

การศึกษาทดสอบสมรรถนะในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมชนิดแนวแกน ตั้งแบบใบพัดบิดเกลียวขนาดเล็ก

Experimental Study on Power Generation Performance of Small Helical Vertical Axis Wind Turbines (HVAWT)

เกียรติศักดิ์ สมัครสมาน¹, ชาญณรงค์ อัครเทศานุกภาพ²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโทสาขาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, kiat.smaksman@gmail.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, acharmna@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทดลองในการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบพัดบิดเกลียวขนาดเล็กภายใต้สภาวะการทำงานที่ระดับความเร็วลมต่ำ พื้นที่กวาดของใบกังหัน 0.4 m² โดยมีวิธีการศึกษาดังนี้ ทำการทดสอบกังหันลมกับอุโมงค์ลมกำหนดความเร็วลมทดสอบ 3 ถึง 10 m/s วัดค่าแรงบิดที่เพลากังหันด้วยประแจวัดแรงบิดดิจิทัล แสดงค่าแรงบิดสูงสุดเป็นนิวตันเมตร (Nm) และวัดความเร็วลมด้วยเครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดลูกถ้วยสามใบแสดงค่าเป็นเมตรต่อวินาที (m/s) กำหนดตัวแปรต้นคือความเร็วลมตั้งแต่ 3 ถึง 10 m/s ส่วนตัวแปรตามได้แก่ความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลม (RPM) แรงบิดที่เพลากังหันลม (Nm) ผลที่ได้จากการวิจัย ดังนี้ 1) กังหันลมสามารถผลิตกำลังเชิงกลได้ตั้งแต่ 2.1 W ไปจนถึง 47.2 W เทียบเท่าการผลิตกำลังไฟฟ้า ตั้งแต่ 1.89 W ไปจนถึง 42.47 W (เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประสิทธิภาพ 0.9) 2) ค่าประสิทธิภาพหรือสัมประสิทธิ์กำลัง (Cp) อยู่ระหว่าง 0.19 ถึง 0.33 3) ค่า Tip Speed Ratio (TSR) 0.99 ถึง 1.30 และ 4) กังหันลมมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความเร็วลม 7 m/s หรือที่สัมประสิทธิ์กำลังประมาณ 0.33 นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วลมระหว่าง 5 ถึง 7 m/s เป็นย่านที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมในการใช้งาน มีสมรรถนะสูงกว่ากังหันลมแนวแกนตั้งชนิดซาร์โวนีเยสแบบดั้งเดิม ผลจากทำงานที่ดีของกังหันลมในย่าน Tip Speed Ratio ต่ำส่งผลให้ขณะกังหันลมทำงานจะมีเสียงรบกวนน้อย ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวช่วยให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายพื้นที่ เช่น ลมระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมหรืออาคารขนาดใหญ่ ลมธรรมชาติบนพื้นที่สูงบนอาคารสูง และบนเรือ

คำหลัก: กังหันลมแกนตั้งขนาดเล็ก กังหันความเร็วลมต่ำ กังหันลมแนวแกนตั้งใบพัดบิดเกลียวขนาดเล็ก

Abstract

This experimental research aims to evaluate the power generation performance of a helical vertical axis wind turbine (HVAWT) under low wind speed conditions, with a swept area of 0.4 m². The methodology is as follows: the wind turbine was tested in a wind tunnel at wind speeds ranging from 3 to 10 m/s. The shaft torque was measured using a digital torque wrench to record the maximum torque in Newton-meters (Nm), and the wind speed was monitored using a 3-cup anemometer (m/s). The independent variable was the wind speed (3–10 m/s), while the dependent variables included the rotor speed (RPM) and the turbine shaft torque (Nm). The research results are as follows: 1) The wind turbine generated mechanical power ranging from 2.1 W to 47.2 W, which corresponds to an electrical power output of 1.89 W to 42.47 W (assuming a generator efficiency of 0.9). 2) The power coefficient (C_p) ranged between 0.19 and 0.33. 3) The Tip Speed Ratio (TSR) was found to be between 0.99 and 1.30. 4) The turbine achieved its maximum efficiency at a wind speed of 7 m/s, with a power coefficient of approximately 0.33. Additionally, it was found that the wind speed range between 5 and 7 m/s represents the optimal operating range for efficiency. This helical vertical axis wind turbine (HVAWT) outperformed the conventional Savonius VAWT. The robust performance at a low Tip Speed Ratio (TSR) also results in minimal noise emissions during operation. These advantageous characteristics allow for versatile applications in various environments, such as industrial exhaust systems, large-scale building ventilation, high-rise building rooftops, and maritime applications (vessels).

Keywords: Small vertical axis wind turbines, low wind speed turbines, small helical vertical axis wind turbines

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานลมเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่เริ่มใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับในประเทศไทยพบว่ามีความศักยภาพพลังงานลมหลัก ๆ สองประเภท ได้แก่ พลังงานลมธรรมชาติซึ่งจะมีความเร็วลมเฉลี่ยทั้งปี เกิน 2.5 m/s ระดับกำลังลมจัดอยู่ในคลาสที่ 1.1 ถึง 1.4 ซึ่งเป็นความเร็วลมค่อนข้างต่ำ ที่ 2.8 ถึง 4.4 m/s ความเร็วสูงสุดจะพบได้บริเวณภาคใต้ของประเทศซึ่งมีความเร็วลมสูงสุดประมาณ 6 m/s (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2566) และพลังงานลมที่มนุษย์สร้างขึ้นพบได้ 2 แหล่ง คือ

ลมปล่องยั้งจากภาคอุตสาหกรรม อาคาร สำนักงาน และที่อยู่อาศัย ความเร็วลมเฉลี่ยที่ 6 ถึง 18 m/s รวมถึงลมจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและภาคขนส่งความเร็วลม 10 ถึง 30 m/s (วชิระ พุทธิแจ่ม, 2022)

กังหันลมในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ กังหันลมแกนนอน (HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (VAWT) สำหรับกังหันลมชนิดแนวแกนตั้งถึงแม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมจะต่ำกว่าชนิดแนวแกนนอน แต่มีคุณลักษณะที่ได้เปรียบคือใบกังหันสามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ไม่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมใบสามารถติดตั้งได้ง่ายบนอาคารสูง ยานพาหนะ เช่น เรือ โดยมี 3 รูปแบบ คือ ซาโวเนียส ดาร์เรียม และแบบผสมระหว่างซาโวเนียสและดาร์เรียม (วิรัช โยชนรินทร์, 2548) กังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบปิดเกลียวจะมีความพิเศษสามารถเริ่มต้นออกตัวหมุนด้วยตัวเองที่ดีที่สุด (จารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ และทวิช จิตรสมบูรณ์, 2552) สำหรับกังหันลมขนาดเล็ก (Small scale micro wind turbines) จะมีทั้งแบบแนวแกนตั้งและแบบแนวแกนนอน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบกังหันที่ 0.5 ถึง 1.25 m มีพื้นที่รับลมประมาณ 0.2 ถึง 1.2 m² สามารถให้พลังงานลมมาตรฐานได้ประมาณ 0.004 ถึง 0.25 kW กังหันลมขนาดเล็กเหล่านี้ยังสามารถเป็นแหล่งผลิตพลังงานที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและสังคม อนาคตของกังหันลมขนาดเล็กขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิตและวัดต่อชั่วโมงที่ผลิตได้ (Tummala et al., 2016)

ทบทวนวรรณกรรม

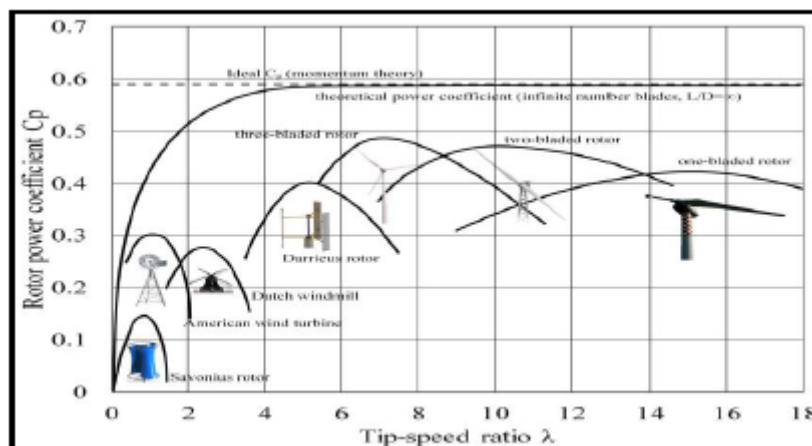
การทดสอบสมรรถนะกังหันลมผ่านการวัดแรงบิด (Torque) สัมประสิทธิ์กำลัง (Cp) และอัตราเร็วปลายใบหรือ Tip Speed Ratio (TSR) เป็นวิธีการมาตรฐานทางวิศวกรรมเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงอากาศพลศาสตร์ของตัวโรเตอร์โดยตรง จากการศึกษาของ Han et al. (2018) ในการออกแบบสร้างและทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมแนวตั้งชนิดใบพัดปิดเกลียวขนาด 100 W เลือกใบกังหันลม Airfoil รุ่น NACA 0018 รัศมีโรเตอร์กังหัน 0.55 m มีความยาวใบ 1.43 m และความยาวคอร์ดของใบ 0.25 m กำหนดให้ค่า Tip Speed Ratio เท่ากับ 1.1 ความเร็วลมทดสอบ 5 ถึง 11 m/s ออกแบบใบกังหันให้ตอบสนองที่ลม 9 m/s และความเร็วกังหัน 170 RPM ทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิธี CFD พบว่ากังหันสามารถผลิตกำลังงานได้ 114.7 W และสัมประสิทธิ์กำลังเท่ากับ 0.16 Sanaye and Farvizi (2024) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมแนวตั้งใบพัดแบบเกลียวมุม 30 องศาเลือกชนิด Airfoil รุ่น NACA 0021 ทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี CFD และ Taguchi จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ามีค่า Tip Speed Ratio 1.33 และค่าสัมประสิทธิ์กำลังเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 0.17 และยังพบว่ากังหันลมแนวแกนตั้งใบพัดแบบเกลียวได้รับความสนใจติดตั้งใช้งานในเขตเมืองเนื่องจากใช้ได้ในทุกทิศทาง ลม เสียงรบกวนต่ำและเริ่มต้นหมุนออกตัวได้ดี Su et al. (2020) ได้ศึกษาทดลองกังหันลมแนวตั้งแบบใหม่ที่มีฟังก์ชันการหมุนและสตาร์ทเอง โดยกังหันลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.55 m และมีความสูง 0.32 m เลือกแอร์ฟอยล์รุ่น DU 93-W-210 ทำการทดสอบที่ความเร็วลม 7.33 ถึง 8.82 m/s พบว่ามีค่า

สัมประสิทธิ์กำลังประมาณ 0.23 โดยมีค่า Tip Speed Ratio 1.2 ถึง 1.5 สำหรับ Ali, Gherissi and Altaharwah (2023) ทำการศึกษาการจำลองกังหันลมแนวตั้งบนตาดฟ้าอาคาร โดยได้ออกแบบกังหันแบบใบตั้งตรงจำนวน 3 ใบ ความยาวใบ 1 m และความยาวคอร์ด 0.3 m เลือก Airfoil รุ่น NACA 0018 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกังหัน 0.72 m ความเร็วลมทดสอบ 3 ถึง 10 m/s ผลการทดลองที่ความเร็วรอบโรเตอร์ที่ 40 ถึง 540 RPM แรงบิด 0.25 ถึง 3.2 Nm มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ระหว่าง 0.09 ถึง 0.45 เมื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น 10 m/s พบค่าสัมประสิทธิ์กำลังลดลงมาเป็น 0.4 ค่ากำลังเชิงกลเริ่มผลิตได้ที่ 1.05 ถึง 180.96 W สามารถสรุปภาพรวมออกมาได้ดังตาราง 1 นี้

ตาราง 1 สรุปภาพรวมการทดสอบกังหันลมแนวแกนตั้งจากการทบทวนวรรณกรรม

นักวิจัย	ชนิดกังหัน	Airfoil	วิธีทดสอบ	ผลการทดสอบ
Han et al. (2018)	ใบพัดเกลียว A=0.88m ²	NACA 0018	CFD	Cp = 0.16, TSR = 1.1, P=114.7W
Sanaye & Farvizi (2024)	ใบพัดเกลียว A=2.27m ²	NACA 0021	CFD&Taguchi	Cp = 0.17, TSR = 1.33
Su et al. (2020)	ใบพัดตรงและเสริมใบพัดย่อย A=0.18m ²	DU 93-W-210	อุโมงค์ลม	Cp = 0.23, TSR = 1.2-1.5
Ali, Gherissi & Altaharwah, (2023)	ใบพัดตรง A=0.72 m ²	NACA 0018	อุโมงค์ลม,CFD	Cp = 0.45, TSR = 1.94, P=1.05-180.96W

