2

การส่งข้อมูลความสัมพันธ์ของทิศและความเร็วลมผ่านระบบ SCADA เพื่อควบคุมการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลม ขนาด 80 เมกะวัตต์

THE DATA TRANSMISSION OF DIRECTION AND WIND SPEED RELATIONSHIP VIA SCADA SYSTEM TO CONTROL THE OPTIMIZATION OF ELECTRICITY GENERATING OF 80 MW WIND ENERGY PLANTS

วันที่รับ: 30 พฤษภาคม 2563
วันที่แก้ไข: 13 กรกฎาคม 2563
วันตอบรับ: 25 พฤศจิกายน 2563

อรรฆพร คงจิต[1*], กัญญานัฐ ทองเทพ[1], ธเนศ ไชยชนะ[1], ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล[1], วีรพล จิรจริต[2] และ จอมภพ แวงศักดิ์[3]

Akaporn Kongjit[1*], Kunyanat Thongtep[1], Tanate Chaichana[1], Yingrak Auttawaitkul[1], Werapon Chiracharit[2] and Jompob Waewsak[3]

[1]วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[1]School of Renewable Energy, Maejo University

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี

[2]Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[3]คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

[3]Faculty of Science, Thaksin University

[*]Corresponding author e-mail: kakkongjit1980@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าด้วยการส่งสัญญาณข้อมูลลมเพื่อควบคุมการผลิตผ่านระบบสกาดา (Supervisory Control And Data Acquisition: SCADA) ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลมแต่ละต้นส่งข้อมูลลมให้กับระบบควบคุมที่ความสูง 553 เมตรจากระดับน้ำทะเล ขนาดกำลังการผลิตต่อต้น 2.5 เมกะวัตต์ จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิตรวม 80 เมกะวัตต์ อำเภอซับใหญ่ จังหวัดชัยภูมิ

การวิจัยนี้ แบ่งกังหันลมได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ติดตั้งบริเวณที่ราบจะมีลมพัดในทิศแน่นอน จำนวน 15 ต้น และกลุ่มที่ติดตั้งใกล้กับเทือกเขาจะมีลมพัดในทิศไม่แน่นอน

จำนวน 17 ต้น วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบสกาดา ใช้วิธีการหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตของมุมของลมที่พัดผ่านกังหันลมแต่ละกลุ่ม ในการกำหนดทิศรอลมของกลุ่มกังหันลม พบว่าในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนและไม่แน่นอน มีจำนวนข้อมูลรอบการทำงาน 5,444 และ 6,464 รอบ เมื่อใช้วิธีเพิ่มการผลิตไฟฟ้าด้วยการส่งสัญญาณผ่านระบบสกาดา ส่งผลให้ผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 162,568.37 และ 84,617.83 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ รวมทั้งโครงการ เท่ากับ 247,186.20 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (ลดกำลังผลิตสูญเสียจากวิธีการเดิม) เท่ากับ 18.41% และเพิ่มความต่อเนื่องในการผลิตไฟฟ้า ผู้ดูแลระบบสามารถใช้วิธีการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากงานวิจัยนี้เพื่อเป็นแนวทางเพิ่มการผลิตไฟฟ้ากับโครงการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมโครงการอื่นได้

คำสำคัญ: กังหันลม, การเพิ่มการผลิตไฟฟ้า, สกาดา

Abstract

This objective of study employs a method of electricity generating by sending signal of wind data for control the electrical generating via SCADA system (Supervisory Control And Data Acquisition). In this circumstance, wind measuring equipment is installed on each wind turbine and sending wind data to the control system at the height of 553 meters above sea level (32 wind turbines, 2.5 megawatts each) in Subyai district, Chaiyaphum province.

This study classifies wind turbines into two groups: those installed on a flat plain with certain wind direction (15 wind turbines) and the rest installed near the mountain range without certain wind direction (17 wind turbines). Data analysis obtained from the SCADA system and regarding a central tendency arithmetic mean of wind direction pass wind turbine groups for determining the wind direction. In May, 2017, wind turbines, groups in which the wind has definite and unpredictable directions it was found that the working round of an amount of data was 5,444 and 6,464 which resulted in an increase in electricity generating (162,568.37 and 84,617.83 kilowatts hour, respectively or 247,186.20 kilowatts hour for the whole project). When comparison with past method this research could increase electric generating 18.41% and adding of electricity generating continually. System administrators can use

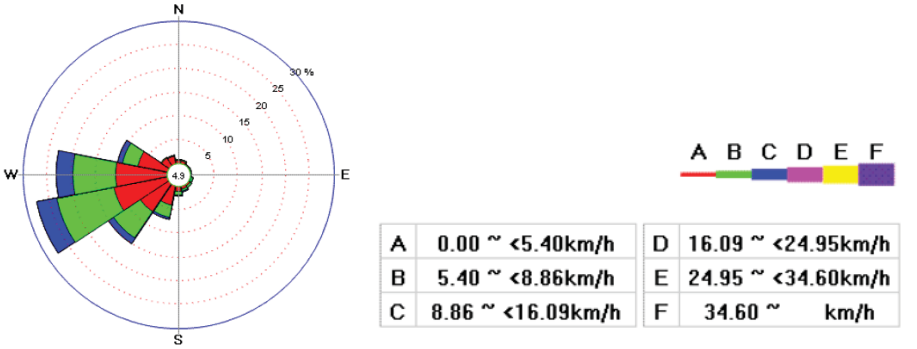
the method in this research to increase electricity generation capacity to other projects.

