

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้น
ต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้น
ต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้น
ต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส

เสาวลักษณ์ ทองดี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ชารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.Rameshprabu Ramaraj)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้น ต่อสมรรถนะของ กังหันลมแบบชาโวเนียส
ชื่อผู้เขียน	นางสาวเสาวลักษณ์ ทองดี
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์

บทคัดย่อ

กังหันลมแกนตั้งแบบชาโวเนียสสามารถทำงานได้ที่ทุกทิศทางลม มีอัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำ และให้แรงบิดสูง ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมต่ำอย่างประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่ภาคเหนือของประเทศ สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของกังหันลมแกนตั้งแบบชาโวเนียสและวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมสามารถผลิตได้ โดยทำการวิจัยอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้น ปรับจำนวนใบ 6 ค่า คือ 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ มุมใบ -15° , -5° , 0° , 5° , 15° และจำนวนชั้น 1-4 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งกังหันลมทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm สูง 30 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 6 cm ทำจากท่อพีวีซีผ่าครึ่ง โดยทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ มีขนาดพื้นที่หน้าตัด $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$ ยาว 9.5 m ที่อัตราเร็วลมระหว่าง 2-7 m/s และปรับภาระโหลดระหว่าง 0-0.49 kg ผลการวิจัยพบว่า จากการศึกษาในส่วนแรกอิทธิพลของจำนวนใบ พบว่ากังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดในช่วงอัตราเร็วลมต่ำกว่า 4.5 m/s ซึ่งมีค่าประมาณ 0.24 ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบเท่ากับ 0.36 อัตราเร็วลมเริ่มหมุน และระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่ต่ำสุดเท่ากับ 2.12 m/s และ 28 s ตามลำดับ สำหรับกรณีศึกษาส่วนที่สองอิทธิพลของมุมใบสำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบต่างๆ พบว่า กังหันลมในช่วง 4-12 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่ มุมใบ 15° สำหรับกังหันลม 16 มุมที่เหมาะสมคือ 5° โดยคิดเป็นร้อยละที่เพิ่มขึ้นจากมุมอ้างอิง (0°) เป็น 85.33, 77.20, 84.11, 127.37 และ 4.54 % ตามลำดับ และกังหันลม 18 ใบ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่มุม 0° เมื่อเปรียบเทียบมุมใบต่าง ๆ สำหรับกังหันลม 16 ใบ มุมใบ 5° พบว่าค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำสุดเท่ากับ 2.53 m/s และระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่เท่ากับ 25 s ผลการวิจัยในส่วนต่อมาเป็นการศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นของกังหันลม พบว่าการเพิ่มจำนวนชั้นส่งผลดีต่อค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุน และเวลาที่ใช้สำหรับการหมุนเข้าสู่อัตราเร็วรอบคงที่ที่ต่ำลง และสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง แต่สัมประสิทธิ์กำลังจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น สำหรับผลการวิจัยส่วนสุดท้ายสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงอัตราเร็วลมที่ทดสอบพบว่ากังหันลม 16 ใบ สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 27.46 W/m^2 และจากศักยภาพพลังงานลมของประเทศ

ไทยซึ่งมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 4 m/s พบว่ากังหันลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ประมาณ 4.95 W/m^2

คำสำคัญ : อุโมงค์ลม, กังหันลมแกนตั้ง, การทดสอบทางอากาศพลศาสตร์, สัมประสิทธิ์กำลัง



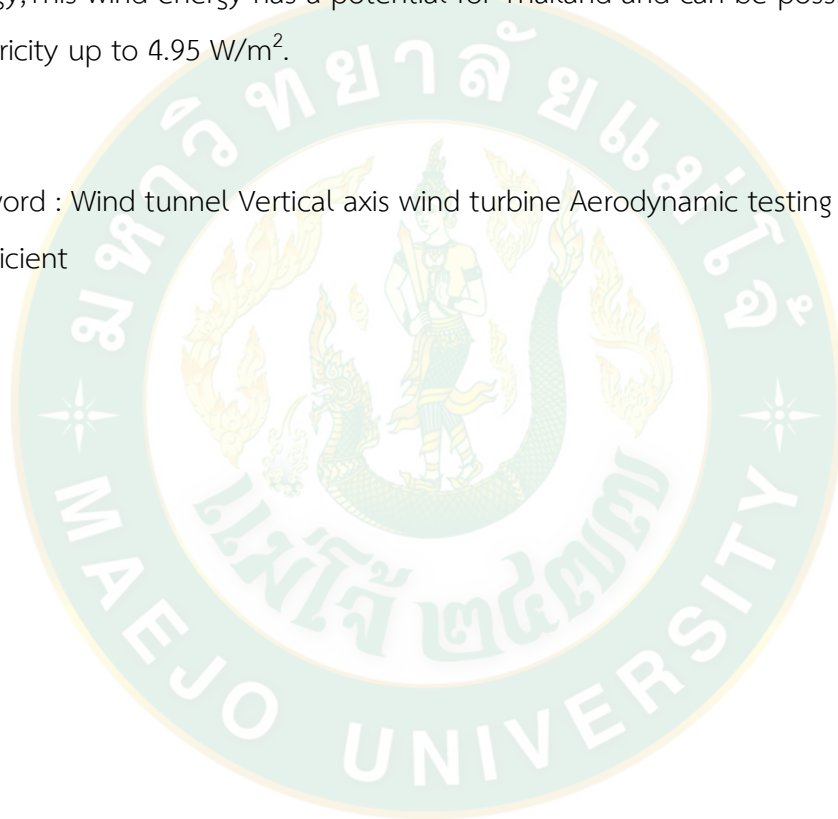
Title	EFFECTED STUDY OF BLADE NUMBER, ANGLE AND STAGE OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE
Author	Miss Saowalak Thongdee
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Churat Thararux

ABSTRACT

The savonius type vertical axis wind turbine can be operated in all wind directions, is low cut in speed and high in torque. Therefore it is a potential source of energy in low wind areas. This research aimed to compare the performance using blades numbers blades angle and stages of Savonius vertical axis wind turbine, as well as that addition generated power was analyzed. The turbine containing the blades numbers was 4, 6, 8, 12, 16 and 18 blades with the blades angle being at -15°, -5°, 0°, 5° and 15°, respectively. Subsequently the number of stages including single stage to four stages were monitored. The rotor used is a semicircle shaped blade made from PVC material, has a blade diameter of 6 cm, diameter of rotor 30 cm and 30 cm height. Turbine was tested dead weight range of 0-0.49 kg at 2-7 m/s wind speed low speed-open type wind tunnel. The wind tunnel has cross section area and size was 1.2 x 1.2 m² and 9.5 m length. Initially, it was found that the effect of blades number at 16 blades showed the maximum power coefficient of the wind turbine and tip speed ratio were 0.24 and 0.36 at wind speed less than of 4.5 m/s, respectively. The next research show the effect of blades angle for 4-18 blades turbine. The maximum power coefficient at the range of 4-12 blades turbine with an angle of 15°, and 5° for 16 blades turbine was compared with the baseline configuration (0°). It was also found that the power coefficient increased about 85.33, 77.20, 84.11, 127.37 and 4.54 %, respectively, using 18 blades at 0° blade angle when comparing all the blades angles. Finally, the study results show that the cut in wind

speed was the lowest at 2.53 m/s and the rev up time of 25 s using 16 blades turbine. Also this result indicated that while the number of stages are increased from one to four the cut in wind speed along with the rev up time are decreased concluding that it can work in any wind direction. However, the power coefficient degrades when the number of stages are increased. The final research shows the assessment of power generated at the ranges of wind speed tested. Consequently, the wind turbine 16 blades produced 27.46 W/m^2 and 4 m/s of wind energy, This wind energy has a potential for Thailand and can be possible to generate electricity up to 4.95 W/m^2 .

Keyword : Wind tunnel Vertical axis wind turbine Aerodynamic testing Power coefficient



กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน และหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี Dr. Rameshprabu Ramaraj และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศไชยชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษา แนวคิดแนวทางในการศึกษาหาความรู้ และการแก้ปัญหาต่าง ๆ และตรวจสอบแก้ไขจนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกท่านที่ได้ประสานวิชาความรู้ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2559

ขอขอบพระคุณ เงินทุนสนับสนุนการวิจัย จากมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดและชนิดแผนอากาศของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กต่อสัมประสิทธิ์กำลัง ประจำปีงบประมาณ 2560

ขอขอบพระคุณ เงินทุนสนับสนุนการวิจัย จากสำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน โครงการสนับสนุนทุนวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2561

ขอขอบพระคุณ ทุนสนับสนุนวัสดุสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่ตลาดเชิงพาณิชย์เพื่อสนับสนุนให้นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาให้เป็นผู้ประกอบการ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการพัฒนาหน่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการสร้างนวัตกรรมด้านการเกษตร ปี พ.ศ. 2561

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้าน และคอยเป็นกำลังใจให้กันตลอดมา ขอขอบพระคุณทุกคนไว้ ณ โอกาสนี้

เสาวลักษณ์ ทองดี

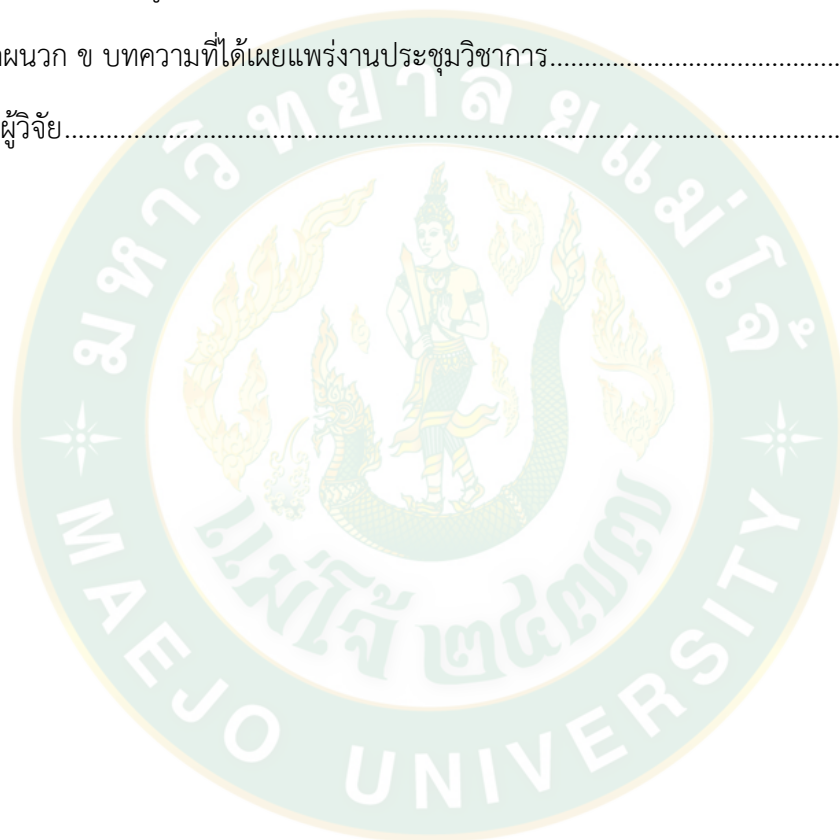
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฐ
สารบัญตารางผนวก	ด
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร	7
ลมในประเทศไทย.....	7
1. ลมมรสุม (Monsoon)	7
2. ลมประจำถิ่น (Local wind).....	8
เทคโนโลยีกักกันลม.....	10
1. กักกันลมชนิดแกนหมุนแนวนอน	10
2. กักกันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง.....	11
อุโมงค์ลม	13

1. รูปแบบของอุโมงค์ลม	13
2. ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม	15
เครื่องมือวัดอัตราเร็วลม	15
1. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย (Cup anemometer)	15
2. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบใบพัด (Windmill anemometer)	16
3. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot wire anemometer)	16
4. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลตราโซนิก (Sonic anemometer)	17
5. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบเลเซอร์ (Laser doppler anemometer)	18
ทฤษฎีการคำนวณพลังงานลม	18
1. ทฤษฎีโมเมนตัมในการไหล	18
2. พลังงานลม (Wind power, P_w)	21
3. การประยุกต์ทฤษฎีใช้สำหรับกังหันลมแกนตั้ง	22
การตรวจเอกสาร	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	30
อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ	30
1. อุโมงค์ลม	30
2. ชุดวัดแรงบิด	30
3. เครื่องบันทึกข้อมูล Multichannel mini data logger	31
4. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบ Hot wire	32
5. เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	32
วิธีดำเนินการทดสอบ	33
1. ทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์	33
2. การสร้างกังหันลม	34
3. การติดตั้งกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม	34

4. ทดสอบการทำงานของกังหันลมในอุโมงค์ลม.....	34
5. การวิเคราะห์ข้อมูล.....	36
ระยะเวลาดำเนินงาน.....	37
งบประมาณ.....	38
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ.....	39
การกระจายของอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด.....	39
1. การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด.....	39
2. การกระจายอัตราเร็วลมที่ความถี่ต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด.....	41
อิทธิพลของจำนวนใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนเนียส.....	45
1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม.....	46
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม.....	48
3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่.....	49
4. ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่.....	51
อิทธิพลของมุมใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนเนียส.....	52
1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม.....	53
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม.....	55
3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่.....	56
4. ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่.....	57
อิทธิพลของจำนวนชั้นต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนเนียส.....	59
1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม.....	59
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม.....	60
3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่.....	61
4. ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่.....	62
การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลม.....	64

สมการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังของกัมมันตแบบชาโวเนียส.....	65
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุปผลงานวิจัย.....	67
ข้อเสนอแนะ	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดสอบกัมมันตชนิดชาโวเนียส	73
ภาคผนวก ข บทความที่ได้เผยแพร่งานประชุมวิชาการ.....	116
ประวัติผู้วิจัย.....	129



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนในภาคไฟฟ้า.....	3
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน	12
ตารางที่ 3 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย	37
ตารางที่ 4 รายละเอียดงบประมาณในการทำวิจัย	38
ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแต่ละจำนวนใบ	48
ตารางที่ 6 อัตราเร็วรอบของกังหันลมที่จำนวนใบ และอัตราเร็วลมต่าง ๆ	50
ตารางที่ 7 ค่า Rev up time กับแรงที่กระทำต่อเพลากังหันที่จำนวนใบต่าง ๆ	51
ตารางที่ 8 มุมใบที่กังหันลมมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับแต่ละจำนวนใบ	55
ตารางที่ 9 อัตราเร็วรอบของกังหันลมแต่ละมุมที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ	57
ตารางที่ 10 ค่า Rev up time สำหรับกังหันลม 16 ใบ ที่มุมต่าง ๆ	58
ตารางที่ 11 อัตราเร็วรอบของกังหันลมแต่ละชั้นที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ	62
ตารางที่ 12 Rev up time กับแรงที่กระทำต่อเพลากังหันที่จำนวนใบต่าง ๆ	63
ตารางที่ 13 การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมชนิดซาโวเนียส 16 ใบ	65

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2548-2558	2
ภาพที่ 2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปี 2550-2557.....	2
ภาพที่ 3 แผนที่ศักยภาพลมในประเทศไทยที่ระดับความสูง 90 เมตร	4
ภาพที่ 4 (ก) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ข) ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้.....	8
ภาพที่ 5 (ก) ลมทะเล (ข) ลมบก	9
ภาพที่ 6 (ก) ลมหุบเขา (ข) ลมภูเขา.....	9
ภาพที่ 7 กังหันลมแกนนอนลักษณะหันหน้ารับลม	11
ภาพที่ 8 กังหันลมแกนนอนลักษณะหันหลังรับลม	11
ภาพที่ 9 กังหันลมแกนตั้ง	12
ภาพที่ 10 อุโมงค์ลมแบบปิด.....	14
ภาพที่ 11 อุโมงค์ลมแบบเปิด	14
ภาพที่ 12 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย	16
ภาพที่ 13 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบใบพัด.....	16
ภาพที่ 14 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน	17
ภาพที่ 15 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลตราโซนิก	17
ภาพที่ 16 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบเลเซอร์	18
ภาพที่ 17 การไหลของอากาศผ่านกังหัน.....	19
ภาพที่ 18 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ	22
ภาพที่ 19 รูปแบบของกังหันลมชาโวเนียสจำนวน 1-3 ชั้น.....	24
ภาพที่ 20 (ก) กังหันลมแบบตรง (ข) แบบพีระมิด และ (ค) แบบพีระมิดหัวกลับ	25
ภาพที่ 21 รูปแบบการปรับมุมใบพัด.....	25
ภาพที่ 22 การติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบกับอุโมงค์ลม	26

ภาพที่ 23	การปรับอัตราส่วนซ้อนทับของใบพัด	27
ภาพที่ 24	รูปแบบอุปกรณ์ครอบเสริมของกังหันลมไฮโดลินิก	27
ภาพที่ 25	กังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกัน	28
ภาพที่ 26	การประกอบกังหันลมแกนแนวตั้งและอุปกรณ์บังคับทิศทางและเพิ่มอัตราเร็วลม	28
ภาพที่ 27	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังระหว่างทดสอบภาคสนามกับอุโมงค์ลม	29
ภาพที่ 28	อุโมงค์ลมแบบเปิด	30
ภาพที่ 29	ชุดวัดแรงบิด	31
ภาพที่ 30	เครื่องบันทึกข้อมูล	31
ภาพที่ 31	เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน	32
ภาพที่ 32	เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส	32
ภาพที่ 33	จุดวัดอัตราเร็วลม	33
ภาพที่ 34	ระยะที่วัดอัตราเร็วลมจากทางเข้าของอุโมงค์ลม	33
ภาพที่ 35	รูปแบบใบพัด	34
ภาพที่ 36	แผนภาพการติดตั้งกังหันลมและชุดทดสอบภายในอุโมงค์ลม	34
ภาพที่ 37	รูปแบบ 3 มิติของกังหันลมจำนวนใบต่าง ๆ (ก) 4 ใบ (ข) 6 ใบ (ค) 8 ใบ (ง) 12 ใบ	35
ภาพที่ 38	ตัวอย่างการปรับมุมใบพัด	35
ภาพที่ 39	(ก) รูปแบบ 3 มิติของกังหันลมจำนวน 1 และ 2 ชั้น (ข) ชุดกังหันลมสำหรับทดสอบ จำนวน 2, 3 และ 4 ชั้น	36
ภาพที่ 40	การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด (ก) ระยะ 0 m	41
ภาพที่ 41	การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m สำหรับความถี่ต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด	44
ภาพที่ 42	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับความถี่ของมอเตอร์พัดลม	45
ภาพที่ 43	กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วลมระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ	45
ภาพที่ 44	การติดตั้งกังหันลมภายในอุโมงค์ลม	46
ภาพที่ 45	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่จำนวนใบต่าง ๆ	47

ภาพที่ 46	สัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยของกังหันลมที่จำนวนใบต่างๆ.....	47
ภาพที่ 47	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมเริ่มหมุนกับจำนวนใบของกังหันลม.....	49
ภาพที่ 48	กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ.....	49
ภาพที่ 49	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบของกังหันลมอัตราเร็วลมต่าง ๆ	50
ภาพที่ 50	กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วรอบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ	50
ภาพที่ 51	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาในช่วงกังหันลมทำงาน	51
ภาพที่ 52	ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ต่อแรงที่กระทำกับเพลลาที่จำนวนใบต่าง ๆ	52
ภาพที่ 53	กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ.....	52
ภาพที่ 54	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 4 ใบพัด	53
ภาพที่ 55	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 6 ใบพัด	53
ภาพที่ 56	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 8 ใบพัด	54
ภาพที่ 57	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 12 ใบพัด.....	54
ภาพที่ 58	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 16 ใบพัด.....	54
ภาพที่ 59	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 18 ใบพัด.....	54
ภาพที่ 60	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมเริ่มหมุนกับมุมใบพัดของกังหันลม 16 ใบ.....	55
ภาพที่ 61	กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนแต่ละมุมใบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ	56
ภาพที่ 62	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบกับอัตราเร็วลมที่มุมต่าง ๆ.....	56
ภาพที่ 63	กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบ.....	57
ภาพที่ 64	ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ของกังหันลม 16 ใบ ที่มุมใบต่าง ๆ.....	58
ภาพที่ 65	กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ.....	58
ภาพที่ 66	สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสำหรับกังหันลมแต่ละชั้น	60
ภาพที่ 67	อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลมแต่ละชั้น	60
ภาพที่ 68	กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วลมเริ่มหมุนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ	61

ภาพที่ 69	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบกับอัตราเร็วลมของกังหันลมแต่ละชั้น	61
ภาพที่ 70	กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วรอบจากแบบจำลองกับการทดสอบของการปรับจำนวนชั้น.	62
ภาพที่ 71	ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ของกังหันลม 16 ใบ ที่จำนวนชั้นต่าง ๆ	63
ภาพที่ 72	กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ.....	63
ภาพที่ 73	กระบวนการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม	64
ภาพที่ 74	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของกังหันลมกับระดับอัตราเร็วลมต่าง ๆ	65



สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 4 ใบ มุม -15°	74
ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 4 ใบ มุม -5°	75
ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 4 ใบ มุม 0°	76
ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 4 ใบ มุม 5°	77
ตารางผนวกที่ 5 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 4 ใบ มุม 15°	78
ตารางผนวกที่ 6 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 6 ใบ มุม -15°	79
ตารางผนวกที่ 7 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 6 ใบ มุม -5°	80
ตารางผนวกที่ 8 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 6 ใบ มุม 0°	82
ตารางผนวกที่ 9 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 6 ใบ มุม 5°	83
ตารางผนวกที่ 10 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 6 ใบ มุม 15°	84
ตารางผนวกที่ 11 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ มุม -15°	85
ตารางผนวกที่ 12 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ มุม -5°	86
ตารางผนวกที่ 13 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ มุม 0°	88
ตารางผนวกที่ 14 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ มุม 5°	89
ตารางผนวกที่ 15 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ มุม 15°	90
ตารางผนวกที่ 16 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 12 ใบ มุม -15°	92
ตารางผนวกที่ 17 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 12 ใบ มุม -5°	93
ตารางผนวกที่ 18 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 12 ใบ มุม 0°	94
ตารางผนวกที่ 19 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 12 ใบ มุม 5°	95
ตารางผนวกที่ 20 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 12 ใบ มุม 15°	97
ตารางผนวกที่ 21 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 16 ใบ มุม -15°	98
ตารางผนวกที่ 22 ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 16 ใบ มุม -5°	99

ตารางผนวกที่ 23	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 16 ใบ มุม 0°.....	101
ตารางผนวกที่ 24	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 16 ใบ มุม 5°.....	102
ตารางผนวกที่ 25	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 16 ใบ มุม 15°	103
ตารางผนวกที่ 26	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 18 ใบ มุม -15°	105
ตารางผนวกที่ 27	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 18 ใบ มุม -5°	106
ตารางผนวกที่ 28	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 18 ใบ มุม 0°.....	107
ตารางผนวกที่ 29	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 18 ใบ มุม 5°.....	109
ตารางผนวกที่ 30	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 18 ใบ มุม 15°	110
ตารางผนวกที่ 31	ข้อมูลการทดสอบกึ่งหันลม 8 ใบ 1-4 ชั้น.....	111



อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ความเร่ง	m/s^2
A	พื้นที่รับลมของกังหันลม	m^2
c	ความกว้างใบ	m
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้าน	-
C_g	ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	-
C_L	สัมประสิทธิ์แรงยก	-
C_P	สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม	-
C_T	สัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม	-
C_t	ประสิทธิภาพของระบบส่งถ่ายกำลัง	-
C_{tot}	ประสิทธิภาพรวมของระบบ	-
D	เส้นผ่านศูนย์กลางกังหันลม	m
F	แรงที่กระทำกับวัตถุ	N
f	ความถี่ของมอเตอร์พัดลม	Hz
F_D	แรงต้าน	N
F_g	แรงที่กระทำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	N
F_L	แรงยก	N
L	ความยาวใบ	m
m	มวลของของไหล	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลของของไหล	m^3/s
N_B	จำนวนใบของกังหันลม	-
N_g	จำนวนชั้นของกังหันลม	-
p	ความดันอากาศภายในอุโมงค์ลม	$Pa, N/m^2$
P_e	กำลังไฟฟ้า	W
P_{max}	กำลังสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้	W
P_O	กำลังงานของกังหันลม	W
P_W	พลังงานจลน์ของมวลอากาศ	W
R	รัศมีของกังหันลม	cm, m

RPM	อัตราเร็วรอบของกังหันลม	รอบ/นาที
t	เวลา	s
T	แรงบิดเพลาของกังหันลม	Nm
T_{rev}	ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่	s
TSR, λ	อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบ	-
U	อัตราเร็วปลายใบ	-
V	อัตราเร็วลม	m/s
$V_{Cut\ in}$	อัตราเร็วลมที่กังหันลมเริ่มหมุน	m/s
β	มุมใบพัด	degree
α	มุมปะทะ	degree
π	ค่าคงที่ เท่ากับ 3.14	-
ρ	ความหนาแน่นอากาศ	kg/m ³
ω	อัตราเร็วเชิงมุม	rad/s
σ	อัตราส่วนโซลิติตี	%

บทที่ 1

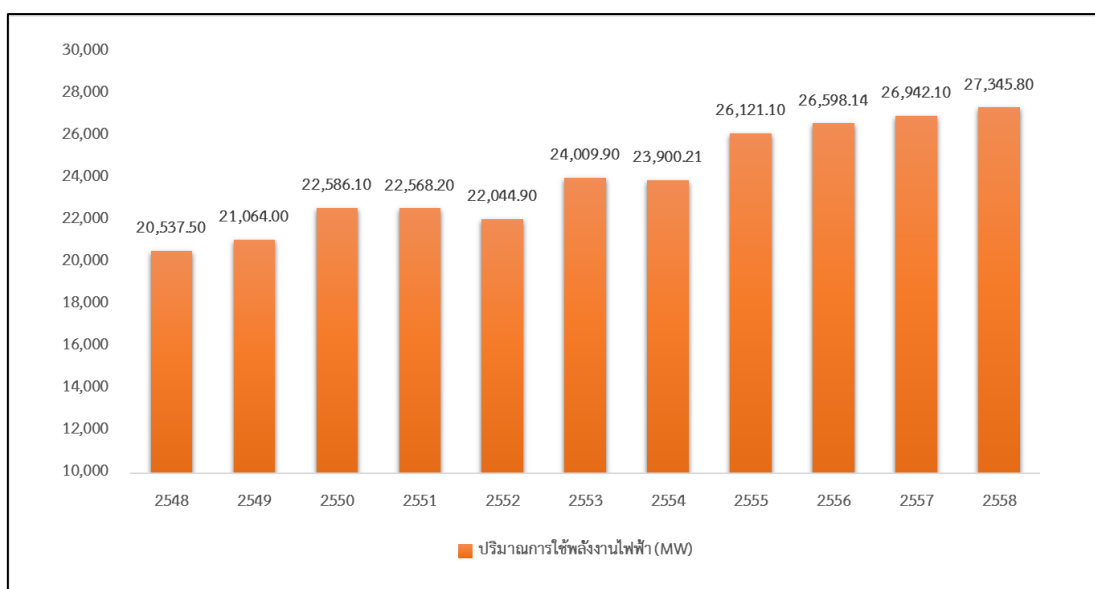
บทนำ

ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

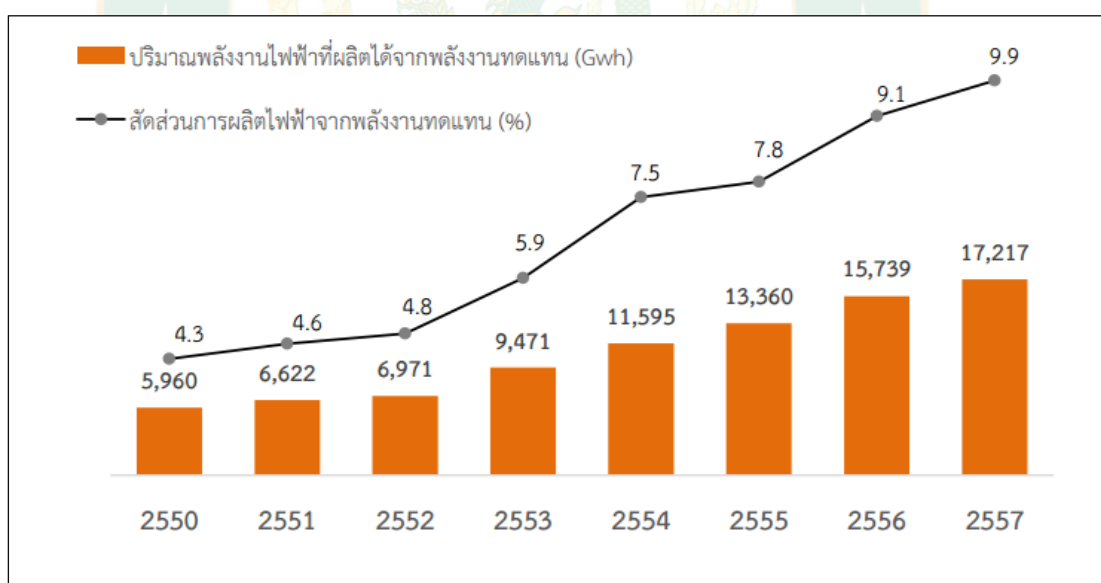
พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตของประชาชนและการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า 27,345.80 MW และมีการใช้เพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณปีละ 4-5 % ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ดังภาพที่ 1 ความเสี่ยงเนื่องจากแนวโน้มของการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการจัดหาพลังงานให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของประเทศ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ใช้พลังงานสิ้นเปลืองจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน สำหรับพลังงานทดแทน ได้แก่ พลังงานขยะ ก๊าซชีวภาพ ชีวมวล น้ำ แสงอาทิตย์ คลื่น และลม ยังมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (ภัทรภรณ์, 2015)

การพัฒนาพลังงานทดแทนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลมาจากนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ซึ่งมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นทุกปี ในปี พ.ศ. 2550 มีสัดส่วนปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนที่ผลิตได้รวมการผลิตไฟฟ้านอกระบบ ทั้งประเทศร้อยละ 4.3 และเพิ่มเป็นร้อยละ 9.87 ในปี พ.ศ. 2557 (ไม่รวมพลังงานน้ำขนาดใหญ่) ดังภาพที่ 2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [พพ.], ม.ป.ป.) และเพื่อให้สอดคล้องกับกรอบของการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ กระทรวงพลังงานจึงได้ทบทวนการจัดทำแผนพลังงาน 5 แผนหลัก ในช่วงปี พ.ศ. 2558-2579 ได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (Power development plan: PDP2015) แผนอนุรักษ์พลังงาน (Energy efficiency development plan: EEP2015) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative energy development plan: AEDP2015) แผนการจัดหาก๊าซธรรมชาติของไทย (Gas plan 2015) และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง (Oil plan 2015) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, ม.ป.ป.) โดยแผน AEDP2015 จะให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มตามศักยภาพ การพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเดิมผลการดำเนินงานสิ้นปี พ.ศ. 2558 มีกำลังการผลิตไฟฟ้าประมาณ 7,962.79 MW และคาดว่าในปี พ.ศ. 2579 จะต้องเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 19,684.40 MW สำหรับพลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนหนึ่งที่รัฐบาลมีเป้าหมายในการ

ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานชนิดนี้ เดิมมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 233.90 MW และเมื่อสิ้นสุดแผน จำเป็นต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 3,002 MW (กานต์นลิน, 2560) ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปี 2548-2558



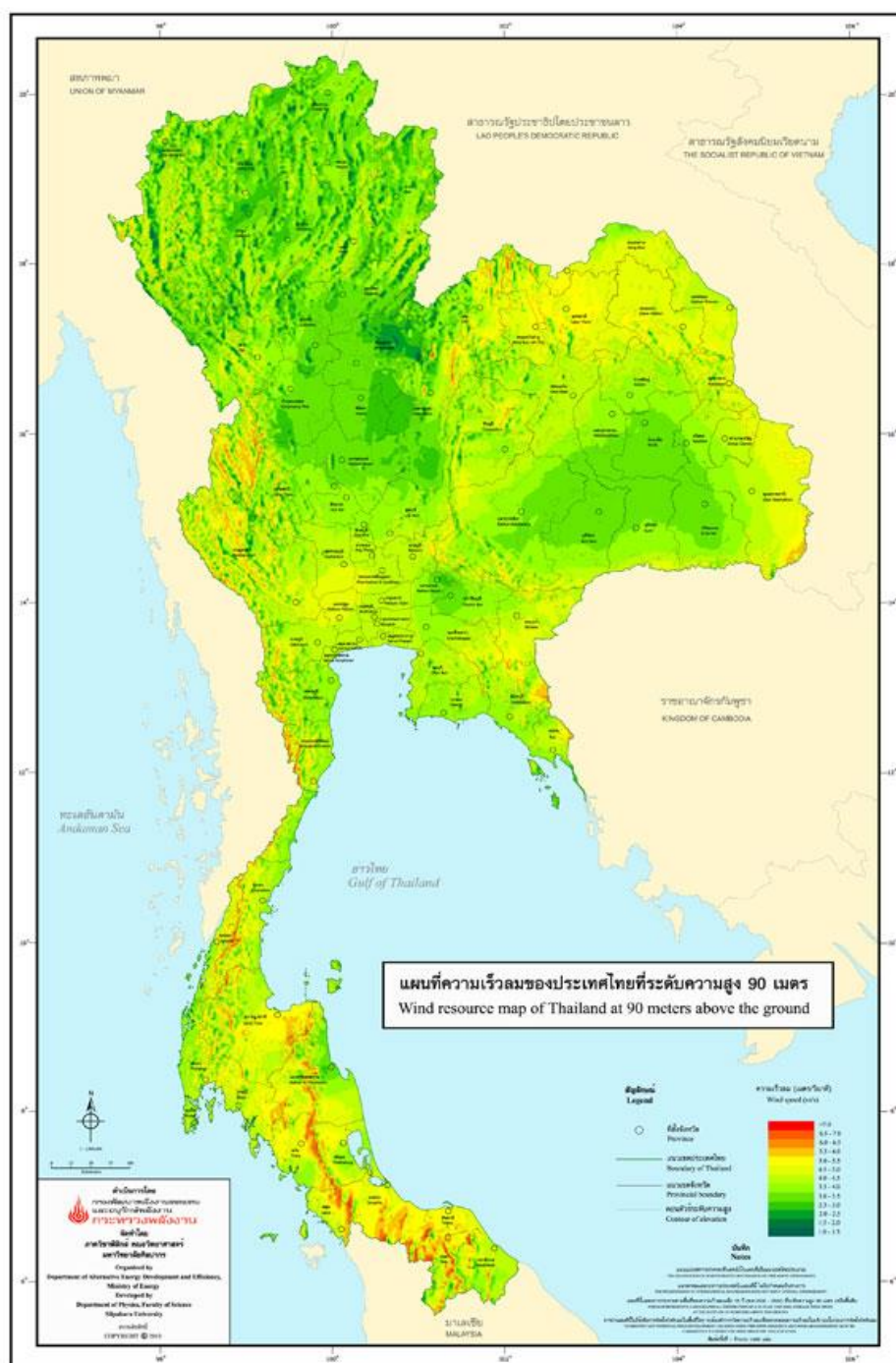
ภาพที่ 2 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปี 2550-2557

ที่มา : พพ. (ม.ป.ป.)

ตารางที่ 1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนในภาคไฟฟ้า

ชนิดของพลังงานทดแทน	กำลังการผลิต (MW)	
	ผลการดำเนินงานสิ้นสุด	เป้าหมายการใช้พลังงาน
	ปี 2558	ปี 2579
ขยะชุมชน	131.68	500
ขยะอุตสาหกรรม	-	50
ชีวมวล	2,726.60	5,570
ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย)	372.51	600
ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน)	-	680
พลังน้ำขนาดเล็ก	172.12	376
พลังน้ำขนาดใหญ่	2,906.40	2,906.40
ลม	233.90	3,002
แสงอาทิตย์	1,419.58	6,000
รวม	7,962.79	19,684.40

ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นเทือกเขาและหุบเขาทอดตัวยาวในแนวเหนือ-ใต้ สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ราบสูง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นที่ราบลูกฟูกสลับกับภูเขาและที่ราบชายฝั่งทะเล ภาคกลางส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ และภาคใต้เป็นคาบสมุทรยื่นลงไปในทะเล มีภูเขาทอดตัวแนวเหนือ-ใต้ (วิกิพีเดีย, ม.ป.ป.) จากลักษณะภูมิประเทศดังกล่าว ทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมอยู่ในระดับปานกลาง-ต่ำ มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า 4 m/s โดยในแผนที่ศักยภาพลมดังกล่าวที่ 3 ส่วนใหญ่ถูกจัดอยู่ในพื้นที่สีเขียว เขียวอ่อน และเหลือง สำหรับแหล่งที่มีศักยภาพพลังงานลมดี คือ บริเวณโซนพื้นที่สีแดง (กองทัพอากาศ [ทอ.], ม.ป.ป.) ซึ่งจากการศึกษาข้อมูล พบว่าพื้นที่ที่เหมาะสมส่วนใหญ่ได้มีการสร้างเป็นฟาร์มกังหันลมสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าขายในเชิงพาณิชย์ ตัวอย่างเช่น พื้นที่ชายฝั่งทะเลปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช กังหันลมห้วยบัง อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา เทพสถิต วินด์ฟาร์ม จังหวัดชัยภูมิ และทุ่งกังหันลมเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นต้น แต่กำลังการผลิตที่ได้ยังไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มกำลังการผลิตในพื้นที่อื่นๆ มากขึ้น ดังนั้น สิ่งสำคัญคือการเลือกใช้เทคโนโลยีกังหันลมให้เหมาะสมสำหรับศักยภาพพลังงานลมและลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทย



turbine, VAWT) แต่เนื่องด้วยเสาที่สูงทำให้ยากในการติดตั้งบนพื้นที่สูงและต้องมีระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบพัด ซึ่งต่างจากกังหันลมแกนตั้งที่ได้รับการพัฒนามากขึ้นในระยะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีของกังหันลมชนิดนี้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ความเร็วเริ่มหมุนต่ำ และบำรุงรักษาง่าย จึงเหมาะกับพื้นที่เขตเมืองที่มีความซับซ้อนของตึกอาคารสูง หรือพื้นที่ห่างไกลไฟฟ้าในชนบท แต่กังหันลมชนิดนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นการศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ตำแหน่งมุมใบพัด จำนวนใบพัด และอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหันลม จึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนากังหันลมของประเทศไทย

ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวข้างต้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่เป็นการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดตำแหน่งมุมใบพัด และจำนวนชั้นของกังหันลมชาโวเนียสที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการทำงานและสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient) โดยทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลม (Wind tunnel) แบบเปิด และปรับเปลี่ยนอัตราเร็วลมตั้งแต่ 2 m/s จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดที่สามารถทดสอบได้ งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบกังหันลมที่มีใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง โดยใช้วิธีวัดแรงบิดแบบกำลังม้าเบรก (Brake horse power) สำหรับหาค่ากำลังขาออกของเพลากังหัน และนำไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดต่อไป ซึ่งผลที่ได้จะช่วยให้สามารถนำไปใช้ในการเลือกรูปแบบของกังหันลมที่ดีที่สุด สำหรับการใช้งานในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส
- 2) เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส
- 3) เพื่อศึกษาอิทธิพลของจำนวนชั้นต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส
- 4) เพื่อพัฒนาสมการเพื่อใช้ในการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบชาโวเนียส

ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ (อัตราเร็วลมไม่เกิน 7 m/s) ณ ห้องปฏิบัติการกลางด้านพลังงานลม วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- 2) ใช้รูปแบบใบพัดแผ่นเรียบตัดโค้งในการทดสอบ
- 3) พิจารณาปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหัน ได้แก่ อัตราเร็วลม จำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้นของกังหัน
- 4) ใช้วิธีวัดแรงบิดที่เพลากังหันแบบ Brake horse power

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงคุณลักษณะการทำงานและประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งที่ออกแบบ ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
- 2) สามารถพัฒนาเป็นกังหันต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือประยุกต์ใช้ทางการเกษตร
- 3) เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการตัดสินใจให้กับหน่วยงานหรือชุมชนที่มีความสนใจในการสร้างกังหันลมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์
- 4) มีพื้นฐานและแนวทางในการพัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยีกังหันลมในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

ลม เป็นแหล่งพลังงานสะอาดชนิดหนึ่งที่หลายประเทศให้ความสนใจและมุ่งพัฒนาให้เกิดประโยชน์มากขึ้น เนื่องจากพลังงานจลน์จากลมสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ โดยอาศัยเทคโนโลยีกังหันลมมาใช้ในการเปลี่ยนรูปของพลังงาน หรือเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ประโยชน์

ลมในประเทศไทย

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุม 2 ชนิด คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนี้ลมยังอาจเกิดขึ้นจากอิทธิพลของภูมิประเทศและ ความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศในพื้นที่นั้นๆ โดยเรียกลมชนิดนี้ว่าลมประจำถิ่น สามารถแบ่งออกเป็น ลมบกและลมทะเล ลมภูเขาและลมหุบเขา นอกจากนี้ในประเทศไทยยังมีลมประจำถิ่นที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ ลมตะเภา และลมว่าว

1. ลมมรสุม (Monsoon)

เป็นการหมุนเวียนส่วนหนึ่งของลมที่พัดตามฤดูกาล คือลมประจำฤดู เป็นลมที่มีทิศทางแน่นอนและสม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะของลมนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นดิน และพื้นน้ำในช่วงฤดูหนาว โดยอุณหภูมิของพื้นดินต่ำกว่าอุณหภูมิของน้ำในมหาสมุทร อากาศเหนือพื้นน้ำจึงมีอุณหภูมิสูงกว่า และลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือทวีปซึ่งเย็นกว่าไหลไปแทนที่ ทำให้เกิดเป็นลมพัดออกจากทวีป และในทางกลับกันเมื่อถึงฤดูร้อนอุณหภูมิของดินภาคพื้นทวีปร้อนกว่าน้ำในมหาสมุทร เป็นเหตุให้เกิดลมพัดในทิศทางตรงข้าม (กรมอุตุนิยมวิทยา [อต.], ม.ป.ป.)

