



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดและชนิดเพนอากาศ
ของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กต่อสัมประสิทธิ์กำลัง

The effect of the number and air foil type of small vertical axis wind
turbines to power coefficient

โดย

ธนศ ไชยชนะ ณัฐวุฒิ คุษฎี และ เสริมสุข บัวเจริญ

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2560



รายงานผลการวิจัย

เรื่อง การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดและชนิดแพนอากาศของกังหันลมแกนตั้ง
ขนาดเล็กต่อสัมประสิทธิ์กำลัง
The effect of the number and air foil type of small vertical axis wind turbines
to power coefficient

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2560
จำนวน 347,000.00 บาท

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.ชเนศ ไชยชนะ
ผู้ร่วมโครงการ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี
ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์
วันที่ 6 เดือน สิงหาคม พ.ศ.2560

สารบัญ

	หน้าที่
1. สารบัญตาราง	ข
2. สารบัญภาพ	ก
3. บทคัดย่อ	1
4. Abstract	1
5. คำนำ	3
6. วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
8. การตรวจเอกสาร	6
9. อุปกรณ์และวิธีการ	19
10. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	25
11. สรุปผลการวิจัย	56
12. เอกสารอ้างอิง	57



สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1 แสดงข้อดีและข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้ง [3,4,5]	4
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [4]	11
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอนและแกนตั้ง ที่มีพื้นที่กังหันเท่ากัน 100 m ² [5]	11
ตารางที่ 4 อัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม	44
ตารางที่ 5 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม	45
ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012	51
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมต้นแบบ	54

สารบัญภาพ

	หน้าที่
ภาพที่ 1 การไหลของอากาศผ่านกังหัน [8]	7
ภาพที่ 2 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ [9]	10
ภาพที่ 3 เปรียบเทียบกังหันชนิดต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากัน (3.2 ตารางเมตร) ที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที [5]	12
ภาพที่ 4 ตัวอย่างกังหันลมแกนตั้ง และกังหันลมแกนนอน	12
ภาพที่ 5 แพนอากาศแบบต่าง ๆ [8]	13
ภาพที่ 6 ลักษณะการกระจายของความดันที่กระทำต่อใบพัด [12]	14
ภาพที่ 7 ลักษณะการทำงานของแพนอากาศ [5]	15
ภาพที่ 8 โครงสร้างของกังหันหมุนสวนทาง [18]	18
ภาพที่ 9 อุโมงค์ลม	19
ภาพที่ 10 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน	20
ภาพที่ 11 Data Logger	20
ภาพที่ 12 เครื่องวัดอัตราเร็วรอบ	21
ภาพที่ 13 ชุดวัดแรงบิดแบบ Brake Horse Power	21
ภาพที่ 14 ลักษณะของอุโมงค์ลมและจัดวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม	22
ภาพที่ 15 ตัวอย่างลักษณะของแพนอากาศ	23
ภาพที่ 16 อุโมงค์ลม (1 ท่อน จากทั้งหมด 4 ท่อน)	25
ภาพที่ 17 พัดลมควบคุมอากาศ	26
ภาพที่ 18 อุโมงค์ลม	27
ภาพที่ 19 จุดที่ทำการวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ	27
ภาพที่ 20 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 20 Hz (m/s)	30
ภาพที่ 21 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 25 Hz (m/s)	31
ภาพที่ 22 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 30Hz (m/s)	32
ภาพที่ 23 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 35Hz (m/s)	33
ภาพที่ 24 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 40Hz (m/s)	34
ภาพที่ 25 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 45Hz (m/s)	35
ภาพที่ 26 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 50 Hz (m/s)	36

สารบัญภาพ

	หน้าที่
ภาพที่ 27 แสดงมุม โค้งของใบพัด	37
ภาพที่ 28 มุม โค้งใบพัด 90° 60° 45° และ 30°	38
ภาพที่ 29 การติดตั้งและการตรวจวัดค่าต่างๆ	38
ภาพที่ 30 อัตราเร็วลมที่กังหันเริ่มหมุนของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็น ครึ่งส่วนหนึ่งของวงกลม	40
ภาพที่ 31 กราฟแสดงอัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง	40
ภาพที่ 32 กราฟแสดงแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลลาของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง	40
ภาพที่ 33 กราฟแสดง สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง	41
ภาพที่ 34 ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม	41
ภาพที่ 35 กังหันลมแกนตั้งแบบซาโวเนียสที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม	42
ภาพที่ 36 แสดงอัตราเร็วลมที่กังหันเริ่มหมุนของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็น ครึ่งวงกลม	43
ภาพที่ 37 กราฟแสดงแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลลาของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง เป็นครึ่งวงกลม	45
ภาพที่ 38 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่มีใบ แบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม	46
ภาพที่ 39 ใบพัดของกังหันลมแบบสมมาตร รหัส NACA 0012	47
ภาพที่ 40 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012	48
ภาพที่ 41 อัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012	48
ภาพที่ 42 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลลาของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012	50
ภาพที่ 43 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012	50
ภาพที่ 44 สัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012	51
ภาพที่ 45 อิทธิพลของรูปแบบของแผนอากาศต่อสัมประสิทธิ์กำลัง	52
ภาพที่ 46 กังหันลมแกนตั้งใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลม จำนวน 12 ใบ	53
ภาพที่ 47 รอบการหมุนของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ	53
ภาพที่ 48 สัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมต้นแบบ	54

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนใบพัดและชนิดเพนอากาศของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก
ต่อสัมประสิทธิ์กำลัง

The effect of the number and air foil type of small vertical axis wind turbines to
power coefficient

ธนศ ไชยชนะ¹ ณัฐวดี ดุษฎี¹ และเสริมสุข บัวเจริญ¹

Tanate Chaichana, Natthawud dussadee and Sermsuk Buochareon

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลมแบบเปิด ออกแบบ สร้าง และทดสอบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์และในสภาวะการทำงานจริง โดยทำการสร้างอุโมงค์ลมที่มีขนาด กว้าง 1.2 m สูง 1.2 m และยาว 9 m ส่วนกังหันลมที่ทำการศึกษากังหันลมที่มีใบ 3 รูปแบบคือ แบบแผ่นเรียบตัดโค้ง แบบสมมาตร NACA0012 และแบบไม่สมมาตร ทำการทดสอบที่จำนวนใบ 4-12 ใบ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ทำงานของอุโมงค์ลมที่ตำแหน่ง 7.5 m จากปากทางเข้าของลมมีขนาด 80X80 cm และสามารถสร้างอัตราเร็วลมได้สูงสุด 8 m/s มุม โคนของใบพัดกังหันแบบแผ่นเรียบตัดโค้งที่เหมาะสมที่สุดคือมุม โคน 90 องศา จำนวนใบที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมที่มีใบ 3 ใบ กังหันที่มีใบแบบสมมาตร NACA 0012 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 29.84% ส่วนค่าสัมประสิทธิ์กำลังสำหรับกังหันลมที่มีใบแบบไม่สมมาตร และแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมมีค่าเท่ากับ 26.84% และ 16.42% ตามลำดับ กังหันลมต้นแบบที่ใช้ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลม 2.98 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 0.84% และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยเท่ากับ 2.63%

Abstract

The objective of the research was to design, build and test a wind tunnel. Design, build and test the wind power coefficients of wind turbine in the wind tunnel. Test the wind power coefficients of wind turbine in real working conditions. The wind tunnel is 1.2 meters wide, 1.2 meters high and 9 meters long. Three type of blade was used to construct wind turbine, curved

blade, symmetrical blade NACA0012 and asymmetrical blade. The number of blade is 4-12. The result show that the work area at 7.5 meters from the entrance of the wind is 80×80 cm. The curved angle of the curved blades is the most suitable is 90 degrees. The number of blades suitable for wind turbines is 8 blades. The power coefficient of the wind turbine with a symmetrical blade, NACA0012, is the most with 29.84%. The power coefficient of the wind turbine with an asymmetrical and curved blade is 26.84% and 16.42% respectively. The cut in speed and power coefficient of prototype wind turbine is 2.98 m/s and 2.63% respectively.



คำนำ

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกและแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [1,2] ที่มีความสอดคล้องกันในเรื่องการพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนทั้งในด้านความร้อน และไฟฟ้า ซึ่งพลังงานลมก็เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่ทั้ง 2 หน่วยงานให้ความสำคัญในการที่จะพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานของประเทศ โดยมีอัตราส่วนสูงถึงประมาณ 17% ของปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนทั้งหมดของประเทศ อีกทั้งยังมีการส่งเสริมต่างๆ เช่น นโยบายส่งเสริมผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กมาก (Very Small Power Producer : VSPP) โดยใช้พลังงานหมุนเวียนพลังงานหมุนเวียน ซึ่งปัจจุบันก็มีโรงไฟฟ้าพลังงานลมเกิดขึ้นแล้วในหลายพื้นที่ของประเทศไทย เช่น โรงไฟฟ้าพลังงานห้วยบง จ.นครราชสีมา โรงไฟฟ้าพลังงานลมที่กำลังมีการพัฒนาอีกหลายพื้นที่ในภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย บริเวณจังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา และปัตตานี ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวนี้เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานอันเนื่องมาจากเหตุผลสำคัญคือ มีอัตราเร็วลมสูง เป็นพื้นที่โล่งริมฝั่งทะเลอ่าวไทย มีระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 22 kVA มีการคมนาคมขนส่งที่อำนวยความสะดวกในการขนส่งส่วนประกอบต่างๆ ของกังหันลม

ทั้งนี้จากการศึกษาถึงศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยที่มีการดำเนินการจากหลายหน่วยงาน เช่น กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมอุตุนิยมวิทยา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ เป็นต้น ได้ข้อสรุปที่ตรงกันคือพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยนั้นจะแบ่งเป็น 3 กลุ่มลักษณะพื้นที่ คือ พื้นที่ภูเขาสูง พื้นที่ราบสูง และพื้นที่ริมฝั่งทะเลของประเทศไทยทั้งฝั่งอ่าวไทย และอันดามัน ซึ่งก็จะเห็นว่าในพื้นที่ ราบสูง และพื้นที่ริมฝั่งทะเลนั้นได้มีการพัฒนาเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานลมแล้ว ส่วนพื้นที่ภูเขาสูงนั้นไม่สามารถดำเนินการได้อย่างเป็นรูปธรรมมากนักอันเนื่องมาจากข้อจำกัดต่างๆ คือ อยู่ในพื้นที่สูงซึ่งส่วนมากจะเป็นพื้นที่อนุรักษ์ มีปัญหาด้านการคมนาคมขนส่ง ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในบริเวณใกล้เคียง ผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณนั้นๆ มีจำนวนน้อย เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันก็เห็นการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานในพื้นที่เหล่านี้อยู่บ้างแต่ก็เป็นระบบที่มีขนาดเล็กขนาดประมาณ ไม่เกิน 1 kW และเป็นระบบที่ไม่มีการต่อเข้ากับเครือข่ายสายส่งไฟฟ้าและระบบที่ติดตั้งในปัจจุบันก็เป็นระบบที่ติดตั้งโดยบริษัทเอกชนต่างๆ ที่มีการสั่งและนำเข้าจากต่างประเทศ จึงเกิดปัญหาที่ตามมาคือเมื่อมีการชำรุดเสียหายการซ่อมบำรุงจึงดำเนินการได้ยาก

ดังนั้นการพัฒนากังหันลมที่สามารถติดตั้งได้ง่าย ใช้วัสดุในประเทศ มีขนาดและน้ำหนักที่สามารถขนย้ายได้ง่าย ติดตั้งโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ติดตั้ง จึงเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อพึ่งตนเองด้านพลังงานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างความมั่นคงให้กับประเทศอีกทางหนึ่งด้วย เนื่องจากบางพื้นที่ที่มีศักยภาพทางด้านพลังงานลมเป็นพื้นที่ความมั่นคงด้วย

ทั้งนี้เพื่อก้าวไปสู่เป้าหมายข้างต้นจะต้องทำการศึกษาเชิงวิชาการและทดลองสร้างต้นแบบ ทดลอง ทดสอบการใช้งาน ทดสอบความคงทนแข็งแรง หาค่าประสิทธิภาพการทำงานของต้นแบบ เสียก่อน โครงการวิจัยนี้จึงเสนอเพื่อขอดำเนินการในการทำการศึกษาเชิงวิชาการและทดลองสร้างต้นแบบ ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของต้นแบบ โดยเลือกกังหันลมแกนตั้ง ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีข้อดีสำหรับลักษณะพื้นที่ดังกล่าวข้างต้น ดังแสดงข้อดีข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้งในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อดีและข้อด้อยของกังหันลมแกนตั้ง [3,4,5]

กังหันลมแกนตั้ง (VAWTs)	
ข้อดี	ข้อด้อย
<ol style="list-style-type: none"> 1. ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถติดตั้งได้บนพื้นดินง่ายต่อการบำรุงรักษา มีความเหมาะสมในพื้นที่บางพื้นที่มากกว่า HAWTs เช่น พื้นที่ยอดเขา เป็นต้น 2. สามารถทำงานได้ที่ทุกทิศทางของลมโดยไม่ต้องมีระบบควบคุมทิศทางรับลมของใบกังหัน 3. ใบของกังหัน สร้างได้ง่ายกว่ากังหันลมแกนนอน (HAWTs) โดยสามารถเป็นใบแบบสมมาตรตลอดทั้งใบได้ 4. มีเสียงรบกวนน้อย กระทบต่อระบบ Radar น้อย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยต่ำกว่ากังหันลมแกนนอน (HAWTs) 2. น้ำหนักทั้งหมดของกังหันจะกระทำที่ตลับลูกปืนตลอดเวลา ต้องออกแบบตลับลูกปืนอย่างเหมาะสม 3. เสียความได้เปรียบด้านความเร็วลมที่ระดับความสูง 4. ต้องใช้วัสดุทำใบและโครงสร้างประกอบใบที่ใหญ่กว่า HAWTs หากต้องการพื้นที่รับลมที่เท่ากัน

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) ออกแบบ สร้าง อุโมงค์ลมแบบเปิด สำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์
- 2) ออกแบบ สร้าง ทดสอบการทำงานและทดสอบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแกนตั้งในอุโมงค์ลม
- 3) สร้างต้นแบบ ทดสอบการทำงานและทดสอบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแกนตั้งในสภาวะการทำงานจริง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ด้านงานเชิงวิชาการ
 - มีองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก ที่สร้างได้ง่าย โดยสามารถใช้วัสดุที่มีภายในประเทศ
 - ได้รูปแบบของกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน
 - ได้ข้อมูลในการพัฒนากังหันลมแกนตั้งขนาดเล็กเพื่อใช้ประโยชน์จริงสำหรับการพัฒนาระบบเพื่อการผลิตไฟฟ้า
 - สามารถเผยแพร่เอกสารการทำวิจัยในแต่ละขั้นตอนในการประชุมระดับชาติ หรือวารสารระดับชาติ หรือวารสารระดับนานาชาติได้
 - รายงานการทำการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ที่สามารถนำข้อมูลไปใช้ศึกษาพัฒนาต่อไปได้
- 2) ด้านสังคม
 - เนื่องจากกังหันลมที่ทำการศึกษาเป็นกังหันลมที่ใช้ลมอัตราเร็วต่ำจึงสามารถทำงานได้เกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นประชาชนในพื้นที่ต่างๆ จึงสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเชิงกล และเชิงไฟฟ้า
 - สร้างความสัมพันธ์ ชุมชนสัมพันธ์ระหว่างนักศึกษา นักวิจัย และบุคลากรของมหาวิทยาลัย กับชุมชนต่างๆ
- 3) ด้านเศรษฐศาสตร์

กังหันลมที่ออกแบบและทำการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นตัวในการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้กับระบบแสงสว่างได้โดยตรง จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าของครัวเรือนที่นำกังหันลมไปใช้ประโยชน์ได้ หรือหากนำไปใช้เป็นระบบผลิต

ไฟฟ้าสำหรับไฟแสงสว่างของถนนก็สามารถลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าของหน่วยงานต่างๆ ได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างความปลอดภัยให้กับประชาชนได้

การตรวจเอกสาร

1) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.1 ลม

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

- ลมท้องถิ่น (Local winds) [6] เป็นลมที่มีวงรอบของการเกิดในช่วงเวลาสั้นๆ คือ เป็นช่วงวัน ครอบคลุมในภูมิภาคที่เฉพาะ โดยเกิดเนื่องจากลักษณะทางภูมิศาสตร์ และความแตกต่างของอุณหภูมิกายในท้องถิ่น ตัวอย่างเช่น ลมบก-ลมทะเล ลมหุบเขา-ลมภูเขา
- ลมประจำฤดู (Monsoon wind) [6] ลมประจำฤดู หรือ ลม มรสุม เกิดจากสาเหตุใหญ่ๆ คือ เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิกายของพื้นดิน และพื้นน้ำทำนองเดียวกับลมบก-ลมทะเล ในฤดูหนาวอุณหภูมิกายของอากาศภาคพื้นทวีปเย็นกว่าอุณหภูมิกายของอากาศในมหาสมุทรที่อยู่ใกล้เคียง อากาศเหนือพื้นน้ำที่มีอุณหภูมิกายสูงกว่าก็จะลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือทวีปซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดเป็นลมพัดออกจากพื้นทวีป พอถึงฤดูร้อนอุณหภูมิกายของอากาศภาคพื้นทวีปจะร้อนกว่าอากาศในมหาสมุทร เป็นเหตุให้เกิดลมพัดไปในทิศทางตรงกันข้าม คือ พัดจากมหาสมุทรเข้าสู่พื้นทวีป

1.2 พลังงานจากลม

จากหลักของการคลและ โมเมนตัม [7] นำมาพิจารณาของไหลมวล m (kg) ที่ถูกแรงกระทำ F (N) ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V (m/s) ไปบนระนาบ x - y จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตันที่ว่า

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

$$Fdt = mdV \quad (1)$$

ในกรณีของไหลแบบคงที่ ในปริมาตรควบคุม สามารถทำการอินทิเกรต สมการที่ 2.1 ในช่วงเวลาหนึ่ง ได้เป็นสมการที่ 2 โดยไม่พิจารณาแรงเสียดทานของน้ำหนักของของไหล และของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ความหนาแน่นของของไหลคงที่) คือ

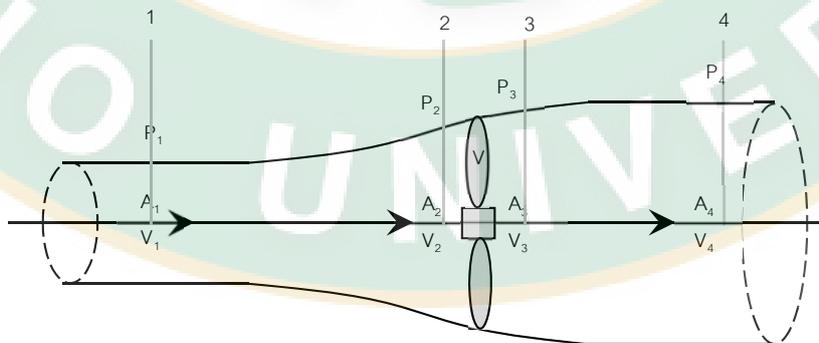
$$F = m(V_2 - V_1) \quad \text{หรือ}$$

$$F = \rho VA(V_2 - V_1) \quad \text{เมื่อ } m = \rho VA \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
 m คือ อัตราการไหล (kg/s)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อการไหล (m^2)
 V คือ ความเร็ว (m/s)