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นพบว่าส่วนใหญ่ผู้วิจัยได้วิจัยกับใบกังหันที่มีคุณสมบัติของ Airfoil ที่สมมาตรรุ่น NACA 0018 NACA 0021 และ DU 93-W-210 ที่ให้คุณสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง และเป็นการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และอุโมงค์ลม สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกังหันลมจริงกับอุโมงค์มาตรฐาน พร้อมกันนี้ยังเลือกใบกังหันลมโค้งเล็กน้อยที่มีรูปร่างคล้ายกับ Airfoil รุ่น NACA 6412 ซึ่งจะมีคุณสมบัติให้แรงยกที่สูงกว่าในลมความเร็วต่ำเนื่องจากความโค้งที่สูงของใบซึ่งช่วยเพิ่มแรงบิดในการเริ่มต้นออกตัวหมุนทำให้กังหันหมุนได้ดีกว่าในพื้นที่ลมต่ำ พร้อมกับการบิดเกลียวใบกังหันและหันด้านเข้าออกมารับลม เมื่อพิจารณาข้างต้นพบว่ามีคุณสมบัติเป็นกังหันลมแนวแกนตั้งที่ออกตัวได้ดีสำหรับลมความเร็วต่ำแต่ให้แรงบิดที่สูงจึงเป็นที่มาของการวิจัยในครั้งนี้ นอกจากนี้ยังมีการรวบรวมและสรุปเพิ่มเติมความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง และ Tip Speed Ratio โดย Palomo (2019) ได้ดังภาพ 1



ภาพ 1 ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์กำลังกังหันลม (C_p) และ Tip Speed Ratio (tsr) (Palomo, 2019)

จากภาพ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) และ Tip Speed Ratio (TSR) พบว่ากลุ่มกังหันลมที่ตอบสนองต่อความเร็วลมต่ำค่า Tip Speed Ratio ไม่เกิน 4.0 โดยมีกังหันอยู่สามประเภท ได้แก่กังหันลมแนวแกนตั้งชนิดซาโวเนียส 2 ใบมีค่า Tip Speed Ratio 0.1 ถึง 1.6 และค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 1.5 ถัดมาเป็นกังหันลมแบบอเมริกันแนวแกนนอนชนิดหลายใบมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุด 0.3 และมี Tip Speed Ratio ประมาณ 0.5 ถึง 2.0 ถัดมาเป็นกังหันลมแบบดัตช์ชนิด 4 ใบแนวแกนนอนมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดประมาณ 0.28 และ Tip Speed Ratio ประมาณ 1.5 ถึง 3.6 นอกจากนี้พบกังหันลมประเภทเป็นแนวแกนตั้งชนิดใบตรง 3 ใบซึ่งมีค่า Tip Speed Ratio ค่อนข้างสูง 3.5 ถึง 7.5 และสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ระหว่าง 0.26 ถึง 0.4

สมการที่เกี่ยวข้อง

สมการด้านพลังงานลมสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้ากังหันลมได้ดังนี้ (Manwell, McGowan & Rogers, 2010)

งานที่ได้ต่อหนึ่งหน่วยเวลาเรียกว่ากำลังงานลม (Wind power, P_w)

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

กำลังงานที่ได้จากกังหัน (Power wind turbine, P_t) ซึ่งแสดงเป็นค่ากำลังงานเฉลี่ยของกังหันลม (สำหรับการออกแบบใบกังหันลม)

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \quad (2)$$

ในกรณีที่ต้องการหาค่ากำลังงานที่ได้จากกังหันในรูปของกำลังเชิงกล (Mechanical power, P_m) เมื่อทราบค่าแรงบิด (เพื่อการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) (Hibbeler, 2016)

$$P_m = T\omega \quad \text{เมื่อ} \quad \omega = 2\pi n / 60 \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, c_p) คือ พลังงานที่กังหันลมผลิตได้ต่อพลังงานที่ป้อนให้ และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 0.59 (Betz's limit) ดังนี้

$$c_p = \frac{P_m \text{ or } P_t}{P_w} \quad (4)$$

Tip Speed Ratio (TSR, λ) คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบที่ปลายใบพัดกังหันต่อความเร็วลมที่มาปะทะใบกังหัน

$$\lambda = \frac{\omega r}{v} \quad (5)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่กังหันลมผลิตได้เมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electrical Power)

$$P_{elec} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p \eta \quad (6)$$

โดยที่ ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s) r คือ รัศมีของโรเตอร์กังหันลม (m) v คือความเร็วลม (m/s) ρ คือความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3) A คือพื้นที่กวาดใบกังหันลม (m^2) T คือ แรงบิด (Nm) และ η คือค่าประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ n คือจำนวนรอบการหมุนของโรเตอร์กังหันลม (RPM)

วัตถุประสงค์

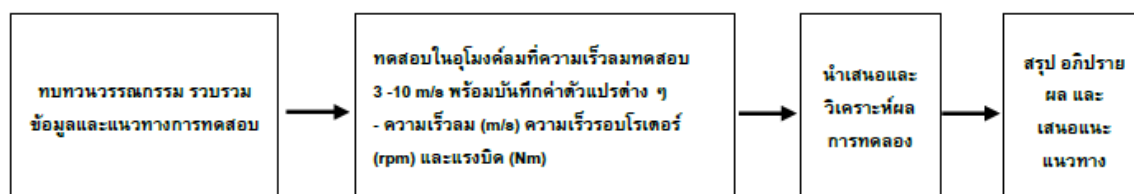
เพื่อศึกษาทดลองในการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้ง ชนิด ใบพัดเกลียวขนาดเล็กภายใต้สภาวะการทำงานที่ระดับความเร็วลมต่ำ ได้แก่ กำลังเชิงกล สัมประสิทธิ์กำลัง และ Tip Speed Ratio

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าและความคุ้มค่าของการจ่ายกำลังงานของกังหันลมเมื่อเทียบกับราคาจำหน่ายในปัจจุบัน
2. เป็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานกับลมธรรมชาติบริเวณที่มีแรงลมเหมาะสม เช่น บริเวณภูเขา ทะเลรวมถึงบนอาคารสูง และลมปล่อยิ่งจากภาคอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพ
3. เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาชุดกังหันลมขนาดเล็กสำหรับความเร็วลมต่ำให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

กรอบแนวคิด

จากการทบทวนวรรณกรรมรวบรวมข้อมูลแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ มีกรอบแนวคิดการวิจัยดังนี้



