การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันด้วยวิธีการ ส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า

อรรฆพร คงจิต

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2563

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า

อรรฆพร คงจิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า

อรรฆพร คงจิต

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล)
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจริต)
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แวงศักดิ์)
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว ....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน
อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้
วันที่....................เดือน...................พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า
ชื่อผู้เขียน	นายอรรฆพร คงจิต
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ

บทคัดย่อ

พลังงานลมในประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ มีความเร็วลมต่ำและไม่สม่ำเสมอ โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนมากจึงนิยมติดตั้งบริเวณอ่าวไทย หรือบริเวณยอดเขาและเทือกเขา เพราะมีความเร็วลม 6.4 เมตรต่อวินาทีขึ้นไป ที่ความสูง 50 เมตร ลมในบริเวณนี้จะได้รับอิทธิพลจากลมภูเขาและลมหุบเขา ลมมีการเปลี่ยนทิศบ่อยกว่าในบริเวณพื้นที่โล่ง งานวิจัยนี้นำเสนอการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น กำลังการผลิต 80 เมกะวัตต์ ติดตั้งกระจายตามพื้นที่เชิงเขาและที่ราบ ตำแหน่งในการติดตั้งขึ้นกับความสะดวกในการขนส่งอุปกรณ์ ใช้ผลของการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลม จัดกลุ่มกังหันจากความสัมพันธ์ของทิศทางและความเร็วลม พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มกังหันตามลักษณะภูมิประเทศติดตั้งได้สองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอน ตั้งตั้งบริเวณที่ราบ ไม่มีสิ่งกีดขวางทิศลม และกลุ่มที่ทิศทางลมมีความไม่แน่นอน ติดตั้งใกล้บริเวณเทือกเขา ตามแนวยาวของสันเขา ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมเหล่านี้มีความแปรปรวนแต่ยังคงมีแนวโน้มตรงตามทิศลมมรสุม

ผลการวิเคราะห์สามารถจัดกลุ่มความสัมพันธ์รูปแบบของลมที่พัดผ่านกังหันลม ส่งข้อมูลลมไปยังกังหันลมต้นอื่นในกลุ่ม ด้วยหลักการควบคุมระบบสกาดา (SCADA) เพื่อให้กังหันลมต้นถัดไปเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ โดยแบ่งงานวิจัยเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าในช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง และช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน พบว่าการใช้วิธีการส่งสัญญาณผ่านระบบสกาดาให้กับกังหันลมในกลุ่มในช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ โดยกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้ามีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 176,575.10 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้ามีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 216,052.52 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ซึ่งมากกว่าช่วงลมมรสุมมีความแน่นอนที่กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า มีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 12,039.03 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิต

ไฟฟ้ามีปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 8,074.43 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน วิธีการประมวลสัญญาณลมจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในประเทศไทยในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ : กังหันลม, ลมมรสุม, ภูมิประเทศ, สกาดา, การเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า

Title	INCREASING WIND FARM POWER GENERATION EFFICIENCY BY TRANSFER THE SIGNAL BETWEEN WIND TURBINES FOR CONTROLLING ELECTRICITY GENERATION
Author	Mr. Akaporn Kongjit
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Tanate Chaichana

ABSTRACT

Potential of wind energy in Thailand is under the influence of southwestern monsoon and northwestern monsoon wind having low speed and not continuity. The wind turbine generating electricity project in Thailand mostly prefers to be installed on the gulf of Siam area or on the top of a hill. These areas must have 6.4 m/s and above of wind speed with the height of 50 m. Hence, the plants are usually installed in the valley but the monsoon wind blowing to turbines in this area will have an influence from mountain wind and value wind. The wind often changes directions rather than open area. This study presents signal processing from a wind measuring equipment on the turbine of 32 turbines, power generating 80 MW. The turbines are installed at the foot of a mountain, the installation location depends on the convenience of equipment transportation. Results of the signal processing are used for a relationship of direction, wind speed of each turbine, and turbine group arrangement. It is found that turbine groups can be classified into 2 groups based on topographic location area: installation in an open area (Turbine direction is in this same direction with monsoon wind while electricity generating) and installation on the hill (Turbine direction will have variance but still tend to match monsoon direction).

Results of an analysis of turbine direction forms from signal can send wind data to other turbines in the group by using SCADA system. This aims to send data to

next turbines for readiness preparation electricity generating. Increasing electricity production, the research can be divided into 2 parts: the monsoon has variance and the monsoon period is certain. The monsoon has variance increase the electricity generating more than the monsoon period is certain. With groups of wind direction is in this same direction can increase the electricity generating (176,575.10 and 216,052.52 kWh per month, respectively), and wind direction will have variance can increase the electricity generating (12,039.03 and 8,074.43 kWh per month, respectively). The signal processing from this research can be used as a guideline for planning electricity generating from wind energy in Thailand in the future.

Keywords : Wind turbine, Monsoon, Terrain, SCADA system, Increase electricity capacity

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี โดยได้รับคำชี้แนะที่มีคุณค่าเป็นอย่างยิ่งจากคณาจารย์หลายท่าน และการสนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยจากหลายหน่วยงาน

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่มอบทุนอุดหนุนการศึกษาผ่าน “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ทุนประเภทที่ 3 ทุนอุดหนุนการทำการค้นคว้าอิสระ/วิทยานิพนธ์ในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ คำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ช่วยตรวจสอบความเหมาะสม ความเรียบร้อยของเนื้อหางานวิจัย ให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องและปัญหาต่างๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจริต สังกัดภาควิชาวิศวกรรมอิเล็คทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล ที่กรุณาให้เกียรติเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณศูนย์บริการวิชาการที่ 7 (จังหวัดเชียงใหม่) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับใช้ในการศึกษา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์หลายท่านที่มิได้กล่าวชื่อในครั้งนี้ เจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกท่านที่ให้ความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมถึงเพื่อน และญาติมิตรทุกท่านที่ไม่สามารถจะกล่าวไว้ในที่นี้ได้หมด สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจเสมอมา คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

อรรฆพร คงจิต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
สารบัญตารางผนวก	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีของลม	5
2.1.1 การเกิดลม	5
2.1.2 พื้นที่ความกดอากาศ	5
2.1.3 การวัดลม	6
2.1.4 ลมพื้นผิว (Surface wind)	9
2.1.5 ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย	10
2.1.6 ตัวเซนเซอร์ของลูกถ้วยและใบพัด (Cup and propeller sensors)	13
2.1.7 ศรวัดทิศทางลม	14

2.2 การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม 15
2.3 พิกัดความเร็วรอบชุดแกนหมุนใบพัด (Rated rotor speed) 17
2.4 ขนาดและกำลังผลิตของกังหันลม 18
2.5 การทำงานของกังหันลมและรูปแบบการเชื่อมโยง 19
2.6 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมขนาดใหญ่สำหรับผลิตไฟฟ้า 21
2.7 ระบบควบคุมกังหันลม 22
2.8 ผลของสัณฐานวิทยาที่ดินต่อร้อยละการแปรผันของความเร็วลม 25
2.9 ผลกระทบของทุ่งกังหันลม (Park effect) 26
2.10 ผลกระทบของเนินเขา (Hill effect) 26
2.11 หลักการและทฤษฎีของระบบ SCADA 27
2.11.1 ลักษณะพิเศษของสกาดา 31
2.11.2 ฐานข้อมูลของสกาดา 31
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 39
3.1 ขั้นตอนการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 2.5 เมกะวัตต์ 41
3.2 ลักษณะภูมิประเทศติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า 42
3.3 ระยะหว่างระหว่างกังหันลม 43
3.4 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามการเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้าและความแตกต่างของความสูงจากระดับน้ำทะเลของกังหันลม 45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล 47
4.1 ลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า 47
4.2 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามสภาวะภูมิประเทศ 49
4.1.1 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า 59
4.1.2 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า 62

4.3 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้การส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาด้วยวิธีหันหน้ากังหันลมให้ตรงกับค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม 67
4.3.1 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง 68
4.3.2 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน 74
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 81
5.1 สรุปผลการทดลอง 81
5.2 ข้อเสนอแนะ 82
บรรณานุกรม 83
ภาคผนวก 86
ภาคผนวก ก ข้อมูลวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน 87
ภาคผนวก ข การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ 105
ประวัติผู้วิจัย 124

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ทิศลมและองศา.......... 7
ตารางที่ 2 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ด 8
ตารางที่ 3 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 1.......... 49
ตารางที่ 4 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 2.......... 51
ตารางที่ 5 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 3.......... 52
ตารางที่ 6 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 4.......... 54
ตารางที่ 7 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 5.......... 56
ตารางที่ 8 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 6.......... 57
ตารางที่ 9 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลงต่อรอบการผลิต.......... 68
ตารางที่ 10 พลังงานไฟฟ้าต่อเดือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อคำนวณจากการทำงานจริงของกังหันลม.......... 71
ตารางที่ 11 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน 75
ตารางที่ 12 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อคำนวณจากการทำงานจริงของกังหันลม.......... 77

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แนวโน้มสถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้า ปี 2559 1
ภาพที่ 2 สถานะการรับซื้อไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน 2
ภาพที่ 3 ทิศลมเรียกเป็นองศาจากทิศจริง 6
ภาพที่ 4 ทิศทางการพัดพาของลมมรสุม 11
ภาพที่ 5 การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม 15
ภาพที่ 6 กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine) 16
ภาพที่ 7 กังหันลมแบบแนวแกนนอน (Horizontal axis wind turbine) 17
ภาพที่ 8 แนวโน้มการขยายขนาดและเพิ่มความสูงของกังหันลม 18
ภาพที่ 9 ขนาดและกำลังผลิตของกังหันลม ออกแบบโดย The National Renewable Energy Laboratory (IPCC, 2001) 19
ภาพที่ 10 แสดง Power curve ของกังหันลม 20
ภาพที่ 11 ห้องเครื่องกังหันลมแบบมีเกียร์ทด 21
ภาพที่ 12 กังหันลมแบบความเร็วคงที่ 23
ภาพที่ 13 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง 24
ภาพที่ 14 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ 24
ภาพที่ 15 ผลของความขรุขระของพื้นดินต่อการแปรผันของลม 25
ภาพที่ 16 (ก) ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งกังหันลม และ (ข) ผลกระทบของความเร็วในทุ่งกังหันลม 26
ภาพที่ 17 ผลกระทบของเนินเขา (บน) และความเร็วลมเปลี่ยนแปลง จากผลกระทบของเนินเขา (ล่าง) 27
ภาพที่ 18 องค์ประกอบของระบบสกาดา 28
ภาพที่ 19 การติดตั้งสกาดาสำหรับตรวจสอบเก็บรวบรวมข้อมูลและบริหารระบบควบคุม 29

ภาพที่ 20 Point-to-Point Configuration 30

ภาพที่ 21 Point-to-Multipoint Configuration 30

ภาพที่ 22 การติดต่อโดยใช้ SPC เป็นตัวกลางระหว่าง Central Computer SCADA Software และ RTU 33

ภาพที่ 23 ตำแหน่งเซนเซอร์บนกังหันลม 36

ภาพที่ 24 การสื่อสารแบบ M2M 37

ภาพที่ 25 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม 37

ภาพที่ 26 กลุ่มกังหันลมโครงการชัยภูมิวินด์ฟาร์ม จำนวน 32 ต้น 39

ภาพที่ 27 แผนภาพการเชื่อมต่อข้อมูลของกลุ่มกังหันลมเข้าสู่ระบบเซิร์ฟเวอร์ 40

ภาพที่ 28 กังหันลมขนาดกำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ และอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลม 42

ภาพที่ 29 แนวเทือกโดยรอบตำแหน่งติดตั้งกังหันลม 43

ภาพที่ 30 ระยะห่างระหว่างกังหันลม 44

ภาพที่ 31 ตัวอย่างกลุ่มกังหันลมที่ติดตั้งในความสูงระดับน้ำทะเลที่ต่างกัน 46

ภาพที่ 32 ทิศทางและความเร็วลมที่ตรวจวัดได้โดยสถานีวัดลมจังหวัดชัยภูมิ ปี 2560 48

ภาพที่ 33 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา 60

ภาพที่ 34 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา 61

ภาพที่ 35 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา 62

ภาพที่ 36 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา 63

ภาพที่ 37 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา 64

ภาพที่ 38 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา 65

ภาพที่ 39 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามลักษณะของทิศทางลม 67

ภาพที่ 40 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน 73

ภาพที่ 41 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน 74

ภาพที่ 42 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน 79

ภาพที่ 43 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน 80

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY แม่โจ้ ๘๔

สารบัญตารางผนวก

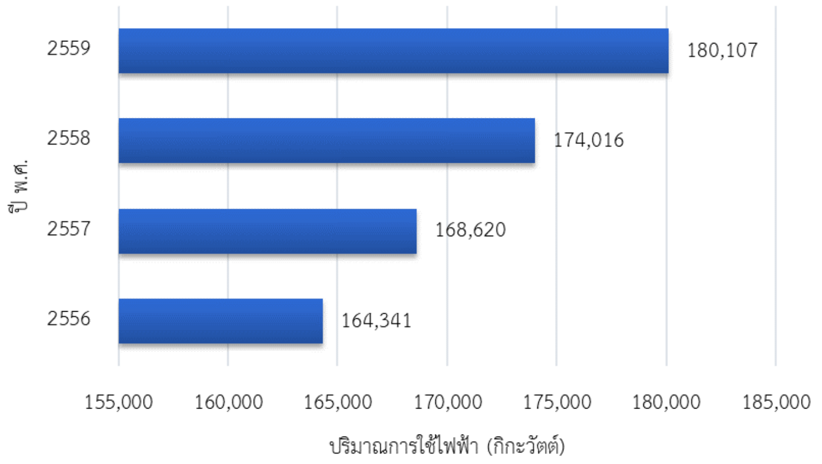
หน้า

ตารางผนวกที่ 1 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา 88
ตารางผนวกที่ 2 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา 90
ตารางผนวกที่ 3 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา 93
ตารางผนวกที่ 4 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา........ 96
ตารางผนวกที่ 5 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา........ 99
ตารางผนวกที่ 6 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา...... 102

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

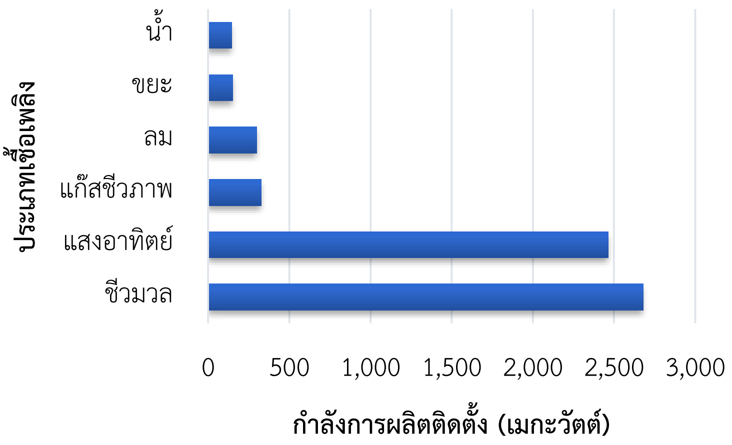
การคาดการณ์แนวโน้มสถานการณ์การใช้พลังงานในปี 2559 (กระทรวงพลังงาน, 2558) ของกระทรวงพลังงาน พบว่าการใช้น้ำมันสำเร็จรูปจะมีการปรับตัวเพิ่มขึ้นจากปี 2558 ในอัตราร้อยละ 3.0 ซึ่งเป็นการประมาณการตัวเลขที่สอดรับกับ GDP ของประเทศในปี 2559 ที่คาดว่าจะขยายตัวประมาณร้อยละ 3.0 - 4.0 โดยแบ่งเป็นการปรับตัวเพิ่มขึ้นในชนิดต่างๆ ดังนี้ น้ำมันเบนซินเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.7 น้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.8 ส่วนก๊าซ LPG จะปรับตัวลดลงต่อเนื่องจากปี 2558 เฉลี่ยลดลงประมาณร้อยละ 2.5 ขณะที่ราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกจะยังอยู่ในช่วงการปรับตัวลดลง โดยคาดว่าราคาน้ำมันดิบดูไบค่าเฉลี่ยจะอยู่ที่ 35-45 ดอลลาร์ต่อบาร์เรล สำหรับสถานการณ์ด้านไฟฟ้าแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าปี 2559 ของกระทรวงพลังงานมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 180,107 กิกะวัตต์ คาดว่าจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 ตามภาวะเศรษฐกิจที่จะปรับตัวดีขึ้นเมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 174,016 กิกะวัตต์ ดังแสดงในภาพที่ 1 สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (PDP2015) ที่คาดว่าจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในอัตราดังกล่าว ทั้งนี้ ประมาณการว่า ความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak) ปี 2559 จะอยู่ที่ไม่เกิน 29,000 เมกะวัตต์ และมีระดับการเฝ้าระวังอยู่ที่ 28,500 เมกะวัตต์



ภาพที่ 1 แนวโน้มสถานการณ์การใช้พลังงานไฟฟ้า ปี 2559

จากการคาดการณ์แนวโน้มสถานการณ์การใช้พลังงานที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปีโดยเฉพาะไฟฟ้า เพื่อรองรับการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐานของประชาชน และเป็นปัจจัยพื้นฐานการผลิตในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย ดังนั้น กระทรวงพลังงานได้ทบทวนการจัดทำแผนพลังงาน 5 แผนหลักในช่วงปี พ.ศ. 2558 – 2579 (กระทรวงพลังงาน, 2558) ที่สอดคล้องกับรอบของการจัดทำแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติได้แก่ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย แผนอนุรักษ์พลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก แผนการจัดหาก๊าซธรรมชาติของไทย และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง โดยในการจัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015) จะให้ความสำคัญในการส่งเสริมการผลิตพลังงานจากวัตถุดิบพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มตามศักยภาพ การพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2559) ทำหน้าที่กำกับกิจการไฟฟ้าและกิจการก๊าซธรรมชาติ กำกับดูแลกิจการพลังงาน ตรวจสอบการประกอบกิจการพลังงานของผู้รับใบอนุญาต โดยในด้านพลังงานทดแทนมีสถานะการรับซื้อไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทนกว่า 6,000 เมกะวัตต์ พลังงานทดแทนที่มีสัญญาซื้อขายไฟฟ้ามากเป็นอันดับหนึ่งได้แก่พลังงานชีวมวล จำนวน 2,680.95 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 44.16 ของพลังงานทดแทนทั้งหมด อันดับสองพลังงานแสงอาทิตย์ 2,464.57 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 40.59 อันดับสามพลังงานก๊าซชีวภาพ 329.42 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 5.43 และพลังงานทดแทนอื่น ๆ ได้แก่ พลังงานลม ขยะ และน้ำจำนวน 299.17, 151.18 และ 146.28 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 4.93, 2.49 และ 2.41 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สถานะการรับซื้อไฟฟ้าโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน

การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ เมื่อมีลมพัดผ่านใบกังหันในความเร็วลมที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้จะทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุน และได้เป็นพลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันลม และจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านระบบควบคุมไฟฟ้า และเข้าสู่ระบบต่อไป

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทย ขนาด SPP (Small Power Plant) ที่มีขนาด 10 เมกะวัตต์ ต่อโครงการ 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

แม้ว่าพลังงานลมเป็นพลังงานค่อนข้างสะอาด แต่พลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ยังคงพึ่งพาไม่ได้ เนื่องจากความไม่เหมาะสมเท่าที่ควรของลมในประเทศไทย กังหันลมแต่ละตัวมีความจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าควบคุมระบบตลอดเวลา ทั้งการหันหน้ากังหันลมไปในทิศทางลม การเตรียมกางใบพัดเพื่อรับลมและหมุนเพื่อปั่นไฟ หรือแม้แต่ระบบควบคุมภายในต่าง ๆ ในตัวกังหันลม สิ่งเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น เมื่อมีลมพัดผ่าน กังหันลมจะเปลี่ยนทิศหันหน้าเข้าหาทิศของลม แต่เนื่องจากโครงสร้างที่ใหญ่และมีน้ำหนักมาก ทำให้ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการหันทิศเข้าหาลม และใช้เวลาในการกางใบ แต่ลมในประเทศไทยนั้นมีความเร็วลมต่ำ ลมไม่ต่อเนื่อง ลมเปลี่ยนทิศทางในแต่ละช่วงเวลา ทำให้ลมที่พัดในแต่ละครั้งถือเป็นสิ่งที่มีค่าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าอย่างมาก ในหลายครั้ง ลมที่แรงพอทำให้กังหันลมทำงานได้นั้น ก็พัดผ่านและหมดไปก่อนที่กังหันลมจะผลิตไฟฟ้าได้ แต่ตัวกังหันลมได้ใช้ไฟฟ้าในการเปลี่ยนทิศเพื่อเข้าหาลมแล้ว เป็นการใช้ไฟฟ้าแทนการผลิตไฟฟ้า

ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น เทียบกับกำลังการผลิตในแต่ละต้น โดยใช้ผลของการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลม และหลักการควบคุมระบบสกาดา (SCADA) ในการดูกำลังการผลิตไฟฟ้าของกลุ่มกังหันลมที่ปะทะลมก่อน เพื่อส่งข้อมูลให้กับกังหันลมกลุ่มถัดไปหันทิศรอลม เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า ใช้วิธีเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมทั้ง 2 กลุ่ม ส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาเพื่อกำหนดมุมของทิศลมในกลุ่มเดียวกัน ให้กังหันลมปรับหน้าเข้าสู่ทิศทางที่กำหนด เตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า แทนวิธีการรับข้อมูลในระบบกังหันลมแบบเดิมที่ใช้การตรวจข้อมูลลมจากอุปกรณ์ตรวจวัดบนกังหันลมแต่ละต้น ซึ่งต้องใช้เวลาในการตรวจข้อมูลลม 0.5-10 นาที เมื่อหน้ากังหันลมอยู่ในจุดที่กำหนด ขณะที่ลมพัดผ่านและมีความเร็วมากกว่า 3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันท่วงที ระยะเวลาในการตรวจข้อมูลลมที่ลดได้นี้ ส่งผลให้กังหันลมมีเวลาผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็น

แนวทางในการวางแผนการดำเนินการของโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในประเทศไทยในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาข้อมูลลมในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมแต่ละต้น
2. กำหนดแผนการผลิตของกังหันลมต้นข้างเคียงเพื่อการผลิตไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. เก็บข้อมูลลมในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมแต่ละต้น
2. เปรียบเทียบข้อมูลลมระหว่างกังหันลมต้นข้างเคียง
3. ประมวลข้อมูลและวางแผนการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมในกลุ่มกังหันลม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบข้อมูลลมในระดับความสูงที่พื้นที่ติดตั้งกลุ่มกังหันลม
2. ทราบแนวทางในการวางแผนการดำเนินการของการผลิตไฟฟ้าพลังงานลม
3. เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกลุ่มกังหันพลังงานลม

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันลมด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้านั้น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลมในลักษณะต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้า เช่น ความเร็วลม ลักษณะลมที่พัดผ่านประเทศไทยในแต่ละช่วงเวลา ผลที่เกิดขึ้นเมื่อลมปะทะสิ่งกีดขวาง เป็นต้น และการศึกษาข้อมูลด้านกังหันลมผลิตไฟฟ้า เช่น หลักการแปลงพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้าของกันหันลม การทำงานของกังหันลม ภูมิประเทศที่เหมาะสมสำหรับพลังงานลม ผลกระทบของภูมิประเทศติดตั้งต่อการผลิตไฟฟ้า รวมถึงการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้านั้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีของลม

2.1.1 การเกิดลม

ลมเกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติทั่วโลก ลมที่พัดเปลี่ยนทิศตามฤดู อิทธิพลของภูมิประเทศและความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศในแต่ละพื้นที่ ลมเกิดจากอากาศที่เคลื่อนที่จากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

- ความแตกต่างของอุณหภูมิในที่สองแห่ง อากาศเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว ความหนาแน่นของอากาศจะลดลง อากาศจึงลอยตัวขึ้น อากาศเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นของอากาศมากกว่าจากบริเวณใกล้เคียงจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่ทำให้เกิดลม
- ความแตกต่างของความกดอากาศ อากาศเมื่อได้รับความร้อนจะมีความกดอากาศต่ำ ความหนาแน่นลดลงจึงลอยตัวสูงขึ้น อากาศเย็นที่มีความหนาแน่นมากกว่าและมีความกดอากาศสูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาหาบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำทำให้เกิดลม

