

เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมแนวแกนตั้ง OPTIMIZATION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE TECHNIQUES

วรพันธุ์ สมบัติธีระ*, ชูชาติ ผาระนัต

Worraphan Sombuttera*, Chuchat Pharanat

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม อ.เมือง จ.มหาสารคาม ประเทศไทย 44000

Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham University, Muang, Maha Sarakham, Thailand, 44000

*Corresponding author e-mail: worraphan_s@hotmail.com

วันที่เข้าระบบ 3 มิถุนายน 2564

วันที่แก้ไขบทความ 29 กันยายน 2564

วันที่ตอบรับบทความ 30 กันยายน 2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมแนวแกนตั้ง โดยใช้ล้อย่อยสะสมพลังงาน มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างกังหันลมแนวแกนตั้งที่ทำงานร่วมกับล้อย่อยแรงสะสมพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใบกังหันลมแนวแกนตั้งออกแบบใบกังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก ชนิดใบกังหันบันกิ (กรงกระรอก) จำนวน 8 ใบ ล้อย่อยแรงสะสมพลังงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร หนัก 6 กิโลกรัม ทำการทดลองที่ความเร็วลม 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในการทดลองที่ 1 ไม่ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การทดลองที่ 2 ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการทดลองที่ 3 ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดไฟฟ้า จากการเปรียบเทียบกังหันลมทั้งสองตัว สรุปได้ว่ากังหันลมตัวที่มีล้อย่อยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 32

คำสำคัญ: กังหันลม, ล้อย่อยแรงสะสมพลังงาน, พลังงานลม

Abstract

This research, regarding to the technical to increasing efficiency of the vertical axis wind turbine by using the flywheel energy storage. The objective was designed and created of the vertical axis wind turbine which were worked together with the flywheel energy storage for the purpose of increased efficiency of the generate electricity. By means of using the vertical axis wind turbine for the wind turbine blades driven by lifting force designed, Bangi turbine blade type (Squirrel cage) amount of 8 pieces. The size of the flywheel energy storage was diameter 30 cm weight 6 kg with wind speed testing 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 and 4.0 m/second as the respective as the following: The first testing: did not the generator. The second testing: did the generator. The third testing: did the generator and the electric load. The similitude, both of the wind turbine concluded that the wind turbine which got the flywheel energy storage was the best efficiency of the average 32 %.

Keywords: Wind turbines, Flywheel energy storage, Wind energy

1. บทนำ

พลังงานลม เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ มนุษย์เราได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานลมมานานหลายพันปี ในการอำนวยความสะดวกสบายแก่ชีวิต เช่น การแล่นเรือใบขนส่งสินค้าไปได้ไกลๆ การหมุนกังหันวิดน้ำ การหมุนโม่หินบดเมล็ดพืชให้เป็นแป้ง ในปัจจุบันมนุษย์จึงได้ให้ความสำคัญและนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยการนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป ไม่ต้องซื้อ เป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสภาพแวดล้อม และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น (Boyle, 1996)

กังหันลม คือ เครื่องจักรกลอย่างหนึ่งที่สามารถรับและแปลงพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมให้เป็นพลังงานกลได้ และนำพลังงานกลมาใช้ในการสูบน้ำโดยตรง หรือผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า การพัฒนากังหันลมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ กังหันลมเริ่มมีมาตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณจนถึงยุคปัจจุบัน โดยการออกแบบกังหันลมต้องอาศัยความรู้ทางด้านพลศาสตร์ของลมและหลักวิศวกรรมศาสตร์ในแขนงต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังงาน พลังงาน และประสิทธิภาพสูงสุด (Koochi-Fayegh & Rosen, 2020) ชนิดของกังหันลมโดยทั่วไปกังหันลมแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามแกนหมุนของกังหันลม คือ กังหันลมแกนหมุนแนวนอน เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ โดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากกับแรงลม มีข้อดี คือ แรงบิดที่ได้ไม่สม่ำเสมอ สามารถสร้างใบให้ได้เปรียบทางกลศาสตร์ได้ง่าย ข้อเสีย คือ ต้องใช้ใบบังคับทิศทาง มีการยืดเสาทีสูง กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง เป็นกังหันลมที่มีแกน

หมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทางมีข้อดี สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง (Burton *et al.*, 2001) ไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้หันหน้าเข้าหาลม การออกแบบใบ การสร้างเสาของกังหันลม ประหยัดและไม่ซับซ้อน ต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบได้สะดวก การซ่อมบำรุงทำได้ง่าย เพราะสามารถติดตั้งกับพื้นดินได้ ข้อเสียมีเพียงด้านเดียวเท่านั้นที่ใบพัดสามารถรับลมได้ ใบพัดมีขนาดใหญ่ และหนัก ไม่เป็นที่นิยมนำมาผลิตไฟฟ้า (Andrew & Daniel, 2020)

จากการศึกษาคุณสมบัติกังหันลมทั้งสองแบบ จึงได้นำเอาข้อดีและข้อเสียของกังหันลมทั้งสองแบบมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่ากังหันลมที่มีแกนหมุนแนวนอนนั้น จะมีความเร็วรอบสูง แต่แรงบิดต่ำ และต้องมีทางเพื่อบังคับให้ด้านหน้าของกังหันลม เข้ารับลมในทิศทางที่มีกระแสลมพัดมา ส่วนกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง?

จะสามารถรับลมได้ทุกทิศทางไม่ต้องมีทางเสื่อคอยบังคับทิศทางเหมือนกังหันลมที่มีแกนหมุนแนวนอน แต่มีความเร็วรอบต่ำ มีแรงบิดที่สูง สามารถนำไปสูบน้ำได้ดี (Jangsawang, 2008)

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง โดยได้นำเอาล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน มาประยุกต์ใช้กับกังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง คาดการณ์ว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมุนได้ในระยะเวลานานขึ้น เพื่อให้ได้กังหันลมแกนหมุนแนวตั้ง ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

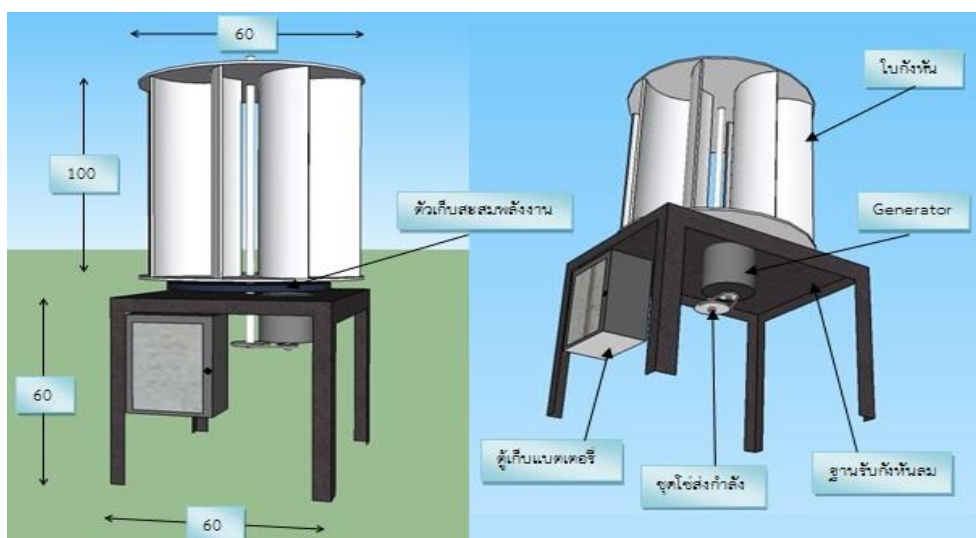
2.1 ออกแบบและสร้างกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งร่วมกับล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน

2.2 เพื่อทำการทดลองผลและหาประสิทธิภาพของกังหันลมแกนหมุนแนวตั้งร่วมกับล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบ ในการจะเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแนวแกนตั้ง การออกแบบกังหันลมแบบกรงกระรอกสามารถหมุนด้วยแรงยก ที่เป็นเช่นนี้ก็สอดคล้องกับทฤษฎีของ Boyle (1996) ที่กล่าวว่ากังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยกเป็นกังหันลมแบบนี้จะให้ความเร็วรอบสูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ที่จะทำหน้าที่สะสมพลังงานจลน์จากการหมุน จะช่วยให้กังหันลมสามารถหมุนได้เร็วและระยะเวลานานขึ้น โดยใบพัดลักษณะกรงกระรอก (Bouras & Kouzi, 2017) มีจำนวน 8 ใบ โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมทำเป็นใบพัดเพราะมีน้ำหนักเบา ล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร หนัก 6 กิโลกรัม โดยจะทำการสร้างกังหันลมจำนวน 2 เครื่อง

โดยตัวหนึ่งจะมีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน อีกตัวหนึ่งไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ทำการทดสอบเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 1 การออกแบบกังหันลมแนวแกนตั้งร่วมกับล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน

3.2 การออกแบบการทดลอง ได้มีการตั้งสมมติฐานไว้ ล้อช่วยแรงสะสมพลังงานจะสะสมพลังงานจากการหมุนของกังหันลม ทำให้หมุนได้ระยะเวลายาวนานขึ้น กังหันลมเป็นต้นกำลังในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วได้กำลังไฟฟ้าออกมาไม่ต่ำกว่า 5 วัตต์ การทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ

3.2.1 การทดลองที่ 1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานและที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน โดยไม่ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.2 การทดลองที่ 2 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานและที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน โดยต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3.2.3 การทดลองที่ 3 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานและที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน โดยการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดไฟฟ้าที่เป็นหลอดแอลอีดี

ทั้ง 3 การทดลอง ทดลองที่ความเร็วลม 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตรต่อวินาที หาค่าเฉลี่ยของค่าที่บันทึกในแต่ละช่วงเวลาเพื่อนำข้อมูลไปลงในกราฟ การทดสอบการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าร่วมกับล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน จากนั้นทำการวัดค่าความเร็วรอบของกังหันลม ระยะเวลาที่กังหันลมหมุน วัดแรงดันไฟฟ้า วัดกระแสไฟฟ้า โดยจะทำการบันทึกค่าที่ค่าต่าง ๆ ทุก 15 วินาที ลำดับในการทดลองมีดังนี้

(1) เตรียมกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน การทดลองในห้องที่ลมเข้าไม่ได้ ติดแผ่นมาร์คที่กังหันลม เพื่อวัดรอบของแกนเพลากังหันลม

(2) นำพัดลมอุตสาหกรรม มาเปิดแล้วขยับพัดลมหาความเร็วลมให้ได้ 4, 6, 8, 10 และ 12 เมตรต่อวินาที โดยเปิดทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที

(3) ทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน กรณีที่ไม่มีการต่อโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บันทึกความเร็วรอบของกังหันลมขณะไม่มีโหลดมาต่อ บันทึกความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ

(4) ทดสอบประสิทธิภาพกังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน กรณีที่มีการต่อโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยต่อโหลดแอลอีดี ขนาด 12 โวลต์ บันทึกความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