ภาพ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากกรอบแนวคิดการวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้งขนาดเล็กภายใต้ความเร็วลมที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบในสภาวะควบคุมความเร็วลม 3 ถึง 10 m/s

วิธีดำเนินการวิจัย

เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและข้อมูลต่าง ๆ ตัวแปรในการวิจัย ตัวแปรต้นคือความเร็วลม (m/s) และตัวแปรตาม ได้แก่ ความเร็วรอบโรเตอร์ (RPM) แรงบิด (Nm) ส่วนตัวแปรควบคุม ได้แก่ พื้นที่กวาดของใบกังหันลม มุมใบกังหันลมและอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งการทดสอบนี้จะทำการทดสอบกับอุโมงค์ลมขนาดใหญ่ที่มีการควบคุมปัจจัยแวดล้อม และอัตราการไหลของลมแบบราบเรียบสม่ำเสมอคุณภาพลมที่ได้ค่อนข้างดี กังหันลมที่จะทำการทดสอบนี้หมุ่นได้สองทิศทางการวิจัยนี้จึงได้กำหนดให้ทิศทางการหมุนของกังหันลมทวนเข็มนาฬิกาสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ก่อน นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดของงานวิจัยคือการวัด

แรงบิดจะทำในสภาวะกังหันหยุดนิ่ง โดยเป็นการวัดแรงบิดประเภท Static torque coefficient หรือแรงบิดเริ่มต้น จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลและคำนวณโดยอ้างอิงสมการ (1) ถึง (6) พร้อมการสรุปอภิปรายผลและเสนอแนะโดยมีวิธีการทดสอบ ดังนี้

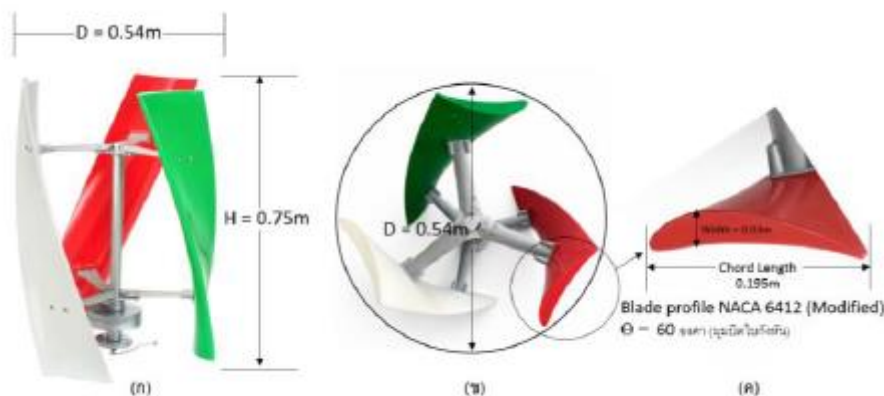
1. การทดสอบหาค่า Tip Speed Ratio โดยทำการทดสอบกังหันลมกับอุโมงค์ลมคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ โดยเริ่มต้นทดสอบที่ความเร็วลม 3 m/s เป็นความเร็วลมแบบปกติ และควบคุมความเร็วลมด้วย VSD จากนั้นทำการบันทึกความเร็วลม (m/s) บันทึกความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลม (RPM) ไปจนถึง 10 m/s แล้วคำนวณค่า Tip Speed Ratio ผ่านสมการ (5) $\lambda = \frac{\omega r}{v}$ เมื่อ $\omega = 2\pi N/60$, r = รัศมีกังหันลม

2. การทดสอบหาค่ากำลังเชิงกล (Mechanical power) ผ่านการวัดแรงบิดที่เพลากังหันลมในสภาวะหยุดนิ่งผ่านประแจวัดแรงบิดดิจิตอลวัดค่าออกมาเป็นนิวตันเมตร (Nm) โดยปรับฟังก์ชันการบันทึกค่าเป็น Peak torque hold ซึ่งขณะทดสอบกังหันลมจะอยู่ในสภาวะหยุดนิ่งและถูกตรึงไว้ด้วยประแจวัดแรงบิด จากนั้นทำการจ่ายลมทดสอบเริ่มต้นความเร็วลม 3 m/s ทำการบันทึกค่าความเร็วลมและแรงบิด เพิ่มความเร็วลมขึ้นไปทีละขั้นและบันทึกค่าไปจนถึง 10 m/s ซึ่งแรงบิดที่วัดได้นี้จะเป็นแรงบิดที่ใบกังหันลมผลิตขึ้นต่อความเร็วลมที่มากกระทำ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่ากำลังเชิงกลผ่านสมการ (3) $P_m = T\omega$ เมื่อ T คือแรงบิด (Nm) ที่วัดได้ และ ω คือค่าที่คำนวณได้จากการทดสอบความเร็วรอบโรเตอร์ข้างต้น

3. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ผ่านสมการ (4) $C_p = \frac{P_m}{P_w}$ ซึ่ง P_w คือกำลังลม (Wind power) สามารถหาได้ผ่านสมการ (1) $P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3$

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. กังหันลมแนวแกนตั้งชนิดใบพัดบิดเกลียวชนิด 3 ใบประเภทดาร์เรียมส์ พื้นที่กวาดใบ 0.4 m² เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.54 m ความยาว 0.75 m และความยาวของคอร์ดใบ 0.195 m ระบบส่งกำลังเป็นการส่งกำลังตรงไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไม่ผ่านชุดเกียร์



ภาพ 3 (ก) รูปด้านหน้ากังหันลม (ข) รูปด้านบนกังหันลม (ค) คุณสมบัติใบกังหันลม

2. เครื่องวัดความเร็วลมชนิดลูกถ้วย 3 ใบ ย่านการวัด 0 - 12 m/s Accuracy ± 56 m/s ($\pm 2\%$) ความเร็วลมเริ่มต้น < 0.7 m/s Output voltage 0 - 800Hz ที่ความเร็วลม 0 - 56 m/s อุณหภูมิในการทำงาน -30 ถึง 65 องศาเซลเซียส และจอแสดงผลแบบดิจิตอล



ภาพ 4 เครื่องมือวัดความเร็วลมชนิดลูกถ้วยสามใบพร้อมจอแสดงผลแบบเรียลไทม์

3. เครื่องมือวัดความเร็วรอบ ย่านการวัด 0 - 1,500 RPM Power supply 90 - 265 Vac มี Dc Output 12V/100mA max และ Input method proximity sensor ชนิด NPN มีค่า Response time settable 0.1ms to 99.9ms และ จอแสดงผล Display 4-digit red LED