Keywords: Wind Turbine, Increase Electricity Generation Capacity, SCADA

บทนำ

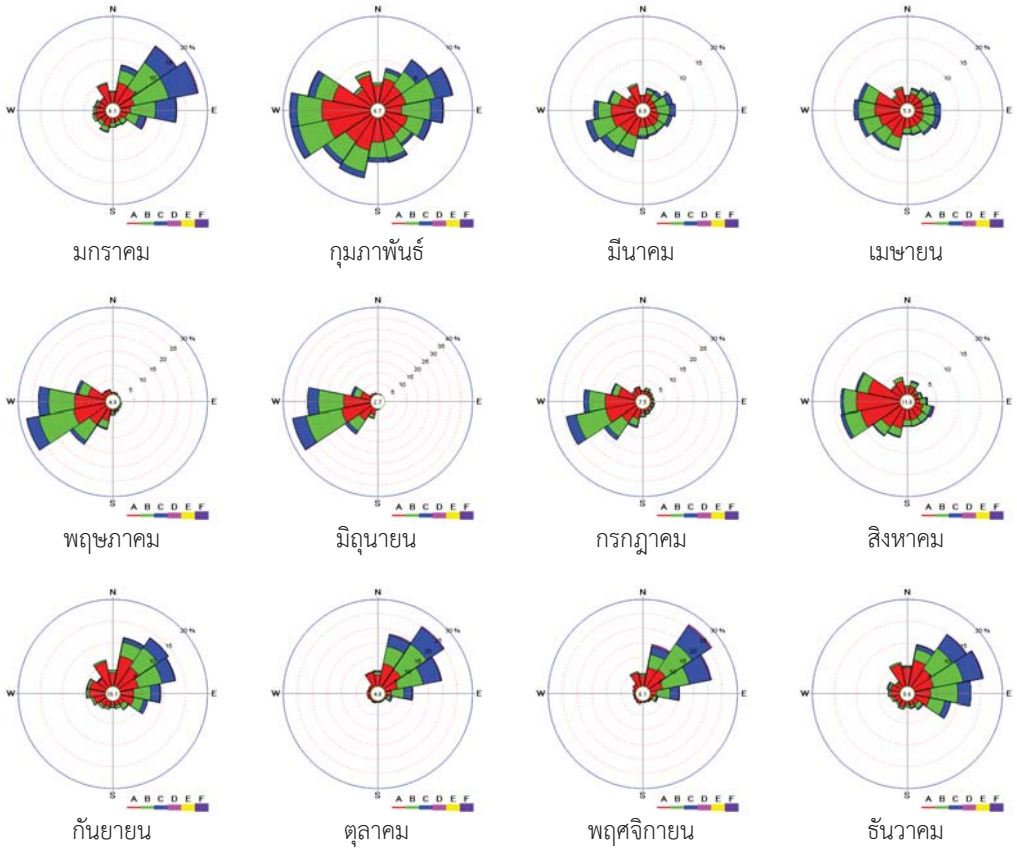
จากการคาดการณ์แนวโน้มสถานการณ์การใช้พลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะไฟฟ้า กระทรวงพลังงานจึงได้ทบทวนการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) ให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มตามศักยภาพ โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ขนาด SPP (Small Power Plant) ที่มีขนาด 10 เมกะวัตต์ต่อโครงการ มีจำนวน 22 โครงการ กำลังการผลิตรวม 1,562.15 เมกะวัตต์ แบ่งเป็น COD (Commercial Operation Date) แล้ว จำนวน 3 โครงการ กำลังการผลิต 267 เมกะวัตต์ และอยู่ระหว่างก่อสร้าง จำนวน 16 โครงการ กำลังการผลิต 1,295.15 เมกะวัตต์ ซึ่งแต่ละโครงการจะประกอบด้วยกลุ่มกังหันลมระหว่าง 16–42 ต้น ตามขนาดของสัญญาซื้อขายกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2559)

ลมที่พัดผ่านประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมจะพัดตามฤดูกาลมีทิศทางแน่นอนและสม่ำเสมอ ประกอบด้วย 2 ลมมรสุม ได้แก่ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างผังลม โดยแท่งกราฟที่ชี้ออกจากกึ่งกลางของวงกลมแทนค่าทิศทางลม วงกลมแต่ละชั้นบอกถึงร้อยละของทิศทางลม สีแต่ละสีบอกถึงความเร็วลม รายละเอียดแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผังลม (Wind rose)

จากการศึกษาทิศทางลมของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีวัดลมชัยภูมิ พบว่าในช่วงกลางเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงเริ่มเข้าของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้นั้น ลมที่พัดผ่านจะมีลักษณะแปรปรวน พัดมาจากหลายทิศทาง เมื่อผ่านช่วงนี้ไปลมจะเริ่มนิ่ง พัดมาจากทิศเดียวกันอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับในช่วงกลางเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงเริ่มเข้าของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ลมที่พัดผ่านในช่วงเริ่มเปลี่ยนลมมรสุมนั้นจะมีความแปรปรวนเช่นกัน จะเริ่มสงบและพัดจากทิศเดียวกันอย่างชัดเจนในช่วงเดือนถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังลมแสดงทิศทางและความเร็วลมที่ตรวจวัดได้โดยสถานีวัดลมจังหวัดชัยภูมิ ปี 2560 (Thai Meteorological Department Automatic Weather System, 2018)

จากลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยมีความเร็วลมอยู่ในระดับต่ำ แม้จะมีศักยภาพด้านพลังงานลมที่น้อย แต่จากการศึกษาแผนที่ศักยภาพพลังงานลมของประเทศไทย โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานในปี พ.ศ. 2544 พบว่าแหล่งพลังงานลม