ทฤษฎีโมเมนตัมสำหรับกังหันลม พิจารณาของไหลที่ผ่านกังหันลม โดยพิจารณาที่ปริมาตรคงที่ ภายได้สมมุติฐานเบื้องต้นคือ [5,8]

- อากาศเป็นของไหลที่ไม่มีการยุบตัว และมีอัตราไหลผ่านกังหันคงที่
- ไม่มีแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับกังหัน
- จำนวนใบของกังหันมีจำนวนอนันต์
- ลักษณะการไหลผ่านระนาบการหมุนของกังหันเหมือนกันทุกจุด
- ความดันสถิต (Static pressure) ของอากาศ ก่อนและหลังผ่านระนาบกังหันไม่ขึ้นกับความดันบรรยากาศ



ภาพที่ 1 การไหลของอากาศผ่านกังหัน [8]

ดังนั้น จาก อัตราการไหล (Mass Flow Rate) ของอากาศที่ตลอดทั้งระบบ จากภาพที่ 1 ก็จะได้ว่า

$$m = \rho V_0 A_0 = \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \quad (3)$$

เมื่อ V_x และ A_x คือ ความเร็วลม และพื้นที่ ณ จุดต่าง ๆ

แรงที่กระทำที่ระนาบการหมุนของกังหันสามารถพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม จากสมการที่ 2 และภาพที่ 1 คือ

$$F = \rho AV(V_1 - V_4) \quad (4)$$

พิจารณาความดันที่จุด 2 และ 3 จะได้ ผลต่างของแรงที่กระทำอันเนื่องจากของไหลที่ระนาบ 2 และ 3

$$F = A(P_2 - P_3) \quad (5)$$

เขียนสมการที่ 4 และสมการที่ 5 ใหม่ ได้ คือ

$$P_2 - P_3 = \rho V(V_1 - V_4) \quad (6)$$

จากสมการ เบริ์นูลลี โดยพิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนระดับความสูงระหว่างการเคลื่อนที่ของของไหล คือ

$$\text{ก่อนเข้าสู่กังหัน } P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

$$\text{ผ่านจากกังหัน } P_3 + \frac{1}{2} \rho V^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho V_4^2 \quad (8)$$

จากสมการที่ 7 และ 8 เขียนใหม่เป็น โดยสมมติ ว่า $P_1 = P_4$ เท่ากับความดันบรรยากาศ จะได้ว่า

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

สรุปความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จากสมการ 6 และ 9 ได้

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

จากสมการที่ 10 จะเห็นว่า ความเร็วของอากาศที่ระนาบการหมุนของกังหัน จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของอากาศก่อนและหลังระนาบการหมุนของกังหัน ดังนั้น กำลังเนื่องจากลมที่มีความเร็ว V กระทำต่อกังหันสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 11 คือ

$$P = FV \quad (11)$$

แทนค่า F และ V จากสมการ 4 และ 10 ลงในสมการที่ 11 จะได้ ก็จะได้สมการแสดงถึงกำลังที่กังหันลมได้รับจากกำลังของลม

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

ซึ่ง กำลังของกระแสลม ที่อยู่ในรูปของพลังงานจลน์ คือ

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho AV_{wind}^3 \quad (13)$$

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

$$V_4 = \frac{1}{3} V_1 \quad (14)$$

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

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

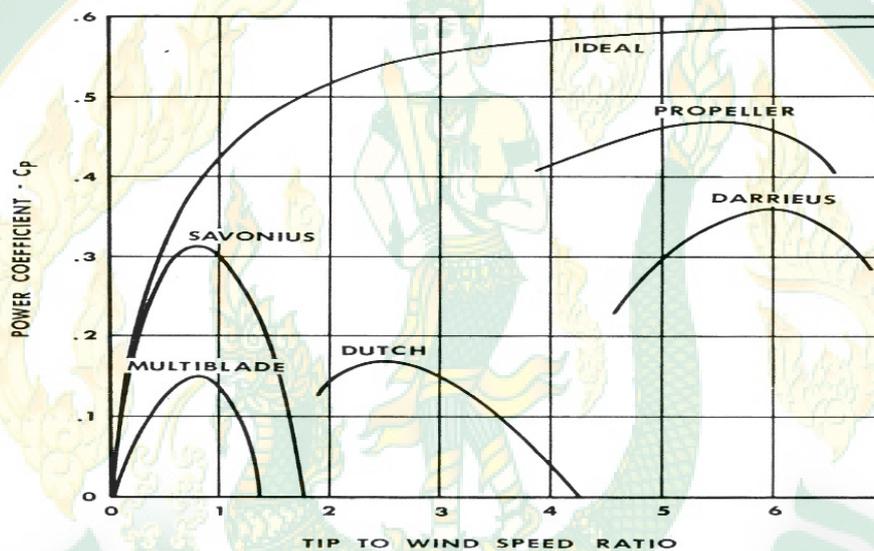
$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho AV_1^3 \quad (16)$$

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

$$C_p = \frac{P}{P_{air}} = \frac{1/2\rho VA(V_1^2 - V_4^2)}{1/2\rho AV^3} \quad (17)$$

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

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_{air}} = \frac{8/27\rho AV^3}{1/2\rho AV^3} = \frac{16}{27} \quad (18)$$



ภาพที่ 2 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมแบบต่าง ๆ [9]

ดังนั้น ความสามารถในการดึงกำลังจากลมมาใช้โดยกังหันลมจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลัง สูงสุดเท่ากับร้อยละ 59.26 ของกำลังทั้งหมดของลม ดังนั้นในการพิจารณากำลังที่กังหันลมผลิตได้สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 2.19 คือ

$$P_{turbine} = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \right) \quad (19)$$

เมื่อ C_p คือ สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient or Coefficient of Performance) ของกังหันลมแต่ละประเภท โดยค่าสัมประสิทธิ์กำลังจะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่า อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าเปลี่ยนแปลงดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของกังหันลมชนิดต่าง ๆ [4]

Rotor type	Typical Load	RPM	C_p	Torque
Propeller	Electrical Generator	high	0.42	low
Darrieus	Electrical Generator	high	0.40	low
Giromill (Cycrogiro)	Electrical Generator or Pump	moderate	0.45	moderate
Chalk Multi-blade	Electrical Generator or Pump	moderate	0.35	moderate
Sail wing	Electrical Generator or Pump	moderate	0.35	moderate
Fan-type	Electrical Generator or Pump	low	0.30	high
Savonius	Pump	low	0.15	high
Dutch-type	Pump or millstone	low	0.17	high

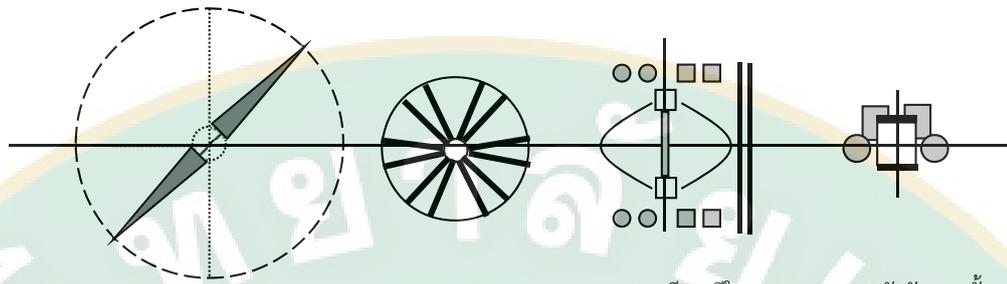
1.3 กังหันลม

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

ภาพที่ 3 จะเห็นได้ชัดว่า กังหันลมแกนตั้งที่มีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากับกังหันลม 2 ใบแกนนอน จะให้ค่าพื้นที่รับลมน้อยกว่ามาก และย่อมจะให้ค่าประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าด้วย โดยทั่วไปกังหันลมแกนตั้งต้องใช้วัสดุที่มากกว่าเพื่อให้ได้กำลังเท่ากับกังหันลมแกนนอน เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอน (ภาพ 3 กังหัน A) และแกนตั้งแบบดาร์ริอุส (ภาพ 2.3 กังหัน C) ที่มีพื้นที่ใบกังหันรับลมเท่ากัน ที่ความเร็วลม 5.0 เมตร/วินาที กำลังที่ได้ที่เพลของกังหันลมแกนตั้งแบบดาร์ริอุสจะมีค่าน้อยกว่ากังหันลมแกนนอนประมาณ 2 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระหว่างกังหันลมแกนนอนและแกนตั้งที่มีพื้นที่กังหันเท่ากัน 100 m² [5]

ประเภท	อัตราเร็วลม (m/s)	C_p	กำลังเพล (kW)
แกนตั้ง	5.0	0.2	1.5
แกนนอน	5.0	0.42	3.1
	3.9	0.42	1.5



A) แกนนอน	B) แกนนอน	C) ดาริอุส มีใบแบบ ซาโวนีอุส 2 ชุด ช่วยเริ่ม	D) กังหันแกนตั้งแบบ ซาโวนีอุส
D = 11.28 m	D = 3.75 m	D = 2.89 m	D = 0.96 m
A = 100 m ²	A = 11.05 m ²	A = 5.96 m ²	A = 0.92 m ²
P = 3.3 kW	P = 0.343 kW	P = 0.221 kW	P = 0.022 kW
	Cp max = 0.30		

ภาพที่ 3 เปรียบเทียบกังหันชนิดต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ผิววัสดุเท่ากัน (3.2 ตารางเมตร)
ที่ความเร็วลม 5.6 เมตร/วินาที [5]



กังหันลมแกนตั้ง [10]



กังหันลมแกนนอน [11]

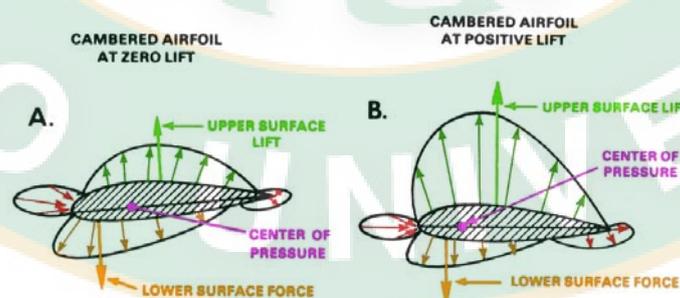
ภาพที่ 4 ตัวอย่างกังหันลมแกนตั้ง และกังหันลมแกนนอน

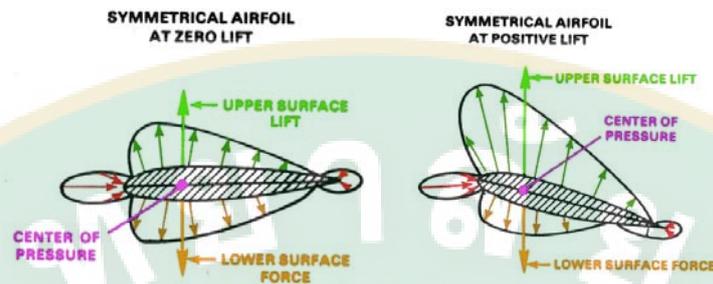
1.4 แพนอากาศ

ลักษณะของใบพัดนั้นมีอยู่หลายแบบ ตั้งแต่แบบที่ง่ายที่สุดคือ เป็นแผ่นแบน จนกระทั่งแบบที่มีโค้ง เว้า ที่มีหลักการทางอากาศพลศาสตร์ที่สลับซับซ้อน แพนอากาศแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 5 เมื่อ มีกระแสลมเคลื่อนที่ผ่านก้านจะทำให้เกิดความดันขึ้นที่ใบพัด โดยลักษณะการแจกแจงของความดันจะขึ้นกับมุมปะทะของลมกับเส้นสมมติของใบพัด (Chord) ลักษณะการกระจายของความดันบนใบพัดแสดงตัวอย่าง ดังภาพที่ 10 จะก่อให้เกิดแรงกระทำต่อใบพัด 2 แรง คือ แรงยก (Lift forces) และ แรงต้าน (Drag forces) และเกิดทอร์ก คือ แรงบิดเนื่องจากการหมุน (Pitching Moment) แรงยก มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางสัมผัสของการไหลของอากาศเป็นแรงสนับสนุนการหมุนของใบพัด แรงต้าน คือแรงที่ต้านการหมุนของใบพัด มีทิศทางขนานกับทิศทางสัมผัสของการไหลของอากาศ และแรงบิด ซึ่งเป็นเป็นแรงที่เฉพาะ ณ จุดต่างๆ บนใบพัด โดยปรกติจะเท่ากับ 0.25 ที่เส้นสมมติ



ภาพที่ 5 แพนอากาศแบบต่าง ๆ [8]





ภาพที่ 6 ลักษณะการกระจายของความดันที่กระทำต่อใบพัด [12]

1.5 สมรรถนะของแพนอากาศ (Airfoil Coefficient)

สมรรถนะของแพนอากาศ จะเขียนอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic Coefficient) ที่ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ 3 รูปแบบ คือ สัมประสิทธิ์แรงยก (Lift Coefficient) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag Coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงบิด (Moment Coefficient) ซึ่งเขียนในรูปสมการดังนี้

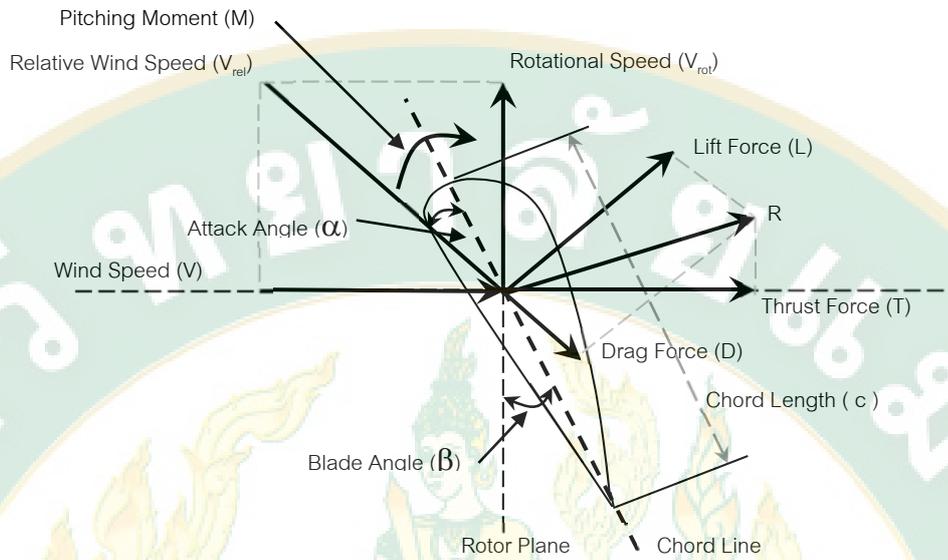
$$C_L = \frac{L}{1/2 \rho AV^2} \quad \text{Lift Coefficient} \quad (20)$$

$$C_D = \frac{D}{1/2 \rho AV^2} \quad \text{Drag Coefficient} \quad (21)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2 \rho c AV^2} \quad \text{Moment Coefficient} \quad (22)$$

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

การเลือกแพนอากาศในการสร้างกังหันลม นั้นควรพิจารณาค่า Lift Coefficient (C_L) และ Attack Angle (α) ที่ทำให้ อัตราส่วน C_D / C_L มีค่าต่ำสุด จึงจะได้กำลังสูงสุดที่เป็นไปได้จากแพนอากาศแบบนั้นๆ ทั้งนี้ก็จะขึ้นกับ เลขเรโนลด์ (Re, Reynolds number) ที่เหมาะสมด้วย



ภาพที่ 7 ลักษณะการทำงานของเพนอากาศ [5]

แรงที่เกิดขึ้นบนใบพัดนั้นเกิดจากแรงกระทำต่าง ๆ ที่กระทำต่อเพนอากาศเมื่อมีกระแสอากาศไหลผ่าน จากภาพที่ 7 พบว่า แรงที่เป็นองค์ประกอบหลักที่เกิดขึ้นบนใบพัด ประกอบด้วย แรงยก (L) แรงต้าน (D) และ แรงลัพท์ที่เกิดขึ้น (R) จากผลของแรงเหล่านี้ ทำการแตกเวกเตอร์ออก ในทิศทางคือ

- แรงในแนวแกน (F_A) ซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อลูกปืนของเพลลา และส่งต่อไปยัง หอคอย
- แรงในแนวสัมผัส (F_T) ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้เกิดการหมุนของใบพัดให้พลังงาน กล

$$F_A = \frac{1}{2} C_A \rho V^2 A \quad (23)$$

$$F_T = \frac{1}{2} C_M \rho V^2 A \quad (24)$$

เมื่อ C_A คือ สัมประสิทธิ์ในแนวแกน

2) การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

ชเนศ ไชยชนะ และคณะ (2558) [13] ได้ทำการสร้างและทดสอบการทำงานของ กังหันลม แกนตั้งแบบ Savonius ที่มีใบพัดจำนวน 12 ใบ และมีส่วนบังคับลมเข้าสู่ใบพัดกังหันลมและใช้

กำลังที่เพลลาของกังหันในการขับเคลื่อนระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งผลการศึกษพบว่า กังหันลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลมเท่ากับ 2.36 m/s ใช้เวลาในการเริ่มหมุนจนถึงเวลาที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่มีค่าระหว่าง 10 - 39s มีสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดที่ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมเท่ากับ 8.06% ที่อัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกเท่ากับ 2.09 และค่า C_p เท่ากับ 44.690 N/m² of swept area ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนอัตราเร็วปลายปีกมีค่าสูงขึ้น และจะมีค่าลดลงเมื่อ C_p ลดลง สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้ากรณีไม่มีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลม และกรณีมีแผ่นเพิ่มอัตราเร็วลมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.46% และ 4.37% ตามลำดับ กังหันลมผลิตไฟฟ้าเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลมประมาณ 3.5-4.0 m/s และเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบจานจะเริ่มประจุไฟฟ้าที่อัตราเร็วรอบของกังหันลมเท่ากับ 24.6 RPM หรือที่อัตราเร็วลมอิสระเท่ากับ 4.65 m/s

ธนศ ไชยชนะ และคณะ (2558) [14] ได้ทำการทดสอบอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน และเวลาจากที่กังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่ ของกังหันลมแบบ Savonius ที่มีใบพัดจำนวน 12 ใบ ใบพัดสร้างจากทรงกระบอกผ่าซีกปิดหัวท้าย มีความยาว ซะยา 6 cm ยาว 30cm ใบพัดทั้ง 12 ใบยึดติดกับเพลลาหมุนด้วยแขนจับที่มีรัศมี 15 เซนติเมตร ทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดด้วยอัตราเร็วลม 2.28, 2.97, 3.54, 4.07, 4.55 และ 5.00 m/s และใช้อัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหันอยู่ในช่วง 8.94-178.76 N/m² ทำการตรวจวัดค่าระหว่างการทดสอบประกอบด้วย อัตราเร็วเชิงมุมของกังหัน เวลา แรงที่กระทำที่เพลลา เนื่องจากการหมุนของกังหัน ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนมีค่าเท่ากับ 2.35 m/s และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหันเปลี่ยน เวลาจากกังหันเริ่มหมุนจนหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงที่มีค่า ระหว่าง 10 - 39 s ทั้งนี้จะมีค่าแปรผกผันกับอัตราเร็วลม และแปรผันตรงกับอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อเพลลาหมุนกับพื้นที่รับลมของกังหัน

Sumpun et al. (2011) [15] ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบกังหันลมแกนตั้งแบบ Savonius 4 ใบพัดขนาดเล็กและทำการทดสอบการทำงานในอุโมงค์ลม พบว่าค่าที่มีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันคือ ความเร็วลม และอัตราส่วนระหว่างแรงที่ได้กับพื้นที่รับลม (tangential force ratio) โดยมีค่า cut in wind speed เฉลี่ยเท่ากับ 1.2778 m/s และได้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันเท่ากับ 5.0 - 7.5%.