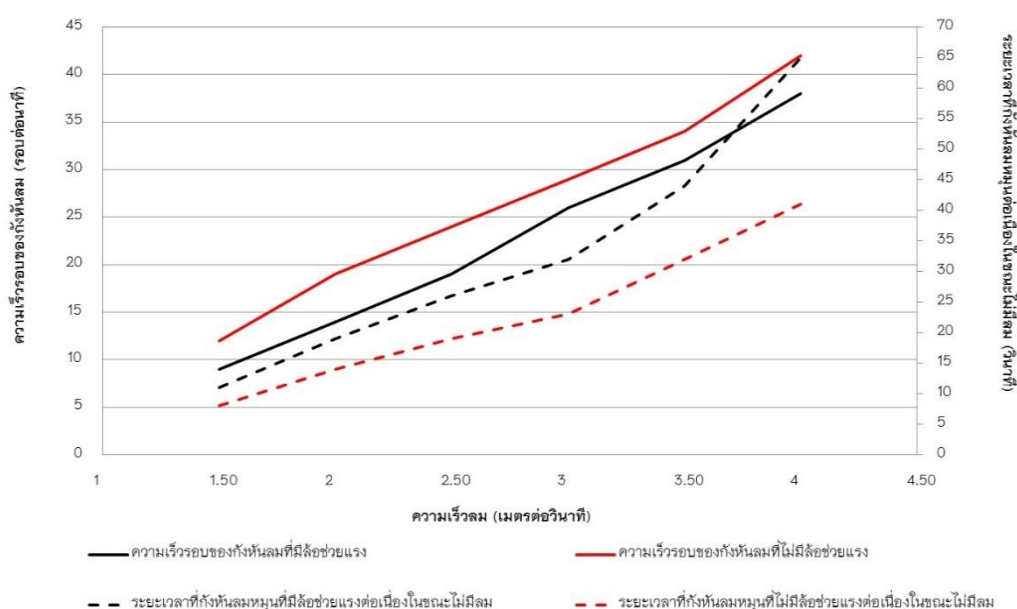


ภาพที่ 2 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน(ขวา)
และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน(ซ้าย)

4. ผลการวิจัย

การทดลองที่ 1 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 38 รอบต่อวินาที และในกรณีที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 65 วินาที กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 42 รอบต่อ

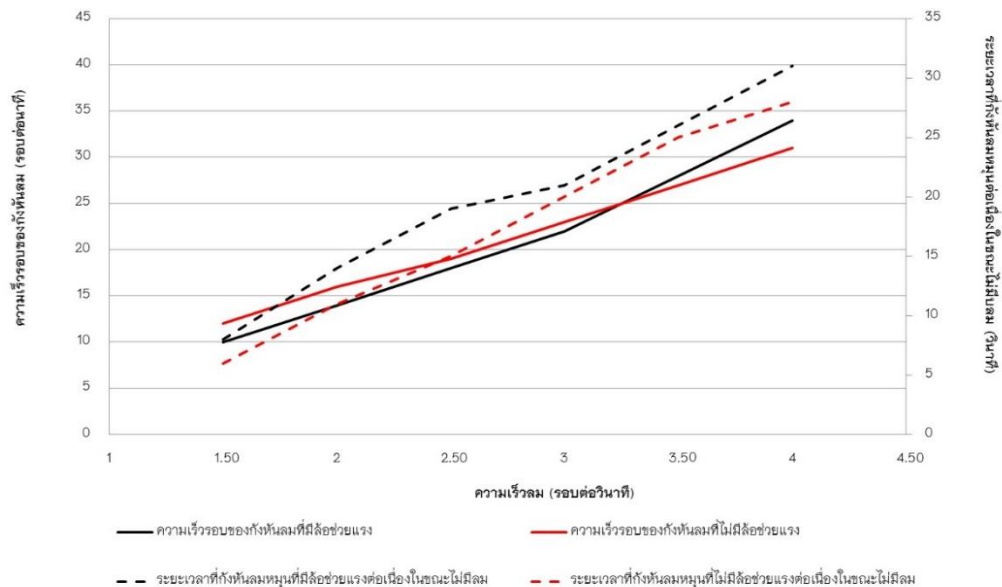
นาที่ และในขณะที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 41 วินาที จากการเปรียบเทียบกังหันลมทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าความเร็วรอบของกังหันลมที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานมีความเร็วรอบที่มากกว่ากังหันลมที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน เนื่องจากขณะที่กังหันลมหมุน ล้อช่วยแรงจะทำการสะสมพลังงานจากการหมุนทำให้ความเร็วของกังหันที่มีล้อช่วยแรงหมุนได้ช้ากว่า แต่กังหันลมที่มีล้อช่วยแรงจะสามารถหมุนได้ต่อเนื่องจากล้อช่วยแรงทำปถ่ายพลังงานที่สะสมจากการหมุน โดยกังหันลมตัวที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพดีกว่าเท่ากับร้อยละ 44 ของตัวที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3



