.47% และการสร้างใบทำได้ยากเช่นกัน

**สมาน เสนงาม (2525)** ได้ทำการออกแบบสร้าง ทดสอบกังหันลมสูบน้ำแบบล้อจักรยาน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 m มีขอบล้อและกระดุมล้อใช้ในการยึดลวดขึ้นโครงกังหันเป็นใบพัด จำนวน 25 ใบ ทำมุมใบเฉลี่ย 30 องศา สำหรับความเร็วลม 4 m/s จากปลายเพลากังหันมีข้อเหวี่ยงช่วงชัก 60 มม. ต่อกับก้านชัก ซึ่งเป็นท่อประปาขนาด 25 mm จากหอคอยลงมาปั้มน้ำที่สร้างจากกระบอกสูบเหล็กกล้า และลูกสูบบางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 mm การทดสอบสมรรถนะพบว่าสามารถใช้งานได้ดี โดยมีสัมประสิทธิ์สูงสุดประมาณ 23 % และสามารถส่งน้ำได้ความสูง 12 m ให้อัตราการไหลสูงสุด 9 liter/min ที่ความสูงน้ำ 8 m ความเร็วลม 6.4 m/s จึงสามารถสรุปได้ว่า กังหันแบบนี้สามารถใช้งานได้ดี เหมาะกับความเร็วลมต่ำ โดยสามารถเริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลม 2.4 m/s และมีส่วนที่ต้องปรับปรุงคือ การใช้จำนวนใบพัดหรือพื้นที่ใบพัดให้เหมาะสมกับความเร็วลมของแต่ละท้องที่ และควรใช้ลูกสูบนั่ง กระบอกสูบทองเหลือง เพื่อเพิ่มระดับการส่งน้ำให้สูงขึ้น

**A.K. Wright and D.H. Wood (2004)** ศึกษา พฤติกรรมการเริ่มทำงานของกังหันลม 3 ใบพัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 m ทำการติดตั้งที่ความสูง 8 m จากตาดฟ้าชั้นที่ 4 ของอาคาร การศึกษาความเร็วลมเริ่มทำงาน พบว่า ความเร็วเริ่มทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 m/s จากการคำนวณข้อมูลแผนอากาศได้ความเร็วลมเริ่มทำงานเท่ากับ 4.7 m/s การศึกษาช่วงการเริ่มทำงาน (Wind speed starting Sequence) คือ การศึกษาเวลาที่ใช้ตั้งแต่กังหันลมเริ่มหมุนจนได้ความเร็วรอบ 250 RPM พบว่า ใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 28 s ขึ้นกับความเร็วของลม และพบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทฤษฎี blade element Theory ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่สุด เลขเรโนลด์ (Reynolds number, Re) ที่โคนของใบพัดจะมีค่าสูงกว่าที่ปลายใบพัด และที่ความเร็วลมสูงค่า Re จะสูงกว่าความเร็วลมต่ำ มุมปะทะก็มีผลต่อการเริ่มทำงานของกังหัน คือ ที่มุมปะทะสูงๆ จะใช้ระยะเวลาในการเริ่มทำงานที่ต่ำ ทั้งที่ความเร็วลมสูงและที่ความเร็วลมต่ำ ทอร์ก ที่ความเร็วลมต่ำ จะมีค่าค่อนข้างคงที่กว่า (0.01 – 0.04 N-m) ที่ความเร็วลมสูง (0.025-0.15 N-m) แต่ทอร์กที่ความเร็วลมสูงโดยเฉลี่ยแล้วมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วต่ำ

**Sung Nam Jung et al (2004)** ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ ของระบบกังหันลมแบบหมุนสวนทาง (Counter-Rotation (C/R) Wind Turbine System) ขนาด 30 kW โดยระบบที่ศึกษาประกอบด้วยกังหันลม 2 ตัว เรียกกังหันลมหลักที่หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และกังหันลมรองที่อยู่เหนือลม หมุนตามเข็มนาฬิกา และมีขนาดความยาวใบพัดครึ่งหนึ่งของกังหันหลัก ในการส่งกำลังจะใช้เฟืองที่หมุนทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

ในการพิจารณาพฤติกรรมของกังหันได้ทำการย่อขนาดจากกังหันจริงแล้วทำการทดสอบในอุโมงค์ลม ประกอบกับการใช้ทฤษฎีโมเมนตัมในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกังหันทั้ง 2 ต่อสภาวะการทำงานที่เหมาะสม พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันรองมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันหลักกำลังที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงขนาด 5/8 เท่าของ เส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันหลัก กำลังที่ได้จะมีค่าลดลง และการศึกษาถึงผลของระยะระหว่างกังหันทั้งคู่ต่อกำลังที่ได้พบว่า ระยะห่างที่เหมาะสมของกังหันทั้งคู่คือ ห่างกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันรอง ซึ่งจะให้กำลังที่เพิ่มขึ้นถึง 9% เมื่อเทียบระบบที่มีเฉพาะกังหันหลักที่ความเร็วลม 10.6 m/s กังหันลมแบบ C/R ให้กำลังที่สูงกว่า ถึง 21% และการศึกษา สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient,  $C_p$ ) พบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วลมประมาณ 3 m/s หรือที่ อัตราส่วนความเร็วทิว (Tip Speed Ratio) ประมาณ 9.5



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของกังหันหมุนสวนทาง [25]

A. Ozdamar et al. (2004) ทำการวัดความเร็วลมในเมือง เซอมี (Cesme) ในประเทศ ตุรกี ที่ระดับความสูง 10 m หรือสูงกว่าระดับน้ำทะเล 19.5 m โดยทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่วันที่ 5 พ.ย.2541 ถึง 5 พ.ย.2542 แล้วใช้วิธีการ สเปกตรัมคลื่นของ Pierson-Moskowitz แปลงความเร็วลมที่ได้เป็นพลังงานคลื่น แล้วทำการวิเคราะห์ราคาของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก มีเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันเท่ากับ 1 m ผลการศึกษาพบว่า ความเร็วลม

เฉลี่ยเท่ากับ 6.24 m/s จากข้อมูลที่เก็บทุก ๆ 10 นาทีตลอดทั้งปี จำนวน 52,560 ข้อมูล พบว่าจะได้กระแสไฟฟ้า 129,956.4 kW-h และทำการคำนวณค่าเฉลี่ยทั้งปีของพลังงานคลื่นที่ได้เท่ากับ 11.48 kW/m ดังนั้นจึงเลือกใช้กังหันขนาด 15 kW/m โดยกำหนดสัมประสิทธิ์ของกังหันเท่ากับ 25 % และทำงาน 85% ใน 1 ปี ได้ว่า สามารถผลิตไฟฟ้าได้ถึง 27,616 kW-h/ปี จากนั้นทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ได้ว่าราคาต้นทุนของกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.096 €/kW-h

**J.-L. Menet (2004)** ได้ทำการศึกษา กังหันลมแบบ double-step Savonius ขนาดสูง 1.015 m รัศมี 0.445 m พบว่าสามารถเริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลม 3 m/s และหมุนด้วยความเร็วรอบ 200 – 800 RPM ให้สัมประสิทธิ์เฉลี่ย 29 % เมื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรถยนต์ 12V 55A ที่ความเร็วลม 10 m/s สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 81 W ซึ่งใช้ในการประจุแบตเตอรี่

**Sumpun et al. (2004)** ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบกังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius 4 ใบพัดขนาดเล็กและทำการทดสอบการทำงานในอุโมงค์ลม พบว่าค่าที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันคือ ความเร็วลม และอัตราส่วนระหว่างแรงที่ได้กับพื้นที่รับลม (tangential force ratio) โดยมีค่า cut in wind speed เฉลี่ยเท่ากับ 1.2778 m/s และได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันเท่ากับ 5.0 – 7.5%.

**Tanate Chaichana (2010)** ได้ทำการออกแบบและศึกษาระบบกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก เพลาร่วมหมุนสวนทางกันเปรียบเทียบกับกังหันแกนตั้งแบบธรรมดาโดยทำการศึกษาในอุโมงค์ลม และเมื่อได้รูปแบบที่สมบูรณ์ก็ได้สร้างต้นแบบเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยผลการทดสอบในอุโมงค์ลมพบว่า ความเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาดเดียวมีค่าต่ำกว่ากังหันลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมหมุนสวนทางกันเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 m/s สัมประสิทธิ์ของกังหันลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมหมุนสวนทางกันมีค่าเท่ากับ 14.89% ซึ่งดีกว่ากังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาดเดียว 10.53% นอกจากนี้ ระบบเพิ่มสัมประสิทธิ์ของกังหันลมสำหรับกังหันลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมหมุนสวนทางกัน สามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์ของกังหันจาก 14.89% เป็นเฉลี่ยเท่ากับ 30.80% สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับกังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกันคือระบบผลิตไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำและแรงบิดต่ำ

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานของโครงการมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.1 ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาข้อมูลต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบ และการสร้าง การทดสอบ อุโมงค์ลม กังหันลม และระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

#### 3.2 การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมอุโมงค์ลม

ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมตามแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นเป็นอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบเปิด โดบประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. ส่วนที่ 1 ทางเข้าของอากาศ เป็นปลายเปิดรับลม เพื่อรับลม และริตลมเข้าสู่ส่วนที่ 2
2. ส่วนที่ 2 เป็นอุโมงค์ลมที่มีขนาดเท่ากับตลอดแนวโดยมีขนาด กว้าง 1.2m สูง 1.2 m และยาว 4.8 เมตร โดยในส่วนที่ 2 แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ
  - ช่วงสร้างความสมบูรณ์ของลม ประกอบด้วยรังผึ้งขนาดช่อง 20x20 cm เพื่อให้ลมมีการเคลื่อนที่แบบรายเรียบที่สุดก่อนเข้าสู่ช่วงทดสอบ
  - ช่วงสำหรับการทดสอบ เป็น ช่วงที่ใช้ในการติดตั้ง Model เพื่อทำการทดสอบ โดยด้านหนึ่งของช่วงนี้จะเป็นอะคลิลิกใสเพื่อให้สามารถมองเห็น model ที่นำมาทดสอบได้
3. ส่วนที่ 3 พัดลม และชุดควบคุม เป็นส่วนที่มีพัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1 m ใช้สำหรับสร้างอัตราเร็วลม ซึ่งขับเคลื่อนด้วย motor ขนาด 1hp และใช้ inverter ในการปรับความถี่ของ motor เพื่อควบคุมอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม

โครงสร้างของอุโมงค์ลมทั้งหมดเป็นเหล็กป้องกันสนิม ผนังสร้างจากไม้กระดานตัดหนา 10mm ผนังด้านในหุ้มด้วยไม้อัด ผนังด้านนอกทาสีด้วยสีน้ำมัน และส่วนทั้ง 3 ส่วนของอุโมงค์ลมสามารถถอดออกได้เป็น 4 ส่วนย่อยคือ ทางเข้าของอากาศ ช่วงสร้างความสมบูรณ์ของลม ช่วงสำหรับการทดสอบ และพัดลม และชุดควบคุม เพื่อง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และสามารถเพิ่มส่วนอื่นเข้าไปได้ในกรณีที่ต้องการทดสอบค่าต่างๆ ในอนาคต

แผ่นอะคลิลิกใสที่ติดตั้งที่ช่วงสำหรับการทดสอบ ขนาด กว้าง 1.2m ยาว 2.4m หนา 10mm สามารถเปิดปิดได้

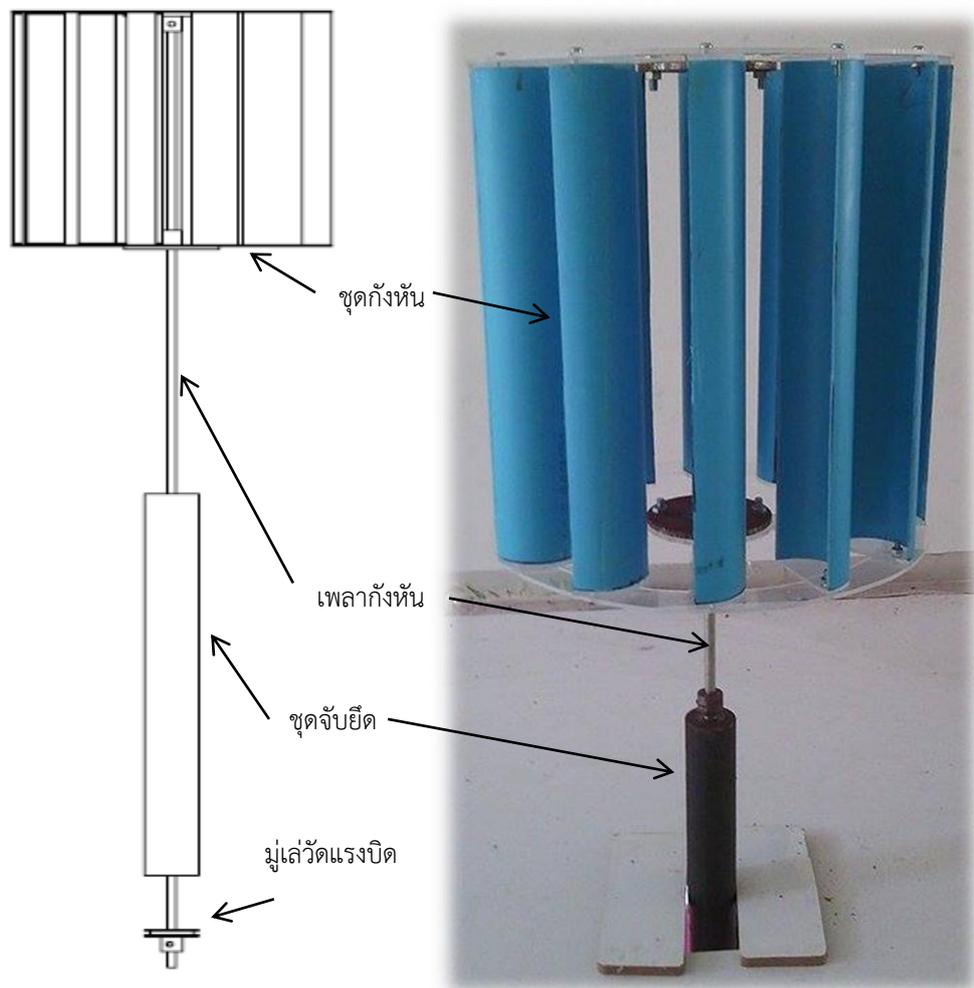


รูปที่ 3.1 อุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบกังหันลม

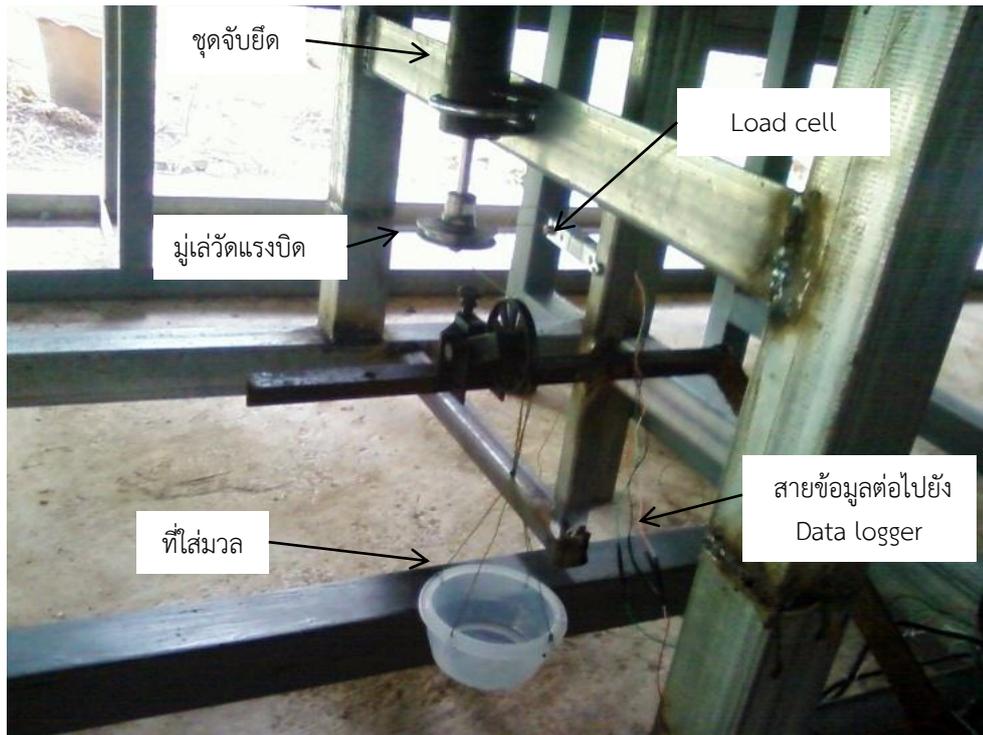
### 3.3 การออกแบบและสร้างกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius สำหรับทดสอบในอุโมงค์ลม