ที่มีศักยภาพของประเทศไทย มีความเร็วลม 6.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ที่ความสูง 50 เมตร มีลมต่อเนื่องและสามารถนำมาผลิตไฟฟ้าได้ พบบริเวณยอดเขาหรือเทือกเขาและชายฝั่งทะเลฝั่งอ่าวไทย (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ม.ป.ป.) โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยจึงนิยมสร้างบริเวณเทือกเขาและชายฝั่ง เช่น ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่เป็นพื้นที่ล้อมรอบด้วยภูเขาสลับกับที่ราบ ข้อดีของพื้นที่ภูเขาจะช่วยป้องลมให้ลมมีปริมาณมากขึ้น สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง การติดตั้งกังหันลมจะติดตั้งบริเวณพื้นที่ราบและใกล้กับเทือกเขาตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ สาเหตุที่ไม่ติดบนเทือกเขาที่มีความเร็วลมมากกว่านั้น เนื่องจากการขนส่งที่ทำได้ลำบาก อีกทั้งบริเวณภูเขานั้นจะมีลมประจำถิ่น ประกอบด้วยลมภูเขาและลมหุบเขา ส่งผลให้ลมในบริเวณนี้แม้จะมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าได้จริงแต่ก็มีความแปรปรวนของลมด้วย (iEnergyGuru, 2015) จากงานวิจัยของศิริพร สุขกุล และ วิรชัย โรยนรินทร์ (2559) ศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก พบว่า ระยะทางและความสูงสิ่งกีดขวางการไหลของอากาศมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับไม่มีสิ่งกีดขวางการไหล มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 68.20 และ 58.33 ที่ทิศตะวันออกเฉียงเหนือและทิศตะวันตกเฉียงใต้ ตามลำดับ ความแปรปรวนของลมที่เกิดขึ้นนี้ ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้า กระบวนการก่อนเริ่มการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม กังหันลมต้องปรับหน้าของกังหันเข้าสู่ทิศที่ลมพัดมาก่อน โดยการตรวจสอบด้วยอุปกรณ์วัดลมบนหัวกังหันลมแต่ละต้น เมื่อตรวจพบลมที่มีความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาที (พรวี เกิดเกตุ และคนอื่นๆ, 2561) กังหันลมจะปรับหน้าเข้าสู่ทิศที่ลมพัดมา การปรับหน้าของกังหันลมเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้เวลาระยะหนึ่ง เนื่องจากกังหันลมมีขนาดใหญ่การหมุนเพื่อปรับหน้ากังหันจึงทำได้ช้า เมื่อหันหน้าเข้าสู่ทิศทางของลมแล้วกังหันลมต้องใช้เวลาในการปรับใบพัดเพื่อรับลมด้วย ในหลายครั้งกังหันลมไม่สามารถปรับทิศรับลมได้ทันกับมวลลมที่พัดผ่าน และด้วยลักษณะของพื้นที่ติดตั้งบริเวณใกล้กับเทือกเขาและที่ราบ ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านมีการเปลี่ยนทิศมากกว่าบริเวณพื้นที่โล่ง

เพื่อให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในประเทศไทยมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น มีนักวิจัยหลายท่านได้เสนองานวิจัยที่ช่วยเพิ่มการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมจากวิธีการต่างๆ Koetket, Khunkhet, Chiracharit, Waewsak, Chaichana, & Auttawaitkul (2018) นำเสนอการเปรียบเทียบระยะเวลารอลมของกังหันลมจากการกำหนดทิศรอลม โดยใช้วิธีการทางสถิติกับข้อมูลที่วัดได้จากการทำงานจริงของกังหันลมในเดือนกันยายนและตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงเดือนที่ลมมรสุมเกิดการเปลี่ยนทิศ พบว่าการกำหนดทิศรอลมของกังหันลมโดยใช้ค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 351.9 และ 648.6 กิโลวัตต์ชั่วโมง

ตามลำดับ จำลอง มะละเขต และคนอื่นๆ (2561) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า เพื่อส่งสัญญาณมายังระบบควบคุมกังหันลมโดยใช้วิธีการคำนวณระยะเวลาและทิศทางที่ลมจะมาถึงต้นกังหันลมโดยไม่ต้องตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลมในแบบเดิม สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าของ WTG23 ได้ 57.96 เมกะวัตต์ชั่วโมง อรรฆพร คงจิต และคนอื่นๆ (2561ก) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมโดยการส่งสัญญาณระหว่างกังหันลมกับกังหันลมผ่านระบบสกาดา มีระยะห่างระหว่างกังหันลมขนานกับลมมรสุม เท่ากับ 0.150–6.782 กิโลเมตร จะสามารถทำให้ระบบการทำงานของกังหันลมลดระยะเวลาตรวจวัดลมก่อนเริ่มการผลิตไฟฟ้าได้ 15 นาที ความเร็วลมเฉลี่ย 7.31 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 1,429.00 กิโลวัตต์ และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ 357.25 กิโลวัตต์ชั่วโมง

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมจำเป็นต้องอาศัยความเร็วลมมากกว่า 3 เมตรต่อวินาที ต่อเนื่องเป็นเวลา 3 นาทีขึ้นไป จึงจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยมีระบบสกาดาเป็นตัวส่งสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของกังหันลม ด้วยการสั่งให้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมปรับหน้ากังหันลม แล้วสั่งให้กังหันกางใบพัดเพื่อรับลมเท่านั้น งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ระบบดังกล่าว โดยอาศัยความสัมพันธ์ของทิศและความเร็วลมที่ความสูง 553 เมตรจากระดับน้ำทะเล เพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้า ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงปริมาณไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้วิธีเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทิศทางลม นำข้อมูลที่บันทึกได้จากกังหันลมต้นอื่นมาประมวลผลและส่งข้อมูลควบคุมไปยังกังหันลมต้นต่อไปผ่านระบบสกาดาในโครงการเพื่อกำหนดมุมของกังหันลมในกลุ่ม เตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้าแทนวิธีการแบบเดิมที่ต้องตรวจวัดลมจากกังหันลมแต่ละต้น ซึ่งใช้เวลาในการตรวจข้อมูลลม 0.5–10 นาทีต่อรอบการผลิต (Koetket, Khunkhet, Chiracharit, Waewsak, Chaichana, & Auttawaitkul, 2018) ระยะเวลาในการตรวจข้อมูลลมที่ลดลงนี้จะส่งผลให้กังหันลมมีเวลาผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบสกาดาในการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมเพื่อเตรียมความพร้อมในการผลิตไฟฟ้า แทนวิธีการเดิมที่ให้กังหันลมแต่ละต้นตรวจวัดลมด้วยตนเอง

2. เพื่อศึกษาวิธีเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยใช้การหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม 2 กลุ่ม ที่แบ่งตามลักษณะลมที่พัดผ่านตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ของสถานที่ติดตั้ง

3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้ารายปีของกังหันลม ที่ลักษณะลมเป็นช่วงของการเปลี่ยนทิศลมมรสุม ช่วงที่ลมมีความแปรปรวน และช่วงที่ลมสงบในประเทศไทยได้

