



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนแนวตั้งด้วยหลุมผิวโค้ง

Enhancement the power coefficient of a vertical axis wind turbine with curved surface hole

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ ธนาพล สุขชนะ*

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา.จ.พระนครศรีอยุธยา.13000

Anuwat Bumrungkij Thanaphol Sukchana*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra, Tambon Hantra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

*Corresponding author.

E-mail: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th; Tel: 035-709101

วันที่รับบทความ 20 เมษายน 25564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 4 มิถุนายน 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 กรกฎาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 2 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนแนวตั้งนั้นมักมีขีดจำกัดด้วยแรงต้านอากาศด้านหลังใบกังหัน งานวิจัยนี้เป็นการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_d) ด้านหลังใบกังหันด้วยหลุมผิวโค้ง ใบกังหันทำด้วยเหล็กแผ่นหนา 1.5 mm อัตราส่วนความสูงต่อความกว้างใบเท่ากับ 2.0 ใช้ลูกบอลเหล็กกลมขนาด 25 mm กดด้านหลังใบให้เป็นหลุมตามแนวยาวจำนวน 3 แถว โดยให้ความลึก 4 ระดับ คือ 0.25R, 0.5R, 0.75R และ 1.0R ทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันและประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบในอุโมงค์ลมด้วยความเร็วลมคงที่ระหว่าง 2.5 ถึง 9.0 m/s ผลการทดลองพบว่าหลุมผิวโค้งด้านหลังใบมีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศลดลงเป็น 1.12 โดยประสิทธิภาพพลังงานของกังหันเพิ่มขึ้นเป็น 29% ด้วยหลุมผิวโค้งที่มีความลึกเท่ากับ 0.5R

คำสำคัญ

กังหันลม ประสิทธิภาพพลังงาน ผิวโค้ง แรงต้านอากาศ หลุม

Abstract

The energy efficiency of vertical axis wind turbines is often limited by the air resistance behind the turbine blades. This research was conducted to decrease the drag coefficient (C_d) of the blades with the curved surface hole method. The blade made from mild steel with 1.5 mm of thickness while the ratio of height to length (h/b) is 2.0. A 25 mm ball steel used to press for the curved surface hole on the back of blade with three rows in longitudinal. There are four types of blade for used in the experimental. That the radius of curved surface holes of 0.25R, 0.5R, 0.75R and 1.0R. Experiments to determine the drag coefficient of turbine blades and energy efficiency of two-blade vertical axis wind turbines. Experiment within the wind tunnel with constant wind speed between 2.5 to 9.0 m/s. The results showed that the curved surface hole on the back of the blades reduced the drag coefficient of 1.12 while the turbine energy efficiency increased to 29% with the curved surface pits of 0.5R.

Keywords

wind turbine; energy efficiency; curved surface; drag coefficient; hole

1. บทนำ

กังหันลมในปัจจุบันมี 2 รูปแบบหลักๆ คือแบบแกนหมุนแนวตั้งและแบบแกนหมุนแนวนอน สำหรับในประเทศไทยของเรานั้นมักพบกังหันลมแบบแกนหมุนแนวนอนเป็นส่วนใหญ่ซึ่งใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเป็นหลัก ในขณะที่กังหันลมแบบแกนหมุนแนวตั้งนั้นไม่เหมาะในการสร้างให้มีขนาดใหญ่เนื่องจากใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้างและสร้างความสมดุลในการหมุนได้ยากแต่สามารถรับลมในแนวราบจากทุกทิศทางได้ ซึ่งมักจะออกแบบสร้างเพื่อใช้กับงานการเกษตร จึงถูกออกแบบให้เป็นกังหันลมขนาดเล็ก ในปัจจุบันกังหันลมทั้ง 2 รูปแบบได้ถูกพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ ดังเช่น ผลงานวิจัยกังหันลมแกนแนวตั้งในต่างประเทศของ Burcin and Mehmet [1] พบว่าหากมีมันหรือช่องทางการบังคับลมให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจะสามารถช่วยให้ประสิทธิภาพของกังหันลมชนิดแกนหมุนแนวตั้งสูงขึ้น ซึ่งเป็นการศึกษาด้วยโปรแกรมสร้างแบบจำลอง Ben et al. [2] ศึกษาทดลองสมรรถนะของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งแบบซาโวเนียส ชนิด 2 ใบ และ 3 ใบ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลม (C_p) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 22% ด้วยอัตราส่วนของความเร็วรอบใบกังหันต่อความเร็วลมปะทะเฉลี่ยเท่ากับ 0.8 Pope et al. [3] ได้ศึกษาด้วยวิธีการจำลองและเสนอสมการสำหรับการทำนายผลของใบพัดสเตเตอร์ที่ทำงานในลักษณะคล้ายอุโมงค์ลมต่อสมรรถนะของกังหันลมแกนแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น Qasim et al. [4] พบว่าใบกังหันลมที่มีรูปร่างของภาคตัดเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูเป็นมุม 120 องศา ทำให้สมรรถนะของกังหันลมเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่รับลมเพิ่มขึ้นเมื่อใบกังหันหมุนเลยแนวตั้งฉากกับทิศทางลม Priegue and Stoesser [5] ศึกษาผลกระทบจากความหยาบของผิวใบกังหันลมแกนแนวตั้ง ที่ใช้ใบกังหันแบบแรงปฏิกิริยาหรือแรงยก ซึ่งพบว่าความหยาบของผิวที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้สมรรถนะของกังหันลมนลดลง Ramadan et al. [6] ได้ปรับปรุงรูปร่างของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิดใบครึ่งทรงกระบอกให้มีรูปร่างเป็นตัว S (S-shape) พร้อมทั้งสร้างและทดสอบพบว่ากังหันลมมีค่า C_p โดยเฉลี่ยเท่ากับ 28% Saad et al. [7, 8] ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะกังหันลมแกนแนวตั้งด้วยใบแบบบิดเกลียว ซึ่งพบว่าค่า C_p เพิ่มขึ้นเป็น 23.1% ด้วยอัตราส่วนความเร็วเท่ากับ 0.8