ออกแบบ กังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius และชุดทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

กังหันลมที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นกังหันลมแกนตั้ง แบบ Savonius มีใบพัดแบบทรงกระบอกผ่าซีกปิดหัวท้ายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm ใบพัดยาว 30 cm โดยกังหันมีใบพัดทั้งหมด 12 ใบ ใบพัดทั้ง 12 ใบยึดติดกับเพลากลางโลหะด้วยแขนจับที่มีรัศมี 15 cm ดังนั้นพื้นที่รับลมของกังหัน (Swept area) มีค่าเท่ากับ  $0.045 \text{ m}^2$



รูปที่ 3.2 กังหันลมแกนตั้ง แบบ Savonius 12 ใบ



รูปที่ 3.3 ชุดวัดแรงบิดแบบ Horse Brake Power

### 3.4 การออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ออกแบบและ สร้างระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กที่ประกอบด้วยส่วนควบคุมการผลิตและประจุไฟฟ้า ซึ่งมีส่วนประกอบส่วนต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.4 เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน

- **จานแท่งแม่เหล็ก** ประกอบด้วยแท่งแม่เหล็กถาวรขนาดกว้าง 1.5 cm ยาว 7.5 cm และหนา 2 cm จำนวน 16 แท่ง จัดวางสลับขั้วเหนือ-ใต้ ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม โดยมีรัศมี ๓ ปลายของแท่งแม่เหล็กเท่ากับ 40 cm ใช้แผ่นเหล็กหนา 0.5 cm เป็นแท่นรับ และใช้พลาสติกแข็งใสช่วยในการจับยึด เจาะกลางเพื่อยึดเพลขนาด 1 นิ้ว

- **งานขดลวด** ประกอบด้วยขดลวดทองแดงเบอร์ 24 พัดรอบจำนวน 500 รอบจำนวน 8 ชุด ในลักษณะวงรีกึ่งสี่เหลี่ยม ภายในเท่ากับความกว้างและยาวของแท่งแม่เหล็ก จับยึดกับแท่งไม้กระดานหนา 5 cm เจาะกลางเพื่อยึดเพลานขนาด 1 นิ้ว
- **ชุดควบคุมไฟฟ้า** ไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นจึงทำการเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรง และประจุเก็บไว้ในแบตเตอรี่ และมีสัญญาณบอกการประจุไฟฟ้า ติดตั้งหลอดไฟฟ้ากระแสตรงกับแบตเตอรี่ และติดตั้งตัวตรวจวัดแสงเพื่อปิด เปิดหลอดไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติ เมื่อปริมาณแสงน้อย โดยอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งในกล่องกันน้ำ เพื่อป้องกันความเสียหาย

### 3.5 การสร้างกังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius สำหรับผลิตไฟฟ้า

ทำการสร้างกังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius สำหรับผลิตไฟฟ้า ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด 1 m ใบสูง 95 cm จำนวนใบพัด 12 ใบ ซึ่งใบพัดสร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว ใบพัดเป็นแบบทรงกระบอกผ่าซีกปิดหัวท้าย เหมือนกังหันลมที่สร้างเพื่อทำการทดสอบในอุโมงค์ลม

กังหันทั้งชุดติดประกอบกับเพลานเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และวางอยู่บนฐานกังหัน (Tower) สูง 2m ทั้งนี้กังหันยังประกอบแผ่นเรียบเพื่อบังคับทิศทาง และเพิ่มอัตราเร็วลมก่อนเข้าปะทะใบของกังหันลม ทั้งนี้กังหันลมที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius (ไม่ติดตั้งแผงเพิ่มอัตราเร็วลม)



รูปที่ 3.6 กังหันลมแกนตั้งแบบ Multi blades Savonius (ติดตั้งแผงเพิ่มอัตราเร็วลม)

### 3.6 การทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลม

ทำการทดสอบการกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ โดยทำการวัดที่ระยะ 6 เมตร จากทางเข้าของอุโมงค์ลม และแบ่งจุดที่จะทำการวัดระยะ 20 x 20 cm ทำการวัดที่อัตราเร็วลมจำนวน 5 อัตราเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 3.7

### 3.7 การทดสอบการทำงานของกังหันลมในอุโมงค์ลม

ติดตั้งกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม ณ ตำแหน่งทดสอบ โดยอยู่ที่ระยะ 6.20 – 7.00m จากทางเข้าของอุโมงค์ลมและทำการทดสอบการทำงานของกังหันลมในอุโมงค์ลม โดยกำหนดค่าในการทดสอบ 2 กรณี คือ

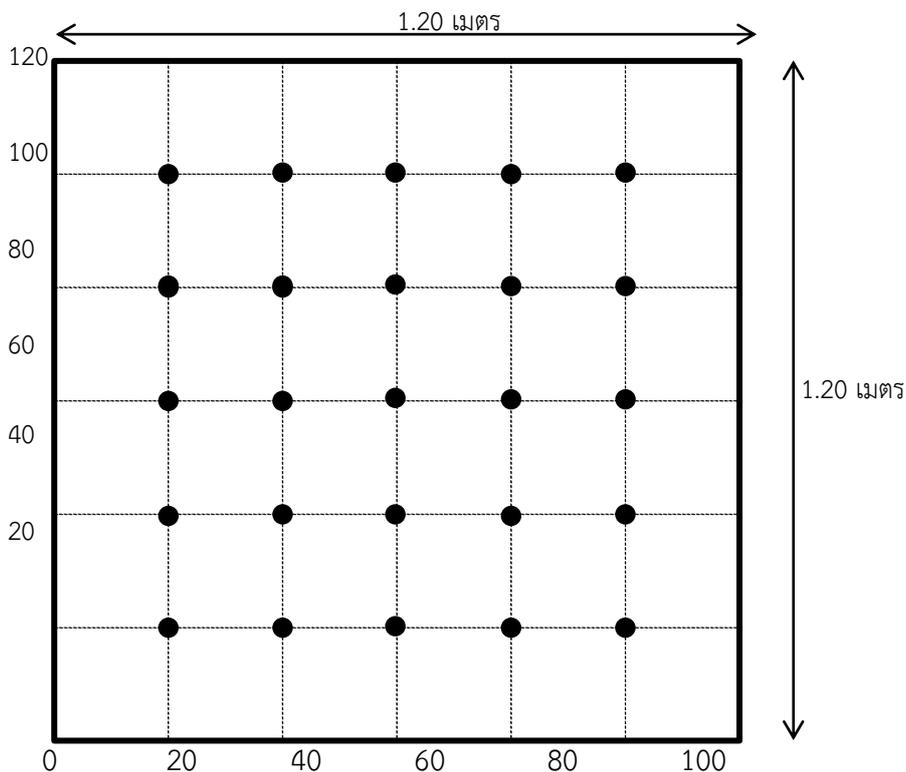
1. กรณีมุมใบพัดคงที่ (มุมระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกระทำกับรัศมีของกังหัน)
    - มุมใบพัดคงที่ 0 องศา
    - อัตราเร็วลม 5 ค่า คือ 2.97, 3.54, 4.07, 4.55 และ 5.00 m/s
  2. กรณีอัตราเร็วลมคงที่
    - อัตราเร็วลมคงที่ 3.54 m/s
    - มุมใบพัดคงที่ 13 ค่า คือ -90 -75 -60 -45 -30 -15 0 15 30 45 60 75 90
- ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ทำการเก็บข้อมูลการทำงานของกังหันลม และสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดสอบ ประกอบด้วย

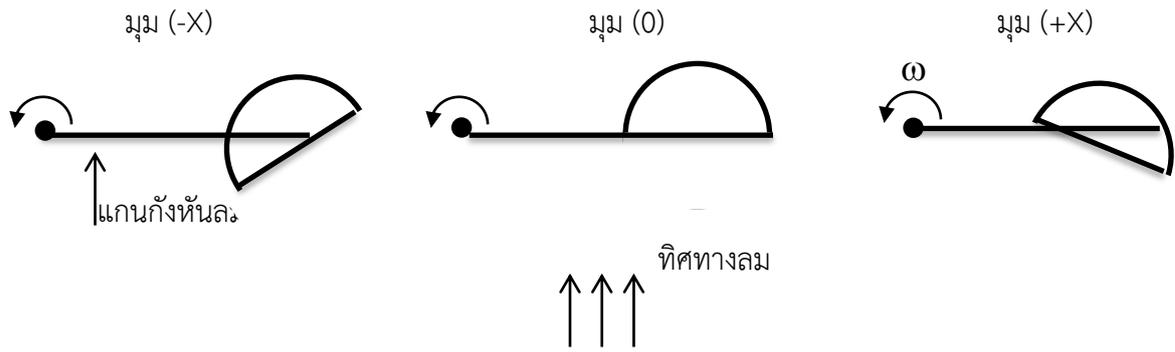
- อัตราเร็วรอบของกังหัน
- แรงบิดที่เพลลา
- อุณหภูมิอากาศในอุโมงค์ลม
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

การวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบด้วย

- อัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (Cut in Speed)
- อัตราเร็วลมทำงาน (Rated Speed)
- ระยะเวลาจาก Cut in Speed ถึง Rated Speed (Rev up rotation)
- อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีก (Tip Speed ratio)
- สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient)
- สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient)



รูปที่ 3.7 จุดที่ทำการวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ

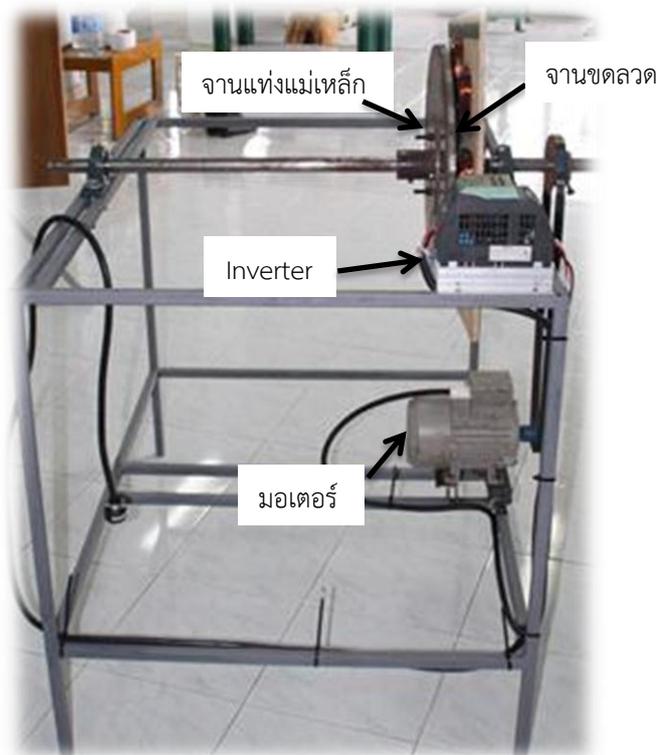


รูปที่ 3.8 มุมใบพัด (มุมระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดกระทำกับรัศมีของกังหัน)

### 3.8 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

ทำการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบ (Rotational speed, RPM) แรงดันไฟฟ้า (Voltage, V) และกระแสไฟฟ้า (Current, A) เพื่อหาอัตราเร็วรอบที่ให้แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการประจุเข้าแบตเตอรี่โดยการติดตั้งระบบทดสอบ

ติดตั้ง จานแม่เหล็ก และจานขดลวดเข้ากับเพลาหมุนเดียวกัน โดยเพลาหมุนจะถูกขับโดยมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ควบคุมรอบการหมุนด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ส่วนจานแม่เหล็กจะยึดติดแบบตรึงกับเพลาหมุนดังนั้นเมื่อเพลาหมุนก็จะทำให้จานแม่เหล็กหมุน ส่วนจานขดลวดจะอยู่กับที่ โดยในการทดสอบได้ต่อขดลวดแบบอนุกรมจำนวน 2 ชุด ทำให้ได้ขดลวด 4 ชุด และนำทั้ง 4 ชุดมาทำการต่อแบบขนาน ดังแสดงค่าในตารางที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า

### 3.9 การทดสอบการทำงานของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้า

ทำการทดสอบการทำงานของกังหันลมเพื่อการผลิตไฟฟ้าโดยตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าต่างๆ ระหว่างการทดสอบดังนี้

- อัตราเร็วลม
- อัตราเร็วรอบของกังหัน
- สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient)
- สัมประสิทธิ์แรงบิด (torque coefficient)
- กำลังการผลิตไฟฟ้า

### 3.10 จัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์

#### 3.11 เผยแพร่งานวิจัย

ได้ทำการเผยแพร่ในการประชุมวิชาการ การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 25 ประจำปี 2558 ในเรื่อง อัตราเร็วลมเริ่มหมุนและเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ของกังหันลมแบบ Savonius 12 ใบ Cut In Speed and Rev Up Time of 12 Blade Savonius Wind Turbine

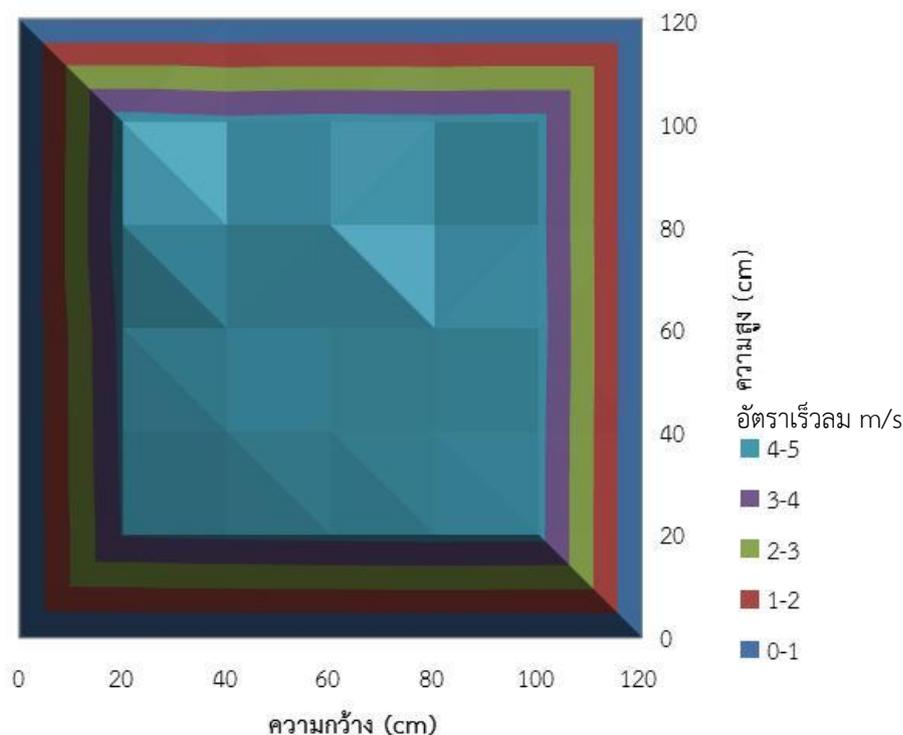
## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม

ทำการทดสอบการกระจายตัวของอัตราเร็วลมในพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบ เพื่อหาพื้นที่ที่มีอัตราเร็วลมคงที่ตลอดหน้าตัด พบว่า พื้นที่ที่สามารถติดตั้งกังหันลมสำหรับทดสอบคือพื้นที่ที่ห่างจากผนังทั้ง 4 ด้าน อย่างน้อย 20 cm ดังแสดงลักษณะการกระจายตัวของอัตราเร็วลมในรูปที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าหากต้องการนำสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ มาทำการทดสอบในอุโมงค์ลมที่สร้างขึ้น สิ่งประดิษฐ์ ควรมีขนาดไม่เกิน กว้าง 40cm และสูง 40cm เพื่อให้ระหว่างการทดลอง สิ่งประดิษฐ์นั้นจะได้รับลมที่มีอัตราเร็วลมที่เท่ากันตลอดพื้นที่รับลมของสิ่งประดิษฐ์นั้น



รูปที่ 4.1 การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม

#### 4.2 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed)

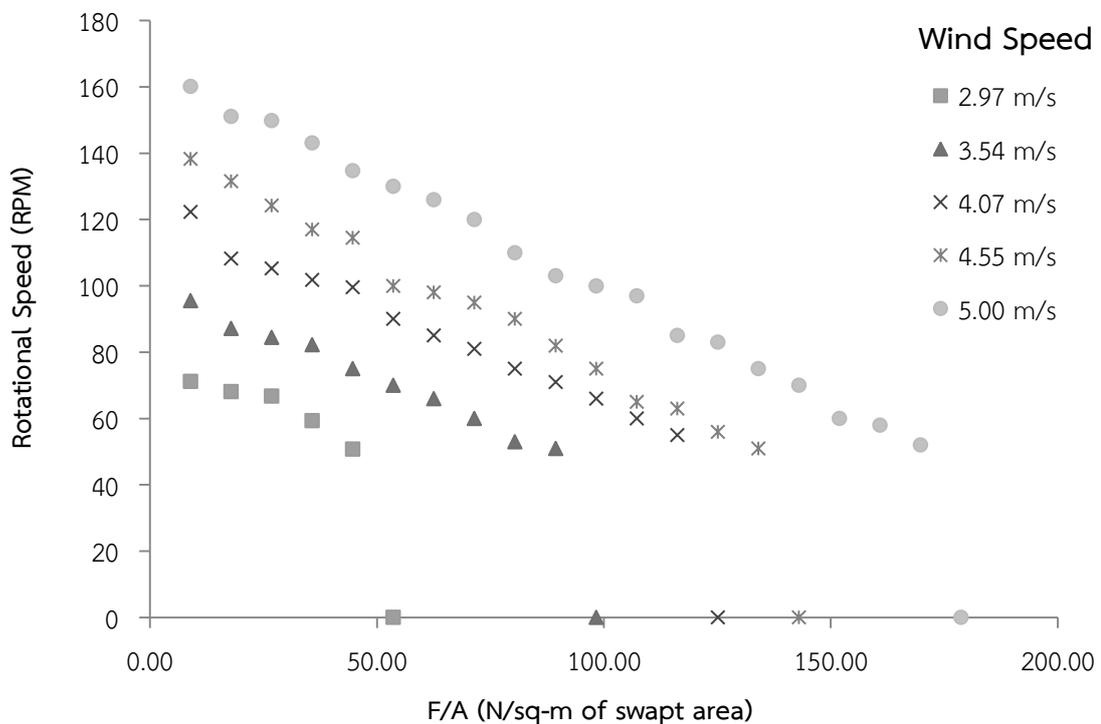
ที่อัตราเร็วลมคงที่ ทำการเพิ่มมวลถ่วงที่มู่เล่ไว้ดแรงปิดขึ้น ครั้งละ 41 g (ลูกปิ่นทรงกลมมวล 2.05g จำนวน 20 ลูก) จนกังหันลมไม่สามารถหมุนได้ จึงทำการหยุดการทดลอง จากนั้นเปลี่ยนอัตราเร็วลมเป็นค่าต่อไป และทำการทดสอบเหมือนเดิม ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่าที่อัตราเร็วสูงขึ้นมวลถ่วงที่ใช้เพื่อให้กังหันลมหยุดหมุนก็จะมีค่าสูงขึ้น จนอย่างต่อเนื่อง โดยที่อัตราเร็วลม 2.28 m/s กังหันลมไม่หมุน ที่อัตราเร็วลม 2.97 m/s กังหันลมหยุดหมุนที่มีมวลถ่วง 246 g หรือ  $F/A$  เท่ากับ  $53.63 \text{ N/m}^2$  of Swept Area ส่วนที่อัตราเร็วลม 3.54, 4.07, 4.55 และ 5.00 m/s กังหันลม

หยุดหมุนที่  $F/A$  เท่ากับ 98.32, 125.13, 143.01 และ 178.76  $N/m^2$  of Swept Area ตามลำดับ จากผลการทดลองในรูปที่ 4 สามารถสร้าง สมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเร็วลมที่ทำให้ กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) กับ  $F/A$  ได้ตั้งสมการที่ 4.1 โดยสมการที่ 4.1 สามารถใช้ในการ ทำนายอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนได้ดี มีความผิดพลาดไม่เกิน 5% ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และจากสมการที่ 4.1 จะเห็นว่าค่า  $F/A$  มีผลต่ออัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนน้อยมาก ซึ่งสรุป ได้ว่า  $F/A$  ไม่มีผลต่ออัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน ดังนั้นอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนจึง มีค่าเท่ากับ 2.354 m/s

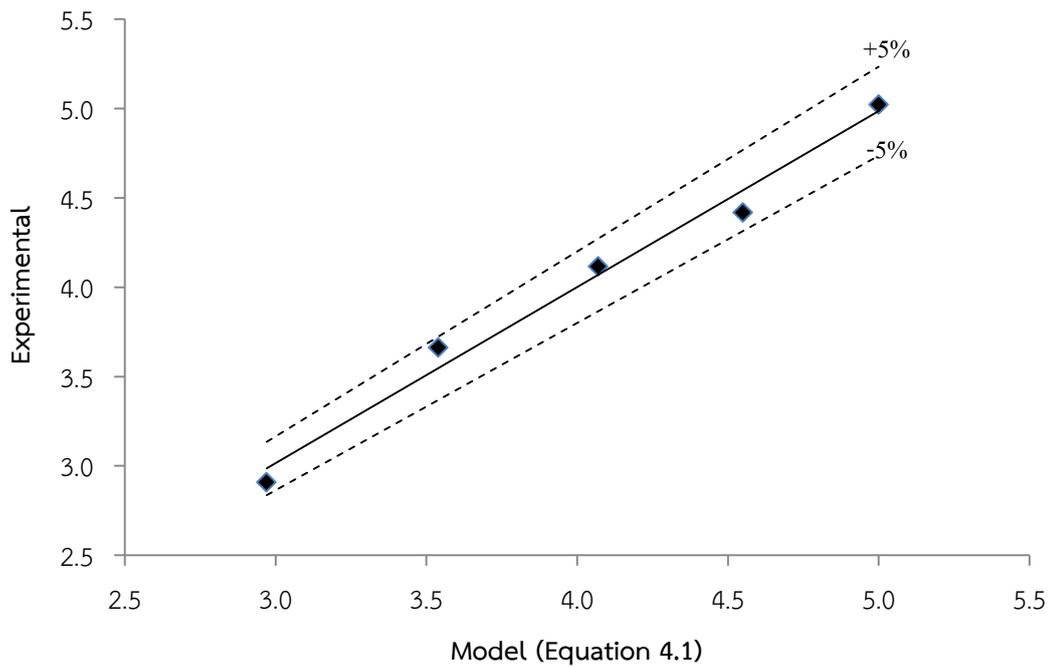
$$V_{cut-in} = 2.354e^{0.0043(F/A)} \quad R^2 = 0.9862 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $V_{cut-in}$  คือ อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed), m/s  
 $F/A$  คือ อัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของ กังหัน (Tangential Force Ratio,  $F/A$ , หน่วย  $N/m^2$  of Swept Area) ดังแสดงในสมการที่ 4.2

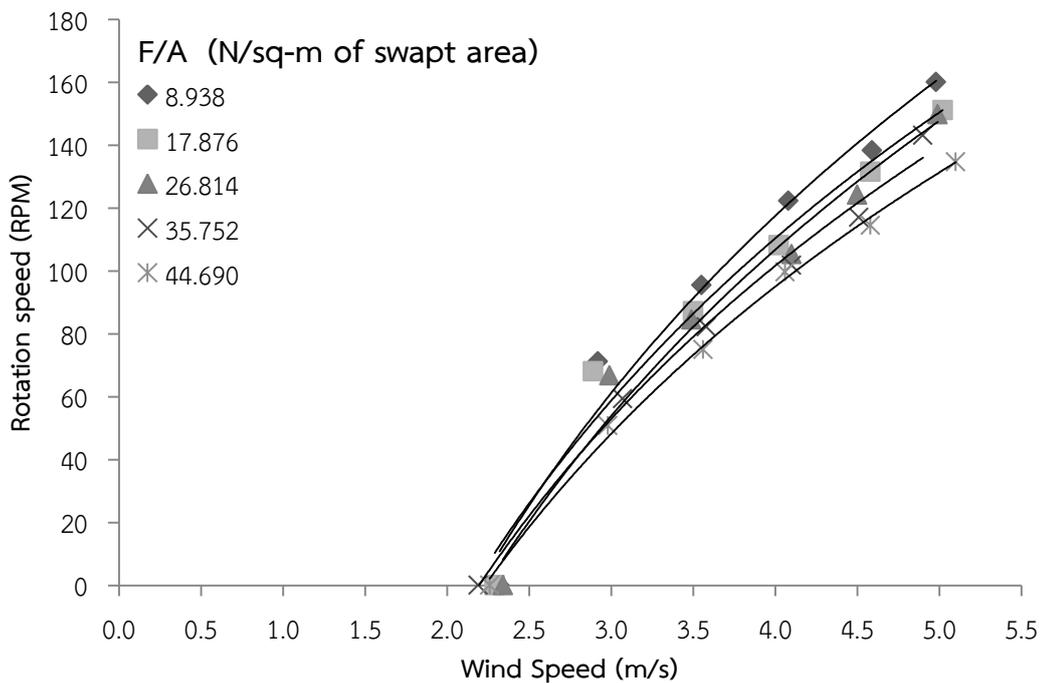
$$F/A \left( \frac{N}{m^2 \text{ of Swept Area}} \right) = \frac{F(N)}{\text{Swept Area } (m^2)} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับ  $F/A$  ที่อัตราเร็วลมต่างๆ



รูปที่ 4.3 แสดงค่า Cut-in Speed ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับอัตราเร็วลมที่  $F/A$  ต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการหมุนของกังหันกับอัตราเร็วลม เมื่อมีการเปลี่ยนค่ามวลที่ถ่วงที่เพลลาของกังหัน หรือค่า  $F/A$  เมื่อสร้างเส้นแนวโน้มเพื่ออธิบายข้อมูลก็พบว่าเส้นแนวโน้มมาตัดแกนของอัตราเร็วลมที่ค่าประมาณ 2.31 - 2.40 m/s โดยเมื่อนำสมการจากเส้นแนวโน้มมาพิจารณา ก็พบว่าได้ค่า Cut-in Speed เฉลี่ยเท่ากับ  $2.358 \pm 0.037$  m/s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่พิจารณาจากสมการที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมการความสัมพันธ์และค่า Cut-in Speed จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.4

F/A (N/m <sup>2</sup> of Swept Area)	สมการความสัมพันธ์ (เส้นแนวโน้ม)	R <sup>2</sup>	Cut-in Speed (m/s)
8.938	RPM = 195.94ln(V) - 154.07	0.976	2.334
17.876	RPM = 179.43ln(V) - 138.33	0.973	2.311
26.814	RPM = 183.85ln(V) - 148.07	0.977	2.388
35.752	RPM = 169.28ln(V) - 132.99	0.992	2.355
44.690	RPM = 162.71ln(V) - 130.51	0.997	2.401
Average			2.358
SD			0.037

### 4.3 เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time)

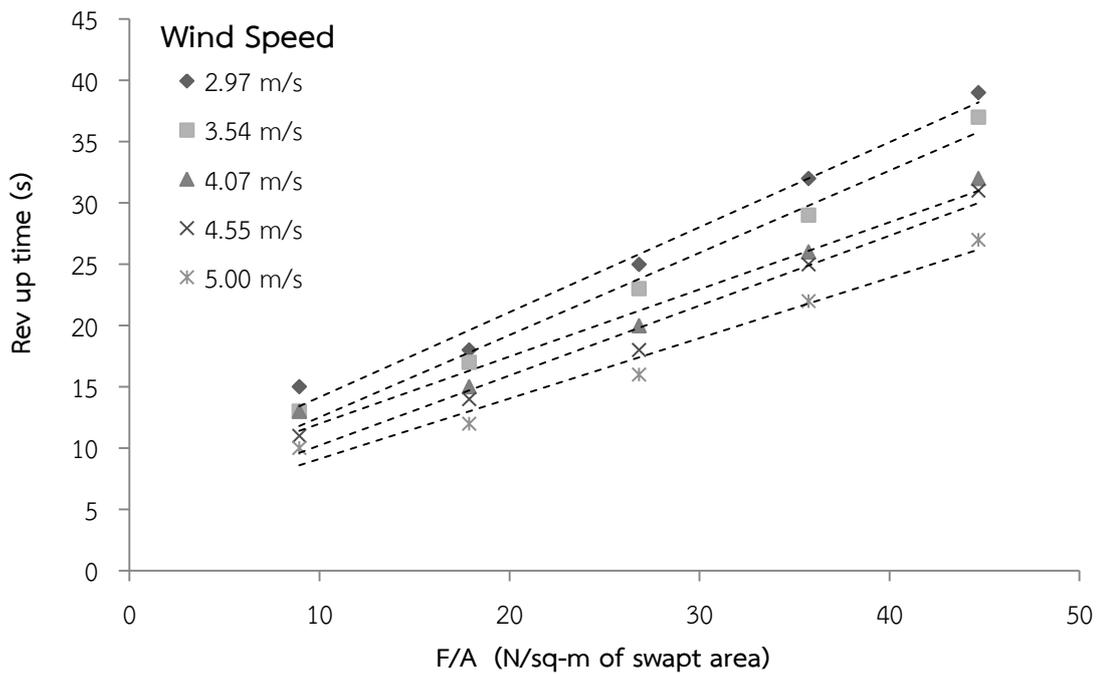
เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) คือเวลาที่พิจารณาจากตอนที่กังหันลมเริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่ โดยพบว่าเวลาดังกล่าวมีค่าระหว่าง 10 - 39s ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลม และอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และได้ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 2 ต่อเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) ดังสมการที่ 4.3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการที่ 4.3 กับค่าการทดลองพบว่ามีความแม่นยำสูงถึง (R<sup>2</sup>) 95.31% ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยค่า Rev up time จะแปรผกผันกับอัตราเร็วลม และแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน

$$T_{Rev-up} = 0.995(F/A) - (0.099V_{wind}(F/A)) - 1.431V_{wind} + 11.402 \quad (4.3)$$