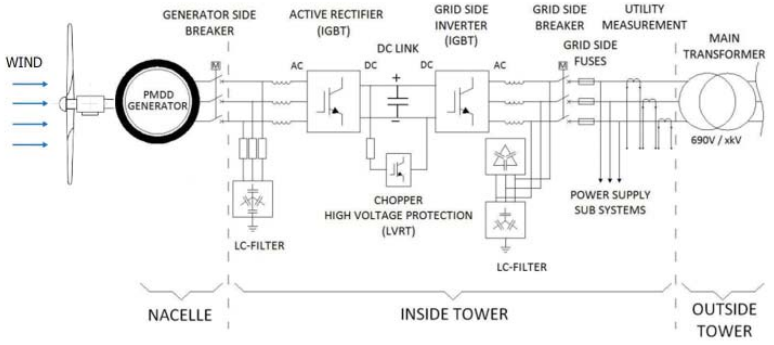
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผลกระทบของทุ่งกังหันลม (Park effect) และผลกระทบของเนินเขา (Hill effect)

การติดตั้งกังหันลมในรูปแบบทุ่งกังหันลมจะมีผลกระทบในด้านของความเร็วลมที่ลดลง เนื่องจากการหมุนวนด้านหลังของของไหล ดังนั้นการเว้นระยะระหว่างกังหันจึงเป็นเรื่องสำคัญ ระยะห่างระหว่างกังหันลมควรมีค่า 5 ถึง 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดในทิศทางลม และ 3 ถึง 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม นอกจากนี้ที่บริเวณยอดเขาอากาศที่เคลื่อนผ่านเชิงเขาจะขยายตัว (ความเร็วลมลดลง) และจะถูกบีบอัดทำให้ความเร็วลมสูงขึ้น (ความเร็วลมมีค่าสูงสุดที่สันเขา) หลังจากอากาศเคลื่อนที่ผ่านสันเขาจะขยายตัวและเกิดการปั่นป่วน ในพื้นที่ลักษณะนี้ควรติดตั้งกังหันลมที่บริเวณสันเขาเพื่อให้ได้รับประโยชน์จากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นอย่างเต็มที่ อีกทั้งผลกระทบของช่องลม (Tunnel effect) ที่อากาศจะถูกบีบอาจส่งผลทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะถูกใช้เป็นพลังงานป้อนให้กังหันลมได้ แต่ถ้าเกิดขึ้นในบริเวณช่องเขาที่ไม่ราบเรียบจะเกิดความปั่นป่วนของลมและส่งผลกระทบต่อกังหันลมที่ติดตั้งไว้ (กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

การเปลี่ยนรูปแบบพลังงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ความเร็วค่าหนึ่ง (พลังงานจลน์) เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานทางกลด้วยแรงบิดและความเร็วรอบของแกนหมุนกังหัน (Torque and speed conversion) พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม
(GOLDWIND 2.5 MW Technical Description, 2017)

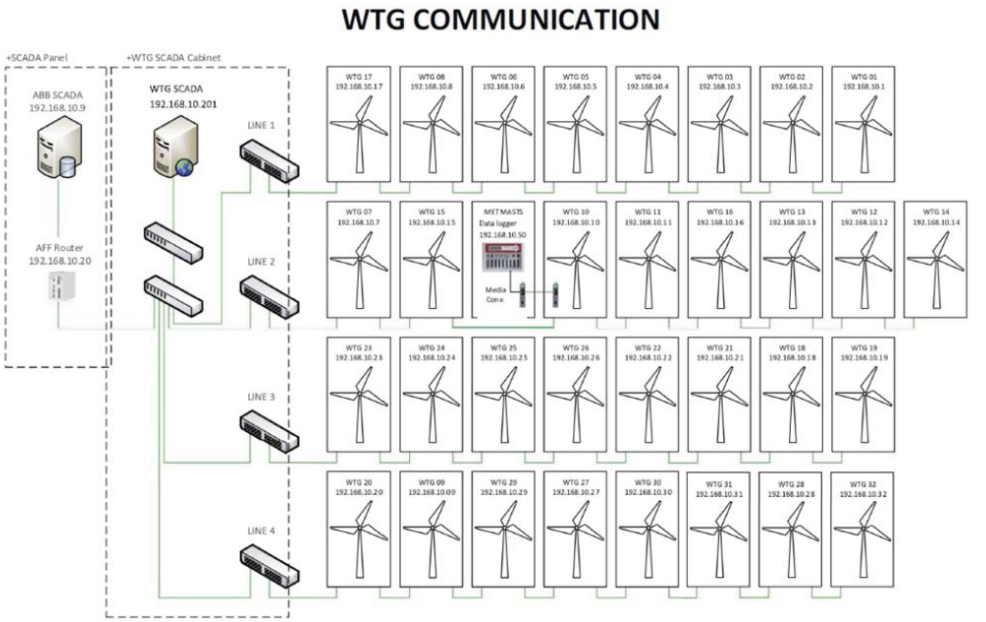
พลังงานลมถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานกลของแกนหมุนกังหันลม มวลของอากาศที่ปะทะเข้ากับใบกังหันจะเคลื่อนที่ช้าลง ในทางปฏิบัติ พลังงานจากลมไม่สามารถถ่ายเทให้กับกังหันลมได้ทั้งหมด มวลของอากาศที่ปะทะเข้ากับใบกังหันจะต้องหยุดสนิทบริเวณพื้นที่หน้าตัดของใบกังหัน สมการที่ 1 สามารถใช้อธิบายพลังงานทั้งหมดที่กังหันลมสามารถเปลี่ยนรูปได้จากพลังงานลม

$$P_{WT} = P_W C_P = \frac{\rho}{2} A_R V^3 C_P \quad (1)$$

เมื่อ P_{WT} คือ กำลังของกังหันลม (วัตต์), C_P คือ สัมประสิทธิ์สมรรถนะของกังหันลม และ A_R คือ พื้นที่กวาดของใบกังหัน (ตารางเมตร)

ระบบสกาดาที่ใช้ในโครงการ

ระบบสกาดาที่ใช้ในโครงการมี 2 ชุด สำหรับควบคุมการสื่อสารและการทำงานของกังหันลมเพื่อเก็บข้อมูลทั้งโครงการ กังหันลมจำนวน 32 ต้น ถูกแบ่งการควบคุมออกเป็น 4 กลุ่มย่อย ข้อมูลต่างๆ เช่น ความเร็วลม ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้า การปรับทิศของหน้ากังหันลมแต่ละต้น เป็นต้น ค่าเหล่านี้จะถูกส่งมาประมวลผลที่ห้องควบคุมและส่งคำสั่งสำหรับเตรียมการผลิตไฟฟ้าให้แก่กังหันลมผ่านระบบสกาดา ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบสกาดาที่ใช้ในโครงการ