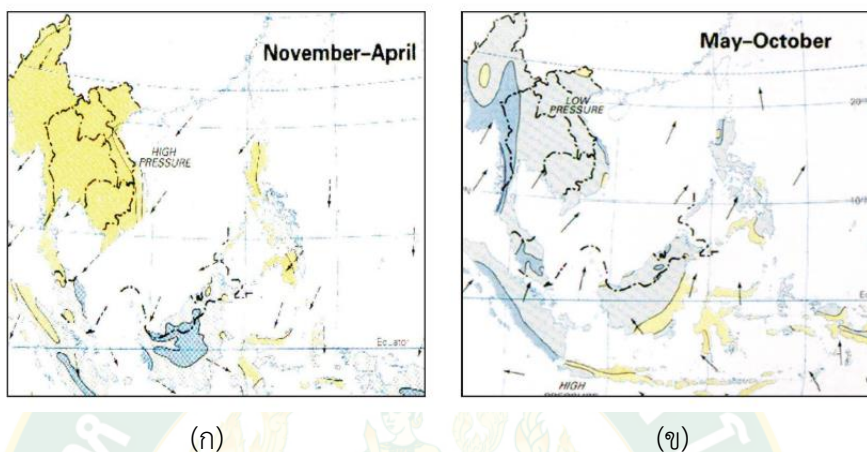
1) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

หรือลมมรสุมฤดูหนาว เกิดขึ้นหลังจากหมดลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดปกคลุมประเทศไทยโดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ดังภาพที่ 4 (ก) มรสุมนี้จะพัดพาเอามวลอากาศเย็นและแห้ง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดบริเวณความกดอากาศสูงจากซีกโลกเหนือ สำหรับภาคใต้จะมีฝนตกชุกโดยเฉพาะฝั่งตะวันออกเนื่องจากลมมรสุมนี้นำความชื้นเข้ามาปกคลุม

2) ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

หรือลมมรสุมฤดูร้อนพัดปกคลุมประเทศไทย ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูง ในซีกโลกใต้บริเวณมหาสมุทร

อินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมาก และฝนชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล และเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่นดังภาพที่ 4 (ข)



ภาพที่ 4 (ก) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (ข) ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

ที่มา : กระทรวงพลังงาน [พน.] (ม.ป.ป.)

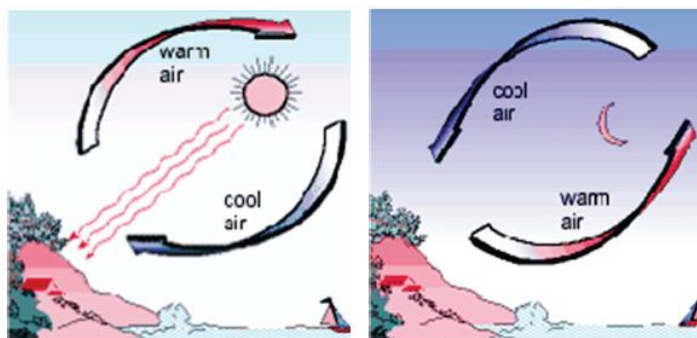
2. ลมประจำถิ่น (Local wind)

เป็นลมที่มีช่วงเวลาของการเกิดน้อยกว่าลมประจำฤดู โดยอาจจะใช้เวลาในการเกิดเป็นช่วงวัน สัปดาห์ หรือเดือน ทั้งนี้ก็มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันไป ตามทิศทาง ภูมิประเทศ ลักษณะ หรือช่วงเวลาที่เกิด เป็นต้น สำหรับลมประจำถิ่นที่สำคัญของประเทศไทย ประกอบด้วย

1) ลมบกและลมทะเล

ลมทะเล (Sea breeze) ในเวลากลางวัน เมื่อพื้นดินได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นดินที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะขยายตัวลอยขึ้นสู่เบื้องบน (ความกดอากาศต่ำ) อากาศเหนือพื้นน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (ความกดอากาศสูง) ก็จะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดลมทะเลพัดเข้าหาชายฝั่ง เรียกว่า ลมทะเล ดังภาพที่ 5 (ก)

ลมบก (Land breeze) ในเวลากลางคืน เมื่อพื้นดินคายความร้อนโดยการแผ่รังสีออกมาและจะคายความร้อนออกได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้พื้นดินมีอุณหภูมิต่ำ (ความกดอากาศสูง) กว่าพื้นน้ำอากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งร้อน (ความกดอากาศต่ำ) กว่าจึงลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือพื้นดินซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ เกิดเป็นลมที่พัดจากฝั่งไปสู่ทะเล จึงเรียกว่า ลมบก ดังภาพที่ 5 (ข)



(ก)

(ข)

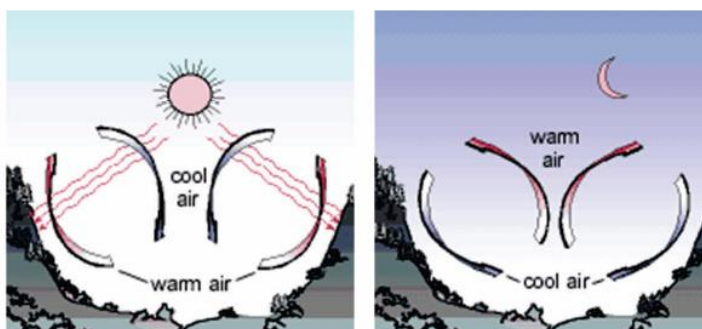
ภาพที่ 5 (ก) ลมทะเล (ข) ลมบก

ที่มา : พน. (ม.ป.ป.)

2) ลมหุบเขาและลมภูเขา

ลมหุบเขา (Valley breeze) ในเวลากลางวันอากาศตามไหล่เขาได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เต็มที่จะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นที่ลาดหุบเขาจะขยายตัวและลอยขึ้นสู่เบื้องสูง (ความกดอากาศต่ำ) ส่วนอากาศที่อยู่หุบเขาเบื้องล่างที่มีอุณหภูมิต่ำ (ความกดอากาศสูง) กว่าไหล่เขาเข้ามาแทนที่ทำให้มีลมเย็นจากหุบเขาเบื้องล่างพัดไปตามลาดเขาขึ้นสู่เบื้องบนเรียกว่าลมหุบเขา ดังภาพที่ 6 (ก)

ลมภูเขา (Mountain breeze) ในเวลากลางคืนอากาศตามไหล่เขาและลาดเขาจะคายความร้อนออกได้อย่างรวดเร็วกว่าหุบเขาจึงมีอุณหภูมิต่ำ (ความกดดันสูง) อากาศตามหุบเขามีอุณหภูมิสูงกว่าจะขยายตัวและลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน (ความกดดันต่ำ) อากาศที่อยู่ตามลาดเขาที่มีอุณหภูมิต่ำและหนักกว่าบริเวณใกล้เคียงจึงไหลเข้ามาแทนที่ทำให้มีลมพัดตามลาดเขาลงสู่หุบเขาเบื้องล่างเรียกว่า ลมภูเขา ดังภาพที่ 6 (ข)



(ก)

(ข)

ภาพที่ 6 (ก) ลมหุบเขา (ข) ลมภูเขา

ที่มา : พน. (ม.ป.ป.)

3) ลมตะเภา

เป็นลมท้องถิ่นในประเทศไทย โดยลมตะเภาเป็นลมที่พัดมาจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ พัดจากอ่าวไทยสู่ภาคกลางตอนล่าง พัดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือกำลังจะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เป็นลมที่นำความชื้นมาสู่ภาคกลางตอนล่าง ในสมัยโบราณลมนี้อาจช่วยพัดเรือสำเภาซึ่งบรรทุกสินค้าเข้ามาค้าขายให้แล่นไปตามแม่น้ำเจ้าพระยา

4) ลมว่าว

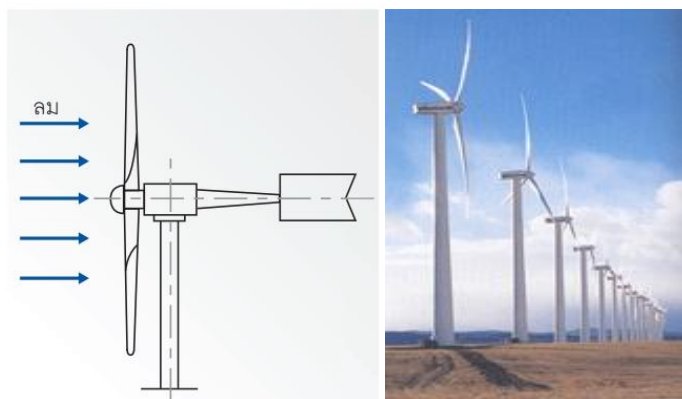
หรืออาจจะเรียกว่าลมข้าวเบา เนื่องจากพัดในช่วงที่ข้าวเบากำลังออกรวง เป็นลมที่พัดจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ เกิดในระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนพฤศจิกายน โดยจะพัดในช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้กำลังจะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

เทคโนโลยีกังหันลม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานจลน์จากลม ที่เรียกว่าพลังงานลมเป็นพลังงานกล ถ้าใช้พลังงานกลผลิตไฟฟ้า เรียกอุปกรณ์ว่า กังหันลม (Wind turbine) หรือโรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind power plant) ถ้าใช้พลังงานกลขับเคลื่อนเครื่องจักรกล เช่น ใช้โม่หรือบดหรือใช้สูบน้ำ เรียกอุปกรณ์ว่า สีลม (Windmill) กังหันลมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามแนวแกนหมุนของใบพัด คือ กังหันลมชนิดแกนแนวนอน และชนิดแกนหมุนแนวตั้ง

1. กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวนอน

กังหันลมที่เพลลาใบพัดกังหันลมหลักและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ด้านบนสุดของเสา และขนานกับพื้นราบในแนวนอนหรือขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม การทำงานแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ทำงานโดยหันหน้าให้ลม ดังภาพที่ 7 และหันหลังให้ลม ดังภาพที่ 8 การหมุนคอของกังหันลมขนาดเล็กจะหันหน้าเข้าหาลมโดยใช้หางเสือ กังหันขนาดใหญ่ใช้เซ็นเซอร์วัดทิศทางลมร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์ (Servomotor) เพื่อขับเคลื่อนคอให้หันหน้าเข้าหาลม กังหันลมส่วนใหญ่มีกล่องเกียร์เพื่อช่วยเพิ่มความเร็วรอบของเพลลาให้หมุนเร็วขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า กังหันลมระดับเมกะวัตต์ที่มีขายในท้องตลาดเป็นแบบกังหันลมแกนหมุนแนวนอนทั้งสิ้น



ภาพที่ 7 กังหันลมแกนนอนลักษณะหันหน้ารับลม

ที่มา : พพ. (2557)



ภาพที่ 8 กังหันลมแกนนอนลักษณะหันหลังรับลม

ที่มา : พพ. (2557)

2. กังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้ง

กังหันลมชนิดนี้ เพลากลมหุนของใบพัดจะตั้งฉากกับพื้นราบ หรือตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของลม ชนิดที่นิยมมากที่สุด คือ กังหันลมแบบดาร์เรียส (Darrieus vertical axis wind turbine) เหมาะสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากหมุนด้วยความเร็วสูง แรงบิดต่ำ และกังหันลมแบบซาโวเนียส (Savonius wind turbine) ที่ทำงานโดยอาศัยแรงลาก (มีประสิทธิภาพต่ำกว่ากังหันที่ทำงานโดยอาศัยแรงยก) ดังภาพที่ 9 เหมาะสำหรับติดตั้งในชุมชนหรืออาคารสูง ขณะทำงานจะหมุนด้วยความเร็วต่ำแต่แรงบิดสูง จึงนิยมนำไปใช้ในการสูบน้ำ การม่แป้งมากกว่าการผลิตกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 9 กังหันลมแกนตั้ง

ที่มา : พพ. (2557)

กังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอนมีข้อได้เปรียบ-เสียเปรียบที่แตกต่างกันซึ่งจากที่เลือกนำมาติดตั้งเพื่อผลิตพลังงานก็ต้องพิจารณาตามคุณสมบัติต่างๆ ทั้งของสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ที่จะติดตั้งและคุณสมบัติของกังหัน โดยข้อเปรียบเทียบระหว่างข้อดีข้อเสียของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบข้อดีข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้งและกังหันลมแกนนอน (ธเนศ, 2559)

กังหันลมแกนตั้ง (VAWTs)	
ข้อดี	ข้อด้อย
1. ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้บนพื้นดิน ซึ่งง่ายต่อการบำรุงรักษาและมีความเหมาะสมในพื้นที่บางพื้นที่มากกว่ากังหันลมแกนนอน เช่น พื้นที่ยอดเขาหรือสันเขา เป็นต้น 2. สามารถทำงานได้ในทุกทิศทางของลมไม่ต้องมีระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบกังหัน 3. ใบของกังหัน สร้างได้ง่ายกว่ากังหันลมแกนตั้ง โดยสามารถเป็นใบแบบสมมาตรตลอดทั้งใบได้ 4. มีเสียงรบกวนน้อย ส่งผลกระทบท่อระบบ Radar น้อย	1. มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำกว่า กังหันลมแกนนอน 2. น้ำหนักทั้งหมดของกังหันจะกระทำที่ตลับลูกปืนตลอดเวลา ดังนั้นต้องออกแบบตลับลูกปืนอย่างเหมาะสม 3. เสียความได้เปรียบด้านอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 4. ต้องใช้วัสดุทำใบและโครงสร้างประกอบใบที่ใหญ่กว่ากังหันลมแกนนอน หากต้องการพื้นที่

กังหันลมแกนนอน (HAWTs)	
ข้อดี	ข้อด้อย
1. มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูง กว่ากังหันลมแกนตั้ง 2. สามารถติดตั้งเสาสูงเพื่อรับลมชั้นบนที่มีอัตราเร็วสูงกว่าได้ 3. มุมของใบพัดสามารถปรับได้จึงมีช่วงทำงานที่คงที่	1. เสาที่สูงทำให้ยากในการติดตั้ง และการขนส่งในพื้นที่ภูเขา และฐานรากต้องมีขนาดใหญ่ 2. ส่งผลกระทบต่อระบบเรดาร์ 3. ต้องการระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบกังหัน 4. อาจเกิดการล่าของใบเนื่องจากการรับลมที่มีอัตราที่ต่างกันระหว่างด้านบนและด้านล่าง

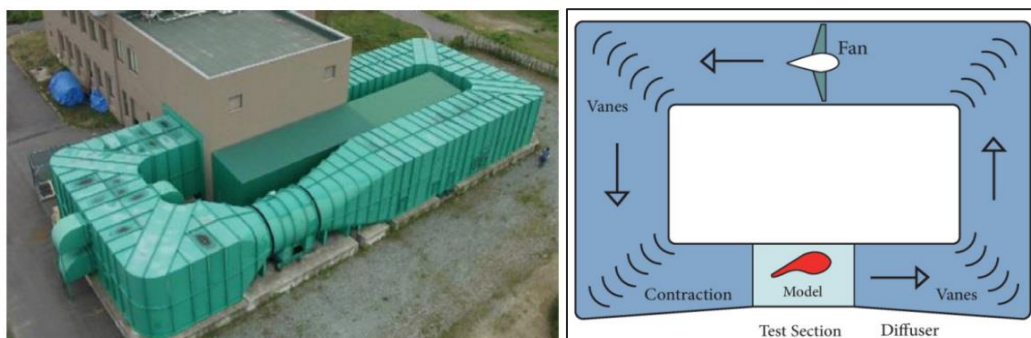
อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้การไหลของอากาศผ่านวัตถุแข็ง เช่น เครื่องบิน สิ่งก่อสร้างตึก อาคาร ใบพัด กังหันลม เป็นต้น โดยอากาศจะถูกเป่าหรือดูดผ่านท่อที่มีวัตถุทดสอบติดตั้งอยู่ภายใน เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วลมที่มีต่อโครงสร้างหรือวัตถุที่ทำการศึกษารวมทั้งทิศทางการปะทะ แรงยก แรงต้าน แรงบิด ซึ่งจะชั่งสำหรับติดตั้งและทดสอบ

1. รูปแบบของอุโมงค์ลม

กฤษฎา และคณะ (2556) อุโมงค์ลมแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ อุโมงค์ลมแบบปิด และอุโมงค์ลมแบบเปิด อุโมงค์ลมแบบปิด

อุโมงค์ลมแบบปิด เป็นอุโมงค์ลมที่นำเอาลมพัดผ่านแบบจำลองในส่วนทดสอบไป แล้ววนกลับมาบริเวณทางเข้าโดยใช้พัดลมตัวเดียว ดังภาพที่ 10 ทำให้ไม่ต้องรับอากาศจากภายนอกเข้ามา กระแสอากาศที่ได้จึงมีความราบเรียบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดค่าต่างๆ สูงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิดเนื่องจากสามารถควบคุมการไหลของลมที่ไหลกลับมาใหม่ได้ และไม่ได้รับผลกระทบจากอากาศบริเวณรอบๆ อุโมงค์ลมชนิดนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดสอบได้ แต่การสร้างต้องใช้งบประมาณสูง และต้องมีพื้นที่กว้างๆในการรับรองโครงสร้าง

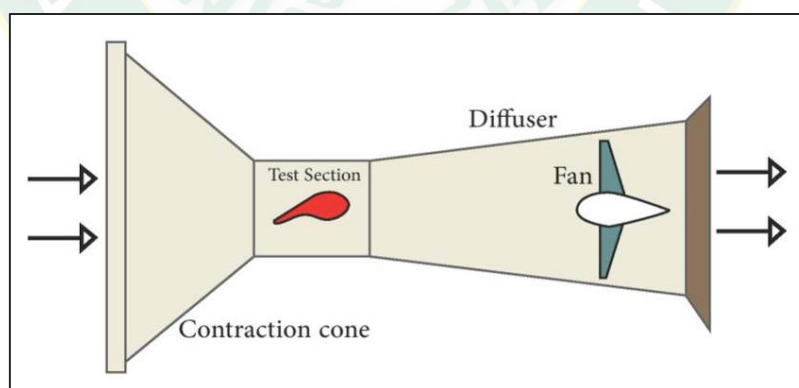


ภาพที่ 10 อุโมงค์ลมแบบปิด

ที่มา : Li et al. (2015); Dsouza et al. (2016)

1) อุโมงค์ลมแบบเปิด

อุโมงค์ลมแบบเปิด คือ อุโมงค์ลมที่มีบริเวณส่วนทางเข้าและทางออกของลมเปิดสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ดังภาพที่ 11 ซึ่งอาจอยู่ภายในหรือภายนอกตัวอาคารที่ใช้ก่อสร้าง มีข้อดีคือ ประหยัดงบประมาณและพื้นที่ในการก่อสร้าง แต่ต้องมีพื้นที่ยาวมากและบริเวณรอบๆ จะต้องไม่มีลมกระแทมายังทางเข้าและทางออกขณะทดสอบได้ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณรอบๆ ก็จะส่งผลถึงการทดสอบทันทีเนื่องจากเป็นระบบเปิด การสร้างอุโมงค์ลมแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ อุโมงค์ลมชนิดเป่า พัดลมจะอยู่บริเวณต้นทางก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ และอุโมงค์ลมชนิดดูด พัดลมจะอยู่บริเวณด้านหลังส่วนทดสอบ ซึ่งมีข้อดีคือ กระแสลมที่เข้ามาหาส่วนทดสอบจะปั่นป่วนน้อยกว่าการนำพัดลมไว้ด้านหน้า



ภาพที่ 11 อุโมงค์ลมแบบเปิด

ที่มา : Dsouza et al. (2016)

2. ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

จากการศึกษาอุโมงค์ลมนั้น พบว่ามีรูปแบบที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ประโยชน์ แต่จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ แบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

1) ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction)

เป็นส่วนแรกที่อากาศแพร่เข้าสู่อุโมงค์ลมชนิดดูด โดยทั่วไปจะนิยมทำให้ปากทางเข้าเป็นแบบรูวงกลมหรือสี่เหลี่ยมและติดครีบริ้งหรือริงเพื่อจัดระเบียบของกระแสอากาศก่อนเข้าสู่ภายในอุโมงค์ลม แล้วลดพื้นที่หน้าตัดลงอย่างสม่ำเสมอจนถึงส่วนปฏิบัติงาน ทำหน้าที่คล้ายหัวฉีดเพื่อให้ความเร็วของกระแสอากาศเพิ่มขึ้น และมีการไหลแบบความราบเรียบมากขึ้น

2) ส่วนปฏิบัติงาน (Test Section)

เป็นส่วนที่ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมสำหรับส่วนนี้ คือ รูปทรง ขนาดของวัตถุที่จะนำมาทดสอบ และขนาดของส่วนปฏิบัติงานว่าสามารถเพิ่มอัตราเร็วลมได้สูงสุดเท่าไร หากมีขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้ชุดตัวขับลมมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

3) ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

ส่วนอากาศแพร่ออกนี้เป็นส่วนที่รับของไหลต่อจากห้องทดสอบจะมีอัตราเร็วลมลดลง โดยทั่วไปจะนิยมสร้างให้มีพื้นที่หน้าตัดของส่วนนี้เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ แต่อุโมงค์ลมบางตัวได้ออกแบบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมตรงตั้งแต่ส่วนอากาศแพร่เข้าจนถึงส่วนอากาศแพร่ออก เพื่อง่ายในการออกแบบและสร้าง

4) ส่วนกำลัง (Power section)

ส่วนกำลังจะทำหน้าที่สร้างแรงลมให้ไหลเข้าสู่อุโมงค์ลม เป็นส่วนที่ติดตั้งอยู่ท้ายสุดของอุโมงค์ลม ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส และอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เครื่องมือวัดอัตราเร็วลม

เครื่องมือวัดอัตราเร็วลม (Anemometer) เป็นเครื่องมือวัดทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้สำหรับวัดอัตราเร็วลม และยังสามารถวัดค่าอื่นๆ ได้ด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้นและความดัน โดยแบ่งออกเป็น 5 ประเภท (เครื่องมือวัดอัตราเร็วลม, ออนไลน์) ดังนี้

1. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย (Cup anemometer)

ประกอบด้วยแกนในแนวตั้งและมีแขนยื่นออกไปสามแขนเพื่อยึดถ้วยดักลมอาศัยแรงลากทำให้เกิดการหมุน ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งทำให้มีความแม่นยำน้อยกว่าเครื่องมือวัดอัตราเร็วลม

ประเภทอื่นๆ ใช้การคำนวณเป็นความเร็วของการหมุน (รอบต่อนาที) แล้วจึงแปลงให้เป็นอัตราเร็วลม และจัดเก็บข้อมูลที่ได้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยปกติติดตั้งเครื่องวัดอัตราเร็วลมร่วมกับเครื่องวัดทิศทางลม



ภาพที่ 12 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วย

ที่มา : พพ. (2557)

2. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบใบพัด (Windmill anemometer)

เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมชนิดนี้จะต้องอยู่ในตำแหน่งขนานกับทิศทางของลม เมื่อลมหมุนใบพัด รอบการหมุนของใบพัดจะถูกคำนวณเป็นอัตราเร็วลม มีลักษณะดังรูปที่ 5.10 ซึ่งไม่ค่อยเป็นที่นิยม



ภาพที่ 13 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบใบพัด

ที่มา : พพ. (2557)

3. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot wire anemometer)

ใช้ลวดเส้นเล็กๆ ซึ่งถูกทำให้มีอุณหภูมิร้อนกว่าอากาศโดยรอบ เมื่อลมพัดให้เส้นลวดเย็นลง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในตัวเครื่องจะคำนวณอัตราเร็วลมโดยอยู่บนพื้นฐานของความต้านทานไฟฟ้าของเส้นลวด เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมประเภทนี้ค่อนข้างจะเปราะบางแต่ให้ความแม่นยำสูง ต้องวัดในลมที่สะอาดและอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน

ที่มา : พพ. (2557)

4. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลตราโซนิก (Sonic anemometer)

ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการวัดอัตราเร็วลม เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมประเภทนี้มีพื้นฐานมาจากระยะเวลาของการเดินทางของโซนิกพัลส์ระหว่างชุดของทรานสดิวเซอร์ การวัดจากชุดของทรานสดิวเซอร์สามารถรวมกันเพื่อให้ได้ผลการวัดอัตราเร็วลมใน 1, 2 หรือ 3 มิติ ซึ่งให้ค่าความละเอียดสูงมาก การไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหวได้ทำให้เหมาะแก่การติดตั้งและใช้งานเป็นระยะเวลานาน ดังแสดงในภาพที่ 15 เช่นในสถานีตรวจวัดสภาพอากาศ และหุ้่นวัดสภาพอากาศซึ่งความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอื่นได้รับผลกระทบจากความเค็มหรือฝุ่นละออง



ภาพที่ 15 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบอัลตราโซนิก

ที่มา : พพ. (2557)

5. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบเลเซอร์ (Laser doppler anemometer)

ทำงานโดยการตรวจจับการเลื่อนเฟสหรือการสะท้อนแสงจากโมเลกุลของอากาศ โดยจะมีการวัดเทียบกับแสงเลเซอร์เดิมเพื่อคำนวณเป็นค่าอัตราเร็วลม เครื่องวัดชนิดนี้นิยมสำหรับการใช้งานบนเรือ เครื่องบิน อุตุนิยมวิทยา สถานีอากาศและกังหันลมในทางวิทยาศาสตร์ ดังภาพ



ภาพที่ 16 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบเลเซอร์

ที่มา : พพ. (2557)

ทฤษฎีการคำนวณพลังงานลม

สำหรับทฤษฎีการคำนวณเกี่ยวกับพลังงานลมนั้น จะแบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 ข้อดังต่อไปนี้

1. ทฤษฎีโมเมนตัมในการไหล

อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้น (Linear momentum) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่กระทำกับวัตถุนั้นและการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นนั้น จะต้องอยู่ในทิศทางที่แรงกระทำ ซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตันสามารถเขียนสมการได้ดังนี้ (สมจิต, 2550)

$$F = ma = m \frac{dV}{dt}$$

หรือ

$$F dt = m dV$$

สมการที่ 1

ในกรณีของไหลเป็นแบบคงที่และปริมาตรเป็นแบบคงที่สามารถอินทิเกรตสมการที่ 1 ในช่วงเวลาหนึ่งได้เป็นสมการที่ 2

$$F = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

หรือ

$$F = \rho A V (V_2 - V_1)$$

$$\text{เมื่อ } \dot{m} = \rho A V$$

สมการที่ 2

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล (kg/s)

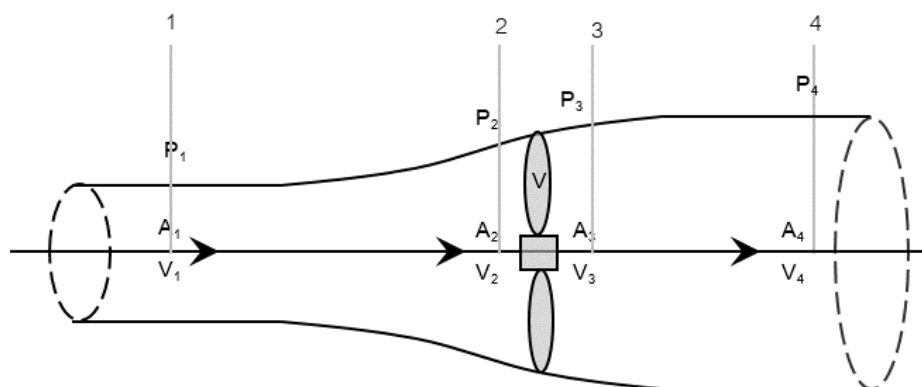
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

ทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมสำหรับกังหันลม พิจารณาของไหลที่ผ่านกังหันลม โดยพิจารณาที่ปริมาตรคงที่ ภายใต้สมมุติฐานเบื้องต้นคือ

- 1) มีอัตราการไหลของอากาศคงที่อย่างต่อเนื่องที่ไหลผ่านกังหัน
- 2) ความดันในลำอากาศเหมือนกันทั้งข้างหน้าและข้างหลังของกังหัน
- 3) ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทาน
- 4) ไม่มีการหมุนวนของอากาศด้านหลังกังหัน
- 5) อากาศเป็นของไหลที่ไม่ยุบตัว (Incompressible flow)



ภาพที่ 17 การไหลของอากาศผ่านกังหัน

ที่มา : ธเนศ (2559)

สมการการไหลอย่างต่อเนื่อง (Equation of continuity) เมื่อมีการไหลภายในท่อ ดังภาพที่ 17 จากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 4 มวลของของไหลที่จุดที่ 1 และจุดที่ 4 จะมีค่าคงที่ ตามหลักทรงมวล (Conservation of mass) จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 = \rho A_3 V_3 \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ V_x และ A_x คือ อัตราเร็วลมและพื้นที่หน้าตัดของการไหล ณ จุดต่างๆ แรงที่กระทำที่ระนาบการหมุนของกังหันสามารถพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมจากสมการที่ 2 คือ

$$F = \rho A V (V_1 - V_4) \quad \text{สมการที่ 4}$$

พิจารณาความดันที่จุด 2 และ 3 จะได้ ผลต่างของแรงที่กระทำอันเนื่องจากของไหลที่ระนาบ 2 และ 3

$$F = A(P_2 - P_3) \quad \text{สมการที่ 5}$$

เขียนสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ใหม่ จะได้

$$P_2 - P_3 = \rho(V_1 - V_4) \quad \text{สมการที่ 6}$$

จากทฤษฎีเบอร์นูลลี (Bernoulli's equation) ในกรณีของไหลที่ไม่ยุบตัวและไม่มีการเปลี่ยนระดับความสูงระหว่างการเคลื่อนที่ของของไหล จะได้

$$\text{ก่อนเข้าสู่กังหัน } P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad \text{สมการที่ 7}$$

$$\text{ออกจากกังหัน } P_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = P_4 + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad \text{สมการที่ 8}$$

จากสมการที่ 7 และ 8 เขียนใหม่ โดยสมมติ ว่า $P_1 = P_4$ เท่ากับความดันบรรยากาศ จะได้

$$P_2 - P_3 = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad \text{สมการที่ 9}$$

สรุปความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จากสมการที่ 6 และ 9 ได้

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_4) \quad \text{สมการที่ 10}$$

จากสมการที่ 10 จะเห็นว่า ความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จะเท่ากับ ค่าเฉลี่ยของอากาศก่อนและหลังระนาบการหมุนของกังหัน ดังนั้น กำลังเนื่องจากลมที่มีความเร็ว V กระทำต่อกังหันสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 11 คือ

$$P = FV \quad \text{สมการที่ 11}$$

แทนค่า F และ V จากสมการที่ 4 และ 10 ลงในสมการที่ 11 จะได้ ก็จะได้สมการแสดงถึง กำลังที่กังหันลมได้รับจากกำลังของลม

$$P = \frac{1}{2}\rho VA(V_1^2 - V_4^2) \quad \text{สมการที่ 12}$$

2. พลังงานลม (Wind power, P_w)

พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศ พลังงานลมทั้งหมดที่ไหลผ่านพื้นที่ สามารถคำนวณได้จาก

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad \text{สมการที่ 13}$$

สมการที่ 12 แสดงถึงกำลังที่กังหันลมได้รับจากลมและสมการที่ 13 แสดงถึงกำลังทั้งหมดของลม จะเห็นว่า กำลังที่สามารถนำมาใช้ได้โดยกังหันลม มีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์ทั้งหมดที่มีในลม จากขีดจำกัด เบตซ์ (Betz limit) ในทางทฤษฎี อัตราเร็วลมที่ผ่านกังหันลม (V_4) จะมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง V_1 แต่ค่า V_4 ที่ทำให้ได้กำลังจากกังหันลมมากที่สุดคือ เมื่อ

$$V_4 = \frac{1}{3} V_1 \quad \text{สมการที่ 14}$$

นั่นคือทำการแทนค่า V_4 จากสมการที่ 14 และ V จากสมการที่ 10 ลงในค่ากำลังของกังหันในสมการที่ 12 จะได้กำลังสูงสุดที่กังหันสามารถทำได้ คือ

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V_1 + \frac{1}{3} V_1}{2} \right) (V_1^2 - \frac{1}{3} V_1^2) \quad \text{สมการที่ 15}$$

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \quad \text{สมการที่ 16}$$

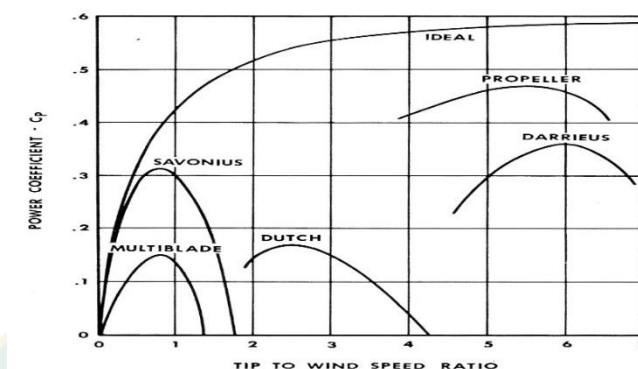
นั่นคือ สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient, C_p) หรือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่กังหันสามารถผลิตได้ ดังสมการที่ 12 กับกำลังทั้งหมดที่ ได้จากลม สมการที่ 13 จะเท่ากับ

$$C_p = \frac{P}{P_w} = \frac{1/2 \rho A (V_1^2 - V_4^2)}{1/2 \rho A V_1^3} \quad \text{สมการที่ 17}$$

จาก ขีดจำกัดของ เบตซ์ (Betz limit) สามารถทำการพิจารณา สัมประสิทธิ์กำลังใหม่ จะได้

$$C_p = \frac{P_{\max}}{P_w} = \frac{8/27 \rho A V_1^3}{1/2 \rho A V_1^3} = \frac{16}{27} \quad \text{สมการที่ 18}$$

ดังนั้น ความสามารถในการดึงกำลังจากลมมาใช้โดยกังหันลมจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สูงสุด เท่ากับร้อยละ 59.26 ของกำลังทั้งหมดของลม และค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่า อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าเปลี่ยนแปลงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ

ที่มา : ธเนศ (2559)

3. การประยุกต์ทฤษฎีใช้สำหรับกังหันลมแกนตั้ง

จากทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวมา เป็นการพิจารณาการทำงานสำหรับกังหันลมแกนนอน แต่สามารถประยุกต์ใช้กับกังหันลมแกนตั้งทั้งรูปแบบกังหันลมแบบแรงต้าน (Drag machines) และกังหันลมแบบแรงยก (Lift machines) ได้ โดยเฉพาะกังหันลมแบบซาโวนีอุส ซึ่งจะอาศัยแรงต้าน (Drag force, F_D) ในการทำงานแต่ก็เกิดแรงยก (Lift force, F_L) ระหว่างการทำงานด้วยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบแผนอากาศ โดยนิยมใช้ตัวแปรที่สำคัญดังนี้ (เกียรติขจร, 2552; ธเนศ, 2559)

1) สัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_L , C_D)

แรงที่เกิดขึ้นที่แผนอากาศ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วรอบๆ แผนอากาศ ที่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดแรง ซึ่งเป็นแรงรวมของแรงยกและแรงต้าน ดังสมการต่อไปนี้

$$C_L = \frac{F_L}{1/2 \rho A V^2} \quad \text{สมการที่ 19}$$

$$C_D = \frac{F_D}{1/2 \rho A V^2} \quad \text{สมการที่ 20}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดรับลม (ผลคูณระหว่างรัศมีกับความสูงของกังหันลม)

2) สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p)

อัตราส่วนระหว่างกำลังงานของกังหันลม (P_o) ต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่ไหลผ่านช่วงหน้าตัดการทำงานของกังหันลม ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพทางเทคนิคของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_p = \frac{P_o}{P_w} = \frac{T\omega}{1/2\rho AV^3} \quad \text{สมการที่ 21}$$

เมื่อ T คือ แรงบิดเพลากังหัน (Nm)

ω คือ ความเร็วในการหมุนของกังหัน (RPS)

3) สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_T)

สัมประสิทธิ์แรงบิด เป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลม สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C_T = \frac{C_p}{(U/V)} \quad \text{สมการที่ 22}$$

4) อัตราส่วนความเร็วปลายใบ (Tip speed ratio, U/V)

อัตราส่วนความเร็วปลายใบ คือ อัตราส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายใบที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองกับอัตราเร็วลมอิสระ ดังแสดงในสมการที่ 23 ค่านี้เป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์กังหันลม เนื่องจากจะมีผลทำให้มุมปะทะและค่าสัมประสิทธิ์กำลังเปลี่ยนแปลงไป

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อ R คือ รัศมีของกังหันลม

5) อัตราส่วนโซลิตีตี้ (Solidity ratio)

อัตราส่วนโซลิตีตี้ เป็นดัชนีที่บอกความทึบของกังหัน เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของพื้นที่ใบกังหันทั้งหมดต่อพื้นที่ของกังหันในแนวตั้งฉากกับกระแสลม (A) โดยโรเตอร์ของกังหันมีรัศมี R ประกอบด้วยใบกังหันลมจำนวน N_b ใบ แต่ละใบมีความกว้าง c และ ยาว L สามารถหาได้จากสมการที่ 24 ซึ่งค่านี้เป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมเปลี่ยนไป

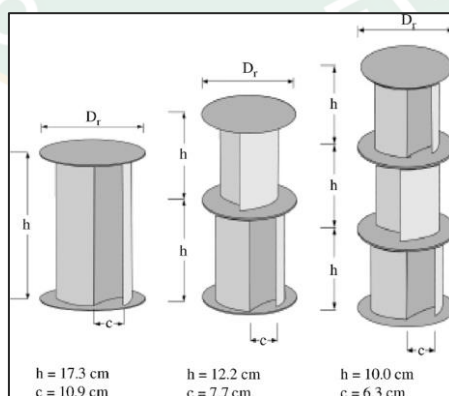
$$\sigma = \frac{N_b c L}{A} = \frac{N_b c L}{2RL} = \frac{N_b c}{2R} = \frac{N_b c}{D} \quad \text{สมการที่ 24}$$

การตรวจเอกสาร

กังหันลมแกนตั้งเป็นกังหันลมประเภทหนึ่งที่มีความสนใจ ทำให้มีผลการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษางานวิจัยส่วนใหญ่พบว่ากังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวนีเยส และดาร์เรียมส์ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยการวิจัยจะมุ่งเน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งในเรื่องของการศึกษา 1) รูปแบบใบพัด 2) มุมและจำนวนใบพัด และ 3) การออกแบบกังหันลมในเชิงประยุกต์ดัดแปลงการเพิ่มจำนวนชั้นของกังหันลม การติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางเพิ่มอัตราเร็วลมรอบกังหัน และการติดตั้งอุปกรณ์ครอบเสริม เป็นอาทิ การทดสอบคุณลักษณะต่างๆส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีทดสอบในอุโมงค์ลมทั้งแบบปิด และแบบเปิด