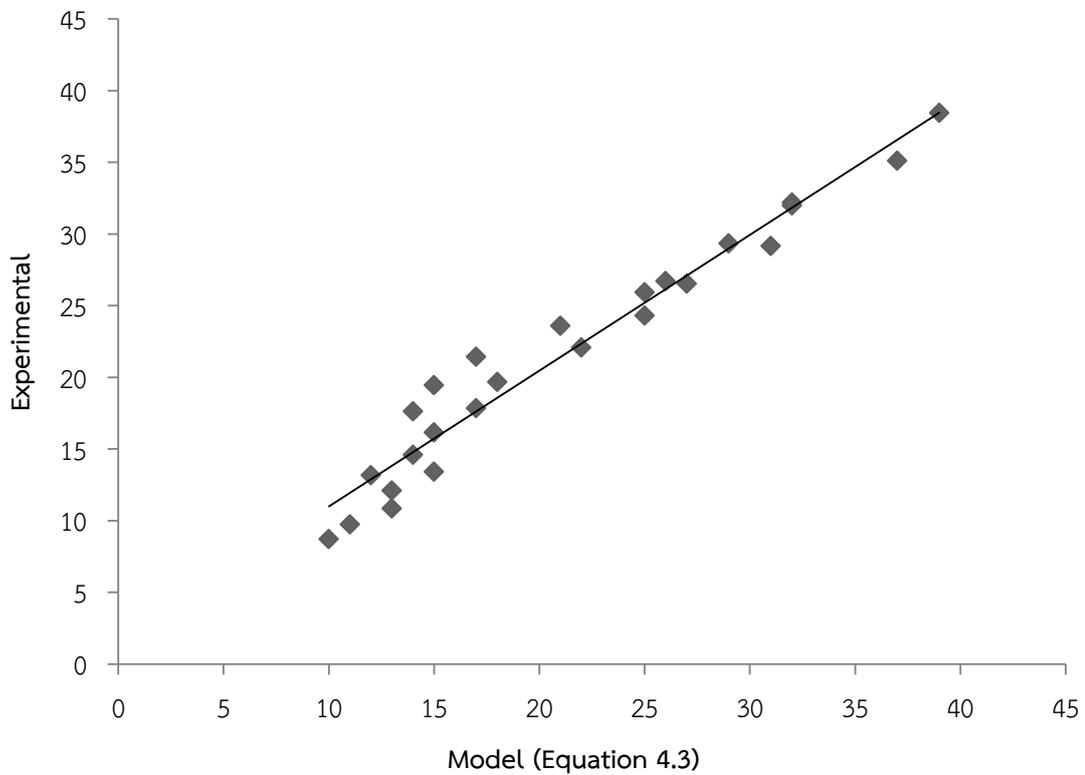
เมื่อ  $T_{Rev-up}$  คือ เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time), s  
 $V_{wind}$  คือ อัตราเร็วลม, m/s  
 $F/A$  คือ อัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน, N/m<sup>2</sup> of Swept Area

ตารางที่ 4.2 สมการความสัมพันธ์จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.5

V (m/s)	สมการความสัมพันธ์ (เส้นแนวโน้ม)	R <sup>2</sup>
2.92	RPM = 0.6937(F/A) + 7.2	0.9836
3.55	RPM = 0.6713(F/A) + 5.4	0.9868
4.08	RPM = 0.5482(F/A) + 5.9	0.9729
4.59	RPM = 0.5706(F/A) + 3.9	0.9749
4.98	RPM = 0.4923(F/A) + 3.8	0.9719



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) กับ  $F/A$  ที่อัตราเร็วลมต่างๆ

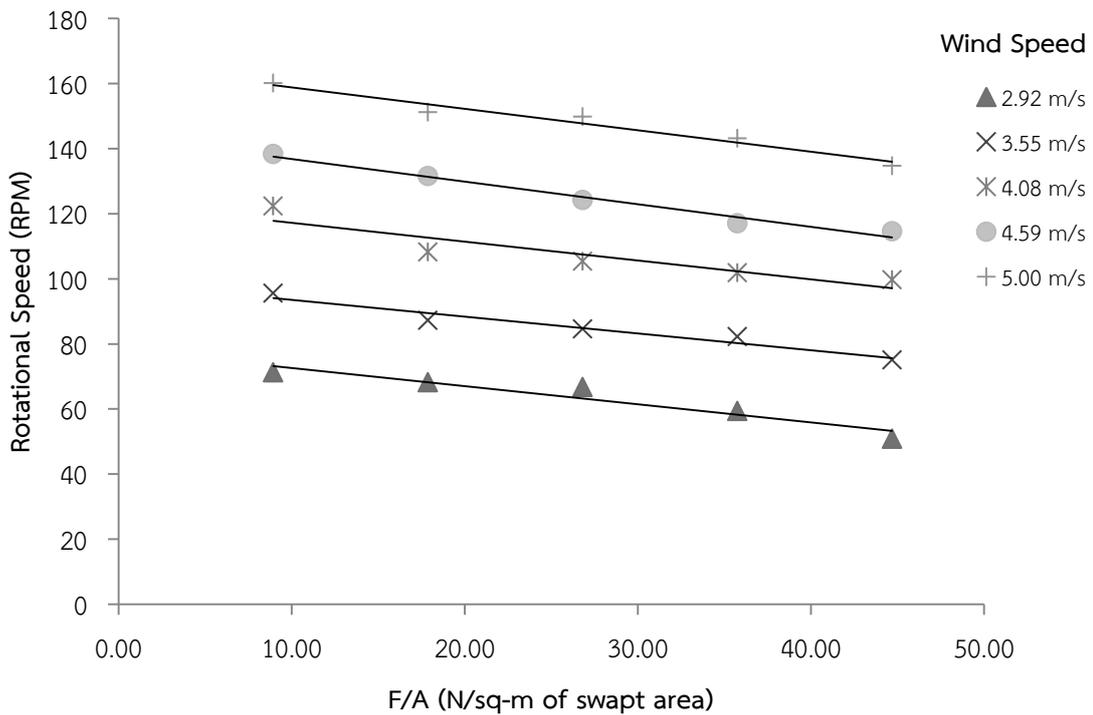


รูปที่ 4.6 แสดงค่า Rev up time ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.3

#### 4.4 ความเร็วรอบทำงานของกังหัน (Rated rotation)

อัตราเร็วรอบทำงานของกังหัน (Rated rotation) ในที่นี้หมายถึงอัตราเร็วรอบที่กังหันหมุนคงที่ที่อัตราเร็วลมและค่าอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลากลมกับพื้นที่รับลมของกังหัน ( $F/A$ ) ค่าต่างๆ

พบว่า Rated Speed จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราเร็วของลมมีค่าสูงขึ้น และที่อัตราเร็วลมคงที่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลากลมกับพื้นที่รับลมของกังหัน ( $F/A$ ) จะทำให้ Rated Speed ลดลง แต่มีการลดลงเพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.7 และสมการเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.7 ได้แสดงในตารางที่ 4.3



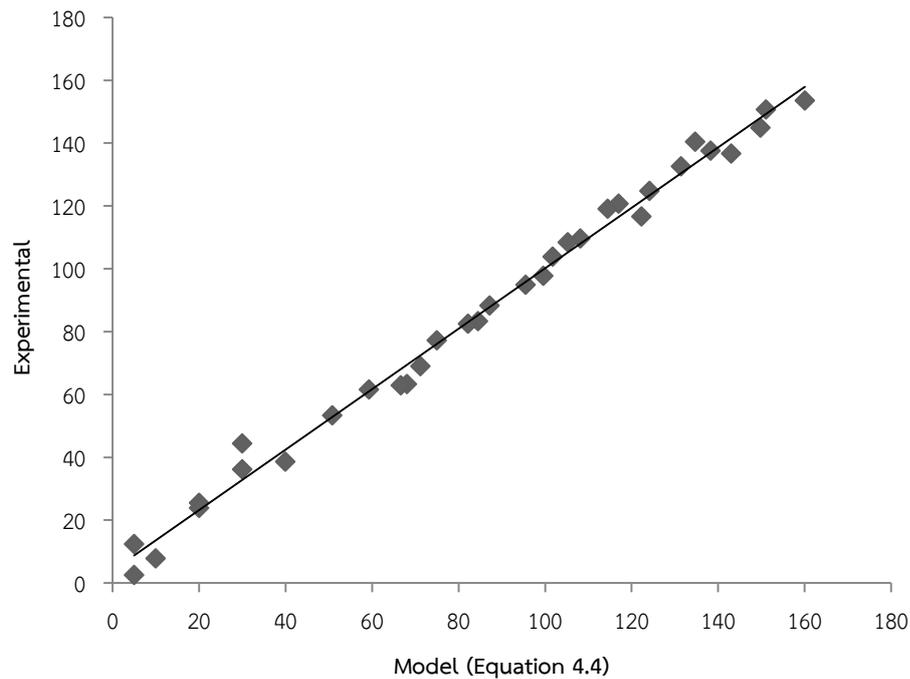
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบของกังหัน (Rated rotation) กับ  $F/A$  ที่อัตราเร็วลมต่างๆ

ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์จากเส้นแนวโน้มในรูปที่ 4.7

V (m/s)	สมการความสัมพันธ์ (เส้นแนวโน้ม)	R <sup>2</sup>
2.92	RPM = -0.5549( $F/A$ ) + 78.10	0.9138
3.55	RPM = -0.5147( $F/A$ ) + 98.68	0.9484
4.08	RPM = -0.5795( $F/A$ ) + 122.98	0.8405
4.59	RPM = -0.6948( $F/A$ ) + 143.73	0.9788
4.98	RPM = -0.6579( $F/A$ ) + 165.40	0.9607

จากสมการความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.3 สามารถนำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรต้นเพื่ออธิบายอัตราเร็วรอบการทำงานของกังหัน (Rated Speed) ได้ดังสมการที่ 4.4 และเมื่อนำค่า Rated Speed ที่ได้จากสมการที่ 4.4 มาเปรียบเทียบกับค่าการทดลองพบว่ามีค่าความแม่นยำสูงถึง ( $R^2$ ) 98.9% ดังแสดงในรูปที่ 4.8

$$RPM_{Rated} = 41.039V_{wind} - 0.506(F/A) + 46.324 \quad R^2 = 0.989 \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.8 แสดงค่า Rated Speed ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 4.4

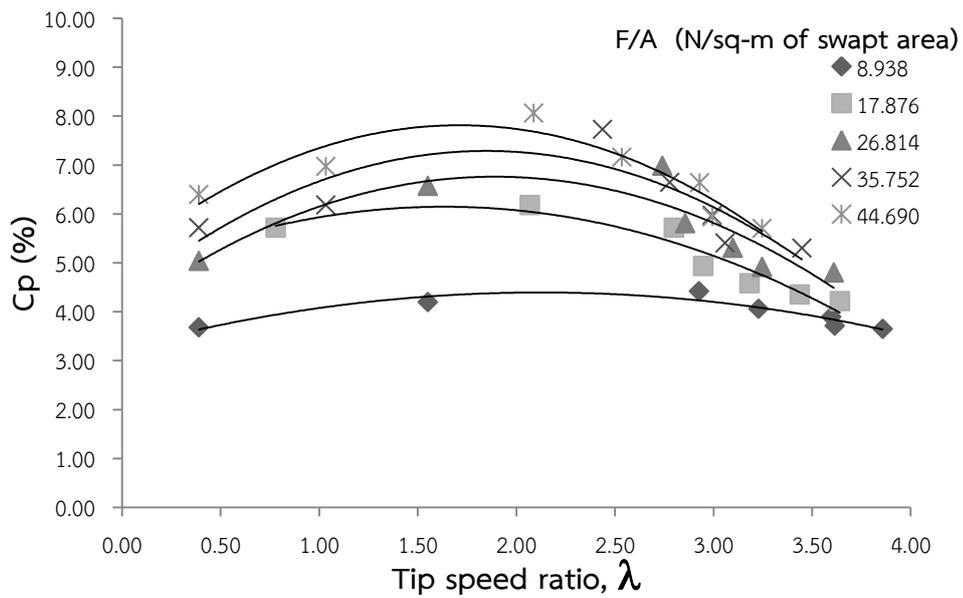
#### 4.5 สัมประสิทธิ์กำลัง ( $C_p$ ) และสัมประสิทธิ์แรงบิด ( $C_T$ )

จากการพิจารณาแรงบิดที่เพลานี้เนื่องจากการหมุนของกังหันเมื่อมีลมเคลื่อนที่มาปะทะ สามารถได้ค่า สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient,  $C_p$ ) และสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient,  $C_T$ ) ซึ่งได้พิจารณาค่าทั้ง 2 สัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีก (Tip Speed Ratio,  $\lambda$ ) โดยที่ค่า Tip Speed Ratio แสดงดังสมการที่ 4.5

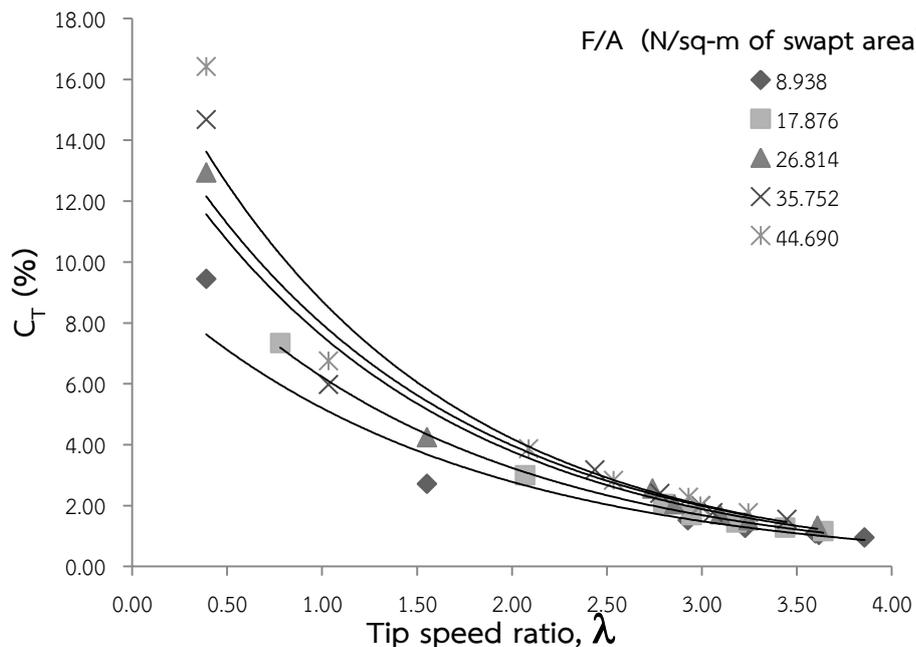
$$\lambda = \omega R / V_{wind} \quad (4.5)$$

- เมื่อ  $\omega$  คือ อัตราเร็วเชิงมุมของกังหัน (รอบต่อวินาที)
- $R$  คือ รัศมีปลายใบพัดของกังหันลม (0.15 m)
- $V_{wind}$  คือ อัตราเร็วลม (m/s)