ขั้นตอนการทำงานของกังหันลม กำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ ผ่านระบบสกาดา

กังหันลมแต่ละต้นจะมีอุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลม เมื่อลมมีความเหมาะสมจะส่งสัญญาณให้แก่ระบบการทำงานของกังหันลมเพื่อปรับหน้ากังหันรับลมสำหรับผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. การเตรียมความพร้อมของระบบ (สถานะ Standby) อุปกรณ์วัดลมทำการตรวจวัดความเร็วและทิศทางลม ส่งสัญญาณให้กังหันลมปรับใบพัดเป็นมุม 75 องศา เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

2. เริ่มกระบวนการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Start) กังหันลมปรับทิศทางของ Nacelle ไปตามทิศทางของลมที่มีความเร็วลมมากกว่า 3 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ใช้เวลาประมาณ 0.5–10 นาที

3. จ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ (สถานะ Online) กังหันลมผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

4. เริ่มหยุดผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stopping) กังหันลมเริ่มหยุดการผลิตไฟฟ้า เมื่อความเร็วลมน้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที

5. หยุดการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stop) กังหันลมหยุดผลิตไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์วัดลมตรวจวัดลมได้น้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาทีอย่างต่อเนื่อง และปรับใบพัดเป็นมุมเป็น 90 องศา (อรรฆพร คงจิต และคนอื่นๆ, 2561ข)

การหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง

การหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง (นันทนา กันยานุวัฒน์ และ นุชนาท นาคำ, 2555) เป็นระเบียบวิธีทางสถิติในการหาค่าเพียงค่าเดียวที่จะใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งชุด ค่าที่หาได้จะทำให้ทราบถึงลักษณะของข้อมูลทั้งหมดที่เก็บรวบรวมมาได้โดยค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean) เป็นค่ากลางหรือเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ดีที่สุด เนื่องจากเป็นค่าที่ไม่เอนเอียง มีความคงเส้นคงวา มีความแปรปรวนต่ำที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุด หาค่าได้จากการหารผลรวมของข้อมูลทั้งหมดด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N} \qquad (2)$$

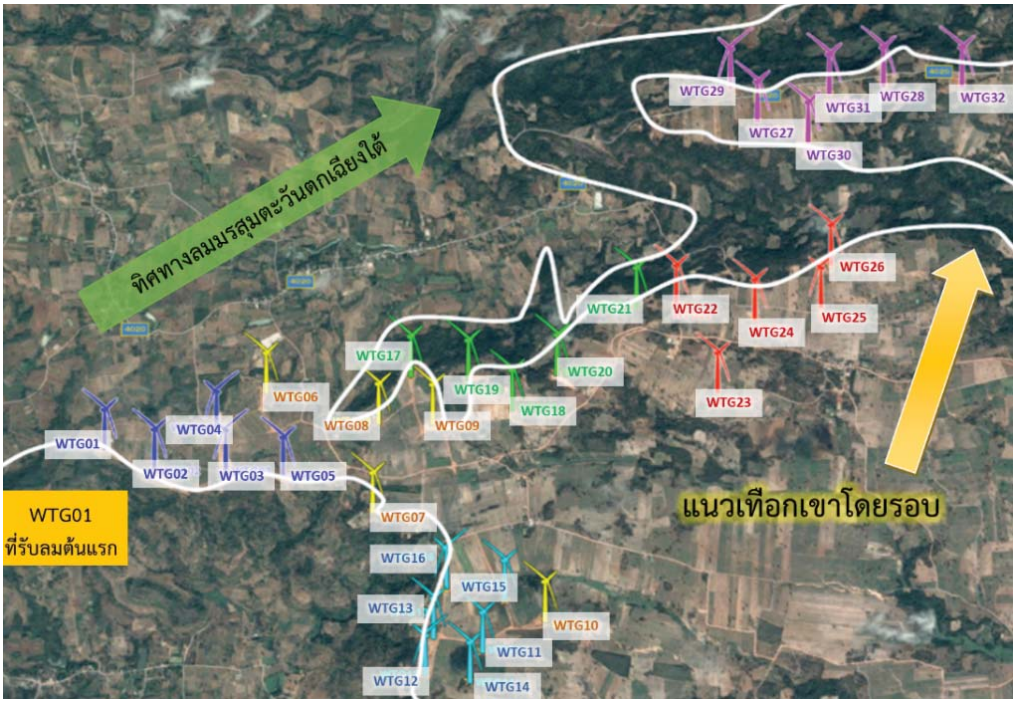
เมื่อ $\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย, $\sum_{i=1}^{N} X_i$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด และ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

วิธีดำเนินการวิจัย

การควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีการติดตั้งบริเวณที่ราบสลับเทือกเขาด้วยการใช้วิธีการหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลความเร็วลม (Wind speed) ทิศทางลม (Wind direction) จำนวนรอบการทำงาน ของโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความสูง 120 เมตร ติดตั้งที่ความสูงเฉลี่ย 553 เมตรจากระดับน้ำทะเล ลักษณะพื้นที่ติดตั้งเป็นบริเวณเทือกเขาสลับที่ราบ ทำให้กังหันลมแต่ละต้นมีความสูงไม่เท่ากัน เมื่อมีลมพัดผ่านกังหันลมจึงเกิดความแปรปรวนของลม ส่งผลให้ลมในบริเวณที่มีการติดตั้งกังหันลมมีทิศทางไม่แน่นอน

2. ใช้ข้อมูลเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนถ่ายลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เมื่อลมพัดมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ กังหันลมต้นแรกที่ได้รับการปะทะของลม ได้แก่ WTG01 ดังรูปที่ 5 ใช้ข้อมูลในช่วงที่กลุ่มกังหันลมมีการผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพร้อมกันทั้ง 32 ต้น