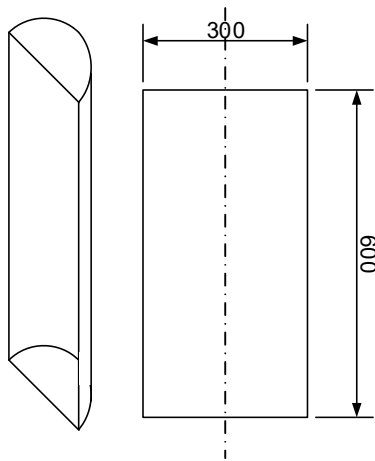
ต่อมาได้ศึกษาแบบเพิ่มจำนวนชั้นพบว่าค่า C_p เพิ่มขึ้นเป็น 26.1% สำหรับกังหันแบบใบ 4 ชั้น นอกจากนี้ผลงานวิจัยกังหันลมแกนแนวตั้งภายในประเทศของเรานั้นก็มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง แต่ด้วยศักยภาพด้านพลังงานลมของประเทศไทยที่มีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ต่ำถึงปานกลางเฉลี่ย 3.7 ถึง 7.0 m/s ที่ได้สำรวจและประเมินไว้โดย ลัทธวรรณ นิยมธรรม และคณะ [9] พนิดา สุขสมพร้อม และคณะ [10] ซึ่งมีมนตรี เลื่องชวนนท์ และ กิจจา ศรีทองกุล [11] นำเสนอการเพิ่มสมรรถนะของกังหันลมแกนแนวตั้งด้วยการผสมผสานระหว่าง แบบซาโวเนียส (Savonius) และ แบบดาร์เรียส (Darrieus) พร้อมทั้งออกแบบรวมชุดกังหันลมขนาดเล็กหลายตัวให้ทำงานร่วมกันในการผลิตกระแสไฟฟ้า วีระศักดิ์ ไชยชาญ และคณะ [12] ได้ออกแบบอุปกรณ์ปรับมุมใบกังหันลมที่มีจำนวนใบกังหันเท่ากับ 6 ใบ จากการศึกษาพบว่ามุมใบกังหันเท่ากับ 60 องศา มีอัตราเร็วรอบและอัตราการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงกว่ามุมอื่นๆ ในเงื่อนไขการทดลอง ต่อมา พงษ์พันธุ์ ฤกษ์ชุมทรัพย์ และคณะ [13] ได้ทดสอบกังหันลมแกนแนวตั้ง 3 รูปแบบและพบว่า ชนิด Lenz มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานได้สูงสุด รองลงมาเป็นแบบ Savonius และแบบ C โดยกังหันชนิด Lenz เริ่มหมุนด้วยความเร็วลมต่ำสุดเท่ากับ 0.6 m/s ในปีเดียวกันนั้น บุญญฤทธิ์ วังอน [14] ได้ทดสอบเปรียบเทียบการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมแบบซาโวเนียส และแบบดาร์เรียส ซึ่งใช้ลมจากคอยล์ร้อนเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ผลการทดสอบพบว่ากังหันลมแบบดาร์เรียสมีสมรรถนะสูงกว่าแบบซาโวเนียส ต่อมา ธนาพล สุขชนะ[15] พัฒนาใบกังหันแบบซาโวเนียสให้ส่วนปิดปลายใบทั้งสองด้านเอียงเป็นมุม 45 องศา ซึ่งมีผลทำให้ค่า C_p เพิ่มขึ้นเป็น 27% เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในแนวทางในการพัฒนากังหันลมแกนแนวตั้งให้มีค่าประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การบังคับลมหรือการรวมกระแสลม การเลือกชนิดและความหยาบผิวของวัสดุ การปรับปรุงรูปร่างของใบให้เหมาะสมกับความเร็วลม การเพิ่มจำนวนชั้นของใบ การเพิ่มจำนวนใบ การลดแรงต้านอากาศด้านหลังของใบ จากข้อมูลการทดลองจริงของผู้วิจัยพบว่า การออกแบบสร้างกังหันลมที่มีขนาดเล็กนั้นแรงต้านการหมุนของเพลาลูกและแรงต้านอากาศ

หลังใบนั้นเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมที่ได้จากวิธีการของ [16] นั้นสามารถทำให้ค่าประสิทธิภาพพลังงานลมเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 14.8% จากใบกังหันแบบเรียบปกติ การวิจัยโดยการทดลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาวิจัยต่อยอดจาก [16] เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานลมโดยการลดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันลมที่มีหลุมผิวโค้งลักษณะเดียวกันกับลูกกอล์ฟ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของกังหันลมชนิดแกนแนวตั้งขนาดเล็กที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานต่อไป

2. อุปกรณ์การทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการสร้างและทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันรูปทรงกระบอกผ่าครึ่ง และการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ โดยทำการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมที่ควบคุมความเร็วลมได้คงที่ อุปกรณ์ในการทดลองนั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลักด้วยกันคือ ใบกังหันลม อุโมงค์ลม และเครื่องมือวัด