ผลการทดสอบกังหันลมจำนวน 12 ใบแบบ Savonius ในอุโมงค์ลมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $F/A$  ลดลง และที่  $F/A$  คงที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ค่าอัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกประมาณ 2.0 – 3.0 จากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้พบว่ากังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดเท่ากับ 8.06% ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.09 และค่า  $F/A$  เท่ากับ 44.690 N/m<sup>2</sup> of swept area ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแสดงดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient,  $C_p$ ) ของ Multi blades Savonius



รูปที่ 4.10 สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque Coefficient,  $C_T$ ) ของ Multi blades Savonius

รูปที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ซึ่งพบว่าเมื่อค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อ  $F/A$  ลดลง ซึ่งจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจะลดลงเมื่อ กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบที่สูงขึ้นและแรงที่เกิดขึ้นที่เพลาส่งขึ้นนั่นเอง ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยที่  $F/A$  ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สัมประสิทธิ์กำลังและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยที่  $F/A$  ต่างๆ

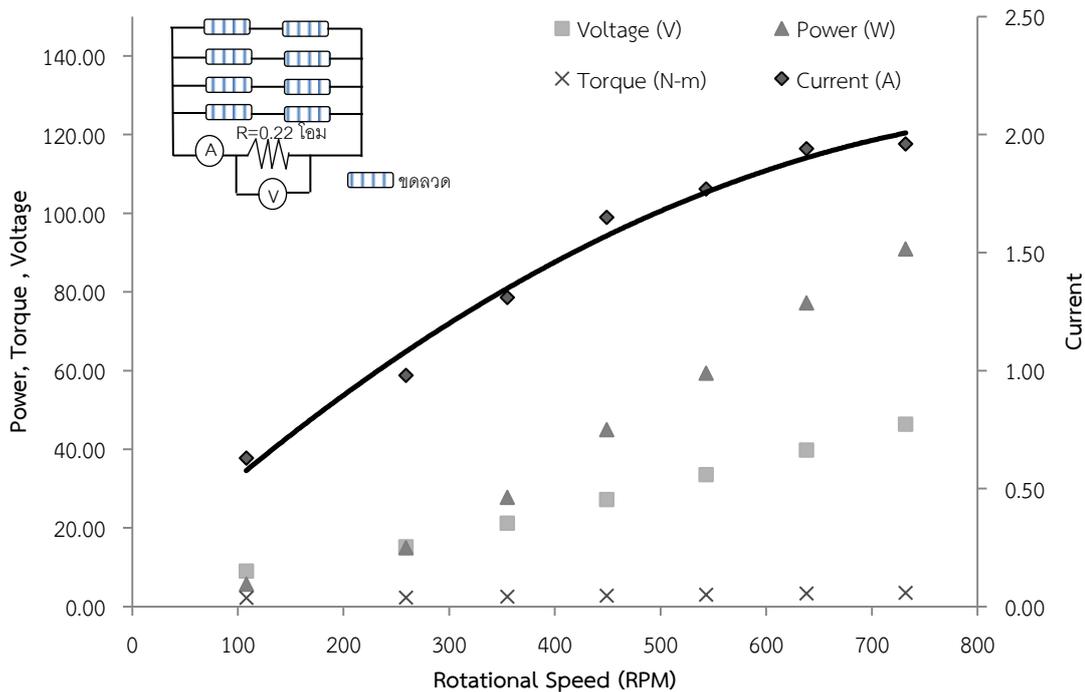
F/A (N/sq-m of swapt area)	Power Coefficient (%)	Torque Coefficient (%)
8.938	3.941	2.566
17.876	5.097	2.556
26.814	5.632	3.757
35.752	6.132	4.499
44.690	6.693	5.119
Average	5.499	3.700

#### 4.6 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน

ติดตั้ง จานแม่เหล็ก และจานขดลวดเข้ากับเพลาลมเดียวกัน โดยเพลาลมจะถูกขับโดยมอเตอร์ไฟฟ้า ที่ควบคุมรอบการหมุนด้วยอินเวอร์เตอร์ (Inverter) ส่วนจานแม่เหล็กจะยึดติดแบบตรึงกับเพลาลมดังนั้นเมื่อเพลาลมก็จะทำให้จานแม่เหล็กหมุน ส่วนจานขดลวดจะอยู่กับที่ โดยในการทดสอบได้ต่อขดลวดแบบอนุกรมจำนวน 2 ชุด ทำให้ได้ขดลวด 4 ชุด และนำทั้ง 4 ชุดมาทำการต่อแบบขนาน พบว่ากระแสไฟฟ้ามี่ค่า 0.63 – 1.96 A ที่อัตราเร็วรอบ 108-732 RPM และ ค่าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่า 15.24 V ที่อัตราเร็วรอบประมาณ 259 RPM อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้า 10-20% ของแบตเตอรี่จึงสามารถนำไปประจุแบตเตอรี่ได้ประมาณในช่วงความเร็วรอบ 200 – 450 RPM ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจาน

อัตราเร็วรอบ (RPM)	108	259	355	449	543	638	732
กระแสไฟฟ้า (A)	0.63	0.98	1.31	1.65	1.77	1.94	1.96
แรงดันไฟฟ้า (V)	9.05	15.24	21.2	27.26	33.55	39.8	46.4
กำลังไฟฟ้า (W)	5.7	14.94	27.77	44.98	59.38	77.21	90.94
แรงบิด (N-m)	2.20	2.34	2.54	2.81	3.04	3.32	3.54



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบผลิตไฟฟ้าต่อขดลวดทองแดงแบบอนุกรม 2 ขด ขนาน 4 ขุด

#### 4.7 การทดสอบการทำงานของกังหันลม

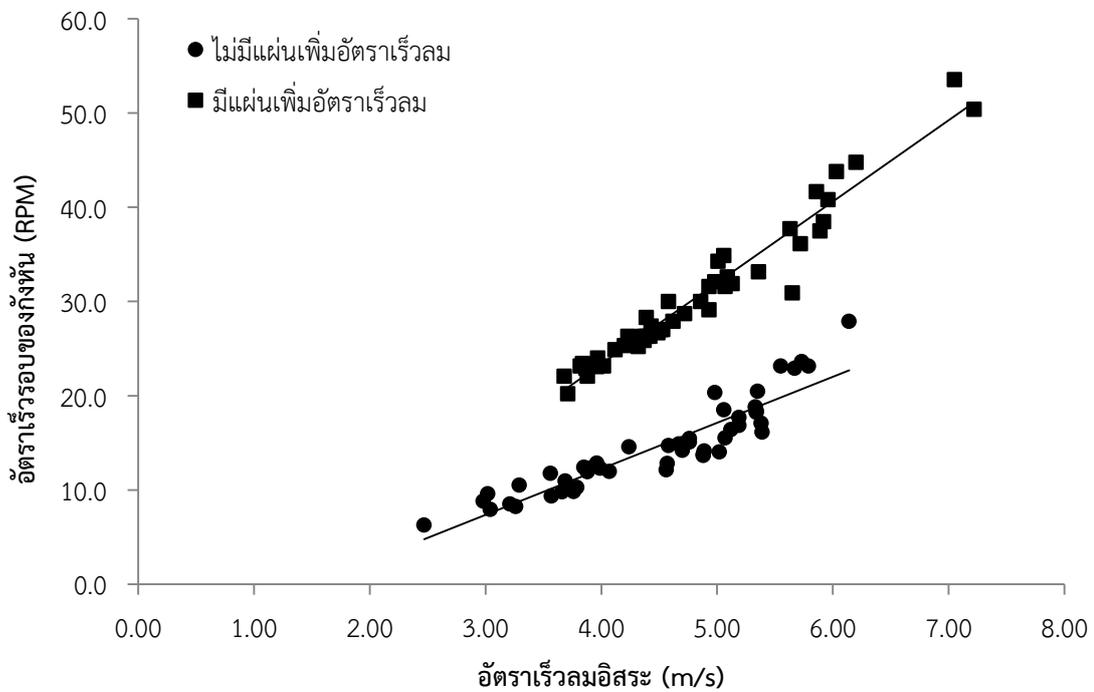
ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการทำงานของกังหันลมโดยยังไม่มีติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า โดยทำการศึกษา 2 แบบคือ การศึกษากรณีที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม กับกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม จากการทดสอบพบว่าทั้ง 2 กรณี อัตราเร็วรอบของกังหันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมอิสระเพิ่มขึ้น (อัตราเร็วลมอิสระในส่วนนี้หมายถึงอัตราเร็วลมก่อนที่จะเข้าสู่กังหันลม หรือก่อนเข้าสู่แผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม) โดยที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากัน พบว่ากรณีที่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็วรอบของกังหันลมมีค่าสูงกว่าอัตราเร็วรอบของกังหันลมกรณีที่ไม่มีการเพิ่มอัตราเร็วลมดังแสดงในรูปที่ 4.12 ทั้งนี้รูปที่ 4.12 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเร็วลมเพิ่มขึ้นผลต่างของอัตราเร็วรอบของกังหันในกรณีที่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็ว กับกรณีที่ไม่มีการเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็วมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.6

ผลการพิจารณาสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันกรณีไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมพบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.46% โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.54% และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.87% และสำหรับกรณีมีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมพบว่ามีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์กำลังมีค่าเท่ากับ 4.37% โดยมีค่าสูงสุด และต่ำสุดเท่ากับ 5.38% และ 3.19% ตามลำดับ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์กำลังและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดแสดงดังตารางที่ 4.7

ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่สร้างขึ้นจริงมีค่าน้อยกว่ากังหันลมที่ทดสอบในอุโมงค์ลม เนื่องจากกังหันลมที่สร้างขึ้นจริงมีแรงเสียดทานของตลับลูกปืน และน้ำหนักของส่วนประกอบต่างๆ ที่กดทับเป็นแรงเสียดทานเพิ่มที่ตลับลูกปืนด้วย

ตารางที่ 4.6 ผลต่างของอัตราเร็วรอบของกังหันลมกรณีมีและไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม

อัตราเร็วลมอิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบของกังหันลม (RPM)		
	กรณีไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม	กรณีมีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม	ผลต่าง
3.50	9.80	19.05	9.24
4.00	12.25	23.36	11.12
4.50	14.69	27.67	12.99
5.00	17.13	31.99	14.86
5.50	19.57	36.30	16.73
6.00	22.01	40.62	18.61
6.50	24.45	44.93	20.48
7.00	26.89	49.24	22.35



รูปที่ 4.12 อัตราเร็วรอบของกังหันลมที่อัตราเร็วลมต่างๆ

ตารางที่ 4.7 สัมประสิทธิ์กำลังและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

ค่า	สัมประสิทธิ์กำลัง (%)		สัมประสิทธิ์แรงบิด (%)	
	กรณีไม่มีแผ่นเพิ่ม อัตราเร็วลม	กรณีมีแผ่นเพิ่ม อัตราเร็วลม	กรณีไม่มีแผ่นเพิ่ม อัตราเร็วลม	กรณีมีแผ่นเพิ่ม อัตราเร็วลม
เฉลี่ย	2.41	4.37	0.77	0.71
สูงสุด	3.47	5.38	1.34	0.90
ต่ำสุด	1.83	3.19	0.54	0.46

#### 4.8 การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม

การทดสอบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมที่สร้างขึ้นได้ทำการทดสอบกับกังหันลมในกรณีที่มีการติดตั้งแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมเท่านั้น เนื่องด้วยเมื่อพิจารณาการเพิ่มอัตราเร็วรอบของกังหันเพื่อมาขับเคลื่อนเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบงานที่ผลิตขึ้นให้มีอัตราเร็วรอบ 110 RPM (ตารางที่ 4.5 แสดงอัตราเร็วรอบต่ำสุดที่ระบบผลิตไฟฟ้าแบบงานที่สร้างขึ้นจะเริ่มประจุไฟฟ้าที่ 108 RPM) ในกรณีที่ไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมนั้นต้องมีลมอิสระพัดมาด้วยอัตราเร็วมากกว่า 6.0 m/s จึงจะเกิดการประจุไฟฟ้า

ทำการทดสอบระหว่างรอบของกังหันลมกับรอบของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบงานในอัตราส่วน 1:4.5 พบว่าเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบงานจะเริ่มประจุไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบของกังหันลมเท่ากับ 24.6 RPM (อัตราเร็วรอบของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบงานเท่ากับ 111 RPM) หรือที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากับ 4.65 m/s โดยพบว่ากังหันลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลมประมาณ 3.5-4.0 m/s ทั้งนี้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่อัตราเร็วลมอิสระค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ที่อัตราเร็วลมอิสระค่าต่างๆ

อัตราเร็วลมอิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบของกังหัน (RPM)	อัตราเร็วรอบของของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบงาน (RPM)	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)
3.50	กังหันลมไม่หมุน				
4.00	19.05	85.73	0.66	5.80	3.81
4.50	23.36	105.12	0.70	6.98	4.90
5.00	27.67	124.52	0.75	8.17	6.10
5.50	31.99	143.96	0.79	9.36	7.40
6.00	36.30	163.35	0.84	10.55	8.81
6.50	40.62	182.79	0.88	11.74	10.33
7.00	44.93	202.19	0.92	12.93	11.95

## บทที่ 5

### สรุปผล

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง ทดสอบสัมประสิทธิ์และคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กแบบ Multi blades Savonius สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยการดำเนินงานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นเริ่มหมุนมีค่าเท่ากับ 2.354 m/s และเวลาที่พิจารณาจากตอนที่กังหันลมเริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่มีค่าระหว่าง 10 - 39s ซึ่งทั้งค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนและเวลาที่พิจารณาจากตอนที่กังหันลมเริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลม และอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน ( $F/A$ )
2. กังหันลมมีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมเท่ากับ 8.06% ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.09 และค่า  $F/A$  เท่ากับ 44.690 N/m<sup>2</sup> of swept area โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.50% และค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $F/A$  ลดลง
3. ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อ  $F/A$  ลดลง
4. อัตราเร็วรอบของกังหันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมอิสระเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากัน พบว่ากรณีที่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็วรอบของกังหันลมมีค่าสูงกว่าอัตราเร็วรอบของกังหันลมกรณีที่ไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมและเมื่ออัตราเร็วลมเพิ่มขึ้นผลต่างของอัตราเร็วรอบของกังหันในกรณีที่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็ว กับกรณีที่ไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมอัตราเร็วมีค่าสูงขึ้นด้วย
5. สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันกรณีไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.46% โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.54% และมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.87%
6. สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันกรณีมีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม มีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์กำลังมีค่าเท่ากับ 4.37% โดยมีค่าสูงสุด และต่ำสุดเท่ากับ 5.38% และ 3.19% ตามลำดับ
7. เครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจานจะเริ่มประจุไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบของกังหันลมเท่ากับ 24.6 RPM หรือที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากับ 4.65 m/s โดยพบว่ากังหันลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลมประมาณ 3.5-4.0 m/s

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ธเนศ ไชยชนะ จอมภพ แวศักดิ์ นิรันดร มาแทน และชูสิทธิ์ คงเรือง, 2555, การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราช, รายงานการวิจัย
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, แผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย. กระทรวงพลังงาน. 2546.
- [3] J. F. Manwell., J. G. McGowan. and A. L. Rogers, (2002). “Wind Energy Explained”. John Wiley & Sons, West Sussex, England.
- [4] Jack Park. (1975). *Simplified Wind Power System for Experimenters*. 2<sup>nd</sup> edition: Helion
- [5] J.-L. Menet, 2004. A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, V 29, 843–1862.
- [6] Tanate Chaichana and Sumpun Chaitep “The Characteristic testing of the excited and permanent magnetic fields generator”, 3<sup>rd</sup> *Aerospace Engineering Conference of Thailand*, March 17-18, 2005, Kasetsart University, Bangkok, THAILAND, (English version)
- [7] ชาญชัย ลิ้มปิยากร, ยุวพันธ์ สันติวิฤกษ์, อุไรพรรณ ปรางอุดมทรัพย์. “หนังสือชุดพลังงานยั่งยืน เล่ม 5 พลังงานลม (Wind Energy)” โครงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อชนบทและการพัฒนาที่ยั่งยืน, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, 2545. 44 หน้า.
- [8] John F. Walker., Nicholas Jenkins., “Wind Energy Technology”., John wiley & Sone, Inc., Baffins Lane, Chic Hester, West Sussex PO19 1UD, England., 1997.
- [9] โครงการการเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและอวกาศ (LESA: Learning module on Earth Science and Astronomy)., (2004) “รูปประกอบการบรรยาย”., [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.lesaproject.com>
- [10] สมาน เสนงาม. *กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก*. รายงานการประชุมวิชาการเรื่อง ปัญหาพลังงานและการแก้ไข, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันที่ 2-4 กรกฎาคม 2524: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, 2525
- [11] Andrzej J. Wortman., *Introduction to WIND TURBINE ENGINEERING*, Butterworth Publishers. United States of America. 1983.
- [12] <http://www.planetarysystems.com/productD.php?PtID=13> [8/8/2012]
- [13] <http://www.windturbinesnow.com/horizontalaxis-windturbines.htm> [8/8/2012]
- [14] [http://www.copters.com/aero/pressure\\_patterns.html](http://www.copters.com/aero/pressure_patterns.html) (2012)
- [15] Oswild H. Blackwood.; William C. Kelly.; and Reymond M. Bell. *General Physics*. Third edition. United State of America: John Wiley & Sons, New York – London. 1963.