Chaichana (2010) [16] ได้ทำการออกแบบและศึกษาระบบกังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก เพลาร่วมแกนหมุนสวนทางกันเปรียบเทียบกับกังหันแกนตั้งแบบธรรมดาโดยทำการศึกษในอุโมงค์ลม และเมื่อได้รูปแบบที่สมบูรณ์ก็ได้สร้างต้นแบบเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า โดยผลการทดสอบในอุโมงค์ลมพบว่า ความเร็วลมเริ่มหมุนของกังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาดียวมีค่าต่ำกว่ากังหัน

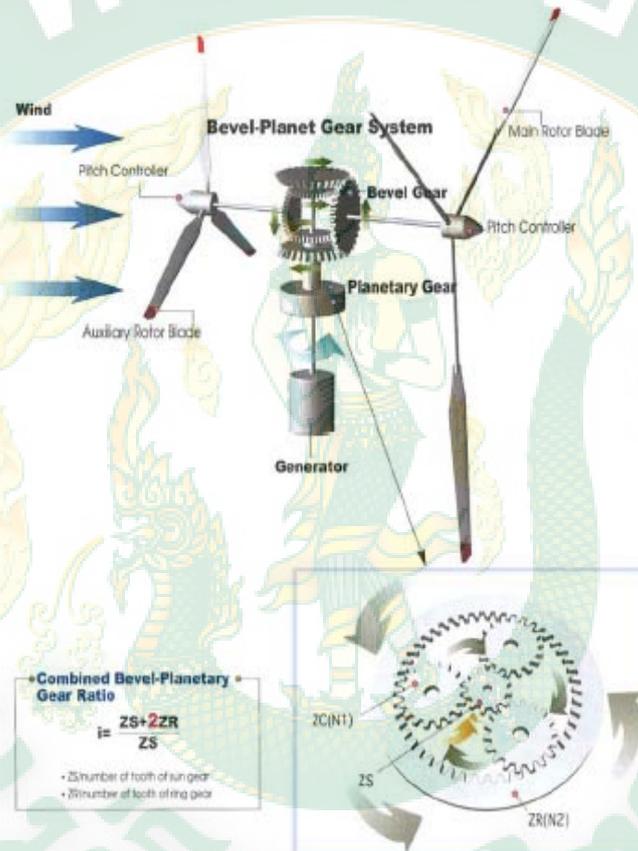
ลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมแกน หมุนสวนทางกันเฉลี่ยเท่ากับ 0.46 m/s ประสิทธิภาพของกังหันลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมแกน หมุนสวนทางกันมีค่าเท่ากับ 14.89% ซึ่งดีกว่ากังหันลมแกนตั้งแบบธรรมดาเพลาดียว 10.53% นอกจากนี้ ระบบเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมสำหรับกังหันลมแกนตั้งแบบเพลาร่วมแกน หมุนสวนทางกัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันจาก 14.89% เป็นเฉลี่ยเท่ากับ 30.80% สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับกังหันลมแกนตั้งเพลาร่วมหมุนสวนทางกันคือระบบผลิตไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบต่ำและแรงบิดต่ำ

A.K. Wright and D.H. Wood (2004) [17] ได้ศึกษาพฤติกรรมการทำงานของกังหันลม 3 ใบพัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 m ทำการติดตั้งที่ความสูง 8 m จากคาบฟ้าชั้นที่ 4 ของอาคาร การศึกษาความเร็วลมเริ่มทำงาน พบว่า ความเร็วเริ่มทำงานเฉลี่ยเท่ากับ 4.6 m/s จากการคำนวณข้อมูลแพนอากาศได้ความเร็วลมเริ่มทำงานเท่ากับ 4.7 m/s การศึกษาช่วงการเริ่มทำงาน (Wind speed starting Sequence) คือ การศึกษาเวลาที่ใช้ตั้งแต่กังหันลมเริ่มหมุนจนได้ความเร็วรอบ 250 RPM พบว่า ใช้เวลาเฉลี่ยเท่ากับ 28 s ขึ้นกับความเร็วมุม และพบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ทฤษฎี blade element Theory ซึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่สุด เลขเรโนลด์ (Reynolds number, Re) ที่โคนของใบพัดจะมีค่าสูงกว่าที่ปลายใบพัด และที่ความเร็วลมสูงค่า Re จะสูงกว่าความเร็วลมต่ำ มุมปะทะก็มีผลต่อการเริ่มทำงานของกังหัน คือ ที่มุมปะทะสูงๆ จะใช้ระยะเวลาในการเริ่มทำงานที่ต่ำ ทั้งที่ความเร็วลมสูงและที่ความเร็วลมต่ำ ทอร์ก ที่ความเร็วลมต่ำจะมีค่าค่อนข้างคงที่กว่า (0.01 – 0.04 N-m) ที่ความเร็วลมสูง (0.025-0.15 N-m) แต่ทอร์กที่ความเร็วลมสูงโดยเฉลี่ยแล้วมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วต่ำ

Sung Nam Jung et al (2004) [18] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ ของระบบกังหันลมแบบหมุนสวนทาง (Counter-Rotation (C/R) Wind Turbine System) ขนาด 30 kW โดยระบบที่ศึกษาประกอบด้วยกังหันลม 2 ตัว เรียกว่ากังหันลมหลักที่หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และกังหันลมรองที่อยู่เหนือลม หมุนตามเข็มนาฬิกา และมีขนาดความยาวใบพัดครึ่งหนึ่งของกังหันหลัก ในการส่งกำลังจะใช้เฟืองที่หมุนทั้งในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ดังแสดงในรูปที่ 8

ในการพิจารณาพฤติกรรมของกังหันได้ทำการย่อขนาดจากกังหันจริงแล้วทำการทดสอบในอุโมงค์ลม ประกอบกับการใช้ทฤษฎีโมเมนตัมในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกังหันทั้ง 2 ต่อสภาวะการทำงานที่เหมาะสม พบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันรองมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันหลักกำลังที่ได้ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงขนาด 5/8 เท่าของ เส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันหลัก กำลังที่ได้จะมีค่าลดลง และการศึกษาถึงผลของระยะระหว่างกังหันทั้งคู่ต่อกำลังที่ได้พบว่า ระยะห่างที่เหมาะสมของกังหันทั้งคู่คือ ห่างกันเท่ากับ

เครื่องหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันรอง ซึ่งจะให้อำนาจที่เพิ่มขึ้นถึง 9% เมื่อเทียบระบบที่มี เฉพาะกังหันหลักที่ความเร็วลม 10.6 m/s กังหันลมแบบ C/R ให้อำนาจที่สูงกว่า ถึง 21% และ การศึกษา สัมประสิทธิ์กำลัง (Power Coefficient, C_p) พบว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วลม ประมาณ 3 m/s หรือที่ อัตราส่วนความเร็วทิว (Tip Speed Ratio) ประมาณ 9.5



ภาพที่ 8 โครงสร้างของกังหันหมุนสวนทาง [18]

J.-L. Menet (2004) [19] ได้ทำการศึกษากังหันลมแบบ double-step Savonius ขนาด สูง 1.015 m รัศมี 0.445 m พบว่าสามารถเริ่มทำงานได้ที่ความเร็วลม 3 m/s และหมุนด้วยความเร็วรอบ 200 – 800 RPM ให้ประสิทธิภาพเฉลี่ย 29 % เมื่อนำไปใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรถยนต์ 12V 55A ที่ความเร็วลม 10 m/s สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 81 W ซึ่งใช้ในการประจุแบตเตอรี่

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1) อุปกรณ์

- อุโมงค์ลมแบบเปิด ชนิดดูด

อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ เพื่อใช้ทดสอบและศึกษาผลของลมในความเร็วต่าง ๆ ซึ่งในการทดลองเลือกใช้อุโมงค์ลมแบบเปิด ชนิดดูด โดยพัดลมจะอยู่บริเวณด้านหลัง ส่วนทดสอบ ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 อุโมงค์ลม

- เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน รุ่น AM - 4214SD

เครื่องวัดความเร็วลม เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดเพื่ออ่านค่าความเร็วลม และวัดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ลม ขณะทำการทดลอง โดยเครื่องวัดความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบลวดร้อน รุ่น AM - 4214SD ช่วงการวัด 0.2 ถึง 25.0 เมตรต่อวินาที มีความแม่นยำ ± 5 เปอร์เซ็นต์ และช่วงการวัดอุณหภูมิคือ 0 - 50 องศาเซลเซียส มีความแม่นยำ ± 0.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 10

- เครื่องบันทึกข้อมูล Multi - Channel Data Logger - 20 Channels

เครื่องบันทึกข้อมูล Multi - Channel Data Logger รุ่น GL820 ยี่ห้อ Graphtec เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อโพรบวัดอุณหภูมิ ความชื้น แรงดันไฟฟ้า มี Isolated input

20 channels (เพิ่มช่องได้สูงสุด 200 ช่องเสียบ) และ Built - in 2GB Flash Memory ซึ่งเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ ผ่านสาย USB/ LAN แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร่อน



ภาพที่ 11 Data Logger

- เครื่องวัดความเร็วรอบดิจิตอล รุ่น ST 6236B

เครื่องวัดความเร็วรอบ เป็นเครื่องมือวัดความเร็วในการหมุนของเพลลาของกังหันลม จะแสดงรอบต่อนาที (RPM) บนหน้าปัดอนาล็อก หรือแสดงผลแบบดิจิตอล ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ เลือกใช้เครื่องวัดความเร็วรอบดิจิตอลแบบสะท้อนแสง รุ่น

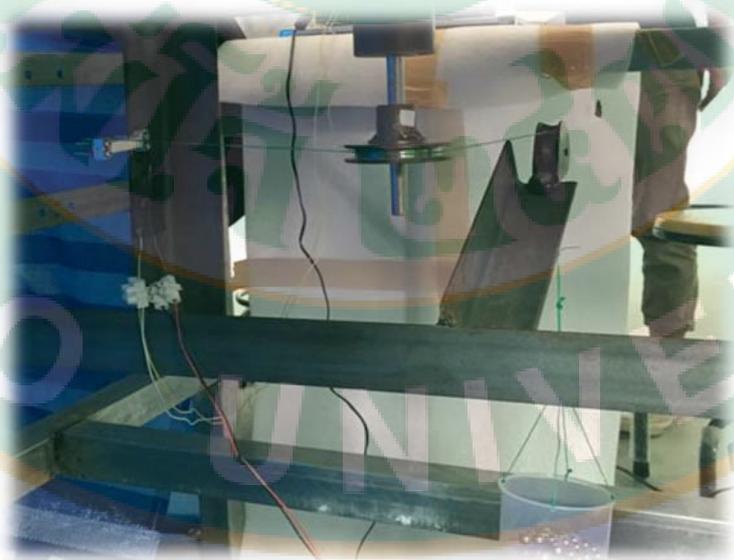
ST 6236B ซึ่งมีช่วงในการทำงานระหว่าง 5 - 99,999 รอบต่อนาที มีความแม่นยำ ± 0.05 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องวัดอัตราเร็วรอบ

- ชุดวัดแรงบิดแบบ Brake Horse Power

ชุดวัดแรงบิดแบบ Brake Horse Power เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงบิดของกังหันลมที่กระทำกับเพลา โดยเชื่อมต่อสัญญาณจากโหลดเซลล์ไปแสดงผลที่เครื่องบันทึกข้อมูล Multi - Channel Data Logger - 20 Channels รุ่น GL820 ยี่ห้อ Graphtec แสดงดังภาพที่ 13

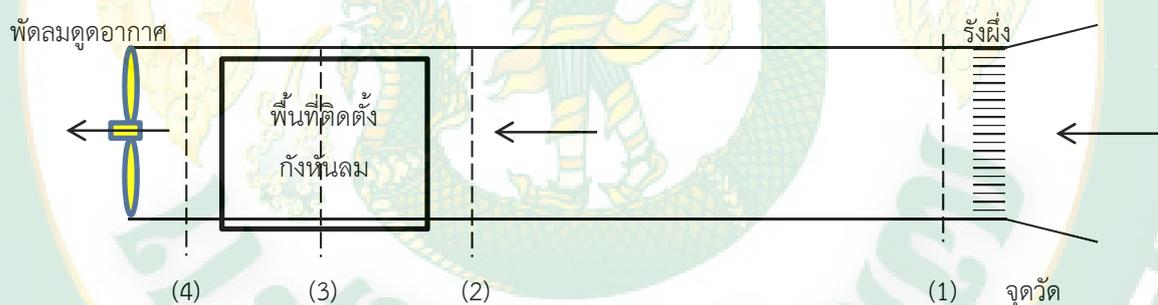


ภาพที่ 13 ชุดวัดแรงบิดแบบ Brake Horse Power

2) วิธีการวิจัย

2.1 ออกแบบ สร้างและทดสอบอุโมงค์ลม

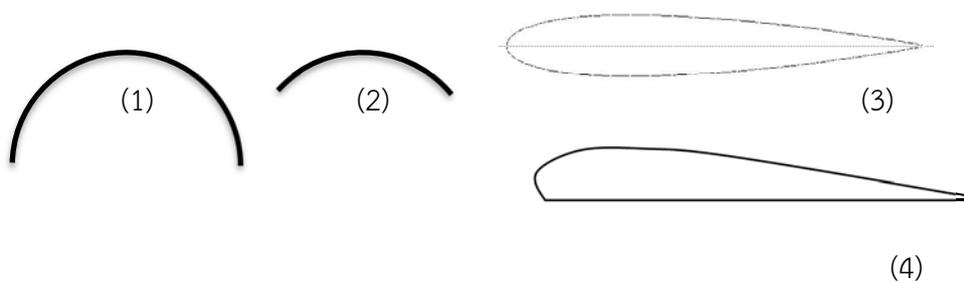
- ออกแบบและอุโมงค์ลม
 - ออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม
 - ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอัตราเร็วลมตลอดช่วงความยาวของอุโมงค์ลม โดยแบ่งช่วงการทดสอบออกแบบ 4 ช่วง คือ (แสดงดังภาพที่ 14)
 - หลังผ่านรังผึ้ง (1)
 - ก่อนเข้าบริเวณทดสอบกึ่งหันลม (2)
 - ปริมาณติดตั้งกึ่งหันลม (3)
 - ช่วงหลังปริมาณติดตั้งกึ่งหันลม (4)
- ทั้งนี้ในแต่ละช่วงจะแบ่งการวัดเป็นจุดวัดตามระยะความกว้างและสูงของอุโมงค์ลม
- จัดทำแผนที่การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมเพื่อกำหนดพื้นที่ในการติดตั้งและทดสอบกึ่งหันลมต่อไป



ภาพที่ 14 ลักษณะของอุโมงค์ลมและจัดวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม

2.2 ออกแบบ สร้างและทดสอบ กึ่งหันลมสำหรับทดสอบการทำงานในอุโมงค์ลม (Lab scale)

- ออกแบบและสร้างกึ่งหันลมแกนตั้ง โดยมีใบพัด 4 ภาพแบบ คือ
 - ใบพัดแบบแผ่นเรียบคดโค้ง เป็นครึ่งวงกลม (1)
 - ใบพัดแบบแผ่นเรียบคดโค้ง เป็นครึ่งส่วนหนึ่งของวงกลม (2)
 - ใบพัดที่มีแผนอากาศแบบสมมาตรตระกูล NACA0012 แผนอากาศ (3)
 - ใบพัดที่มีแผนอากาศแบบไม่สมมาตรตระกูล NACA0012 แผนอากาศ (4)



ภาพที่ 15 ตัวอย่างลักษณะของแพนอากาศ

- ศึกษาคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมที่มีใบพัดแบบต่างๆ โดยทำการศึกษาในประเด็นต่างๆ ดังนี้
 - ประเด็นที่ 1 ผลของภาพแบบของแพนอากาศต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหัน
 - ประเด็นที่ 2 ผลของจำนวนใบพัดต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหัน โดยใช้จำนวนใบพัด 4 ค่า คือ 4 6 8 และ 12 ใบพัด
- วิเคราะห์คุณลักษณะการทำงานของกังหันลมประกอบด้วย
 - อัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (Cut-in Speed)
 - อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วรอบจนคงที่ (Rev up rotation)
 - อัตราเร็วรอบที่อัตราเร็วลมต่างๆ (Rated rotational speed)
 - แรงบิดที่เพลลาทำงานของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ
 - กำลังที่เพลลาทำงานของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ
 - สัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม
 - อื่นๆ

2.3 ออกแบบ สร้างและทดสอบ กังหันลมสำหรับทดสอบการทำงานจริง (ต้นแบบ Prototype)

- ทำการเลือกกังหันลมที่ทำทดสอบในอุโมงค์ลม (Lab scale) ที่มีคุณลักษณะการทำงานที่ดีที่สุด 1 รูปแบบมาทำการสร้างต้นแบบ (Prototype) โดยขยายขนาดตามสัดส่วนที่เหมาะสม
- ทดสอบการทำงานในลักษณะลมจริง โดยพิจารณาค่าคุณลักษณะการทำงานประกอบด้วย (สภาพการทำงานที่ไม่มีไหลด์)
 - อัตราเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (Cut-in Speed)
 - อัตราการเพิ่มขึ้นของอัตราเร็วรอบจนคงที่ (Rev up rotation)
 - อัตราเร็วรอบที่อัตราเร็วลมต่างๆ (Rated rotational speed)

- แรงบิดที่เพลทำงานของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ
- กำลังที่เพลทำงานของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ
- สัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม
- อื่นๆ

2.4 จัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์

จัดทำรายงานความก้าวหน้าและรายงานฉบับสมบูรณ์ตามระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

2.5 เผยแพร่งานวิจัย

เผยแพร่ผลงานการดำเนินงานในการประชุมวิชาการ



ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

1) การออกแบบ สร้างและทดสอบอุโมงค์ลม

อุโมงค์ที่ทำการออกแบบและสร้างขึ้นเป็นอุโมงค์ลมแบบเปิดมีคุณลักษณะการออกแบบ
ดังนี้

- ส่วนของอุโมงค์ลม มีรายละเอียดและวัสดุในการสร้างดังนี้
 - อุโมงค์ลมมีความยาวทั้งสิ้น 9.6 m ประกอบเป็น 4 ท่อน แต่ละท่อนมีความยาว 2.40 m กว้าง 1.20 m และสูง 1.20 m
 - ไม้กระดานอัดหนา 10 cm แบบเคลือบขาว 1 ช้าง ขนาด 240x120 cm จำนวน 15 แผ่น
 - อะคริลิกใสหนา 6 mm ขนาด 240x120 cm จำนวน 15 แผ่น
 - โครงสร้างเหล็กกล่อง ขนาด 2x1 นิ้ว และ 2x2 นิ้ว