2.1.2 พื้นที่ความกดอากาศ

พื้นที่ความกดอากาศ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

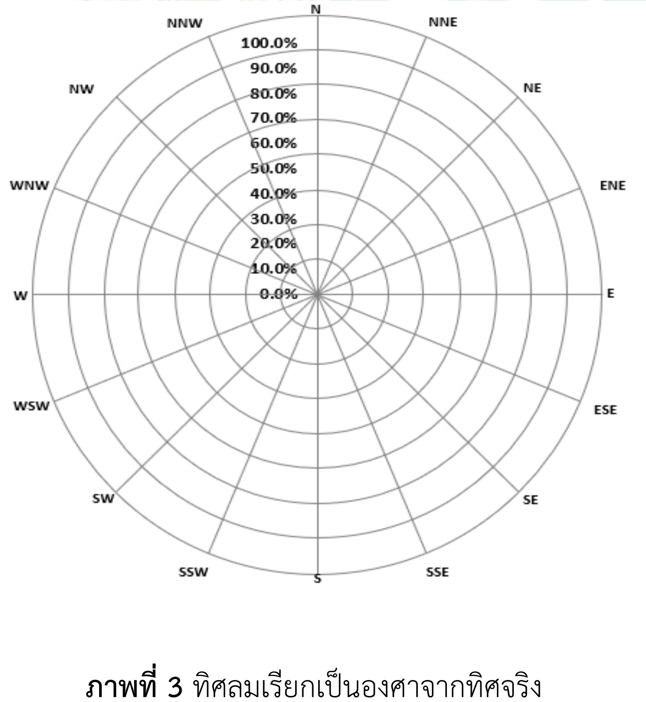
1. พื้นที่ความกดอากาศสูง (High pressure area) หมายถึง บริเวณที่มีความกดอากาศสูงกว่าบริเวณข้างเคียง กระแสลมจะพัดเวียนออกจากจุดศูนย์กลางในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ในซีกโลกด้านเหนือเส้นศูนย์สูตร) บริเวณที่มีความกดอากาศสูงนี้จะมีสภาพท้องฟ้าแจ่มใส อากาศเย็น

2. พื้นที่ความกดอากาศต่ำ (Low pressure area) หมายถึง บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำกว่าบริเวณข้างเคียง กระแสลมจะพัดเวียนออกจากจุดศูนย์กลางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ในซีกโลกด้านเหนือเส้นศูนย์สูตร) บริเวณที่มีความกดอากาศต่ำนี้ ท้องฟ้าจะมีเมฆมาก ถ้าหากมีความกดอากาศต่ำมากๆ จะเกิดพายุต่างๆ ขึ้น (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, ม.ป.ป.)

2.1.3 การวัดลม

การวัดลมมีพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด 2 พารามิเตอร์ คือ

1.1 ทิศลม อาจเรียกตามทิศของเข็มทิศ หรือองศาจากทิศจริง เข็มทิศจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ทิศ คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก แบ่งย่อยได้อีก 8 ทิศ คือทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันออกเฉียงใต้ และยังสามารถแบ่งย่อยเป็น 16 หรือ 32 ทิศ ได้อีก แต่การรายงานทิศนั้น นิยมรายงานเพียง 8 หรือ 16 ทิศเท่านั้น ส่วนการวัดทิศลมที่เป็นองศา จะนับจาก 0°-360° ตามเข็มนาฬิกา เช่น ทิศเหนือคือ 0° หรือ 360°, ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ คือ 45°, ทิศตะวันออก คือ 90°, ทิศตะวันออกเฉียงใต้ คือ 135°, ทิศใต้ คือ 180°, ทิศตะวันตกเฉียงใต้ คือ 225° เป็น, ทิศตะวันตก คือ 270° และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ คือ 315° ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ทิศลมเรียกเป็นองศาจากทิศจริง

ตารางที่ 1 ทิศลมและองศา

ตัวย่อ	ทิศทาง	มุม (องศา)
N	ทิศเหนือ	0, 360
NNE	ทิศเหนือค่อนตะวันออกเฉียงเหนือ	22.5
NE	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	ทิศ
ENE	ทิศตะวันออกเฉียงเหนือค่อนตะวันออก	67.5
E	ทิศตะวันออก	90
ESE	ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนตะวันออก	112.5
SE	ทิศตะวันออกเฉียงใต้	135
SSE	ทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนใต้	157.5
S	ทิศใต้	180
SSW	ทิศใต้ค่อยตะวันตกเฉียงใต้	202.5
SW	ทิศตะวันตกเฉียงใต้	225
WSW	ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนตะวันตก	247.5
W	ทิศตะวันตก	270
WNW	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนตะวันตก	292.5
NW	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	315
NNW	ทิศตะวันตกเฉียงเหนือค่อนเหนือ	337.5

1.2 ความเร็วลม อัตราการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีพลังงานจลน์ ทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัตถุใด ๆ ที่ปะทะลมได้ และแรงในรูปความกดดันเป็นสัดส่วนกับความเร็วลมยกกำลังสองหรือในรูปสมการ ดังสมการที่ 1

$p = 0.5\rho u^2$ สมการที่ 1

เมื่อ p คือ ความดันที่เกิดจากการกระทำของลม (นิวตันต่อตารางเมตร)

u คือ ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศเมตร)

แรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำของลม สามารถหาความเร็วลมได้โดยที่ไม่ต้องอาศัยเครื่องมือใด ๆ โดยการสังเกตจากวัตถุที่อยู่รอบ ๆ ส่งผลให้มีการกำหนดมาตราความเร็วลมที่ขึ้นกับลักษณะของลม เรียกว่ามาตราโบฟอร์ด (Beaufort scale) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับสิ่งที่กีดขวางบนบกและในทะเล โดยการสังเกตกำลังลมเหนือพื้นดินและในทะเล มาตราโบฟอร์ด เริ่มต้นจากมาตราที่ 0 ไปจนถึงมาตราที่ 17 ปัจจุบันมาตราโบฟอร์ดถูกนำมาใช้น้อยลง โดยเฉพาะสถานีบนบก เนื่องจากมีการใช้เครื่องมือวัดลมมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2 เป็นตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ดและปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 2 ตารางเทียบความเร็วลมและชนิดลมของมาตราโบฟอร์ด

มาตรา โบฟอร์ด	ความเร็วลม		ชนิดลม	ปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน
	น็อต	กม./ชม.		
0	1	1.6	ลมสงบ	ลมสงบ ควันลอยขึ้นตรง
1	1 – 3	1.6 – 4.8	ลมเบา	ทิศทางลมสังเกตได้จากควันที่ แต่ไม่ใช่จากศรลม
2	4 – 6	6.4 – 8.6	ลมอ่อน	รู้สึกมีลมปะทะหน้า ใบไม้เคลื่อนไหว ศรลมเริ่มหันทิศทางไปตามลม
3	7 – 10	12.8 – 19.2	ลมเฉื่อย	ใบไม้และกิ่งไม้เล็ก ๆ เคลื่อนไหวตลอดเวลา ธงคลี่ออกตามลม
4	11 – 21	20.8 – 28.8	ลมปานกลาง	ฝุ่นฟุ้ง กระดาษปลิว กิ่งไม้เล็ก ๆ โยก
5	17 – 21	30.4 – 38.4	ลมกระโชก	ต้นไม้เล็ก ๆ เริ่มโยก แหล่งน้ำบนบก เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง เป็นระลอก

ตารางที่ 2 (ต่อ)

มาตรา โบฟอร์ด	ความเร็วลม		ชนิดลม	ปรากฏการณ์ธรรมชาติเหนือพื้นดิน
	น็อต	กม./ชม.		
6	22 – 27	40.0 - 38.4	ลมแรง	กิ่งไม้ใหญ่โยก สายโทรเลขดังหวือๆ ไม่สะดวกที่จะใช้ร่ม
7	28 – 33	51.2 – 60.8	พายุปานกลาง	ต้นไม้โยก เดินต้านลมไม่สะดวก
8	34 – 40	62.4 – 73.6	พายุกระโชก	กิ่งไม้หัก เดินไปข้างหน้าไม่สะดวก
9	41 – 47	75-2 – 86.4	พายุแรง	สิ่งก่อสร้างเสียหายเล็กน้อย
10	48 – 55	88.0 – 100.8	พายุจัด	ต้นไม้ถอนราก สิ่งก่อสร้างเสียหายมาก
11	56 – 63	102.4 – 115.2	พายุจัด	สิ่งก่อสร้างเสียหายเป็นบริเวณกว้าง
12	64 – 71	116.8 – 131.2	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
13	72 – 80	132.8 – 147.3	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
14	81 – 89	148.8 – 164.8	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
15	90 – 99	166.4- 182.4	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
16	100 – 108	184.0 – 200.0	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก
17	109 – 118	201.6 – 217.6	เฮอร์ริเคน	สิ่งก่อสร้างเสียหายหนัก

2.1.4 ลมพื้นผิว (Surface wind)

ลมผิวพื้น (Surface winds) คือ ลมที่พัดจากบริเวณผิวพื้นไปยังความสูงประมาณ 1 กิโลเมตร เหนือพื้นดิน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการคลุกเคล้าของอากาศ และมีแรงฝืดอันเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วย ในระดับต่ำแรงความชันความกดอากาศในแนวนอนจะไม่สมดุลกับ แรงคอริออลิส (Coriolis) ลมผิวพื้นจะไม่พัดขนานกับเส้นความกดอากาศเท่า (Isobar) แต่พัดข้ามเส้นความกดอากาศเท่าจากความกดอากาศสูงไปยังความกดอากาศต่ำ และทำมุมกับเส้นความกดอากาศเท่า การทำมุมนั้นขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวพื้น ถ้าเป็นทะเลที่ราบเรียบจะทำมุม 10° -20° แต่พื้นดิน (ระดับความสูง 10 เมตร) ทำมุม 20°-40° ส่วนบริเวณที่เป็นป่าไม้หนาทึบ อาจทำมุมถึง 90° แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตร ขึ้นไป แรงต้านจะลดลงและความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น มุมที่ทำกับ

เส้นความกดอากาศเท่า จะเล็กลง ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตร เกือบไม่มีแรงฝืด ดังนั้นลมจึงพัดขนานเส้นความกดอากาศเท่า (สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ, ม.ป.ป.)

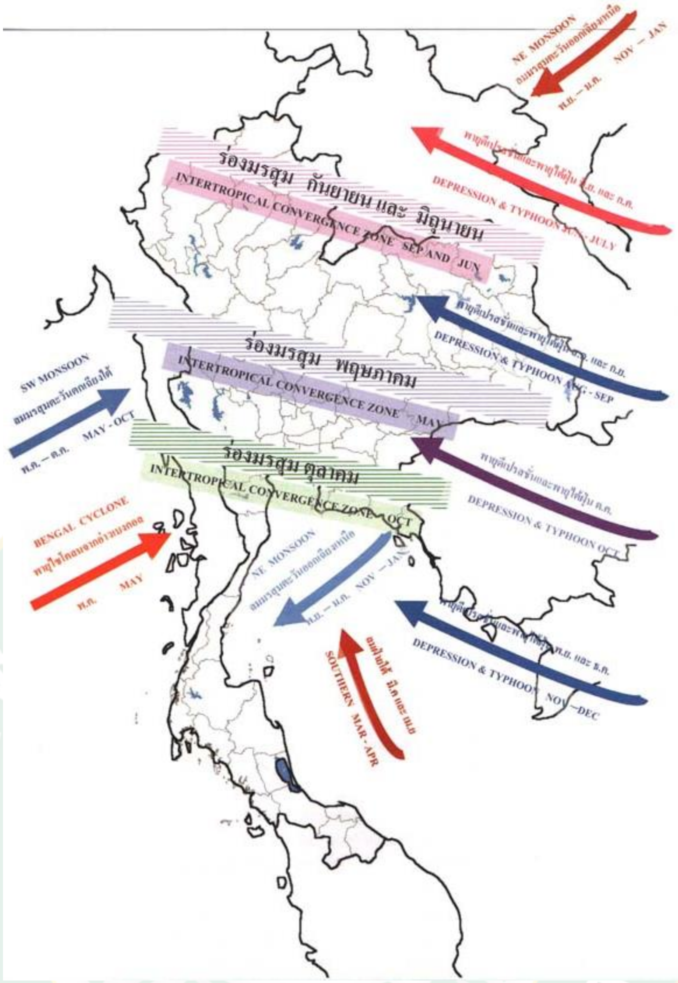
2.1.5 ลมสำคัญที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