- [16] ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2551, การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในเขตภาคเหนือตอนบน, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [17] มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2551, การประเมินศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [18] เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ อริยวัฒน์ พระบำรุง วันวิสาข์ ชนะประเสริฐ ณ์ภูฎี ราชปรีชา และ พานทาน ทุง (2553), การประเมินศักยภาพแหล่งพลังงานลมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ด้านภูมิศาสตร์สารสนเทศ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [19] รัตเกล้า พันธุ์อร่าม ประจันต์ วงศ์วิเศษ และ Meigen Zhang (2553) การศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้านอุตุนิยมวิทยา 3 มิติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [20] เสริม จันทร์ฉาย และ จรุงแสง ลักษณะบุญส่ง, 2553, การพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [21] อาปีดิน จิเหลา (2009) Using Computational Fluid Dynamics (CFD) for Wind Energy Resource Map : A Case Study of Chaiyaphum Province, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [22] จอมภพ แววศักดิ์ บุญเลิศ อาชีวะระงับโรด ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล นิรันดร มาแทน ชูลีรัตน์ คงเรือง ธเนศ ไชยชนะ วาริช วีระพันธ์ และวิสา คจนคร, 2555, การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดนครศรีธรรมราชด้วยแบบจำลองอุตุนิยมวิทยา 3 มิติ, รายงานการวิจัย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [23] สมาน เสนงาม. *กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก*. รายงานการประชุมวิชาการเรื่อง ปัญหาพลังงานและการแก้ไข, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันที่ 2-4 กรกฎาคม 2524: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, 2525
- [24] A.K. Wright and D.H. Wood., (2004). “The starting and low wind energy speed behavior of a small horizontal axis wind turbine”, *Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamic.*, V 92: 1265-1279.
- [25] Sung Num Jung, Tae-Soo No. and Ki-wahn Ryu., (2005). “Aero Dynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotation wind turbine system”, *Renewable Energy.*, V 30, Issue 5: 631-644.
- [26] A. Ozdamar., K. T. Gursel., G. Orer. and Y. Pekbey., (2004). “Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: by the example of Ceame – Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, V 8, 581-592.
- [27] J.-L. Menet., (2004).” A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study”, *Renewable Energy.*, V 29,: 843–1862.

- [28] Sumpun Chaitep, **Tanate Chaichana**, Pipatpong Watanawanyoo and Hiroyuki Hirahara, (2011), “Performance Evaluation of Curved Blades Vertical Axis Wind Turbine”, *European Journal of Scientific Research*, Volume 57, Issue 3 ,435-466
- [29] Tanate Chaichana, 2010, Design and Development of a Small Vertical Co-Axis Counter-Rotation Wind Turbine System for Electricity Generation, Doctoral Thesis, Energy Engineering, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, THAILAND

## ภาคผนวก

ตารางภาคผนวก 1 ข้อมูลการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม

มวลถ่วง (g)	ความถี่มอเตอร์พัลซ (Hz)	อัตราเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิในอุโมงค์ลม (°C)	ความชื้นของอากาศในอุโมงค์ลม (%)	อัตราเร็วรอบของกังหันลม (RPM)	แรงดันไฟฟ้าที่ load cell (average) (mV)	ผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ load cell ในกรณีที่กังหันลมหมุนกับไม่หมุน (mV)
41	10	1.54	30	53	5	-0.13576	0.00625
41	15	2.32	30	53	30	-0.08062	0.06139
41	20	2.92	30	54	71.2	-0.06981	0.0722
41	25	3.55	29	56	95.5	-0.04473	0.09728
41	30	4.08	29	57	122.3	-0.02603	0.11598
41	35	4.59	29	57	138.3	-0.02083	0.12118
41	40	4.98	28	59	160.1	-0.04334	0.09867
82	10	1.54	30	54	10	0.055303	0.000552
82	15	2.32	30	54	40	0.07799	0.023239
82	20	2.92	30	55	68.1	0.191	0.136249
82	25	3.55	29	57	87.2	0.207458	0.152707
82	30	4.08	29	57	108.2	0.226935	0.172184
82	35	4.59	29	58	131.5	0.24094	0.186189
82	40	4.98	29	59	151.1	0.237438	0.182687
123	10	1.54	30	54	5	0.21203	0.016139
123	15	2.32	30	54	30	0.241478	0.045587
123	20	2.92	30	56	66.7	0.426368	0.230477
123	25	3.55	29	57	84.5	0.459741	0.26385
123	30	4.08	29	57	105.3	0.479219	0.283328
123	35	4.59	29	58	124.2	0.51074	0.314849
123	40	4.98	28	59	149.8	0.513557	0.317666
164	10	1.54	30	55	5	0.35901	0.004194
164	15	2.32	30	55	20	0.409786	0.05497
164	20	2.92	29	56	59.3	0.654751	0.299935
164	25	3.55	29	57	82.2	0.700403	0.345587
164	30	4.08	29	57	101.8	0.728846	0.37403
164	35	4.59	29	57	117	0.749886	0.39507
164	40	4.98	28	59	143.1	0.746637	0.391821
205	10	1.54	30	54	5	0.523831	0.003484
205	15	2.32	30	55	20	0.531199	0.010852
205	20	2.92	29	56	50.8	0.881194	0.360847
205	25	3.55	29	57	75	0.935622	0.415275
205	30	4.08	29	57	99.6	0.972398	0.452051
205	35	4.59	29	57	114.5	0.987617	0.46727
205	40	4.98	28	59	134.7	0.986104	0.465757

ตารางภาคผนวก 2 ข้อมูลการทดสอบกังหันลมที่สร้างขึ้นกรณีไม่มีแผนเพิ่มอัตราเร็วลม

ลำดับ	ความเร็วลมอิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบของกังหันลม (RPM)	F (N)	T (N-m)	P (Turbine, W)	P (wind,W)	Tip speed ratio	Cp (%)	Ct (%)
1	2.47	6.26	0.58	5.70	0.59	1.76	2.54	3.39	1.34
2	2.98	8.81	0.70	6.87	1.01	3.08	2.96	3.28	1.11
3	3.02	9.58	0.71	6.97	1.11	3.21	3.17	3.47	1.09
4	3.04	7.94	0.72	7.01	0.93	3.27	2.61	2.83	1.09
5	3.21	8.50	0.76	7.40	1.05	3.85	2.65	2.72	1.03
6	3.26	8.25	0.77	7.52	1.03	4.04	2.53	2.56	1.01
7	3.29	10.51	0.77	7.59	1.33	4.15	3.19	3.20	1.00
8	3.56	11.76	0.84	8.21	1.61	5.25	3.30	3.06	0.93
9	3.57	9.36	0.84	8.24	1.28	5.30	2.62	2.42	0.92
10	3.66	9.79	0.86	8.44	1.38	5.71	2.67	2.41	0.90
11	3.69	10.95	0.87	8.51	1.55	5.85	2.97	2.65	0.89
12	3.76	9.82	0.89	8.67	1.42	6.19	2.61	2.29	0.88
13	3.79	10.27	0.89	8.74	1.50	6.34	2.71	2.36	0.87
14	3.85	12.40	0.91	8.88	1.83	6.65	3.22	2.76	0.86
15	3.88	11.93	0.91	8.95	1.78	6.80	3.07	2.62	0.85
16	3.88	12.32	0.91	8.95	1.84	6.80	3.18	2.70	0.85
17	3.96	12.85	0.93	9.14	1.96	7.23	3.24	2.70	0.83
18	3.99	12.30	0.94	9.20	1.89	7.40	3.08	2.55	0.83
19	4.07	11.95	0.96	9.39	1.87	7.85	2.94	2.38	0.81
20	4.24	14.56	1.00	9.78	2.37	8.88	3.43	2.67	0.78
21	4.56	12.15	1.07	10.52	2.13	11.04	2.66	1.93	0.72
22	4.57	12.82	1.08	10.54	2.25	11.12	2.81	2.03	0.72
23	4.58	14.71	1.08	10.57	2.59	11.19	3.21	2.31	0.72
24	4.67	14.89	1.10	10.77	2.67	11.86	3.19	2.25	0.71
25	4.7	14.22	1.11	10.84	2.57	12.09	3.03	2.12	0.70
26	4.76	15.08	1.12	10.98	2.76	12.56	3.17	2.20	0.69
27	4.76	15.46	1.12	10.98	2.83	12.56	3.25	2.25	0.69
28	4.88	13.67	1.15	11.26	2.56	13.54	2.80	1.89	0.68
29	4.88	13.76	1.15	11.26	2.58	13.54	2.82	1.91	0.68
30	4.89	14.15	1.15	11.28	2.66	13.62	2.89	1.95	0.68
31	4.98	20.34	1.17	11.49	3.89	14.38	4.08	2.71	0.66
32	5.02	14.05	1.18	11.58	2.71	14.73	2.80	1.84	0.66
33	5.06	18.52	1.19	11.67	3.60	15.09	3.66	2.39	0.65
34	5.07	15.54	1.19	11.70	3.03	15.18	3.07	2.00	0.65
35	5.12	16.39	1.21	11.81	3.23	15.63	3.20	2.06	0.64
36	5.19	17.70	1.22	11.97	3.53	16.28	3.41	2.17	0.64
37	5.19	16.85	1.22	11.97	3.36	16.28	3.25	2.07	0.64

38	5.33	18.81	1.25	12.30	3.85	17.64	3.53	2.19	0.62
39	5.34	18.40	1.26	12.32	3.78	17.74	3.45	2.13	0.62
40	5.34	18.24	1.26	12.32	3.74	17.74	3.42	2.11	0.62
41	5.35	20.48	1.26	12.34	4.21	17.84	3.83	2.36	0.62
42	5.38	17.09	1.27	12.41	3.54	18.14	3.18	1.95	0.61
43	5.39	16.13	1.27	12.43	3.34	18.24	2.99	1.83	0.61
44	5.55	23.17	1.31	12.80	4.94	19.91	4.17	2.48	0.59
45	5.67	22.90	1.33	13.08	4.99	21.23	4.04	2.35	0.58
46	5.73	23.62	1.35	13.22	5.20	21.91	4.12	2.37	0.58
47	5.79	23.17	1.36	13.36	5.16	22.61	4.00	2.28	0.57
48	6.14	27.91	1.45	14.16	6.59	26.96	4.55	2.44	0.54

ตารางภาคผนวก 3 ข้อมูลการทดสอบกังหันลมที่สร้างขึ้นกรณีมีแผนเพิ่มอัตราเร็วลม

ลำดับ	ความเร็วลมอิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบของกังหันลม (RPM)	F (N)	T (N-m)	P (Turbine, W)	P (wind, W)	Tip speed ratio	Cp (%)	Ct (%)
1	3.68	22.06	0.87	8.49	3.12	5.80	5.99	5.38	0.90
2	3.71	20.20	0.87	8.56	2.88	5.95	5.45	4.85	0.89
3	3.82	23.17	0.90	8.81	3.40	6.49	6.06	5.24	0.86
4	3.84	23.44	0.90	8.86	3.46	6.59	6.10	5.25	0.86
5	3.87	22.90	0.91	8.93	3.41	6.75	5.92	5.05	0.85
6	3.88	22.06	0.91	8.95	3.29	6.80	5.69	4.84	0.85
7	3.94	23.17	0.93	9.09	3.51	7.12	5.88	4.93	0.84
8	3.96	23.08	0.93	9.14	3.51	7.23	5.83	4.86	0.83
9	3.97	23.17	0.93	9.16	3.54	7.29	5.84	4.85	0.83
10	3.97	24.00	0.93	9.16	3.66	7.29	6.05	5.03	0.83
11	4.02	23.17	0.95	9.27	3.58	7.57	5.76	4.73	0.82
12	4.12	24.90	0.97	9.50	3.94	8.15	6.04	4.84	0.80
13	4.2	25.32	0.99	9.69	4.09	8.63	6.03	4.74	0.79
14	4.23	26.32	1.00	9.76	4.28	8.82	6.22	4.85	0.78
15	4.32	25.21	1.02	9.97	4.19	9.39	5.84	4.46	0.76
16	4.36	26.32	1.03	10.06	4.41	9.65	6.04	4.57	0.76
17	4.37	25.86	1.03	10.08	4.35	9.72	5.92	4.47	0.76
18	4.39	28.30	1.03	10.13	4.78	9.85	6.45	4.85	0.75
19	4.39	26.32	1.03	10.13	4.44	9.85	5.99	4.51	0.75
20	4.42	26.32	1.04	10.20	4.47	10.06	5.95	4.45	0.75
21	4.43	27.40	1.04	10.22	4.67	10.13	6.18	4.61	0.75
22	4.45	27.03	1.05	10.27	4.62	10.26	6.07	4.51	0.74
23	4.49	26.67	1.06	10.36	4.60	10.54	5.94	4.37	0.74
24	4.51	27.03	1.06	10.40	4.69	10.68	5.99	4.39	0.73
25	4.53	27.03	1.07	10.45	4.71	10.83	5.97	4.35	0.73