เกียร์ติขจร (2552) ได้ทำการออกแบบกังหันลมแกนตั้งประสิทธิภาพสูง วิเคราะห์กังหันลมแกนตั้งแบบใบกังหันตรงชนิด 3 ใบ โดยเปรียบเทียบแผนอากาศ 3 แบบ คือ NACA 0012, NACA 0015 และ NACA 0018 ผลการวิจัยพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของแผนอากาศแบบ NACA 0012 มีค่าสูงกว่าแผนอากาศแบบ NACA 0015 และ NACA 0018 เล็กน้อย ที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบประมาณ 4 ดังนั้นแผนอากาศแบบ NACA 0012 จึงเหมาะในการนำมาใช้สร้างกังหันลมแกนตั้งประสิทธิภาพสูง

Saha et al. (2008) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกังหันลมซาโวนีเยสโดยทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดชนิดเป่าอากาศ เพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมซาโวนีเยสจำนวน 1-3 ชั้น ดังภาพที่ 19 ในการทดสอบใช้ใบพัดแบบครึ่งวงกลมและใบพัดแบบโค้งปิด 12.5 องศา ปรับจำนวนใบพัด 2-3 ใบ อัตราเร็วลม 6-10 m/s ผลการทดสอบพบว่า กังหันลมจำนวน 2 ชั้น ใบพัดแบบโค้งปิดจำนวน 2 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 0.31 ซึ่งมีค่าสูงกว่าใบพัดแบบครึ่งวงกลมเพียงเล็กน้อย (C_p ประมาณ 0.29)



ภาพที่ 19 รูปแบบของกังหันลมซาโวนีเยสจำนวน 1-3 ชั้น

ที่มา : Saha et al. (2008)

Loganathan et al. (2014a) ได้ทำการทดสอบรูปทรงของกังหันลมชาโวเนียส 16 ใบพัด 3 รูปแบบ คือ แบบตรง แบบพีระมิด และแบบพีระมิดหัวกลับ ดังภาพที่ 20 โดยกำหนดมุมใบพัด 10 องศา จากมุมอ้างอิง (เส้นช่ยาวทำมุม 90 องศา กับทิศทางลม) ดังภาพที่ 21 ผลการทดสอบพบว่า กำลังขาออกสูงสุดของกังหันลมแบบพีระมิดหัวกลับมีค่าสูงกว่าแบบตรง 27.1% และสูงกว่าแบบพีระมิด 48.9% ที่อัตราเร็วลมประมาณ 11 m/s



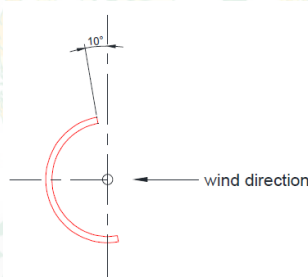
(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 20 (ก) กังหันลมแบบตรง (ข) แบบพีระมิด และ (ค) แบบพีระมิดหัวกลับ

ที่มา : Loganathan et al. (2014a)



ภาพที่ 21 รูปแบบการปรับมุมใบพัด

ที่มา : Loganathan et al. (2014a)

Li et al. (2015) ได้ศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดแบบตรงสำหรับกังหันลมแกนตั้งดาร์ริเยส ทดสอบใบพัด NACA 0021 จำนวนใบพัด 2, 3, 4 และ 5 ใบ ปรับมุมพิทช์ 4-14 องศา ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมจำนวน 2 ใบพัด มุมพิทช์ 6 องศา มีค่าสูงกว่าจำนวน 3 และ 4 ใบพัด มุมพิทช์ 8 องศา และจำนวนใบพัด 5 ใบ มุมพิทช์ 12 องศา ตามลำดับ

Rezaeiha et al. (2017) ศึกษาผลกระทบของมุมพิทช์ต่อค่าประสิทธิภาพกำลังและอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมแกนตั้ง โดยทดสอบกับกังหันลมใบพัด รุ่น NACA 0015 ปรับมุมพิทช์ระหว่าง -7 ถึง 3 องศา ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการวิเคราะห์ ผลการทดสอบพบว่า มุมพิทช์ -2 องศา มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด และเพิ่มขึ้นประมาณ 6.6% เมื่อเทียบกับมุมพิทช์ 0 องศา

Castelli et al. (2012) ได้ศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดแบบตรงสำหรับกังหันลมแกนตั้งดาร์เรียมส์ ทำการทดสอบโดยใช้ใบพัดรุ่น NACA 0025 จำนวน 3-5 ใบ และวิเคราะห์ค่าโดยใช้โปรแกรม CFD ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของจำนวนใบพัด 3 ใบ มีค่าประมาณ 0.40 ซึ่งสูงกว่า 4 ใบพัด 5% และ 5 ใบพัด 15% ตามลำดับ

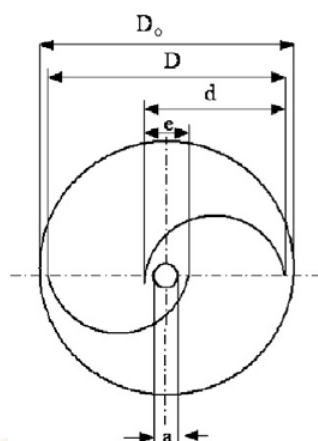
Wenehenubuna et al. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวเนียส ที่เกี่ยวกับจำนวนใบพัด ทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด ดังภาพที่ 22 โดยใช้ใบพัดแบบโค้งครึ่งวงกลม จำนวนใบ 2-4 ใบ ผลการทดสอบพบว่า จำนวนใบพัด 4 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำประมาณ 0.35 แต่กังหันลม 3 ใบพัด มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงกว่า



ภาพที่ 22 การติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบกับอุโมงค์ลม

ที่มา : Wenehenubuna et al. (2015)

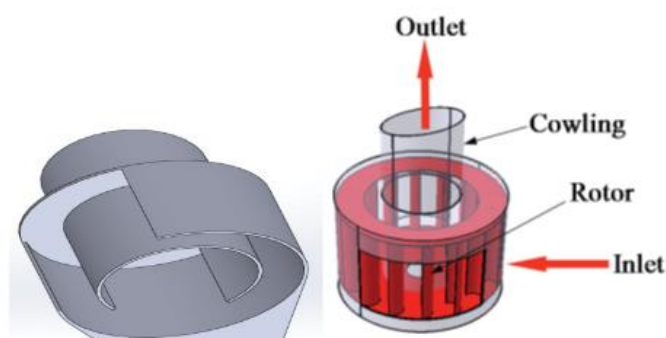
Mahmoud et al. (2012) ได้ทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของกังหันลมซาโวเนียส ในวิจัยนี้ได้ทดลองศึกษารูปทรงเรขาคณิตของกังหันที่มีกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ จำนวนชั้นของกังหัน 1-2 ชั้น โดยปรับอัตราส่วนระหว่างความสูงของใบพัดกับเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเป็น 0.5, 1 และ 5 ปรับอัตราส่วนซ้อนทับของใบ (เป็นอัตราส่วนระหว่าง $(e-a)/d$) ดังภาพที่ 23 และจำนวนใบพัด 2-4 ใบ ทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดและใช้วิธีวัดแรงบิดเพลาแบบ Break Horse Power ผลการทดสอบพบว่า 1) กังหันลมที่ไม่มีอัตราส่วนซ้อนทับทำงานได้ดีกว่าที่มีการซ้อนทับกัน 2) สัมประสิทธิ์กำลังของกังหัน 2 ใบพัด มีค่ามากกว่า 3 และ 4 ใบ 3) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเพิ่มขึ้นตามเมื่ออัตราส่วนความสูงของกังหันมากขึ้น



ภาพที่ 23 การปรับอัตราส่วนซ้อนทับของใบพัด

ที่มา : Mahmoud et al. (2012)

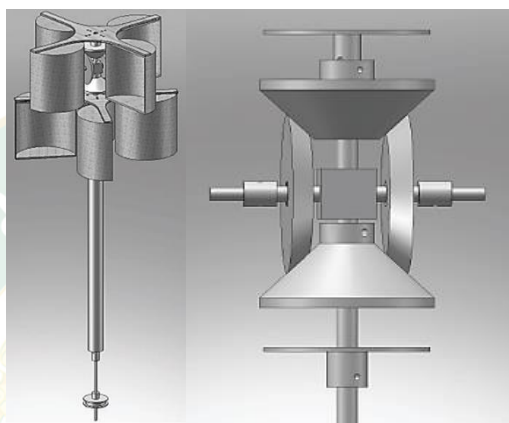
Loganathan et al. (2015) ได้ทำการศึกษากังหันลมไฮโดลินิกแกนตั้งสำหรับผลิตไฟฟ้าภายในครัวเรือน ด้วยใบพัดแบบโค้งครึ่งวงกลม จำนวนใบพัด 8 และ 16 ใบ ออกแบบอุปกรณ์ครอบเสริมโดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการเกิดพายุไซโคลน ดังภาพที่ 24 แล้วแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 กรณี คือ ปรับจำนวนใบพัด 2 ค่า ที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ครอบเสริม เพื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบและกำลังขาออกสูงสุดของกังหัน ผลการทดสอบพบว่า 1) กังหันลม 8 ใบพัด ที่ติดตั้งอุปกรณ์ครอบเสริมมีความเร็วรอบสูงขึ้นประมาณ 40% เมื่อเทียบกับ 8 ใบพัดที่ไม่มีอุปกรณ์ครอบเสริม และสำหรับกังหันลม 16 ใบพัด ที่ติดตั้งอุปกรณ์ครอบเสริมมีความเร็วรอบสูงขึ้นประมาณ 26% เมื่อเทียบกับจำนวนใบพัด 16 ใบที่ไม่มีอุปกรณ์ครอบเสริม 2) จากการวิเคราะห์กำลังขาออกในช่วงอัตราเร็วลมหนึ่ง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าที่โรเตอร์ 16 ใบพัดไม่มีตัวครอบเสริมสามารถผลิตพลังงานออกมาได้มากกว่า 3 กรณีที่เหลือได้ถึงอัตราเร็วลมประมาณ 12.5 m/s ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดเจนว่าอุปกรณ์ครอบเสริมสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มกำลังขาออกของโรเตอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นำมาใช้ในการลดจำนวนใบพัด



ภาพที่ 24 รูปแบบอุปกรณ์ครอบเสริมของกังหันลมไฮโดลินิก

ที่มา : Loganathan et al. (2015)

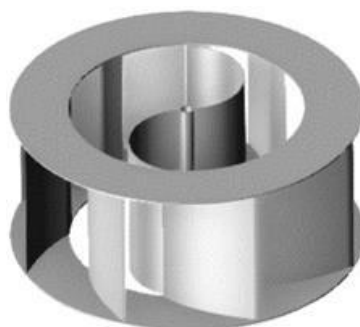
Chaichana et al. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกัน ดังภาพที่ 25 ทดสอบโดยใช้กังหันลมชาโวเนียสใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง 4 ใบ จำนวน 2 ชั้น ช่วงอัตราเร็วลม 2-4.5 m/s และทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบปิด ผลการทดสอบพบว่า ความเร็วเริ่มหมุนของกังหันลมมีค่าเท่ากับ 1.74 m/s ซึ่งสูงกว่ากังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาเดียวเฉลี่ยประมาณ 0.46 m/s และค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยประมาณ 14.89% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 30.8% เมื่อเทียบกับกังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาเดียว



ภาพที่ 25 กังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกัน

ที่มา : Chaichana et al. (2015)

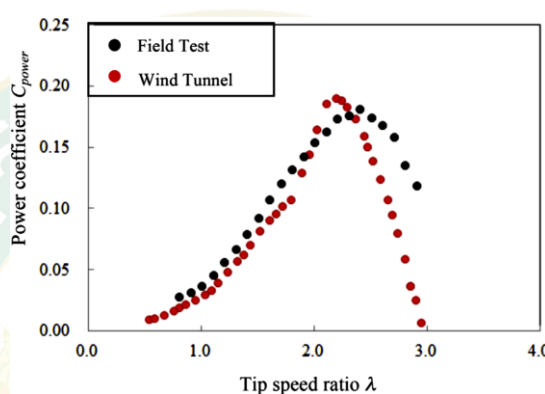
Korprasertsak et al. (2015) ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของอุปกรณ์บังคับทิศทางและเพิ่มอัตราเร็วลมในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันลม โดยใช้โปรแกรม CFD ทดสอบกับกังหันลมชาโวเนียส 2 ใบพัด และติดตั้งอุปกรณ์บังคับทิศทางและเพิ่มอัตราเร็วลมรอบกังหัน ดังภาพที่ 26 ผลการทดสอบพบว่า กรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว มีความเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้น 50 % ของความเร็วเชิงมุมในกรณีที่ไม่มีติดตั้ง และกำลังขาออกสูงสุดของกังหันมีค่าประมาณ 1.4 W ที่อัตราเร็วลม 8 m/s และความเร็วเชิงมุมประมาณ 13 rad/s



ภาพที่ 26 การประกอบกังหันลมแกนแนวตั้งและอุปกรณ์บังคับทิศทางและเพิ่มอัตราเร็วลม

ที่มา : Korprasertsak et al. (2015)

Li et al. (2016) ได้ศึกษาประสิทธิภาพกำลังของกังหันลมแกนตั้งใบพัดตรง ทดสอบภาคสนามและอุโมงค์ลม โดยใช้กังหันลม 2 ใบพัด NACA0021 มุมพิทช์ 6 องศา และใช้เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมแบบเลเซอร์สำหรับการทดสอบในอุโมงค์ลม และใช้เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมแบบถ้วยในการทดสอบภาคสนาม จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังเพื่อเปรียบเทียบของทั้งสองรูปแบบ ผลการทดสอบพบว่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของการทดสอบในอุโมงค์ลมมีค่ามากกว่าการทดสอบภาคสนาม ในทางกลับกัน เกือบทุก ๆ ช่วงของอัตราส่วนความเร็วปลายใบเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของการทดสอบภาคสนามมีค่าสูงกว่า แต่มีค่าต่างกันเล็กน้อย ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังระหว่างการทดสอบภาคสนามกับอุโมงค์ลม

ที่มา : Li et al. (2016)

จากการศึกษาข้อมูลและเอกสารอ้างอิง ยังไม่ทราบถึงข้อมูลที่เหมาะสมของจำนวนใบ มุมใบพัด และจำนวนชั้นของกังหันลมที่ความสูงคงที่ สำหรับกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวนีสบีพัดตัดโค้งครึ่งวงกลม ที่มีลักษณะแขนยื่นใบพัดห่างจากเพลาล้อด้วยกังหันลมแบบ H-Darrieus ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในกรณีดังกล่าว เพื่อหาประสิทธิภาพทางเทคนิคของกังหันลม คุณลักษณะการทำงาน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการเพิ่มจำนวนชั้นของกังหันลมจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมให้สูงขึ้นได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งได้มีการอธิบายรายละเอียดคุณสมบัติของเครื่องมือพร้อมภาพประกอบ และวิธีดำเนินการทดสอบโดยปรับตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ได้ผลตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังต่อไปนี้

อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

1. อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำตั้งภาพที่ 28 ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด กว้าง 1.2 m สูง 1.2 m และ ยาว 9.5 m ภายในอุโมงค์ลมทั้ง 4 ด้าน บุด้วยแผ่นไม้อัดเคลือบโฟมกำสี้ขาวหนา 6 mm ปากทางเข้าติดตั้งรังผึ้งที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใส หนา 0.3 mm โดยแต่ละช่องมีขนาด (กว้าง x ยาว x ลึก) 20 x 20 x 20 cm เพื่อกระจายอัตราเร็วลมก่อนเข้าสู่ภายในอุโมงค์ลมให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Loganathan et al. (2017) ที่ได้ทำการศึกษาขนาดของรังผึ้งเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศภายใน และสำหรับส่วนท้ายของอุโมงค์ลมติดตั้งพัดลมพาร์มดูดอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.27 m 6 ใบพัด ใช้มอเตอร์ 3 Phases, 50 Hz, 380 V ขนาด 1.5 hp และมีชัตเตอร์ เป็นระบบเปิด-ปิดโดยใช้แรงลม (Automatic shutter) เหมาะกับการใช้งานหนักที่พัดลมต้องทำงาน 24 ชั่วโมง หรือใช้เป็นเวลานาน ๆ



ภาพที่ 28 อุโมงค์ลมแบบเปิด

2. ชุดวัดแรงบิด

ชุดวัดแรงบิดที่สร้างขึ้นเป็นอุปกรณ์สำหรับใช้สำหรับทดสอบกำลังที่ได้จากเพลลาของกังหันลม โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดหากลังม้าเบรกเรียกว่า ไดนาโมมิเตอร์ โดยจะวัดออกมาในรูปของทอร์ก และรอบการหมุนของกังหันลม สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีไดนาโมมิเตอร์แบบสายพาน (Rope-

brake) ซึ่งปลายเชือกด้านหนึ่งจะถูกยึดกับถั่วยรรับน้ำหนักของลูกเหล็ก (3.5 g/ball) ที่ใช้สำหรับปรับภาระของเพลากังหันลม และปลายด้านหนึ่งจะยึดอยู่กับเซนเซอร์โหลดเซลล์ที่มีขนาด 0.5 kg ดังภาพที่ 29 ผลจากการเปลี่ยนแปลงทอร์กที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของเพลาก็จะถูกรับสัญญาณโดยโหลดเซลล์ และส่งสัญญาณต่อไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ซึ่งวิธีการดังกล่าวหลักการสำหรับทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ม.ป.ป.; Chaichana, 2010)



ภาพที่ 29 ชุดวัดแรงบิด

3. เครื่องบันทึกข้อมูล Multichannel mini data logger

เครื่องบันทึกข้อมูล Graphtec GL-820 ทำหน้าที่รับสัญญาณจากโหลดเซลล์ โดยขยายสัญญาณแล้วแสดงผลมายังหน้าจอ และบันทึกข้อมูลไว้ในเครื่องเป็นรูปแบบ Excel file นอกจากนี้ยังสามารถเชื่อมต่อหัววัดอุณหภูมิและความชื้น จำนวน 20 channels หรือเพิ่มช่องได้สูงสุด 200 ช่องเสียบบ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 เครื่องบันทึกข้อมูล

4. เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบ Hot wire

เครื่องวัดอัตราเร็วลม เป็นเครื่องมือที่ใช้อ่านค่าอัตราเร็วลมและอุณหภูมิภายในอุโมงค์ขณะทดสอบ โดยเลือกใช้เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน ยี่ห้อ Lutron AM-4214SD ดังภาพที่ 31 สามารถวัดอัตราเร็วลมได้ตั้งแต่ 0.2 ถึง 25 m/s บันทึกข้อมูลลงบน SD card แสดงผลการบันทึกข้อมูลเป็นรูปแบบ Excel file สามารถตั้งค่าความถี่ในการบันทึกข้อมูล (Sampling time) ได้ ตั้งแต่ 1 ถึง 3600 วินาที ค่าความแม่นยำ $\pm 0.05\%$



ภาพที่ 31 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน

5. เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส

เครื่องวัดความเร็วรอบเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับอ่านค่าความเร็วรอบของกังหันลม เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส ST-6236B Non-Contact Tachometer ดังภาพที่ 32 ค่าความถูกต้อง $\pm 0.05\%$ และช่วงการทดสอบระหว่าง 2.5 ถึง 99,999 RPM



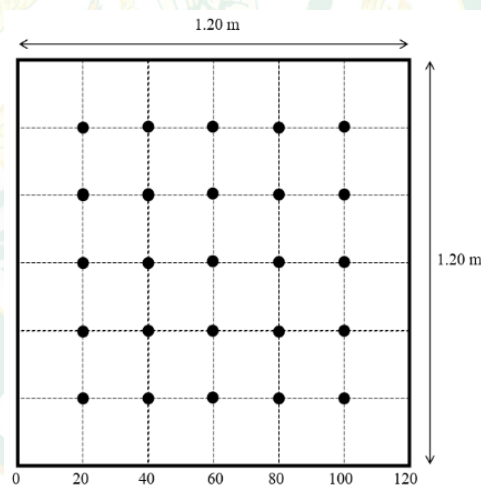
ภาพที่ 32 เครื่องวัดความเร็วรอบแบบไม่สัมผัส

วิธีดำเนินการทดสอบ

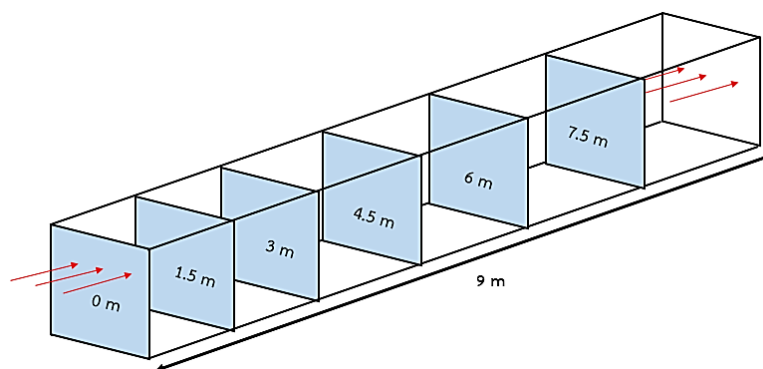
1. ทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์

แบ่งจุดวัดอัตราเร็วลมเป็นระยะ 20 x 20 cm ของพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chaichana, 2010 และทำการวัดที่ระยะ 0, 1.5, 3, 4.5, 6 และ 7.5 m ดังแสดงในภาพที่ 33 และภาพที่ 34 ตามลำดับ

- 1) ในแต่ละระยะทำการปรับอัตราเร็วลม โดยปรับความถี่ของมอเตอร์พัดลมจำนวน 7 ค่า คือ 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 Hz
- 2) นำค่าอัตราเร็วลมที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบการกระจายอัตราเร็วลมในแต่ละระยะของอุโมงค์ลม
- 3) วิเคราะห์การกระจายอัตราเร็วลมในแต่ละความถี่ และอัตราเร็วลมสูงสุดที่อุโมงค์สามารถผลิตได้ เพื่อศึกษาพื้นที่ทำงานของอุโมงค์ลม สำหรับติดตั้งกังหันลมขนาดเล็กที่จะนำมาทดสอบ



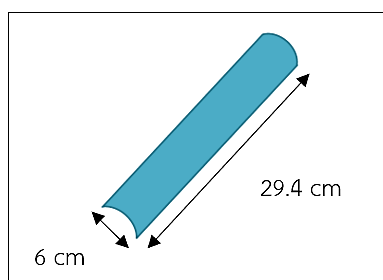
ภาพที่ 33 จุดวัดอัตราเร็วลม



ภาพที่ 34 ระยะที่วัดอัตราเร็วลมจากทางเข้าของอุโมงค์ลม

2. การสร้างกังหันลม

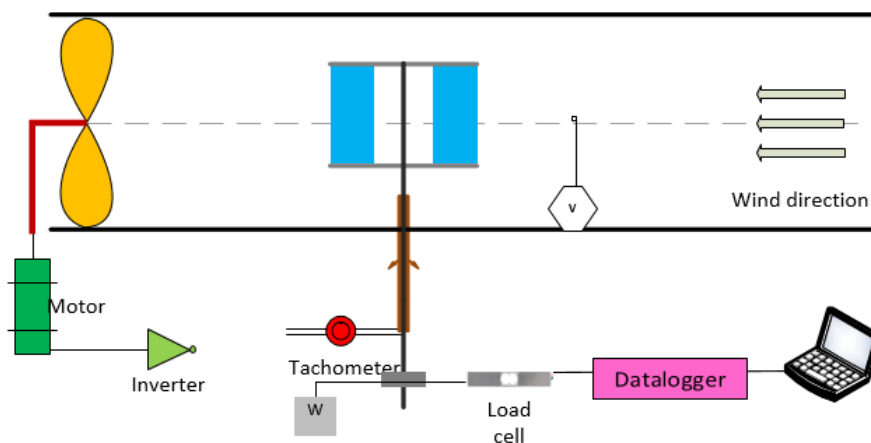
- 1) รูปแบบใบพัด สร้างจากท่อ PVC เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm ยาว 29.4 cm ปิดหัวท้ายด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 0.3 cm ดังภาพที่ 35
- 2) รูปแบบกังหันลมแกนตั้ง Savonius ขนาดของกังหัน สูง 30 cm รัศมี 15 cm



ภาพที่ 35 รูปแบบใบพัด

3. การติดตั้งกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม

ทำการติดตั้ง ณ ตำแหน่งทดสอบ โดยอยู่ที่ระยะ 7-8 m จากทางเข้าของอุโมงค์ลม รวมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดและชุดทดสอบ ดังภาพที่ 36

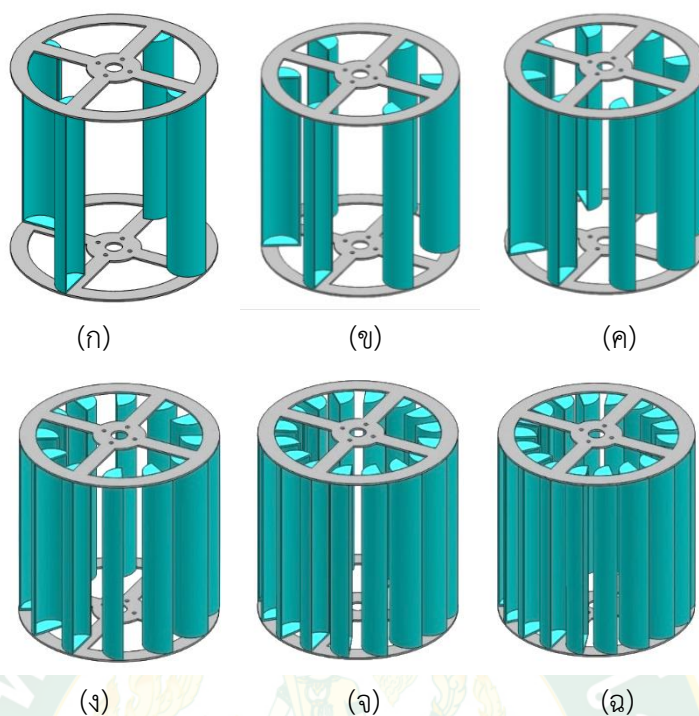


ภาพที่ 36 แผนภาพการติดตั้งกังหันลมและชุดทดสอบภายในอุโมงค์ลม

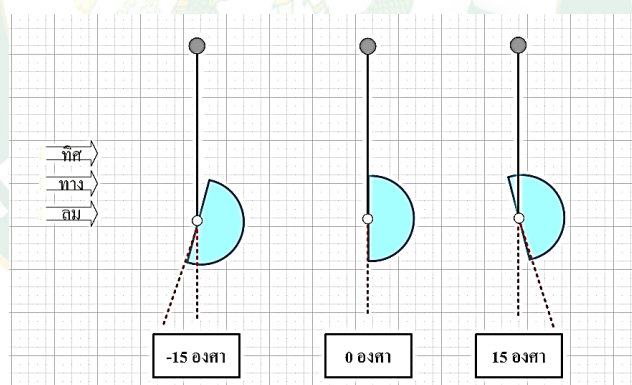
4. ทดสอบการทำงานของกังหันลมในอุโมงค์ลม

ทำการทดสอบโดยกำหนดรูปแบบการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ

- 1) ปรับจำนวนใบ จำนวน 6 ค่า คือ 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ ดังภาพที่ 37 โดยแต่ละจำนวนใบทำการปรับมุมใบ (มุมระหว่างหน้าใบพัดกับเส้นตามแนวรัศมีของกังหันลม) จำนวน 5 มุม คือ -15, -5, 0, 5 และ 15 องศา ดังภาพที่ 37 และปรับอัตราเร็วลมจำนวน 6 ค่า

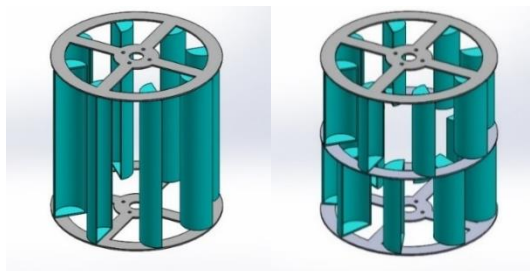


ภาพที่ 37 รูปแบบ 3 มิติของกังหันลมจำนวนใบต่าง ๆ (ก) 4 ใบ (ข) 6 ใบ (ค) 8 ใบ (ง) 12 ใบ (จ) 16 ใบ และ (ฉ) 18 ใบ



ภาพที่ 38 ตัวอย่างการปรับมุมใบพัด

- 2) ปรับจำนวนชั้นของกังหันลมตั้งแต่ 1-4 ชั้น ซึ่งมีความสูงของกังหันคงที่ ดังภาพที่ 39 กำหนดให้จำนวนใบและมุมคงที่ที่ 8 ใบ และมุม 0 องศา ตามลำดับ โดยทดสอบที่ อัตราเร็วลมจำนวน 6 ค่า



(ก)



(ข)

ภาพที่ 39 (ก) รูปแบบ 3 มิติของกังหันลมจำนวน 1 และ 2 ชั้น (ข) ชุดกังหันลมสำหรับทดสอบ
จำนวน 2, 3 และ 4 ชั้น

ในระหว่างการทดสอบของแต่ละอัตราเร็วลมทั้ง 2 กรณี ทำการเพิ่มโหลดที่กระทำกับเพลากังหันระหว่าง 0-0.49 kg และทำการตรวจวัดค่าดังต่อไปนี้

- ความเร็วรอบของกังหันลม
- อัตราเร็วลม
- แรงบิดที่เพลาล
- อุณหภูมิอากาศภายในอุโมงค์ลม

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังนี้

- 1) กำลังขาออกของเพลากังหัน
- 2) สัมประสิทธิ์กำลัง
- 3) สัมประสิทธิ์แรงบิด
- 4) อัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (Cut in wind speed)
- 5) อัตราเร็วรอบทำงาน (Rated rotational speed)
- 6) ระยะเวลาจาก Cut in speed ถึง Rated rotational speed (Rev up time)
- 7) สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดสอบต่างๆ กับค่าสัมประสิทธิ์กำลัง
- 8) วิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลม

งบประมาณ

การทำวิจัยเรื่องการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัด มุมใบ และจำนวนชั้นต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนเนียส มีค่าใช้จ่ายรวมประมาณ 100,000 บาท โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 รายละเอียดงบประมาณในการทำวิจัย

รายการ	งบประมาณ (บาท)
ค่าวัสดุ ได้แก่	
1. วัสดุคอมพิวเตอร์	1,500
2. วัสดุก่อสร้าง ได้แก่ เหล็กกล่อง, เหล็กฉาก, ไม้กระดานอัด, แผ่นอะคริลิก แผ่นอะลูมิเนียม, ตะปู, นอต, ลวดเชื่อม, สี, ตลับลูกปืน, ท่อ PVC, เชือก, ผ้าใบ, กาวท่อ, ไขมิด เป็นต้น	90,000
4. วัสดุไฟฟ้าและวิทยุ ได้แก่ โหลดเซลล์ แผงวงจรไฟฟ้า สายไฟ เป็นต้น	30,000
ค่าใช้สอย ได้แก่	
1. ค่านำเสนอผลงานวิจัย 2 ครั้ง (ค่าลงทะเบียน ค่าเดินทาง และค่าที่พัก)	15,000
2. ค่าจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์	9,000
3. ค่าสืบค้นข้อมูล	1,000
ครุภัณฑ์ก่อสร้าง	
1. สว่านเจาะเหล็ก	1,500
2. เครื่องเจียร	2,000
รวม	150,000

บทที่ 4

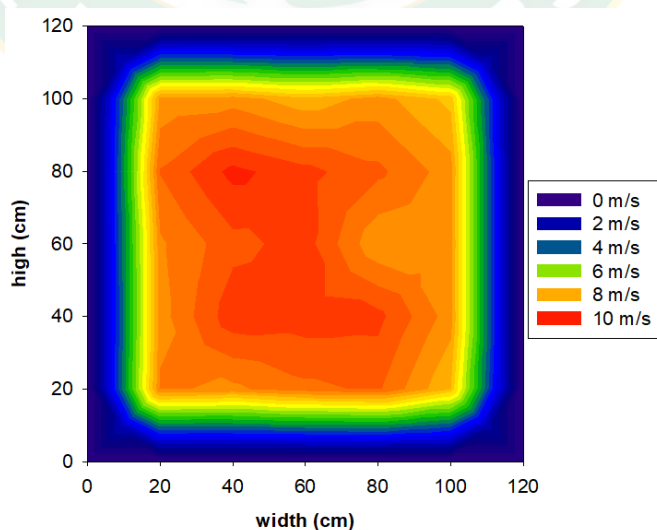
ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลของการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ 1) การศึกษาการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดเพื่อให้ทราบถึงพื้นที่ทำงาน ความสามารถในการผลิตอัตราเร็วลมสูงสุดของอุโมงค์ลม และตำแหน่งสำหรับติดตั้งกังหันลมที่ใช้ในการทดสอบ 2) ศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบมุมไบ และจำนวนชั้น ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของกังหันลม โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามขั้นตอนต่าง ๆ ในบทที่ 3 มาวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดอัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม อัตราเร็วลมที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่ ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่ 3) วิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลม และ 4) สร้างสมการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม

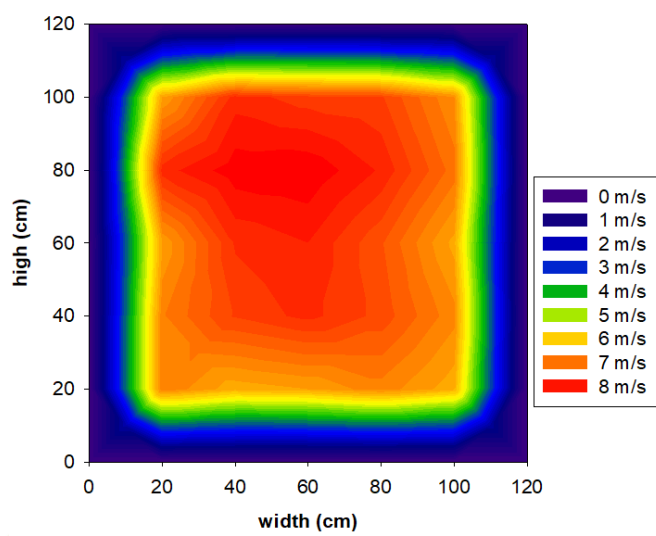
การกระจายของอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

1. การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

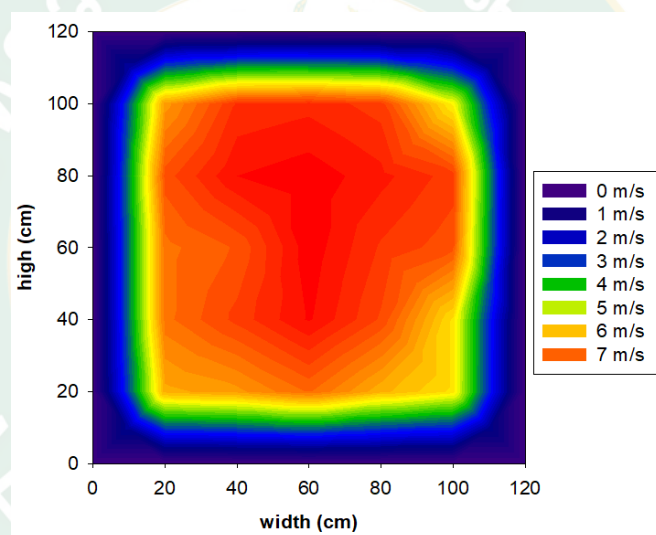
การกระจายอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อระยะจากทางเข้าของอุโมงค์ลมเพิ่มขึ้น โดยอัตราเร็วลมสูงสุดจะอยู่บริเวณส่วนกลางของพื้นที่หน้าตัด และมีค่าลดลงเมื่อเข้าไปใกล้ผนังของอุโมงค์ลมทั้ง 4 ด้าน ดังภาพที่ 40 ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ที่ระยะ 7.5 m มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมขนาดเล็ก



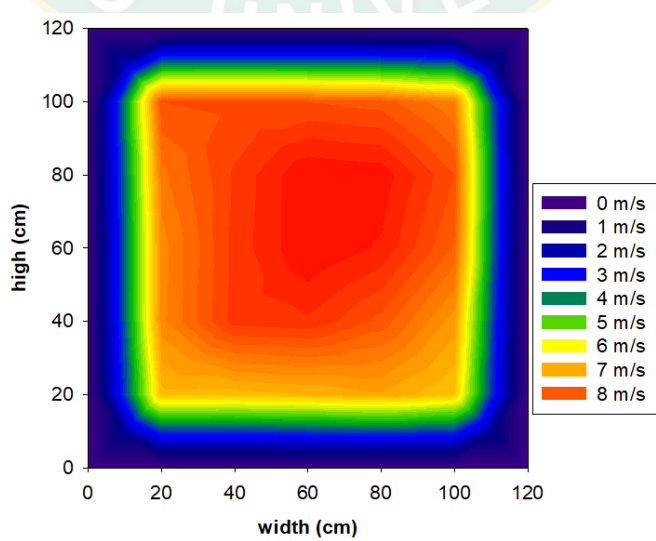
(ก)



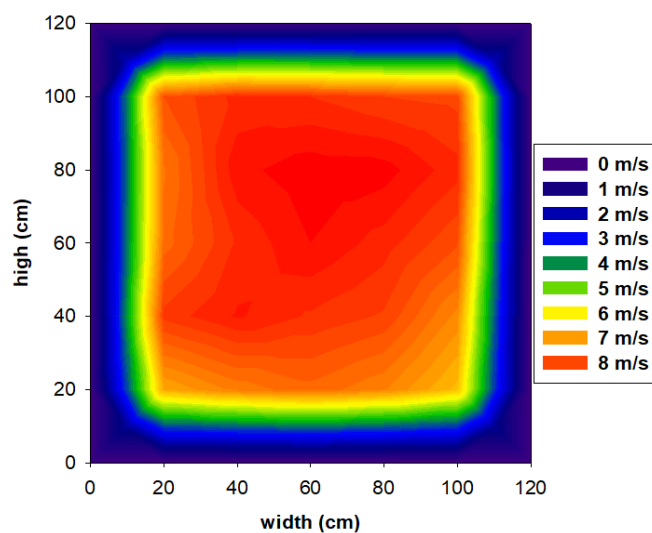
(a)



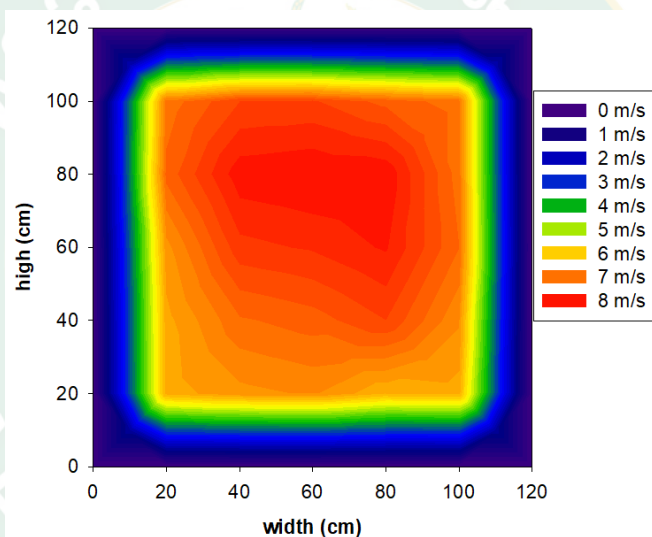
(b)



(c)



(จ)

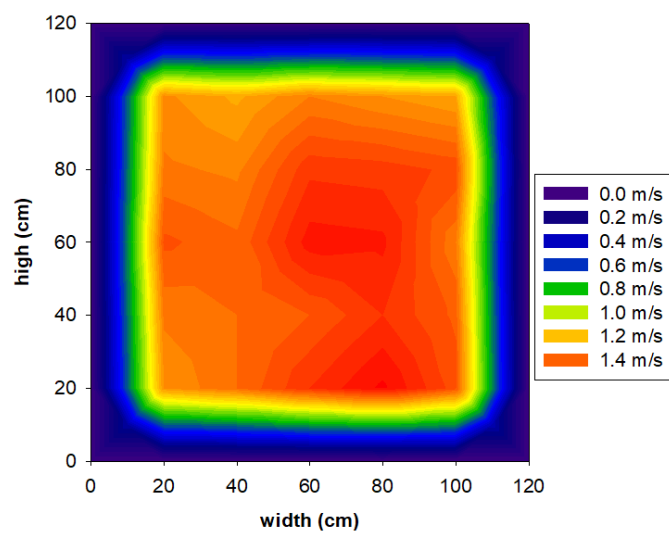


(ข)