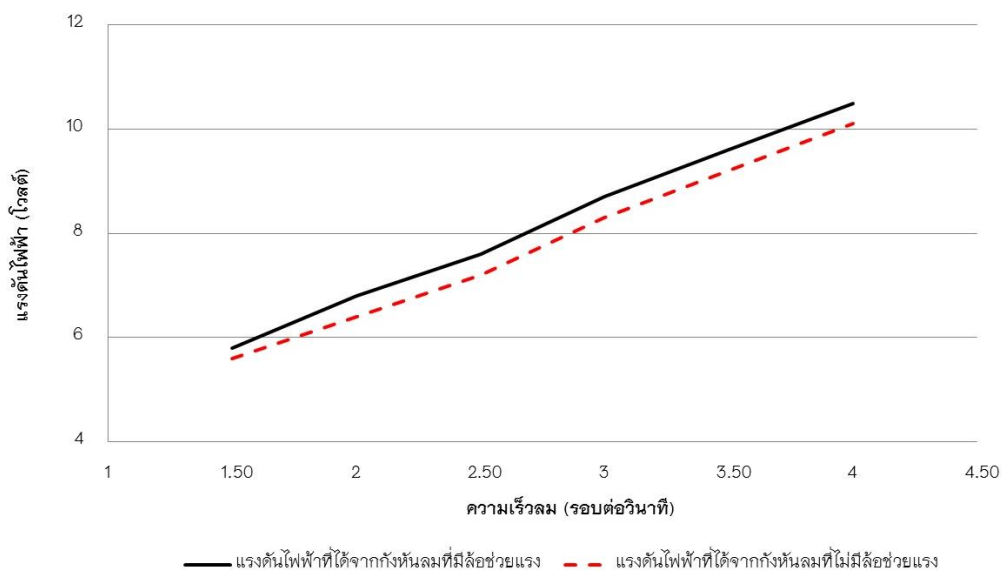
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ขณะไม่ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดลองที่ 2 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 34 รอบต่อวินาที ได้แรงดันไฟฟ้า 10.50 โวลต์ และในขณะที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสะสมพลังงานสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 31 นาที กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 31 รอบต่อวินาที ได้แรงดันไฟฟ้า 10.10 โวลต์ และในขณะที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 28 วินาที จากการเปรียบเทียบกังหันลมทั้งสองแบบ สรุปได้

ว่ากังหันลมตัวที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับ ร้อยละ 75 ของตัวที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5

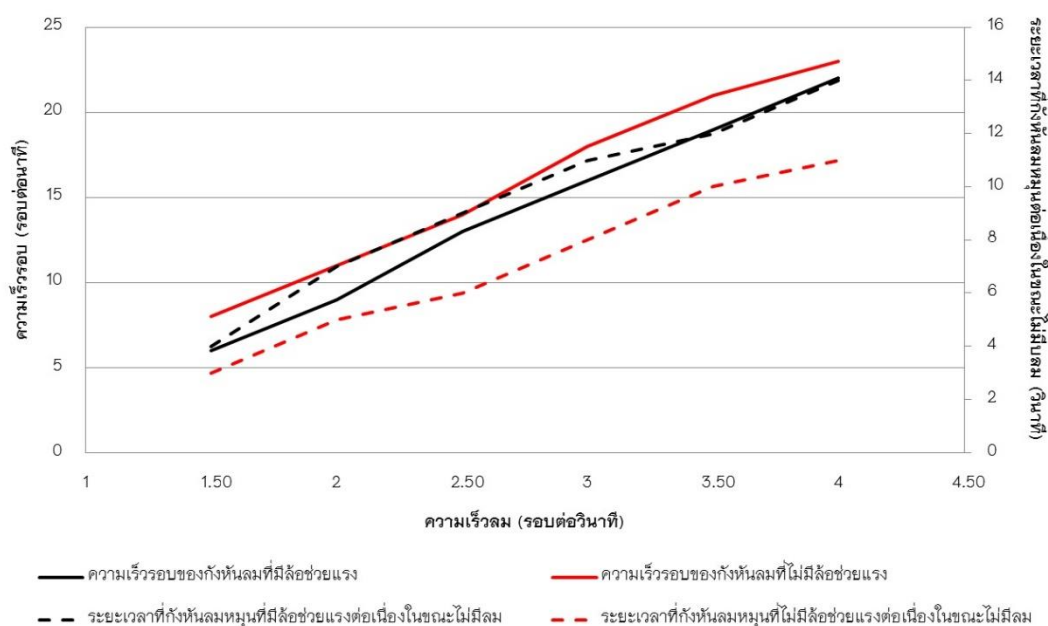


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับความเร็วรอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง
ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน
ขณะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