ภาพที่ 16 อุโมงค์ลม (1 ท่อน จากทั้งหมด 4 ท่อน)

- พัดลมควบคุมอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 1 m ติดตั้ง มอเตอร์ขนาด 1.5 hp
- ระบบควบคุมการทำงานของพัดลมควบคุมอากาศ ประกอบด้วย
 - Invertor ควบคุมความถี่สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์
 - สัญญาณไฟบอกสถานการณ์การทำงานของพัดลมเพื่อความปลอดภัย
 - ชุดป้องกันไฟฟ้าต่างๆ

ประกอบส่วนประกอบต่างๆ จะได้อุโมงค์ลมที่มีความยาว 9.6 m และเมื่อรวมกับพัดลมควบคุมอากาศ จะได้อุโมงค์ลมความยาวรวม 10 m ดังแสดงในภาพที่ 18



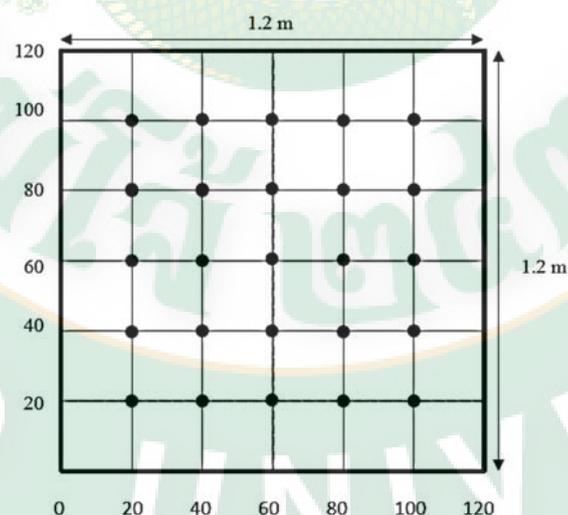
ภาพที่ 17 พัดลมควบคุมอากาศ



ภาพที่ 18 อุโมงค์ลม

2) การกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม

ทำการทดสอบการกระจายตัวของอัตราเร็วลมในพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลมเพื่อทดสอบ เพื่อหาพื้นที่ที่มีอัตราเร็วลมคงที่ตลอดหน้าตัด โดยทำการวัด ณ จุดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 19 พบว่าพื้นที่ที่สามารถติดตั้งกังหันลมสำหรับทดสอบคือพื้นที่ที่ห่างจากผนังทั้ง 4 ด้าน อย่างน้อย 20 cm



ภาพที่ 19 จุดที่ทำการวัดอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลมแบบเปิดอัตราเร็วลมต่ำ

จากผลการทดสอบโครงการการศึกษาลักษณะการกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม ความเร็วต่ำแบบเปิด ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของอัตราเร็วลมในอุโมงค์ลม ความเร็วต่ำแบบเปิดและเพื่อประเมินพื้นที่อัตราเร็วลมเสถียรสำหรับใช้ในการทดสอบในอุโมงค์ลม โดยใช้พัดลมขนาด 1.5 HP ในการทดสอบได้ทำการเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องวัดอัตราเร็วลมแบบลวดร้อน มีการแบ่งระดับความเร็วลมที่วัดคือ 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, และ 50 Hz และตำแหน่งที่วัดคือ 0 m, 1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m และ 7.5 m ซึ่งมีข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ทั้งหมดดังแสดงต่อไปนี้

2.1 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 20 Hz

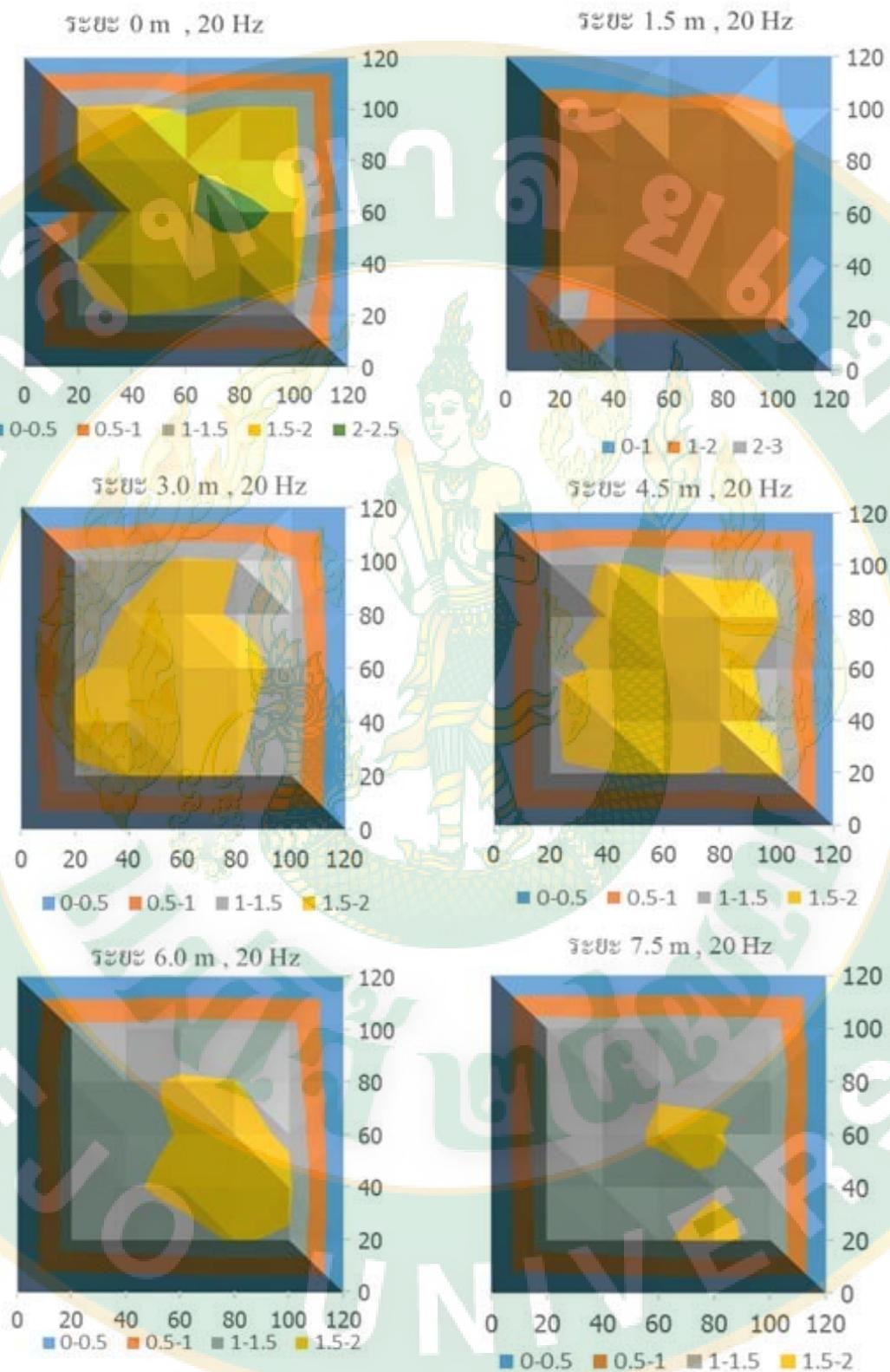
การกระจายตัวของอัตราเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ (0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 และ 7.5 m) ที่การปรับอัตราเร็วรอบของพัดลมที่ความถี่มอเตอร์ 20 Hz มีค่า ตั้งแต่ 0-3 m/s ดังแสดงในภาพที่ 20 ทั้งนี้พบว่าที่อัตราเร็วรอบของพัดลมค่านี้ เกิดความไม่สม่ำเสมอของอัตราเร็วลม โดย ณ ตำแหน่งวัดต่างๆ มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยที่แตกต่างกัน และที่ตำแหน่งที่จะติดตั้งกังหันลมมีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 1-2 m/s แต่เป็นที่น่าสังเกตคืออัตราเร็วลมมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ 1.0-1.5 m/s ที่พื้นที่ส่วนกลางของอุโมงค์ลม (80X80 m) ซึ่งจะพื้นที่ที่สามารถใช้ในการติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการทดสอบค่าต่างๆ ได้

2.2 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 25 Hz

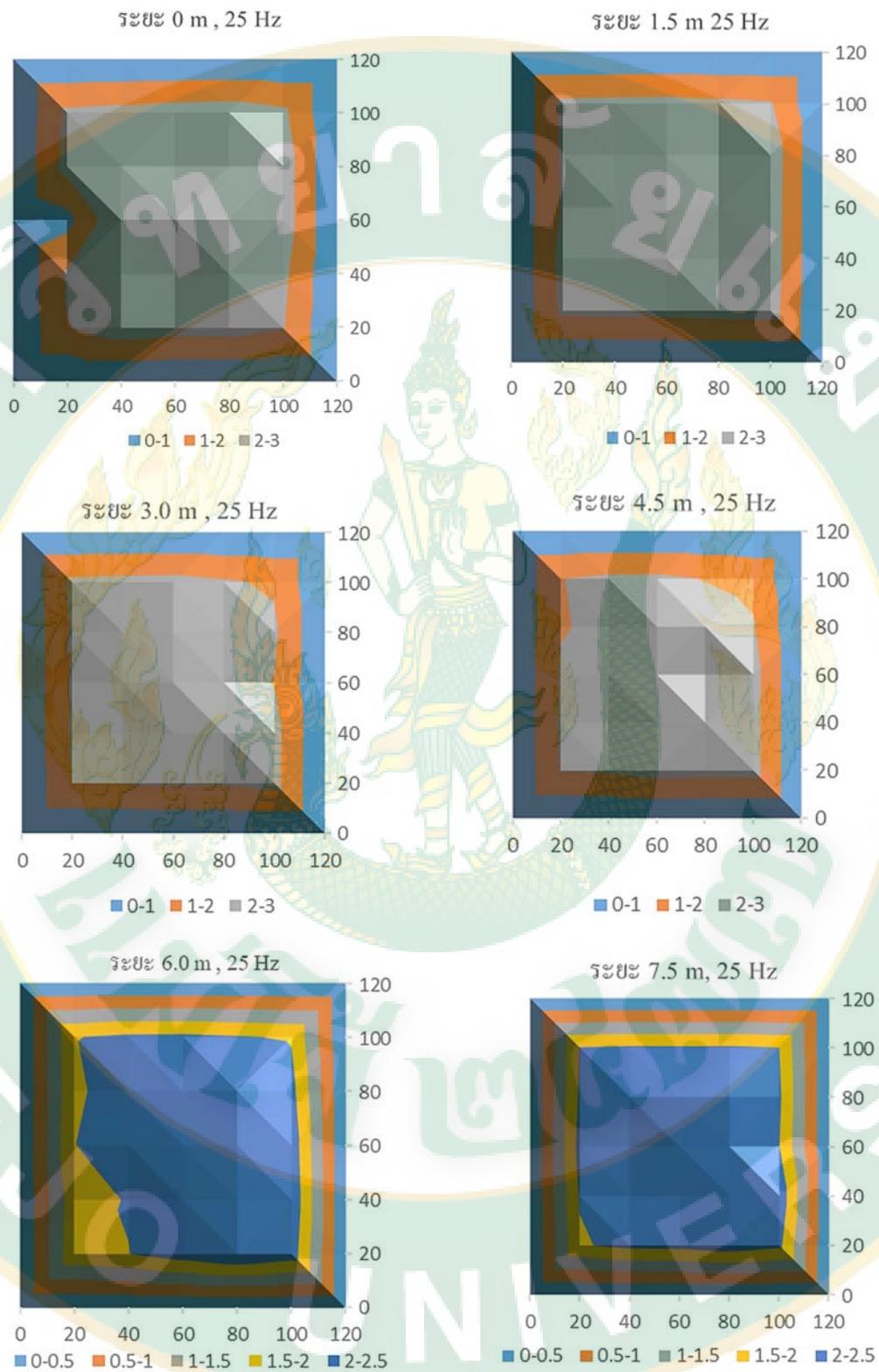
การกระจายตัวของอัตราเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ (0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 และ 7.5 m) ที่การปรับอัตราเร็วรอบของพัดลมที่ความถี่มอเตอร์ 25 Hz มีค่า ตั้งแต่ 2-3 m/s ดังแสดงในภาพที่ 21 ทั้งนี้พบว่าที่อัตราเร็วรอบของพัดลมค่านี้ เกิดความไม่สม่ำเสมอของอัตราเร็วลม โดย ณ ตำแหน่งวัดต่างๆ มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยที่แตกต่างกัน และที่ตำแหน่งที่จะติดตั้งกังหันลมมีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 1-2 m/s อัตราเร็วลมมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ 2.0-2.5 m/s ที่พื้นที่ส่วนกลางของอุโมงค์ลม (80X80 m) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่สามารถใช้ในการติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการทดสอบค่าต่างๆ ได้

2.3 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 30 Hz

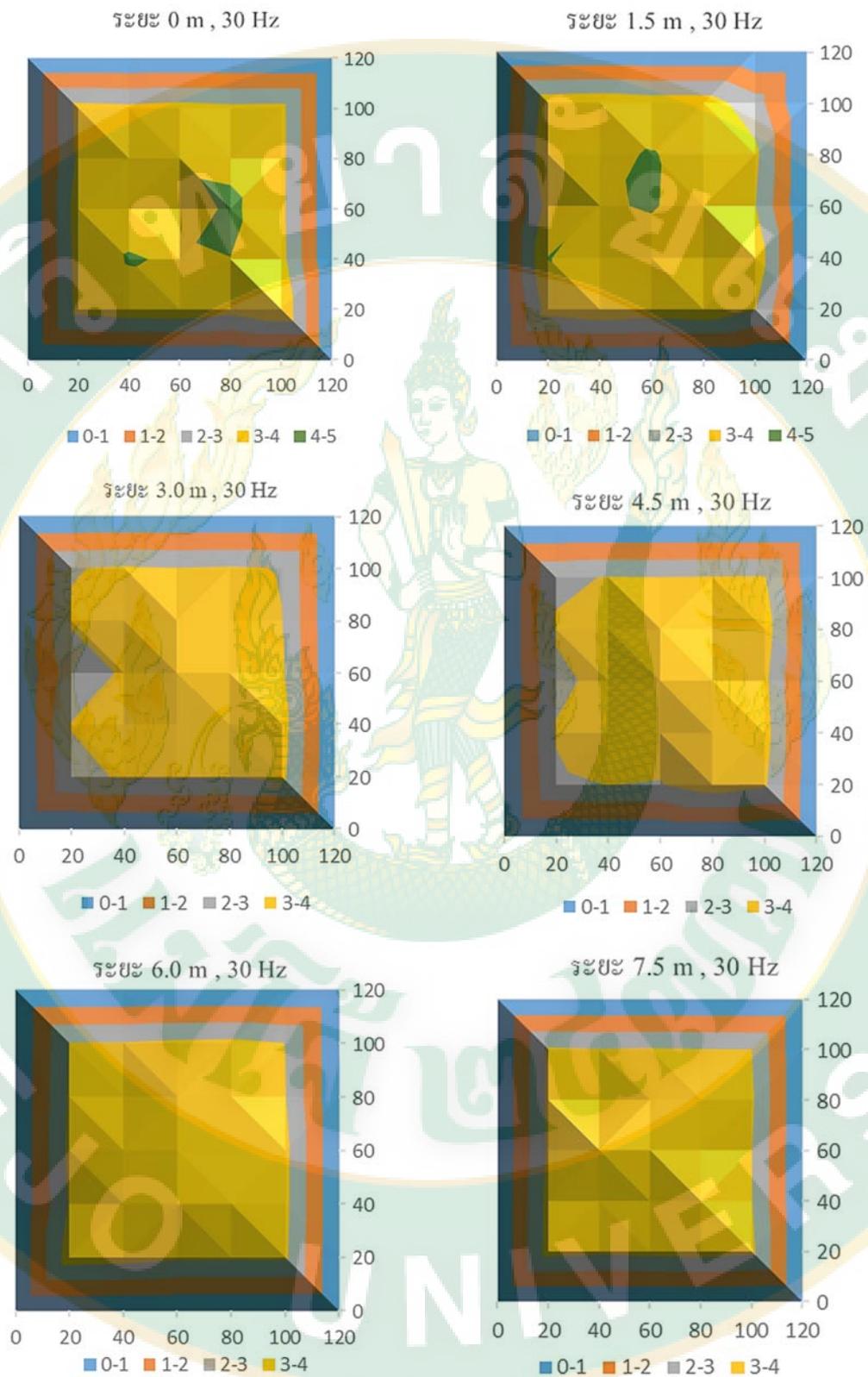
การกระจายตัวของอัตราเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ (0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 และ 7.5 m) ที่การปรับอัตราเร็วรอบของพัดลมที่ความถี่มอเตอร์ 30 Hz มีค่า ตั้งแต่ 1-4 m/s ดังแสดงในภาพที่ 22 ทั้งนี้พบว่าที่อัตราเร็วรอบของพัดลมค่านี้ เกิดความไม่สม่ำเสมอของอัตราเร็วลม โดย ณ ตำแหน่งวัดต่างๆ มีอัตราเร็วลมเฉลี่ยที่แตกต่างกัน และที่ตำแหน่งที่จะติดตั้งกังหันลมมีอัตราเร็วลมเฉลี่ย 1-2 m/s อัตราเร็วลมมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ 3.0-4.0 m/s ที่พื้นที่ส่วนกลางของอุโมงค์ลม (80X80 m) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่สามารถใช้ในการติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการทดสอบค่าต่างๆ ได้