ภาพ 5 เครื่องมือวัดความเร็วรอบ (Proximity sensor) พร้อมจอแสดงผลแบบเรียลไทม์

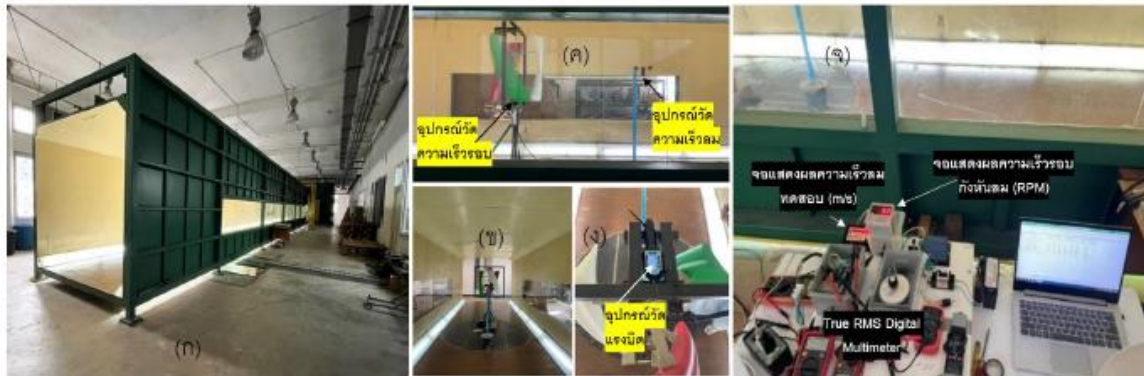
4. ประแจวัดแรงบิดดิจิตอล 0 - 10 Nm. ย่านการวัด 0.3 - 10 Nm. Resolution 0.01 Nm. Accuracy $\pm 2\%$ (Clockwise) และ $\pm 2.5\%$ (Counter-clockwise)



ภาพ 6 เครื่องมือวัดแรงบิด Digital Torque Wrench (Realtime and Peak torque hold)

5. ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลม ซึ่งเป็นอุโมงค์ลมชั้นบรรยากาศ (Boundary layer wind tunnel) ขนาดหน้าตัด (Test section) กว้าง 2.5 m สูง 2.5 m และความยาวช่วงทดสอบ 25.5 m ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 150 Hp และควบคุมความเร็วรอบด้วย VSD ปรับความเร็วลมสูงสุดได้ 0 ถึง 20 m/s และเป็นประเภทอุโมงค์ลมแบบวงจรเปิด

จากรายการอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ข้างต้นได้นำมาติดตั้งเพื่อทำการทดสอบดังภาพ 7 นี้



ภาพ 7 อุปกรณ์เครื่องมือและเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย

ภาพ 7 แสดงรายการอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยดังนี้ (ก) ภาพอุโมงค์ลมธรรมชาติ-AIT (ข) ภาพรวมกังหันลมติดตั้งภายในอุโมงค์ลม (ค) อุปกรณ์วัดความเร็วรอบและวัดความเร็วลม (ง) อุปกรณ์วัดแรงบิด (จ) จอแสดงผลความเร็วลมทดสอบ ความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลม และดิจิตอลมัลติมิเตอร์

ผลการวิจัย

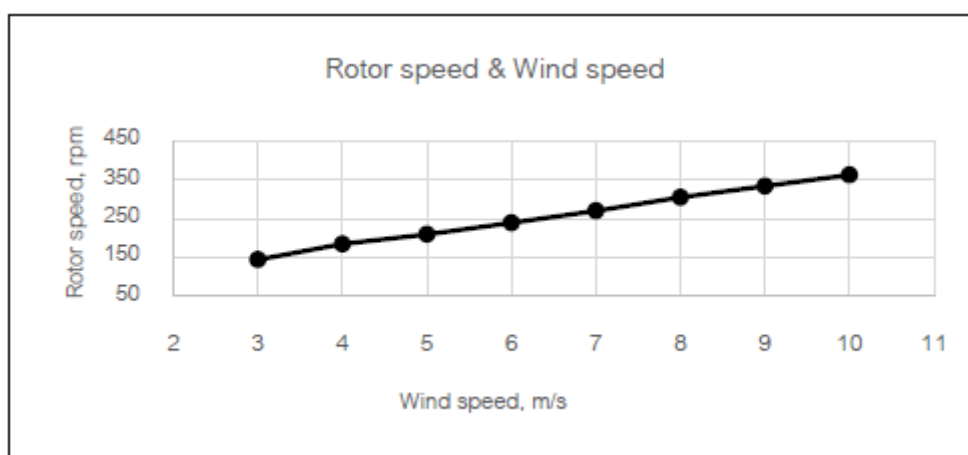
ในการวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะซึ่งเป็นการประเมินความสามารถในการแปลงพลังงานจลน์ของลมเป็นพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าของกังหันลม โดยอาศัยตัวแปรหลัก ๆ ได้แก่ กำลัง (Power) แรงบิด (Torque) ความเร็วรอบ (RPM) Tip Speed Ratio (TSR) และค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) โดยคำนวณตามสมการ (3) (4) (5) และ (6) ดังแสดงในตาราง 2 ดังนี้

ตาราง 2 ภาพรวมผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ความเร็วลม (m/s)	3	4	5	6	7	8	9	10
ความเร็วรอบโรเตอร์ (RPM)	143	184	209	239	270	305	334	363
ความเร็วเชิงมุม / ω (rad/s)	15	19	22	25	28	32	35	38
แรงบิดที่เพลากังหัน / Shaft Torque (Nm)	0.14	0.25	0.39	0.51	0.98	1.02	1.06	1.24
กำลังเชิงกล / Mechanical Power (W)	2.1	4.81	8.6	12.7	27.6	32.7	37.2	47.2
Tip Speed Ratio (TSR)	1.30	1.25	1.14	1.08	1.05	1.04	1.01	0.99
สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p)	0.32	0.31	0.28	0.24	0.33	0.26	0.21	0.19
กำลังไฟฟ้า / Electric Power ($\eta=0.9$)	1.89	4.33	7.70	11.42	24.82	29.42	33.44	42.47