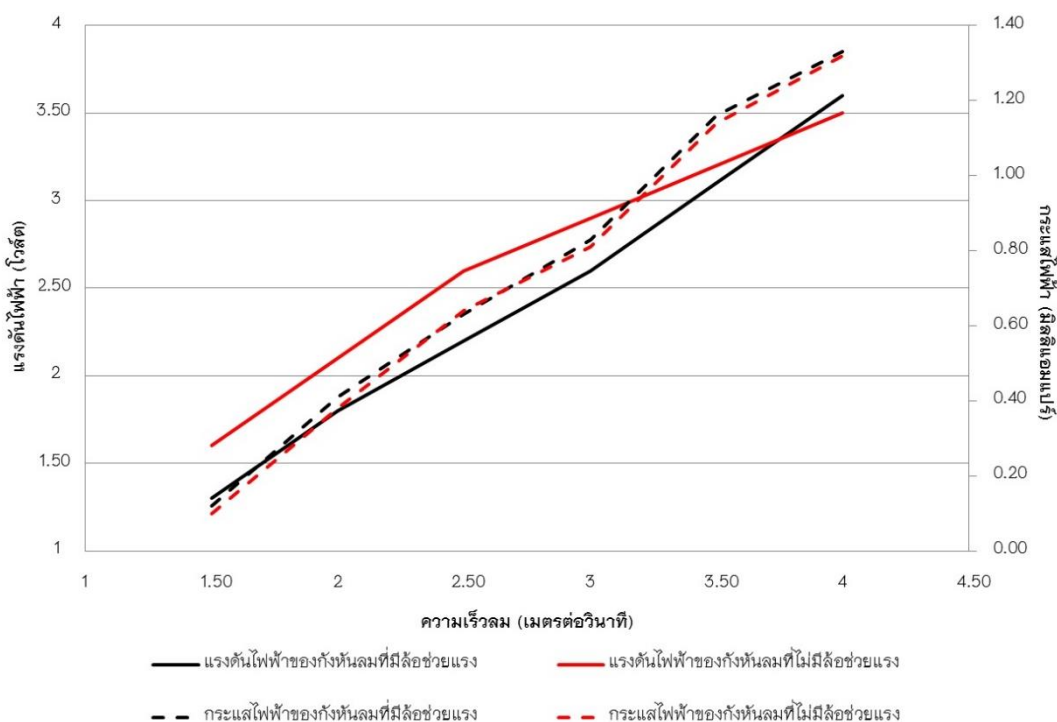


ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับแรงดันไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้ง
ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน และไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน
ขณะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดลองที่ 3 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานและที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน โดยการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับโหลดไฟฟ้าที่เป็นหลอดแอลอีดี ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 22 รอบต่อวินาที ได้แรงดันไฟฟ้า 3.60 โวลต์ ได้กระแสไฟฟ้า 1.30 มิลลิแอมป์ และในกรณีที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 14 วินาที กังหันลมผลิตไฟฟ้าแนวแกนตั้งที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานโดยการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาที จะได้ความเร็วรอบ 23 รอบต่อวินาที ได้แรงดันไฟฟ้า 3.50 โวลต์ ได้กระแสไฟฟ้า 1.30 มิลลิแอมป์ และในกรณีที่ไม่มีลม กังหันลมจะอาศัยแรงจากล้อช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีกจนใบกังหันลมหยุดหมุน ได้ 11 วินาที จากการเปรียบเทียบกังหันลมทั้งสองแบบ สรุปได้ว่ากังหันลมตัวที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพดีกว่าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับร้อยละ 84 ของตัวที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน



ภาพที่ 6 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมกับความเร็วรอบของกังหันลมแนวแกนตั้ง ที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานกับที่ไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงาน ขณะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดไฟฟ้า