26	4.58	30.00	1.08	10.57	5.28	11.19	6.55	4.72	0.72
27	4.62	27.91	1.09	10.66	4.96	11.49	6.04	4.32	0.71
28	4.72	28.71	1.11	10.89	5.21	12.25	6.08	4.25	0.70
29	4.86	30.00	1.14	11.21	5.61	13.37	6.17	4.19	0.68
30	4.93	31.58	1.16	11.37	5.99	13.96	6.41	4.29	0.67
31	4.93	29.13	1.16	11.37	5.52	13.96	5.91	3.96	0.67
32	4.98	32.09	1.17	11.49	6.14	14.38	6.44	4.27	0.66
33	5.01	34.29	1.18	11.56	6.60	14.65	6.84	4.51	0.66
34	5.06	34.88	1.19	11.67	6.79	15.09	6.89	4.50	0.65
35	5.07	31.58	1.19	11.70	6.16	15.18	6.23	4.06	0.65
36	5.09	32.61	1.20	11.74	6.38	15.36	6.41	4.15	0.65
37	5.13	31.91	1.21	11.83	6.29	15.72	6.22	4.00	0.64
38	5.36	33.15	1.26	12.36	6.83	17.94	6.18	3.81	0.62
39	5.63	37.74	1.33	12.99	8.17	20.78	6.70	3.93	0.59
40	5.65	30.93	1.33	13.03	6.72	21.01	5.47	3.20	0.58
41	5.72	36.14	1.35	13.20	7.95	21.80	6.32	3.65	0.58
42	5.86	41.67	1.38	13.52	9.39	23.44	7.11	4.01	0.56
43	5.89	37.50	1.39	13.59	8.49	23.80	6.37	3.57	0.56
44	5.92	38.46	1.39	13.66	8.75	24.16	6.50	3.62	0.56
45	5.96	40.82	1.40	13.75	9.35	24.66	6.85	3.79	0.55
46	6.03	43.80	1.42	13.91	10.15	25.54	7.26	3.98	0.55
47	6.2	44.78	1.46	14.30	10.67	27.76	7.22	3.85	0.53
48	7.05	53.57	1.66	16.26	14.52	40.81	7.60	3.56	0.47
49	7.22	50.42	1.70	16.66	14.00	43.84	6.98	3.19	0.46

ตารางภาคผนวก 4 ผลการทดสอบเครื่องผลิตไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

ความเร็ว มอเตอร์ (Hz)	RPM	อนุกรมชุดที่ 1		อนุกรมชุดที่ 2		อนุกรมชุดที่ 3		อนุกรมชุดที่ 4		ขนานรวม	
		I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)	V (V)
5	108	0.45	10.28	0.44	10.18	0.43	7.55	0.42	7.69	0.63	9.05
7.5	259	0.8	15.42	0.79	15.37	0.75	13.66	0.77	13.54	0.98	15.24
10	355	1.12	19.38	1.13	19.93	1.12	17.24	1.08	17.2	1.31	21.2
12.5	449	1.38	25.22	1.39	25.64	1.39	22.13	1.38	21.56	1.65	27.26
15	543	1.58	31.4	1.6	30.7	1.67	26.47	1.68	26.97	1.77	33.55
17.5	638	1.8	37.2	1.8	41.3	1.87	35.8	1.87	32.4	1.94	39.8
20	732	1.89	47.4	1.86	42.1	2.14	39.6	2.15	41.7	1.96	46.4

**บันทึกข้อความ**

ส่วนราชการ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง โทร.7256

ที่ ศธ 64.26/2167

วันที่ 19 มีนาคม 2558

เรื่อง ตอบรับการนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ

เรียน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ

ตามที่ท่านได้ลงทะเบียนเข้าร่วมเสนอผลงานวิจัยจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 25 ประจำปี 2558 ในระหว่างวันที่ 10-12 มิถุนายน 2558 บัดนี้ คณะกรรมการฝ่ายวิชาการฯ ได้พิจารณาผลงานวิจัยของท่านเรียบร้อยแล้ว และขอแจ้งให้ทราบว่าผลงานของท่าน เรื่อง **อัตราเร็วลมเริ่มหมุนและเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ของกังหันลมแบบ Savonius 1.2 ใบ** ได้รับการพิจารณาให้นำเสนอภาคบรรยาย ทั้งนี้ ขอให้ท่านยืนยันการเข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยตามแบบฟอร์มที่กำหนด และปรับแก้บทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิและจัดพิมพ์ให้ถูกต้องตามรูปแบบที่การประชุมฯ กำหนด พร้อมชำระค่าลงทะเบียนและส่งเอกสารมายังฝ่ายวิชาการการจัดประชุมฯ (สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยทักษิณ) โดยผ่านทาง E-mail : [conference2015.tsu@gmail.com](mailto:conference2015.tsu@gmail.com) **ภายในวันที่ 31 มีนาคม 2558** สำหรับช่วงเวลานำเสนอผลงานท่านสามารถตรวจสอบได้ที่เว็บไซต์ <http://www.pt.tsu.ac.th/rdi/> ตั้งแต่วันที่ 1 พฤษภาคม 2558 เป็นต้นไป

จึงเรียนมาเพื่อทราบและดำเนินการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพันธุ์ เขมกมัตย์)

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

โทรศัพท์ 074-609600 ต่อ 7256-8 # และ 081-540-7304

โทรศัพท์โทรสาร 074-673227 E-mail : [conference2015.tsu@gmail.com](mailto:conference2015.tsu@gmail.com)**หมายเหตุ :** ท่านจะต้องส่งแบบยืนยันและชำระค่าลงทะเบียนให้แล้วเสร็จภายในวันที่ 31 มีนาคม 2558 หากพ้นกำหนดเวลาดังกล่าว ฝ่ายวิชาการจัดการประชุมจะถือว่าท่านละสิทธิ์การเข้าร่วมประชุมไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

## อัตราเร็วลมเริ่มหมุนและเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ของกังหันลมแบบ Savonius 12 ใบ Cut In Speed and Rev Up Time of 12 Blade Savonius Wind Turbine

ธนศ ไชยชนะ<sup>1,\*</sup> สัมพันธ์ ไชยเทพ<sup>2</sup> จอมภพ วาเวศศักดิ์<sup>1</sup> และ เสาวลักษณ์ ทองดี<sup>3</sup>  
Tanate Chaichana<sup>1,\*</sup>, Sumpun Chaitep<sup>2</sup>, Jompob Waewsak<sup>1</sup> and Saowalak Thongdee<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน และเวลาจากที่กังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่ ของกังหันลมแบบ Savonius ที่มีใบพัดจำนวน 12 ใบ ใบพัดสร้างจากทรงกระบอกผ่าซีกปิดหัวท้าย มีความยาวชะยา 6 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ใบพัดทั้ง 12 ใบยึดติดกับเพลาลมด้วยแขนจับที่มีรัศมี 15 เซนติเมตร ทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดด้วยอัตราเร็วลม 2.28, 2.97, 3.54, 4.07, 4.55 และ 5.00 เมตรต่อวินาที และใช้อัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมกับพื้นที่รับลมของกังหันอยู่ในช่วง 8.94-178.76 นิวตันต่อตารางเมตร ทำการตรวจวัดค่าระหว่างการทดสอบประกอบด้วย อัตราเร็วเชิงมุมของกังหัน เวลา แรงที่กระทำที่เพลาลมเนื่องจากการหมุนของกังหัน ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันเริ่มหมุนมีค่าเท่ากับ 2.35 เมตรต่อวินาที และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมกับพื้นที่รับลมของกังหันเปลี่ยน เวลาจากกังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วลมเชิงมุมคงที่มีค่า ระหว่าง 10 – 39 วินาที ทั้งนี้จะมีค่าแปรผกผันกับอัตราเร็วลม และแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมกับพื้นที่รับลมของกังหัน

**คำสำคัญ :** กังหันลมแกนตั้ง กังหันลมแบบ Savonius อัตราเร็วลมเริ่มหมุน

### Abstract

The objective of this research was to study the cut in speed and rev up time of 12 blades savonius wind turbine. Chord length of half cylindrical blades type is 6 cm and 30 cm blade length. The radius of rotor was set at 15cm. The turbine was examined in open flow and low wind speed wind tunnel type. Wind speed was setting of 2.28, 2.97, 3.54, 4.07, 4.55 and 5.00 m/s. Tangential force ratio various between 8.94-178.76 N/m<sup>2</sup> of swept area. Rotational speed of turbine, time and forces on the shaft due to the rotation was determined. The results shown that cut in wind speed of wind turbine was 2.354 m/s and rev up time is 10 – 39 s. Cut in wind speed is slowly changed with tangential force ratio. Rev up time is reverse variation to wind speed and is proportional to the tangential force ratio.

**Keywords:** VAWT, Savonius Wind Turbine, Starting Rotation

ผศ.ดร., ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ จังหวัดพัทลุง 93210

<sup>2</sup> ข้าราชการบำนาญ, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>3</sup> นิสิตระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

\* Corresponding author: e-mail: Tanatecha@hotmail.com Tel. 0816406768

## บทนำ

พลังงานลมเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในประเทศไทย ทั้งนี้จากการศึกษาศักยภาพด้านพลังงานลมพบว่าพื้นที่ที่มีศักยภาพดี จะเป็นพื้นที่บริเวณชายฝั่งอ่าวไทยและพื้นที่สูงตามยอดเขาด่างของประเทศ [1] เช่น ในเขตชายฝั่งทะเลจังหวัดนครศรีธรรมราช พบว่ามีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมอยู่ในช่วง 4.5 – 86 GWh/year [2] และในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่มีค่าพลังงานลมเฉลี่ยเท่ากับ 128.95 W/m<sup>2</sup> [3] เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากพลังงานลมในภาพของพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย เริ่มโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ณ แหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต ในปี พ.ศ. 2526 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยตลอดปี ประมาณ 5 m/s โดยใช้ชื่อว่าสถานีพลังงานทดแทนพรหมเทพ โดยตั้งอยู่ทางทิศเหนือของแหลมพรหมเทพ ประมาณ 1 km โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในปัจจุบันสามารถผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าได้รวมทั้งสิ้น 170 kW [4] ส่วนกังหันลมที่มีกำลังการผลิตสูงสุดของประเทศไทย คือกังหันลมที่ติดตั้ง ณ อ่างพักน้ำตอนบน โรงไฟฟ้า ลำตะคองชลภาวัฒนา ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา โดยมีกำลังการผลิตรวม 2,500 กิโลวัตต์ [4] กังหันลมกังหันลมสามารถแบ่งตามลักษณะของแกนได้ 2 ชนิด คือ กังหันลมแบบแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine) และแบบแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine) [5] โดยกังหันลมทั้ง 2 ชนิดจะมีข้อดี และข้อด้อยที่แตกต่างกันไป สามารถที่จะนำมาใช้งานได้เป็นอย่างดีหากหลายทั้งทางกลซึ่งเป็นการใช้งาน โดยตรงจากเพลามุมของกังหัน หรือการนำพลังงานกลที่ได้ไปขับเคลื่อนเครื่องผลิตไฟฟ้า ทั้งนี้การพัฒนากังหันลมภายในประเทศในปัจจุบันจะเป็นในส่วนของกังหันลมขนาดเล็กซึ่งพบว่าในปี 2520 [6] ได้มีการทดสอบกังหันแกนตั้งแบบ Savonius แบบ Hybrid และแบบ Savonius คัดแปลง โดยพบว่าแบบ Savonius เป็นกังหันลมที่สร้างง่าย มีสัมประสิทธิ์สูง แต่ไม่สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ส่วนแบบ Savonius คัดแปลงสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ แต่มีความยุ่งยากในการสร้าง ในปี 2525 ได้มีการออกแบบ สร้าง และพัฒนากังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [6] ซึ่งมีทั้งกังหันแบบแกนตั้งและกังหันแบบแกนนอน โดยพบว่ากังหันสามารถทำงานได้ เหมาะสำหรับการใช้งานที่ความเร็วลมค่อนข้างสูง และสามารถใช้งานในการผลิตไฟฟ้าได้ และในปี 2554 สัมพันธ์ และคณะ ได้ออกแบบสร้างและทดสอบกังหันลมแกนตั้งใบโค้ง โดยพบว่า มีสัมประสิทธิ์ค่อนข้างต่ำโดยมีค่าระหว่าง 5-7.5% [7] และในปีเดียวกัน ธนศและสัมพันธ์ได้ อิทธิพลของตำแหน่งของสันใบพัดแบบโค้งต่อสัมประสิทธิ์ของกังหันลมแกนตั้งเพลารวมมุมสวนทางกันพบว่าใบพัดกังหันแบบโค้งที่เหมาะสมที่สุดคือใบพัดที่โค้งแบบสมมาตร [8, 9]

ในการบอกคุณลักษณะของกังหันลมนั้นต้องบอกค่าต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อกำลังการผลิตพลังงานของกังหันลม เช่น ขนาดของกังหันลม อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มผลิตพลังงาน อัตราเร็วลมที่กังหันลมทำงานอย่างเต็มกำลัง กำลังการผลิตสูงสุด เวลาที่ใช้ในการทำให้กังหันลมหมุนจนมีอัตราเร็วลมคงที่ เป็นต้น โดยที่งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการทดสอบ การทำงานของกังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius ที่มีใบพัด 12 ใบ โดยเสนอค่าคุณลักษณะการทำงานของกังหัน 2 ค่า คือ อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) และเวลาที่พิจารณาจากที่กังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่หรือเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time)

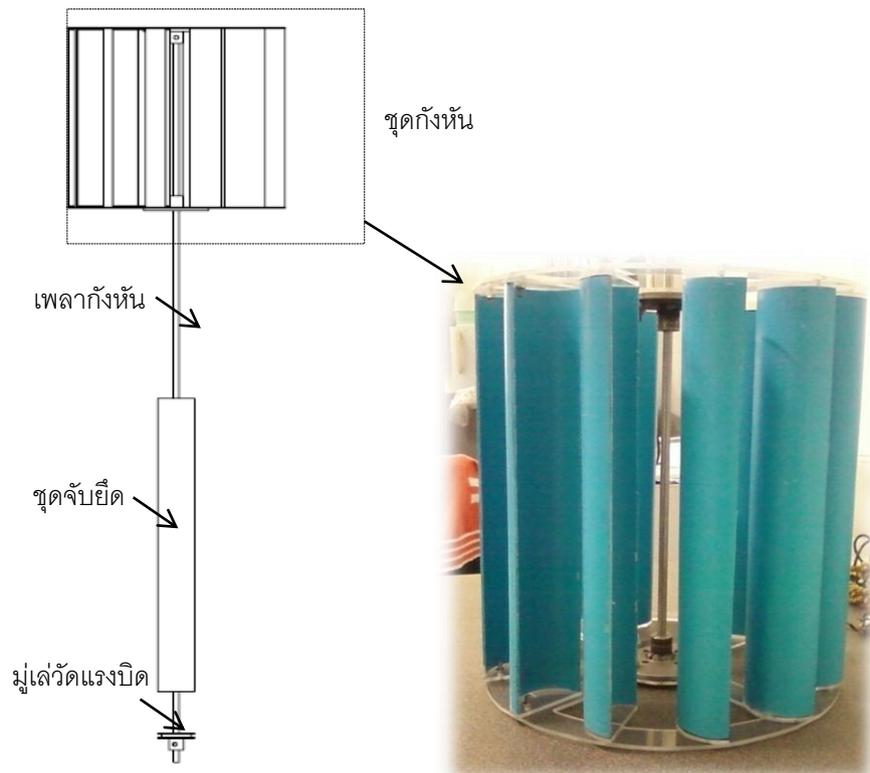
## วิธีการวิจัย

### กังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius

กังหันลมที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นกังหันลมแกนตั้ง แบบ Savonius มีใบพัดแบบทรงกระบอกผ่าซีกปิดหัวท้ายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm ใบพัดยาว 30 cm โดยกังหันลมมีใบพัดทั้งหมด 12 ใบ ใบพัดทั้ง 12 ใบยึดติด

กับเพลาลมุน โลหะด้วยแขนจับที่มีรัศมี 15 cm ดังนั้นพื้นที่รับลมของกังหัน (Swept area) มีค่าเท่ากับ  $0.045 \text{ m}^2$  ดังแสดงในภาพที่ 1