ลมมรสุม (Monsoon) (กรมอุตุนิยมวิทยา, ม.ป.ป) ในฤดูร้อนของทวีปเอเชีย แผ่นดินจะได้รับความร้อนเต็มที่ ขณะที่ในฤดูหนาวแผ่นดินจะได้รับความเย็นเต็มที่โดยเฉพาะในบริเวณทางเหนือของเทือกเขาหิมาลัย ในฤดูหนาวอากาศจะหนักทำให้เกิดความกดอากาศสูงแต่ปกคลุมทั่วทวีปเอเชีย ในฤดูร้อนแผ่นดินจะร้อนระอุทำให้เกิดความกดอากาศต่ำ ลมมรสุมจึงเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความกดอากาศดังกล่าว กล่าวคือในมหาสมุทรอินเดียลมจะพัดจากทะเลสู่แผ่นดิน จากทิศตะวันตกเฉียงใต้และทิศใต้ในฤดูร้อน เมื่อถึงเดือนพฤศจิกายนทวีปเอเชียจะเริ่มเข้าสู่ฤดูหนาวซึ่งถูกปกคลุมด้วยลมหนาวที่เป็นอากาศแห้ง พัดจากทิศเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือลงใต้

ลมมรสุม มาจากคำในภาษาอาหรับว่า Mausim แปลว่า ฤดู ดังนั้นลมมรสุมจึงหมายถึง ลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางกลับการเปลี่ยนฤดูคือ ฤดูร้อนจะพัดในทิศทางหนึ่ง และจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว ครั้งแรกใช้เรียกลมนี้ในบริเวณทะเลอาหรับซึ่งพัดอยู่ในทิศทางตะวันออกเฉียงเหนือเป็นระยะเวลา 6 เดือน และพัดอยู่ในทิศทางตะวันตกเฉียงใต้เป็นระยะเวลา 6 เดือน แต่อยู่ในส่วนอื่น ๆ ของโลก ลมมรสุมที่เห็นชัดเจนที่สุดคือ ลมมรสุมที่เกิดขึ้นในเอเชียตะวันออกและเอเชียใต้

ลักษณะการเกิดลมมรสุม คือ ในฤดูหนาวอากาศภายในภาคพื้นทวีปเย็นกว่าอากาศในมหาสมุทรที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้ภาคพื้นทวีปบริเวณไซบีเรียเป็นเขตความกดอากาศสูงอุณหภูมิต่ำ มหาสมุทรอินเดียเป็นเขตความกดอากาศต่ำอุณหภูมิสูง อากาศที่มีอุณหภูมสูงกว่าจะลอยตัวสูงขึ้น และอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา อากาศที่ไหลออกจากบริเวณความกดอากาศสูงจะไหลจมในทิศทางเบนไปทางขวา กลายเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือผ่านเข้าไปยังเอเชียตะวันออกและเอเชียใต้ โดยทั่วไปมีลักษณะอากาศดีและอากาศแห้ง ลมมรสุมฤดูหนาวจึงมีลักษณะของท้องฟ้าแจ่มใส

ในฤดูร้อนลมจะพัดเปลี่ยนในทิศทางตรงกันข้าม อากาศภาคพื้นทวีปอุ่นกว่าพื้นน้ำ ซึ่งทำให้ภาคพื้นทวีปเป็นเขตความกดอากาศต่ำ พื้นน้ำเป็นเขตความกดอากาศสูง เกิดลมพัดจากพื้นน้ำที่เป็นเขตความกดอากาศสูงเข้าสู่พื้นดินที่เป็นเขตความกดอากาศต่ำ ในทิศทวนเข็มนาฬิกากลายเป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ลมที่พัดจากพื้นน้ำเข้ามา นำเอาความชื้นมาด้วย



ภาพที่ 4 ทิศทางการพัดพาของลมมรสุม

ที่มา: สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ กรมชลประทาน, 2558

มรสุมที่มีกำลังแรงจัดที่สุด เกิดขึ้นในบริเวณเอเชียตะวันออก และเอเชียใต้ เอเชียตะวันออก ได้แก่ ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ไต้หวัน ญี่ปุ่น และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนเกาหลี ลมมรสุมที่เกิดในเอเชียตะวันออกจะแตกต่างจากเอเชียใต้คือ ในเอเชียตะวันออก ลมมรสุมฤดูหนาวมีกำลังแรงกว่าและมีทิศทางที่คงที่กว่ามรสุมฤดูร้อน ความเร็วลมตามชายฝั่งในเดือนมกราคม จะมีมากกว่าเดือนกรกฎาคมหลายเท่า ส่วนลมมรสุมในเอเชียใต้ รวมทั้งประเทศอินเดีย ปากีสถาน และประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ลมมรสุมฤดูหนาวไม่สามารถแผ่เข้าไปถึงดินแดนเหล่านี้ได้ เพราะมีเทือกเขาหิมาลัยขวางกั้นอยู่ ดังนั้นเอเชียใต้จึงได้รับมรสุมโดยตรงเฉพาะในช่วงฤดูร้อนเท่านั้น และลมจะมีกำลังแรงในฤดูร้อน แม้แต่ในมหาสมุทร คือฤดูร้อนลมมีความเร็วเฉลี่ย 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ส่วนฤดูหนาวลมมีกำลังอ่อน มีความเร็วน้อยกว่า 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บริเวณที่มีฝนตกหนัก เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมฤดูร้อนคือ เมืองเชอร์ราปันจิ ทางภาคตะวันออกของประเทศอินเดีย มีปริมาณฝนตกในแต่ละปีประมาณ 10,800 มิลลิเมตร ส่วนใหญ่จะมีฝนตกในช่วงเดือนเมษายนถึงตุลาคม ฝนที่ตกมีประโยชน์ทางด้านการเกษตร ทำให้พืชผลเจริญเติบโต เนื่องจากบริเวณที่มีฝนอากาศแห้ง แต่ฝนที่ตกลงมามีข้อเสีย เนื่องจากช่วงเวลาที่ฝนตกจะมีความไม่แน่นอนรวมทั้งความแรงของฝน สำหรับประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้ง 2 ฤดู คือ ในช่วงฤดูฝนประมาณต้นเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนต้นเดือนตุลาคม ได้รับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และต่อมาเป็นช่วงฤดูหนาว ดังแสดงในภาพที่ 4

นอกจากลมมรสุมที่เกิดขึ้นทวีปเอเชียแล้ว ยังมีลมมรสุมที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนอื่นของโลก เช่น ทางภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย เมื่อลมมรสุมพัดข้ามเส้นศูนย์สูตรจะเปลี่ยนทิศทางเป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงเหนือพัดเข้าสู่ทางภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย ซึ่งมีแนวเขตลมค้าเบียดตัวเข้าหากันพาดผ่านอยู่ เป็นแนวแบ่งเขตระหว่างลมค้าตะวันออกเฉียงเหนือของซีกโลกเหนือกับลมค้าตะวันออกเฉียงใต้ของซีกโลกใต้ รวมทั้งมีลมมรสุมเกิดขึ้นในอ่าวกินีของแอฟริกาตะวันออกบางส่วนของทวีปอเมริกาเหนือ และบางส่วนของทวีปอเมริกาใต้

ลมประจำถิ่น เป็นลมที่เกิดขึ้นภายในท้องถิ่นเนื่องจากอิทธิพลของภูมิประเทศและความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศประจำถิ่น แบ่งแยกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1) ลมบกและลมทะเล เป็นลมประจำถิ่น เกิดจากความแตกต่างของความกดอากาศระหว่างทะเลกับแผ่นดิน ลมทะเล (Sea breeze) เกิดขึ้นในฤดูร้อนตามชายฝั่งทะเลในเวลากลางวัน เนื่องจากพื้นดินจะมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นดินเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัวลอยขึ้น อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งเย็นกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ เกิดเป็นลมพัดจากทะเลเข้าหาฝั่ง เรียกว่า ลมทะเล

ลมบก (Land breeze) เกิดในเวลากลางคืน พื้นดินจะคายความร้อนได้เร็วกว่าพื้นน้ำ ทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นน้ำ อากาศเหนือพื้นน้ำซึ่งร้อนกว่าพื้นดินจะลอยตัวขึ้น อากาศเหนือพื้นดินซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้าไปแทนที่ ทำให้เกิดเป็นลมพัดจากชายฝั่งไปสู่ทะเล เรียกว่า ลมบก

2) ลมภูเขาและลมหุบเขา เกิดขึ้นเองตามความแตกต่างของความกดอากาศในเวลากลางคืนจากความแตกต่างของความกดอากาศบริเวณภูเขา กล่าวคือ บริเวณภูเขาที่ระดับสูงจะมีอากาศเย็นกว่าที่ระดับต่ำ

ลมหุบเขา (Valley breeze) เกิดในช่วงกลางวัน อากาศตามภูเขาและลาดเขาร้อนเพราะได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ ส่วนอากาศที่หุบเขาด้านล่างมีความเย็นกว่าจึงไหลเข้าแทนที่ ทำให้ลมเย็นจากหุบเขาเบื้องล่างพัดไปตามลาดเขาขึ้นสู่เบื้องบน เรียกว่า ลมหุบเขา

ลมภูเขา (Mountain breeze) เกิดในเวลากลางคืน อากาศตามภูเขาและลาดเขาจะเย็นอย่างรวดเร็ว อากาศลาดเขาที่เย็นกว่า จึงไหลออกมาทำให้มีลมพัดมาจากลาดเขาสู่หุบเขาเบื้องล่าง เรียกว่า ลมภูเขา

3) ลมตะเภา ลมตะเภา (Southwest local wind) เป็นลมท้องถิ่นในประเทศที่พัดจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ คือ พัดจากอ่าวไทยเข้าสู่ภาคกลางตอนล่าง ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้

4) ลมว่าว ลมว่าว (Northeast local wind) เป็นลมที่พัดจากทิศเหนือไปทิศใต้ตอนต้นฤดูหนาว เกิดในระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนพฤศจิกายน เป็นลมเย็นที่พัดตามลำน้ำเจ้าพระยา และพัดในช่วงที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเปลี่ยนเป็นลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หรืออาจจะเรียกว่า ลมข้าวเบา เพราะพัดในช่วงที่ข้าวเบากำลังออกรวง ส่วนลมในฤดูเล่นว่าว คือ ลมตะเภา ซึ่งพัดจากทิศใต้ไปทิศเหนือในช่วงกลางฤดูร้อน ทั้งลมว่าวและลมตะเภาเป็นลมท้องถิ่นในประเทศ

2.1.6 ตัวเซนเซอร์ของลูกถ้วยและใบพัด (Cup and propeller sensors)

เครื่องวัดลมแบบลูกถ้วยและใบพัด โดยทั่วไปจะใช้เพื่อตรวจสอบอัตราเร็วลม มีส่วนประกอบย่อย 2 ส่วน คือ ตัวที่หมุนรอบ (Rotor) และ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) ในระบบที่ออกแบบไว้ดี ความเร็วเชิงมุมของลูกถ้วยหรือใบพัดที่หมุนต้องเป็นสัดส่วนโดยตรงต่ออัตราเร็วลม ในกรณีของตัวหมุนใบพัด ส่วนประกอบของอัตราเร็วลมต้องขนานกับแกนของการหมุน นอกจากนี้การออกแบบเครื่องวัดอัตราเร็วลมที่ดีนั้น การสอบเทียบอัตราเชิงเส้น (Linearity) ต้องเป็นอิสระกับความหนาแน่นอากาศ และตั้งค่าศูนย์ไว้อย่างดีและมีเสถียรภาพในพิสัยของอัตราเร็วลมที่วัด โดยสามารถทดสอบได้โดยง่ายในกระบวนการผลิต ทั้งนี้ที่ใกล้จุดเริ่มต้นของอัตราเร็วที่วัดหรือช่วงอัตราลมต่ำกว่า 4 เมตรต่อวินาที การสอบเทียบเครื่องวัดอัตราลมแบบลูกถ้วยสามารถคลาดเคลื่อนจากอัตราเชิงเส้นได้มาก หากแขนเชื่อมต่อกับลูกถ้วยกับแกนหมุนยาวกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกถ้วยมากไป ลักษณะการตอบสนองของอัตราลมประเภทลูกถ้วยและใบพัด ต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลมสามารถตรวจสอบโดย “ระยะการตอบสนอง (Response length)” ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับโมเมนต์ของความเฉื่อยของตัวหมุนและยังขึ้นอยู่กับปัจจัยทางเรขาคณิตของเครื่องวัดอัตราเร็วลมดังกล่าว