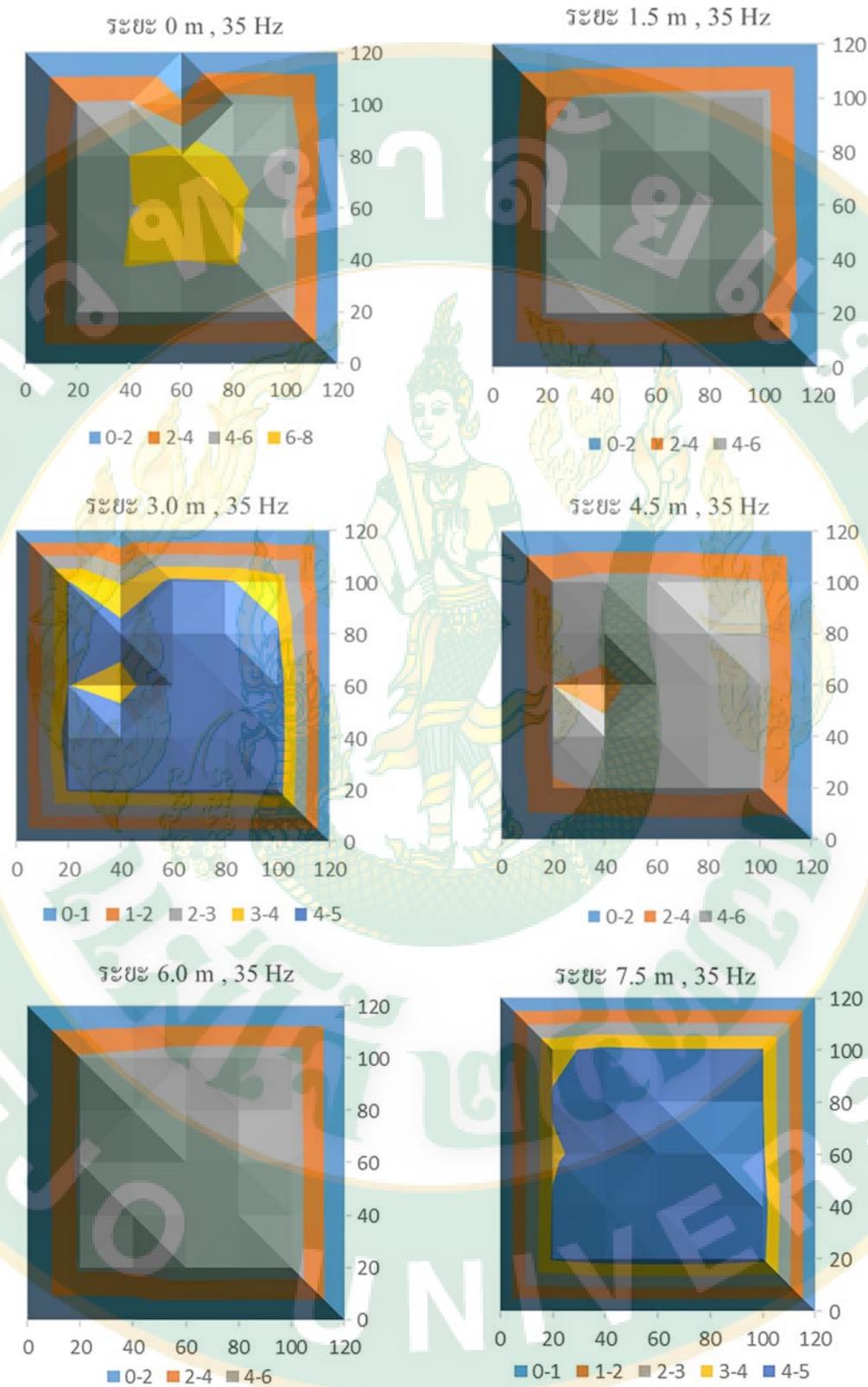
ภาพที่ 20 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 20 Hz (m/s)



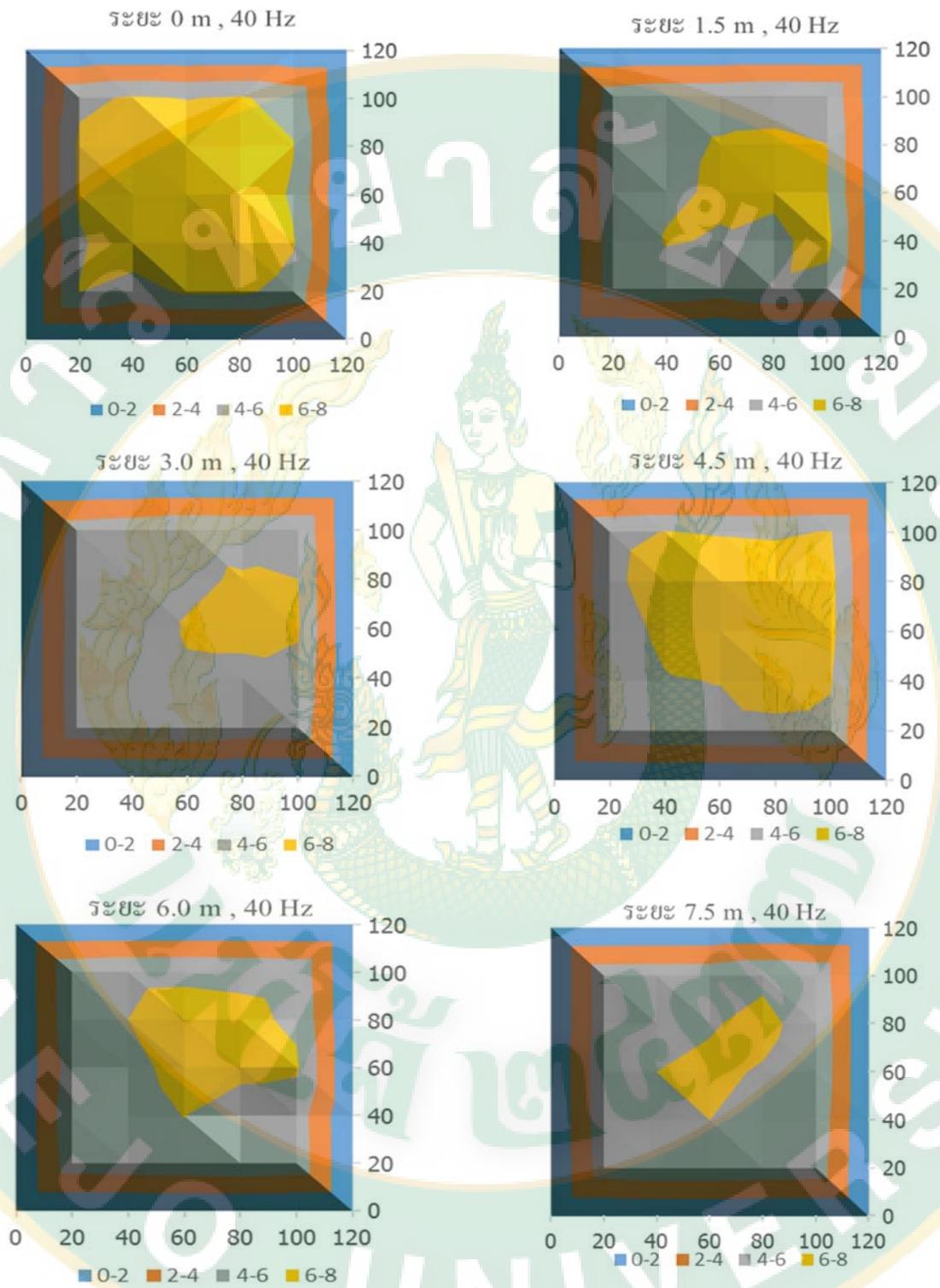
ภาพที่ 21 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 25 Hz (m/s)



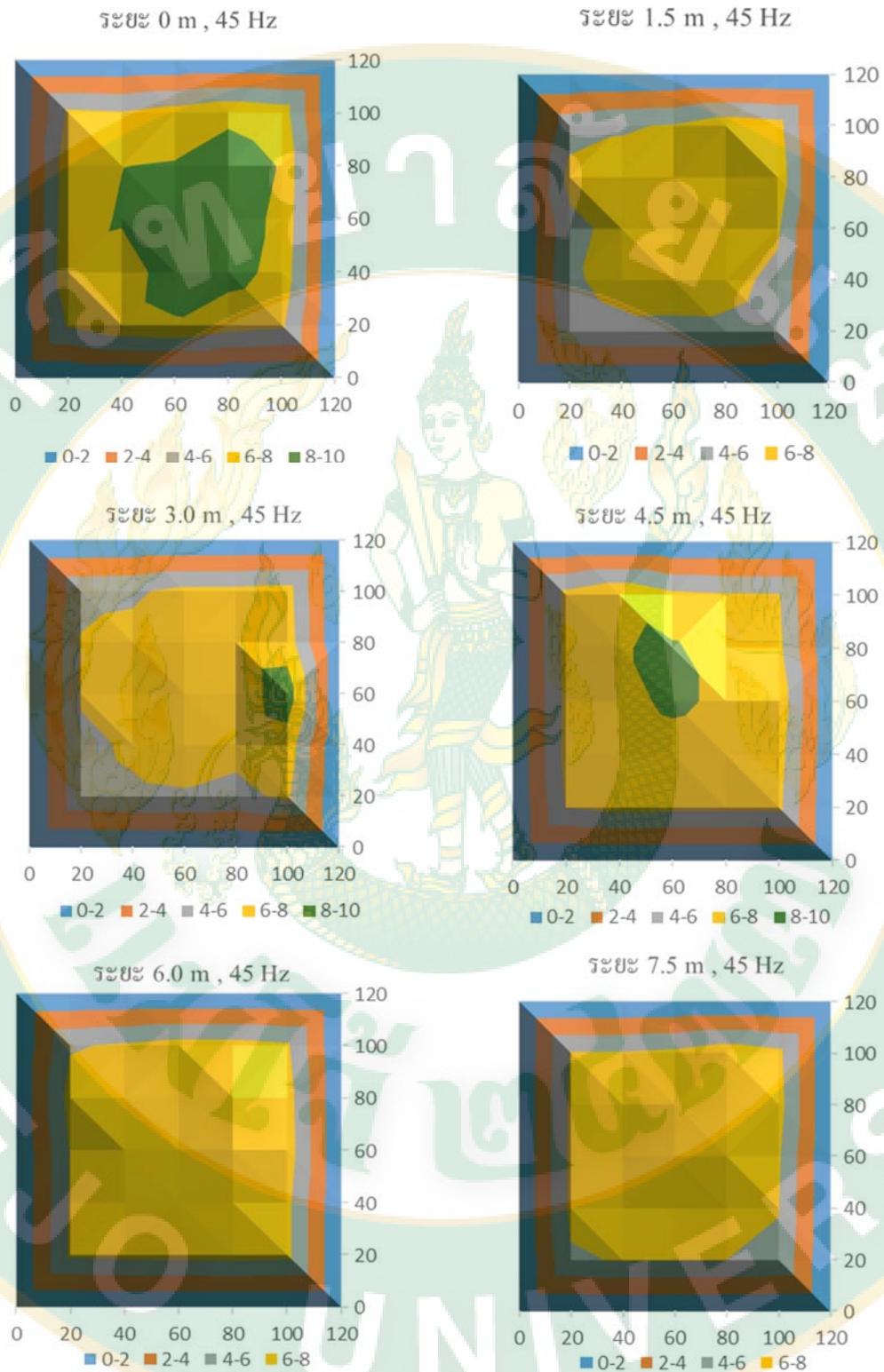
ภาพที่ 22 การกระจายของอัตราเร็วคลื่นที่ 30Hz (m/s)



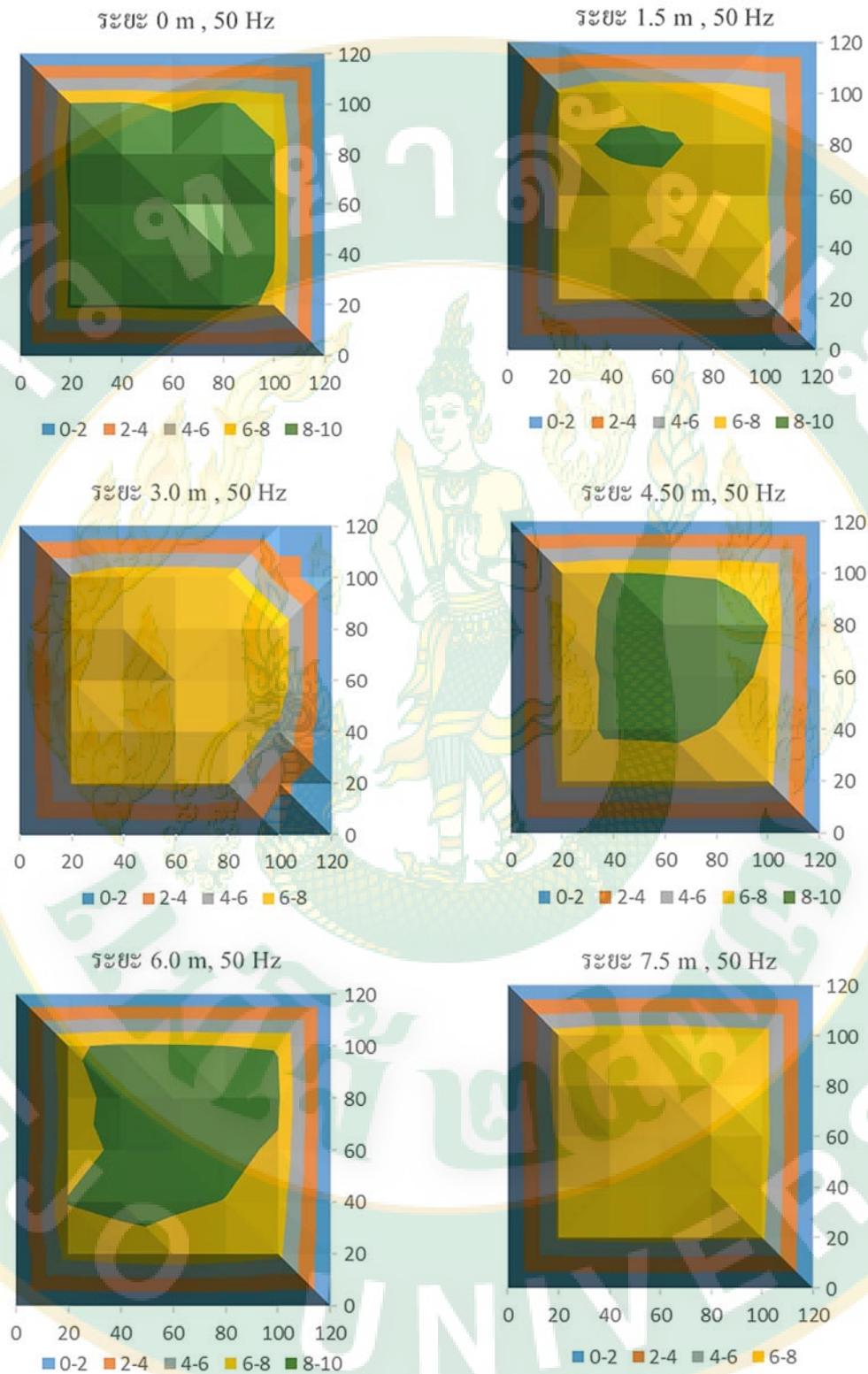
ภาพที่ 23 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 35Hz (m/s)



ภาพที่ 24 การกระจายของอัตราเร็วคลื่นที่ 40Hz (m/s)



ภาพที่ 25 การกระจายของอัตราเร็วคลื่นที่ 45Hz (m/s)

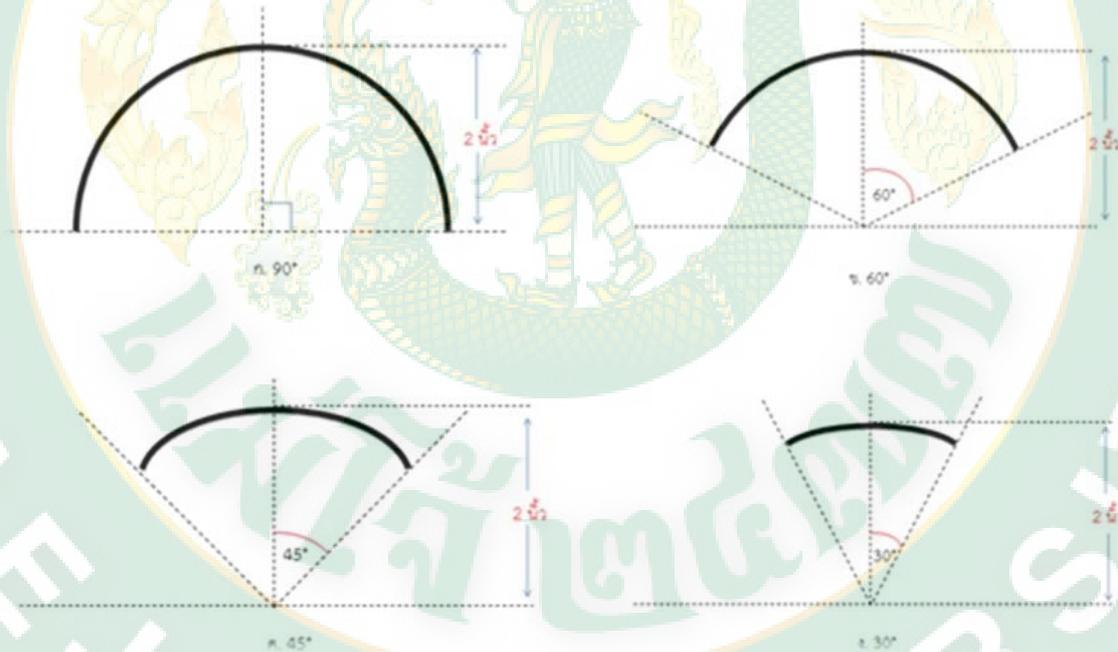


ภาพที่ 26 การกระจายของอัตราเร็วลมที่ 50 Hz (m/s)

จากภาพที่ 20-26 จะเห็นว่าอัตราเร็วลมสูงสุดที่อุโมงค์ลมสามารถสร้างได้มีค่าเท่ากับ 8 m/s และพื้นที่ในการใช้งานอุโมงค์ลมสำหรับติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการศึกษาค่าทางอากาศพลศาสตร์ คือพื้นที่ขนาด 80X80 cm ซึ่งในพื้นที่ส่วนนี้ อัตราเร็วลมมีค่าคงที่ตลอดพื้นที่ดั่งนั้นเมื่อติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการทดสอบ แรงจากลมที่กระทำต่อกังหันลมจะมีค่าเท่ากันทุกจุดของกังหันลมในระนาบการหมุนของกังหัน ค่าทางอากาศพลศาสตร์ที่ได้ก็จะมีค่าที่แม่นยำขึ้น

- 3) อิทธิพลของมุมโค้งใบพัดต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบเบบซาโวเนียสที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง

หัวข้อนี้เป็นการศึกษามุมโค้งของใบพัดกังหันแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง จำนวนของใบพัดเท่ากับ 16 ใบ ใบพัดยาว 30 cm ทั้งนี้มุมโค้งของใบพัดมีค่า 90 60 45 และ 30 องศา ดังแสดงในภาพที่ 27 และ 28 ทั้งนี้วัสดุที่ใช้สร้างใบพัดของกังหันคือ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว



ภาพที่ 27 แสดงมุมโค้งของใบพัด

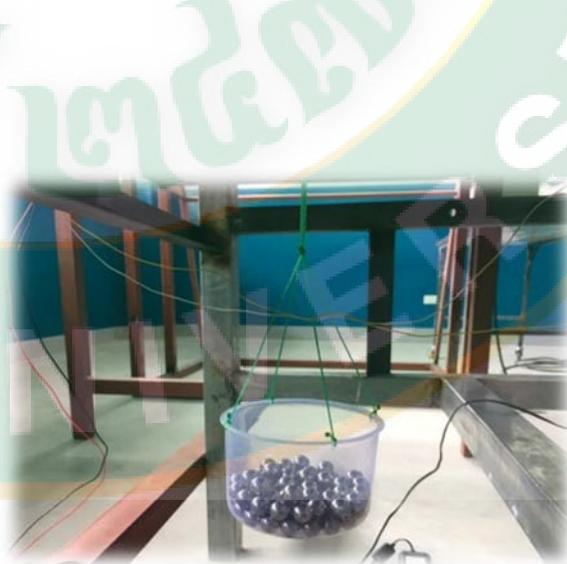


ภาพที่ 28 มุมโค้งใบพัด 90° 60° 45° และ 30°

กัณฑ์และชุดการตรวจวัดต่างๆ ถูกติดตั้งในอุโมงค์ลมที่ตำแหน่ง 7.5 m จากปากทางเข้าของอุโมงค์ลม และทำการทดสอบที่อัตราเร็วลม 3 ค่า คือ 3.12 5.46 และ 6.65 m/s และถ่วงมวลเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงบิดจำนวน 8 ค่า คือ 0 0.07 0.14 0.21 0.28 0.35 0.42 และ 0.49 kg