จากตาราง 2 แสดงภาพรวมผลการทดสอบและการวิเคราะห์ พบว่ากังหันลมมีความสอดคล้องกับหลักอากาศพลศาสตร์โดยความเร็วรอบโรเตอร์แปรผันตามความเร็วลม และแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมยกกำลังสอง กำลังเชิงกลที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกำลังสามของความเร็วลมโดยมีความสามารถในการผลิตกำลังเชิงกลสูงสุดตั้งแต่ 2.1 W ถึง 47.2 W (กำลังไฟฟ้า 1.89 W ถึง 47.2 W) ค่าสัมประสิทธิ์กำลังระหว่าง 0.19 ถึง 0.33 ค่า Tip Speed Ratio ประมาณ 0.99 ถึง 1.3 โดยสามารถอธิบายเพิ่มเติมดังนี้

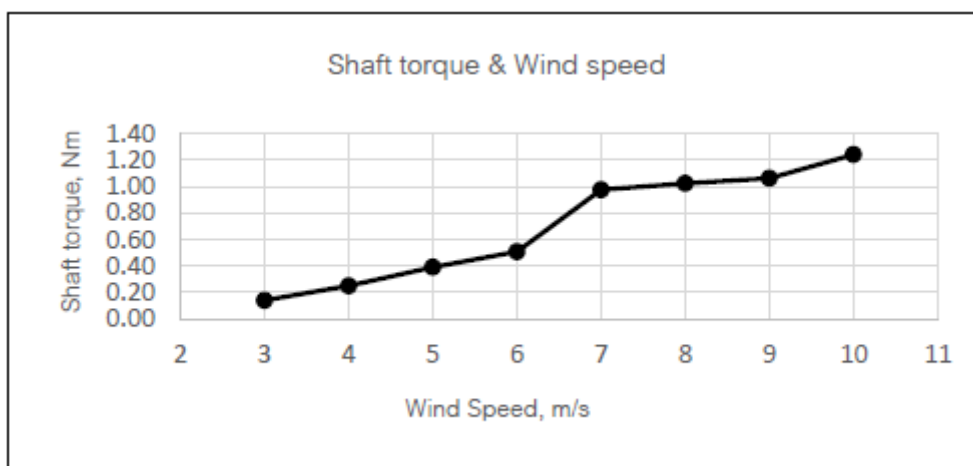
1. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลมต่อความเร็วลม



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลมต่อความเร็วลม

จากภาพ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลมและความเร็วลม ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบโรเตอร์กังหันลมเพิ่มขึ้นตามความเร็วลมในลักษณะเชิงเส้นค่อนข้างคงที่และมีเสถียรภาพดีในช่วงความเร็วลมทดสอบ โดยที่ความเร็วลม 3 m/s มีค่าความเร็วรอบโรเตอร์ที่ 143 RPM เมื่อเพิ่มความเร็วลมขึ้นไปหนึ่งหน่วยเป็น 4 m/s ความเร็วรอบโรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 184 RPM

2. ผลการทดสอบแรงบิดเพลากังหันลมต่อความเร็วลม



ภาพ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลากังหันลมต่อความเร็วลม

จากภาพ 9 ผลจากการทดสอบพบว่าแรงบิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสามารถความเร็วลมโดยแบ่งพฤติกรรมออกเป็น 3 ช่วงหลัก ๆ ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงความเร็วลมต่ำ (3 ถึง 6 m/s) แรงบิดเพิ่มขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไปจาก 0.14 เป็น 0.51 Nm มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงเชิงเส้นแสดงถึงช่วงเริ่มต้นที่แรงยกบนใบพัดยังไม่สูงมาก

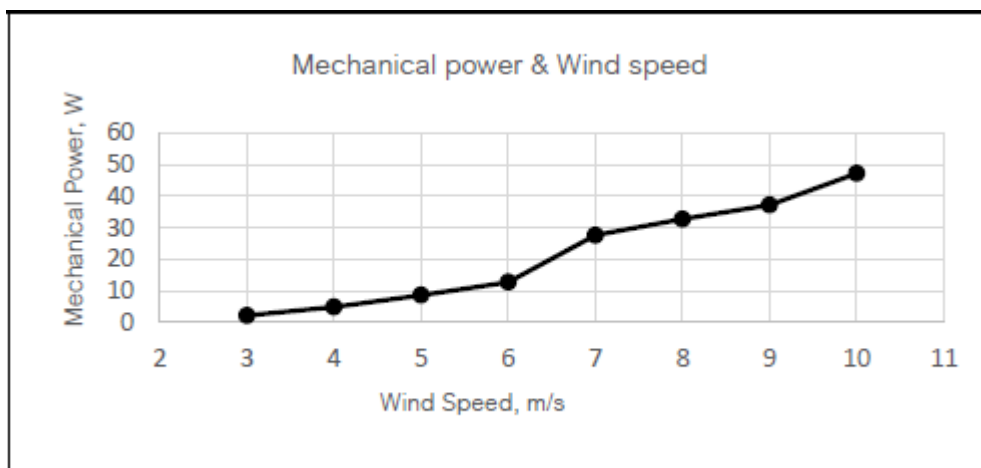
ช่วงที่ 2 เป็นช่วงจุดเปลี่ยนผ่าน (6 ถึง 7 m/s) พบการเพิ่มขึ้นของแรงบิดอย่างมีนัยสำคัญจาก 0.51 ไปเป็น 0.98 Nm ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเกือบ 92 เปอร์เซ็นต์ พฤติกรรมนี้อาจเกิดจากใบพัดเข้าสู่ช่วงมุมประทะ (Angle of attack) ที่เหมาะสมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Lift coefficient) เพิ่มขึ้นถือเป็นช่วงที่กังหันลมเข้าสู่การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูง (หรืออาจเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของใบกังหันที่มีการประกอบให้มีการหมุนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาซึ่งจะต้องวิจัยเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป)

ช่วงที่ 3 ความเร็วลมสูง (7 ถึง 10 m/s) แรงบิดยังเพิ่มขึ้นจาก 0.98 ไป 1.24 Nm มีแนวโน้มชะลอการเติบโตสังเกตได้จากกราฟที่มีลักษณะเริ่มมีความชันลดลงเล็กน้อย

ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแรงบิดของกังหันลมเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม โดยมีพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นบางช่วงสอดคล้องกับกำลังลมที่แปรผันตามกำลังสามของความเร็วลม กล่าวโดยสรุปกังหันลมนี้เริ่มเข้าสู่ประสิทธิภาพสูงที่ความเร็วลมประมาณ 6 ถึง 7 m/s