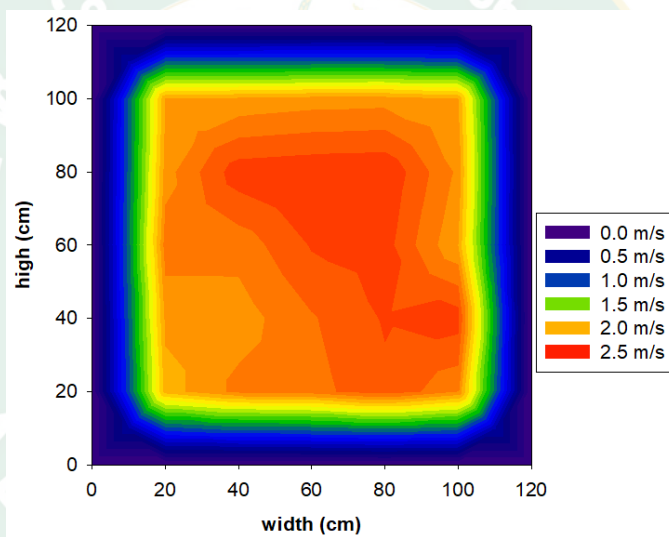
ภาพที่ 40 การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด (ก) ระยะ 0 m
(ข) ระยะ 1.5 m (ค) ระยะ 3 m (ง) ระยะ 4.5 m (จ) ระยะ 6 m และ (ฉ) ระยะ 7.5 m

2. การกระจายอัตราเร็วลมที่ความถี่ต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

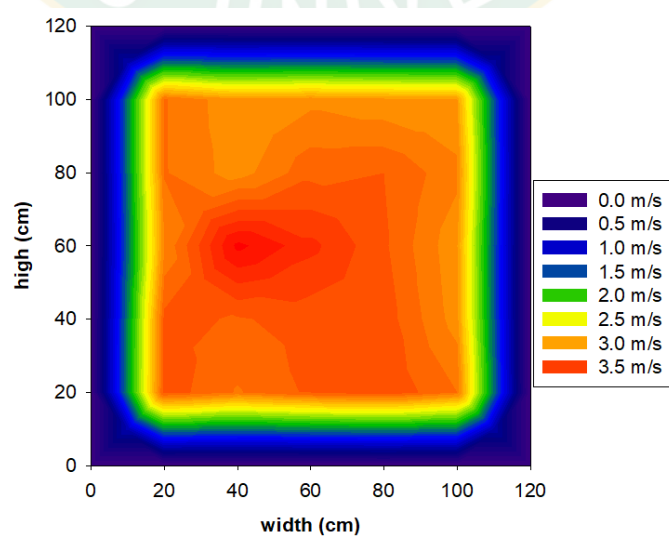
จากการทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m และปรับอัตราเร็วลมจำนวน 7 อัตราเร็วลม พบว่า การเพิ่มอัตราเร็วลมทำให้การกระจายอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งพื้นที่ทำงานส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมในทุก ๆ อัตราเร็วลม และที่อัตราเร็วลมต่ำจะมีพื้นที่ทำงานขยับไปเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 41 (ก)-(ข) โดยพื้นที่ทำงานสำหรับทดสอบทางพลศาสตร์มีขนาดประมาณ 0.5×0.5 m ดังนั้น การออกแบบกังหันลมที่จะนำมาทดสอบจะต้องมีขนาดพื้นที่ปะทะลมน้อยกว่า 0.25 m^2



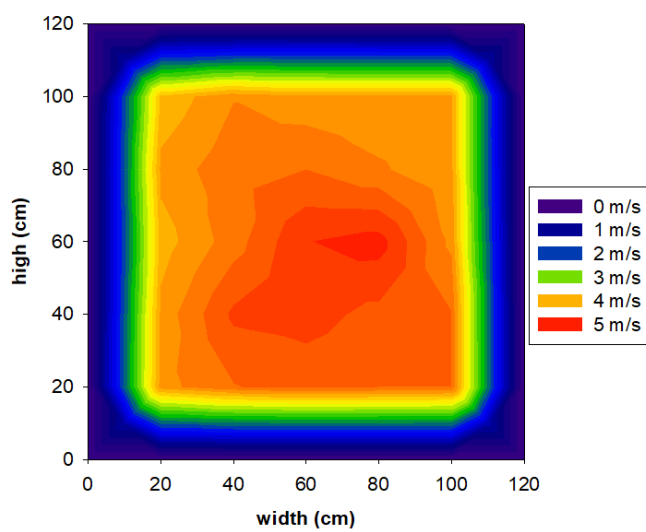
(a)



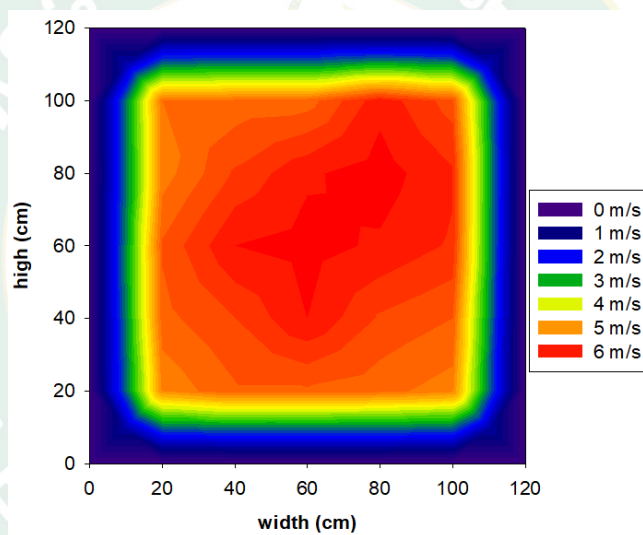
(b)



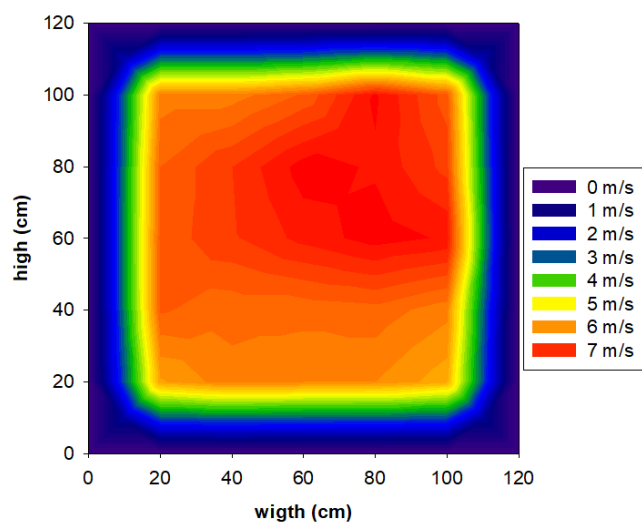
(c)



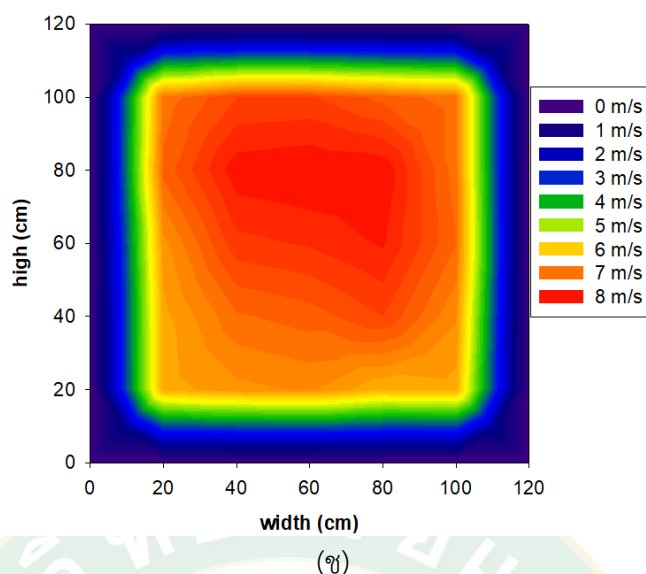
(a)



(b)



(c)



ภาพที่ 41 การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m สำหรับความถี่ต่าง ๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด
(ก) ความถี่ 20 Hz (ข) ความถี่ 25 Hz (ค) ความถี่ 30 Hz (ง) ความถี่ 35 Hz (จ) ความถี่ 40 Hz
(ฉ) ความถี่ 45 Hz และ (ช) ความถี่ 50 Hz

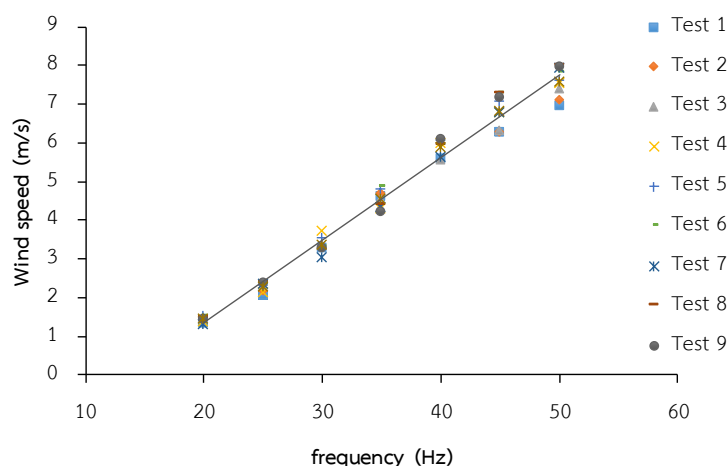
จากพื้นที่ทำงานดังกล่าว ได้ทำการวัดอัตราเร็วลม 9 จุด จากส่วนกลางของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม เพื่อวิเคราะห์ค่าอัตราเร็วลมสูงสุดที่อุโมงค์ลมสามารถทำได้โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับความถี่ของมอเตอร์พัดลม ดังภาพที่ 42 ผลการทดสอบ พบว่าที่ตำแหน่งทดสอบอุโมงค์ลมสามารถผลิตอัตราเร็วลมสูงสุดได้ประมาณ 7.7 m/s และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างการจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการทดสอบ พบว่ามีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ ± 0.15 m/s และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9953 ดังแสดงในสมการที่ 25 และภาพที่ 43 ซึ่งสมการดังกล่าวเนื่องจากตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ทำให้ง่ายในการปรับความถี่มอเตอร์เพื่อเพิ่มหรือลดอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลม และจากการวิเคราะห์ความรุนแรงของความปั่นป่วน (Turbulence Intensity, IT) จากการคำนวณข้อมูลอัตราเร็วลม ณ ตำแหน่งทดสอบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามหลักพื้นฐานของการออกแบบอุโมงค์ลมที่มีความสม่ำเสมอของการไหลในช่วง 0.1-0.4 (ธเนศ ไชยชนะ, 2559)

$$V = 0.2148(f) - 2.9638$$

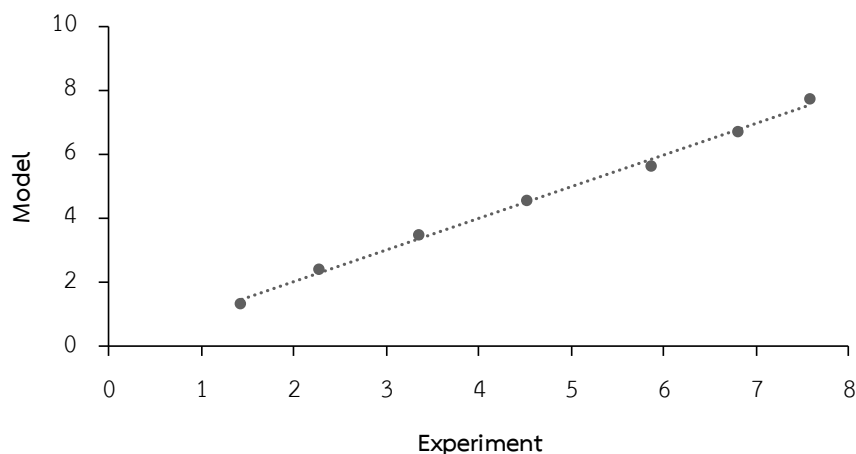
สมการที่ 25

เมื่อ V คือ อัตราเร็วลม (m/s)

f คือ ความถี่ของมอเตอร์พัดลม (Hz)



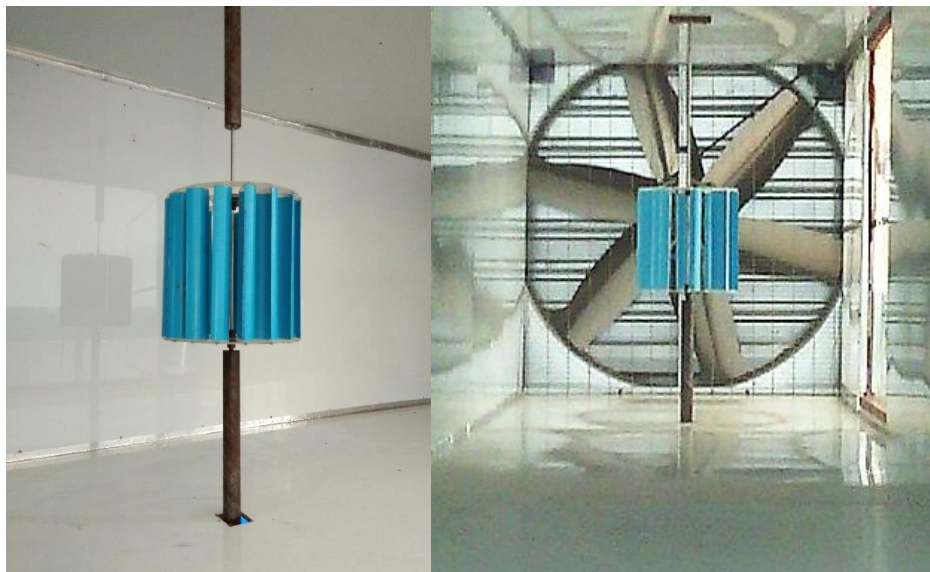
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับความถี่ของมอเตอร์พัดลม



ภาพที่ 43 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วลมระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

อิทธิพลของจำนวนใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนีเยส

จำนวนใบเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของกังหันลม เนื่องจากกังหันลมแกนตั้งอาศัยแรงต้านจากใบในการขับเคลื่อนเพื่อผลิตพลังงาน ซึ่งคาดว่าจะการเพิ่มจำนวนใบจะช่วยให้กังหันลมมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงทดสอบกังหันลมด้วยวิธีการปรับจำนวนใบเป็น 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ มุมใบ 0° ในช่วงอัตราเร็วลมเฉลี่ย 2-7 m/s ที่ทำการติดตั้งบริเวณกึ่งกลางภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด ดังภาพที่ 44

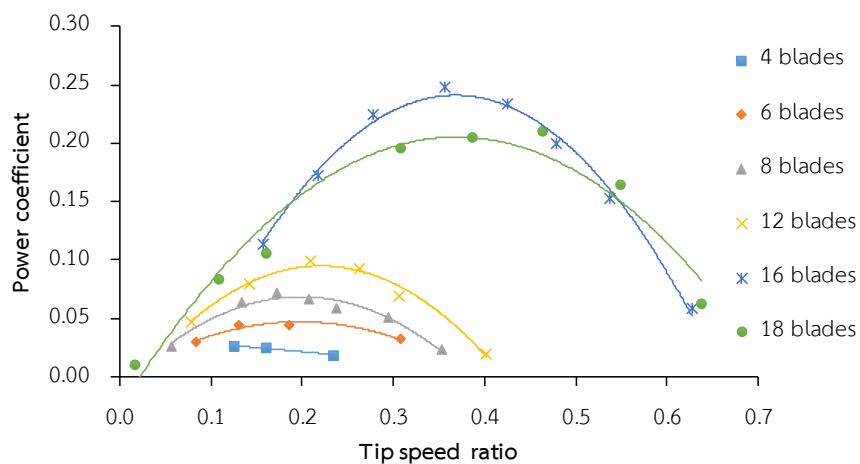


ภาพที่ 44 การติดตั้งกังหันลมภายในอุโมงค์ลม

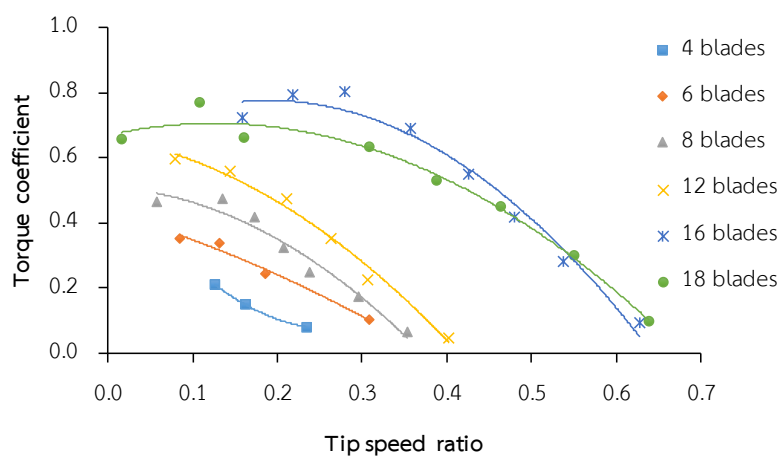
1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

ค่าสัมประสิทธิ์ของกังหันลมที่ทำการศึกษ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สัมประสิทธิ์กำลังที่ได้จากสัดส่วนของกำลังกังหันลมที่ผลิตได้ต่อกำลังจากมวลอากาศเคลื่อนที่ที่คำนวณทางทฤษฎี และสัมประสิทธิ์แรงบิด ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของกังหันลม โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพของจำนวนใบ ที่อัตราเร็วลมคงที่เฉลี่ย 4 m/s ดังแสดงในภาพที่ 45 พบว่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของแต่ละจำนวนใบมีแนวโน้มสูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลมในช่วง 4-16 ใบ มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงที่ 18 ใบ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่ทดสอบในทุกๆ จำนวนใบ พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงขึ้น โดยกังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำกว่า 0.5 ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า จำนวนใบที่มากขึ้นไม่ได้หมายความว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดจะสูงตาม เนื่องจาก ค่า Solidity ซึ่งเป็นอัตราส่วนพื้นที่ของใบต่อพื้นที่ในการกวาดลม ค่านี้ถ้ามีในปริมาณมากก็จะทำให้ประสิทธิภาพของกังหันลมลดลง

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยของแต่ละจำนวนใบในช่วงอัตราเร็วลม $2-7 \text{ m/s}$ ดังภาพที่ 46 กับงานวิจัยของ Loganathan et al. (2017) ที่ทำการทดสอบกังหันลมชนิดซาโวเนียส 8-24 ใบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2 เท่าของความสูง ที่อัตราเร็วลมระหว่าง $4.5-8.5 \text{ m/s}$ พบว่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนใบเช่นเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่อัตราเร็วลม 4 m/s พบว่ามีแนวโน้มที่ต่างกัน ดังตารางที่ 5

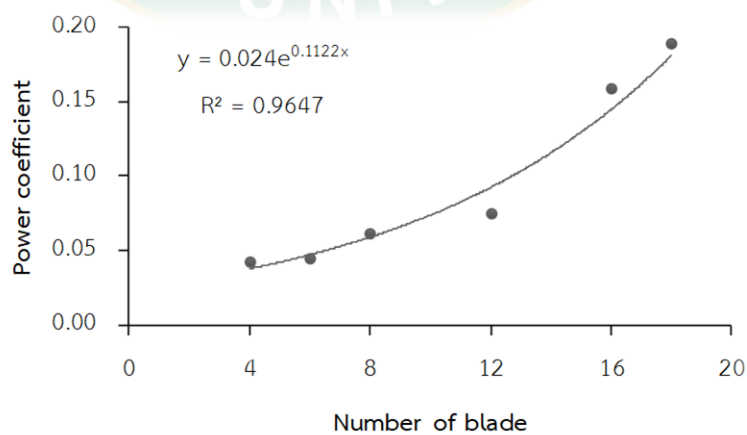


(ก)



(ข)

ภาพที่ 45 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่จำนวนใบต่าง ๆ



ภาพที่ 46 สัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยของกังหันลมที่จำนวนใบต่างๆ

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแต่ละจำนวนใบ

จำนวนใบ	$V \approx 4 \text{ m/s}$		$V \approx 2-7 \text{ m/s}$	
	$C_{P, \text{ Max}}$	TSR	$C_{P, \text{ Avg}}$	TSR
4	0.0280	0.10	0.0420	0.21
6	0.0470	0.20	0.0443	0.24
8	0.0684	0.20	0.0608	0.32
12	0.0949	0.22	0.0746	0.35
16	0.2410	0.36	0.1586	0.52
18	0.2052	0.38	0.1889	0.46

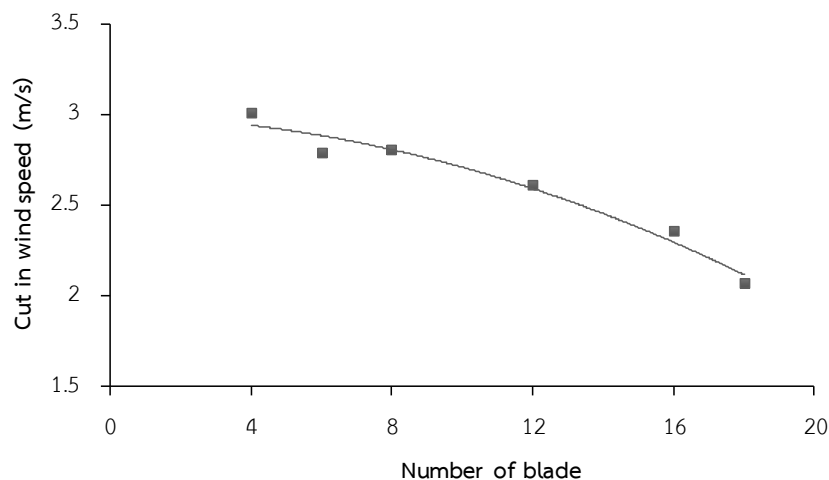
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม

การศึกษาอัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม เป็นการพิจารณาค่าอัตราเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมต้องการใช้สร้างแรงบิดเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานต่าง ๆ ในระบบได้ ซึ่งการวิจัยทำการปรับจำนวนใบพัด 4-18 ใบ และทดสอบที่อัตราเร็วลมประมาณ 2-7 m/s พบว่า อัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำสุด (ไม่มีแรงกระทำที่เพลากังหันลม) มีแนวโน้มลดลงเป็น 2.94, 2.88, 2.81, 2.60, 2.30 และ 2.12 m/s ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนใบ นั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนใบทำให้กังหันลมมีพื้นที่รับลมเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้กังหันลมมีแรงบิดเพื่อเพื่อหมุนเข้าสู่อัตราเร็วรอบคงที่สูงขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 26 และภาพที่ 47 โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9654 และจากการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างสมการจำลองกับการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 48 พบว่า ค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนมีค่า RMSE เท่ากับ $\pm 0.07 \text{ m/s}$ อย่างไรก็ตาม สมการนี้ใช้ได้ในกรณีที่จำนวนใบอยู่ระหว่าง 4-18 ใบ เท่านั้น

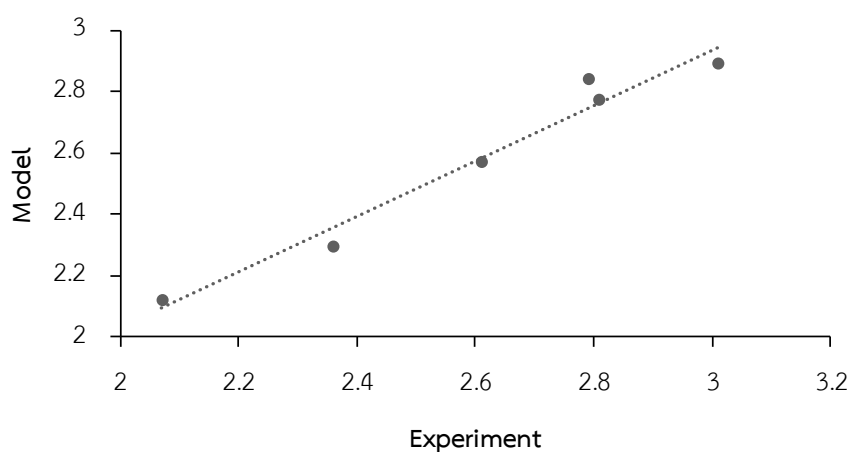
$$V_{\text{Cut in}} = 2.9978 - 0.0034(N_B) - 0.0025(N_B)^2 \quad \text{สมการที่ 26}$$

เมื่อ $V_{\text{Cut in}}$ คือ อัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (m/s)

N_B คือ จำนวนใบพัด



ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมเริ่มหมุนกับจำนวนใบของกังหันลม



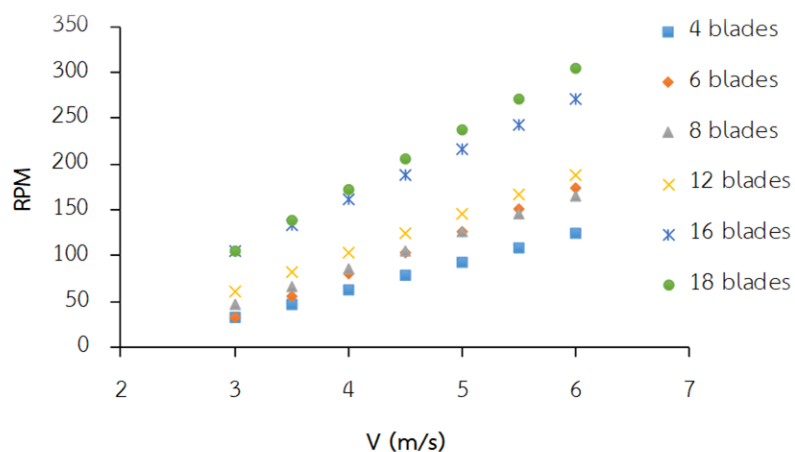
ภาพที่ 48 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่

จากการศึกษาอัตราเร็วรอบที่กังหันลมหมุนด้วยความเร็วคงที่ โดยพิจารณาในกรณีที่ไม่มีแรงกระทำที่เพลลา พบว่าการเพิ่มขึ้นของจำนวนใบกับอัตราเร็วลมส่งผลให้กังหันลมมีอัตราเร็วรอบสูงขึ้น และสำหรับกังหันลม 12 กับ 16 ใบ มีอัตราเร็วรอบของกังหันแตกต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับจำนวนใบอื่น ๆ ดังภาพที่ 49 และตารางที่ 6 ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ทดสอบกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 27 และภาพที่ 50 พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.9454 และ RMSR เท่ากับ ± 15.54 RPM

$$\text{RPM} = 46.616(V) + 8.802(N_b) - 168.59$$

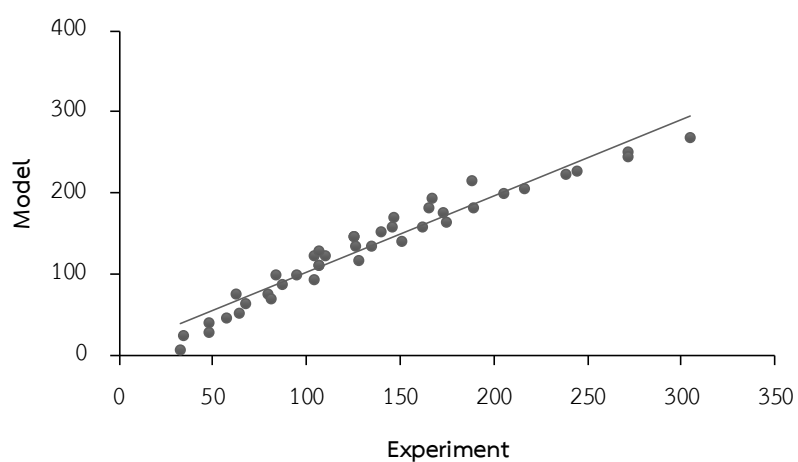
สมการที่ 27



ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบของกังหันลมอัตราเร็วลมต่าง ๆ

ตารางที่ 6 อัตราเร็วรอบของกังหันลมที่จำนวนใบ และอัตราเร็วลมต่าง ๆ

อัตราเร็วลม (m/s)	Rated rotational speed (RPM)					
	4 ใบ	6 ใบ	8 ใบ	12 ใบ	16 ใบ	18 ใบ
3.0	32.98	34.06	48.12	62.25	106.85	106.62
3.5	48.37	57.47	67.69	83.27	134.28	139.64
4.0	63.75	80.88	87.27	104.30	161.71	172.65
4.5	79.14	104.29	106.85	125.33	189.13	205.67
5.0	94.53	127.70	126.43	146.35	216.56	238.69
5.5	109.92	151.11	146.00	167.38	243.99	271.70
6.0	125.31	174.52	165.58	188.44	271.42	304.72



ภาพที่ 50 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วรอบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

4. ระยะเวลาที่กักหันลมหมุนคงที่

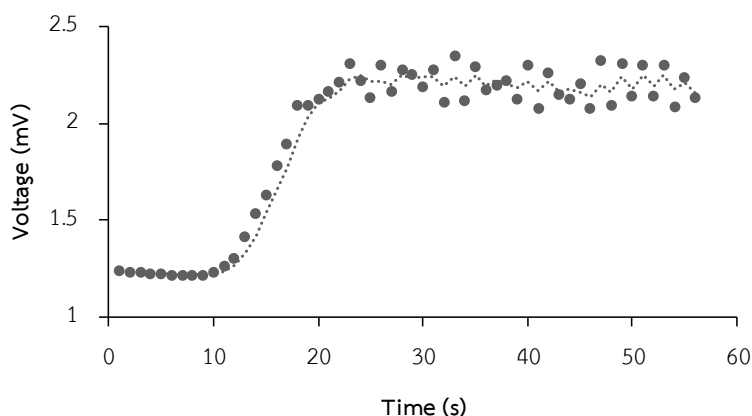
จากภาพที่ 51 แสดงการวิเคราะห์ระยะเวลาของกักหันลมขณะเริ่มหมุนจนถึงหมุนด้วยความเร็วคงที่ โดยทำการทดสอบที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4 m/s และปรับภาระโหลดจำนวน 8 ค่า ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 7 จากการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนเข้าสู่ความเร็วรอบคงที่นั้นแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนใบพัดและภาระโหลดดังภาพที่ 52 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 28 กับค่าจากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 53 พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9925 และ RMSE เท่ากับ ± 1.22 s โดยสมการดังกล่าวใช้ได้กับจำนวนใบ 4-8 ใบ อัตราเร็วลม 4 m/s และภาระโหลดในช่วง 0-4.8 N เท่านั้น

$$T_{Rev} = 1.807(N_B) + 5.777(F_g) + 1.0946$$

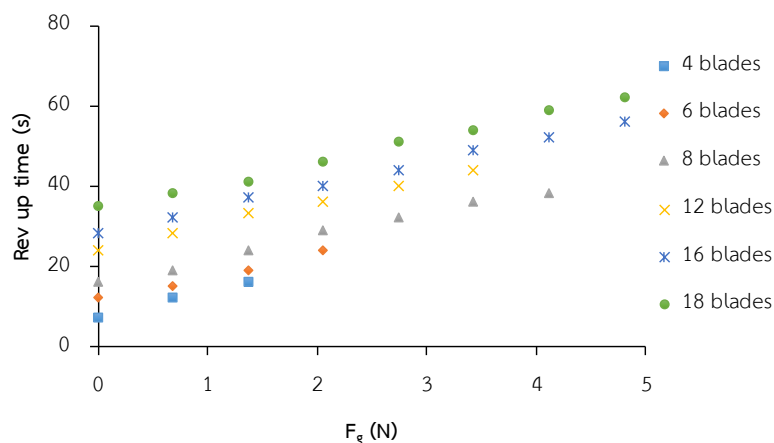
สมการที่ 28

ตารางที่ 7 ค่า Rev up time กับแรงที่กระทำต่อเพลากักหันที่จำนวนใบต่าง ๆ

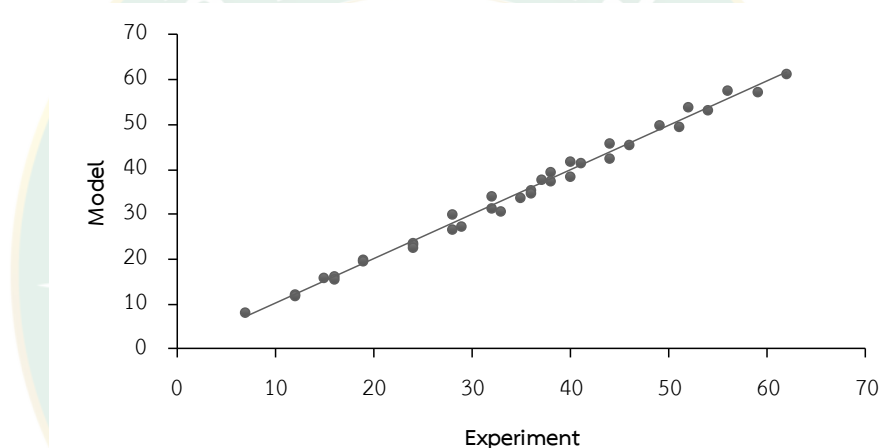
Load (N)	Rev up time (s)					
	4 ใบ	6 ใบ	8 ใบ	12 ใบ	16 ใบ	18 ใบ
0.00	7	12	16	24	28	35
0.69	12	15	19	28	32	38
1.37	16	19	24	33	37	41
2.06	-	24	29	36	40	46
2.75	-	-	32	40	44	51
3.43	-	-	36	44	49	54
4.12	-	-	38	-	52	59
4.81	-	-	-	-	56	62



ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับเวลาในช่วงกักหันลมทำงาน



ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ต่อแรงที่กระทำกับเพลลาที่จำนวนใบต่าง ๆ



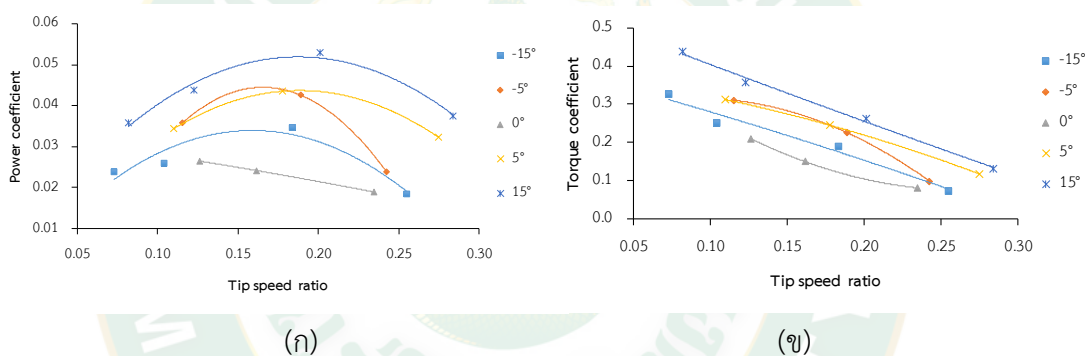
ภาพที่ 53 กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

อิทธิพลของมุมใบต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส

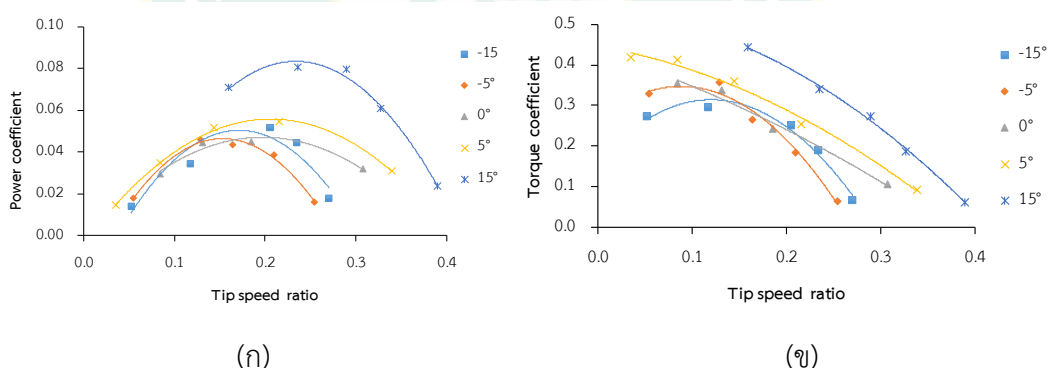
สำหรับการศึกษาอิทธิพลของมุมใบ ผู้วิจัยมีข้อสมมุติฐานว่ากังหันลมชนิดชาโวเนียสในแต่ละจำนวนใบ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่มุมใบแตกต่างกัน เนื่องจากตำแหน่งใบของกังหันลมแต่ละแบบไม่เหมือนกัน ดังนั้น จึงได้ทำการทดสอบกังหันลมทั้งหมด 6 แบบ คือ กังหันลม 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ ในแต่ละแบบปรับมุมใบทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ -15° , -5° , 0° , 5° และ 15° และปรับภาระโหลดกับอัตราเร็วลมในช่วง 0-0.49 kg และ 2-7 m/s ตามลำดับ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงดังหัวข้อต่อไป

1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

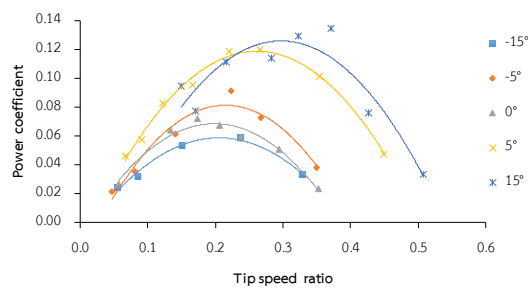
จากการทดสอบได้เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดในแต่ละมุมใบของกังหันลมที่มีจำนวนตั้งแต่ 4-18 ใบ ที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4 m/s ดังแสดงในภาพที่ 54-ภาพที่ 59 สามารถสังเกตได้ว่ามุมใบ 15° กังหันลมในช่วง 4-12 ใบ มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับมุมอื่น ๆ โดยคิดเป็นร้อยละที่เพิ่มขึ้นจากมุมใบ 0° (มุมอ้างอิง) เป็น 85.33, 77.20, 84.11 และ 127.37 (%) ตามลำดับ สำหรับกังหันลม 16 ใบ มุมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด คือ 5° คิดเป็นร้อยละที่เพิ่มขึ้น 4.54 % และ 18 ใบ ประสิทธิภาพสูงสุดที่มุม 0° ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 8 ซึ่งจากเงื่อนไขการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มมุมใบส่งผลต่อกังหันลมที่มีจำนวนใบน้อยกว่า 18 ใบ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Li et al. (2015) และ Loganathan et al. (2014b) พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน คือ กังหันลมที่มีจำนวนใบต่างกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่มุมใบไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วลมและค่า Solidity ของกังหันลมด้วย



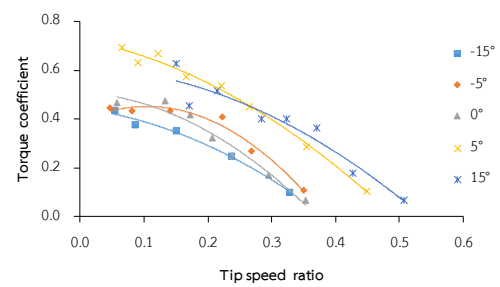
ภาพที่ 54 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 4 ใบพัด



ภาพที่ 55 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 6 ใบพัด

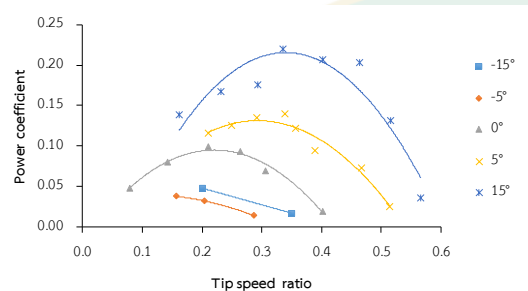


(ก)

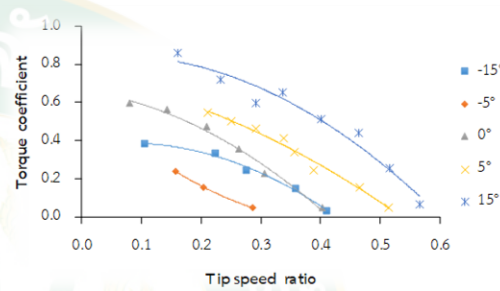


(ข)