รูปที่ 5 ภาพถ่ายดาวเทียมโครงการทุ่งกังหันลม จังหวัดชัยภูมิ

3. จากงานวิจัยของอรรฆพร คงจิต และคนอื่นๆ (2561ข) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมของทิศทางลมกับเวลาขณะที่มีการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมทั้ง 32 ต้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของทิศลมที่ตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลมแต่ละต้น วิเคราะห์ข้อมูลด้วยการใช้วิธีการหาค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงให้กังหันลมหยุดในจุดที่กำหนด และแบ่งกลุ่มกังหันลมออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

3.1 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ใช้กังหันลมที่ติดตั้งบริเวณพื้นโล่งห่างจากเนินเขา ได้แก่

3.1.1 ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 202.64–207.87 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 205.26 องศา ความเร็วเฉลี่ย 4.69 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG07, WTG13, WTG16, WTG19, WTG25 และ WTG27

3.1.2 ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 217.99–227.99 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 222.99 องศา ความเร็วเฉลี่ย 4.75 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG02, WTG09, WTG12, WTG18 และ WTG24

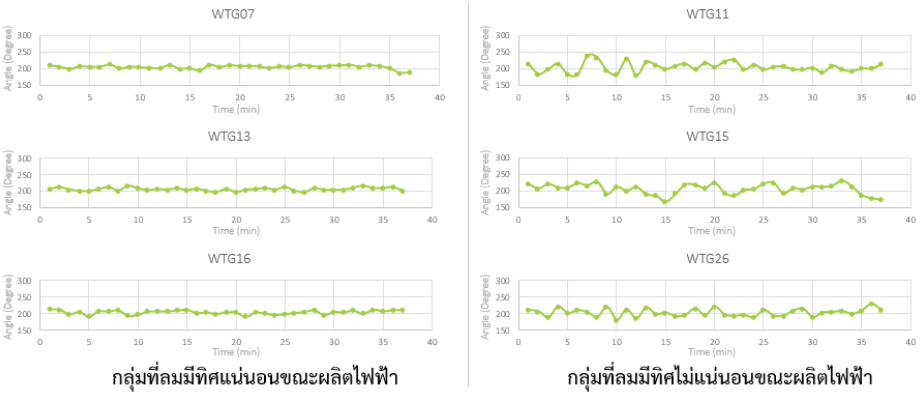
3.1.3 ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 245.55–256.53 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 251.04 องศา ความเร็วเฉลี่ย 5.43 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG23, WTG29, WTG31 และ WTG32

3.2 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ใช้กังหันลมติดตั้งบริเวณใกล้กับเนินเขา ทำให้ลมที่พัดสู่กังหันลมมีความแปรปรวน ได้แก่

3.2.1 ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 195.67–210.32 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 202.99 องศา ความเร็วเฉลี่ย 4.14 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG06, WTG11, WTG15, WTG22, WTG26 และ WTG30

3.2.2 ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 216.91–235.74 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 226.33 องศา ความเร็วเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG01, WTG03, WTG04, WTG05, WTG14, WTG17 และ WTG20

3.2.3 ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 253.83–255.35 องศา ค่าเฉลี่ยเลขคณิตช่วงของทิศทางลม 264.02 องศา ความเร็วเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วย WTG08, WTG10, WTG21 และ WTG28



รูปที่ 6 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ที่ใช้ในการแบ่งกลุ่มกังหันลม

4. เปรียบเทียบระยะเวลาที่หน้ากังหันลมใช้จากการหมุนหน้ากังหันลมจากจุดหยุดการทำงานก่อนหน้าที่เกิดจากการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดลม กับวิธีกำหนดทิศรอลมด้วยการส่งต่อข้อมูลภายในกลุ่มกังหันลม ระยะเวลาการหมุนของหน้ากังหันลมที่ลดได้จะเพิ่มเวลาในการผลิตไฟฟ้าให้กับกังหันลมได้มากขึ้น

ผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศและความเร็วลมที่ความสูง 553 เมตรจากระดับน้ำทะเล ของโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า จังหวัดชัยภูมิ โดยใช้กังหันลมขนาดกำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ จำนวน 32 ต้น ขนาดกำลังการผลิตรวม 80 เมกะวัตต์ เพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมทั้ง 2 กลุ่ม ส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาเพื่อกำหนดมุมของทิศลมในกลุ่มเดียวกัน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม ประกอบด้วย

1. มุมที่กังหันลมหยุดก่อนหน้า (สถานะ Stop)
2. มุมที่เริ่มการทำงานในรอบผลิตต่อมา (สถานะ Start)
3. ส่วนต่างมุมเดิม คือ ระยะการกวาดมุมของหน้ากังหันลมจากมุมที่กังหันลมหยุดจนถึงมุมที่เริ่มการทำงาน
4. ส่วนต่างมุมเฉลี่ย คือ ระยะการกวาดมุมของหน้ากังหันลมจากมุมที่กังหันลมหยุดจนถึงมุมเฉลี่ยที่กำหนดตามกลุ่มกังหันลม
5. เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น คำนวณจากการทำงานของกังหันลม กังหันลมจะหมุนเปลี่ยนทิศ 180 องศา ใช้เวลา 10 นาที เวลาการผลิตไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำระยะเวลาที่ใช้ในส่วนต่างมุมลบด้วยระยะเวลาของส่วนต่างมุมเฉลี่ย หากผลเป็นบวกจะได้เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น

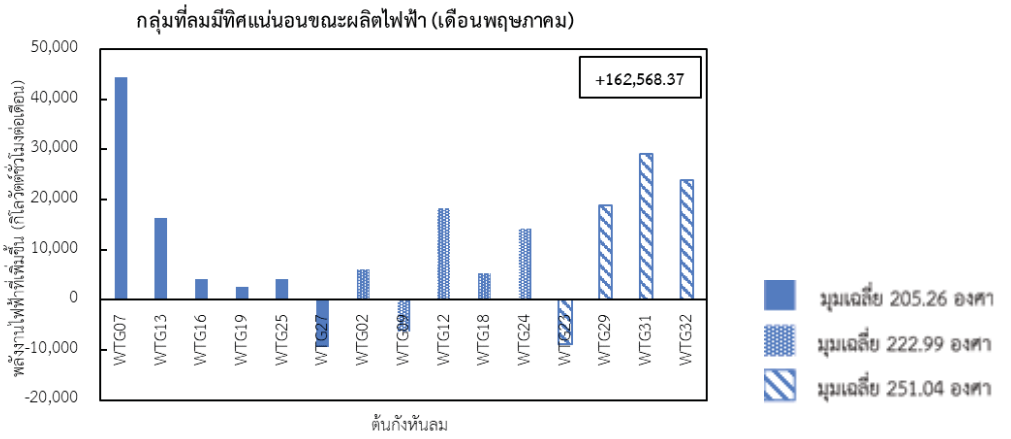
6. พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในการวิจัย คำนวณจากเวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นคูณกับกำลังผลิตไฟฟ้า ณ ความเร็วลมหนึ่ง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้การส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดา ด้วยวิธีหันหน้ากังหันลมให้ตรงกับค่าเฉลี่ยเลขคณิตทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม

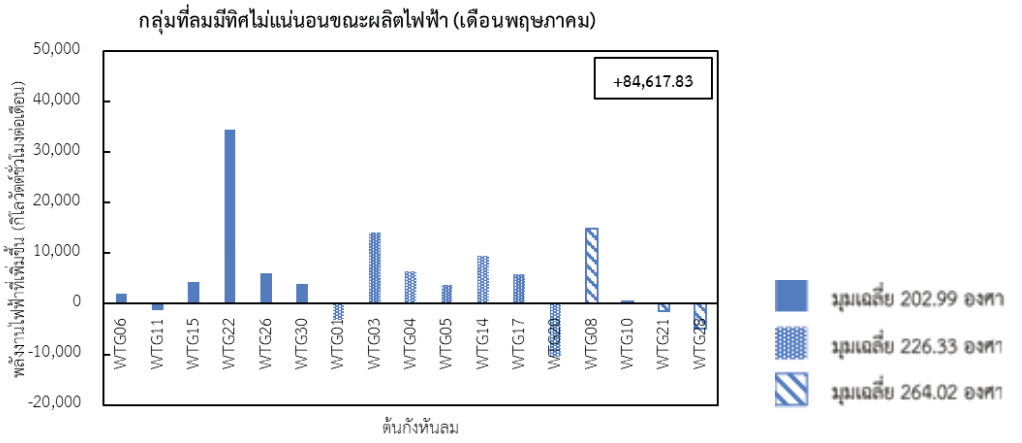
กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 1 รอบ (นาที)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า							
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 205.26 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.94 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,433.29 กิโลวัตต์							
WTG07	214.29	260.552	46.264	-55.29	5.64	329	44,341.64
WTG13	247.31	196.26	51.05	9.00	2.34	292	16,294.02
WTG16	195.79	216.92	21.14	11.66	0.53	321	4,034.70
WTG19	215.32	207.72	7.60	2.46	0.29	376	2,562.85
WTG25	197.42	219.39	21.97	14.13	0.44	397	4,130.64
WTG27	223.12	267.15	44.02	61.89	-0.99	398	-9,434.60
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 222.99 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.84 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,388.04 กิโลวัตต์							
WTG02	235.57	213.25	22.31	9.74	0.70	375	6,060.63
WTG09	204.41	207.30	2.89	15.69	-0.71	386	-6,348.04
WTG12	172.61	227.17	54.57	4.18	2.80	281	18,196.05
WTG18	211.93	223.47	11.54	0.48	0.61	378	5,375.05
WTG24	194.85	269.64	74.79	46.65	1.56	392	14,179.65
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 251.04 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 7.55 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,786.70 กิโลวัตต์							
WTG23	237.33	213.53	23.80	37.51	-0.76	386	-8,753.65
WTG29	206.18	255.24	49.06	4.20	2.49	255	18,924.21
WTG31	290.25	225.13	65.12	25.91	2.18	448	29,060.48
WTG32	284.7	223.29	61.42	27.76	1.87	430	23,944.76
		รวมทั้งสิ้น			**18.98**	**5,444**	**162,568.37**
กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า							
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 202.99 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.69 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 970.61 กิโลวัตต์							
WTG06	241.32	218.62	22.69	15.63	0.39	325	2,061.80
WTG11	245.24	226.02	19.21	23.03	-0.21	354	-1,214.99
WTG15	189.72	230.86	41.14	27.87	0.74	358	4,269.80
WTG22	298.15	193.93	104.22	9.06	5.29	404	34,549.97
WTG26	187.14	202.78	15.64	0.22	0.86	432	5,987.89
WTG30	192.66	235.02	42.36	32.03	0.57	424	3,935.91

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 1 รอบ (นาที)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 226.33 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.84 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,059.39 กิโลวัตต์							
WTG01	215.89	216.07	0.17	10.26	-0.56	327	-3,236.47
WTG03	191.38	228.13	36.75	-1.80	2.14	375	14,178.17
WTG04	242.60	228.15	14.45	-1.82	0.90	406	6,479.56
WTG05	236.70	191.83	44.87	34.50	0.58	368	3,743.33
WTG14	177.01	219.28	42.28	7.05	1.96	276	9,537.92
WTG17	187.10	213.93	26.84	12.40	0.80	409	5,793.25
WTG20	194.32	196.41	2.09	29.92	-1.55	387	-10,562.78
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 264.02 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.03 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,130.24 กิโลวัตต์							
WTG08	208.93	253.13	44.20	10.89	1.85	427	14,883.68
WTG10	265.64	216.65	48.99	47.37	0.09	334	565.20
WTG21	193.06	226.87	33.81	37.15	-0.19	397	-1,387.66
WTG28	186.47	220.10	33.63	43.93	-0.57	461	-4,966.77
		รวมทั้งสิ้น			**13.09**	**6,464**	**84,617.83**

จากตารางที่ 1 การเพิ่มการผลิตไฟฟ้าของแต่ละกลุ่มกังหันลมจะไม่เท่ากัน เนื่องจากผลของมุมที่กังหันลมแต่ละต้นหยุดการทำงานก่อนหน้าอยู่คนละมุมกัน ระยะเวลาที่ใช้สำหรับปรับหน้าของกังหันลมแต่ละต้นจึงไม่เท่ากันไปด้วย เมื่อใช้วิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดา โดยข้อมูลที่ส่งเป็นค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมพบว่า กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า จำนวน 15 ต้น มีรอบการทำงาน 5,444 รอบ สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 18.98 นาที ต่อ 1 รอบการผลิต คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 162,568.37 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังแสดงในรูปที่ 7 และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า จำนวน 17 ต้น มีรอบการทำงาน 6,464 รอบ สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 13.09 นาที ต่อ 1 รอบการผลิต คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 84,617.83 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังแสดงในรูปที่ 8 รวมทั้งโครงการ เท่ากับ 247,186.20 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน