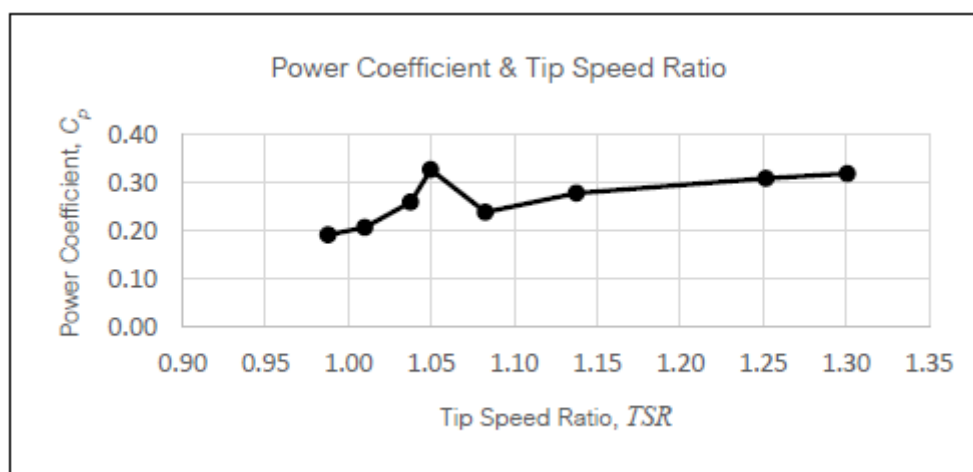
3. ผลการวิเคราะห์กำลังเชิงกล Tip Speed Ratio (TSR) และสัมประสิทธิ์กำลัง (Cp)

การวิเคราะห์กำลังเชิงกลกังหันลมเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานลมไปเป็นแรงบิดในแกนหมุนของเพลากังหันลม ผลที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังเชิงกลนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพกังหันลมจากความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์กำลังและ Tip Speed Ratio การวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรเหล่านี้ด้วยสมการ (3) (4) และ (5) ดังนี้



ภาพ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเชิงกล (Mechanical Power) ต่อความเร็วลม

จากภาพ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเชิงกล (Mechanical Power) ต่อความเร็วลม พบว่า กำลังเชิงกลเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกำลังสามของความเร็วลม มีความสามารถผลิตกำลังงานตั้งแต่ 2.1 W ไปจนถึง 47.2 W นอกจากนี้จะเห็นว่าช่วงความเร็วลมที่ 6 m/s ไปที่ 7 m/s จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงกว่าปกติแสดงถึงช่วงความเร็วลมที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ดี สำหรับกังหันลมนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ระหว่าง 0.19 ถึง 0.33 และ Tip Speed Ratio อยู่ในช่วงประมาณ 0.99 ถึง 1.3 สาเหตุส่วนหนึ่งอาจเกิดจากทดสอบกังหันลมแบบสภาวะหยุดนิ่งซึ่งเป็นข้อจำกัดของการวิจัยนี้ ลมที่มาปะทะกับองศาของใบขณะนั้นอาจสร้างแรงบิดที่ดี อธิบายเพิ่มเติมได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังภาพ 11



ภาพ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) และ Tip Speed Ratio (TSR)

จากภาพ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) และ Tip Speed Ratio (TSR) สามารถอธิบายได้ว่าเป็นกังหันลมที่ออกตัวได้ดีในช่วงลมความเร็วต่ำพบว่ามีแรงบิดเริ่มต้นที่ดี

(High starting torque) เกิดขึ้นในช่วง Tip Speed Ratio ใกล้ 1.0 แต่มีปัญหาเรื่องการไหลของอากาศที่ไม่เสถียรในช่วง Tip Speed Ratio 1.05-1.10 เลยส่งผลให้ประสิทธิภาพการสกัดพลังงานลมลดลงชั่วคราว

สรุปผลการวิจัย

กังหันลมผลิตกำลังเชิงกลได้ที่ 2.1 W ถึง 47.2 W หรือเทียบเท่าการผลิตกำลังไฟฟ้าได้ที่ 1.89 W ถึง 42.47 W ค่าประสิทธิภาพหรือสัมประสิทธิ์กำลัง 0.19 ถึง 0.33 ค่า Tip Speed Ratio หรืออัตราส่วนความเร็วปลายใบต่อความเร็วลมอยู่ระหว่าง 0.99 ถึง 1.30 และพบจุดที่เหมาะสมที่สุดคือช่วงความเร็วลมประมาณ 7 m/s ซึ่งเป็นช่วงค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดโดยให้ค่ากำลังเชิงกลเท่ากับ 27.6 W หรือกำลังไฟฟ้าที่ 24.82 W ซึ่งเป็นสถานะที่ประสิทธิภาพสูงสุดของระบบ นอกจากนี้พบว่ากังหันลมจัดอยู่ในประเภทกังหันความเร็วลมต่ำประสิทธิภาพดีกว่ากังหันลมแนวแกนตั้งชนิดซาร์โวนีเยสแบบดั้งเดิมซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์กำลังประมาณไม่เกิน 0.15 หรือกล่าวได้ว่าเป็นกังหันลมแนวแกนตั้งประเภทให้แรงบิดสูงทำงานที่ความเร็วต่ำ

อภิปรายผล

จากผลการทดสอบสมรรถนะสามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถผลิตกำลังเชิงกล (Mechanical power) สามารถนำมาอธิบายการผลิตพลังงานของกังหันลมที่แท้จริงได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปกำลังงานเชิงกลและสามารถประมาณการค่ากำลังงานทางไฟฟ้าได้ผ่านประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยกำลังเชิงกลนี้ได้จากการวัดวิเคราะห์แรงบิดที่กังหันลมผลิตขึ้นในแต่ละความเร็วลมทดสอบ ผลที่ได้จากการวัดค่ากำลังเชิงกลของกังหันลมพื้นที่กวาดใบ 0.4 m² ที่ความเร็วลม 10 m/s มีค่าสูงสุดประมาณ 47 W และหากนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ 0.90 มาทำการติดตั้งเข้ากับชุดกังหันลมนี้ พบว่าจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 42.47 W ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Han et al. (2018) พบว่ากังหันแนวแกนตั้งชนิดใบปิดเกลียวใบกังหันชนิดต่างกันพื้นที่ที่มีกวาดใบ 0.88 m² ทดสอบที่ความเร็วลม 11 m/s ได้กำลังเชิงกลสูงสุด 114.7 W นอกจากนี้พบว่าผลิตพลังงานได้น้อยกว่าเมื่อเทียบสัดส่วนขนาดของพื้นที่กวาดใบกังหันของ Ali, Gherissi and Altaharwah (2023) ที่เป็นกังหันลมแนวตั้งชนิดใบตรง (ปกติกังหันลมแนวตั้งใบตั้งตรงจะมีประสิทธิภาพสูงให้ค่าพลังงานสูงตามการรายงานของ Palomo, 2019)

2. ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (c_p) และค่า Tip Speed Ratio (TSR) โดยกังหันลมนี้มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ในช่วงระหว่าง 0.19 ถึง 0.33 และมีค่า Tip Speed Ratio ระหว่าง 0.99 ถึง 1.3 ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพหรือสัมประสิทธิ์กำลังดีกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Sanaye and Armin Farvizi (2024) Han et al. (2018) และ Su et al. (2020) ที่พบค่าสัมประสิทธิ์กำลังอยู่ระหว่าง 0.16 ถึง

0.23 และมีค่า Tip Speed Ratio ระหว่าง 1.1 ถึง 1.5 นอกจากนี้ยังพบว่าที่ Tip Speed Ratio 1.05 มีค่าประสิทธิภาพหรือสัมประสิทธิ์กำลังสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับแรงบิดที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่วัดได้ขณะทำการทดสอบ กังหันลมนี้จัดอยู่ในประเภทกังหันลมความเร็วต่ำประเภทดาร์เรียม (ทำงานโดยอาศัยแรงยก) มีค่าสัมประสิทธิ์กำลังที่สูงกว่ากังหันลมแนวแกนตั้งประเภทซาโวเนียสชนิดสองใบพัด โกลีเคียงกังหันลมแบบดัตช์และแบบอเมริกัน แต่จะน้อยกว่ากังหันลมประเภทดาร์เรียมแนวแกนตั้งชนิดใบตั้งตรงชนิดสามใบที่ทาง Palomo (2019) ที่ได้ระบุไว้ งานวิจัยนี้ค้นพบเพิ่มเติมคือค่า Tip Speed Ratio ที่ต่ำข้อดีคือขณะทำงานจะมีเสียงรบกวนน้อยมีความเหมาะสมในการใช้งานที่ลมความเร็วต่ำได้ดีและเหมาะสมกับหลายพื้นที่

ข้อเสนอแนะ

การนำไปใช้งาน

1. เลือกเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดความเร็วต่ำและประสิทธิภาพสูง เพื่อให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของกังหันลมความเร็วต่ำนี้
2. กังหันลมนี้ทำงานได้ดีที่ความเร็วลมประมาณ 7 m/s สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในพื้นที่ที่มีความเร็วลมที่คงที่ เช่น ลมที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่วนสำหรับ เรือ อาคารสูงหรือพื้นที่สูงต่าง ๆ ความสามารถในการผลิตพลังงานของกังหันลมก็จะขึ้นอยู่กับความเร็วลมในขณะใช้งาน
3. ควรใช้คู่กับ MPPT ในการจ่ายโหลดและตั้งค่าให้อยู่ในช่วง Tip Speed Ratio ประมาณ 1.05 ถึง 1.20 หรือใช้วิธีการควบคุมโหลดแบบฟuzzyฟัลส์วิดโมดูละชันแบบเรียลไทม์ โดยวิธีนี้ใช้การเปิด-ปิดสวิตช์เพื่อควบคุมประสิทธิภาพของของกังหันลมให้ดียิ่งขึ้น

การวิจัยครั้งต่อไป

1. ทดลองประกอบกังหันลมใหม่ให้หมุนต่างจากทิศทางเดิม (ให้หมุนตามเข็มนาฬิกา) แล้วทำการทดลองซ้ำอาจจะทำให้ได้ค่าการผลิตพลังงานใหม่
2. ออกแบบวิธีการวัดแรงบิดผ่าน Torque meter ที่วัดค่าได้ขณะกังหันลมหมุนสามารถแสดงค่าแรงบิดได้ละเอียดขึ้น ซึ่งจะสามารถนำมาศึกษาพฤติการณ์การเกิด Dynamic stall และ Tip loss ได้เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2566). รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาทบทวนศักยภาพและปรับปรุงแผนที่พลังงานลมของประเทศไทย. <https://kc.dede.go.th/project-view-file.aspx?p=2386>.

- จารุวรรณ ตั้งต้นสกุลวงศ์ และทวิช จิตรสมบุรณ์. (2552). *ความสามารถในการเริ่มต้นหมุนด้วยตนเองของ กังหันลมแกนตั้ง*. ใน มานพ เรื่องศิริวัฒนกุล (บ.ก.), การจัดการและเทคโนโลยีพลังงาน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 (ETM-033234). ภาค วิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. <https://eng.sut.ac.th/research/2015/upload/report/report53.pdf>.
- วชิระ พุทธแจ่ม (2565). *นวัตกรรมกังหันลมแกนนอนขนาดเล็กแบบไร้เพลาลำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าจากระบบลมระบายอุตสาหกรรม*. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทชั้นปริญญาตรีบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 6 2 9 1 . <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6291>.
- วิรัช โอรยรินทร์. (2548). การออกแบบกังหันลม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมนกค,* 3(5), 27-35. <https://repository.rmutt.ac.th/dspace/handle/123456789/1714>.
- Ali, M., Gherissi, A., & Altaharwah, Y. (2023). Experimental and simulation study on a rooftop vertical-axis wind turbine. *Open Engineering*, 13(1), Article 20220465. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0465>.
- Han, D., Heo, Y. G., Choi, N. J., Nam, S. H., Choi, K. H., & Kim, K. C. (2018). Design, fabrication, and performance test of a 100-W helical-blade vertical-axis wind turbine at low tip-speed ratio. *Energies*, 11(6), Article 1517. <https://doi.org/10.3390/en11061517>.
- Hibbeler, R. C., (2016). *Engineering mechanics: Dynamics*. (14th ed.). Pearson Prentice Hall. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292088785_A26856513/preview-9781292088785_A26856513.pdf.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explain: Theory, design and application*. (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119994367>.
- Palomo, R. E. Q. (2019). *Operation and faults analysis of energy-saving permanent magnet synchronous generator for small wind turbine*. [Doctoral dissertation, Wroclaw University of Science and Technology]. Wroclaw. https://dbc.wroc.pl/Content/74201/palomo_operations_PhD.pdf.
- Sanaye, S., & Farvizi, A. (2024). Optimizing a vertical axis wind turbine with helical blades: Application of 3D CFD and Taguchi method. *Energy Reports*, 12(2024), 2527-2547. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.059>.

- Su, H., Dou, B., Qu, T., Zeng, P., & Lei, L. (2020). Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function. *Energy Conversion and Management*, 217(2020), Article 113012. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113012>.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraj, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56(2016), 1351-1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>.