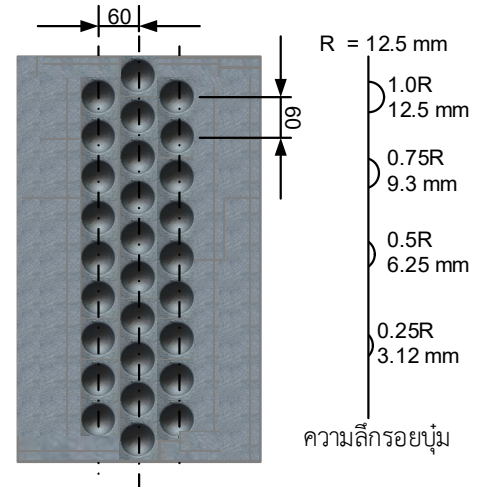


รูปที่ 1 ขนาดของใบกังหันในการทดลอง

2.1 ใบกังหัน

ใบกังหันลม (Bucket) ในการทดลองนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกผ่าครึ่ง มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างใบ (h/b) เท่ากับ 2.0 โดยมีขนาดความกว้าง (b) เท่ากับ 300 mm และความสูง (h) เท่ากับ 600 mm ดังรูปที่ 1 คิดเป็นพื้นที่รับลมแนวตรงเท่ากับ 0.18 m^2 ส่วนบนและล่างของใบทั้งสองด้านปิดเรียบ ใบกังหันทำด้วยเหล็กแผ่นมีความหนา 1.5 mm

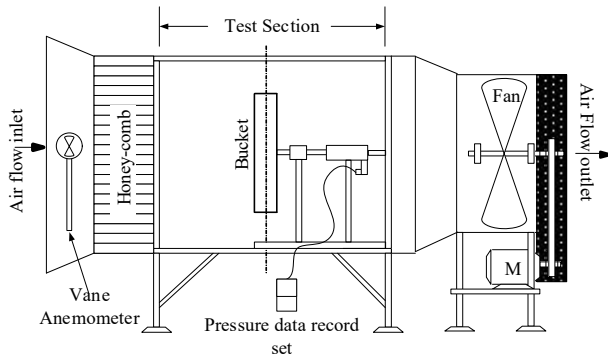
โดยใช้ลูกบอลกลมขนาด 25 mm กดด้วยแท่นอัดไฮดรอลิกส์ เพื่อให้เกิดหลุมด้านหลังของใบจำนวน 3 แถวและมีระยะห่างดังรูปที่ 2 โดยมีความลึกเท่ากับ 0.25R, 0.5R, 0.75R และ 1.0R โดย R มีค่าเท่ากับ 12.5 mm จะทำให้ได้ความลึกของหลุมเท่ากับ 3.12, 6.25, 9.30 และ 12.50 mm ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะของหลุมและความลึกบนใบกังหันลม

2.2 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลม (Wind tunnel) ที่ใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3 มีส่วนประกอบต่างๆ ที่สามารถใช้ในการทดสอบการทำงานของกังหันลมและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันลม เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบกังหันลม โดยอุโมงค์ลมมีขนาดของห้องทดสอบ (Test section) กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ $1.2 \times 1.5 \times 1.2 \text{ m}$ มีรังผึ้ง (Honey-comb) บริเวณทางเข้าของอากาศ (Air inlet) เพื่อปรับเรียงกระแสลม โดยมีต้นกำลัง (M) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 10hp, 1450 RPM พัดลม (Fan) ทำหน้าที่ดูดอากาศให้ไหลเข้าอุโมงค์ลมด้วยความเร็วคงที่ ความเร็วลมในห้องทดสอบปรับให้คงที่ได้ด้วยการเปลี่ยนขนาดของมู่เลย์ขับที่มอเตอร์ต้นกำลังและมู่เลย์ตามของเพลาพัดลม ซึ่งจะทำความเร็วลมที่ได้มีค่าคงที่และมีความผิดพลาดน้อยกว่าการปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลมในการทดลอง

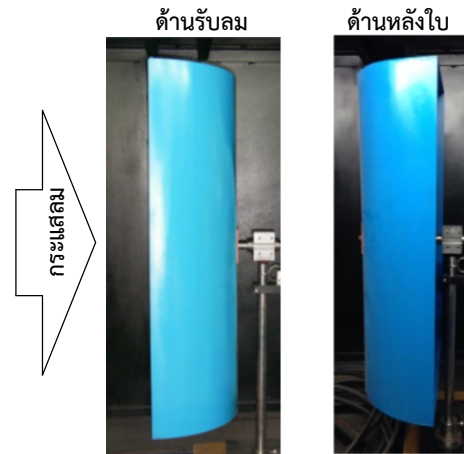
2.3 เครื่องมือวัด

เครื่องมือสำหรับวัดค่าต่างๆ จากการทดลองที่สำคัญในงานวิจัย ประกอบด้วยเครื่องวัดความเร็วกระแสลม (Vane Anemometer) เป็นแบบตัวเลขรุ่น TE-473B เครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Tachometer) แบบตัวเลขรุ่น FT3406 สำหรับเครื่องมือในการวัดแรงนั้นเป็นการวัดโดยทางอ้อมด้วยชุดเครื่องที่ประกอบด้วยกระบอกสูบไฮดรอลิกส์ขนาด 20 mm ที่บรรจุน้ำมันไฮดรอลิกส์ภายในเป็นระบบปิด เมื่อได้รับแรงกดแนวตรงที่บริเวณปลายก้านสูบจะทำให้เกิดความดันขึ้น และส่งสัญญาณความดันไปยังหัววัดความดัน (Pressure transducer) รุ่น TR-PS2W-2Bar พร้อมบันทึกความดันด้วย (Pressure data recorder) รุ่น MPS-384SD จากนั้นนำเอาค่าความดันไฮดรอลิกส์ (P) ที่อ่านได้มาคำนวณหาแรงต้าน (Drag force) ทั้งด้านรับลม (F_D) และด้านหลังใบ (f_d) โดยชุดเครื่องมือวัดแรงได้ทำการสอบเทียบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน ซึ่งทำให้ได้ค่าความผิดพลาดในการวัดแรงเฉลี่ยไม่เกิน $\pm 0.5\%$