ภาพที่ 56 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 8 ใบพัด

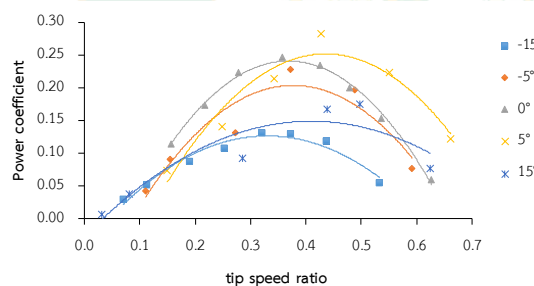


(ก)

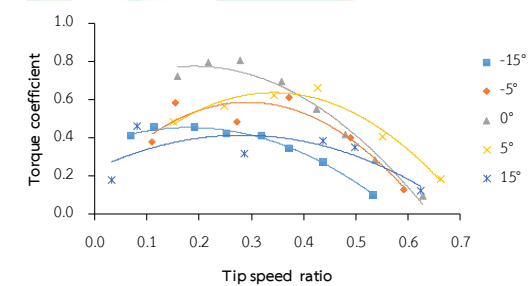


(ข)

ภาพที่ 57 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 12 ใบพัด

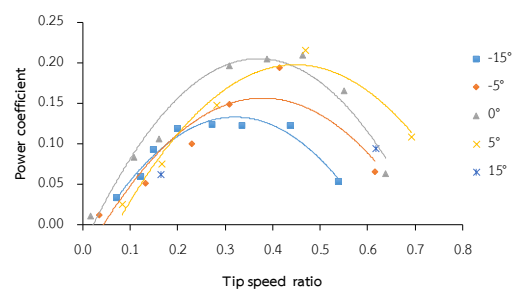


(ก)

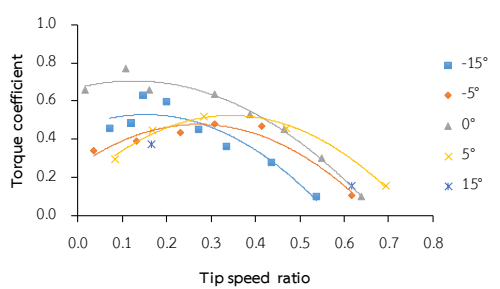


(ข)

ภาพที่ 58 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 16 ใบพัด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 59 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 18 ใบพัด

ตารางที่ 8 มุมใบที่กังหันลมมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับแต่ละจำนวนใบ

จำนวนใบ	4	6	8	12	16	18
มุมใบ (°)	15	15	15	15	5	0
$C_{P,max}$	0.0519	0.0833	0.1259	0.2157	0.2519	0.2050
C_T	0.2731	0.3470	0.4197	0.6345	0.5858	0.5396
TSR	0.19	0.24	0.3	0.34	0.43	0.38

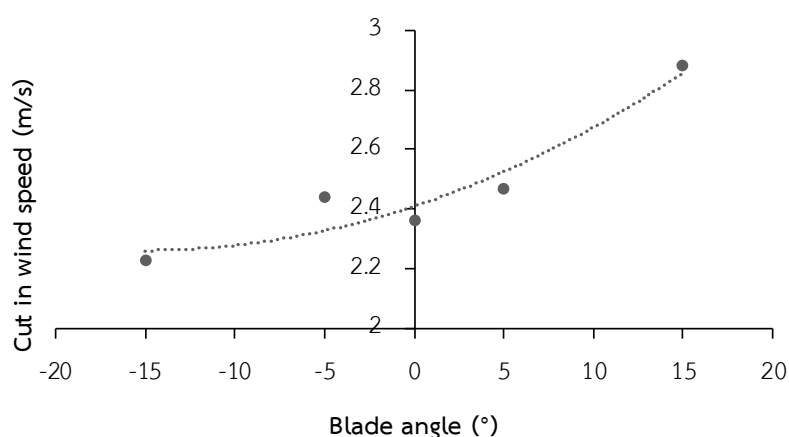
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้น พบว่ากังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกกังหันลม 16 ใบ เพื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วลมที่กังหันลมเริ่มทำงานสำหรับมุมต่าง ๆ ดังภาพที่ 60 ผลการทดสอบพบว่า ค่าอัตราเร็วลมเริ่มทำงานแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของมุมใบ ซึ่งมีค่าเป็น 2.27, 2.33, 2.41, 2.53 และ 2.86 m/s ตามลำดับ เนื่องจากใบของกังหันทางด้านส่วนโค้งใบที่รับลมจะมีแรงต้านน้อย ทำให้สามารถเริ่มหมุนได้ที่อัตราเร็วลมต่ำลง แต่จะมีแรงบิดและอัตราเร็วรอบต่ำ ด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดต่ำโดยเฉพาะมุมใบ -15° เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ 29 และภาพที่ 61 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9169 และ RMSR เท่ากับ ± 0.05 m/s

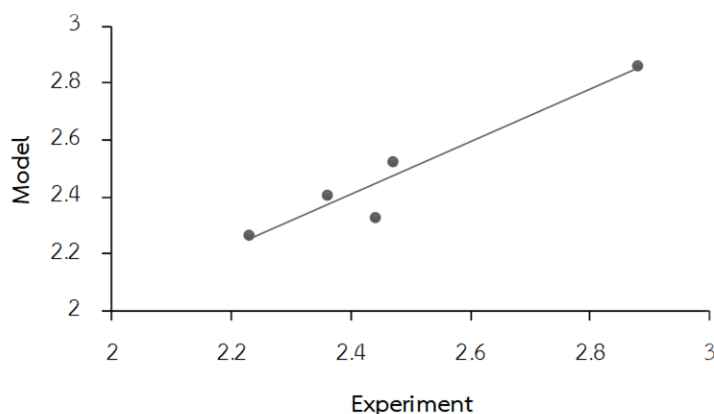
$$V_{Cut\ in} = 0.0007(\beta)^2 + 0.0198(\beta) + 2.4103$$

สมการที่ 29

เมื่อ β คือ มุมใบพัด (°)



ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมเริ่มหมุนกับมุมใบพัดของกังหันลม 16 ใบ



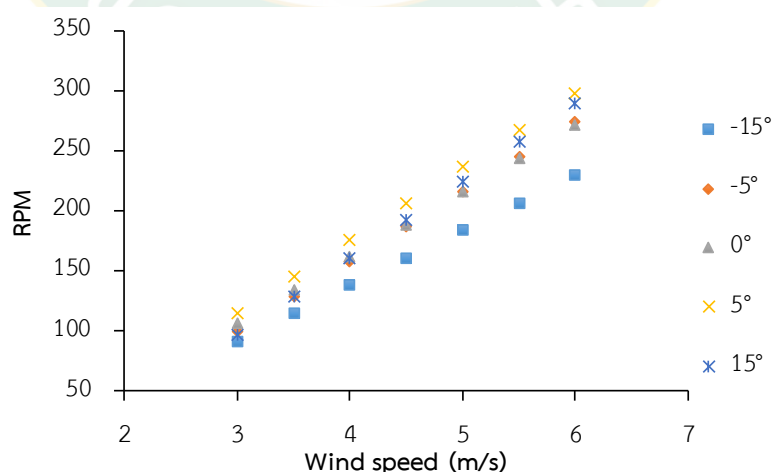
ภาพที่ 61 กราฟเปรียบเทียบค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนแต่ละมุมใบระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่

ผลการพิจารณาอัตราเร็วรอบในแต่ละมุมของกังหันลม 16 ใบ ที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ พบว่า อัตราเร็วรอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามค่าอัตราเร็วลมในช่วงทดสอบ โดยที่มุมใบ -15° , -5° , 0° , 5° และ 15° มีอัตราเร็วรอบสูงสุดประมาณ 230.38, 274.82, 271.42, 297.97 และ 289.74 RPM ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 62 และ ตารางที่ 9 ซึ่งอัตราเร็วรอบของแต่ละมุมมีความแตกต่างกันน้อยเมื่อเทียบกับการศึกษาอิทธิพลของการปรับจำนวนใบ และจากการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากสมการที่ 30 กับการทดสอบ ดังภาพที่ 63 พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9648 และ RMSE เท่ากับ ± 11.11 RPM โดยสมการนี้ใช้ได้ในการณที่อัตราเร็วลมสูงกว่า 2.3 m/s

$$\text{RPM} = 57.0624(V) + 1.15148(\beta) - 69.5086$$

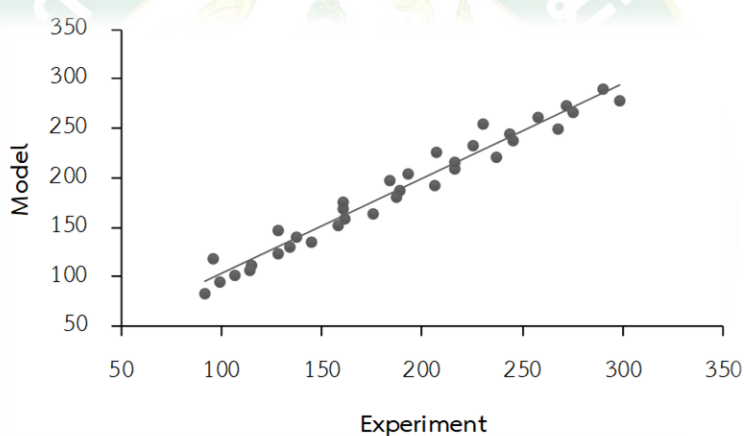
สมการที่ 30



ภาพที่ 62 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบกับอัตราเร็วลมที่มุมต่าง ๆ

ตารางที่ 9 อัตราเร็วรอบของกังหันลมแต่ละมุมที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ

อัตราเร็วลม (m/s)	Rated rotational speed (RPM)				
	-15°	-5°	0°	5°	15°
3.0	91.56	99.37	106.85	114.35	96.26
3.5	114.70	128.61	134.28	144.95	128.51
4.0	137.84	157.85	161.71	175.56	160.75
4.5	160.97	187.09	189.13	206.16	193.00
5.0	184.11	216.34	216.56	236.76	225.25
5.5	207.25	245.58	243.99	267.37	257.50
6.0	230.38	274.82	271.42	297.97	289.74



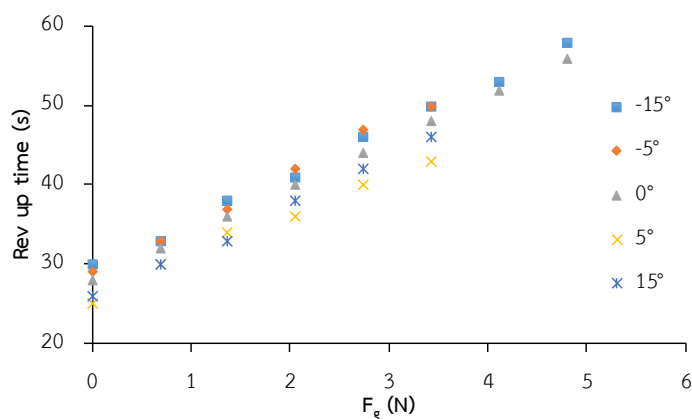
ภาพที่ 63 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบ

4. ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่

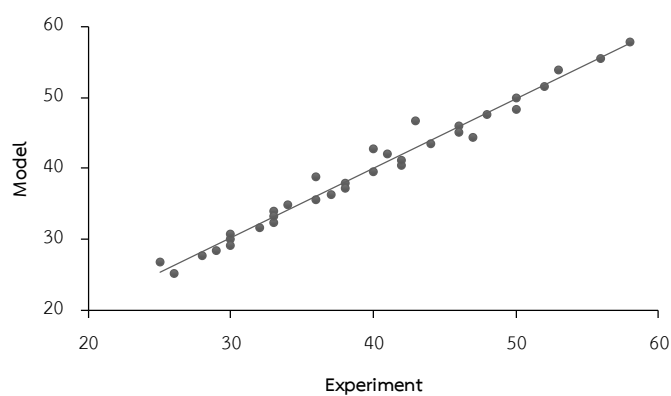
จากการทดสอบอิทธิพลของมุมใบสำหรับกังหันลม 16 ใบ ที่ส่งผลต่อค่า Rev up time ผลการทดสอบพบว่า กังหันลมที่มีมุม 5° ใช้เวลาในการเร่งตัวเข้าสู่อัตราเร็วรอบคงที่ต่ำสุด รองลงมาเป็นมุม 15°, 0°, -5° และ -15° ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 64 และตารางที่ 10 ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากสมการที่ 31 กับค่าจากการทดสอบดังภาพที่ 65 พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9787 และ RMSE เท่ากับ ± 1.27 s โดยจากการสังเกตจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าอิทธิพลของมุมใบนั้นส่งผลกระทบท่อการเปลี่ยนแปลงค่า Rev up time เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอิทธิพลของจำนวนใบที่มีช่วงระยะเวลาที่กว้างกว่า

$$T_{\text{Rev,Ang}} = 5.812(F_g) - 0.16(\beta) + 27.591$$

สมการที่ 31



ภาพที่ 64 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ของกังหันลม 16 ใบ ที่มุมใบต่าง ๆ



ภาพที่ 65 กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

ตารางที่ 10 ค่า Rev up time สำหรับกังหันลม 16 ใบ ที่มุมต่าง ๆ

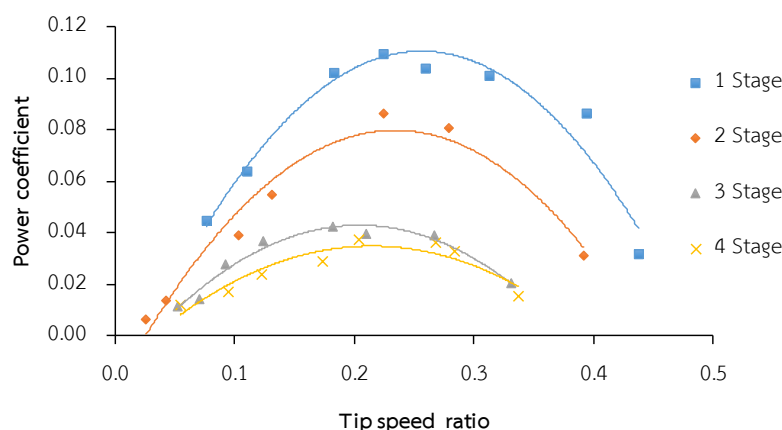
load (N)	Rev up time (s)				
	-15°	-5°	0°	5°	15°
0.00	30	29	28	25	26
0.69	33	33	32	30	30
1.37	38	37	36	34	33
2.06	41	42	40	36	38
2.75	46	47	44	40	42
3.43	50	50	48	43	46
4.12	53	-	52	-	-
4.81	58	-	56	-	-

อิทธิพลของจำนวนชั้นต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบชาโวเนียส

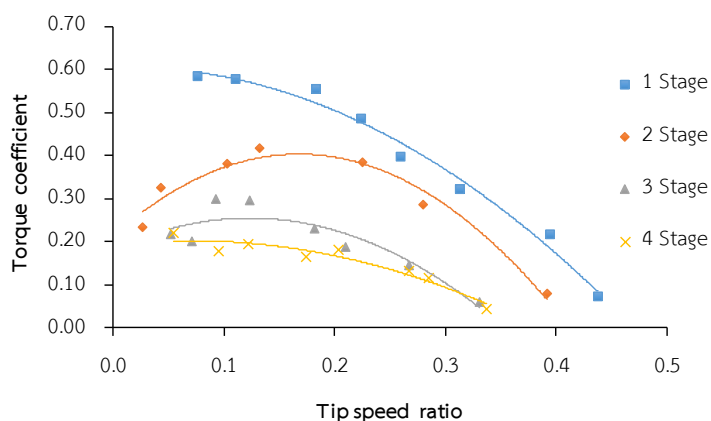
นอกจากจำนวนใบและมุมใบที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแล้ว ยังมีการศึกษาจำนวนชั้น ซึ่งคาดว่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมได้ดียิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้กังหันลม 8 ใบ สำหรับทดสอบ โดยปรับจำนวนชั้นทั้งหมด 4 ชั้น แต่ละชั้นวางตำแหน่งใบเยื้องกันแล้วทดสอบในช่วงอัตราเร็วลมเฉลี่ย 2-7 m/s และปรับภาระโหลดระหว่าง 0-0.49 kg ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

1. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม

จากการทดสอบจำนวนชั้นต่าง ๆ ดังภาพที่ 66 ที่มีความสูงของกังหันลมคงที่ และทดสอบที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4.88 m/s พบว่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนชั้นสูงขึ้น โดยช่วงจำนวนชั้นจาก 1 เป็น 2 และ 3 ชั้น สัมประสิทธิ์กำลังลดลงอย่างมาก และจาก 3 เป็น 4 ชั้น สัมประสิทธิ์กำลังลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มจำนวนชั้นในกรณีที่มีความสูงคงที่ไม่เป็นผลดีต่อสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Saha et al. (2008) และ Mahmoud et al. (2012) พบว่าค่าที่ได้ไม่มีความสอดคล้องกันในช่วงจำนวนชั้นจาก 1-2 ชั้น เนื่องจากงานวิจัยดังกล่าวมีสัมประสิทธิ์กำลังเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อจำนวนชั้นมีมากกว่า 2 ชั้น ซึ่งจากการสังเกตมีความเป็นไปได้ว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นในกรณีความสูงของกังหันลมเพิ่มขึ้นตาม ทำให้กังหันลมมีพื้นที่รับลมมากขึ้น เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้ที่มีพื้นที่ใบลดลง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 66 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสำหรับกังหันลมแต่ละชั้น

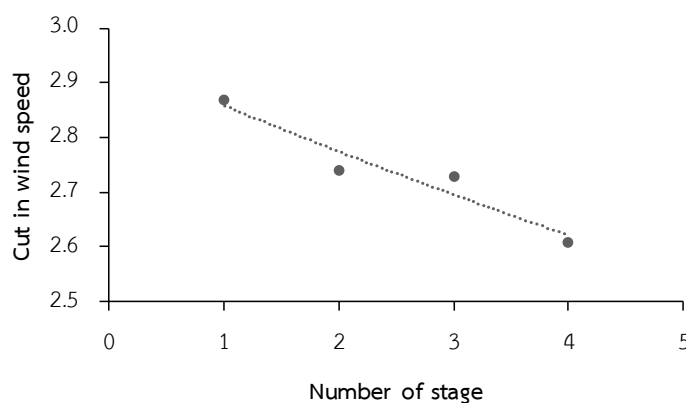
2. อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลม

จากการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราเร็วลมต่ำสุดที่กังหันลมเริ่มทำงาน โดยทดสอบในช่วงอัตราเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 2-7 m/s ผลการทดสอบพบว่า อัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำสุดแปรผกผันกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.85, 2.77, 2.70 และ 2.62 m/s ตามลำดับ ดังภาพที่ 67 และจากภาพที่ 68 เป็นผลการเปรียบเทียบค่า Cut in wind speed ที่ได้จากสมการที่ 32 กับการทดสอบ พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9219 และ RMSR เท่ากับ ± 0.0257 m/s เมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่า Cut in wind speed สำหรับการปรับจำนวนชั้นมีค่าต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลของจำนวนใบและมุมใบในหัวข้อดังกล่าวข้างต้น

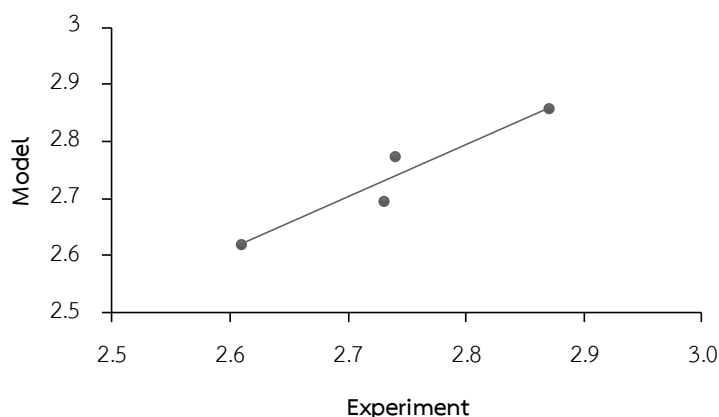
$$V_{\text{Cut in}} = 0.0025(N_s)^2 - 0.0915(N_s) + 2.9475$$

สมการที่ 32

เมื่อ N_s คือ จำนวนชั้นของกังหันลม



ภาพที่ 67 อัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลมแต่ละชั้น



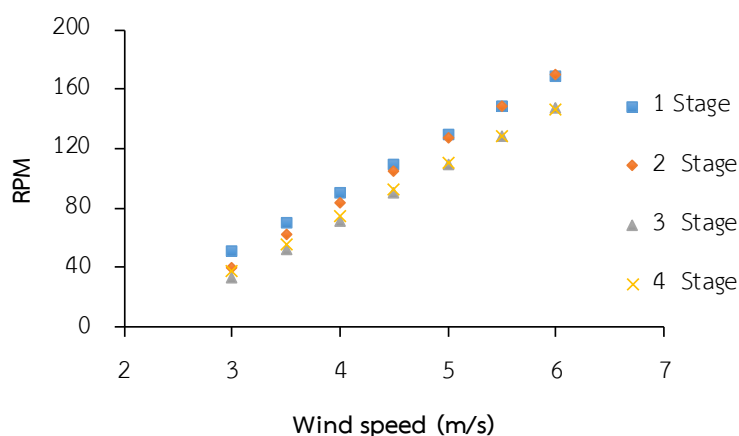
ภาพที่ 68 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วลมเริ่มหมุนระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

3. อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังงานเต็มที่

การศึกษาอัตราเร็วรอบของกังหันลมแต่ละชั้น พบว่าในช่วงอัตราเร็วลม 3-5 m/s กังหันลมมีอัตราเร็วรอบลดลงเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราเร็วลมมากกว่า 5 m/s กังหันลม 1 กับ 2 ชั้น และ 3 กับ 4 ชั้น มีอัตราเร็วรอบเท่า ๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 69 และตารางที่ 11 โดยแต่ละจำนวนชั้นมีอัตราเร็วรอบต่างกันน้อยมาก เมื่อเทียบกับการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบและมุมใบ นั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนชั้นโดยการวางตำแหน่งใบแต่ละชั้นทำให้กังหันลมหมุนได้ราบเรียบมากขึ้น และส่งผลต่อการลดลงของอัตราเร็วรอบน้อยมาก ถึงแม้ว่าพื้นที่ใบของกังหันลดลง เนื่องจากแผ่นยึดใบของแต่ละชั้นที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วรอบที่ได้จากแบบจำลองในสมการที่ 33 กับการทดสอบพบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9887 และ RMSE เท่ากับ ± 4.2595 RPM ดังภาพที่ 70

$$\text{RPM} = 39.178(V) - 6.6443(N_s) - 59.686$$

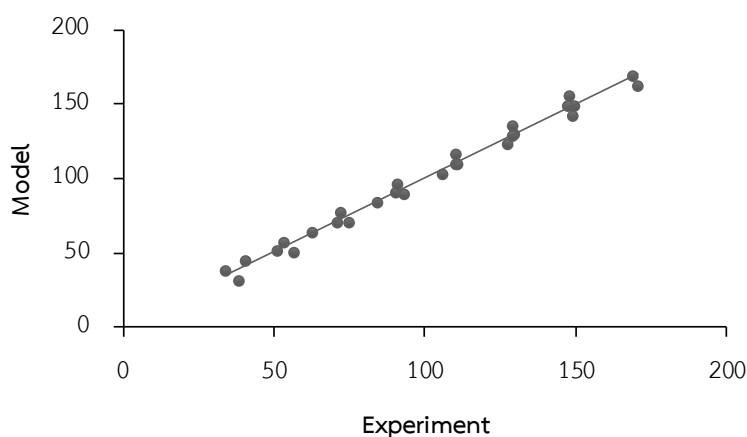
สมการที่ 33



ภาพที่ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบกับอัตราเร็วลมของกังหันลมแต่ละชั้น

ตารางที่ 11 อัตราเร็วรอบของกังหันลมแต่ละชั้นที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ

อัตราเร็วลม (m/s)	Rated rotational speed (RPM)			
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น
3.0	51.27	40.85	34.21	38.63
3.5	70.91	62.49	53.17	56.73
4.0	90.56	84.13	72.14	74.83
4.5	110.20	105.76	91.11	92.94
5.0	129.85	127.40	110.08	111.04
5.5	149.49	149.04	129.05	129.15
6.0	169.14	170.68	148.02	147.25



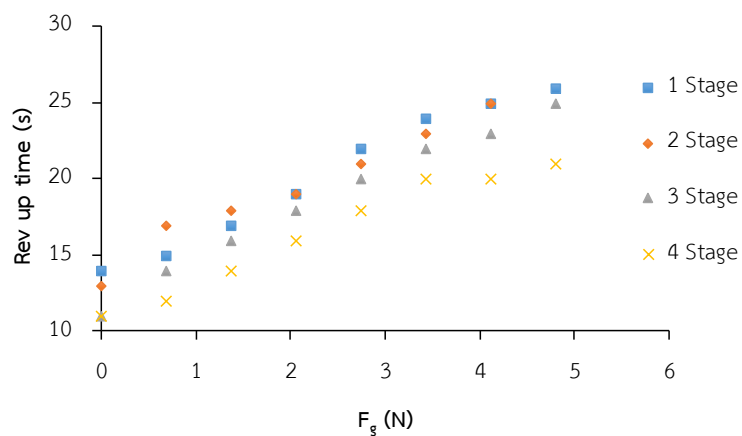
ภาพที่ 70 กราฟเปรียบเทียบอัตราเร็วรอบจากแบบจำลองกับการทดสอบของการปรับจำนวนชั้น

4. ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่

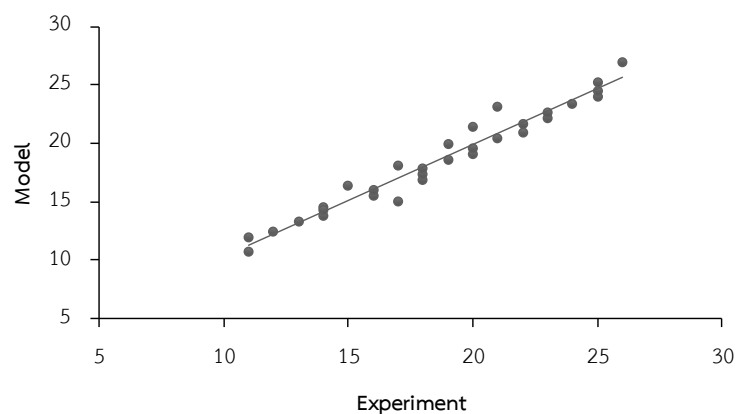
จากการวิเคราะห์ค่า Rev up time ของกังหันลมแต่ละชั้นที่มีแรงกระทำในระดับต่าง ๆ ที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4.88 m/s ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาที่กังหันลมหมุนเข้าสู่อัตราเร็วรอบคงที่มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อกังหันลมมีจำนวนชั้นสูงขึ้น ดังภาพที่ 71 และตารางที่ 12 ซึ่งจากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากสมการที่ 34 กับค่าจากการทดสอบ พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9573 และ RMSE เท่ากับ ± 0.89 s ดังภาพที่ 72

$$T_{\text{Rev}, N_s} = 2.589(F_g) - 1.285(N_s) + 15.889$$

สมการที่ 34



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่าง Rev up time ของกังหันลม 16 ใบ ที่จำนวนชั้นต่าง ๆ



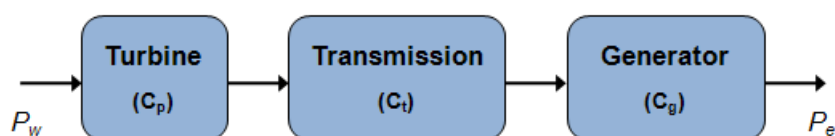
ภาพที่ 72 กราฟเปรียบเทียบค่า Rev up time ระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบ

ตารางที่ 12 Rev up time กับแรงที่กระทำต่อเพลากังหันที่จำนวนใบต่าง ๆ

load (N)	Rev up time (s)			
	1 ชั้น	2 ชั้น	3 ชั้น	4 ชั้น
0.00	14	13	11	11
0.69	15	17	14	12
1.37	17	18	16	14
2.06	19	19	18	16
2.75	22	21	20	18
3.43	24	23	22	20
4.12	25	25	23	20
4.81	26	-	25	21

การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าของกังหันลม

พลังงานทั้งหมดที่ส่งไปยังกังหันลมสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการของพลังงานจลน์ของลม ซึ่งกระบวนการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานงานไฟฟ้านั้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพตามที่แสดงในภาพที่ 73 ฉะนั้น กำลังไฟฟ้าของกังหันลมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 35 ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างพลังงานลมกับประสิทธิภาพโดยรวม (Overall efficiency, C_{tot}) จากกระบวนการเปลี่ยนพลังงาน



ภาพที่ 73 กระบวนการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม

ที่มา : MathWorks (n.d.)

$$P_e = \frac{C_{tot} \rho A V^3}{2}$$

สมการที่ 35

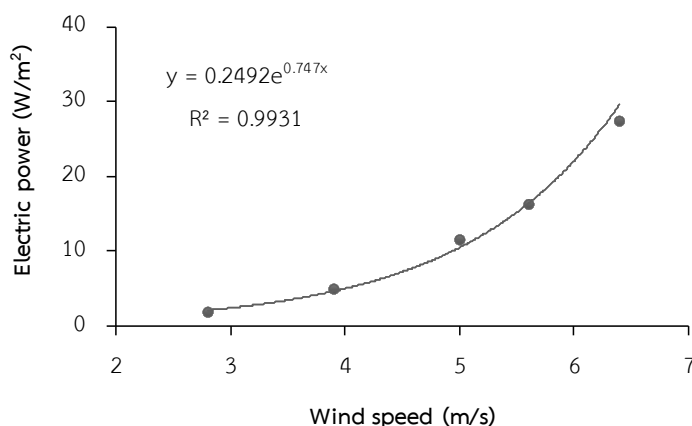
เมื่อ C_{tot} คือ ประสิทธิภาพโดยรวม = $C_p C_t C_g$

C_p คือ สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม

C_t คือ ประสิทธิภาพของระบบส่งถ่ายกำลัง

C_g คือ ประสิทธิภาพของเจนเนอเรเตอร์

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมีการกำหนดเงื่อนไขในกรณีศึกษากังหันลมชนิดชาโวเนียส 16 ใบ จำนวน 1 ชั้น เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดในช่วงอัตราเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทย โดยเลือกใช้ระบบถ่ายทอดกำลังแบบสายพานแบน (Flat belts) จากพูลเลย์ของเพลากังหันไปยังพูลเลย์ของเพลตาม ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้สายพาน คือ มีราคาถูกและใช้งานง่าย รับแรงกระตุกและการสั่นสะเทือนได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียง แต่ต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างเพลารับหรือปรับแรงตึงในสายพานระหว่างการใช้งาน นอกจากนั้นยังไม่อาจใช้งานที่มีอัตราทดสูงมากได้ โดยประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังแบบสายพานและเจนเนอเรเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าประมาณ 85 % (ธนศิลป์ ล้อมทอง, 2554) จากการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงอัตราเร็วลมที่ทดสอบจะมีค่าต่างกันไปเนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่อัตราเร็วลมต่าง ๆ ดังภาพที่ 74 และตารางที่ 13 โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 27.46 W/m^2



ภาพที่ 74 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของกังหันลมกับระดับอัตราเร็วลมต่าง ๆ

ตารางที่ 13 การประเมินกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมชนิดซาโวเนียส 16 ใบ

C_s (Value)	0.85				
C_t (Value)	0.85				
C_p (Value)	0.20	0.20	0.22	0.22	0.25
V (m/s)	2.80	3.90	5.00	5.60	6.40
P_T (W/m^2)	2.55	6.88	15.95	22.41	38.01
P_e (W/m^2)	1.84	4.97	11.52	16.19	27.46

สมการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบซาโวเนียส

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ 5 ตัวแปร ได้แก่ 1) จำนวนใบที่ได้จากการทดสอบจำนวน 4-18 ใบ 2) มุมปะทะ (Angle of attack, α) ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นชะยากับทิศทางลม โดยมีทั้งหมด 5 มุม คือ 75° , 85° , 90° , 95° และ 105° 3) อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วปลายใบกับอัตราเร็วลมที่ใช้ในการทำนายสมการเท่ากับ 4 m/s 4) โหลดที่กระทำต่อเพลานำมาวิเคราะห์หามีค่าตั้งแต่ 0.07 - 0.49 kg และ 5) อุณหภูมิอากาศภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดที่มีค่า 21 - 32 C° จากรายละเอียดตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมามีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 135 ข้อมูล โดยจะนำไปสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตามหรือค่าสัมประสิทธิ์กำลัง ซึ่งผลการทำนายสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบซาโวเนียสแสดงดังสมการที่ 36 เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่ามีค่า RMSR เท่ากับ 0.2250 ± 0.1347 และ R^2 เท่ากับ 0.7849 จากค่าดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าสมการที่ได้มีค่าความผิดพลาดค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นไปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์การถดถอย

เชิงเส้นของสมการมีความซับซ้อนต่ำเกินไป และอาจจะมีตัวแปรอื่น ๆ เช่น กำลังของกังหันลมที่เปลี่ยนไปเนื่องจากมุมปะทะที่เปลี่ยนตามการหมุนของกังหันลม ดังนั้นในการวิจัยควรศึกษาตัวแปรเพิ่มขึ้นและเลือกใช้วิธีการทำนายสมการที่เหมาะสมกับข้อมูล เพื่อให้สมการที่ได้มีความผิดพลาดน้อยลง และสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมได้

$$C_p = (0.001528 \times N_B) + (0.000392 \times \alpha) + (0.187081 \times F_g) + (0.126 \times \lambda) - (0.00236 \times T) - 0.003636$$

สมการที่ 36



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบ มุมใบ และจำนวนชั้นต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวเนียส ตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวในบทที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สัมประสิทธิ์แรงบิด อัตราเร็วเริ่มหมุน อัตราเร็วรอบที่กังหันลมผลิตกำลังคงที่ และระยะเวลาที่กังหันลมใช้ในการหมุนเข้าสู่อัตราเร็วรอบคงที่ ซึ่งการทดสอบกังหันลมจะปรับจำนวนใบ 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ มุมใบ -15° , -5° , 0° , 5° , 15° องศา และจำนวนชั้น 1-4 ชั้น โดยทดสอบในช่วงอัตราเร็วลม 2-7 m/s และปรับภาระโหลดที่เพลาระหว่าง 0-0.49 kg สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลม

ผลการทดสอบการกระจายของอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลม ที่มีความยาว 9.5 m พบว่าการกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m จากทางเข้าของอุโมงค์ลม มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ทำงานประมาณ 50×50 cm

2. อิทธิพลของจำนวนใบต่อสมรรถนะกังหันลม

ผลการทดสอบสมรรถนะของกังหันลมที่ พบว่ากังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุด ที่อัตราเร็วลมต่ำกว่า 4.5 m/s โดยมีอัตราเร็วลมเริ่มหมุน และระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่ต่ำสุดเท่ากับ 2.12 m/s และ 28 s ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเร็วลมระหว่าง 2-7 m/s กังหันลม 18 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุด สำหรับอัตราเร็วรอบของกังหันลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราเร็วลมและจำนวนใบ

3. อิทธิพลของมุมใบต่อสมรรถนะกังหันลม

ผลการทดสอบสมรรถนะของกังหันลมแต่ละจำนวนใบที่มุมใบต่าง ๆ พบว่า กังหันลมแต่ละจำนวนใบมีมุมที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดต่างกัน ซึ่งการปรับมุมสำหรับกังหันลมที่มีจำนวนใบน้อย ๆ ส่งผลดีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมเมื่อเทียบกับมุมอ้างอิง โดยกังหันลม 16 ใบ มุมใบ 5° มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดเท่ากับ 0.2519 และ 0.5858 ตามลำดับ ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายใบประมาณ 0.34 ซึ่งค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำสุดเท่ากับ 2.53 m/s และระยะเวลาที่กังหันลมหมุนคงที่เท่ากับ 25 s

4. อิทธิพลของจำนวนชั้นต่อสมรรถนะกังหันลม

การเพิ่มจำนวนชั้นส่งผลดีต่อสมรรถนะของกังหันลมคือ กังหันลมมีค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำ ใช้เวลาสำหรับการหมุนเข้าสู่อัตราเร็วรอบได้เร็วขึ้น สามารถรับลมได้ทุกทิศทางและหมุนราบเรียบยิ่งขึ้นซึ่งเป็นผลจากการวางตำแหน่งใบของแต่ละชั้น แต่การเพิ่มจำนวนชั้นนั้นทำให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง

5. ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลม

ผลการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ได้ในช่วงอัตราเร็วลมที่ทดสอบพบว่ากังหันลม 16 ใบ ที่มีพื้นที่รับลม 1 m^2 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด 27.46 W/m^2 และสำหรับที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4 m/s สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 4.95 W/m^2

ข้อเสนอแนะ

- 1) อุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบยังความสามารถจำกัดในการสร้างอัตราเร็วลม และกระจายอัตราเร็วลมภายในที่สม่ำเสมอ เนื่องจากอุโมงค์ลมแบบเปิด มีข้อจำกัดคือไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในได้ ดังนั้น ควรมีการปรับปรุงรูปแบบเพื่อให้การกระจายอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอและราบเรียบยิ่งขึ้น
- 2) ควรคำนึงถึงสถานที่ที่ใช้สำหรับติดตั้งอุโมงค์ลม เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนจากลมภายนอก และสิ่งกีดขวางทั้งส่วนทางเข้าและทางออก
- 3) ควรศึกษาอิทธิพลของรัศมีกังหันลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกังหันลม
- 4) ควรศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมด้วยสำหรับกังหันแต่ละรูปแบบ เพื่อให้ทราบผลที่เด่นชัดและสนับสนุนผลที่ได้จากการทดสอบ
- 5) ควรมีการวิจัยต่อยอดในการผลิตกระแสไฟฟ้า สำหรับกังหันลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎี

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. **สารานุกรมพลังงานทดแทน**. กรุงเทพมหานคร.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. [ม.ป.ป.]. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=42195. (15 มิถุนายน 2560).
- กรมอุตุนิยมวิทยา. [ม.ป.ป.]. **ลมมรสุม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52>. (19 มิถุนายน 2560).
- กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. [ม.ป.ป.]. **คู่มือการพัฒนาและลงทุนผลิตพลังงานทดแทน. ไฟฟ้าพลังงานลม, 2-4**.
- กฤษฎา แสนใจกล้า คณาพจน์ คัมภีรานนท์ และอภิสิทธิ์ ชุมภู. 2556. **อุโมงค์ลมสำหรับทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา: ตาก.
- กองทัพอากาศ, พลังงานทดแทน. [ม.ป.ป.]. **พลังงานลม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.rtafaltenegy.com/15035436/-พลังงานลม>. (1 กรกฎาคม 2560).
- กานต์นลิน ชีร์รัตนานนท์. [ม.ป.ป.]. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=43412. (25 เมษายน 2560).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. [ม.ป.ป.]. **สถิติความต้องการใช้ไฟฟ้ารายปี**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&layout=edit&id=353&Itemid=200. (1 กรกฎาคม 2560).
- เกียรติขจร สุเวชเวทิน. 2552. **การออกแบบกังหันลมแกนตั้งประสิทธิภาพสูง**. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์: ปทุมธานี.
- เครื่องวัดความเร็วลม**. [ม.ป.ป.]. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.technotestsystem.com/15144320/เครื่องวัดความเร็วลม-anemometer>. (26 มิถุนายน 2560).
- ธเนศ ไชยชนะ. 2559. **เอกสารวิศวกรรมพลังงานลม**. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธนุศิลป์ ลิ้มทอง. 2554. **การศึกษาการออกแบบสายพานลำเลียงที่เหมาะสมโดยวิธีการเศรษฐศาสตร์**. คณะวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร: กรุงเทพมหานคร.
- ภัทรภรณ์ หิรัญวงศ์ และสิงห์พันธุ์ สิงห์เสนี. 2015. **อนาคตพลังงานไฟฟ้าไทย พอเพียงแต่เสี่ยงภัย**.

FAQ (Focused and Quick), 102.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. [ม.ป.ป.]. **การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Internal%20Combustion%20Engine%20Part%20I/6_2.html. (30 กันยายน 2561).