สำหรับตัวเซนเซอร์ลมประเภทลูกถ้วยและใบพัดเกือบจะทั้งหมด มีการตอบสนองที่ดีกว่าสำหรับอัตราเร็วลมที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงที่อัตราเร็วลมลดลง ดังนั้นอัตราเฉลี่ยของตัวหมุน เหล่านี้จะให้ค่าอัตราเร็วลมเฉลี่ยมากเกินความเป็นจริง นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงลมในแนวตั้งสามารถทำให้ลูกถ้วยหมุนมากกว่าที่ควร เนื่องจากลูกถ้วยสามารถหมุนคล่องขึ้นจากลมที่เฉียง การหมุนของลูกถ้วยที่เกินควรนี้อาจมีค่ามากถึงร้อยละ 10 ในเครื่องวัดลมแบบลูกถ้วยบางชนิดและภายใต้ความ

ปั่นป่วนของลม (เครื่องวัดอัตราลมลูกถ้วยที่ความสูง 10 เมตร ด้วยระยะการตอบสนองที่ 5 เมตร เหนือพื้นดินที่ขรุขระมาก) ผลกระทบนี้สามารถลดให้เหลือน้อยที่สุดได้โดยเลือกเครื่องวัดอัตราเร็วลมที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วโดยเครื่องวัดอัตราเร็วลมชนิดลูกถ้วยที่ตรวจสอบยืนยันแล้วว่ามีการตอบสนองในรูปกราฟโคซาน (Cosine response) ที่ดี หรือในกรณีเครื่องวัดอัตราลมแบบใบพัดนั้นไม่ควรมีส่วนประกอบที่ทำให้เกิดค่าการหมุนที่เกินควรในแนวตั้งเกิดขึ้น ในทางปฏิบัติไม่สามารถสอบเทียบในอุโมงค์ลมได้ ให้สอบเทียบเครื่องวัดอัตราลมที่ใช้งานเปรียบเทียบกับเครื่องวัดอัตราลมมาตรฐานในสนาม

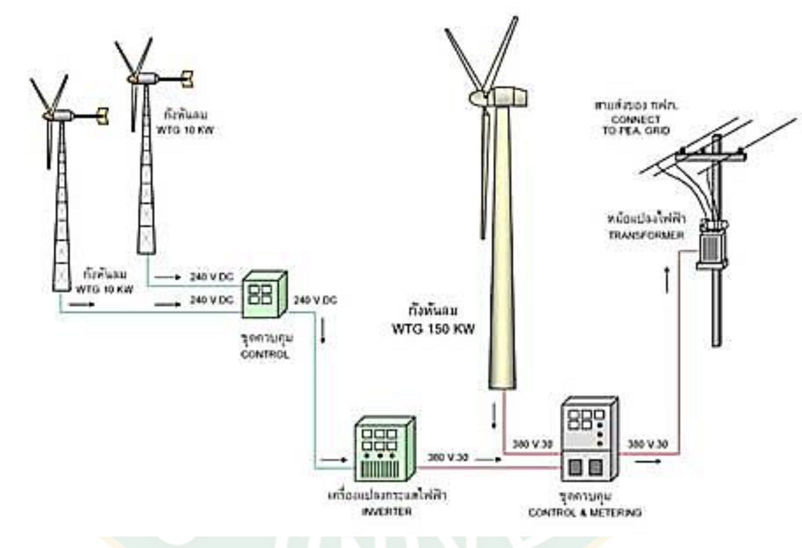
2.1.7 ศรวัดทิศทางลม

ในการติดตั้งศรลมนั้นควรอยู่ในลักษณะสมดุล ไม่เอียงหรือมีแนวโน้มไปทิศใดทิศหนึ่ง กรณีมีหางลูกศรมากกว่าหนึ่งหางควรอยู่ในตำแหน่งที่ขนานกับแกนลูกศรเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาด การตอบสนองของศรลมที่ไม่มีความหน่วง ศรลมจะเปลี่ยนแปลงทันทีตามทิศทางลม ทำให้แสดงตำแหน่งไม่ทรงตัวและแกว่งไปมารอบตำแหน่งที่แท้จริง โดยการแกว่งจะลดลงเรื่อย ๆ ตัวแปรสองค่าที่ใช้เพื่ออธิบายการตอบสนองนี้คือ "ความถี่อิสระโดยธรรมชาติที่ไม่มีความหน่วง" (Undamped natural frequency) หรือ "ความยาวคลื่น" (Wavelength) และ “อัตราส่วนการหน่วง” (Damping ratio) คือ อัตราส่วนการหน่วงตามความเป็นจริงกับความหน่วงวิกฤต อัตราส่วนการหน่วงที่มีค่าระหว่าง 0.3 และ 0.7 ถือได้ว่าเป็นช่วงที่ดี ไม่เกิดการแกว่งเป้ามากเกินไป รวมทั้งตอบสนองได้รวดเร็วพอควร สำหรับในกรณีที่ค่าเฉลี่ยสำหรับคาบเวลาที่ค่อนข้างยาวถูกประมาณค่าจากข้อมูลที่ตรวจได้ในระยะเวลาสั้น ๆ อาจยอมรับค่าอัตราความหน่วงที่มีค่าต่ำได้ เครื่องกำเนิดสัญญาณโดยแท้จริงแล้วคือ Shaft-angle transducer หรือเครื่องมือที่ทำหน้าที่คล้ายกันชนิดอื่น ๆ เช่น Potentiometer, Alternating and direct synchros, Digital angle-encoder disc, Direct reading dial, Rotary switches เป็นต้น การเลือกใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณส่วนใหญ่ขึ้นกับประเภทของหน่วยวิเคราะห์ข้อมูล และหน่วยอ่านข้อมูล ทั้งนี้ผู้ใช้ควรดูแลเพื่อให้แน่ใจว่าเฟืองและเครื่องกำเนิดสัญญาณมีค่าความฝืดในการหมุนที่ต่ำ วิธีการบันทึกข้อมูลอย่างง่ายคือ การติดตั้งแผ่นบันทึกรอบทรงกระบอกที่หมุนรอบแกนของศรลม ปากกาจะเขียนข้อมูลลงบนแผ่นกระดาษที่เคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ความถูกต้องสมบูรณ์ของการวัดทิศทางยังขึ้นอยู่กับการดูแลเครื่องมือที่ปรับให้ตรงกับทิศเหนือจริง

2.2 การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

หลักการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

หลักการทำงานทั่วไปของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.) เมื่อมีกระแสลมพัดมาปะทะกับใบพัดของกังหันลม กังหันลมจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมที่อยู่ในรูปแบบของพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานกล ใบพัดเกิดการหมุนแรงจากการหมุนของใบพัดนี้จะถูกส่งผ่านเพลาแกนหมุน ทำให้เฟืองขับเคลื่อนหรือเฟืองเกียร์ ที่ติดอยู่กับเพลาแกนหมุน ๆ ตามไปด้วย เมื่อเฟืองขับเคลื่อนของกังหันลมเกิดการหมุน จะขับเคลื่อนให้เพลาแกนหมุนที่ต่อเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนินไฟฟ้าออกมา ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม ความยาวของใบพัด และสถานที่ที่ติดตั้งกังหันลมดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

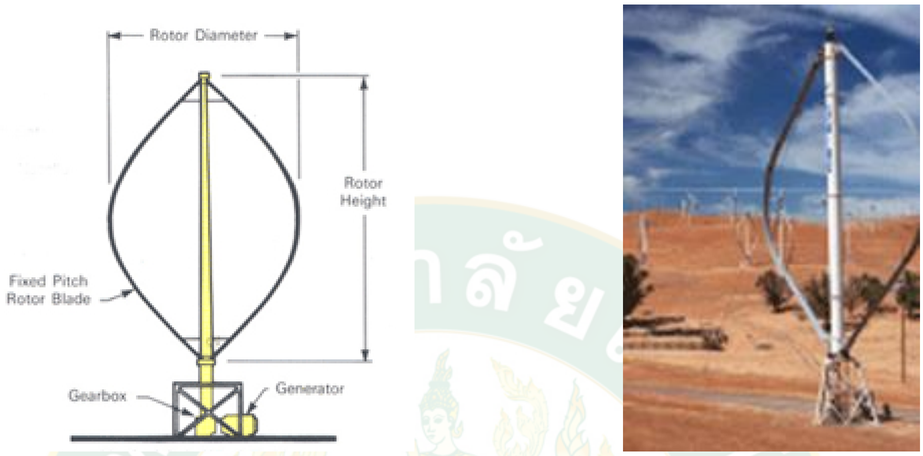
ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.

ชนิดของกังหันลม

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีกังหันลมเพื่อใช้สำหรับผลิตไฟฟ้าได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง หลายประเทศทั่วโลกได้ให้ความสนใจ โดยเฉพาะในทวีปยุโรป เช่น ประเทศเดนมาร์ก กังหันลมที่ได้มีการพัฒนากันขึ้นมานั้นจะมีลักษณะและรูปร่างแตกต่างกันออกไป แต่ถ้าจำแนกตามลักษณะแนวแกนหมุนของกังหันจะได้ 2 แบบ คือ

1) กังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง ดังแสดงในภาพที่ 6



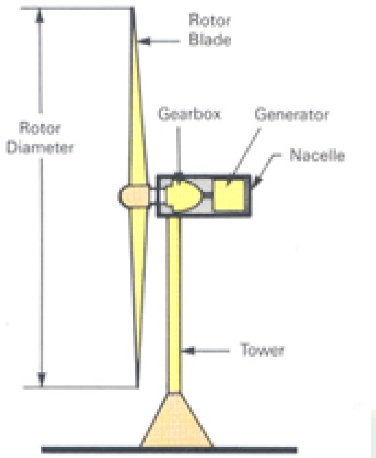
ภาพที่ 6 กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง (Vertical axis wind turbine)

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.

แม้ว่ากังหันลมแบบแนวแกนนอนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนมากออกแบบให้เป็นชนิดที่ขับใบกังหันด้วยแรงยก แต่อย่างไรก็ตาม กังหันลมแบบแนวแกนตั้ง ซึ่งได้รับการพัฒนามากในระยะหลังก็ได้รับความสนใจมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีกว่าแบบแนวแกนนอนคือ ในแบบแนวแกนตั้งนั้นไม่ว่าลมจะเข้ามาทิศไหนก็ยังหมุนได้ โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ควบคุมให้กังหันหันหน้าเข้าหาลม นอกจากนี้แล้วแบบแนวแกนตั้งนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบการส่งกำลังวางไว้ใกล้พื้นดินมากกว่าแบบแกนนอน เวลาเกิดปัญหาแก้ไขง่ายกว่าแบบแกนนอนที่ติดอยู่บนหอคอยสูง

2) กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal axis wind turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลมโดยมีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม มีอุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า หางเสือ และมีอุปกรณ์ป้องกันกังหันชำรุดเสียหายขณะเกิดลมพัดแรง เช่น ลมพายุและตั้งอยู่บนเสาที่แข็งแรง ดังแสดงในภาพที่ 7 กังหันลมแบบแกนนอน ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน นิยมใช้กับเครื่องฉุดน้ำ กังหันลมแบบกงล้อจักรยาน กังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าแบบพรอบเพลเลอร์ (Propeller)

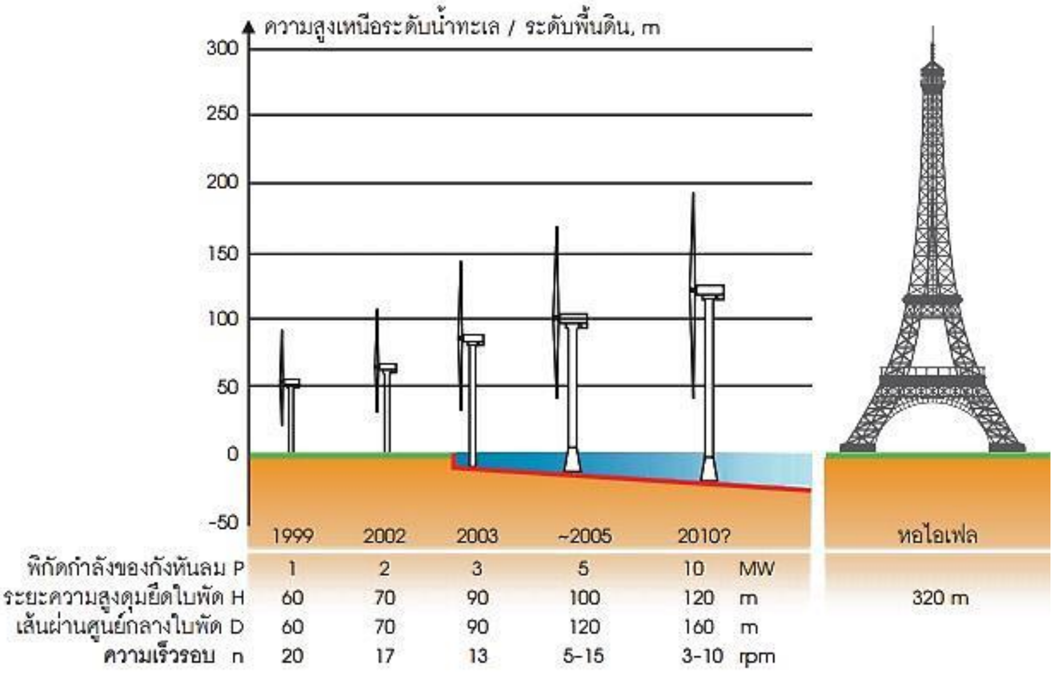


ภาพที่ 7 กังหันลมแบบแนวแกนนอน (Horizontal axis wind turbine)

ที่มา: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ม.ป.ป.