การติดตั้งกัณฑ์



การติดตั้งมวลถ่วง



การวัดอัตราเร็วลม

การวัดอัตราเร็วรอบ

การวิเคราะห์ค่าแรงบิด

ภาพที่ 29 การติดตั้งและการตรวจวัดค่าต่างๆ

3.1 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันเริ่มหมุน

อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันเริ่มหมุนมีค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 3.2973 m/s คือมุมโค้งใบขนาด 90 องศา ส่วนอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันเริ่มหมุนมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 2.6449 m/s คือมุมโค้งใบขนาด 45 องศา ดังแสดงในภาพที่ 30

3.2 อัตราเร็วรอบคงที่

อัตราเร็วรอบคงที่มีค่าต่ำสุดที่มุมโค้งใบขนาด 60 องศา ส่วนค่าอัตราเร็วรอบคงที่สูงที่สุดคือมุมโค้งใบขนาด 30 องศา รองลงมาเป็นมุมโค้งใบขนาด 45 องศา และ 90 องศา ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 31

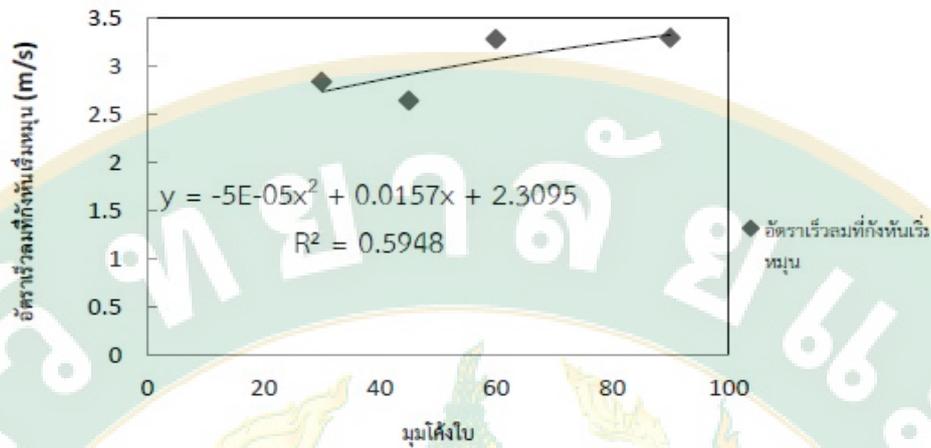
3.3 อัตราเร็วแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหัน

แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหันมีค่าต่ำสุดคือ มุมโค้งใบขนาด 30 องศา เมื่อเปลี่ยนเป็นมุมโค้งใบขนาด 45, 60 และ 90 องศา แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหันลมก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยขนาดใบพัดมุม 90 องศา มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 32

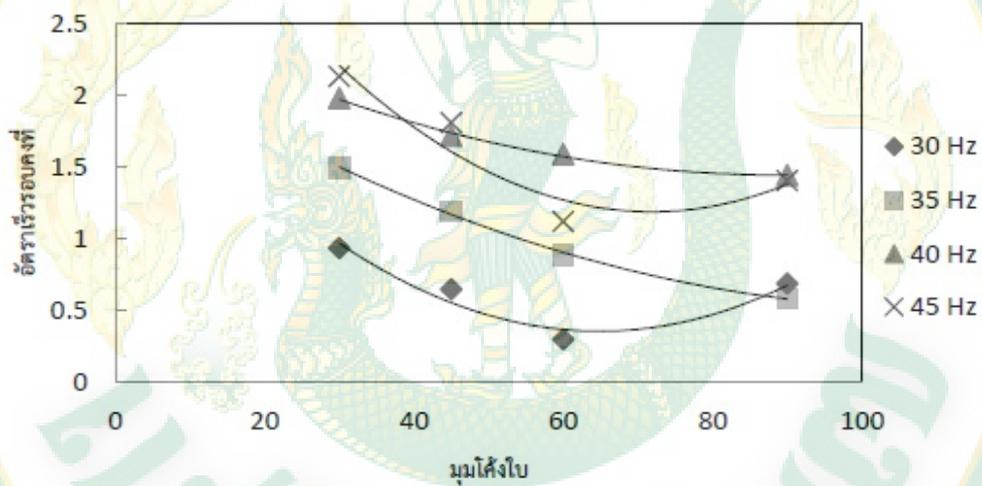
3.4 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหัน

สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมมุมโค้งใบขนาด 30 องศา มีค่าน้อยสุด เมื่อเปลี่ยนเป็นมุมโค้งใบขนาด 45, 60 และ 90 องศา ทำให้สัมประสิทธิ์กำลังมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมประสิทธิ์กำลังที่มีค่ามากที่สุดคือมุมโค้งใบขนาด 90 องศา โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.08 (8%) ดังแสดงในภาพที่ 33 ส่วนสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์กำลัง

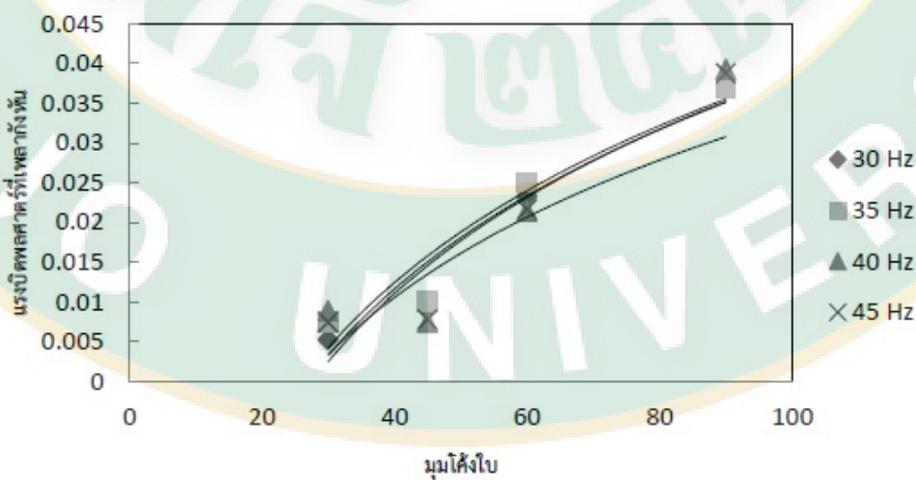
สรุปผลจากการศึกษาในส่วนนี้ได้ว่ามุมโค้งของใบพัดกังหันที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงที่สุดคือมุมโค้ง 90 องศา หรือก็คือใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม



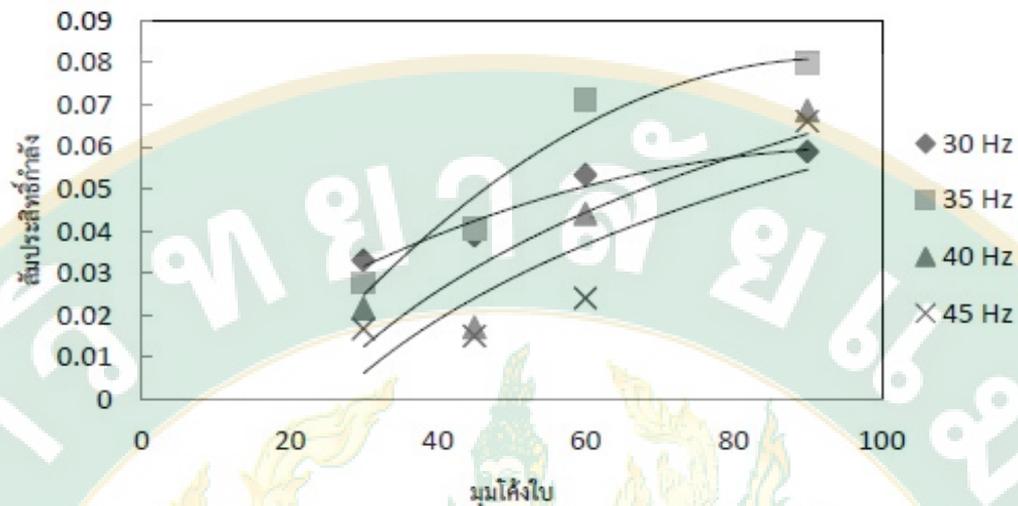
ภาพที่ 30 อัตราเร็วลมที่กังหันเริ่มหมุนของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งส่วนหนึ่งของวงกลม



ภาพที่ 31 กราฟแสดงอัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง



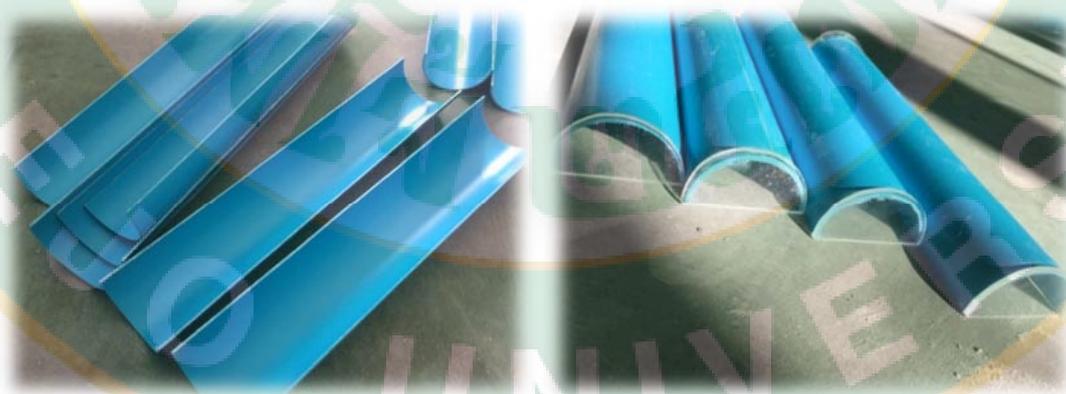
ภาพที่ 32 กราฟแสดงแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง



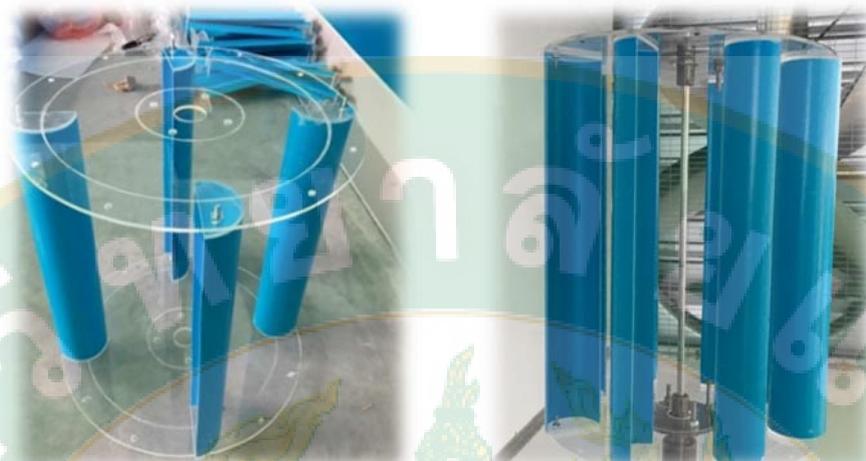
ภาพที่ 33 กราฟแสดง สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง

- 4) อิทธิพลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบแบบซาโวเนียสที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง

จากผลการทดสอบมุมดัดโค้งพบว่ามุมดัดโค้งที่ 90 องศาเหมาะสมที่สุด ดังนั้นในส่วนที่จะทำการศึกษา อิทธิพลของจำนวนใบต่อคุณลักษณะการทำงานของกังหันลมแบบแบบซาโวเนียสที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง โดยใช้มุมดัดโค้งเท่ากับ 90 องศา หรือก็คือใบพัดแบบครึ่งวงกลม โดยใบพัดสร้างจากท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 30 cm ฝ่าครึ่งแล้วประกอบเป็นกังหันลมที่มีรัศมีเท่ากับ 15 cm มีจำนวนใบพัด 4 6 8 และ 12 ใบ ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม



4 ไบ

6 ไบ



8 ไบ

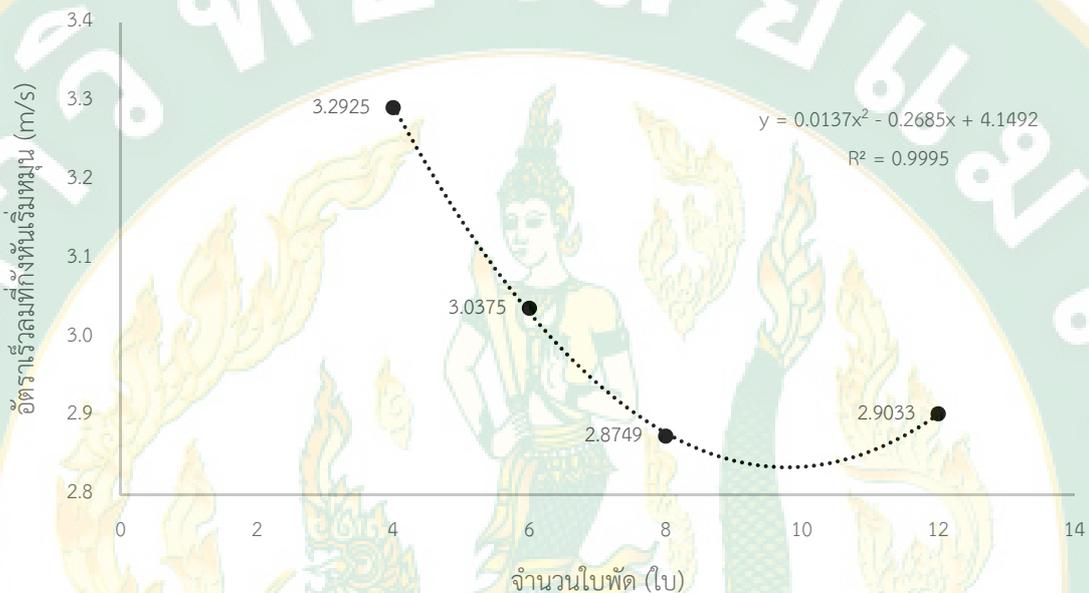
12 ไบ

ภาพที่ 35 กังหันลมแกนตั้งแบบซาโวเนียสที่มีไบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

4.1 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน

จากการทดลองที่อัตราเร็วลมที่ 3.12 5.46 และ 6.65 m/s และถ่วงมวลที่ 0 0.07 0.14 0.21 0.28 0.35 0.42 และ 0.49 kg แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน โดยใช้การพิจารณาเส้นแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบของกังหัน (RPS) กับอัตราเร็วลม(m/s) จากนั้นหาสมการความสัมพันธ์ของค่าทั้ง 2 ในรูปของ $V(m/s) = f(RPS)$ แล้วทำการอินทิเกรตสมการ 1 ครั้งแล้วแทนค่า RPS=0 ก็จะได้ค่าของ V ที่ RPS = 0 หรือก็คือ V ที่กังหันลมกำลังจะเริ่มหมุน (ยังไม่หมุน) ถ้า V มากกว่าค่านี้กังหันลมก็จะหมุน ซึ่งผลการพิจารณาพบว่า กังหัน 4 ไบพัด มีค่าอัตราเร็วลมที่กังหันลมเริ่มหมุนเฉลี่ยเท่ากับ 3.2925 m/s เมื่อเพิ่มจำนวนไบพัดเป็น 6 ไบพัด อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนมีค่าลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.0375 m/s และอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนสำหรับ 8 ไบพัด มีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.8749

m/s ทั้งนี้พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดเป็น 12 ใบพัด พบว่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนเริ่มเพิ่มขึ้นเป็น 2.9033 m/s ดังแสดงในภาพที่ 36 และหากพิจารณาที่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนกับจำนวนใบพัดแล้ว จำนวนใบที่ น่าจะให้ค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนน้อยที่สุดคือ 10 ใบ



ภาพที่ 36 แสดงอัตราเร็วลมที่กังหันเริ่มหมุนของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบคัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

4.2 อัตราเร็วรอบคองที่ของกังหัน

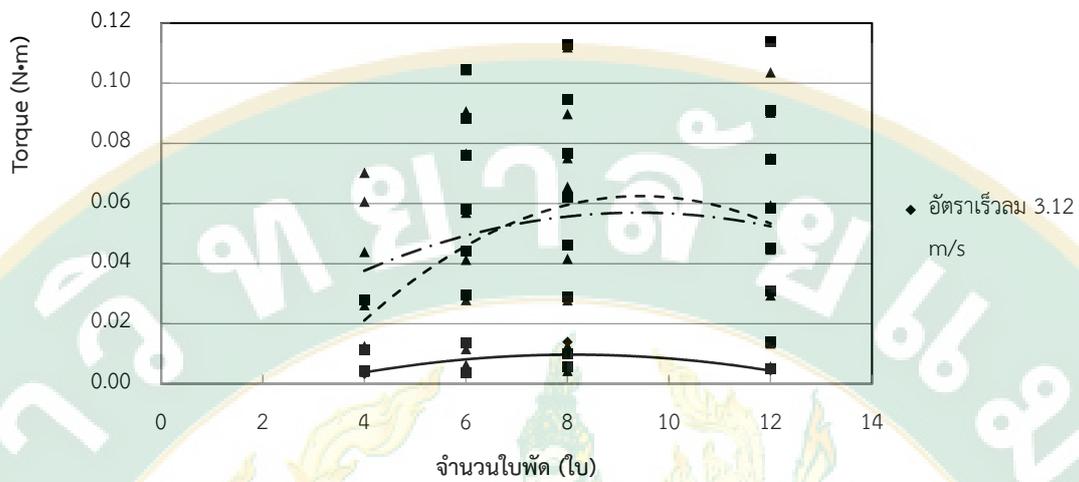
เมื่อมีลมที่มีอัตราเร็วคงที่พัดมาอัตราเร็วรอบการหมุนของกังหันลมก็จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งค่าอัตราเร็วรอบการหมุนคงที่นั้นนอกจากมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราเร็วลมแล้วยังมีค่าของภาระที่กระทำที่เพลาลังผลต่ออัตราเร็วรอบการหมุน ทั้งนี้พบว่า อัตราเร็วรอบการหมุนของกังหันจะแปรผันตรงกับอัตราเร็วลมแต่ละแปรผกผันกับภาระที่กระทำที่เพลาลังกังหัน ค่าที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4

4.3 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลากังหัน

จากการทดลองที่อัตราเร็วลมที่ 3.12 5.46 และ 6.65 m/s และถ่วงมวลที่ 0 0.07 0.14 0.21 0.28 0.35 0.42 และ 0.49 kg พบว่าแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาลังกังหันลม 4 ใบพัด มีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดเป็น 6 และ 8 ใบพัด ทำให้แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาลังกังหันเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาลังกังหันที่มีค่ามากที่สุดคือ กังหันลม 8 ใบพัด เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดเป็น 12 ใบ แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาลังกังหันลดลง แสดงข้อมูลดังตารางที่ 5 และภาพที่ 37