วิกิพีเดีย. [ม.ป.ป.]. **ภูมิศาสตร์ประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A0%E0%B8%B9%E0%B8%A1%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%AA%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%A2>. (27 มิถุนายน 2560).

สมจิต ชินะใจ. 2550. **การวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนตั้งโดยใช้กรอบเสริมกันบังคับลมเข้า**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่: เชียงใหม่.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. [ม.ป.ป.]. **แผนบูรณาการพลังงานระยะยาว**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb>. (18 มิถุนายน 2560)

A. Rezaeiha, I. Kalkman and B. Blocken. 2017. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. **Applied Energy**, 179, 132-150.

B. Loganathan, H. Chowdhury, I. Mustary and F. Alam. 2015. An experimental study of a cyclonic vertical axis wind turbine for domestic scale power generation. **Procedia Engineering**, 105, 686-691.

B. Loganathan, I. Mustary, H. Chowdhury and F. Alam. 2014a. Aerodynamic Behaviour of Small Savonius Turbine with 3 Different Configurations. **9th Australasian Fluid Mechanics Conference Melbourne**.

B. Loganathan, I. Mustary, H. Chowdhury and F. Alam. 2017. Effect of turbulence on a Savonius type micro wind turbine. **Procedia Engineering**, 110, 549-554.

_____. 2014b. Study of a Savonius Type Wind Turbines for its Aerodynamic Characteristics. **9th Australasian Fluid Mechanics Conference Melbourne**,

F. Wenehenubuna, A. Saputraa and H. Sutantoa. 2015. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. **Energy Procedia**, 68, 297-304.

- M.R. Castelli, S.D. Betta and E. Benini. 2012. Effect of Blade Number on a Straight-Bladed Vertical-Axis Darreius Wind Turbine. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, 69-74.
- Mathworks.com. [n.d.]. **Modeling the Power Generated by a Wind Turbine**. [Online]. Available from. https://www.mathworks.com/products/demos/symbolictlbx/Wind_turbine/Wind_turbine_power.html. (20 September 2018).
- N. Korprasertsak and T. Leephakpreeda. 2015. CFD-Based Power Analysis on Low Speed Vertical Axis Wind Turbines with Wind Boosters. **Energy Procedia**, 79, 963-8.
- N.H. Mahmoud, A.A. El-Haroun, E. Wahba and M.H. Nasef, E. Wahba and M.H. Nasef. 2012. An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. **Alexandria Engineering Journal**, 51, 19-25.
- Q.A. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, K. Furukawa and M. Yamamoto. 2015. Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine. **Energy**, 90, 784-795.
- Q.A. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, T. Kogaki, T. Ogasawara and M. Yamamoto. 2016. Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test. **Renewable Energy**, 90, 291-300.
- R.D. S. Salim, A. Shankar, M. Safwan and S. D'sa. 2016. Wind Tunnels: State of Art Survey and Future Scope for Testing Micro Air Vehicles. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences (ASRJETS)**, 19(1), 25-41.
- T. Chaichana. 2010. **Design and development of a small vertical co-axis counter-rotation wind turbine system for electricity generation**. Chiangmai University: Chiangmai.
- T. Chaichana and S. Chaitep. 2015. Performance Evaluation of Co-Axis Counter-Rotation Wind Turbine. **Energy Procedia**, 79, 149-156.
- U.K. Saha, S. Thotla and D. Maity. 2008. Optimum design configuration of Savonius

rotor through wind tunnel experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 96, 1359-1375.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดสอบกัณฑ์มนชนิดาไวเนียส

ตารางผนวกที่ 1 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 4 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	3.02	0.00	39.13	29.90	0.20	0.0291	0.1430
	2.99	0.07	13.88	29.70	0.07	0.0229	0.3140
2	4.07	0.00	66.02	29.30	0.25	0.0185	0.0726
	4.09	0.07	47.78	29.60	0.18	0.0348	0.1893
	4.23	0.14	27.97	29.50	0.10	0.0260	0.2506
	4.02	0.21	18.57	29.10	0.07	0.0237	0.3271
3	5.27	0.00	102.83	28.60	0.31	0.0147	0.0480
	5.17	0.07	89.25	28.40	0.27	0.0379	0.1398
	5.20	0.14	71.60	27.90	0.22	0.0478	0.2210
	5.20	0.21	56.07	28.10	0.17	0.0450	0.2656
	5.33	0.28	43.92	27.90	0.13	0.0394	0.3045
	5.17	0.35	35.77	27.80	0.11	0.0383	0.3527
	5.23	0.42	26.93	27.70	0.08	0.0246	0.3046
	5.17	0.49	23.80	27.10	0.07	0.0138	0.1904
4	5.77	0.00	125.68	23.70	0.34	0.0178	0.0519
	5.63	0.07	109.23	23.70	0.30	0.0406	0.1333
	5.73	0.14	96.73	23.70	0.26	0.0476	0.1798
	5.60	0.21	84.45	23.80	0.24	0.0601	0.2537
	5.47	0.28	67.98	23.90	0.20	0.0663	0.3396
	5.50	0.35	57.82	23.90	0.17	0.0551	0.3338
	5.43	0.42	48.03	24.10	0.14	0.0504	0.3629
	5.57	0.49	39.63	24.10	0.11	0.0409	0.3655
5	6.67	0.00	136.03	25.70	0.32	0.0118	0.0367
	6.80	0.07	121.47	26.00	0.28	0.0254	0.0907
	6.70	0.14	108.72	26.50	0.25	0.0369	0.1448
	6.80	0.21	103.23	26.30	0.24	0.0441	0.1852
	6.60	0.28	94.70	26.70	0.23	0.0564	0.2506

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.63	0.35	78.65	26.90	0.19	0.0513	0.2756
	6.70	0.42	74.40	27.00	0.17	0.0564	0.3234
	6.50	0.49	65.12	27.00	0.16	0.0488	0.3105

ตารางผนวกที่ 2 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 4 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.92	0.00	31.58	27.20	0.17	0.0286	0.1679
2	3.79	0.00	58.48	27.50	0.24	0.0238	0.0983
	4.01	0.07	48.23	27.10	0.19	0.0426	0.2252
	3.96	0.14	29.08	27.30	0.12	0.0358	0.3102
3	5.00	0.00	96.80	27.50	0.30	0.0132	0.0435
	5.17	0.07	81.90	27.50	0.25	0.0320	0.1286
	5.13	0.14	74.47	27.70	0.23	0.0453	0.1990
	5.20	0.21	64.02	27.80	0.19	0.0506	0.2617
	5.17	0.28	56.10	27.90	0.17	0.0467	0.2737
	5.20	0.35	41.92	27.90	0.13	0.0375	0.2967
	5.17	0.42	32.70	27.90	0.10	0.0340	0.3420
	5.20	0.49	23.47	27.70	0.07	0.0209	0.2946
4	5.67	0.00	114.52	27.50	0.32	0.0115	0.0363
	5.53	0.07	105.22	27.00	0.30	0.0339	0.1137
	5.53	0.14	96.57	27.10	0.27	0.0461	0.1683
	5.67	0.21	87.63	27.10	0.24	0.0402	0.1656
	5.63	0.28	78.52	27.10	0.22	0.0475	0.2171
	5.67	0.35	68.72	27.40	0.19	0.0512	0.2687
	5.67	0.42	60.00	27.90	0.17	0.0410	0.2466
	5.57	0.49	49.38	27.90	0.14	0.0465	0.3340
5	6.37	0.00	130.62	28.40	0.32	0.0090	0.0280
	6.47	0.07	119.87	28.30	0.29	0.0247	0.0848

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.77	0.14	107.42	27.60	0.25	0.0230	0.0924
	6.63	0.21	102.92	27.40	0.24	0.0301	0.1236
	6.43	0.28	94.70	27.30	0.23	0.0472	0.2043
	6.50	0.35	85.38	27.30	0.21	0.0506	0.2451
	6.40	0.42	74.32	27.30	0.18	0.0482	0.2644
	6.43	0.49	63.65	27.20	0.16	0.0443	0.2852

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 4 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	3.02	0.00	33.02	27.40	0.17	0.0285	0.1660
2	4.14	0.00	61.98	27.40	0.23	0.0189	0.0804
	4.16	0.07	42.80	27.50	0.16	0.0242	0.1496
	4.14	0.14	33.20	27.50	0.13	0.0265	0.2100
	4.85	0.00	92.83	24.80	0.30	0.0219	0.0729
3	4.88	0.07	84.50	25.00	0.27	0.0418	0.1537
	4.80	0.14	75.80	25.10	0.25	0.0608	0.2453
	4.77	0.21	67.75	25.10	0.22	0.0588	0.2638
	4.82	0.28	57.87	25.30	0.19	0.0592	0.3142
	4.81	0.35	44.97	25.40	0.15	0.0490	0.3339
	4.82	0.42	35.25	25.70	0.11	0.0452	0.3936
	4.87	0.49	25.02	25.60	0.08	0.0307	0.3811
	5.33	0.00	116.67	25.90	0.34	0.0164	0.0479
4	5.40	0.07	105.37	25.80	0.31	0.0429	0.1400
	5.33	0.14	94.82	25.90	0.28	0.0595	0.2133
	5.40	0.21	85.40	26.00	0.25	0.0624	0.2515
	5.53	0.28	78.80	26.10	0.22	0.0625	0.2796
	5.43	0.35	68.95	26.30	0.20	0.0709	0.3558
	5.40	0.42	59.82	26.20	0.17	0.0583	0.3354

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.33	0.49	47.75	26.40	0.14	0.0531	0.3776
	6.30	0.00	126.71	26.20	0.32	0.0097	0.0306
	6.37	0.07	113.67	26.20	0.28	0.0235	0.0837
	6.40	0.14	105.85	26.40	0.26	0.0348	0.1341
5	6.37	0.21	99.75	26.60	0.25	0.0451	0.1835
	6.50	0.28	89.05	26.80	0.22	0.0408	0.1898
	6.40	0.35	79.48	26.70	0.19	0.0515	0.2640
	6.60	0.42	66.52	26.70	0.16	0.0402	0.2543
	6.57	0.49	58.22	26.70	0.14	0.0380	0.2728

ตารางผนวกที่ 4 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 4 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.91	0.00	32.38	20.36	0.17	0.0305	0.1746
	3.97	0.00	69.58	20.70	0.27	0.0322	0.1173
2	4.06	0.07	45.90	20.90	0.18	0.0435	0.2452
	4.07	0.14	28.47	21.00	0.11	0.0343	0.3123
	4.90	0.00	98.22	21.20	0.31	0.0187	0.0593
	4.90	0.07	84.43	21.70	0.27	0.0454	0.1679
	4.87	0.14	69.87	21.70	0.23	0.0584	0.2592
3	4.77	0.21	63.00	21.60	0.21	0.0658	0.3169
	4.93	0.28	44.42	21.80	0.14	0.0444	0.3138
	4.97	0.35	32.52	21.90	0.10	0.0351	0.3416
	4.77	0.42	25.83	22.00	0.09	0.0325	0.3822
	5.57	0.00	119.03	24.40	0.34	0.0141	0.0420
	5.57	0.07	108.37	25.20	0.31	0.0464	0.1517
4	5.40	0.14	101.07	24.90	0.29	0.0705	0.2399
	5.33	0.21	83.38	25.20	0.25	0.0782	0.3187
	5.43	0.28	68.07	24.80	0.20	0.0696	0.3540

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
5	5.40	0.35	59.48	25.00	0.17	0.0690	0.3989
	5.47	0.42	51.15	25.50	0.15	0.0629	0.4280
	5.43	0.49	35.87	25.40	0.10	0.0476	0.4598
	6.37	0.00	140.25	25.30	0.35	0.0098	0.0283
	6.37	0.07	126.05	25.40	0.31	0.0363	0.1169
	6.33	0.14	107.52	25.20	0.27	0.0464	0.1742
	6.53	0.21	107.58	26.10	0.26	0.0572	0.2214
	6.33	0.28	104.90	26.00	0.26	0.0696	0.2677
	6.00	0.35	89.00	25.90	0.23	0.0813	0.3491
	6.40	0.42	80.22	26.00	0.20	0.0721	0.3661
	6.40	0.49	74.48	26.30	0.18	0.0666	0.3643

ตารางผนวกที่ 5 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 4 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.79	0.00	34.47	26.60	0.19	0.0259	0.1338
2	3.78	0.00	68.33	26.70	0.28	0.0375	0.1320
	3.93	0.07	50.28	27.00	0.20	0.0529	0.2629
	3.85	0.14	30.05	26.90	0.12	0.0437	0.3565
	3.84	0.21	19.98	26.70	0.08	0.0359	0.4393
3	5.07	0.00	103.27	26.20	0.32	0.0187	0.0584
	5.00	0.07	92.53	26.50	0.29	0.0437	0.1504
	5.10	0.14	80.08	26.80	0.25	0.0550	0.2231
	5.00	0.21	68.28	26.90	0.21	0.0612	0.2853
	5.00	0.28	51.23	27.00	0.16	0.0574	0.3566
	5.17	0.35	44.18	27.10	0.13	0.0485	0.3609
	5.07	0.42	35.50	26.50	0.11	0.0389	0.3540
	5.07	0.49	29.53	26.40	0.09	0.0376	0.4108
4	5.60	0.00	126.83	26.60	0.36	0.0146	0.0410

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.57	0.07	117.00	27.30	0.33	0.0401	0.1214
	5.63	0.14	106.70	27.20	0.30	0.0508	0.1709
	5.57	0.21	96.78	27.50	0.27	0.0619	0.2269
	5.63	0.28	88.45	27.00	0.25	0.0679	0.2756
	5.50	0.35	76.97	27.10	0.22	0.0704	0.3206
	5.57	0.42	67.28	26.80	0.19	0.0688	0.3624
	5.60	0.49	57.13	27.30	0.16	0.0626	0.3911
5	6.47	0.00	139.78	26.70	0.34	0.0106	0.0312
	6.43	0.07	127.22	26.80	0.31	0.0305	0.0981
	6.50	0.14	127.50	27.20	0.31	0.0473	0.1536
	6.47	0.21	118.15	27.00	0.29	0.0574	0.2000
	6.47	0.28	103.43	26.70	0.25	0.0558	0.2223
	6.43	0.35	95.38	26.60	0.23	0.0636	0.2733
	6.50	0.42	83.50	26.60	0.20	0.0604	0.2997
	6.63	0.49	76.17	26.50	0.18	0.0500	0.2776

ตารางผนวกที่ 6 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 6 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	3.06	0.00	45.25	27.90	0.23	0.0349	0.1504
	4.07	0.00	70.10	27.80	0.27	0.0179	0.0661
	4.17	0.07	62.18	27.80	0.23	0.0443	0.1889
2	4.08	0.14	53.32	27.90	0.21	0.0515	0.2508
	4.13	0.21	30.82	28.30	0.12	0.0346	0.2948
	4.13	0.28	13.68	28.30	0.05	0.0143	0.2743
	5.23	0.00	104.57	28.30	0.31	0.0151	0.0481
3	5.27	0.07	94.98	28.70	0.28	0.0356	0.1258
	5.33	0.14	87.25	28.80	0.26	0.0487	0.1895
	5.23	0.21	80.42	28.80	0.24	0.0479	0.1985

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
4	5.27	0.28	72.07	28.60	0.21	0.0745	0.3470
	5.27	0.35	65.38	28.50	0.19	0.0664	0.3407
	5.33	0.42	45.75	28.60	0.13	0.0483	0.3585
	5.27	0.49	32.90	28.40	0.10	0.0398	0.4058
	5.83	0.00	126.73	28.60	0.34	0.0124	0.0365
	5.63	0.07	115.23	28.70	0.32	0.0416	0.1295
	5.87	0.14	105.73	28.70	0.28	0.0593	0.2095
	5.77	0.21	96.35	28.80	0.26	0.0740	0.2821
5	5.77	0.28	90.05	29.00	0.25	0.0785	0.3201
	5.77	0.35	84.73	29.10	0.23	0.0745	0.3230
	5.90	0.42	80.65	29.20	0.21	0.0611	0.2846
	5.90	0.49	78.18	29.30	0.21	0.0558	0.2684
	6.57	0.00	145.32	29.00	0.35	0.0085	0.0244
	6.73	0.07	132.88	29.30	0.31	0.0264	0.0853
	6.87	0.14	122.92	29.10	0.28	0.0444	0.1578
	6.87	0.21	115.32	29.20	0.26	0.0536	0.2032
	7.83	0.28	106.02	29.00	0.21	0.0354	0.1666
	6.83	0.35	100.60	28.80	0.23	0.0495	0.2142
	6.63	0.42	102.12	28.70	0.24	0.0595	0.2460
	6.80	0.49	96.87	29.20	0.22	0.0664	0.2971

ตารางผนวกที่ 7 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 6 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	3.01	0.00	39.52	29.20	0.21	0.0303	0.1468
	2.99	0.07	24.00	29.20	0.13	0.0424	0.3369
2	4.22	0.00	68.23	29.20	0.25	0.0160	0.0631
	4.18	0.07	55.97	29.30	0.21	0.0389	0.1849
	4.10	0.14	42.90	29.50	0.16	0.0434	0.2643

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	4.05	0.21	33.23	29.50	0.13	0.0461	0.3574
	4.11	0.28	14.27	29.60	0.05	0.0180	0.3294
3	5.33	0.00	120.67	29.30	0.36	0.0166	0.0467
	5.27	0.07	100.08	29.80	0.30	0.0426	0.1429
	5.37	0.14	88.17	29.90	0.26	0.0584	0.2264
	5.27	0.21	70.55	29.60	0.21	0.0519	0.2468
	5.23	0.28	58.53	30.10	0.18	0.0554	0.3153
	5.23	0.35	49.03	29.80	0.15	0.0569	0.3866
	5.03	0.42	39.65	25.60	0.12	0.0409	0.3305
	4.97	0.49	31.13	25.60	0.10	0.0357	0.3626
4	5.40	0.00	143.48	25.80	0.42	0.0147	0.0351
	5.37	0.07	123.52	25.80	0.36	0.0510	0.1410
	5.47	0.14	108.93	25.90	0.31	0.0620	0.1980
	5.53	0.21	98.03	25.90	0.28	0.0707	0.2541
	5.53	0.28	85.05	26.10	0.24	0.0757	0.3136
	5.43	0.35	75.58	26.30	0.22	0.0818	0.3745
	5.43	0.42	67.00	26.40	0.19	0.0567	0.2927
	5.37	0.49	56.72	26.50	0.17	0.0755	0.4550
5	6.40	0.00	170.53	26.70	0.42	0.0157	0.0376
	6.37	0.07	154.90	26.80	0.38	0.0402	0.1053
	6.33	0.14	137.17	26.90	0.34	0.0592	0.1740
	6.23	0.21	123.87	27.10	0.31	0.0556	0.1781
	6.27	0.28	115.57	27.10	0.29	0.0661	0.2283
	6.33	0.35	101.05	27.10	0.25	0.0596	0.2378
	6.17	0.42	88.35	27.10	0.22	0.0735	0.3266
	6.27	0.49	79.05	27.20	0.20	0.0746	0.3769

ตารางผนวกที่ 8 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 6 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T ($^\circ\text{C}$)	TSR	C_p	C_T
1	2.95	0.00	31.25	23.80	0.17	0.0325	0.1959
2	3.85	0.00	75.35	23.90	0.31	0.0320	0.1041
	3.98	0.07	46.95	24.40	0.19	0.0450	0.2430
	3.83	0.14	31.97	24.30	0.13	0.0444	0.3384
	4.01	0.21	21.42	24.40	0.08	0.0297	0.3538
	4.97	0.00	121.82	24.70	0.39	0.0192	0.0498
3	4.93	0.07	102.68	24.80	0.33	0.0486	0.1488
	5.07	0.14	72.65	24.80	0.23	0.0454	0.2019
	4.97	0.21	60.65	24.90	0.19	0.0509	0.2657
	5.03	0.28	52.60	25.10	0.16	0.0498	0.3037
	5.07	0.35	43.68	25.40	0.14	0.0415	0.3066
	5.07	0.42	30.57	25.30	0.09	0.0320	0.3383
	5.17	0.49	20.95	25.60	0.06	0.0209	0.3276
4	5.53	0.00	157.75	26.00	0.45	0.0191	0.0426
	5.53	0.07	132.62	26.20	0.38	0.0490	0.1302
	5.60	0.14	122.90	26.30	0.34	0.0662	0.1922
	5.60	0.21	110.93	26.50	0.31	0.0718	0.2307
	5.57	0.28	93.42	26.60	0.26	0.0694	0.2635
	5.47	0.35	74.57	26.70	0.21	0.0559	0.2609
	5.63	0.42	66.10	26.80	0.18	0.0489	0.2653
	5.63	0.49	58.30	27.00	0.16	0.0536	0.3299
5	6.23	0.00	183.65	26.90	0.46	0.0150	0.0324
	6.40	0.07	167.83	26.90	0.41	0.0443	0.1075
	6.50	0.14	139.73	27.10	0.34	0.0482	0.1427
	6.67	0.21	126.05	27.30	0.30	0.0591	0.1991
	6.53	0.28	96.98	27.50	0.23	0.0508	0.2178
	6.67	0.35	85.73	27.50	0.20	0.0461	0.2284

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.77	0.42	77.83	27.50	0.18	0.0455	0.2517
	6.80	0.49	76.05	28.00	0.18	0.0499	0.2840

ตารางผนวกที่ 9 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 6 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.17	0.00	21.23	30.90	0.15	0.0384	0.2500
2	3.12	0.00	57.80	30.90	0.29	0.0395	0.1357
	3.16	0.07	23.67	31.20	0.12	0.0351	0.2983
3	4.03	0.00	87.20	31.40	0.34	0.0311	0.0917
	4.15	0.07	56.98	31.60	0.22	0.0545	0.2529
	4.27	0.14	39.15	31.90	0.14	0.0517	0.3592
	4.28	0.21	22.95	32.10	0.08	0.0347	0.4121
	4.26	0.28	9.45	32.00	0.03	0.0146	0.4197
4	5.60	0.00	136.40	31.70	0.38	0.0122	0.0319
	5.63	0.07	116.42	31.10	0.32	0.0494	0.1523
	5.60	0.14	99.98	31.10	0.28	0.0671	0.2394
	5.53	0.21	69.53	31.40	0.20	0.0623	0.3156
	5.67	0.28	59.43	31.50	0.16	0.0591	0.3586
	5.57	0.35	46.10	31.20	0.13	0.0571	0.4391
	5.53	0.42	36.27	31.20	0.10	0.0496	0.4824
	5.53	0.49	8.70	31.30	0.02	0.0123	0.4977
5	6.23	0.00	164.92	32.00	0.42	0.0132	0.0318
	6.23	0.07	151.60	31.70	0.38	0.0352	0.0921
	6.13	0.14	141.28	31.80	0.36	0.0510	0.1411
	6.23	0.21	113.47	31.90	0.29	0.0872	0.3051
	6.17	0.28	79.98	31.60	0.20	0.0724	0.3555
	6.13	0.35	68.78	31.50	0.18	0.0672	0.3819
	6.07	0.42	57.47	31.50	0.15	0.0512	0.3441

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.00	0.49	50.20	31.10	0.13	0.0425	0.3237
6	7.30	0.00	187.25	31.00	0.40	0.0075	0.0187
	7.10	0.07	178.87	30.90	0.40	0.0243	0.0613
	7.07	0.14	169.12	30.80	0.38	0.0380	0.1011
	7.00	0.21	154.82	30.70	0.35	0.0458	0.1320
	7.23	0.28	147.68	30.70	0.32	0.0513	0.1600
	7.00	0.35	135.73	30.60	0.30	0.0651	0.2139
	6.90	0.42	113.72	30.20	0.26	0.0742	0.2867
	7.00	0.49	101.88	29.90	0.23	0.0642	0.2810

ตารางผนวกที่ 10 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 6 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.09	0.00	32.07	27.70	0.24	0.0632	0.2619
2	2.90	0.00	60.35	27.90	0.33	0.0392	0.1199
	3.00	0.07	38.15	28.20	0.20	0.0661	0.3315
3	4.04	0.00	100.52	28.30	0.39	0.0236	0.0605
	4.04	0.07	84.12	28.30	0.33	0.0610	0.1867
	4.16	0.14	76.75	28.60	0.29	0.0795	0.2746
	4.15	0.21	62.23	28.80	0.24	0.0804	0.3415
	4.01	0.28	40.77	28.80	0.16	0.0707	0.4435
	5.33	0.00	146.15	28.90	0.43	0.0134	0.0311
4	5.23	0.07	134.45	29.00	0.40	0.0471	0.1168
	5.37	0.14	126.35	2.90	0.37	0.0531	0.1437
	5.37	0.21	117.97	29.00	0.35	0.0789	0.2285
	5.37	0.28	110.25	29.20	0.32	0.0594	0.1840
	5.33	0.35	103.38	29.30	0.30	0.0963	0.3163
	5.30	0.42	90.20	29.50	0.27	0.0824	0.3085
	5.33	0.49	78.00	29.40	0.23	0.0904	0.3938

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
5	6.03	0.00	178.95	29.60	0.47	0.0147	0.0316
	6.00	0.07	156.13	29.70	0.41	0.0655	0.1604
	5.97	0.14	136.02	29.50	0.36	0.1044	0.2917
	6.07	0.21	118.45	29.90	0.31	0.1197	0.3905
	5.97	0.28	103.78	30.00	0.27	0.1266	0.4638
	6.03	0.35	85.53	30.20	0.22	0.1137	0.5109
	5.93	0.42	75.78	30.20	0.20	0.1061	0.5291
	5.97	0.49	65.25	30.20	0.17	0.0904	0.5268
6	7.17	0.00	202.53	30.30	0.44	0.0087	0.0196
	7.00	0.07	189.82	30.80	0.43	0.0341	0.0801
	6.93	0.14	177.50	30.70	0.40	0.0495	0.1232
	6.93	0.21	162.87	30.70	0.37	0.0667	0.1810
	7.07	0.28	153.70	31.00	0.34	0.0782	0.2289
	6.93	0.35	142.63	30.90	0.32	0.0806	0.2496
	6.90	0.42	134.00	30.70	0.30	0.0992	0.3253
	7.10	0.49	129.97	30.90	0.29	0.0737	0.2565

ตารางผนวกที่ 11 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.87	0.00	33.08	20.80	0.18	0.0350	0.1938
2	3.85	0.00	80.58	20.90	0.33	0.0330	0.1003
	3.91	0.07	59.00	21.10	0.24	0.0587	0.2477
	3.73	0.14	35.67	21.30	0.15	0.0530	0.3532
	3.98	0.21	21.67	21.50	0.09	0.0321	0.3762
	3.90	0.28	13.72	21.60	0.06	0.0240	0.4346
	4.73	0.00	115.58	22.80	0.38	0.0163	0.0425
3	4.78	0.07	103.73	22.80	0.34	0.0675	0.1983
	4.84	0.14	82.95	23.00	0.27	0.0862	0.3207

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
4	4.78	0.21	56.43	23.20	0.19	0.0709	0.3825
	4.85	0.28	48.30	23.50	0.16	0.0659	0.4210
	4.87	0.35	39.15	23.80	0.13	0.0581	0.4604
	4.86	0.42	28.60	23.60	0.09	0.0461	0.4985
	4.92	0.49	19.83	24.10	0.06	0.0297	0.4688
	5.43	0.00	146.22	23.90	0.42	0.0181	0.0428
	5.13	0.07	125.85	24.30	0.38	0.0748	0.1942
	5.27	0.14	113.15	24.00	0.34	0.1037	0.3075
	5.50	0.21	105.45	24.40	0.30	0.1175	0.3903
	5.17	0.28	68.85	24.40	0.21	0.0964	0.4605
5	5.17	0.35	56.42	24.30	0.17	0.0944	0.5509
	5.13	0.42	51.55	25.00	0.16	0.0928	0.5887
	5.40	0.49	43.08	25.00	0.13	0.0694	0.5543
	6.20	0.00	162.82	25.20	0.41	0.0135	0.0327
	6.37	0.07	149.97	25.50	0.37	0.0463	0.1253
	6.33	0.14	133.30	25.60	0.33	0.0707	0.2141
	6.30	0.21	130.80	25.90	0.33	0.0998	0.3061
	6.37	0.28	121.47	25.90	0.30	0.1115	0.3723
	6.53	0.35	107.02	26.20	0.26	0.1018	0.3959
	6.07	0.42	73.58	26.00	0.19	0.0833	0.4374
	6.33	0.49	62.95	25.90	0.16	0.0658	0.4214

ตารางผนวกที่ 12 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.65	0.00	42.72	23.70	0.25	0.0551	0.2178
2	3.75	0.00	83.58	23.80	0.35	0.0377	0.1077
	3.85	0.07	65.67	23.90	0.27	0.0725	0.2704
	3.77	0.14	53.62	24.00	0.22	0.0910	0.4078

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
3	3.82	0.21	34.32	24.20	0.14	0.0614	0.4347
	3.85	0.28	19.77	24.30	0.08	0.0349	0.4329
	3.79	0.35	11.43	25.00	0.05	0.0211	0.4450
	4.97	0.00	117.83	24.50	0.37	0.0202	0.0541
	4.91	0.07	102.97	25.30	0.33	0.0601	0.1826
	4.86	0.14	88.05	25.30	0.28	0.0846	0.2971
	4.85	0.21	78.52	25.50	0.25	0.1023	0.4023
	4.91	0.28	67.42	25.50	0.22	0.1022	0.4737
	4.97	0.35	48.18	25.80	0.15	0.0712	0.4674
4	4.90	0.42	33.82	26.00	0.11	0.0526	0.4857
	4.93	0.49	25.35	25.90	0.08	0.0411	0.5096
	5.53	0.00	143.53	26.10	0.41	0.0205	0.0504
	5.47	0.07	133.63	26.10	0.38	0.0696	0.1813
	5.50	0.14	116.12	25.90	0.33	0.0989	0.2984
	5.50	0.21	103.23	26.10	0.29	0.1128	0.3828
	5.63	0.28	95.53	26.20	0.27	0.1239	0.4654
	5.57	0.35	84.52	26.90	0.24	0.1202	0.5043
	5.57	0.42	75.70	26.80	0.21	0.1253	0.5868
5	5.57	0.49	68.80	27.20	0.19	0.1152	0.5935
	6.47	0.00	174.40	27.10	0.42	0.0127	0.0299
	6.33	0.07	157.63	26.80	0.39	0.0529	0.1355
	6.27	0.14	145.77	27.40	0.37	0.0824	0.2256
	6.53	0.21	129.07	27.30	0.31	0.0899	0.2899
	6.17	0.28	118.42	27.30	0.30	0.1220	0.4046
	6.13	0.35	108.23	27.70	0.28	0.1267	0.4575
	6.33	0.42	99.45	27.30	0.25	0.1111	0.4505
	6.33	0.49	87.38	27.40	0.22	0.1051	0.4850

ตารางผนวกที่ 13 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T ($^{\circ}\text{C}$)	TSR	C_p	C_T
1	2.90	0.00	41.15	30.40	0.22	0.0438	0.1967
	3.01	0.07	30.72	30.70	0.16	0.0517	0.3228
2	3.89	0.00	87.50	30.70	0.35	0.0233	0.0660
	4.02	0.07	75.53	30.80	0.29	0.0505	0.1714
	3.95	0.14	59.87	30.90	0.24	0.0588	0.2472
	3.96	0.21	52.17	30.70	0.21	0.0670	0.3240
	3.96	0.28	43.58	31.10	0.17	0.0720	0.4164
	4.13	0.35	35.22	31.10	0.13	0.0637	0.4757
	3.76	0.42	13.67	30.90	0.06	0.0266	0.4668
	5.47	0.00	141.72	30.70	0.41	0.0179	0.0440
3	5.40	0.07	132.70	31.20	0.39	0.0441	0.1142
	5.33	0.14	121.02	30.80	0.36	0.0665	0.1867
	5.27	0.21	107.47	30.90	0.32	0.0764	0.2386
	5.33	0.28	93.80	31.50	0.28	0.0757	0.2741
	5.33	0.35	85.57	31.30	0.25	0.0765	0.3037
	5.43	0.42	84.20	31.00	0.24	0.0780	0.3208
	5.33	0.49	75.75	31.10	0.22	0.0810	0.3634
	6.00	0.00	169.75	31.30	0.44	0.0161	0.0361
4	5.93	0.07	162.87	31.50	0.43	0.0440	0.1021
	5.93	0.14	155.32	31.70	0.41	0.0645	0.1570
	5.87	0.21	146.55	31.80	0.39	0.0725	0.1850
	5.87	0.28	137.78	31.70	0.37	0.0737	0.1998
	5.87	0.35	122.68	31.50	0.33	0.0943	0.2872
	6.03	0.42	118.48	31.60	0.31	0.0831	0.2695
	5.97	0.49	106.60	31.00	0.28	0.0887	0.3162
	6.90	0.00	198.42	31.00	0.45	0.0124	0.0275
5	6.60	0.07	191.82	31.90	0.46	0.0399	0.0875

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.70	0.14	184.40	31.90	0.43	0.0533	0.1233
	6.77	0.21	171.68	31.40	0.40	0.0607	0.1524
	6.70	0.28	163.03	31.70	0.38	0.0664	0.1738
	6.83	0.35	162.52	31.60	0.37	0.0816	0.2184
	6.73	0.42	156.15	31.90	0.36	0.0841	0.2310
	6.57	0.49	144.53	31.90	0.35	0.0970	0.2806

ตารางผนวกที่ 14 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.85	0.00	63.70	22.80	0.35	0.0700	0.1996
	2.93	0.07	38.78	22.90	0.21	0.0825	0.3965
	2.77	0.14	26.40	23.10	0.15	0.1006	0.6732
	2.64	0.21	14.18	23.40	0.08	0.0660	0.7838
2	3.78	0.00	108.22	23.60	0.45	0.0474	0.1054
	3.83	0.07	86.58	23.60	0.35	0.1013	0.2858
	3.68	0.14	62.23	23.90	0.27	0.1198	0.4511
	3.75	0.21	52.82	24.20	0.22	0.1188	0.5377
	3.75	0.28	39.67	24.40	0.17	0.0953	0.5737
	3.73	0.35	29.15	24.40	0.12	0.0823	0.6704
	3.84	0.42	22.22	24.60	0.09	0.0574	0.6328
	3.71	0.49	15.67	25.00	0.07	0.0460	0.6947
3	4.86	0.00	156.08	25.00	0.50	0.0154	0.0306
	4.92	0.07	138.98	25.10	0.44	0.0817	0.1841
	4.83	0.14	120.17	25.20	0.39	0.1095	0.2805
	4.79	0.21	98.33	25.30	0.32	0.1197	0.3713
	4.89	0.28	85.38	25.60	0.27	0.1239	0.4518
	4.97	0.35	73.80	25.50	0.23	0.1040	0.4458
	4.84	0.42	66.28	25.70	0.21	0.1154	0.5372

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
4	4.90	0.49	62.23	26.00	0.20	0.1145	0.5741
	5.37	0.00	181.35	25.70	0.53	0.0221	0.0417
	5.43	0.07	171.18	26.10	0.49	0.0749	0.1514
	5.27	0.14	156.58	26.10	0.47	0.1264	0.2708
	5.37	0.21	139.22	26.40	0.41	0.1452	0.3566
	5.33	0.28	121.50	26.50	0.36	0.1496	0.4181
	5.33	0.35	109.62	26.70	0.32	0.1491	0.4621
	5.57	0.42	101.00	26.10	0.28	0.1415	0.4966
	5.30	0.49	93.73	26.70	0.28	0.1444	0.5200
5	6.20	0.00	218.27	27.00	0.55	0.0168	0.0303
	6.27	0.07	207.50	26.90	0.52	0.0578	0.1112
	6.13	0.14	188.02	26.90	0.48	0.1093	0.2270
	6.20	0.21	179.37	27.00	0.45	0.1266	0.2788
	6.23	0.28	164.70	27.60	0.41	0.1292	0.3116
	6.10	0.35	153.42	27.60	0.39	0.1488	0.3769
	6.10	0.42	139.82	27.80	0.36	0.1649	0.4581
	6.07	0.49	130.20	27.60	0.34	0.1658	0.4920

ตารางผนวกที่ 15 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.03	0.00	36.42	28.30	0.28	0.0542	0.1929
	2.98	0.00	80.08	28.50	0.42	0.0662	0.1568
	2.92	0.07	61.38	28.70	0.33	0.1022	0.3096
2	2.87	0.14	38.55	29.20	0.21	0.0884	0.4190
	2.84	0.21	28.38	29.30	0.16	0.0952	0.6063
	2.95	0.28	20.50	29.20	0.11	0.0685	0.6276
3	3.99	0.00	129.00	29.40	0.51	0.0331	0.0652
	4.02	0.07	109.42	29.20	0.43	0.0761	0.1781

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	3.88	0.14	91.57	29.40	0.37	0.1345	0.3627
	3.95	0.21	81.37	29.60	0.32	0.1295	0.4008
	3.95	0.28	71.40	29.70	0.28	0.1142	0.4027
	3.97	0.35	54.57	29.90	0.22	0.1112	0.5159
	4.04	0.42	43.78	29.20	0.17	0.0773	0.4538
	3.88	0.49	37.10	29.70	0.15	0.0945	0.6298
4	5.13	0.00	176.62	29.30	0.54	0.0243	0.0449
	5.23	0.07	165.22	29.30	0.50	0.0714	0.1441
	5.23	0.14	156.07	29.40	0.47	0.1088	0.2323
	5.30	0.21	140.97	29.40	0.42	0.1388	0.3323
	5.23	0.28	128.02	29.40	0.38	0.1574	0.4099
	5.07	0.35	119.00	29.10	0.37	0.1487	0.4031
	5.17	0.42	100.53	30.30	0.31	0.1706	0.5584
	5.23	0.49	84.70	29.80	0.25	0.1445	0.5688
5	5.73	0.00	210.50	29.70	0.58	0.0204	0.0354
	5.67	0.07	196.13	30.40	0.54	0.0697	0.1283
	5.93	0.14	190.73	30.20	0.50	0.0900	0.1784
	5.67	0.21	171.67	30.50	0.48	0.1438	0.3023
	5.63	0.28	159.93	29.90	0.45	0.1716	0.3851
	5.80	0.35	156.78	30.20	0.42	0.1822	0.4294
	5.73	0.42	146.18	30.10	0.40	0.2013	0.5030
	5.80	0.49	138.27	30.10	0.37	0.1984	0.5302
6	6.50	0.00	241.92	29.80	0.58	0.0164	0.0281
	6.40	0.07	230.73	29.90	0.57	0.0607	0.1073
	6.33	0.14	218.63	30.00	0.54	0.1003	0.1851
	6.47	0.21	205.85	30.10	0.50	0.1270	0.2541
	6.33	0.28	194.72	30.10	0.48	0.1682	0.3485
	6.33	0.35	181.82	30.00	0.45	0.1928	0.4278

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.43	0.42	176.97	30.00	0.43	0.1775	0.4109
	6.43	0.49	167.42	30.10	0.41	0.1771	0.4334

ตารางผนวกที่ 16 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 12 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.83	0.00	52.62	27.80	0.29	0.0468	0.1604
2	3.94	0.00	88.08	27.90	0.35	0.0165	0.0470
	3.92	0.07	50.17	28.00	0.20	0.0475	0.2368
3	5.23	0.00	136.83	28.30	0.41	0.0132	0.0320
	5.10	0.07	116.12	28.20	0.36	0.0536	0.1501
	5.23	0.14	91.77	28.50	0.28	0.0672	0.2443
	5.10	0.21	72.52	28.80	0.22	0.0742	0.3323
	5.20	0.28	34.98	28.60	0.11	0.0405	0.3831
4	5.83	0.00	168.63	28.70	0.45	0.0094	0.0208
	5.87	0.07	149.85	28.80	0.40	0.0381	0.0949
	5.67	0.14	135.27	28.80	0.37	0.0687	0.1833
	5.80	0.21	110.67	28.80	0.30	0.0736	0.2459
	5.93	0.28	88.57	28.80	0.23	0.0683	0.2914
	5.73	0.35	76.40	28.80	0.21	0.0799	0.3817
	5.73	0.42	52.30	28.80	0.14	0.0617	0.4307
	5.87	0.49	17.43	28.90	0.05	0.0196	0.4196
5	6.60	0.00	197.77	30.10	0.47	0.0105	0.0224
	6.80	0.07	182.50	30.10	0.42	0.0372	0.0882
	6.87	0.14	169.58	30.10	0.39	0.0540	0.1394
	6.70	0.21	156.10	30.00	0.37	0.0697	0.1906
	6.90	0.28	137.82	30.30	0.31	0.0709	0.2262
	6.87	0.35	123.38	30.60	0.28	0.0764	0.2710
	6.57	0.42	113.30	30.60	0.27	0.0872	0.3220