3. การทดลอง

เริ่มต้นทำการทดลองจากการหาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_d) ทั้งด้านรับลมและด้านหลังใบดังรูปที่ 4 จากใบกังหันแบบผิวเรียบเพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลอง

โดยติดตั้งแนวตั้งฉากกับกระแสลม จากนั้นจะทำการทดสอบความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกับความลึกของหลุมที่เกิดด้วยลูกบอลเหล็กบริเวณด้านหลังใบกังหันเพื่อให้ได้ใบกังหันที่มีค่า C_d ต่ำที่สุด จากนั้นจะขึ้นรูปใบกังหันด้วยความลึกของหลุมที่เหมาะสมและประกอบเป็นกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ และทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมเพื่อหาประสิทธิภาพ

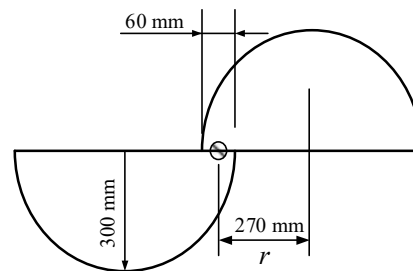


รูปที่ 4 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศในอุโมงค์ลม

3.1 เงื่อนไขและวิธีการทดลอง

การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันและด้านรับลม โดยติดตั้งใบกังหันเข้ากับแกนของกระบอกไฮดรอลิกส์ของชุดเครื่องมือวัดแรงในแนวตั้งฉากกับทิศทางของกระแสลม คำนวณเป็นค่าแรงต้านอากาศด้านรับลม F_D และด้านหลังใบ f_d ด้วยสมการที่ (1) ซึ่งเริ่มการทดสอบจากแบบเรียบและแบบหลุมตื้นไปลึกด้วยใบกังหันใบเดียวกัน เริ่มจากความลึกของหลุมเท่ากับ 3.12, 6.25, 9.30 และ 12.50 mm ในผลการทดลองจะกำหนดชื่อเรียกให้เป็น M1, M2, M3 และ M4 ตามลำดับ ความเร็วลมจากอุโมงค์ที่ใช้ทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 2.7, 3.2, 3.7, 4.4, 5.4, 6.5, 7.8 และ 8.9 m.s^{-1} สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนขนาดของมู่เลย์ขับและมู่เลย์ตามของชุดใบพัดลม เริ่มการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันและด้านรับลมโดยการวัดแรงกระทำด้านหลังของใบกังหันและด้านรับลมได้ในแนวตรง ซึ่งในการทดลองนั้นจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 40 ครั้ง ต่อ 1 เงื่อนไขความเร็วลม ตัดผลการทดลองที่มีค่าอยู่

ในกลุ่มสูงและกลุ่มต่ำอย่างละ 5 ครั้งออก แล้วนำข้อมูลกลุ่มที่เหลือจำนวน 30 ครั้ง มาเฉลี่ยและนำเสนอเป็นผลในการทดลอง ซึ่งข้อมูลที่ได้มีความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่า 95% โดยแรงที่วัดได้นำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหัน (C_{df}) และด้านรับลม (C_{df}) ด้วยสมการที่ (2) แล้วประเมินประสิทธิภาพของใบกังหัน (ε) โดยสัดส่วนของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบต่อด้านรับลมด้วยสมการที่ (3) เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกใช้ใบกังหันที่เหมาะสมในการประกอบเป็นกังหันลมสำหรับทดสอบสมรรถนะต่อไป จากนั้นประเมินหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ (η_{pw}) ก่อนการทดลองจริงด้วยสมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการสำหรับประเมินหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ จากงานวิจัย [15] โดยเลือกใช้ใบกังหันที่มีประสิทธิภาพพลังงานลมของใบมากที่สุดจากการทดลอง เมื่อทดสอบได้ความลึกของหลุมที่ทำให้ประสิทธิภาพพลังงานลมของใบกังหันสูงสุดแล้วจึงผลิตและประกอบเป็นกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ โดยให้มีระยะเกย (Gap) เช่นเดียวกับงานวิจัย [15] ดังรูปที่ 5 และทำการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมภายในอุโมงค์ด้วยความเร็วลมตามเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบใบกังหัน โดยแกนเพลามีแบริ่งที่มีแรงต้านการหมุนต่ำรองรับพร้อมทั้งติดตั้งล้อเบรกเชือกที่มีรัศมี (R) คงที่บริเวณปลายเพลาด้านล่างเพื่อวัดแรงดึง (F) โดยแรงดึง F จะมีค่าคงที่ตามตัมน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 ขนาด และคำนวณเป็นแรงบิด (T) ได้ด้วยสมการที่ (5) ซึ่งจะได้แรงบิดคงที่เท่ากับ 0.10, 0.20, 0.35, 0.60 และ 1.10 Nm จากนั้นนำแรงบิดที่ได้มาคำนวณเป็นกำลังงานกล (P_m) ด้วยสมการที่ (6) โดยใช้ความเร็วรอบ (N) ที่วัดได้จริงตามความเร็วลมที่ต่างกัน สุดท้ายคำนวณกำลังของกระแสลม (P_w) ด้วยสมการที่ (7) ซึ่งเป็นสมการมาตรฐานโดยใช้ความเร็วลม (V) ตามเงื่อนไขของความเร็วลมในการทดลอง แล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานลม ($Power\ Eff$) ด้วยสมการที่ (8)