กังหันลมที่สร้างขึ้นถูกติดตั้งเพื่อทำการทดสอบในอุโมงค์ลม ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทนเพื่อการพัฒนาเกษตรและอุตสาหกรรมชุมชน ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง โดยอุโมงค์ลมเป็นแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำขนาด กว้าง 1.2 m สูง 1.2 m ยาว 8 m สามารถสร้างอัตราเร็วลมสูงสุดได้  $7.0 \text{ m/s}$  มีพื้นที่ทำงานขนาด  $90 \times 90 \text{ m}^2$  ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 กังหันลมแกนตั้ง แบบ Savonius 12 ใบ

### การทดสอบ

ทำการทดสอบกังหันลมโดยปรับค่าตัวแปร 2 ค่า คือ อัตราเร็วลม และมวลที่กระทำที่มู่เล่วิดแรงบิด และทำการวัดแรงบิดโดยวิธี Horse Brake Power ดังแสดงในภาพที่ 3

- อัตราเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบ คือ 2.28, 2.97, 3.54, 4.07, 4.55 และ  $5.00 \text{ m/s}$
- มวลที่กระทำที่มู่เล่วิดแรงบิดสำหรับการทดสอบ อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) จำนวน 20 ค่า โดยมีค่าตั้งแต่ 41g ถึง  $20 \times (41\text{g})$  เมื่อพิจารณาเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน (Tangential Force Ratio,  $F/A$ , หน่วย  $\text{N/m}^2$  of Swept Area) 8.94-178.76  $\text{N/m}^2$
- มวลที่กระทำที่มู่เล่วิดแรงบิดสำหรับการทดสอบ เวลาที่พิจารณาจากที่กังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่หรือเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) จำนวน 5 ค่า คือ 41g, 82g, 123g, 164g และ 205g

ในระหว่างการทดลอง จะบันทึกค่า

- มวลที่เปลี่ยนแปลงไปโดยพิจารณาจากค่าที่บันทึกได้จาก Load Cell
- อัตราเร็วรอบของกังหันลม (รอบ/นาที, RPM) โดยใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส (Light Detector Tachometer)



ภาพที่ 2 อุโมงค์ลมแบบเปิด



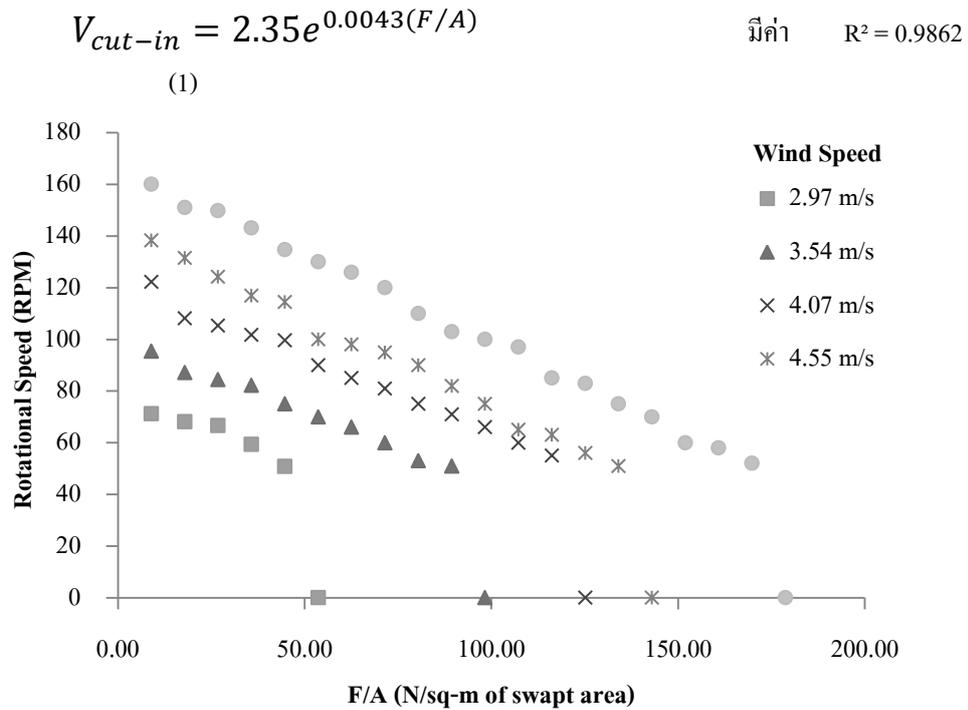
ภาพที่ 3 ชุดวัดแรงบิดแบบ Horse Brake Power

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

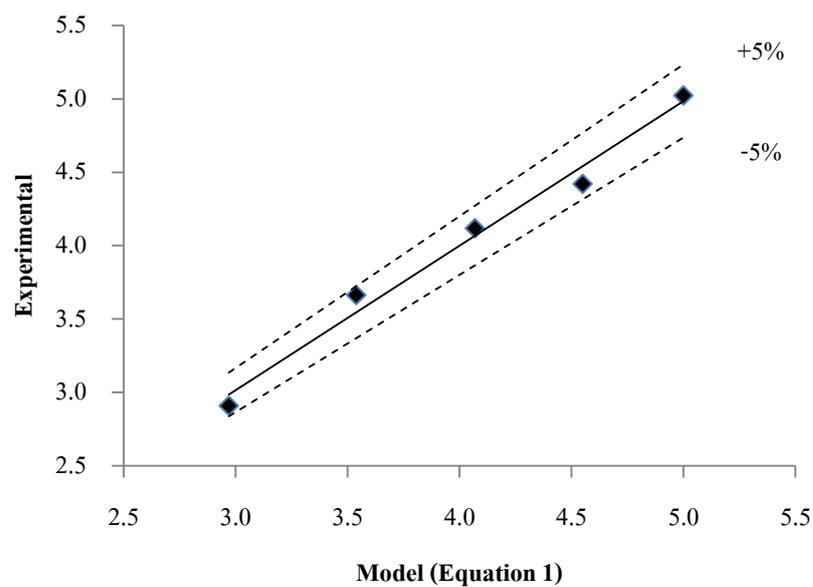
#### อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed)

ที่อัตราเร็วลมคงที่ ทำการเพิ่มมวลถ่วงที่มู่เล่วัดแรงบิดขึ้น ครั้งละ 41g (ลูกปิ่นทรงกลมมวล 2.05g จำนวน 20 ลูก) จนกังหันลมไม่สามารถหมุนได้ จึงทำการหยุดการทดลอง จากนั้นเปลี่ยนอัตราเร็วลมเป็นค่าต่อไป และทำการทดสอบเหมือนเดิม ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งพบว่าที่อัตราเร็วสูงขึ้นมวลถ่วงที่ใช้เพื่อให้กังหันลมหยุดหมุนก็จะมีค่าสูงขึ้น จนอย่างต่อเนื่อง โดยที่อัตราเร็วลม 2.28 m/s กังหันลมไม่หมุน ที่อัตราเร็วลม 2.97 m/s กังหันลมหยุดหมุนที่มวลถ่วง 246 g หรือ  $F/A$  เท่ากับ  $53.63 \text{ N/m}^2$  of Swept Area ส่วนที่อัตราเร็วลม 3.54, 4.07, 4.55 และ 5.00 m/s กังหันลมหยุดหมุนที่  $F/A$  เท่ากับ 98.32, 125.13, 143.01 และ  $178.76 \text{ N/m}^2$  of Swept Area ตามลำดับ จาก

ผลการทดลองในภาพที่ 4 สามารถสร้าง สมการเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) กับ F/A ได้ดังสมการที่ 1 โดยที่สมการที่ 1 สามารถใช้ในการทำนายอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนได้ดี มีความผิดพลาดไม่เกิน 5% ดังแสดงในภาพที่ 5 และจากสมการที่ 1 จะเห็นว่าค่า F/A มีผลต่ออัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนน้อยมาก ซึ่งสรุปได้ว่า F/A ไม่มีผลต่ออัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน ดังนั้นอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนจึงมีค่าเท่ากับ 2.35 m/s



ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของกังหันกับ F/A ที่อัตราเร็วลมต่างๆ

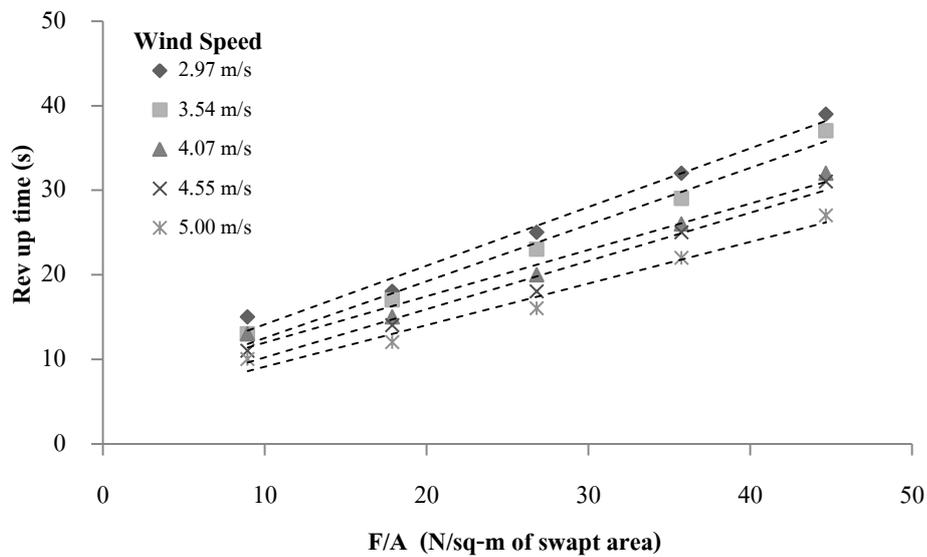


ภาพที่ 5 แสดงค่า Cut-in Speed ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 1

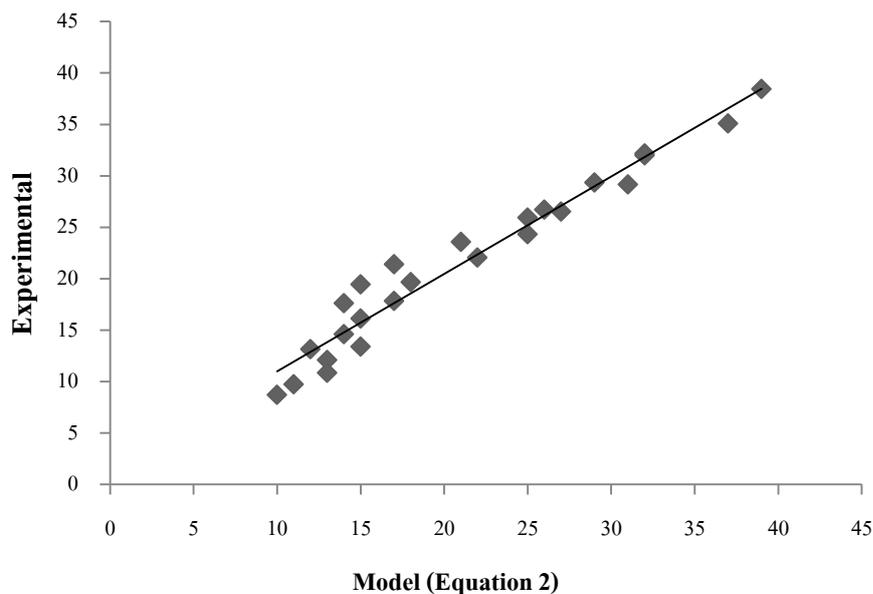
**เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time,  $T_{Rev-up}$ )**

เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) คือเวลาที่พิจารณาจากตอนที่กังหันลมเริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่ โดยพบว่าเวลาดังกล่าวมีค่าระหว่าง 10 – 39 s ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลมและอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน ดังแสดงในภาพที่ 6 และได้รับความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้ง 2 ต่อเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) ดังสมการที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการที่ 2 กับค่าการทดลองพบว่ามีความแม่นยำสูงถึง 95.31% ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยค่า Rev up time จะแปรผกผันกับอัตราเร็วลม และแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน

$$T_{Rev-up} = 0.995(F/A) - (0.099V_{wind}(F/A)) - 1.431V_{wind} + 11.402 \quad (2)$$



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) กับ F/A ที่อัตราเร็วลมต่างๆ



ภาพที่ 7 แสดงค่า Rev up time ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการที่ 2

### สรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้มีจุดประสงค์ในการนำเสนอผลการทดสอบค่า อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) และเวลาที่พิจารณาจากที่กังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่หรือเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) ของ กังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius ที่มีใบพัด 12 ใบ ซึ่งผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า

- อิทธิพลที่มีผลต่อ อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) และเวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) ของกังหันลมคือ อัตราเร็วลม และอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน (Tangential Force Ratio, F/A)
- อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) มีค่าเท่ากับ 2.354 m/s โดยค่า F/A มีผลต่ออัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน (Cut-in Speed) น้อยมาก
- เวลาเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่ (Rev up time) มีค่า ระหว่าง 10 – 39 s โดยแปรผกผันกับอัตราเร็วลม และแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลาลมหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน

### คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจาก งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2557 มหาวิทยาลัยทักษิณ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานทดแทนเพื่อการพัฒนาเกษตรและอุตสาหกรรมชุมชน ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่สนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่สนับสนุนสถานที่ในการดำเนินการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ธเนศ ไชยชนะ, 2556, **เทคโนโลยีพลังงานลม (Wind energy technology)** เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
- [2] ชนะ จันท์น้ำ จอมภพ แววศักดิ์, ยุทธนา ภูริระวิชย์กุล, สุภวรรณ ภูริระวิชย์กุล, ชุติรัตน์ คงเรือง, นิรันดร มาแทน, เขาวรัตน์ พรหมแพทย์, และ อภิชาติ หนูทอง, (2552), “การประเมินศักยภาพของแหล่งพลังงานลมและความเป็นไปได้ของฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่ตามแนวชายฝั่ง ทะเลอ่าวไทย”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
- [3] ณัฐวุฒิ ดุษฎี, กิตติกร สาสุจิตต์, ธเนศ ไชยชนะ, นิรันดร สุวรรณสิทธิ์, อภิชาติ สวนคำทอง และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2551), “การประเมินศักยภาพพลังงานลมเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบน”, การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9 ประจำปี 2551
- [4] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กระทรวงพลังงาน, <http://www.egat.co.th> [20/1/2558]
- [5] J. F. Manwell., J. G. McGowan., and A. L. Rogers. (2002). **Wind Energy Explained: John Wiley & Sons; Baffins Lane, Chic Hester, West Sussex PO19 1UD, England.**
- [6] เสถียร วงศ์สารเสริฐ, (2520), “การออกแบบและสร้างกังหันลมขนาดเล็กแบบประหยัด”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- [7] สมาน แสงงาม, (2525), “กักันลมผลิตไฟฟ้าสำหรับชนบท”, รายงานฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- [8] Sumpun Chaitep, Tanate Chaichana, Pipatpong Watanawanyoo and Hiroyuki Hirahara, (2011), “Performance Evaluation of Curved Blades Vertical Axis Wind Turbine”, *European Journal of Scientific Research*, Volume 57, Issue 3 ,435-466
- [9] ธเนศ ไชยชนะ และสัมพันธ์ ไชยเทพ, (2554), อิทธิพลของตำแหน่งของสันใบพัดแบบโค้งต่อสัมประสิทธิ์ของกักันลมแกนตั้งเพลาพร้อมหมุนสวนทางกัน, วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ (Thaksin University Journal) ปีที่ 14 ฉบับที่ 3 ฉบับพิเศษ หน้า 107-115, 2554