รูปที่ 7 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน



รูปที่ 8 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การใช้เทคโนโลยีระบบสื่อสารที่เหมาะสม จะสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียเวลาของกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ เนื่องจากกังหันลมไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันทีแต่ต้องใช้ระยะเวลามากสำหรับการเริ่มต้นการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ระบบการส่งข้อมูลลมจากต้นกังหันลมก่อนหน้าผ่านระบบสกาดาไปยังต้นต่อไป เตรียมความพร้อมในการผลิตไฟฟ้าได้ทันทีนี้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มพลังงานการผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดา โดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม ที่สามารถเพิ่มพลังงานการผลิตไฟฟ้าได้จริงและวิธีการนี้มีความเหมาะสมเมื่อใช้กับกังหันลมในกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนมากกว่ากังหันลมในกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาความสัมพันธ์ของทิศและความเร็วลมของกังหันลมที่ติดตั้งที่ความสูง 553 เมตรจากระดับน้ำทะเล ขนาดกำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ จำนวน 32 ต้น ขนาดกำลังการผลิตรวม 80 เมกะวัตต์ จังหวัดชัยภูมิ ใช้ข้อมูลในเดือนพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ การติดตั้งของกังหันลมมีทั้งบริเวณที่ราบและบริเวณใกล้กับเทือกเขา ทำให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมแต่ละต้นมีความแน่นอนและความแปรปรวนไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ติดตั้งที่มีภูเขาเป็นตัวบังคับความเร็วและทิศทางลม เมื่อทำการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมและทิศทางลมเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าพบว่า สามารถแบ่งกังหันลมได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนและกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ใช้วิธีการส่งข้อมูลค่าเฉลี่ยเลขคณิตของกลุ่มกังหันลมผ่านระบบสกาดาเพื่อลดระยะเวลาตรวจสอบลม วิธีการนี้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมได้ทั้งสองกลุ่ม โดยเมื่อใช้ในกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนจะเพิ่มการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่ากลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไฟฟ้าที่สูญเสียไปจากการที่กังหันลมไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันที เสียเวลากับการเปลี่ยนทิศจากมุมที่หยุดก่อนหน้าไปยังมุมผลิตไฟฟ้ารอบต่อไป พบว่าเมื่อให้กังหันลมปรับทิศเองจะสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ควรจะได้ 502,343.33 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน แต่เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ จะสูญเสียกำลังการผลิตไฟฟ้าเพียง 409,863.44 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (ลดกำลังผลิตสูญเสีย) เท่ากับ 18.41%

อย่างไรก็ตามวิธีการประยุกต์ใช้ระบบสกาดาด้วยการปรับตั้งค่าทิศลมให้กลุ่มกังหันลมเพื่อส่งข้อมูลค่าเฉลี่ยเลขคณิตทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมให้ปรับหน้ากังหันลมเพื่อเตรียมความพร้อมในการผลิตไฟฟ้าจากงานวิจัยนี้ ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มการผลิตไฟฟ้าสำหรับโครงการกังหันลมได้ ซึ่งในปัจจุบันโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยมีเพิ่มมากขึ้น จากตัวเลขจริงของข้อมูลลมและวิธีการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าที่ผู้วิจัยนำเสนอ จะช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถใช้วิธีการนี้ได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงลมมรสุมที่พัดผ่านโครงการและสถานที่ติดตั้งในแต่ละโครงการของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมในประเทศไทยได้

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). *สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.* กรุงเทพฯ: กระทรวงฯ.

จำลอง มะละเขต และคนอื่น ๆ. (2561). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า. ใน *การประชุมวิชาการและการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ.* เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

นันทนา กันยานุวัฒน์ และ นุชนาท นาคำ. (2555). *แนวทางการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบทางเคมี.* กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่.

พรวี เกิดเกตุ และคนอื่น ๆ. (2561). การกำหนดทิศรอลมของกังหันลมด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อเพิ่มเวลาในการผลิตไฟฟ้า. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14.* ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

ศิริพร สุขกุล และ วิรชัย โรยนรินทร์. (2559). การศึกษาผลกระทบการขวางการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยคอมพิวเตอร์. ใน *การประชุมสัมมนาวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9.* เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2559). *ข้อมูลผู้ผลิตไฟฟ้า SPP/VSPP.* สืบค้น 5 พฤศจิกายน 2559,
จาก http://www.erc.or.th/ERCSPP/default.aspx?x=&muid=23& prid=41

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (ม.ป.ป.). *ผันลมเย็น แปรเป็นพลังงานสะอาด – NSTDA.* สืบค้น 28 พฤษภาคม 2562,
จาก http://nstda.or.th/rural/public/100%20articles-stkc/99.pdf

อรรฆพร คงจิต และคนอื่น ๆ. (2561ก). การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลม จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิต 80 MW โดยใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA. ใน *งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561*, (น. 63–68). กรุงเทพฯ.

_____. (2561ข). สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80 MW. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14.* ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

Goldwind Science and Technology. (2017). *GOLDWIND 2.5 MW Technical Description.* Beijing, China.

iEnergyGuru. (2015). *พลังงานลม: มารู้จักประเภทของลม และปรากฏการณ์ต่างๆ ของลมกันเถอะ!!!.* สืบค้น 30 พฤษภาคม 2562, จาก https://ienergyguru.com/2015/07/ประเภทของลม/

Koetket, P., Khunkhet, S., Chiracharit, W., Waewsak, J., Chaichana, T., & Auttawaitkul, Y. (2018). Increasing Efficiency in Wind Energy Electricity Generating by Signal Processing from Wind Measuring Equipment on Wind Turbine for the Determination of Wind Direction. In *2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT).* Bangkok: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Thai Meteorological Department Automatic Weather System. (2018). *Wind Rose.* Retrieved May 30, 2019, from http://www.aws-observation.tmd.go.th/web/aws/aws_windroses.asp