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.57	0.49	100.38	30.40	0.24	0.0902	0.3759

ตารางผนวกที่ 17 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 12 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	3.19	0.00	44.52	30.10	0.22	0.0210	0.0957
	3.07	0.07	17.57	30.10	0.09	0.0243	0.2712
2	4.21	0.00	76.77	29.90	0.29	0.0138	0.0480
	4.16	0.07	54.02	30.10	0.20	0.0318	0.1562
	4.16	0.14	41.80	30.20	0.16	0.0374	0.2372
3	5.40	0.00	117.23	30.10	0.34	0.0100	0.0294
	5.50	0.07	100.60	30.40	0.29	0.0262	0.0913
	5.40	0.14	88.40	30.50	0.26	0.0352	0.1369
	5.53	0.21	75.60	30.30	0.21	0.0405	0.1889
	5.43	0.28	64.32	30.20	0.19	0.0429	0.2308
	5.37	0.35	55.58	29.90	0.16	0.0460	0.2831
	5.43	0.42	35.63	29.90	0.10	0.0312	0.3033
4	5.50	0.49	19.20	30.30	0.05	0.0168	0.3058
	5.90	0.00	140.38	30.40	0.37	0.0092	0.0247
	5.90	0.07	130.20	30.20	0.35	0.0257	0.0743
	5.93	0.14	117.68	30.10	0.31	0.0361	0.1160
	5.77	0.21	106.55	29.90	0.29	0.0486	0.1677
	5.83	0.28	97.17	29.80	0.26	0.0537	0.2052
	5.73	0.35	85.12	29.70	0.23	0.0614	0.2636
	5.80	0.42	77.37	29.40	0.21	0.0614	0.2932
	5.83	0.49	67.20	29.20	0.18	0.0586	0.3242
5	6.80	0.00	166.95	27.80	0.39	0.0110	0.0286
	6.87	0.07	158.10	27.50	0.36	0.0315	0.0871
	6.77	0.14	139.23	27.70	0.32	0.0489	0.1513

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.87	0.21	127.53	27.90	0.29	0.0586	0.2009
	6.80	0.28	112.75	28.00	0.26	0.0665	0.2554
	6.80	0.35	99.90	28.00	0.23	0.0715	0.3100
	6.83	0.42	92.92	28.10	0.21	0.0733	0.3431
	6.87	0.49	82.17	29.60	0.19	0.0592	0.3153

ตารางผนวกที่ 18 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 12 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.06	0.00	25.10	28.70	0.19	0.0586	0.3066
2	3.00	0.00	59.83	28.60	0.31	0.0451	0.1441
	2.99	0.07	5.28	28.70	0.03	0.0150	0.5391
3	4.32	0.00	110.90	28.60	0.40	0.0193	0.0478
	4.36	0.07	85.18	28.70	0.31	0.0692	0.2253
	4.37	0.14	73.30	28.60	0.26	0.0932	0.3538
	4.24	0.21	56.75	28.50	0.21	0.0993	0.4729
	4.25	0.28	38.73	28.50	0.14	0.0802	0.5611
	4.26	0.35	21.53	28.40	0.08	0.0472	0.5949
4	5.33	0.00	161.15	28.30	0.47	0.0156	0.0328
	5.43	0.07	145.97	28.20	0.42	0.0511	0.1211
	5.33	0.14	136.78	28.20	0.40	0.0817	0.2029
	5.40	0.21	127.57	28.20	0.37	0.1007	0.2715
	5.40	0.28	116.95	28.20	0.34	0.1109	0.3261
	5.40	0.35	105.60	28.10	0.31	0.1186	0.3864
	5.37	0.42	101.75	28.10	0.30	0.1308	0.4394
	5.40	0.49	91.70	27.90	0.27	0.1267	0.4751
5	5.77	0.00	191.40	27.80	0.52	0.0121	0.0232
	5.93	0.07	182.40	27.80	0.48	0.0422	0.0875
	5.90	0.14	174.85	27.70	0.47	0.0699	0.1503

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.87	0.21	165.02	27.90	0.44	0.0906	0.2051
	5.87	0.28	151.62	27.90	0.41	0.1024	0.2524
	5.87	0.35	141.92	28.00	0.38	0.1167	0.3072
	5.87	0.42	134.65	28.00	0.36	0.1290	0.3580
	5.90	0.49	129.50	27.80	0.34	0.1334	0.3870
6	7.03	0.00	225.43	28.00	0.50	0.0070	0.0138
	6.97	0.07	212.22	28.20	0.48	0.0270	0.0564
	7.03	0.14	203.63	28.30	0.45	0.0471	0.1037
	7.00	0.21	197.58	28.50	0.44	0.0612	0.1381
	6.90	0.28	188.70	28.80	0.43	0.0779	0.1815
	6.97	0.35	182.90	29.10	0.41	0.0870	0.2112
	6.97	0.42	175.23	29.10	0.39	0.0963	0.2438
	7.07	0.49	167.72	29.30	0.37	0.0985	0.2643

ตารางผนวกที่ 19 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 12 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.13	0.00	44.47	30.20	0.33	0.0960	0.2928
2	2.91	0.00	79.53	30.80	0.43	0.0476	0.1109
	2.92	0.07	59.95	30.70	0.32	0.1219	0.3786
	2.92	0.14	38.80	30.60	0.21	0.1188	0.5693
	3.09	0.21	21.60	30.80	0.11	0.0697	0.6356
	3.94	0.00	129.13	31.10	0.52	0.0248	0.0481
3	4.18	0.07	124.28	31.10	0.47	0.0728	0.1561
	4.28	0.14	105.98	31.10	0.39	0.0944	0.2429
	4.26	0.21	96.55	31.40	0.36	0.1219	0.3424
	4.17	0.28	89.82	31.00	0.34	0.1398	0.4131
	4.25	0.35	79.18	30.90	0.29	0.1352	0.4621
	4.33	0.42	68.97	30.80	0.25	0.1248	0.4996

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
4	4.24	0.49	57.07	31.00	0.21	0.1155	0.5468
	5.40	0.00	185.85	31.10	0.54	0.0143	0.0264
	5.40	0.07	178.85	31.00	0.52	0.0503	0.0968
	5.43	0.14	165.65	30.90	0.48	0.0738	0.1542
	5.30	0.21	157.25	30.80	0.47	0.0961	0.2063
	5.40	0.28	151.93	30.70	0.44	0.1092	0.2473
	5.50	0.35	150.52	30.20	0.43	0.1201	0.2796
	5.40	0.42	139.78	30.00	0.41	0.1367	0.3363
	5.27	0.49	132.83	30.00	0.40	0.1485	0.3749
5	5.90	0.00	217.13	30.00	0.58	0.0131	0.0227
	5.90	0.07	211.98	29.00	0.56	0.0387	0.0685
	5.87	0.14	212.27	27.90	0.57	0.0545	0.0959
	5.77	0.21	204.72	27.30	0.56	0.0592	0.1061
	5.73	0.28	196.37	27.70	0.54	0.1108	0.2060
	5.77	0.35	188.67	27.50	0.51	0.1121	0.2182
	5.67	0.42	181.80	27.10	0.50	0.1415	0.2810
	5.67	0.49	175.88	26.70	0.49	0.1483	0.3043
6	6.40	0.00	254.85	26.00	0.63	0.0136	0.0218
	6.43	0.07	249.38	25.80	0.61	0.0345	0.0566
	6.40	0.14	237.65	26.30	0.58	0.0488	0.0836
	6.47	0.21	232.45	26.50	0.56	0.0755	0.1337
	6.30	0.28	227.18	26.40	0.57	0.1033	0.1824
	6.40	0.35	223.72	26.80	0.55	0.1151	0.2098
	6.50	0.42	218.87	26.80	0.53	0.1164	0.2202
	6.37	0.49	211.08	26.60	0.52	0.1437	0.2760

ตารางผนวกที่ 20 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 12 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.90	0.00	97.07	26.50	0.53	0.0653	0.1242
	2.90	0.07	60.93	26.60	0.33	0.1764	0.5354
2	4.13	0.00	148.90	26.70	0.57	0.0360	0.0635
	4.05	0.07	133.10	26.70	0.52	0.1320	0.2558
	3.85	0.14	113.67	27.20	0.46	0.2036	0.4396
	3.99	0.21	102.13	27.00	0.40	0.2069	0.5152
	3.97	0.28	84.92	27.00	0.34	0.2201	0.6549
	4.05	0.35	75.43	27.00	0.29	0.1753	0.5991
	3.99	0.42	58.83	27.00	0.23	0.1668	0.7201
	3.98	0.49	40.87	27.00	0.16	0.1390	0.8618
3	5.10	0.00	210.80	27.00	0.65	0.0220	0.0338
	5.20	0.07	196.22	27.10	0.59	0.0918	0.1550
	5.13	0.14	186.80	27.10	0.57	0.1301	0.2278
	5.20	0.21	185.32	27.20	0.56	0.1346	0.2406
	5.23	0.28	170.55	27.30	0.51	0.1671	0.3266
	5.20	0.35	163.02	27.40	0.49	0.1846	0.3750
	5.17	0.42	161.83	27.50	0.49	0.1827	0.3715
	5.23	0.49	154.58	27.50	0.46	0.2001	0.4316
4	5.90	0.00	249.92	27.60	0.67	0.0140	0.0210
	5.80	0.07	241.03	27.80	0.65	0.0454	0.0696
	5.77	0.14	230.47	27.90	0.63	0.0766	0.1221
	5.87	0.21	225.33	27.70	0.60	0.0903	0.1498
	5.73	0.28	214.27	27.60	0.59	0.1261	0.2149
	5.87	0.35	215.37	27.70	0.58	0.1347	0.2337
	5.73	0.42	205.20	27.60	0.56	0.1626	0.2894
	5.83	0.49	200.27	27.50	0.54	0.1725	0.3200
5	6.53	0.00	283.38	27.20	0.68	0.0156	0.0229

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	6.63	0.07	273.77	27.10	0.65	0.0470	0.0726
	6.63	0.14	263.77	27.00	0.62	0.0722	0.1157
	6.67	0.21	258.10	26.80	0.61	0.0897	0.1475
	6.67	0.28	252.62	26.80	0.59	0.1085	0.1823
	6.77	0.35	249.65	26.80	0.58	0.1026	0.1772
	6.53	0.42	240.80	26.80	0.58	0.0897	0.1550
	6.63	0.49	238.40	26.80	0.56	0.1047	0.1855

ตารางผนวกที่ 21 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 16 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.87	0.00	85.62	30.10	0.47	0.1257	0.2684
	2.89	0.07	55.57	30.40	0.30	0.1570	0.5206
	2.98	0.14	27.80	30.40	0.15	0.0792	0.5407
	3.00	0.21	12.30	30.40	0.06	0.0237	0.3684
2	3.97	0.00	134.92	30.50	0.53	0.0543	0.1019
	3.96	0.07	110.15	30.70	0.44	0.1185	0.2712
	4.08	0.14	96.80	30.80	0.37	0.1290	0.3462
	4.11	0.21	83.77	30.90	0.32	0.1316	0.4114
	3.95	0.28	63.55	31.00	0.25	0.1068	0.4228
	3.89	0.35	47.23	31.20	0.19	0.0867	0.4550
	3.90	0.42	28.00	31.20	0.11	0.0514	0.4556
	3.91	0.49	17.37	31.00	0.07	0.0287	0.4117
3	5.13	0.00	192.00	31.00	0.59	0.0471	0.0801
	5.17	0.07	168.43	31.00	0.51	0.0929	0.1815
	5.00	0.14	149.23	31.20	0.47	0.1225	0.2614
	5.23	0.21	138.55	31.20	0.42	0.1445	0.3477
	5.20	0.28	129.48	31.20	0.39	0.1337	0.3421
	5.33	0.35	125.67	31.20	0.37	0.1054	0.2850

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.23	0.42	111.50	31.30	0.33	0.1381	0.4129
	5.37	0.49	102.88	31.30	0.30	0.1446	0.4803
4	5.83	0.00	224.92	31.50	0.61	0.0407	0.0673
	5.87	0.07	204.57	31.70	0.55	0.0933	0.1704
	5.93	0.14	190.25	31.40	0.50	0.1080	0.2145
	5.97	0.21	180.20	31.40	0.47	0.1098	0.2316
	5.83	0.28	166.13	31.80	0.45	0.1346	0.3010
	5.97	0.35	153.47	31.60	0.40	0.1294	0.3206
	5.97	0.42	146.90	31.70	0.39	0.1741	0.4503
	5.93	0.49	138.75	31.70	0.37	0.1416	0.3857
5	6.57	0.00	254.25	31.90	0.61	0.0254	0.0418
	6.37	0.07	226.33	31.90	0.56	0.0929	0.1665
	6.33	0.14	207.95	32.30	0.52	0.1361	0.2641
	6.57	0.21	195.27	32.10	0.47	0.1488	0.3187
	6.53	0.28	184.00	32.20	0.44	0.1711	0.3870
	6.57	0.35	179.68	32.30	0.43	0.1655	0.3853
	6.53	0.42	169.47	32.50	0.41	0.1709	0.4198
	6.43	0.49	156.10	32.30	0.38	0.1646	0.4321

ตารางผนวกที่ 22 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 16 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.69	0.00	79.43	25.70	0.46	0.1213	0.2617
	2.59	0.07	28.67	25.80	0.17	0.0796	0.4575
2	3.60	0.00	135.87	26.00	0.59	0.0766	0.1294
	3.68	0.07	114.53	26.00	0.49	0.1963	0.4014
	3.57	0.14	84.77	26.10	0.37	0.2274	0.6106
	3.59	0.21	62.33	26.10	0.27	0.1316	0.4822
	3.69	0.28	36.53	26.20	0.16	0.0910	0.5862

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
3	3.62	0.35	25.43	26.50	0.11	0.0415	0.3767
	4.78	0.00	201.48	26.40	0.66	0.0506	0.0764
	4.83	0.07	176.95	26.60	0.58	0.1338	0.2324
	4.91	0.14	160.80	26.60	0.51	0.1606	0.3121
	4.90	0.21	147.12	26.60	0.47	0.1719	0.3644
	4.78	0.28	126.07	26.70	0.41	0.2313	0.5585
	4.84	0.35	118.57	26.90	0.38	0.1770	0.4601
	4.89	0.42	100.47	27.00	0.32	0.1758	0.5453
	4.79	0.49	79.60	26.90	0.26	0.1353	0.5186
	5.17	0.00	232.57	27.10	0.71	0.0444	0.0629
4	5.13	0.07	203.88	27.10	0.62	0.1341	0.2150
	5.23	0.14	192.95	27.20	0.58	0.1630	0.2817
	5.13	0.21	175.10	27.40	0.54	0.1837	0.3430
	5.23	0.28	164.23	27.50	0.49	0.2418	0.4908
	5.23	0.35	156.02	27.60	0.47	0.2000	0.4274
	5.37	0.42	151.05	27.70	0.44	0.1899	0.4297
	5.23	0.49	139.02	27.60	0.42	0.1682	0.4033
	5.97	0.00	268.77	27.80	0.71	0.0408	0.0577
5	5.97	0.07	246.77	28.10	0.65	0.0980	0.1509
	5.97	0.14	229.13	28.00	0.60	0.1545	0.2562
	6.10	0.21	211.10	27.90	0.54	0.1788	0.3292
	6.23	0.28	202.70	28.10	0.51	0.2083	0.4079
	6.17	0.35	193.72	28.20	0.49	0.1911	0.3874
	6.07	0.42	186.27	28.40	0.48	0.1753	0.3637
	6.13	0.49	176.57	28.40	0.45	0.1753	0.3878

ตารางผนวกที่ 23 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 16 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.75	0.00	93.22	25.60	0.53	0.0958	0.1798
	2.75	0.07	73.58	25.70	0.42	0.1785	0.4253
	2.78	0.14	55.03	25.70	0.31	0.1815	0.5838
2	3.90	0.00	155.72	25.80	0.63	0.0584	0.0931
	3.97	0.07	135.92	25.90	0.54	0.1524	0.2837
	3.89	0.14	118.75	26.00	0.48	0.1997	0.4170
	3.93	0.21	106.43	26.10	0.43	0.2338	0.5500
	3.86	0.28	87.93	26.10	0.36	0.2475	0.6926
	3.77	0.35	66.98	26.60	0.28	0.2241	0.8041
	3.88	0.42	53.70	26.90	0.22	0.1728	0.7951
	3.88	0.49	38.95	26.90	0.16	0.1142	0.7249
3	5.13	0.00	217.70	26.60	0.67	0.0282	0.0423
	5.17	0.07	202.88	26.90	0.62	0.1075	0.1744
	5.07	0.14	184.65	27.10	0.57	0.1536	0.2684
	5.03	0.21	167.88	27.00	0.52	0.1745	0.3332
	4.97	0.28	163.82	26.80	0.52	0.1836	0.3546
	4.93	0.35	152.45	27.00	0.49	0.1818	0.3747
	4.97	0.42	141.38	27.30	0.45	0.2232	0.4994
	5.00	0.49	132.55	27.30	0.42	0.2350	0.5645
4	5.57	0.00	256.60	27.50	0.72	0.0283	0.0391
	5.67	0.07	237.65	27.50	0.66	0.0812	0.1234
	5.60	0.14	224.32	27.70	0.63	0.1322	0.2102
	5.60	0.21	210.28	27.90	0.59	0.1686	0.2859
	5.60	0.28	198.67	27.60	0.56	0.1904	0.3419
	5.57	0.35	188.45	28.00	0.53	0.2113	0.3975
	5.63	0.42	181.23	28.40	0.51	0.2212	0.4379
	5.80	0.49	182.23	28.30	0.49	0.2071	0.4199

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
5	6.47	0.00	294.28	28.40	0.71	0.0220	0.0308
	6.33	0.07	276.20	28.50	0.68	0.0695	0.1015
	6.50	0.14	266.83	28.80	0.64	0.1084	0.1681
	6.37	0.21	252.17	28.80	0.62	0.1515	0.2436
	6.50	0.28	245.65	29.10	0.59	0.1770	0.2983
	6.47	0.35	235.83	28.80	0.57	0.1919	0.3352
	6.37	0.42	223.48	28.80	0.55	0.2154	0.3909
	6.40	0.49	217.02	28.90	0.53	0.2286	0.4294

ตารางผนวกที่ 24 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 16 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.66	0.00	95.92	26.00	0.57	0.1631	0.2881
	2.62	0.07	62.35	26.20	0.37	0.1966	0.5263
2	3.52	0.00	148.63	26.50	0.66	0.1212	0.1830
	3.57	0.07	125.20	26.70	0.55	0.2240	0.4072
	3.51	0.14	95.32	26.70	0.43	0.2823	0.6614
	3.55	0.21	77.60	26.90	0.34	0.2145	0.6250
	3.50	0.28	55.48	26.90	0.25	0.1405	0.5649
	3.43	0.35	32.73	27.00	0.15	0.0728	0.4856
3	4.67	0.00	206.20	27.10	0.69	0.0799	0.1153
	4.80	0.07	189.43	27.30	0.62	0.1740	0.2811
	4.83	0.14	172.05	27.50	0.56	0.2176	0.3890
	4.88	0.21	163.55	27.50	0.53	0.1698	0.3226
	4.76	0.28	142.45	27.60	0.47	0.2480	0.5283
	4.83	0.35	130.40	27.80	0.42	0.2475	0.5835
	4.81	0.42	110.02	27.80	0.36	0.2598	0.7234
	4.93	0.49	114.48	27.90	0.36	0.1846	0.5068
4	5.43	0.00	262.03	28.10	0.76	0.0414	0.0547

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.27	0.07	229.28	28.00	0.68	0.1605	0.2348
	5.30	0.14	209.72	27.90	0.62	0.1746	0.2811
	5.33	0.21	200.43	28.00	0.59	0.2256	0.3824
	5.43	0.28	187.52	28.00	0.54	0.2790	0.5149
	5.40	0.35	181.37	28.10	0.53	0.2427	0.4602
	5.23	0.42	173.33	28.20	0.52	0.2231	0.4290
	5.33	0.49	155.27	28.20	0.46	0.2237	0.4894
5	5.83	0.00	294.95	28.30	0.79	0.0524	0.0660
	5.93	0.07	263.15	28.50	0.70	0.1362	0.1957
	5.87	0.14	249.65	28.60	0.67	0.1903	0.2848
	5.90	0.21	238.98	28.70	0.64	0.1876	0.2949
	5.97	0.28	232.77	28.60	0.61	0.1739	0.2839
	5.87	0.35	221.43	28.80	0.59	0.2326	0.3925
	6.03	0.42	212.10	29.00	0.55	0.2153	0.3900
	6.03	0.49	201.42	29.00	0.52	0.2148	0.4098

ตารางผนวกที่ 25 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 16 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.98	0.00	95.87	30.50	0.50	0.1351	0.2678
	2.92	0.07	32.53	30.40	0.18	0.0834	0.4764
2	3.95	0.00	157.33	30.60	0.62	0.0770	0.1232
	4.01	0.07	127.18	30.60	0.50	0.1742	0.3495
	3.96	0.14	110.32	30.80	0.44	0.1674	0.3825
	3.73	0.21	67.90	31.00	0.29	0.0913	0.3193
	3.74	0.28	19.13	31.10	0.08	0.0372	0.4625
	3.73	0.35	7.47	31.20	0.03	0.0057	0.1803
	5.03	0.00	227.27	30.80	0.71	0.0580	0.0819
3	5.20	0.07	199.57	30.60	0.60	0.1323	0.2196

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.13	0.14	187.58	30.40	0.57	0.1685	0.2937
	5.13	0.21	170.93	30.60	0.52	0.1723	0.3296
	5.07	0.28	151.53	30.70	0.47	0.1944	0.4139
	5.23	0.35	132.53	30.40	0.40	0.1580	0.3973
	5.13	0.42	100.62	30.40	0.31	0.1396	0.4537
	5.03	0.49	65.73	30.50	0.21	0.0956	0.4660
4	5.70	0.00	267.85	30.30	0.74	0.0363	0.0492
	5.73	0.07	243.12	29.80	0.67	0.1129	0.1696
	5.53	0.14	223.82	29.80	0.64	0.1889	0.2975
	5.50	0.21	205.35	29.50	0.59	0.2202	0.3757
	5.57	0.28	191.95	29.60	0.54	0.2216	0.4092
	5.50	0.35	172.93	29.60	0.49	0.2409	0.4880
	5.43	0.42	156.13	29.70	0.45	0.2162	0.4793
	5.43	0.49	147.98	30.00	0.43	0.1683	0.3935
5	6.13	0.00	300.75	30.40	0.77	0.0386	0.0501
	6.13	0.07	280.43	30.50	0.72	0.1110	0.1547
	6.13	0.14	259.27	30.60	0.66	0.1558	0.2348
	6.17	0.21	245.93	30.60	0.63	0.1877	0.2998
	6.23	0.28	232.28	30.80	0.59	0.2109	0.3604
	6.33	0.35	212.37	31.10	0.53	0.2529	0.4804
	6.23	0.42	202.78	31.10	0.51	0.2166	0.4240
	6.23	0.49	193.42	31.30	0.49	0.2136	0.4385

ตารางผนวกที่ 26 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 18 ใบ มุม -15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.88	0.00	82.38	31.80	0.45	0.0950	0.2115
	2.79	0.07	43.83	31.50	0.25	0.1387	0.5617
	2.70	0.14	19.13	31.80	0.11	0.0772	0.6928
	2.89	0.21	9.33	31.50	0.05	0.0174	0.3438
2	3.86	0.00	132.33	31.60	0.54	0.0537	0.0997
	4.06	0.07	112.83	31.40	0.44	0.1219	0.2795
	3.88	0.14	82.67	3.11	0.33	0.1221	0.3647
	3.91	0.21	67.88	30.90	0.27	0.1235	0.4529
	3.88	0.28	49.15	30.70	0.20	0.1188	0.5979
	3.93	0.35	36.85	30.50	0.15	0.0926	0.6286
	3.84	0.42	29.62	30.30	0.12	0.0587	0.4852
	3.92	0.49	17.75	30.20	0.07	0.0324	0.4560
3	4.93	0.00	190.52	29.70	0.61	0.0400	0.0660
	5.03	0.07	164.48	29.80	0.51	0.1158	0.2258
	5.10	0.14	153.28	29.60	0.47	0.1176	0.2493
	5.07	0.21	134.78	29.50	0.42	0.1808	0.4329
	5.13	0.28	130.58	29.30	0.40	0.1258	0.3150
	5.03	0.35	106.55	29.20	0.33	0.1913	0.5755
	5.10	0.42	105.27	29.00	0.32	0.1392	0.4295
	4.97	0.49	88.42	28.60	0.28	0.1811	0.6479
4	5.43	0.00	220.22	29.00	0.64	0.0368	0.0578
	5.43	0.07	195.98	29.00	0.57	0.1053	0.1859
	5.53	0.14	179.00	28.80	0.51	0.1068	0.2102
	5.53	0.21	164.35	28.80	0.47	0.1370	0.2939
	5.47	0.28	144.67	28.80	0.42	0.2088	0.5026
	5.67	0.35	140.13	28.40	0.39	0.1844	0.4748

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.53	0.42	136.83	28.30	0.39	0.1565	0.4031
	5.50	0.49	117.30	28.70	0.33	0.2183	0.6520
5	6.27	0.00	252.73	28.80	0.63	0.0227	0.0358
	6.07	0.07	224.73	28.70	0.58	0.0834	0.1435
	6.03	0.14	205.57	28.60	0.53	0.1508	0.2820
	6.13	0.21	192.15	28.50	0.49	0.1906	0.3874
	5.97	0.28	171.60	28.60	0.45	0.2169	0.4803
	6.13	0.35	161.32	28.60	0.41	0.2131	0.5161
	6.03	0.42	152.20	28.70	0.40	0.2353	0.5942
	5.90	0.49	139.90	28.80	0.37	0.2377	0.6384

ตารางผนวกที่ 27 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 18 ใบ มุม -5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.78	0.00	90.08	28.50	0.51	0.1335	0.2627
	2.72	0.07	25.83	28.70	0.15	0.0913	0.6127
2	3.76	0.00	147.77	28.70	0.62	0.0651	0.1056
	3.76	0.07	99.07	28.70	0.41	0.1934	0.4672
	3.62	0.14	71.27	28.60	0.31	0.1483	0.4800
	3.58	0.21	52.48	28.90	0.23	0.1001	0.4348
	3.58	0.28	30.05	28.80	0.13	0.0512	0.3887
	3.62	0.35	7.88	29.20	0.03	0.0117	0.3423
3	4.90	0.00	212.50	29.00	0.68	0.0444	0.0652
	4.83	0.07	180.17	29.20	0.59	0.1522	0.2601
	4.83	0.14	168.92	29.20	0.55	0.1624	0.2960
	4.90	0.21	138.08	29.20	0.44	0.2381	0.5382
	4.93	0.28	119.10	29.30	0.38	0.1766	0.4652
	5.00	0.35	113.08	29.40	0.36	0.1581	0.4448
	5.03	0.42	101.53	29.60	0.32	0.1283	0.4052

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
4	5.03	0.49	75.47	29.50	0.24	0.1228	0.5218
	5.33	0.00	243.10	29.60	0.72	0.0437	0.0610
	5.40	0.07	217.95	29.70	0.63	0.1295	0.2044
	5.43	0.14	195.40	29.80	0.56	0.1913	0.3389
	5.37	0.21	180.55	29.90	0.53	0.1635	0.3096
	5.37	0.28	154.65	29.70	0.45	0.2464	0.5447
	5.47	0.35	154.67	29.80	0.44	0.1719	0.3870
	5.43	0.42	139.65	30.00	0.40	0.1789	0.4434
	5.47	0.49	129.23	30.20	0.37	0.1669	0.4496
5	5.93	0.00	278.27	30.20	0.74	0.0378	0.0513
	6.13	0.07	251.62	30.10	0.64	0.1077	0.1672
	6.10	0.14	232.78	30.00	0.60	0.1660	0.2771
	6.07	0.21	225.52	30.00	0.58	0.1214	0.2081
	6.10	0.28	201.70	30.30	0.52	0.1828	0.3520
	6.23	0.35	192.52	30.00	0.48	0.1739	0.3587
	5.97	0.42	178.90	30.00	0.47	0.2044	0.4343
	6.10	0.49	157.78	30.50	0.41	0.2153	0.5303

ตารางผนวกที่ 28 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 18 ใบ มุม 0°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.80	0.00	96.02	26.40	0.54	0.1363	0.2528
	2.65	0.07	18.75	26.30	0.11	0.0555	0.4991
2	3.86	0.00	157.00	23.50	0.64	0.0625	0.0979
	3.79	0.07	132.90	23.40	0.55	0.1648	0.2997
	3.76	0.14	111.20	23.60	0.46	0.2097	0.4521
	3.81	0.21	93.93	23.30	0.39	0.2048	0.5287
	3.78	0.28	74.35	23.50	0.31	0.1960	0.6353
	3.75	0.35	38.20	23.60	0.16	0.1057	0.6606

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	3.76	0.42	25.90	23.90	0.11	0.0831	0.7687
	3.71	0.49	3.82	24.30	0.02	0.0106	0.6583
3	4.76	0.00	220.62	26.60	0.73	0.0586	0.0805
	4.74	0.07	189.83	26.60	0.63	0.1491	0.2373
	4.76	0.14	169.70	26.40	0.56	0.1895	0.3386
	4.81	0.21	140.68	26.50	0.46	0.2379	0.5177
	4.69	0.28	100.58	26.50	0.34	0.2041	0.6065
	4.79	0.35	89.83	26.50	0.29	0.1474	0.5010
	4.76	0.42	75.17	26.70	0.25	0.1503	0.6059
	4.81	0.49	58.43	26.80	0.19	0.1281	0.6719
4	5.17	0.00	258.67	27.00	0.79	0.0504	0.0642
	5.13	0.07	220.85	27.20	0.68	0.1771	0.2622
	5.23	0.14	206.82	27.30	0.62	0.1896	0.3056
	5.17	0.21	183.75	27.50	0.56	0.2282	0.4087
	5.23	0.28	152.00	27.40	0.46	0.2662	0.5839
	5.17	0.35	134.42	27.60	0.41	0.2324	0.5690
	5.20	0.42	126.23	27.80	0.38	0.2096	0.5501
	5.33	0.49	100.87	28.00	0.30	0.1891	0.6368
5	5.90	0.00	294.72	28.00	0.78	0.0372	0.0474
	5.93	0.07	268.85	28.20	0.71	0.1393	0.1959
	5.97	0.14	250.12	28.10	0.66	0.1769	0.2688
	5.93	0.21	225.83	28.10	0.60	0.2097	0.3509
	5.93	0.28	203.67	28.00	0.54	0.2684	0.4981
	5.73	0.35	186.42	28.10	0.51	0.2533	0.4961
	5.77	0.42	165.27	28.10	0.45	0.2425	0.5390
	6.03	0.49	168.02	27.90	0.44	0.2284	0.5223

ตารางผนวกที่ 29 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 18 ใบ มุม 5°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.73	0.00	99.83	27.30	0.57	0.1458	0.2537
	2.70	0.07	11.07	27.20	0.06	0.0296	0.4613
2	3.55	0.00	156.55	27.10	0.69	0.1077	0.1554
	3.71	0.07	110.92	27.00	0.47	0.2156	0.4594
	3.57	0.14	64.42	27.10	0.28	0.1474	0.5203
	3.59	0.21	38.13	27.00	0.17	0.0747	0.4473
	3.57	0.28	18.73	26.60	0.08	0.0244	0.2954
3	4.71	0.00	230.15	26.50	0.77	0.0641	0.0836
	4.75	0.07	197.55	26.40	0.65	0.2012	0.3079
	4.70	0.14	178.23	26.30	0.60	0.1804	0.3029
	4.71	0.21	141.40	26.10	0.47	0.2101	0.4457
	4.80	0.28	84.43	26.50	0.28	0.1482	0.5367
	4.82	0.35	71.35	26.60	0.23	0.1272	0.5471
	4.83	0.42	72.43	26.70	0.24	0.0805	0.3423
	4.78	0.49	53.73	26.80	0.18	0.0747	0.4235
4	5.27	0.00	265.98	27.10	0.79	0.0561	0.0707
	5.13	0.07	231.80	27.20	0.71	0.1836	0.2589
	5.07	0.14	211.70	27.30	0.66	0.1980	0.3019
	5.20	0.21	195.68	27.50	0.59	0.1927	0.3262
	5.23	0.28	156.93	27.60	0.47	0.2091	0.4442
	5.27	0.35	130.43	27.40	0.39	0.1906	0.4901
	5.20	0.42	117.63	27.40	0.36	0.1560	0.4392
	5.23	0.49	69.28	27.60	0.21	0.1458	0.7017
5	5.77	0.00	300.90	27.50	0.82	0.0418	0.0510
	5.77	0.07	277.53	27.60	0.76	0.1400	0.1852
	5.70	0.14	254.63	27.70	0.70	0.1964	0.2801

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.93	0.21	241.05	27.70	0.64	0.2246	0.3521
	5.80	0.28	219.50	27.60	0.59	0.2151	0.3620
	5.77	0.35	189.45	27.40	0.52	0.2304	0.4467
	5.70	0.42	182.93	27.70	0.50	0.2124	0.4216
	5.90	0.49	146.95	28.00	0.39	0.1859	0.4754

ตารางผนวกที่ 30 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 18 ใบ มุม 15°

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.76	0.00	38.68	29.00	0.22	0.0600	0.2725
2	3.70	0.00	145.80	29.00	0.62	0.0944	0.1527
	3.70	0.07	38.82	29.10	0.16	0.0610	0.3706
3	4.76	0.00	216.53	29.10	0.71	0.0579	0.0811
	4.79	0.07	147.73	29.10	0.48	0.1401	0.2895
	4.87	0.14	84.03	29.20	0.27	0.1039	0.3832
	4.81	0.21	51.68	29.20	0.17	0.0559	0.3316
	4.90	0.28	27.13	29.20	0.09	0.0337	0.3874
	4.79	0.35	17.37	29.00	0.06	0.0167	0.2927
	4.75	0.42	5.97	28.90	0.02	0.0054	0.2736
4	5.43	0.00	257.32	29.00	0.74	0.0479	0.0644
	5.27	0.07	215.60	29.20	0.64	0.1482	0.2305
	5.37	0.14	164.57	29.30	0.48	0.1497	0.3109
	5.33	0.21	102.72	29.20	0.30	0.1025	0.3391
	5.27	0.28	51.65	29.50	0.15	0.0668	0.4341
	5.27	0.35	44.20	29.60	0.13	0.0397	0.3014
	5.27	0.42	32.62	29.60	0.10	0.0264	0.2712
	5.30	0.49	22.27	29.60	0.07	0.0174	0.2645
5	5.93	0.00	293.45	29.80	0.78	0.0382	0.0492
	5.83	0.07	253.35	29.90	0.68	0.1303	0.1910

No.	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
	5.93	0.14	221.90	30.00	0.59	0.1439	0.2451
	5.87	0.21	176.18	29.70	0.47	0.1384	0.2936
	5.97	0.28	120.37	29.90	0.32	0.1016	0.3207
	5.87	0.35	85.15	29.90	0.23	0.0696	0.3052
	5.87	0.42	63.05	29.60	0.17	0.0600	0.3557
	5.87	0.49	47.33	29.80	0.13	0.0399	0.3148

ตารางผนวกที่ 31 ข้อมูลการทดสอบกังหันลม 8 ใบ 1-4 ชั้น

N _s	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C _p	C _T
1	2.96	0.00	41.15	30.40	0.22	0.0438	0.20
		0.07	30.72	30.70	0.16	0.0517	0.32
	3.95	0.00	87.50	30.70	0.35	0.0233	0.07
		0.07	75.53	30.80	0.29	0.0505	0.17
		0.14	59.87	30.90	0.24	0.0588	0.25
		0.21	52.17	30.70	0.21	0.0670	0.32
		0.28	43.58	31.10	0.17	0.0720	0.42
		0.35	35.22	31.10	0.13	0.0637	0.48
		0.42	13.67	30.90	0.06	0.0266	0.47
	4.83	0.00	136.57	26.80	0.44	0.0316	0.07
		0.07	118.15	26.70	0.39	0.0865	0.22
		0.14	97.23	26.80	0.31	0.1010	0.32
		0.21	81.22	26.90	0.26	0.1039	0.40
		0.28	69.22	26.90	0.22	0.1093	0.49
		0.35	56.52	26.80	0.18	0.1019	0.56
		0.42	33.70	26.80	0.11	0.0637	0.58
		0.49	23.27	26.80	0.08	0.0445	0.58
	5.93	0.00	169.75	31.30	0.44	0.0161	0.04
		0.07	162.87	31.50	0.43	0.0440	0.10

N_s	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C_p	C_T
2	6.73	0.14	155.32	31.70	0.41	0.0645	0.16
		0.21	146.55	31.80	0.39	0.0725	0.18
		0.28	137.78	31.70	0.37	0.0737	0.20
		0.35	122.68	31.50	0.33	0.0943	0.29
		0.42	118.48	31.60	0.31	0.0831	0.27
		0.49	106.60	31.00	0.28	0.0887	0.32
		0.00	198.42	31.00	0.45	0.0124	0.03
		0.07	191.82	31.90	0.46	0.0399	0.09
		0.14	184.40	31.90	0.43	0.0533	0.12
	4.77	0.21	171.68	31.40	0.40	0.0607	0.15
		0.28	163.03	31.70	0.38	0.0664	0.17
		0.35	162.52	31.60	0.37	0.0816	0.22
		0.42	156.15	31.90	0.36	0.0841	0.23
		0.49	144.53	31.90	0.35	0.0970	0.28
	3.55	0.00	23.77	25.50	0.14	0.0395	0.28
		0.00	70.77	25.50	0.31	0.0454	0.15
		0.07	25.72	25.60	0.11	0.0417	0.36
	5.36	0.00	118.98	25.70	0.39	0.0309	0.08
		0.07	84.83	25.60	0.28	0.0806	0.29
		0.14	68.10	25.70	0.22	0.0862	0.38
		0.21	39.72	25.80	0.13	0.0548	0.42
		0.28	30.50	25.80	0.10	0.0392	0.38
		0.35	13.10	25.90	0.04	0.0139	0.33
		0.42	8.05	25.80	0.03	0.0061	0.23
	5.36	0.00	139.68	26.10	0.41	0.0232	0.06
		0.07	120.55	26.10	0.35	0.0678	0.19
		0.14	108.85	26.20	0.32	0.0525	0.16
		0.21	93.35	26.20	0.27	0.0553	0.20