2.3 พิกัดความเร็วรอบชุดแกนหมุนใบพัด (Rated rotor speed)

พิกัดความเร็วรอบชุดแกนหมุนใบพัด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) เป็นความเร็วรอบต่ำสุดของชุดแกนหมุนใบพัดที่ทำให้กังหันลมสกัดพลังงานจากลมได้เท่ากับพิกัด (ต้องสอดคล้องกับความเร็วพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมีค่าพิกัดความเร็วรอบชุดแกนหมุนใบพัดสูงระหว่าง 100-500 รอบต่อนาที กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่ชุดแกนหมุนใบพัดต่อกับเพลาความเร็วรอบต่ำมีค่าต่ำ ระหว่าง 5-20 รอบต่อนาที โดยมีแนวโน้มการขยายขนาดและเพิ่มความสูงของกังหันลมซึ่งทำให้พิกัดความเร็วรอบชุดแกนหมุนใบพัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 8

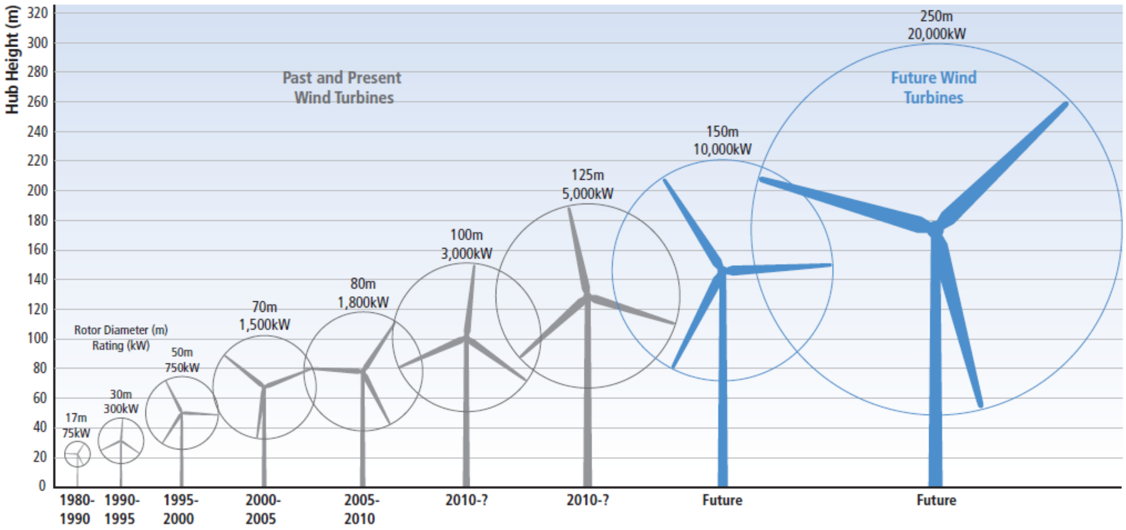


ภาพที่ 8 แนวโน้มการขยายขนาดและเพิ่มความสูงของกังหันลม

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557

2.4 ขนาดและกำลังผลิตของกังหันลม

กังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า (Wind turbine for electric) เป็นกังหันลมที่รับพลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ของลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล จากนั้นนำพลังงานกลมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันมีการนำมาใช้งานทั้ง กังหันลมขนาดเล็ก (Small wind turbine) และกังหันลมขนาดใหญ่ (Large wind turbine) ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะแปรผันตรงต่อขนาดของกังหันดังแสดงในภาพที่ 9 และขนาดของกังหันก็จะขึ้นอยู่กับศักยภาพของลมในพื้นที่เช่นกัน (Green intreand.com, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 9 ขนาดและกำลังผลิตของกังหันลม ออกแบบโดย

The National Renewable Energy Laboratory (IPCC, 2001)

ที่มา: Green intreand.com, ม.ป.ป.

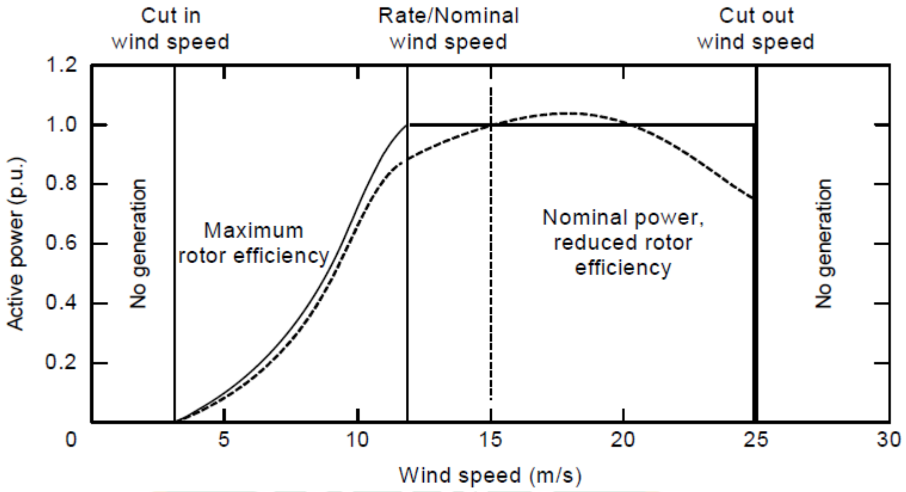
2.5 การทำงานของกังหันลมและรูปแบบการเชื่อมโยง

การทำงานของกังหันลม (วิภาอร เศรษฐศิรินนท์ และคณะ, 2550) สามารถอธิบายได้จากรูป Power Curve ของกังหันลมของแต่ละผู้ผลิต ดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมจะมีลักษณะการทำงานดังนี้

1. ที่ความเร็วลมต่ำ (1-3 เมตรต่อวินาที) กังหันลมจะยังไม่ทำงาน ในช่วงความเร็วลมนี้ กังหันลมจะยังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ที่ความเร็วลมระหว่าง 2.5-5 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะเริ่มทำงาน เรียกช่วงนี้ว่า “Cut in wind speed”

2. ที่ความเร็วลมช่วงประมาณ 12-15 เมตรต่อวินาที เรียกว่า “Nominal หรือ Rated wind speed” เป็นช่วงที่กังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้า และกำลังผลิตจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ถึงพิกัดกำลังสูงของกังหันลม โดยมีกำลังผลิตสูงสุดเท่ากับ Installed capacity ของกังหันลม ค่าความเร็วลมที่แน่นอนขึ้นกับอัตราส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัด และการออกแบบที่จุดต่ำกว่า Nominal คือ “Maximum rotor efficiency” ซึ่งขึ้นกับ “Tip speed ratio”

3. ที่ช่วงความเร็วลมสูงกว่า Cut-out speed (ค่าประมาณ 25 เมตรต่อวินาที) กังหันลมจะหยุดทำงาน เนื่องจากเมื่อมีความเร็วลมที่สูงเกินไปพัดผ่านกังหันลม จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมและเป็นอันตรายต่อบริเวณโดยรอบได้



ภาพที่ 10 แสดง Power curve ของกังหันลม

ที่มา: วิภาอร เศรษฐศิรินนท์ และคณะ, 2550

สามารถประมาณการพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก Power curve ของกังหันลม ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลมจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับความเร็วลม แต่ความสัมพันธ์นี้ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรง ดังแสดงในสมการที่ 5

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) = ผลของ Speed frequency distribution (ชั่วโมง) × Power curve สมการที่ 5

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสูตร ยังไม่รวมค่าความสูญเสีย (Loss) ที่เกิดขึ้นจริงในระบบเจอเนอร์เรเตอร์, เครื่องจักรกล, ผลของพลศาสตร์ของลม หากต้องการค่าใกล้เคียงพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายจริง ต้องคูณด้วยตัวแฟกเตอร์ประสิทธิภาพของกังหันลม ประมาณร้อยละ 90 จึงสามารถประเมินความเหมาะสมของกังหันลมในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ ดังสมการที่ 6

$$\text{Capacity factor (CF)} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงตลอดปี (กิโลวัตต์ชั่วโมง)}}{\text{[กำลังผลิตไฟฟ้าของกังหัน (กิโลวัตต์)} \times \text{ชั่วโมงการผลิตใน 1 ปี (ชั่วโมงต่อปี)]}}$$

สมการที่ 6

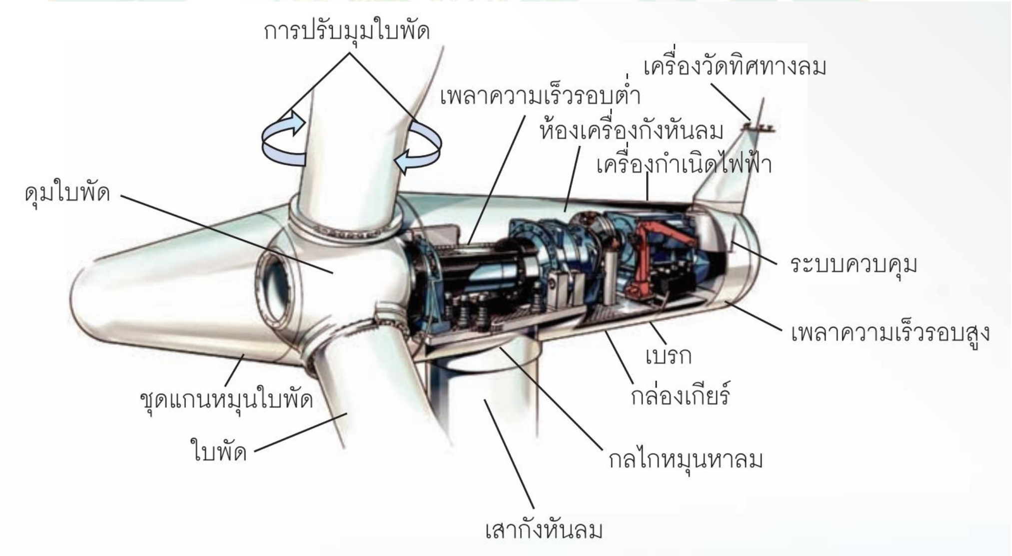
เมื่อ ค่าแฟคเตอร์ประสิทธิภาพของกังหันลมในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีค่าร้อยละ 10-20

รูปแบบการเชื่อมโยงของกังหันลมในการผลิตกระแสไฟฟ้ามี 2 รูปแบบ ได้แก่

1. การใช้กังหันลมจ่ายพลังงานไฟฟ้าร่วมกับแหล่งพลังงานอื่นโดยไม่เชื่อมโยงกับระบบจำหน่าย (Iso-rated grid) เช่น กังหันลมร่วมกับพลังน้ำขนาดเล็ก (Mini hydro) หรือกังหันลมร่วมกับพลังแสงอาทิตย์ เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกล
2. การใช้กังหันลมจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ากับระบบจำหน่าย (Grid connect) โดยไฟฟ้าจากกังหันลมเป็นไฟฟ้าเสริมจากไฟฟ้าหลัก เช่น โรงไฟฟ้าจากก๊าซ โรงไฟฟ้าถ่านหิน หรือพลังงานน้ำจากเขื่อน

2.6 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมขนาดใหญ่สำหรับผลิตไฟฟ้า

ห้องเครื่องกังหันลม (Nacelle) ห้องเครื่องจักรกลของกังหันลมผลิตไฟฟ้า ภายในประกอบด้วยอุปกรณหลัก ๆ ได้แก่ ระบบเกียร์ (อาจจะไม่มีในกรณีที่เป็นกังหันลมแบบไม่มีเกียร์ทด) ระบบเบรก ระบบส่งกำลัง ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ส่วนควบคุม ห้องเครื่องของกังหันลมขนาดใหญ่จะมีหลังคาด้านบนเป็นแพลตฟอร์มใช้รับส่งพนักงานและเครื่องมือต่าง ๆ ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมกังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ห้องเครื่องกังหันลมแบบมีเกียร์ทด