รูปที่ 5 การประกอบเป็นกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ

3.2 สมการคำนวณผลการทดลอง

ในการทดลองนั้นจะเริ่มจากการทดลองตามหัวข้อที่ 3.1 โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องในการคำนวณดังต่อไปนี้ สมการที่ (1) แรงต้านอากาศด้านรับลมและด้านหลังของใบกังหันที่คำนวณได้จากความดันน้ำมันไฮดรอลิกส์ของเครื่องมือวัด สมการที่ (2) สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลมและด้านหลังของใบกังหัน [4, 8, 15] สมการที่ (3) ประสิทธิภาพของใบกังหันลมที่ได้จากสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันต่อด้านรับลม [15] สมการที่ (4) การทำนายประสิทธิภาพของกังหันลมชนิด 2 ใบ ด้วยสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลมและด้านหลังของใบกังหันและประสิทธิภาพของใบกังหันลม [15] สมการที่ (5) แรงบิดเพลาวัดด้วยล้อเบรกเชือกจากการทดสอบกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ ในอุโมงค์ลม [4, 15] สมการที่ (6) กำลังงานกลของเพลาวัดได้จากแรงบิดและความเร็วรอบจริงจากการทดลอง [4, 15] สมการที่ (7) พลังงานของกระแสลมที่เป็นไปได้ในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลสูงสุดเมื่อใช้กังหันลมเปลี่ยนรูปจากพลังงานลมเป็นพลังงานกล [4, 16] สมการที่ (8) ประสิทธิภาพพลังงานลม [4, 8, 15] เป็นอัตราส่วนพลังงานของกระแสลมที่เปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ด้วยกังหันลมต่อพลังงานของกระแสลมที่เป็นไปได้สูงสุดตามสมการที่ (7)

$$F_D, f_D = P A_c \quad (1)$$

$$C_{dF}, C_{df} = \frac{2F_D, 2f_D}{\rho A V^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{C_{dF} C_{df}}{C_{dF}} \quad (3)$$

$$\eta_{pw} = \frac{2\pi r N [0.5 \varepsilon \rho A C_{dF} V^2 - 2(0.5 \rho A C_{dF} (\pi r N)^2)]}{0.5 \rho A V^3} \quad (4)$$

$$T = FR \quad (5)$$

$$P_m = \frac{2\pi T N}{60} \quad (6)$$

$$P_w = 0.5 \rho A V^3 \quad (7)$$

$$Power\ Eff. = \frac{P_m}{P_w} \quad (8)$$

โดยที่

- F_D คือแรงต้านอากาศด้านรับลมของใบกังหันที่คำนวณได้จากเครื่องวัดแรง, N
- f_D คือแรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันที่คำนวณได้จากเครื่องวัดแรง, N
- P คือความดันไฮดรอลิกส์, N/m²
- A_c คือพื้นที่ภาคตัดของลูกสูบไฮดรอลิกส์, m²
- C_d คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ
- ρ คือความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³
- A คือพื้นที่รับลมของใบกังหัน, m²
- V คือความเร็วลม, m/s
- ε คือประสิทธิภาพพลังงานลมของใบกังหันลม
- C_{dF} คือสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลม
- C_{df} คือสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบ

η_{pw} คือประสิทธิภาพของกังหันลม

r คือรัศมีของใบกังหันวัดจากแกนเพลลา, m

T คือแรงบิดเพลลา, Nm

F คือแรงดึงจากล้อเบรกเชือก, N

R คือรัศมีล้อเบรกเชือก, m

P_m คือกำลังงานกลเพลลาของกังหันลม, W

N คืออัตราเร็วรอบของกังหันลม, rpm

P_w คือพลังงานของกระแสลม, W

$Power\ Eff.$ คือประสิทธิภาพพลังงานลม

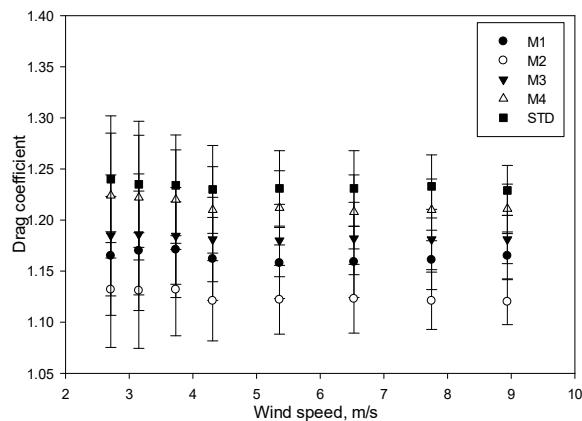
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากเงื่อนไขและวิธีการทดลอง การลดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันลมแกนแนวตั้งด้วยหลุมผิวโค้งนั้น จะแบ่งการนำเสนอผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศและประสิทธิภาพของใบกังหัน และส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ ที่ประกอบขึ้นด้วยใบกังหันจากการทดสอบแล้วมีประสิทธิภาพสูงสุด