ตารางที่ 4 อัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

Blade No	Load (kg)	RPS		
		V = 3.12 m/s	V = 5.46 m/s	V = 6.65m/s
4.00	0.00	- (ไม่หมุน)	1.170	1.499
	0.07	-	0.884	1.339
	0.14	-	0.630	1.010
	0.21	-	-	0.862
	0.28	-	-	0.587
	0.35	-	-	0.388
6.00	0.00	0.576	1.961	2.828
	0.07	0.217	1.746	2.657
	0.14	-	1.153	2.460
	0.21	-	0.875	2.333
	0.28	-	0.768	2.214
	0.35	-	0.697	2.120
	0.42	-	0.630	1.981
	0.49	-	0.319	1.471
8.00	0.00	0.931	2.332	3.221
	0.07	-	2.071	3.079
	0.14	-	1.943	2.898
	0.21	-	1.733	2.698
	0.28	-	1.563	2.653
	0.35	-	1.372	2.647
	0.42	-	1.294	2.502
	0.49	-	1.121	2.407
12.00	0.00	0.917	2.014	3.187
	0.07	-	1.824	2.761
	0.14	-	1.688	2.530
	0.21	-	1.530	2.512
	0.28	-	1.465	2.373
	0.35	-	1.390	2.271
	0.42	-	1.227	2.132
	0.49	-	1.112	2.040



ภาพที่ 37 กราฟแสดงแรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

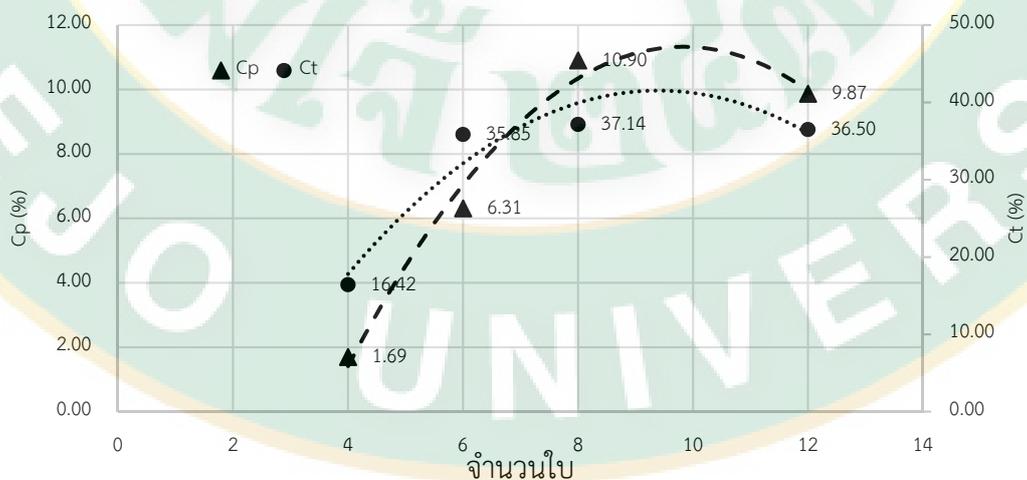
ตารางที่ 5 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลาของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

Blade No	Load (kg)	Torque (N-m)		
		V = 3.12 m/s	V = 5.46 m/s	V = 6.65m/s
4	0	0.003414	0.004420	0.004104
	0.07	-	0.011506	0.012648
	0.14	-	0.028006	0.026264
	0.21	-	-	0.043958
	0.28	-	-	0.060702
	0.35	-	-	0.070304
6	0	0.003676	0.003720	0.006399
	0.07	0.013791	0.013815	0.011698
	0.14	-	0.029758	0.028001
	0.21	-	0.044357	0.041355
	0.28	-	0.058080	0.056989
	0.35	-	0.076086	0.076679
	0.42	-	0.088408	0.090723
	0.49	-	0.104784	0.104398
8	0	0.004615	0.005721	0.004423
	0.07	0.014028	0.010193	0.012662
	0.14	-	0.028917	0.027890
	0.21	-	0.046124	0.041658

Blade No	Load (kg)	Torque (N-m)		
		V = 3.12 m/s	V = 5.46 m/s	V = 6.65m/s
	0.28	-	0.062282	0.065637
	0.35	-	0.076818	0.075169
	0.42	-	0.094628	0.089816
	0.49	-	0.112926	0.111988
12	0	0.004559	0.005032	0.005842
	0.07	-	0.013973	0.013545
	0.14	-	0.030823	0.029516
	0.21	-	0.045152	0.044746
	0.28	-	0.058636	0.059415
	0.35	-	0.074620	0.075160
	0.42	-	0.091077	0.090299
	0.49	-	0.114106	0.103666

4.4 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิด

จากการวิเคราะห์พบว่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลม 4 ใบพัด มีค่าน้อยที่สุด แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดเป็น 6 และ 8 ใบพัด ทำให้สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดที่มีค่ามากที่สุดคือ กังหันลม 8 ใบพัด เมื่อเพิ่มจำนวนใบพัดเป็น 12 ใบ สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง โดยที่กังหันลม 8 ใบพัด มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 10.90% และ 37.14% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่มีใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม

การศึกษาในส่วนนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาจำนวนใบที่เหมาะสม ซึ่งใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบ คัดโค้งครึ่งวงกลม โดยพิจารณาค่าต่างๆ ประกอบกัน ทั้งค่าอัตราเร็วลมที่กังหันลมเริ่มหมุน อัตราเร็วรอบคงที่ สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหัน ซึ่งผลส่วนนี้สรุปได้ว่า จำนวนใบพัดที่เหมาะสมที่สุดคือ 8 ใบพัด

5) กังหันลมแกนตั้งแบบซาโวเนียสที่มีใบแบบสมมาตรและไม่สมมาตร

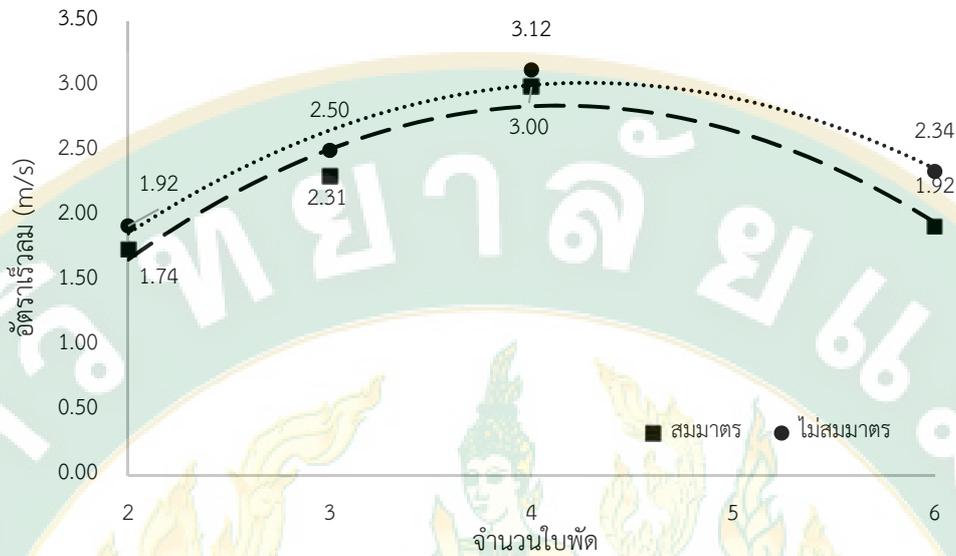
ใบที่มีรูปแบบของแพนอากาศ NACA0012 และแบบ NACA0012 ผ่าครึ่ง ถูกนำมาใช้ในการประกอบเป็นกังหันลมแบบซาโวเนียสที่มีจำนวนใบพัด 2 3 4 และ 6 ใบพัด โดยใบพัดยาว 30 cm และกังหันลมที่ประกอบขึ้นมีรัศมี 15 cm จากนั้นทำการติดตั้งกังหันในอุโมงค์ลมแล้ว ทำการศึกษาค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน อัตราเร็วลมคงที่ สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิด ผลการศึกษาพบว่า



ภาพที่ 39 ใบพัดของกังหันลมแบบสมมาตร รหัส NACA 0012

5.1 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุน

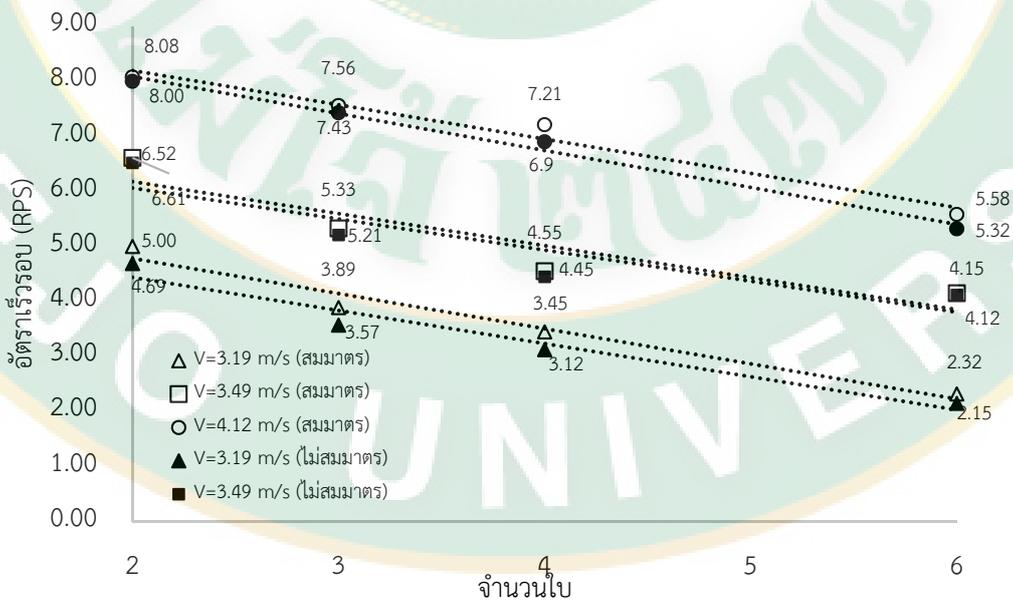
ในการทดสอบหาอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนของกังหันลมแกนตั้งที่มีใบแบบสมมาตร ซึ่งพิจารณาจำนวนใบพัดของกังหันลม จำนวน 2 ใบพัด 3 ใบพัด 4 ใบพัด และ 6 ใบพัด จึงนำค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนของแต่ละจำนวนใบพัดมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่มากที่สุด และค่าน้อยที่สุด จึงสามารถนำค่าอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนมาวิเคราะห์ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 40 โดยพบว่าที่จำนวนใบพัด 2 ใบ กังหันลมสามารถหมุนได้ที่อัตราเร็วลมต่ำที่สุด และกังหันที่มีใบสมมาตรหมุนได้ง่ายกว่ากังหันที่มีใบไม่สมมาตร ทั้งนี้เมื่อจำนวนใบมากขึ้นกังหันจะเริ่มหมุนได้ยากขึ้นและอัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนก็จะมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อใบของกังหันลมมีค่ามากกว่า 4 ใบ



ภาพที่ 40 อัตราเร็วลมที่ทำให้กังหันลมเริ่มหมุนของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012

5.2 อัตราเร็วรอบคงที่

ผลการศึกษพบว่า อัตราเร็วลมของกังหันลมทั้งที่มีใบแบบสมมาตรและแบบใบไม่สมมาตรมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ อัตราเร็วลมรอบมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมสูงขึ้นและอัตราเร็วรอบจะลดลงเมื่อจำนวนของใบพัดสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 41 โดยที่อัตราเร็วลม 4.12 m/s กังหันจะหมุนอยู่ที่อัตราเร็วรอบ 5.32 – 8.08 รอบ/วินาที (PRS) ที่อัตราเร็วลม 3.49 m/s กังหันจะหมุนอยู่ที่อัตราเร็วรอบ 4.12 – 6.52 PRS และ ที่อัตราเร็วลม 3.19 m/s กังหันจะหมุนอยู่ที่อัตราเร็วรอบ 2.15 – 5.00 PRS



ภาพที่ 41 อัตราเร็วรอบคงที่ของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012

5.3 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลของกังหัน

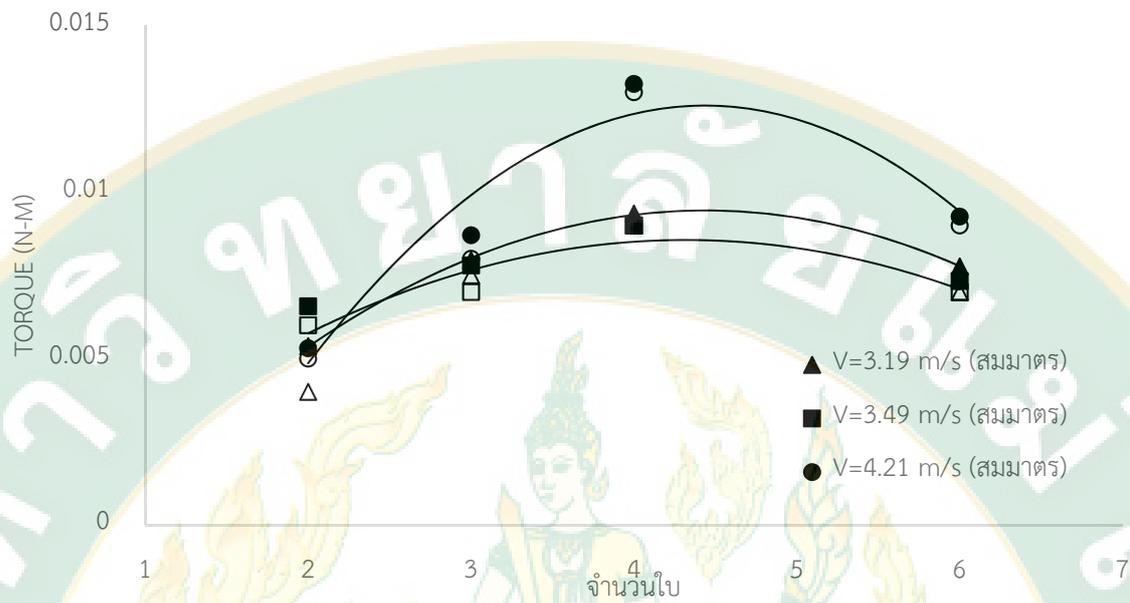
ระหว่างการทดสอบได้บันทึกค่าความแตกต่างของแรงที่เพลในขณะที่กังหันลมไม่หมุน กับขณะที่กังหันลมหมุนด้วยอัตราเร็วรอบคงที่ แล้วนำค่าแรงที่แตกต่างกันนั้นมาทำการคำนวณเป็นค่าแรงบิดที่เพล โดยผลการพิจารณาพบว่าที่กังหันลม 4 ใบพัดให้แรงบิดที่เพลสูงที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ย 0.013 N-m ที่อัตราเร็วลม 4.12 m/s และพบว่าเมื่อจำนวนใบพัดของกังหันสูงกว่า 4 ใบพัด ค่าแรงบิดที่เพลมีค่าน้อยลง และค่าแรงบิดที่เพลมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 41

5.4 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิด

สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 สมมาตร มีค่าอยู่ในช่วง 14.83 - 35.15% โดยมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 29.84% ที่จำนวนใบพัด 4 ใบพัดส่วนที่จำนวนใบพัดค่าอื่นๆ พบว่าสัมประสิทธิ์กำลังมีค่าต่ำกว่า ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 สมมาตร มีค่าสูงกว่ากังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 ไม่สมมาตรเฉลี่ย 10.8% โดยกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 ไม่สมมาตรมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 26.84% ที่จำนวนใบพัด 4 ใบ

สัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าในช่วง 13.53-24.74% สำหรับกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 สมมาตร และมีค่าระหว่าง 11.21- 22.12% สำหรับกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 ไม่สมมาตร ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 21.96% และ 19.59% สำหรับใบแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 สมมาตร มีค่าสูงกว่ากังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012 ไม่สมมาตรเฉลี่ย 12.9%

จากการทดสอบในส่วนนี้สรุปได้ว่ากังหันลมที่มีใบแบบสมมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงกว่าใบแบบไม่สมมาตร ดังนั้นใบกังหันแบบสมมาตรมีความเหมาะสมกว่าใบแบบไม่สมมาตร ในการนำมาผลิตเป็นกังหันลมแกนตั้งแบบซาโวนีเยส และจำนวนใบที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 ใบ



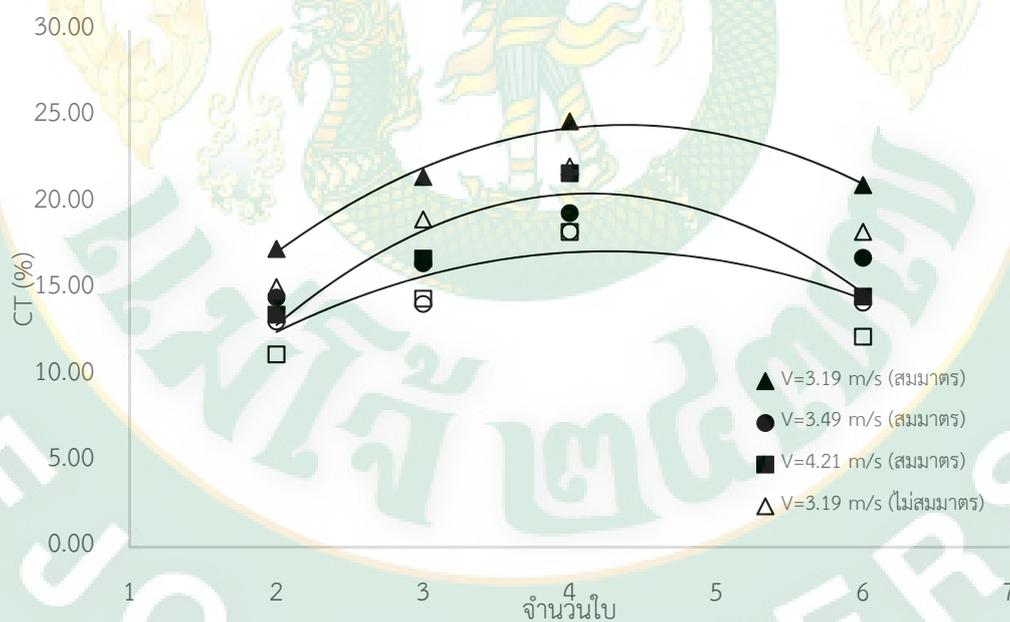
ภาพที่ 42 แรงบิดพลศาสตร์ที่เพลของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012



ภาพที่ 43 สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมที่มีใบแบบ NACA0012

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012

ค่า	จำนวนใบ	ใบแบบสมมาตร				ใบแบบไม่สมมาตร			
		V 3.19 m/s	V 3.49 m/s	V 4.21 m/s	AV	V 3.19 m/s	V 3.49 m/s	V 4.21 m/s	AV
C_p	2	21.84	19.22	22.59	21.22	20.23	18.02	20.21	19.12
	3	25.56	25.55	26.76	25.96	24.54	23.5	24.11	23.81
	4	29.97	24.41	35.15	29.84	28.01	21.23	32.45	26.84
	6	14.83	17.61	19.16	17.20	14.25	13.14	16.12	14.63
C_T	2	17.34	14.52	13.53	15.13	15.12	13.12	11.21	13.15
	3	21.51	16.51	16.78	18.27	19.05	14.14	14.45	15.88
	4	24.74	19.41	21.73	21.96	22.12	18.34	18.32	19.59
	6	21.04	16.81	14.57	17.47	18.33	14.22	12.24	14.93