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557

1. ใบพัด เป็นตัวรับพลังลมและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล ซึ่งยึดติดกับชุดแกนหมุนและส่งแรงจากแกนหมุนไปยังเพลาแกนหมุน จำนวนใบกังหันอาจมีตั้งแต่หนึ่งถึงหลายสิบใบ กังหันลมที่มีจำนวนใบมากส่วนใหญ่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิด (Torque) สูง ในทางตรงข้ามกังหันที่มีจำนวนใบน้อยส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ ต้องการความเร็วรอบสูง แรงบิด (Torque) ต่ำ เช่น การผลิตไฟฟ้า รูปหน้าตัดของใบกังหันอาจมีตั้งแต่ลักษณะแพนอากาศ (Airfoil) หรือลักษณะคล้ายปีกเครื่องบิน เป็นแผ่นโค้งและเป็น แผ่นราบตรง วัสดุที่ใช้ทำใบกังหันควรจะเป็นวัสดุเบาและแข็งแรงซึ่งอาจเป็นอลูมิเนียมอัลลอยด์แผ่นเหล็ก ไม้ และไฟเบอร์กลาส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบ

2. เพลาแกนหมุน รับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

3. ห้องส่งกำลัง เป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4. ห้องเครื่อง มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่าง ๆ ของกังหันลม เช่น ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม

5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

6. ระบบควบคุมไฟฟ้า ใช้ระบบคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

7. ระบบเบรค เป็นระบบกลไกเพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลม เกินความสามารถของกังหัน ที่จะรับได้ และในระหว่างการซ่อมบำรุงรักษา

8. แกนคอหมุนรับทิศทางลม เป็นตัวควบคุมการหมุนห้องเครื่อง เพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบอิเลคทรอนิคส์ ที่เชื่อมต่อให้มีความสัมพันธ์ กับหางเสือรับทิศทางลมที่อยู่ด้านบนของเครื่อง

9. เครื่องวัดความเร็วลมและทิศทางลม เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมกลไกอื่น ๆ ได้ถูกต้อง

10. เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน

2.7 ระบบควบคุมกังหันลม

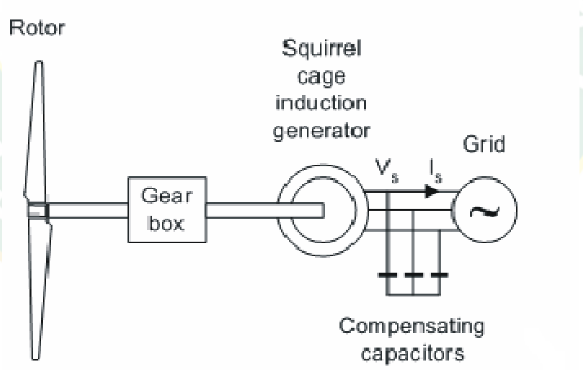
ระบบควบคุมในชุดกังลม (นิพนธ์ เกตุจ้อย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, 2547) จะต้องอาศัยข้อมูลของความเร็วจากอุปกรณ์วัความเร็วลม Anemometer และข้อมูลทิศทางของกระแสลมจากอุปกรณ์ Wind vane ในการควบคุม ซึ่งระบบควบคุมในชุดกังหันลมส่วนใหญ่จะมี 2 ชนิด

1. ระบบควบคุมทิศทางของกังหันลม ทำหน้าที่ควบคุมให้กังหันลมให้หันหน้าเข้าหาทิศทางลมตลอดเวลา หันไปข้าง ๆ หันเงยหน้าขึ้น หรือทำให้ใบกังหันหุบตัวเพื่อให้มีพื้นที่ของกังหันที่รับกระแสลมน้อยลงเมื่อความเร็วสูงเกิน

2. ระบบควบคุมความเร็วรอบของเพลา เป็นระบบควบคุมที่จะมีการทดรอบให้สอดคล้องกันระหว่างความเร็วรอบของแกนกังหันลมกับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อป้องกันการเสียหาย หากความเร็วลมสูง ๆ แรงลมที่ปะทะใบกังหันจะมาก กังหันลมจึงถูกออกแบบให้มีระบบควบคุมกังหันลมเมื่อมีค่าความเร็วสูง โดยค่าที่รับได้นี้เป็นค่าที่จำกัดค่าหนึ่ง โดยการควบคุมให้เกิดการหน่วงต่อการหมุนของกังหันลม อาจทำได้โดยการเพิ่มชิ้นส่วนที่ทำให้เกิดแรงหน่วงขึ้นอย่างสูง เมื่อถึงจุดของความเร็วที่กำหนดไว้ หรือปิดมุมของใบกังหันเมื่อมีความเร็วลมที่สูงมาปะทะ

โดยที่ทั้ง 2 ระบบนี้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่ใช้ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

- กังหันลมแบบความเร็วคงที่ (Fixed speed with directly grid-couple (Asynchronous) squirrel cage induction generator) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด (Rotor) กล่องเกียร์ (Gear box) ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (Squirrel cage induction generator) ชุดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้ากับระบบสายส่งไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 12

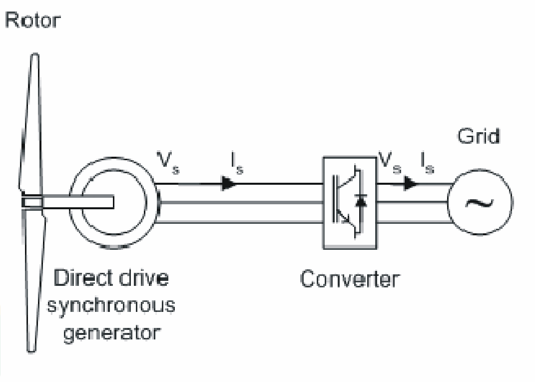


ภาพที่ 12 กังหันลมแบบความเร็วคงที่

ที่มา: นิพนธ์ เกตุจ้อย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, 2547

- กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง (Variable speed based on a direct drive and synchronous generator) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิด

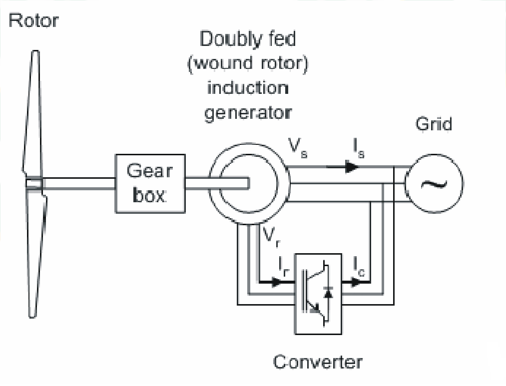
ไฟฟ้าแบบซิงโครนัสโดยตรง และมีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ชนิดต่อตรง

ที่มา: นิพนธ์ เกตุจ้อย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, 2547

- กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่ (Variable speed with doubly fed induction generator) กังหันลมชนิดนี้ประกอบไปด้วย ใบพัด กล่องเกียร์ เชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิด ดังแสดงในภาพที่ 14



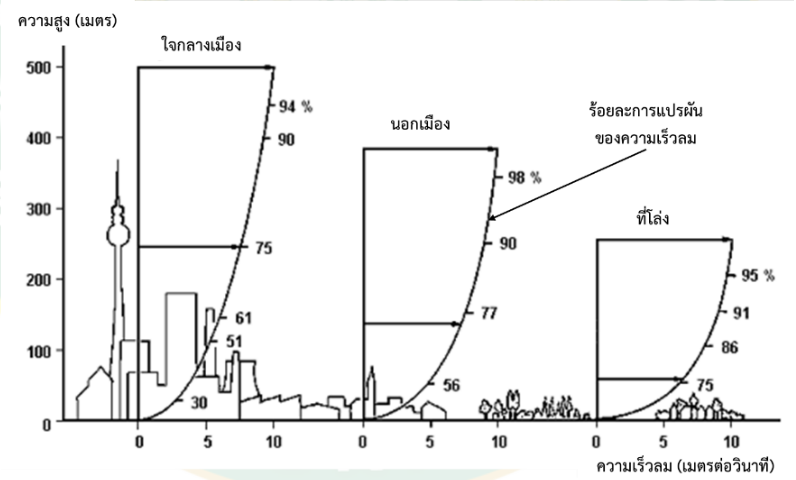
ภาพที่ 14 กังหันลมแบบความเร็วไม่คงที่

ที่มา: นิพนธ์ เกตุจ้อย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์, 2547

2.8 ผลของสัณฐานวิทยาที่ดินต่อร้อยละการแปรผันของความเร็วลม

ความขรุขระของพื้นดินส่งผลกระทบต่อความเร็วลม (D. Al Katsaprakakis and D.G. Christakis, 2012) โดยลมจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามความสูงเหนือพื้นดินที่มากขึ้น กล่าวคือหากทำการวัดลมที่ระยะความสูงต่าง ๆ ระยะความสูงมากสุดที่ทำการวัดในแต่ละครั้ง จะมีความเร็วลมมากกว่าการวัดลมที่ระยะความสูงที่ต่ำกว่า เป็นผลเนื่องมาจากความขรุขระของพื้นดินที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วลม เมื่อลมพัดสูงขึ้นความขรุขระของพื้นดินที่ส่งผลกระทบต่อลมจะน้อยลง การไหลเวียนของอากาศพลศาสตร์และการสูญเสียความเสียดทานลดลง ดังนั้นพลังงานลมจึงเพิ่มสูงขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมตามของความสูงเหนือพื้นดิน แสดงในภาพที่ 15 ภูมิประเทศที่มีความขรุขระสูง เช่น เมืองที่มีอาคารสูงหรือป่าที่มีต้นไม้สูง จะทำให้พลังงานจลน์ของลมลดลง ส่วนในบริเวณที่ราบที่มีความขรุขระของพื้นดินต่ำ การแปรผันของความเร็วลมเมื่อเทียบกับความสูงเหนือพื้นดินพลังงานจลน์ของลมจะสูงกว่า



ภาพที่ 15 ผลของความขรุขระของพื้นดินต่อการแปรผันของลม

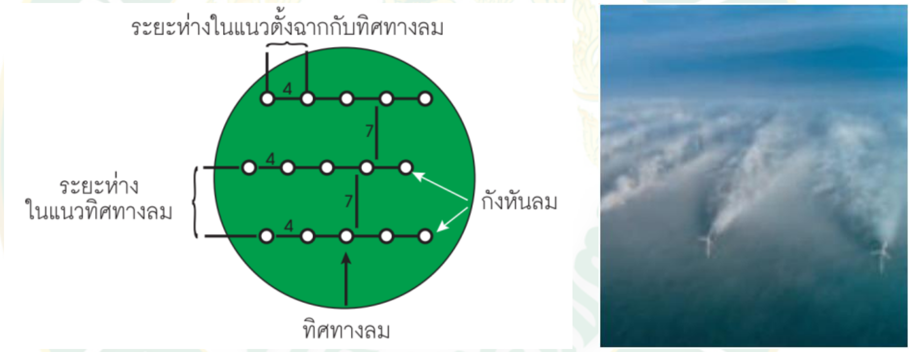
ที่มา: Baumbach G, 1991

จากข้อมูลข้างต้น สามารถประยุกต์ใช้สำหรับการเลือกสถานที่ติดตั้งกังหันลม โดยควรติดตั้งในระดับสูงเหนือพื้นดินหรือในสถานที่ที่มีความขรุขระพื้นต่ำ บริเวณพื้นที่โล่งไม่มีสิ่งก่อสร้าง ในอีกด้านหนึ่งต้องคำนึงว่าพลังงานจลน์ของลมนั้นคล้ายคลึงกับมวลของลมนั่นคือความหนาแน่นของลมซึ่ง

จะลดลงตามความสูงของระดับน้ำทะเล ในระดับความสูงที่สูงกว่า 1,000 เมตร ความหนาแน่นของบรรยากาศจะลดลงอย่างมากและพลังงานจลน์ของลมก็ลดลงเช่นกัน

2.9 ผลกระทบของทุ่งกังหันลม (Park effect)

การติดตั้งกังหันลมในรูปแบบทุ่งกังหันลม จะมีผลกระทบในด้านของความเร็วลมที่ลดลงเนื่องจากการหมุนวนด้านหลังของของไหล ดังนั้นการเว้นระยะระหว่างกังหันจึงเป็นเรื่องสำคัญ ระยะห่างระหว่างกลางหันลมควรมีค่า 5 ถึง 9 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดในทิศทางลม และมีค่า 3 ถึง 5 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดในทิศตั้งฉากกับทิศทางลม ดังแสดงในภาพที่ 16 ผลกระทบของความเร็วลมที่ลดลงจากการติดตั้งกังหันลมในทุงกังหันลมจะสงผลทำใหพลังงานไฟฟาที่ผลิตไดมีคาลดลงประมาณร้อยละ 5