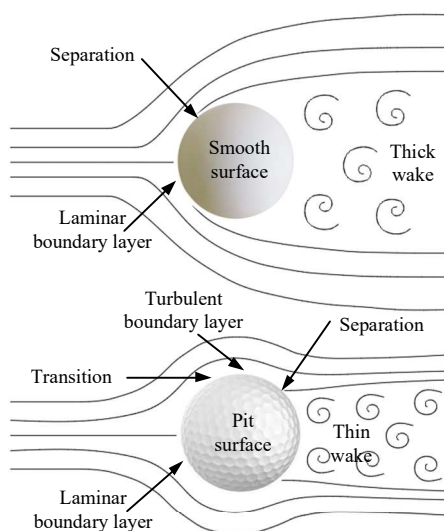
4.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันลม

การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเป็นการทดสอบแบบกระแสลมปะทะแนวตรงทำมุม 90° กับใบกังหัน วัดแรงกระทำกับใบกังหันด้วยอุปกรณ์การวัดแบบความดันและคำนวณค่าของแรงกระทำด้วยสมการที่ (1) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าของแรงที่มีความละเอียดและคงที่ได้มากกว่าการวัดแรงโดยตรงด้วยสปริงหรือเครื่องวัดแบบตัวเลขชนิดดึง จากการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหัน ดังรูปที่ 6 โดยการคำนวณด้วยสมการที่ (2) จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันลมเฉลี่ยเท่ากับ 1.16, 1.12, 1.18, 1.21 และ 1.23 สำหรับใบกังหันแบบ M1, M2, M3, M4 และ STD ตามลำดับ โดยค่าที่ได้เฉลี่ยต่ำกว่างานวิจัยของ [4, 7, 8, 15] แสดงว่าหลุมบนใบกังหันมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบลดลง ซึ่งเกิดจากการไหลของอากาศผ่านวัตถุที่มีรอยบุ่มเช่นลูกกอล์ฟ ดังรูปที่ 7 หลุมบนผิวของวัสดุจะเป็นผลทำให้แรงเสียดทานระหว่างผิววัสดุกับอากาศลดลงจึงเกิดขอบเขตของการไหลแบบราบเรียบ

เพิ่มมากขึ้นหรือทำให้เกิดการไหลของอากาศแบบหมุนวนบนผิวของวัสดุข้างนั่นเอง จนกระทั่งเกิดการแยกชั้นของกระแสลมก็จะซาลงไปด้วย จากการแยกชั้นของกระแสลมที่ซาลงทำให้ร่องอากาศทางด้านรับลมของใบกังหันแคบลงซึ่งจะช่วยให้เกิดแรงดูดในการเคลื่อนที่น้อยลง เนื่องจากผลต่างของความดันด้านหน้าและด้านหลังมีค่าน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าความลึกของหลุมมีผลต่อหลักอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น โดยการทดสอบ M2 ซึ่งมีความลึกของหลุมเท่ากับ 0.5R จะให้ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำสุดและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความลึกของหลุมเพิ่มมากขึ้นโดยมีแนวโน้มกลับไปใกล้เคียงกับพื้นผิวแบบเรียบปกติ ทั้งนี้ความเร็วลมไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ



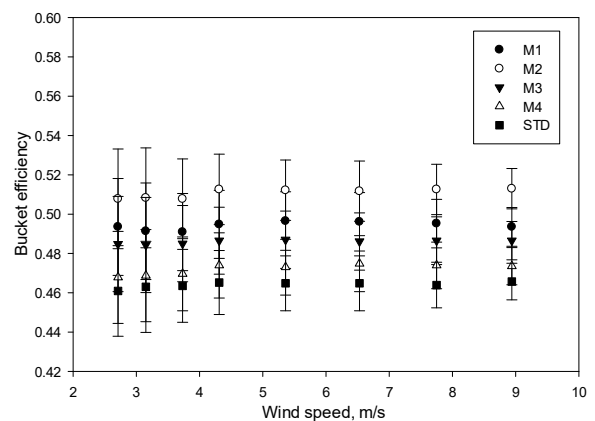
รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบกังหัน



รูปที่ 7 หลักอากาศพลศาสตร์กับวัตถุผิวเรียบและพื้นผิวที่เป็นหลุม

4.2 ประสิทธิภาพของใบกังหันลม

การประเมินประสิทธิภาพของใบกังหันลมด้วยสมการที่ 3 โดย C_d เป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลมของใบกังหันที่ได้จากการทดลองทั้ง 4 รูปแบบ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.3 เท่ากับค่ามาตรฐาน [2, 4, 6, 16] ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าหลุมผิวโค้งบนใบกังหันมีผลทำให้สมรรถนะของใบกังหันเพิ่มขึ้นเนื่องจาก C_{df} โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของใบกังหัน M1, M2, M3, M4 และแบบ STD เท่ากับ 0.49, 0.51, 0.49, 0.47 และ 0.46 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของกังหันลมโดยจะมีค่าเฉลี่ยไม่เกิน 0.59 [2, 4, 6] ซึ่งจะเห็นได้ว่าความลึกของหลุมแตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพของใบกังหันลมแตกต่างกัน แสดงว่าความลึกของหลุมมีผลต่อการไหลของอากาศแบบมีชั้นขอบเขต (Boundary layer) จนถึงช่วงการไหลของอากาศแบบแยกชั้น (Separation) ที่มีความกว้างมากขึ้นดังรูปที่ 7 จึงส่งผลทำให้ C_{df} มีค่าที่แตกต่างกัน โดยพบว่าหากหลุมบนพื้นผิวใบกังหันมีความลึกน้อยหรือมากเกินไปจะทำให้เกิดการไหลแบบแยกชั้นเร็วขึ้นเช่นเดียวกันกับวัตถุแบบผิวเรียบ แสดงว่าการเพิ่มประสิทธิภาพของใบกังหันลมด้วยหลุมผิวโค้งนั้นจะต้องมีความลึกที่เหมาะสม