ภาพที่ 7 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมกับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้ง ที่มีล้อยช่วยแรงสะสมพลังงานกับที่ไม่มีล้อยช่วยแรงสะสมพลังงาน ขณะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดไฟฟ้า

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าของกังหันลมแนวแกนตั้ง ที่มีล้อยช่วยแรงสะสมพลังงาน ระดับโมเดลที่สร้างขึ้น พบว่าที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาที กังหันที่จะได้ความเร็วรอบ 63 รอบต่อวินาที และจะอาศัยแรงจากล้อยช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีก 184 วินาที ขณะที่ต่อเข้ากับ โหลดโหลดมีความเร็วรอบ 48 รอบต่อวินาที ได้แรงดันไฟฟ้า 5.30 โวลต์ ได้กระแสไฟฟ้า 2.90 มิลลิแอมป์ และจะอาศัยแรงจากล้อยช่วยแรงสามารถหมุนต่อไปได้อีก 30 วินาที ซึ่งกังหันลมชุดที่มีล้อยช่วยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เท่ากับร้อยละ 84 ของตัวที่ไม่มีล้อยช่วยแรงสะสมพลังงาน

ผลการศึกษาพบว่ากังหันลมแนวแกนตั้งแบบกรงกระรอกสามารถหมุนด้วยแรงยก ที่เป็นเช่นนี้ ก็สอดคล้องกับทฤษฎีของ Boyle (1996) ที่กล่าวว่ากังหันลมที่ขับเคลื่อนด้วยแรงยก เป็นกังหันลมแบบนี้จะให้ความเร็วรอบสูง เมื่อนำมาใช้ร่วมกับล้อยช่วยแรงสะสมพลังงาน ซึ่งจะทำหน้าที่สะสมพลังงานจลน์จากการหมุน ให้กังหันลมมีความเร็วรอบที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Samuel & Erik (2017) ที่กล่าวว่า ล้อยช่วยแรงสะสมพลังงานยึดตามมวลที่หมุนได้ทำให้สามารถเก็บพลังงานในรูปแบบ

จลนศาสตร์ได้ในระยะสั้น แต่เมื่อพลังงานลมหมดลง กังหันลมจะสามารถหมุนได้ต่อด้วยพลังงานจลน์จากการหมุนของล้อช่วยแรงได้ระยะเวลายาวนานขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาเปรียบเทียบกังหันลมแนวแกนตั้งที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานและไม่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานทั้งสองแบบ สรุปได้ว่ากังหันลมตัวที่มีล้อช่วยแรงสะสมพลังงานมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 32

6. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)

งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับทุนอุดหนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ขอขอบคุณ คณะกรรมการตรวจประเมินงานวิจัยทุก ๆ ท่าน ที่ได้กรุณาตรวจประเมินและให้คำแนะนำเครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นทุกขั้นตอน พร้อมทั้งได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงเป็นอย่างดี ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม รวมทั้งอาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ สถานที่ อุปกรณ์การทดลอง กลุ่มตัวอย่าง ในการทำวิจัยผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Andrew, H., & Daniel T.G. (2020). Optimisation of a wind power site through utilization of flywheel energy storage technology, **Energy Reports**, 6(5), 259-265.
- Boyle, G. (1996). **Renewable Energy Power for A Sustainable Future**. United Kingdom: Alden University.
- Bouras, M., & Kouzi, K. (2017). **A new design of Flywheel Energy Storage System based on a double star Asynchronous machine associated to Wind Energy**, Paper presented at the 8th International Renewable Energy Congress (IREC), Amman, Jordan. Doi: 10.1109/IREC.2017.7926011.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). **Wind Energy Handbook**, England: John Wiley & Son.
- Keith, R.P. (2019). The Status and Future of Flywheel Energy Storage. **Joule**, 3(6), 1394-1399.
- Woranuch, J. (2008), **Renewable Energy** (1st ed.). Bangkok: Chulalongkorn University Press.



- Samuel, W., & Erik, G.H. (2017). Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage, **Journal of Cleaner Production**, 162, 1118-1134.
- Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M.A. (2020). A review of energy storage types, applications, and recent developments. **Journal of Energy Storage**, 27.