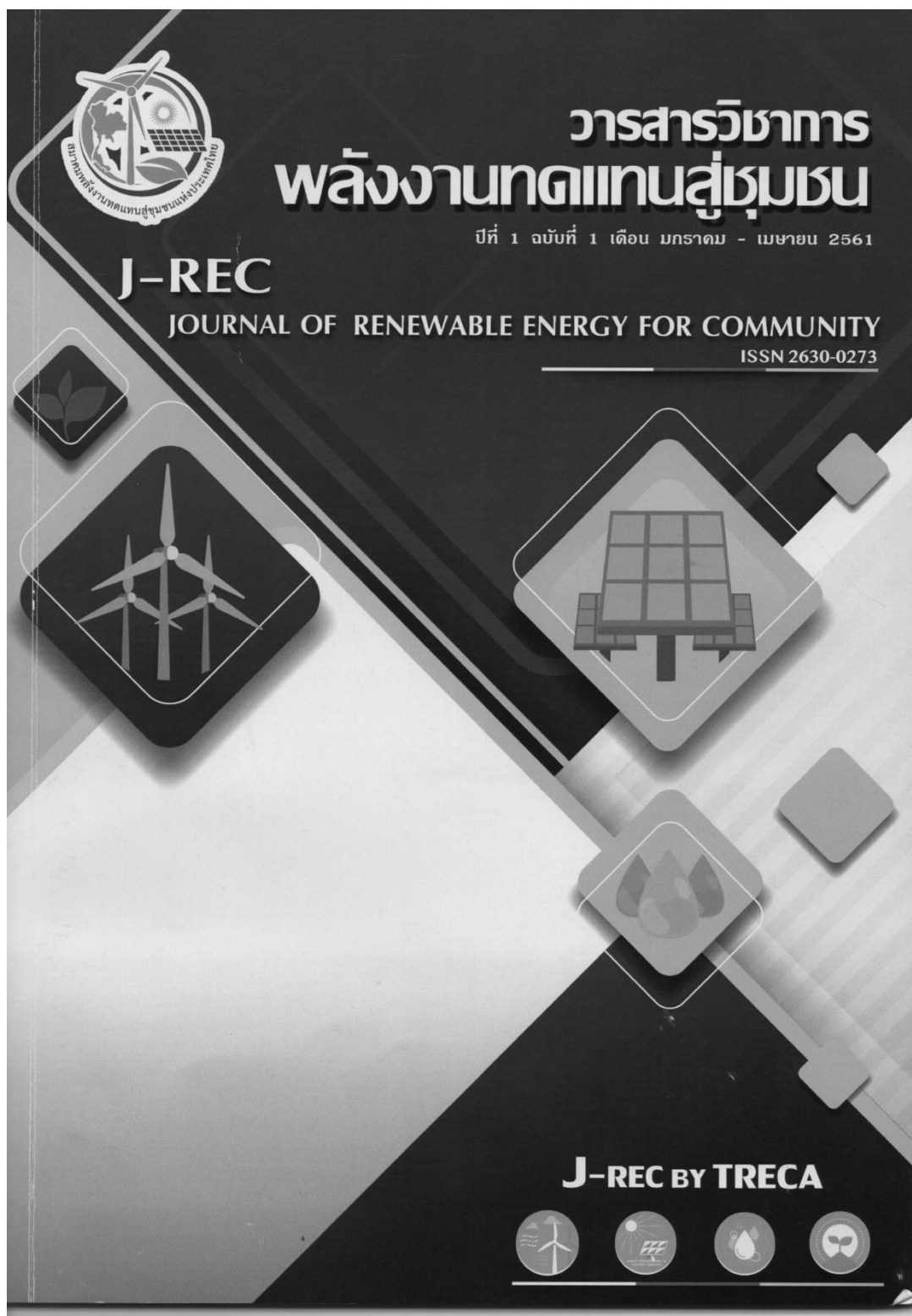
N_s	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C_p	C_T
3	5.86	0.28	73.42	26.10	0.22	0.0744	0.34
		0.35	60.40	26.30	0.18	0.0473	0.26
		0.42	49.63	26.30	0.15	0.0335	0.23
		0.49	35.18	26.30	0.10	0.0214	0.21
		0.00	169.55	26.50	0.45	0.0251	0.06
		0.07	145.53	26.40	0.39	0.0854	0.22
		0.14	126.67	26.40	0.34	0.1029	0.31
		0.21	101.52	26.50	0.27	0.1104	0.40
	2.70	0.28	81.13	26.70	0.22	0.0984	0.46
		0.35	62.40	26.60	0.16	0.0694	0.42
		0.42	50.68	26.70	0.14	0.0724	0.52
		0.49	41.05	26.70	0.11	0.0478	0.43
		0.00	22.88	29.40	0.13	0.0283	0.21
		0.00	63.42	29.90	0.27	0.0244	0.09
		0.07	39.93	30.20	0.17	0.0332	0.20
		0.14	22.85	30.20	0.09	0.0116	0.12
	5.06	0.00	103.40	30.40	0.33	0.0202	0.06
		0.07	85.00	30.40	0.27	0.0391	0.15
		0.14	67.22	30.40	0.21	0.0393	0.19
		0.21	59.23	30.70	0.18	0.0422	0.23
		0.28	39.43	30.30	0.12	0.0367	0.30
		0.35	29.35	30.50	0.09	0.0278	0.30
		0.42	23.57	30.50	0.07	0.0142	0.20
		0.49	17.45	30.70	0.05	0.0113	0.22
	5.55	0.00	129.80	30.80	0.37	0.0180	0.05
		0.07	116.45	30.90	0.33	0.0506	0.15
		0.14	103.73	30.80	0.29	0.0670	0.23
		0.21	89.73	30.80	0.25	0.0595	0.24

N_s	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C_p	C_T
4	6.27	0.28	77.78	30.70	0.22	0.0764	0.34
		0.35	64.58	30.90	0.18	0.0586	0.33
		0.42	59.33	31.10	0.17	0.0473	0.28
		0.49	45.70	31.40	0.13	0.0475	0.36
		0.00	154.65	31.10	0.40	0.0157	0.04
		0.07	137.88	31.10	0.36	0.0459	0.13
		0.14	126.13	31.30	0.31	0.0486	0.16
		0.21	119.38	31.30	0.30	0.0642	0.22
	2.80	0.28	109.33	31.60	0.27	0.0699	0.26
		0.35	96.50	31.40	0.24	0.0732	0.30
		0.42	85.22	31.70	0.21	0.0674	0.32
		0.49	78.85	31.60	0.19	0.0579	0.30
		0.00	32.08	28.40	0.18	0.0288	0.16
		0.07	4.33	28.30	0.02	0.0112	-0.46
	3.95	0.00	73.00	28.40	0.29	0.0286	0.10
		0.07	53.08	28.50	0.21	0.0411	0.20
		0.14	31.80	28.20	0.13	0.0245	0.19
		0.21	23.00	28.40	0.09	0.0173	0.19
	5.05	0.00	106.58	28.80	0.34	0.0152	0.05
		0.07	93.05	28.80	0.28	0.0327	0.12
		0.14	85.28	28.80	0.27	0.0359	0.13
		0.21	65.03	28.90	0.20	0.0371	0.18
		0.28	54.95	29.00	0.17	0.0288	0.17
		0.35	39.95	29.00	0.12	0.0237	0.19
		0.42	30.77	29.10	0.10	0.0170	0.18
		0.49	17.85	29.20	0.05	0.0121	0.22
	5.51	0.00	134.05	29.30	0.38	0.0137	0.04
		0.07	118.05	29.20	0.34	0.0346	0.10

N_s	V (m/s)	Load (kg)	RPM	T (C°)	TSR	C_p	C_T
		0.14	108.42	29.40	0.31	0.0471	0.15
		0.21	96.95	29.40	0.28	0.0450	0.16
		0.28	82.10	29.40	0.24	0.0523	0.22
		0.35	74.45	29.30	0.21	0.0423	0.20
		0.42	56.07	29.50	0.16	0.0417	0.26
		0.49	45.90	29.40	0.13	0.0296	0.22
6.17		0.00	151.93	29.30	0.39	0.0119	0.03
		0.07	137.75	29.50	0.35	0.0303	0.09
		0.14	126.55	29.40	0.32	0.0454	0.14
		0.21	115.38	29.50	0.29	0.0511	0.18
		0.28	110.68	29.40	0.28	0.0426	0.15
		0.35	97.27	29.20	0.25	0.0371	0.15
		0.42	81.02	29.30	0.21	0.0506	0.24
		0.49	75.82	29.20	0.20	0.0221	0.11



ภาคผนวก ข
บทความที่ได้เผยแพร่งานประชุมวิชาการ





การกระจายของอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด Wind Speed Distribution in Open Type Wind Tunnel

เสาวลักษณ์ ทองดี กนกวรรณ ตีบกวาง ขาทีนิ บุรณ์เจริญ ชูรัตน์ ธารักษ์ ณัฐวุฒิ ดุษฎี
Rameshprabu Ramraj และธเนศ ไชยชนะ*

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 ม.4 ต.หนองหาร อ.สันทราย เชียงใหม่ 50290

*ผู้ติดต่อ: Tanatecha@hotmail.com, 081-5306768

บทคัดย่อ

อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้สำหรับศึกษาลักษณะการไหลของอากาศผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ และใช้ในการทดสอบคุณลักษณะการทำงานของกังหันลม สำหรับงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด อัตราเร็วลมต่ำ และหาพื้นที่ทำงานที่เหมาะสมสำหรับการทดลองทางอากาศพลศาสตร์ อุโมงค์ลมเป็นแบบทรงกระบอกมีขนาดหน้าตัด 1.2 m X 1.2 m ยาว 9 m ติดตั้งพัดลมดูดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 m ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1.5 hp ที่ส่วนท้ายของอุโมงค์ลม ทำการทดสอบโดยการวัดอัตราเร็วลมที่ระยะ 0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 และ 7.5 m จากส่วนหัวของอุโมงค์ลม และปรับค่าอัตราเร็วลม 7 ค่าอัตราเร็วลม ผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะ 7.5 m การกระจายของอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากที่สุด อัตราเร็วลมสูงสุดที่อุโมงค์ลมสามารถทำได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.6 m/s พื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์มีขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ อยู่บริเวณส่วนกลางหน้าตัดของอุโมงค์ลม กังหันลมต้นแบบที่จะนำมาทำการทดสอบควรมีขนาดพื้นที่หน้าตัดปะทะลมไม่เกิน $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$

คำหลัก: อุโมงค์ลม การกระจายอัตราเร็วลม การทดสอบทางพลศาสตร์

Abstract

A wind tunnel was a tool used to study the effects of air moving past solid objects and to study characteristic of wind turbine. This research was focused on studying wind speed distribution, the test section has the cross-sectional area and the highest velocity within the wind tunnel. The wind turbine used in the experiment was high, width and length were 1.2 m, 1.2 m and 9 m, respectively. The fan of blower tunnel diameter was 1.2 m and powered by an electric motor with 1.5 hp. The wind speed was measure at 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6.0 m of distance from inlet of wind tunnel and vary the wind speed of test 5 Values. It was found that the optimal distance of wind speed distribution as 7.5 m. Maximum achievable flow speed as 7.6 m/s and maximum wind speed in the wind tunnel centre decreasing while approaching the wall. The test section area size for the wind turbine install about $0.5 \times 0.5 \text{ (m}^2\text{)}$.

Keywords: Wind tunnel, Wind Speed Distribution, Aerodynamic testing



1. บทนำ

พลังงานลมเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับพลังงานทดแทน ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากรัฐบาลเพื่อส่งเสริมให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีกังหันลม แต่เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานลมต่ำ อัตราเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า 4 m/s [1] จึงไม่เหมาะสำหรับการติดตั้งกังหันลมขนาดใหญ่ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงจำเป็นต้องวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมให้เหมาะสำหรับการใช้งานภายในประเทศให้มากขึ้น จากหลายๆ งานวิจัยได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของกังหันลมหรือการทดสอบอาคาร ยานพาหนะ เป็นต้น โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างอุโมงค์ลมกับภาคสนาม [2-4] พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก งานวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมใช้อุโมงค์ลมสำหรับการทดสอบสมรรถนะของกังหันลมขนาดเล็ก ซึ่งสามารถทดสอบได้ง่าย มีความผิดพลาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทดสอบภาคสนามเนื่องจากสามารถควบคุมอัตราเร็วลมได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ

อุโมงค์ลมที่นำมาทดสอบโดยหลักๆ นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ อุโมงค์แบบปิด และอุโมงค์แบบเปิด [5] ข้อดีของอุโมงค์ลมแบบปิด นั้นคือ มีโอกาสสกปรกน้อยและลักษณะการไหลของอากาศภายในมีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับอุโมงค์ลมแบบเปิด แต่ยากในการออกแบบเพื่อให้อากาศไหลกลับได้อย่างสม่ำเสมอ และต้นทุนสูงเนื่องจากจำเป็นต้องสร้างให้มีขนาดใหญ่ สำหรับอุโมงค์ลมแบบเปิดนั้นมีอยู่ 2 ชนิด คือ อุโมงค์ลมแบบเป่า และอุโมงค์ลมแบบดูด ซึ่งจะต่างกันที่ตำแหน่งของพัดลมแต่อุโมงค์แบบเปิดจะมีอัตราเร็วลมที่สม่ำเสมอมากกว่าอุโมงค์ลมแบบเป่า

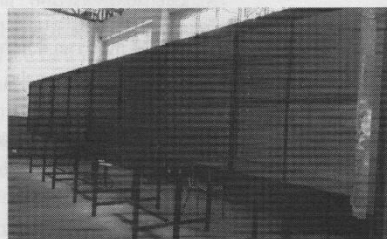
งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งกังหันลมและพื้นที่ทำงานของอุโมงค์ลม และอัตราเร็วลมสูงสุดที่สามารถทำได้ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปใช้ในการออกแบบขนาดของกังหันลมให้เหมาะสมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

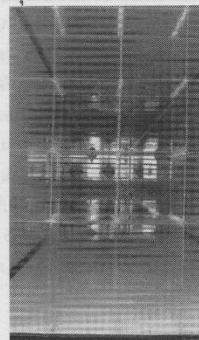
2.1 อุโมงค์ลม

งานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดอุโมงค์ลมแบบเปิดชนิดดูดอากาศสำหรับการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 1 (ก) มีพื้นที่หน้าตัด $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$ ยาว 9 m โดยจะแบ่งอุโมงค์ลมเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนอากาศไหลเข้า ได้ทำการติดตั้งรั้วผึ้งที่ทำจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 0.3 cm บริเวณด้านหน้าของอุโมงค์ลม ดังแสดงในภาพที่ 1 (ข) เพื่อให้อากาศไหลกระจายได้ทั่วภายในอุโมงค์ลม สำหรับส่วนปฏิบัติการเป็นส่วนที่ทำการติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบ

ประสิทธิภาพ และสุดท้ายเป็นส่วนอากาศไหลออก หรือส่วนที่ทำให้เกิดลม จะใช้พัดลมเชื่อมต่อกับมอเตอร์ขนาด 1.5 hp และปรับความถี่ได้สูงสุด 50 Hz



ภาพที่ 1 อุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ [6]



ภาพที่ 2 รั้วผึ้งของอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ [6]

2.2 วิธีการวิจัย

สำหรับการทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์นั้น จะทำการวัดอัตราเร็วลมโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน ซึ่งมีความแม่นยำสูง และสามารถวัดลมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

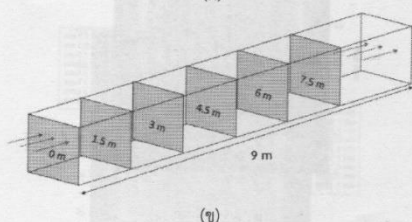
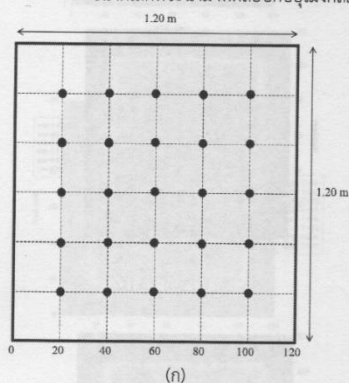
กรณีที่ 1 ทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมที่อัตราเร็วลมคงที่

- 1) แบ่งจุดวัดเป็นระยะ $20 \times 20 \text{ cm}$ ของพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลม ดังภาพที่ 2 (ก) และทำการวัดที่ระยะ 0, 1.5, 3, 4.5, 6 และ 7.5 m ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) จากทางเข้าของอุโมงค์ลม
- 2) ให้อัตราเร็วลมคงที่ โดยปรับความถี่ของมอเตอร์พัดลม 50 Hz



- 3) บันทึกค่าอัตราเร็วลมของแต่ละจุดวัด โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง และนำค่าอัตราเร็วลมที่ได้มาเฉลี่ย
 - 4) นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบการกระจายอัตราเร็วลมในแต่ละระยะของอุโมงค์ลม
- กรณีที่ 2 ทดสอบการกระจายอัตราเร็วลมที่อัตราเร็วลมต่างๆ

- 1) เลือกระยะที่มีการกระจายอัตราเร็วลมดีที่สุดจากกรณีที่ 1 มาทำการทดสอบปรับอัตราเร็วลม โดยปรับความถี่ของมอเตอร์พัดลมจำนวน 7 ค่า คือ 20, 25, 30, 35, 40, 45 และ 50 Hz
- 2) วิเคราะห์การกระจายอัตราเร็วลมในแต่ละความถี่ เพื่อศึกษาพื้นที่ทำงานของอุโมงค์ลมสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบกังหันลมขนาดเล็กที่จะนำมาทดสอบกับอุโมงค์ลม

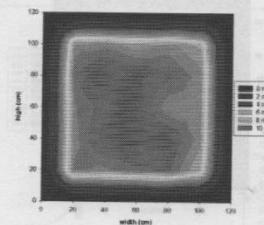


ภาพที่ 2 (ก) จุดที่ทำการวัดอัตราเร็วลม (ข) ระยะที่วัดอัตราเร็วลมจากทางเข้าของอุโมงค์ลม

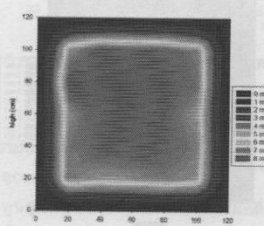
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะต่างๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

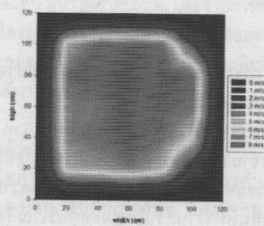
การกระจายอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อระยะจากทางเข้าของอุโมงค์ลมเพิ่มขึ้น โดยอัตราเร็วลมสูงสุดจะอยู่บริเวณส่วนกลางของพื้นที่หน้าตัด และมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของอุโมงค์ลมทั้ง 4 ด้าน ดังภาพที่ 3 (ก)-(ค) ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ที่ระยะ 7.5 m มีความเหมาะสมสำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ของกังหันลมขนาดเล็ก



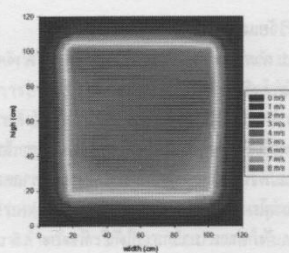
(ก) ระยะ 0 m



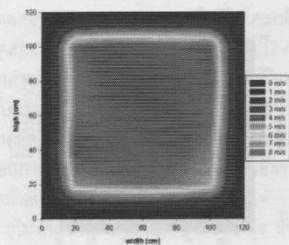
(ข) ระยะ 1.5 m



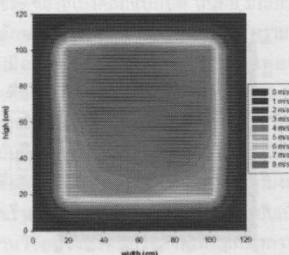
(ค) ระยะ 3 m



(ง) ระยะ 4.5 m



(จ) ระยะ 6 m



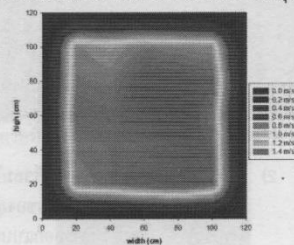
(ฉ) ระยะ 7.5 m

ภาพที่ 3 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ระยะต่างๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

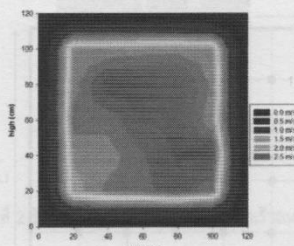
3.2 การกระจายอัตราเร็วลมที่ความถี่ต่างๆ ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิดที่ระยะ 7.5 m

การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m และปรับอัตราเร็วลมจำนวน 7 อัตราเร็วลม ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอัตราเร็วลมทำให้การกระจายอัตราเร็วลมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งพื้นที่ทำงานส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมในทุกๆ อัตราเร็วลม และที่อัตราเร็วลมต่ำจะมีพื้นที่ทำงานขยับไปเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 4 (ก)-(ข) โดยพื้นที่ทำงานสำหรับทดสอบทางพลศาสตร์มีขนาดประมาณ 0.5×0.5 m ดังนั้น การออกแบบกังหันลมที่จะนำมาทดสอบจะต้องมีขนาดพื้นที่ปะทะลมน้อยกว่า 0.25 m^2

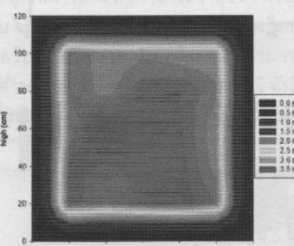
จากพื้นที่ทำงานดังกล่าว ได้ทำการวัดอัตราเร็วลม 9 จุด จากส่วนกลางของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม เพื่อทดสอบอัตราเร็วลมสูงสุดที่อุโมงค์ลมสามารถทำได้ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับความถี่ของมอเตอร์พัดลม ดังภาพที่ 5 พบว่า ที่ตำแหน่งทดสอบอุโมงค์ลมสามารถผลิตอัตราเร็วลมสูงสุดได้ประมาณ 7.6 m/s และเนื่องจากตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ทำให้ง่ายในการปรับความเร็วมอเตอร์เพื่อเพิ่มหรือลดอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลม



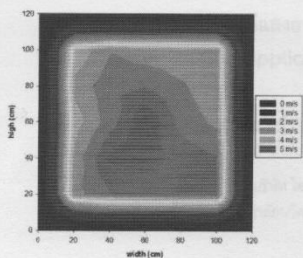
(ก) ความถี่ 20 Hz



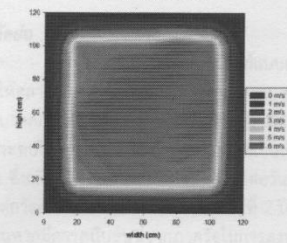
(ข) ความถี่ 25 Hz



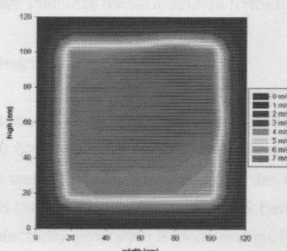
(ค) ความถี่ 30 Hz



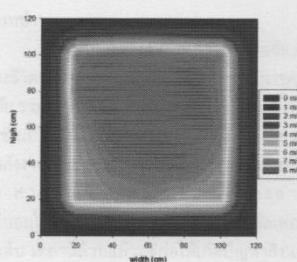
(ง) ความถี่ 35 Hz



(จ) ความถี่ 40 Hz



(ด) ความถี่ 45 Hz

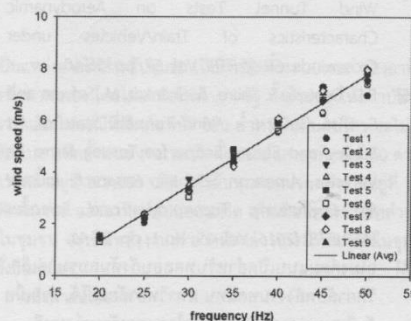


(ซ) ความถี่ 50 Hz

ภาพที่ 4 การกระจายอัตราเร็วลมที่ระยะ 7.5 m ภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกระจายตัวของอัตราเร็วลมภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด สำหรับกรณีที่เพิ่มระยะจากทางเข้า พบว่าที่ระยะ 7.5 m มีการกระจายอัตราเร็วลมอย่างสม่ำเสมอและมีพื้นที่ทำงานขนาด 0.5×0.5 m บริเวณส่วนกลางพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม จึงเหมาะสำหรับติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ โดยอุโมงค์ลมสามารถผลิตอัตราเร็วลมได้สูงสุด 7.6 m/s



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วลมกับความถี่ของมอเตอร์ที่ระยะ 7.5 m

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ

ทุนอุดหนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2559

โครงการอิทธิพลของจำนวนใบพัดและแผนอากาศของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. การดำเนินโครงการพลังงานลม. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม 2560, จาก http://www3.egat.co.th/re/egat_wind/egat_wind.htm.
- [2] Q.A. Li, T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, T. Kawabata, T. Kogaki, et al., (2016). Study on power performance for straight-bladed vertical



- axis wind turbine by field and wind tunnel test. *Renewable Energy*, 90, pp. 291-300.
- [3] K. OLASEK and M. KARCZEWSKI. (2012). MULTI-PHASE MODERNISATION OF THE SUBSONIC WIND TUNNEL ORIENTED TOWARDS INTEGRATION OF CFD & EXPERIMENT. *XX Polish Fluid Mechanics Conference*.
- [4] M. Suzuki and Y. Hibino. (2016). Field Tests and Wind Tunnel Tests on Aerodynamic Characteristics of Train/Vehicles under Crosswinds. *GR of RTRI*, Vol. 57, pp. 55-60.
- [5] R.D. Dsouza, S. Salim, A. Shankar, M. Safwan and S. D'sa. (2016). Wind Tunnels: State of Art Survey and Future Scope for Testing Micro Air Vehicles, *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)* (2016) Vol. 19, No 1, pp. 25-41.
- [6] อุโมงค์ลมแบบเปิดสำหรับทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก, วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้. ถ่ายเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2560, ถ่ายโดย เสาวลักษณ์ ทองดี.






The 11th TSAE International Conference
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 19
26-27 APRIL 2018
Chulabhorn International Convention Center
(Wora Wana Hua Hin Hotel & Convention)
Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand

วิศวกรรมเกษตร
เปิดแนวคิดวิศวกรรมสู่การเกษตรแนวใหม่
AGRICULTURAL ENGINEERING
Imagineering Novel Agriculture



Topics of Oral and Poster Presentation

- Power and machinery
- Soil and water engineering
- Post-harvest and food engineering
- Structures and buildings
- Agricultural systems
- Electronics and information technology
- Energy and environment

Thai Society of Agricultural Engineering
TSAE 2018



อิทธิพลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวเนียส

Effect of Blades Number on Characteristics of a Savonius Type Vertical Axis Wind Turbine

เสาวลักษณ์ ทองดี¹, ชูรัตน์ ธารารักษ์¹, ณัฐวุฒิ ดุษฎี¹, Rameshprabu Ramaraj¹, ธนศ ไชยชนะ^{1*}Saowalak Thongdee¹, Churat Tararuk¹, Natthawud Dussadee¹, Rameshprabu Ramaraj¹, Tanate Chaichana^{1*}¹สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 50290¹School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand*Corresponding author: Tel.: 081-5306768. E-mail address: Tanatecha@hotmail.com

บทคัดย่อ

กังหันลมแกนตั้งแบบซาโวเนียสสามารถทำงานได้ทุกทิศทางลม มีอัตราเร็วลมเริ่มหมุนต่ำ และให้แรงบิดสูง ซึ่งเหมาะกับพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมต่ำ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาผลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวเนียส โดยทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมอัตราเร็วลมต่ำแบบเปิด ที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4 m s^{-1} กังหันลมที่ใช้ในการทดสอบมีใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 6 cm ใบยาว 30 cm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน 30 cm ในการทดสอบได้ปรับจำนวนใบพัดเป็น 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ โดยปรับมุมใบพัดคงที่ที่ 0° ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลมมีค่าเท่ากับ 3.01, 2.65, 2.81, 2.61, 2.36 และ 2.07 m s^{-1} ที่จำนวนใบเป็น 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้นเมื่อมีจำนวนใบมากขึ้นในช่วง 4-16 ใบ และลดลงที่จำนวนใบพัด 18 ใบพัด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่มีจำนวนใบพัด 16 ใบ ให้ค่าที่สูงที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.247 และมีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 0.804

คำสำคัญ: กังหันลมแกนตั้ง, สัมประสิทธิ์กำลัง, สัมประสิทธิ์แรงบิด

Abstract

The savonius type vertical axis wind turbine can be operated at all wind direction, low cut in speed and high torque. Therefore, it is suitable for low wind energy potential areas. This research was focused on studying the effect of blades number by the performance characteristics of savonius turbine. Turbine was tested at 4 m s^{-1} wind flow velocity with low speed-open type wind tunnel. The wind turbine used in the experiment was a semi-circular curved blade, the blade, length and turbine diameter were 6 cm , 30 cm and 30 cm , respectively. The turbine contained the number blades was 4, 6, 8, 12, 16 and 18 blades, subsequently blades angle was fix at 0° . It was found that the cut in wind speed was 3.01, 2.65, 2.81, 2.61, 2.36 and 2.07 m s^{-1} for 4, 6, 8, 12, 16 and 18 blades, respectively. The power and torque coefficient are increased at the range of 4-16 blades and decreased at with 18 blades. The maximum power coefficient of the wind turbine is showed at 16 blades with an average of 0.247 and 0.804 of torque coefficient.

Keywords: Vertical axis wind turbine, Power coefficient, Torque coefficient

1. บทนำ

พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งที่สะอาด ไม่จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงในการผลิตพลังงาน ทำให้ไม่เกิดกากของเสียหรือเพลิงที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และยังสามารถผลิตพลังงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืน แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยที่มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยต่ำในช่วง $2-4 \text{ m s}^{-1}$ พื้นที่ที่เหมาะสมมีจำกัด ในบางฤดูอาจไม่มีลมและยังขาดเทคโนโลยีที่เหมาะสม (สำนักงานนโยบายและแผน

พลังงาน, 2560) ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีกังหันลมให้เหมาะสมสำหรับศักยภาพพลังงานลมและลักษณะภูมิจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

เทคโนโลยีกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวเนียส เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้แรงลากในการหมุนสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง มีความเร็วลมเริ่มหมุนต่ำ ให้แรงบิดสูง นิยมนำมาใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านการเกษตร และผลิตไฟฟ้า เหมาะกับพื้นที่ที่มีความชื้นของดินดีการ และพื้นที่ทางไกลสายส่งแต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกังหันลมแกนนอน จาก

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

หลายๆ งานวิจัยพยายามศึกษาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งในหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น

B. Loganathan et al. (2014, 2015) ศึกษาเกี่ยวกับกังหันลมชาโวเนียส 16 ใบพัด 3 รูปแบบ คือ แบบตรง แบบพีระมิด และแบบพีระมิดหัวกลับ ผลการทดสอบพบว่ากำลังขาออกสูงสุดของกังหันลมแบบพีระมิดหัวกลับมีค่าสูงกว่าแบบตรง 27% และสูงกว่าแบบพีระมิด 48.9 % ที่อัตราเร็วลมประมาณ 11 m s^{-1} และนอกจากนี้ ได้ทำการศึกษากังหันลมไฮโดรลิกแกนตั้งสำหรับผลิตไฟฟ้าภายในครัวเรือน ด้วยใบพัดแบบโค้งครึ่งวงกลม จำนวนใบพัด 8 และ 16 ใบ ออกแบบอุปกรณ์ครอบเสริมโดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับการเกิดพายุไซโคลน ผลการทดสอบพบว่าอุปกรณ์ครอบเสริมสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มกำลังขาออกของโรเตอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นำมาใช้ในการลดจำนวนใบพัด

F. Wenehenbuna et al. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งชนิดชาโวเนียสที่เกี่ยวข้องกับจำนวนใบพัดทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด โดยใช้ใบพัดแบบโค้งครึ่งวงกลมติดกับแกนหมุน จำนวนใบ 2-4 ใบ ผลการทดสอบพบว่าจำนวนใบพัด 4 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำประมาณ 0.35 แต่กังหันลม 3 ใบพัด มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่อัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงกว่า

N. Korprasertsak et al. (2015) ศึกษาการเพิ่มความเร็วรอบของกังหันลมชาโวเนียส 2 ใบพัด โดยใช้แผ่นบังคับทิศทางลมและทดสอบด้วยวิธีการ Simulation CFD ที่อัตราเร็วลม $1-8 \text{ m s}^{-1}$ กรณีที่ติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางและเพิ่มอัตราเร็วลม โดยมีความเร็วเชิงมุมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น 50% ของความเร็วเชิงมุมในกรณีที่ไม่มีการติดตั้ง และกำลังขาออกสูงสุดที่อัตราเร็วลม 8 m s^{-1} มีค่าประมาณ 1.3 W ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 30 % เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นบังคับทิศทางลม

จากการศึกษางานวิจัยที่แสดงข้างต้น งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้กังหันลมชาโวเนียสที่มีลักษณะใบยึดติดกับแกนหมุน โดยมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราเร็วลมโดยใช้อุปกรณ์เสริม และปรับปรุงทรงของกังหันลมเป็นหลัก แต่ไม่มีการกล่าวถึงจำนวนใบที่เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งชนิดชาโวเนียส โดยทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมแบบเปิด เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบของแต่ละจำนวนใบ

2. ระเบียบวิธี

4.1 การออกแบบกังหันลม

ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการออกแบบลักษณะเป็นใบตรง เนื่องจากง่ายในการสร้าง โดยใช้ท่อ PVC ผ่าซีก หนา 2 mm เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 6 cm ยาว 30 cm ปิดหัวท้ายใบพัดด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 3 mm และประกอบใบเข้ากับแผ่นวงแหวนที่ทำด้วยแผ่นอะคริลิกที่มี 15 cm สำหรับยึดใบเข้ากับเพลากังหัน

ดังแสดงใน Figure 1 ทั้งหมด 6 ชุด คือ กังหันลม 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ ดังแสดงใน Figure 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการปรับจำนวนใบ

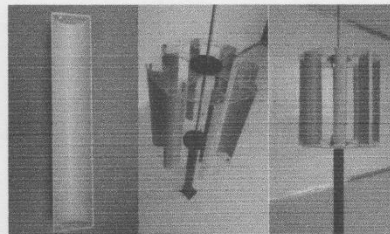


Figure 1 Rotor design.

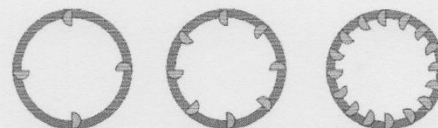


Figure 2 Plan view of the turbine configuration.

4.2 การติดตั้งกังหันลมทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการติดตั้งกังหันลม ณ ตำแหน่งทดสอบที่ระยะ 7-8 m จากทางเข้าของอุโมงค์ลมแบบเปิด ดังแสดงใน Figure 3 ปรับจำนวนใบของกังหันลม 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ ปรับมุมใบ 0° ทดสอบที่อัตราเร็วลมเฉลี่ย 4 m s^{-1} โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน เครื่องวัดความเร็วรอบแบบเลเซอร์ เซนเซอร์ และวัดแรงบิดของเพลาด้วยวิธี Brake horsepower ซึ่งประกอบด้วย โหลดเซลล์ รอก และชุดถ่วงมวล

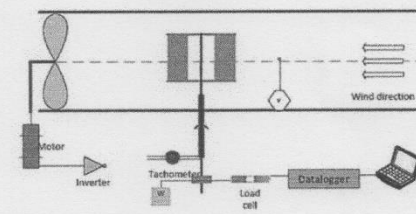


Figure 3 Schematics of experimental setup. (เสาวลักษณ์ และคณะ, 2560)

จากการทดสอบ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความเร็วลมเริ่มหมุน ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังงานของกังหันลม (P_o) กับพลังงานจลน์ของลม (P_w) ดังแสดงในสมการที่ 1 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพทางเทคนิคของกังหันลม และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) เป็นอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์กำลังกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบ (λ) ดังแสดงในสมการที่ 2

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

$$C_p = \frac{P_o}{P_w} = \frac{\tau\omega}{1/2\rho AV^3} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (3)$$

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ความเร็วลมเริ่มหมุน (Cut in wind speed)

การศึกษาความเร็วลมเริ่มหมุน เป็นการพิจารณาค่าความเร็วลมต่ำสุดที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนออกตัว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับศักยภาพลมในแต่ละพื้นที่ จากการศึกษาโดยการปรับจำนวนใบพัด 4-18 ใบ และทดสอบที่อัตราเร็วลมเฉลี่ยประมาณ 4 m s^{-1} ผลการทดสอบพบว่า เมื่อจำนวนใบพัดเพิ่มขึ้น ความเร็วลมเริ่มหมุนต่ำสุด (กรณีไม่มีการเพิ่มโหลดให้กับเพลากังหัน) มีแนวโน้มลดลงเป็น 3.01, 2.65, 2.81, 2.61, 2.36 และ 2.07 m s^{-1} ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 4

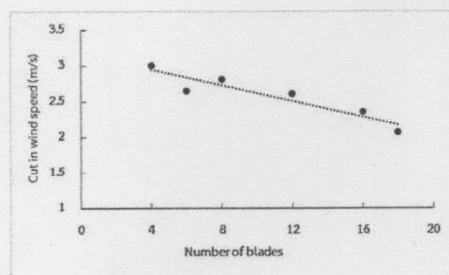


Figure 4 Effect of blades number on cut in wind speed

3.2 สัมประสิทธิ์กำลัง (power coefficient, C_p) และ สัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_T)

สัมประสิทธิ์ของกังหันลมที่ทำการศึกษานี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิด ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนความเร็วเร็วปลายใบ โดยปรับจำนวนใบ 4-18 ใบ จากผลการทดสอบดังแสดงใน Figure 5 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดของกังหันลม 4-16 ใบ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบค่าหนึ่ง และสำหรับกังหันลม 18 ใบ มีค่าต่ำกว่ากังหันลม 16 ใบ ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบประมาณ 0.20-0.55

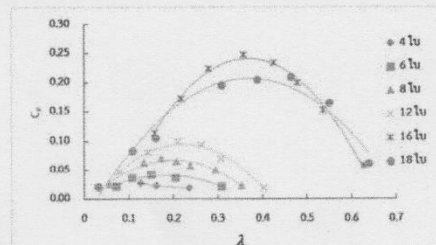


Figure 5 Power coefficient as a function of tip speed ratio at different number of blades.

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดที่ทดสอบในทุกๆ จำนวนใบ พบว่ามีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบสูงขึ้น โดยกังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดในช่วงค่าอัตราส่วนความเร็วปลายใบต่ำกว่า 0.5 ดังแสดงใน Figure 6 ซึ่งกังหันลม 16 ใบ มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดประมาณ 0.247 และ 0.804 ดังแสดงใน Figure 7

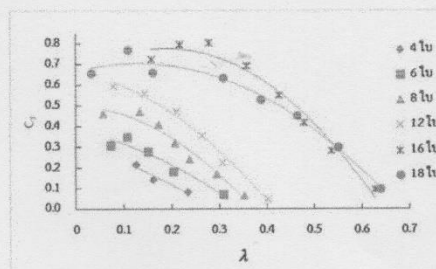


Figure 6 Torque coefficient as a function of tip speed ratio at different number of blades.

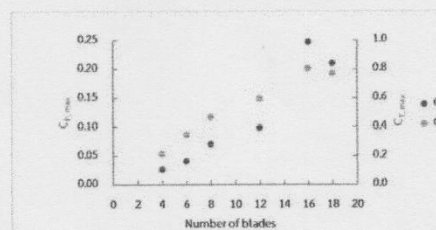


Figure 7 Maximum power and torque coefficient at different number of blades.

4 สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแกนตั้งชนิดซาโวนีเยส ที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมแบบเปิดความเร็วลมต่ำ ผลการศึกษาสรุปได้ว่า กังหันลม 16 ใบ มีความเหมาะสมที่สุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 19 วันที่ 26-27 เมษายน 2561

- 1) ค่าความเร็วลมเริ่มหมุนต่ำของกังหันลม 4, 6, 8, 12, 16 และ 18 ใบ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.01, 2.65, 2.81, 2.61, 2.36 และ 2.07 m s^{-1} ตามลำดับ
- 2) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 0.247 ในช่วงอัตราส่วนความเร็วปลายใบ 0.3-0.5 และสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงสุดประมาณ 0.804

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนา ศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีการศึกษา 2559 โครงการอิทธิพลของจำนวนใบพัดและแผนอากาศของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กต่อค่าสัมประสิทธิ์กำลัง งบประมาณประจำปี 2560 และวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

6 เอกสารอ้างอิง

- B. Loganathan, H. Chowdhury, I. Mustary and F. Alam. (2015). An experimental study of a cyclonic vertical axis wind turbine for domestic scale power generation. *Procedia Engineering*, 105, 686–691.
- F. Wenehenubuna, A. Saputraa and H. Sutantoa, (2015) An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy Procedia*, 68, 297 – 304.
- N. Korprasertsak and T. Leephakpreeda. (2015). CFD-Based Power Analysis on Low Speed Vertical Axis Wind Turbines with Wind Boosters, *Energy Procedia*, 79, 963 – 968.
- เสาวลักษณ์ ทองดี, จตุพร แก้วอ่อน, ประสงค์ เกษราธิคุณ, ศุภลักษณ์ อำลอบ, ธเนศ ไชยชนะ. 2560. สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมชาโวนีเยส 12 ใบพัด. รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ประจำปี 2560, 1664–1667. 31 พฤษภาคม–2 มิถุนายน 2560, เชียงใหม่
- B. Loganathan, I. Mustary, H. Chowdhury and F. Alam. (2014). Aerodynamic Behaviour of Small Savonius Turbine with 3 Different Configurations, 9th Australasian Fluid Mechanics Conference, 8–14 December 2014, Melbourne, Australia
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2560. พลังงานลม. แหล่งข้อมูล: www.eppo.go.th/eng/Load/ET11.pdf. เข้าถึงเมื่อ 18 มิถุนายน 2560

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นางสาวเสาวลักษณ์ ทองดี

เกิดเมื่อ

22 กรกฎาคม 2535

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558 ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม โรงเรียนก้างปลาวิทยาคม ตำบลที่
วัง อำเภอฟุ่่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช