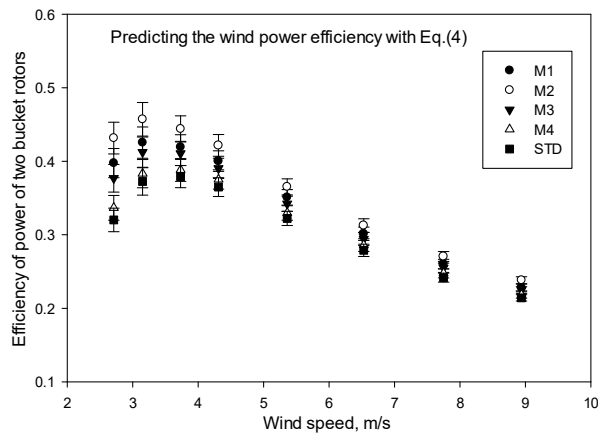


รูปที่ 8 ผลความลึกหลุมผิวโค้งต่อประสิทธิภาพของใบกังหัน

4.3 การทำนายประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลม

ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลม (Power coefficient, C_p) ดังรูปที่ 9 สามารถประเมินก่อนทำการทดสอบได้ด้วยสมการที่ (4) [15] โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ และค่าประสิทธิภาพของใบกังหันลมที่ทดสอบได้ทั้ง 5

รูปแบบ กำหนดความเร็วลมตามเงื่อนไขการทดลองเท่ากับ 2.7, 3.2, 3.7, 4.4, 5.4, 6.5, 7.8 และ 8.9 m.s^{-1} กำหนดให้ความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1 rps (60 rpm) และค่าตัวแปรอื่นๆ เป็นค่าที่กำหนดในเงื่อนไขการทดลองและค่าได้จากการทดลองเบื้องต้น จะได้ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของพลังงานของกังหันลม C_p เท่ากับ 0.36, 0.38, 0.36, 0.34 และ 0.32 สำหรับใบกังหันแบบ M1, M2, M3, M4 และ STD และพบว่าประสิทธิภาพพลังงานเริ่มลดต่ำลงอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วลมสูงกว่า 6 m/s เนื่องจากแรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันในสมการนั้นจะแปรผันตามความเร็วลมและความเร็วเชิงมุมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าใบกังหันแบบ M2 (ความลึกของหลุม 0.5D หรือ 6.25 mm) มีแนวโน้มการให้ประสิทธิภาพพลังงานลมได้ดีกว่าแบบอื่น

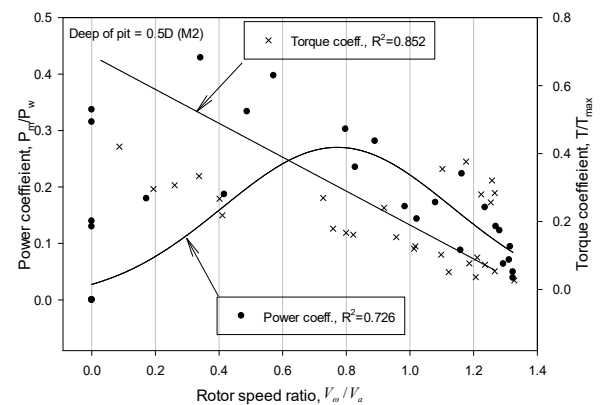


รูปที่ 9 ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมที่ทำนายด้วยสมการที่ (4)

4.4 ประสิทธิภาพพลังงานจากการทดสอบ

หลังจากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ประเมินค่าประสิทธิภาพของใบกังหันลมและทำนายประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ ด้วยสมการในหัวข้อ 4.3 ซึ่งพบว่าใบกังหันที่มีหลุมลึก 0.5D หรือ 6.25 mm (M2) มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่นที่ทำการทดสอบ จึงขึ้นรูปใบกังหันตามรูปแบบ M2 และประกอบเป็นกังหันลมแกนแนวตั้งชนิด 2 ใบ ตามรูปที่ 5 [1, 6, 7, 8, 11, 15] โดยมีแกนเพลานขนาด 19 mm ติดตั้งในอุโมงค์ลมโดยมีเบร็กรองรับปลายเพลาทั้ง 2 ด้าน และทำการทดสอบด้วยความเร็วลมคงที่เท่ากับการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ใช้ค้อนน้ำหนักมาตรฐานเป็นตัวกำหนดแรงดึงผ่านล้อ

เบรกเชือกแบบคงที่ คำนวณเป็นแรงบิดคงที่ด้วยสมการที่ (5) เท่ากับ 0.10, 0.20, 0.35, 0.60 และ 1.10 Nm พร้อมกับวัดความเร็วรอบในแต่ละความเร็วลมที่ทำการทดลองแล้วนำมาคำนวณเป็นกำลังงานเพลากองกังหันด้วยสมการที่ (6) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของกังหันลมด้วยสมการที่ (8) ด้วยพลังงานของกระแสลมสูงสุดจากสมการที่ (7) ดังรูปที่ (10) เป็นความสัมพันธ์ของ 3 ตัวแปร ประกอบด้วย P_m/P_w , T/T_{max} และ V_o/V_a พบว่าอัตราส่วน V_o/V_a เท่ากับ 0.8 หรือที่ความเร็วลมปะทะเฉลี่ย 7.0 m/s มีผลต่อประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดสอดคล้องกับผลงานวิจัย [2, 4, 6, 7, 8, 16] โดยมีค่าประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเฉลี่ย 29% ซึ่งสูงกว่าผลการทดลองแบบใบเรียบปลายปิดตั้งฉากตรงของ [15] ประมาณ 13% และสูงกว่าผลการทดลองแบบปลายใบปิดเฉียง 45° ของ [15] เฉลี่ยประมาณ 7% ในขณะที่ประสิทธิภาพพลังงานจากผลการทดลองมีค่าน้อยกว่าการทำนายด้วยสมการที่ (4) เฉลี่ย 17% เนื่องจากสมการไม่คิดค่าแรงเสียดทานในการหมุนของเพลากังหันลม ซึ่งในการทำงานจริงของกังหันลมขนาดเล็กนั้น ค่าแรงเสียดทานในการหมุนจะมีผลต่อประสิทธิภาพพลังงานมากกว่ากังหันลมขนาดใหญ่ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกหนึ่งในการพัฒนากังหันลมขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของ P_m/P_w , T/T_{max} และ V_o/V_a ของใบกังหันที่มีความลึกของหลุมเท่ากับ 0.5R

5. สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งด้วยวิธีการลดแรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหันหลุมผิวโค้งลักษณะเหมือนกับผิวของลูกกอล์ฟนั้นสามารถช่วยให้ค่า

สัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศด้านหลังใบกังหันแบบครึ่งทรงกระบอกจากค่ามาตรฐาน 1.23 ลดลงเหลือเพียง 1.12 โดยพบว่าประสิทธิภาพพลังงานของกังหันเฉลี่ยเท่ากับ 29% และให้กำลังสูงสุดที่อัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมต่อความเร็วลม (V_{ω}/V_a) เท่ากับ 0.8 แสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้านหลังของใบกังหันให้มีหลุมผิวโค้ง หรือผิวไม่เรียบอย่างมีรูปแบบเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยให้ประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในการออกแบบสร้างหรือพัฒนากังหันลมที่มีขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพพลังงานเพิ่มขึ้นได้นั้น ควรคำนึงถึงแรงเสียดทานในการหมุนของเพลากังหันที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพพลังงาน รวมทั้งอัตราเร็วลมเฉลี่ยของประเทศไทยนั้นจะอยู่เพียงในระดับต่ำถึงปานกลาง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Burcin DA, Mehmet A. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*. 2010;35: 821–829.
- [2] Ben FB, Robert ES, Louis VF. *Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors*. National Technical Information Service, U. S. Department of Commerce; 1977.
- [3] Pope K, Rodrigues V, Doylea R, Tsopelas A, Gravelsins R, et al. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*. 2010;35: 1043–1051.
- [4] Qasim AY, Usubamatov R, Investagation and design impeller type vertical axis wind turbine. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5 (12): 121–126.
- [5] Priegue L, Stoesser T. The influence of blade roughness on the performance of a vertical axis tidal turbine. *International Journal of Marine Energy*. 2017;17: 136–146.
- [6] Ramadan A, Yousef K, Said M, Mohamed MH. Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine. *Energy*. 2018;151: 839–853.
- [7] Saad AS, El-Sharkawy II, Ookawara S, Ahmed M. Performance enhancement of twisted- bladed savonius vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*. 2020;209: 1–19.
- [8] Saad AS, Elwardany A, El-Sharkawy II, Ookawara S, Ahmed M. Performance evaluation of a novel vertical axis wind turbine using twisted blades in multi- stage Savonius rotors. *Energy Conversion and Management*. 2021;235: 1–21.
- [9] ลัทธวรรณ นิยมธรรม, จอมภพ แวศักดิ์, ชนะ จันทรฉำ. การประเมินศักยภาพของพลังงานลมด้วยระเบียบวิธีแผนที่ลมมหภาค: กรณีศึกษาพื้นที่ตอนกลางของประเทศไทย. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 2563;23(1): 39–48.
- [10] พนิดา สุขสมพร้อม, เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต, ศิโรรัตน์ พัฒนไพโรจน์. การศึกษาศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมสำหรับจังหวัดนครพนม. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 2563;37(2): 1–9.
- [11] มนตรี เลื่องชวนนท์, กิจจา ศรีทองกุล. การออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งสำหรับความเร็วลมต่ำในประเทศไทย. *Thai Journal of Physics*. 2563;37(1): 1–10.
- [12] วีระศักดิ์ ไชยชาญ, ศักราษ ทองนอก, เพียรดี อ่อนยิ่ง, ภูเทพ วรณบวร. การออกแบบอุปกรณ์ปรับมุมใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิดแกนแนวตั้ง 6 ใบพัด. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*. 2561;10(1): 13–23
- [13] พงษ์พันธุ์ ฤกษ์ชุมทรัพย์, จรัสศรี เสือทับทิม, ปฏิภาณ อร่ามวาณิชย์. การออกแบบและสร้างกังหันลมแนวตั้งขนาดกระทัดรัด. *วารสารวิชาการปทุมวัน*. 2560;7(19): 59–67.
- [14] บุญญฤทธิ์ วังอน. กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าจากลมร้อนเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน. *วารสารวิจัยราชวมงคลกรุงเทพ*. 2560;11(1): 47–54.
- [15] ธนาพล สุขชนะ. ผลกระทบของรูปทรงส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี*. 2562;17(1): 163–173.