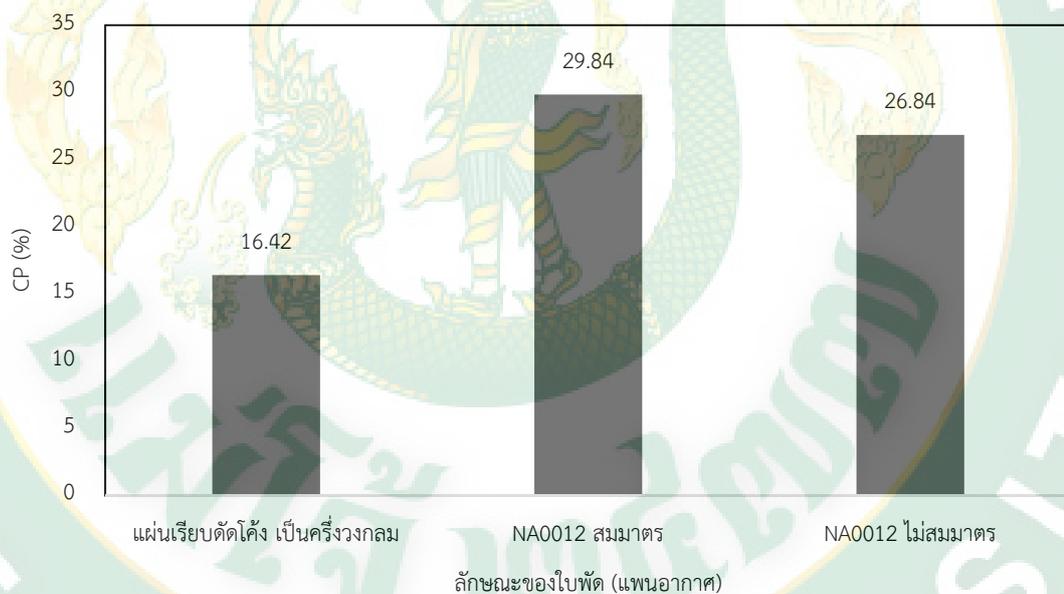
ภาพที่ 44 สัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันที่มีใบแบบ NACA0012

6) อิทธิพลของรูปแบบของแพนอากาศต่อสัมประสิทธิ์กำลัง

จากผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ในข้อที่ 3 - 4 ซึ่งมีรูปของใบพัด 3 รูปแบบ ประกอบด้วย

- ใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้ง เป็นครึ่งวงกลม
- ใบพัดที่มีแพนอากาศแบบสมมาตร NACA 0012 แพนอากาศ
- ใบพัดที่มีแพนอากาศแบบไม่สมมาตร NACA 0012 แพนอากาศ

เมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนใบเท่ากันที่ 4 ใบ และอัตราเร็วลมในการทดสอบเท่ากัน พบว่า ใบพัดแบบสมมาตร NACA 0012 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 29.84% รองลงมาคือแบบไม่สมมาตร NACA 0012 มีค่า 26.84% และใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 16.42% ดังแสดงในภาพที่ 42 แต่เมื่อพิจารณาเรื่องการสร้างและการติดตั้งพบว่าใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมมีความง่ายต่อการสร้างใบและง่ายต่อการติดตั้งที่สุด



ภาพที่ 45 อิทธิพลของรูปแบบของแพนอากาศต่อสัมประสิทธิ์กำลัง

7) กังหันลมต้นแบบ

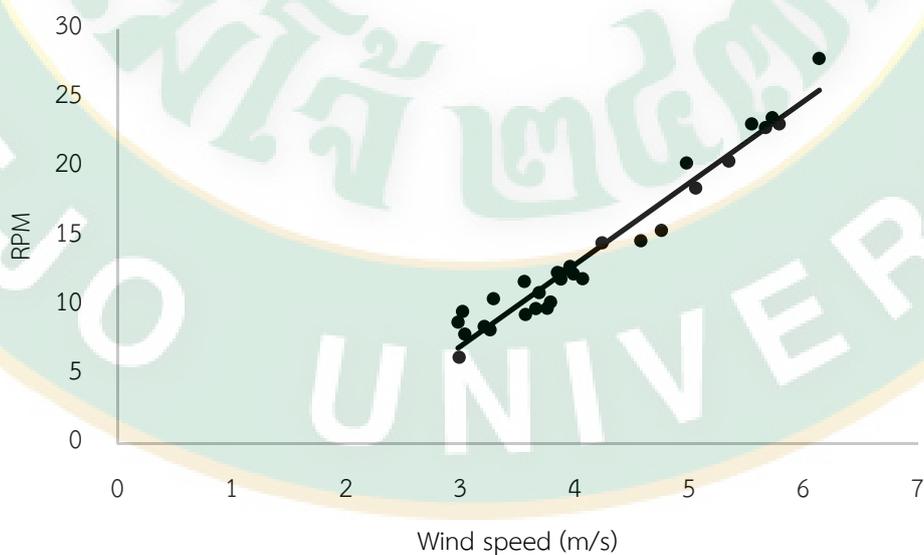
จากการทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลมซึ่งพบว่ากังหันลมแบบใบสมมาตรที่มีแพนอากาศแบบ NACA0012 ให้สัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือเฉลี่ยเท่ากับ 29.84% แต่เมื่อทำการพิจารณาเพื่อทำการสร้างกังหันลมต้นแบบก็ประสบปัญหาที่ไม่สามารถสร้างใบของกังหันที่มีขนาดใหญ่ได้

ดังนั้นจึงเลือกสร้างกังหันลมต้นแบบที่ใช้ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลม จำนวน 12 ใบ ความยาวใบ 1 เมตร และรัศมีของกังหันเท่ากับ 1 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 46

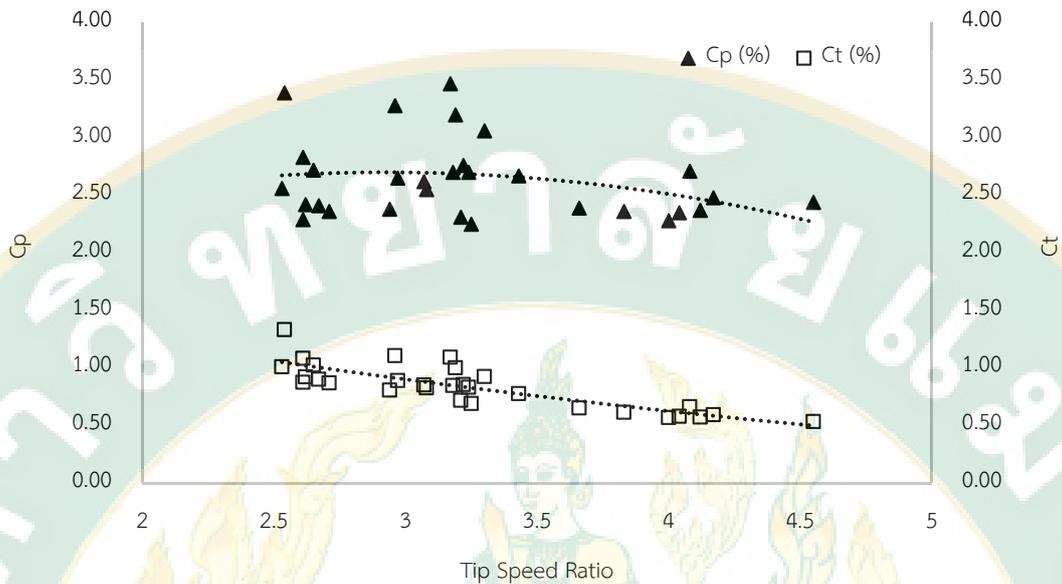


ภาพที่ 46 กังหันลมแกนตั้งใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลม จำนวน 12 ใบ

ทำการติดตั้งและทดสอบการทำงานจริง โดยพบว่ากังหันลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลม 2.98 m/s และอัตราเร็วรอบของกังหันจะสูงขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 44 ผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 0.84% และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยเท่ากับ 2.63% ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 45 และตารางที่ 5



ภาพที่ 47 รอบการหมุนของกังหันที่อัตราเร็วลมต่างๆ



ภาพที่ 48 สัมประสิทธิ์แรงบิดและสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลมต้นแบบ

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของกังหันลมต้นแบบ

ลำดับ	ความเร็วลมอิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบของกังหันลม (RPM)	F (N)	T (N-m)	Pt (W)	Pw (W)	Tip speed ratio	Cp (%)	Ct (%)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	4.76	15.46	1.12	10.98	2.83	12.56	3.25	2.25	0.69	6.83
2	5.79	23.17	1.36	13.36	5.16	22.61	4.00	2.28	0.57	12.05
3	3.76	9.82	0.89	8.67	1.42	6.19	2.61	2.29	0.88	4.51
4	4.58	14.71	1.08	10.57	2.59	11.19	3.21	2.31	0.72	6.44
5	5.67	22.9	1.33	13.08	4.99	21.23	4.04	2.35	0.58	11.83
6	3.79	10.27	0.89	8.74	1.5	6.34	2.71	2.36	0.87	4.65
7	5.35	20.48	1.26	12.34	4.21	17.84	3.83	2.36	0.62	9.96
8	5.73	23.62	1.35	13.22	5.2	21.91	4.12	2.37	0.58	12.43
9	4.07	11.95	0.96	9.39	1.87	7.85	2.94	2.38	0.81	5.23
10	5.06	18.52	1.19	11.67	3.6	15.09	3.66	2.39	0.65	8.61
11	3.66	9.79	0.86	8.44	1.38	5.71	2.67	2.41	0.90	4.50
12	3.57	9.36	0.84	8.24	1.28	5.3	2.62	2.42	0.92	4.38
13	6.14	27.91	1.45	14.16	6.59	26.96	4.55	2.44	0.54	16.44
14	5.55	23.17	1.31	12.8	4.94	19.91	4.17	2.48	0.59	12.05
15	3.99	12.3	0.94	9.2	1.89	7.4	3.08	2.55	0.83	5.37

ลำดับ	ความเร็ว ลม อิสระ (m/s)	อัตราเร็วรอบ ของกังหันลม (RPM)	F (N)	T (N-m)	Pt (W)	Pw (W)	Tip speed ratio	Cp (%)	Ct (%)	กำลัง ไฟฟ้า (W)
16	3.26	8.25	0.77	7.52	1.03	4.04	2.53	2.56	1.01	4.09
17	3.88	11.93	0.91	8.95	1.78	6.8	3.07	2.62	0.85	5.23
18	3.69	10.95	0.87	8.51	1.55	5.85	2.97	2.65	0.89	4.87
19	4.24	14.56	1.00	9.78	2.37	8.88	3.43	2.67	0.78	6.37
20	3.88	12.32	0.91	8.95	1.84	6.8	3.18	2.70	0.85	5.38
21	3.96	12.85	0.93	9.14	1.96	7.23	3.24	2.70	0.83	5.60
22	4.98	20.34	1.17	11.49	3.89	14.38	4.08	2.71	0.66	9.86
23	3.21	8.50	0.76	7.4	1.05	3.85	2.65	2.72	1.03	4.15
24	3.85	12.4	0.91	8.88	1.83	6.65	3.22	2.76	0.86	5.41
25	3.04	7.94	0.72	7.01	0.93	3.27	2.61	2.83	1.08	4.02
26	3.56	11.76	0.84	8.21	1.61	5.25	3.3	3.06	0.93	5.16
27	3.29	10.51	0.77	7.59	1.33	4.15	3.19	3.20	1.00	4.72
28	2.98	8.81	0.70	6.87	1.01	3.08	2.96	3.28	1.11	4.23
29	2.99	6.26	0.58	5.7	0.59	1.76	2.54	3.39	1.33	3.70
30	3.02	9.58	0.71	6.97	1.11	3.21	3.17	3.47	1.09	4.44
AV	4.18	14.01	0.98	9.59	2.44	9.78	3.25	2.63	0.84	6.75
การประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้ากรณี que เปลี่ยน จำนวนใบพัด (อัตราเร็วลม 4.18m/s)					กรณี 4 ใบพัด					2.29
					กรณี 6 ใบพัด					4.45
					กรณี 8 ใบพัด					7.29

เนื่องจากว่ากังหันลมต้นแบบมีรอบการหมุนและแรงบิดที่เพลาค่อนข้างต่ำซึ่งก็เป็นคุณสมบัติทั่วไปของกังหันลมชนิดนี้อยู่แล้วดังนั้นจึงได้ทำการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบจานเพื่อใช้กับกังหันลมต้นแบบโดยผลการทดสอบการผลิตไฟฟ้าพบว่ามีการผลิตเฉลี่ย 6.75W และเมื่อประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้าในกรณีที่มีการเปลี่ยนใบพัดกังหันเป็น 4 6 และ 8 ใบ ก็พบว่าที่ 8 ใบมีการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 7.29 W ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบประสิทธิภาพในอุโมงค์ลม แต่เหตุที่ไม่เลือกสร้าง 8 ใบในการสร้างเป็นต้นแบบก็เนื่องมาจากอัตราเร็วลมเริ่มหมุนที่ค่อนข้างสูง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง อุโมงค์ลมแบบเปิด สำหรับการทดสอบทางอากาศพลศาสตร์ออกแบบ สร้าง ทดสอบการทำงานและทดสอบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม แกนตั้งในอุโมงค์ลม สร้างต้นแบบ ทดสอบการทำงานและทดสอบสัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม แกนตั้งในสภาวะการทำงานจริง ซึ่งผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. พื้นที่ในการใช้ฐานอุโมงค์ลมสำหรับติดตั้งกังหันลมเพื่อทำการศึกษาค่าทางอากาศพลศาสตร์ มีขนาด 80X80 cm
2. มุมโค้งของใบพัดกังหันที่เหมาะสมที่สุด คือมุม โค้ง 90 องศา หรือก็คือ ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลม ซึ่งเป็นมุม โค้งที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด
3. จำนวนใบที่เหมาะสมสำหรับกังหันลมที่มีใบพัดเป็นแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลมคือ 8 ใบ โดยให้ค่าอัตราเร็วลมที่กังหันลมเริ่มหมุนน้อยที่สุด อัตราเร็วรอบคงที่สูงที่สุด สัมประสิทธิ์กำลังและสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันสูงที่สุด
4. เมื่อเปรียบเทียบที่จำนวนใบเท่ากันที่ 4 ใบ และอัตราเร็วลมเท่ากัน ใบพัดแบบสมมาตร NACA 0012 ให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดคือ 29.84% รองลงมาคือแบบไม่สมมาตร NACA 0012 มีค่า 26.84% และใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมมีค่าเท่ากับ 16.42% แต่เมื่อพิจารณาเรื่องการสร้างและการติดตั้งพบว่าใบพัดแบบแผ่นเรียบตัดโค้งเป็นครึ่งวงกลมมีความง่ายต่อการสร้างใบและง่ายต่อการติดตั้งที่สุด
5. กังหันลมต้นแบบที่ใช้ใบแบบแผ่นเรียบตัดโค้งครึ่งวงกลม จำนวน 12 ใบ ความยาวใบ 1 เมตร และรัศมีของกังหันเท่ากับ 1 เมตร กังหันลมเริ่มหมุนที่อัตราเร็วลม 2.98 m/s และอัตราเร็วรอบของกังหันจะสูงขึ้นเมื่ออัตราเร็วลมสูงขึ้น มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเฉลี่ยเท่ากับ 0.84% และมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยเท่ากับ 2.63%
6. กังหันลมต้นแบบมีอัตราเร็วรอบและแรงบิดที่เพลาต่ำดังนั้นต้องทำการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมกับกังหันลม
7. หากต้องการใช้กังหันลมในการผลิตไฟฟ้าต้องทำการเพิ่มรอบขึ้นให้เหมาะสมกับรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และต้องทำการพิจารณาการสูญเสียแรงบิดที่เพลาประกอบด้วย

เอกสารอ้างอิง

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

- [14]Oswild H. Blackwood.; William C. Kelly.; and Reymond M. Bell. **General Physics**. Third edition. United State of America: John Wiley & Sons, New York – London. 1963.
- [15]ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2551, การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในเขตภาคเหนือตอนบน, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [16]มหาวิทยาลัยทักษิณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์, 2551, การประเมินศักยภาพของพลังงานลมเฉพาะพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ของประเทศไทย, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
- [17]เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ อริยวัฒน์ พระบำรุง วันวิสาข์ ชนะประเสริฐ ณีภูสิธิ ราชปรีชา และ ฟาน ทาน ทุง (2553), การประเมินศักยภาพแหล่งพลังงานลมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์ด้านภูมิศาสตร์สารสนเทศ, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและ สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [18]รัตเกล้า พันธุ์อร่าม ประจักษ์นทร์ วงศ์วิเศษ และ Meigen Zhang (2553) การศึกษาศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทยด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้านอุณหภูมิมิตวิทยา 3 มิติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [19]เสริม จันทรฉาย และ จรุงแสง ลักษณะบุญส่ง, 2553, การพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานลมสำหรับประเทศไทย,รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [20]อาบีดิน จิเหลา (2009) Using Computational Fluid Dynamics (CFD) for Wind Energy Resource Map : A Case Study of Chaiyaphum Province, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [21]จอมภพ แวศักดิ์ บุญเลิศ อาชีวะระงับโรค ยุทธนา ภูริระวณิชชกุล นรินทร์ มาแทน ชูสิทธิ์คังเรือง ธนศ ไชยชนะ วาริช วีระพันธ์ และวัสตา คงนคร, 2555, การประเมินศักยภาพของพลังงานลมนอกชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดนครศรีธรรมราชด้วยแบบจำลองอุณหภูมิมิตวิทยา 3 มิติ, รายงานการวิจัย, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

- [22]สมาน เสนงาม. **กัณฑ์ลผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก**. รายงานการประชุมวิชาการเรื่อง ปัญหาพลังงานและการแก้ไข, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วันที่ 2-4 กรกฎาคม 2524: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น, 2525
- [23]A.K. Wright and D.H. Wood., (2004). “The starting and low wind energy speed behavior of a small horizontal axis wind turbine”, *Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamic.*, V 92: 1265-1279.
- [24]Sung Num Jung, Tae-Soo No. and Ki-wahn Ryu., (2005). “Aero Dynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotation wind turbine system”, *Renewable Energy.*, V 30, Issue 5: 631-644.
- [25]A. Ozdamar., K. T. Gursel., G. Orer. and Y. Pekbey., (2004). “Investigation of the potential of wind-waves as a renewable energy resource: by the example of Ceame – Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, V 8, 581-592.
- [26]J.-L. Menet., (2004).” A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study”, *Renewable Energy.*, V 29,: 843–1862.
- [27]Sumpun Chaitep, Tanate Chaichana, Pipatpong Watanawanyoo and Hiroyuki Hirahara, (2011), “Performance Evaluation of Curved Blades Vertical Axis Wind Turbine”, **European Journal of Scientific Research**, Volume 57, Issue 3 ,435-466
- [28]Tanate Chaichana, 2010, Design and Development of a Small Vertical Co-Axis Counter-Rotation Wind Turbine System for Electricity Generation, Doctoral Thesis, Energy Engineering, Department of mechanical engineering, Faculty of engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, THAILAND