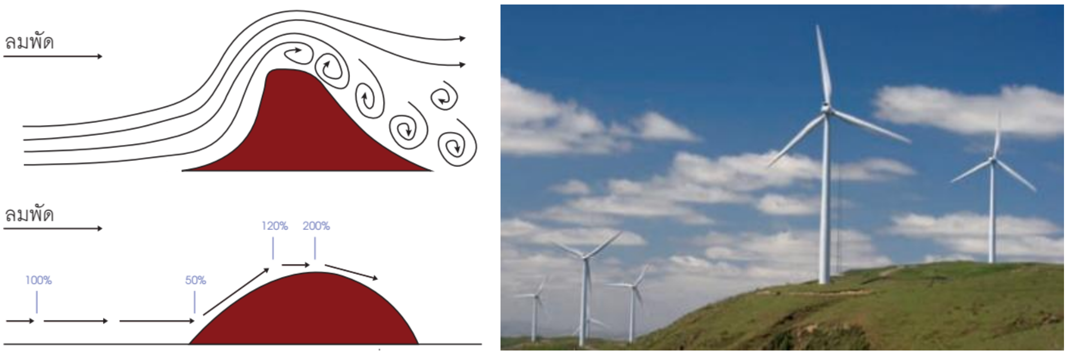
(ก) (ข)

ภาพที่ 16 (ก) ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งกังหันลม และ
(ข) ผลกระทบของความเร็วในทุ่งกังหันลม

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557

2.10 ผลกระทบของเนินเขา (Hill effect)

อากาศที่เคลื่อนผ่านเชิงเขาจะขยายตัว (ความเร็วลมลดลง) และจะถูกบีบอัดที่บริเวณยอดเขาทำให้ความเร็วลมสูงขึ้นกว่าบริเวณพื้นที่โดยรอบ (ความเร็วลมมีค่าสูงสุดที่สันเขา) หลังจากอากาศเคลื่อนที่ผ่านสันเขาจะขยายตัวและเกิดการปั่นป่วน ดังแสดงในภาพที่ 17 ในพื้นที่ลักษณะนี้ควรติดตั้งกังหันลมที่บริเวณสันเขาเพื่อให้ได้รับประโยชน์จากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นอย่างเต็มที่



ภาพที่ 17 ผลกระทบของเนินเขา (บน) และความเร็วลมเปลี่ยนแปลง
จากผลกระทบของเนินเขา (ล่าง)

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557

นอกจากนี้ยังมีผลกระทบของช่องลม (Tunnel effect) เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านอุโมงค์ช่องเขาแคบ ๆ อากาศจะถูกบีบอาจส่งผลทำให้ความเร็วลมเพิ่มขึ้น นำมาใช้เป็นพลังงานป้อนกังหันลมได้ แต่ถ้าเกิดในบริเวณช่องเขาที่ไม่ราบเรียบจะส่งผลให้เกิดความปั่นป่วนขึ้นและส่งผลกระทบต่อกังหันลมที่ติดตั้งไว้

2.11 หลักการและทฤษฎีของระบบ SCADA

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) (วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556) คือระบบเครื่องมืออัตโนมัติสำหรับตรวจสอบเก็บรวบรวมข้อมูลและบริหารระบบควบคุมของกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม สกาดาประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ

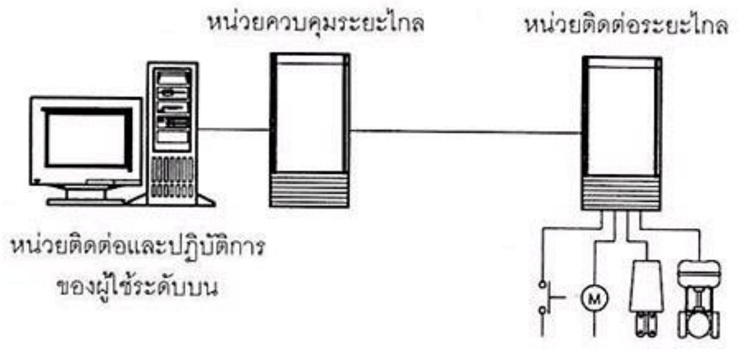
- หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของผู้ใช้ระดับบน
- หน่วยควบคุมระยะไกล และหน่วยติดต่อระยะไกล

SCADA เป็นระบบที่สามารถเอาสัญญาณจากตัววัดที่อยู่ในรูปของไฟฟ้าหรือพลังงานอื่น ๆ มาแปลงอยู่ในรูปของข้อมูลที่เป็นตัวเลขเพื่อใช้ทำประโยชน์ต่าง ๆ ให้กับผู้ปฏิบัติงานในระยะไกล เป็นการรวม ขบวนการ 2 ขบวนการเข้าด้วยกัน คือ

1. Telemetry System เป็นเทคนิคที่ใช้ในการส่งและรับข้อมูลผ่านสื่อกลาง โดยข้อมูลนั้นสามารถวัดได้ เช่น โวลต์ ความเร็ว หรืออัตราการไหล ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปอีกสถานที่หนึ่งโดยผ่านสื่อกลางต่าง ๆ เช่น เคเบิล สายโทรศัพท์ หรือ คลื่นวิทยุ ข้อมูลจากหลาย ๆ สถานที่จะถูกนำมารวมกันในระบบ SCADA

2. Data Acquisition เป็นวิธีการที่จะเข้าถึงและควบคุมข้อมูลจากอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรือถูกตรวจสอบอยู่ โดยที่ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปให้ระบบ Telemetry ระบบ DAQ (Data acquisition) เป็นการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ข้อมูลจริงในงานวิจัยทดลองวิทยาศาสตร์และทดสอบงานทางด้านวิศวกรรมเชิงคุณภาพและประสิทธิผลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีความแตกต่างจากงานระบบคอมพิวเตอร์ทั่วไปตรงที่มีฮาร์ดแวร์พิเศษเพื่อตรวจจับสัญญาณทางกายภาพทางวิทยาศาสตร์อาทิเช่น อุณหภูมิ ความดันอากาศ ก๊าซ อัตราการไหล เป็นต้น แปลงเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เป็นรูปแบบในลักษณะสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่าน Software ประยุกต์ที่พัฒนาตามคุณลักษณะของงานวิจัยทดลองนั้น ๆ ในลักษณะเวลาจริง (Real time) ดังแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งในอดีตมักใช้เป็นระบบเฉพาะเจาะจงลงไปตามประเภทงาน ไม่สามารถใช้งานร่วมกับงานวิจัยอื่นได้ ทั้งยังมีราคาที่สูงมาก ทว่าด้วยความสามรถของคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในปัจจุบันประกอบกับการใช้งานที่ง่ายขึ้นของซอฟต์แวร์ระบบปฏิบัติการในลักษณะที่เป็นวินโดว์หรือกราฟฟิก ทำให้การประยุกต์เพื่อนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในงานด้าน Data Acquisition นี้มีความเป็นไปได้อย่างไม่ยุ่งยาก และให้ความคล่องตัวกับนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัยทดลองและวิศวกร เพื่อพัฒนาระบบงานดังกล่าวได้เองจากฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ งานด้าน Data Acquisition ที่มีให้เลือกมากมายหลากหลายผู้ผลิต และสามารถใช้งานร่วมกันได้โดยส่วนใหญ่ ทำให้ราคาระบบโดยรวมมีราคาไม่สูง และให้ประสิทธิผลในการพัฒนาประเทศเชิงเทคโนโลยีได้ดีกว่าองค์ประกอบของระบบสกาดา

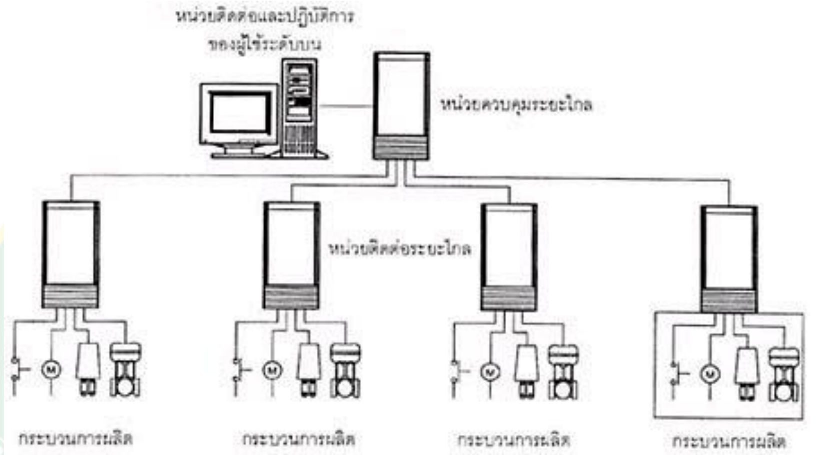
- หน่วยติดต่อและปฏิบัติการของผู้ใช้ระบบระดับบน
- หน่วยควบคุมระยะไกล
- หน่วยติดต่อระยะไกล



ภาพที่ 18 องค์ประกอบของระบบสกาดา

ที่มา: วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556

ผู้ใช้สามารถตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นระยะทางไกลได้โดยหน่วยติดต่อและปฏิบัติการของผู้ใช้ระดับบนเป็นเครื่องมือปฏิบัติการของผู้ใช้สำหรับตรวจสอบและควบคุม กระบวนการผลิตเชื่อมต่อกับหน่วยควบคุมระยะไกล หน่วยควบคุมระยะไกลติดต่อกับหน่วยติดต่อระยะไกลโดยการสื่อสารข้อมูลแบบดิจิตอลทางระบบเครือข่ายคมนาคม และหน่วยติดต่อระยะไกลเป็นเครื่องมือเชื่อมต่อกับกระบวนการผลิต ประกอบด้วยหน่วยรับสัญญาณ และส่งสัญญาณของสัญญาณชนิดอนาล็อกและสัญญาณชนิดดิจิตอล ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 การติดตั้งสกาดาสำหรับตรวจสอบเก็บรวบรวมข้อมูลและบริหารระบบควบคุม

ที่มา: วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556

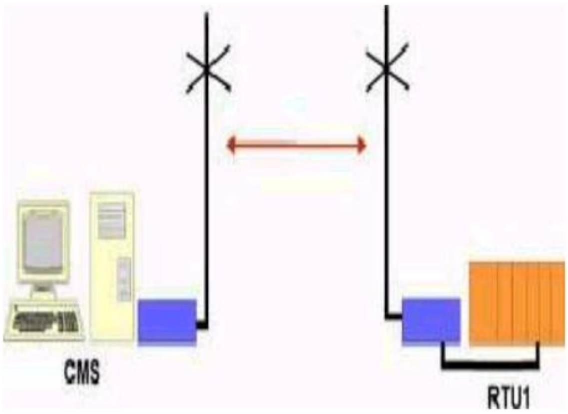
ประเภทงานที่เหมาะสมกับสกาดา

- การตรวจสอบ
- การเก็บรวบรวมข้อมูลของกระบวนการผลิต
- การบริหารระบบควบคุม

ของกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่บริเวณกระบวนการผลิตครอบคลุมพื้นที่กว้างหรือโรงงานอุตสาหกรรมมีกระบวนการผลิตอิสระติดตั้งกระจัดกระจายทั่วบริเวณพื้นที่การผลิต รวมถึงระบบสาธารณูประโภคต่าง ๆ

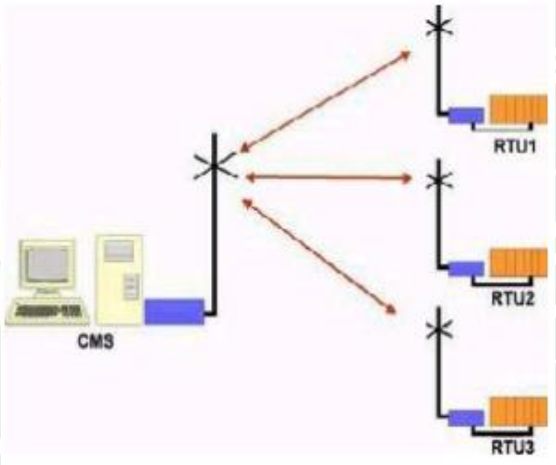
รูปแบบของสกาดา

- Point-to-Point Configuration ดังแสดงในภาพที่ 20
- Point-to-Multipoint Configuration ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 20 Point-to-Point Configuration

ที่มา: วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556



ภาพที่ 21 Point-to-Multipoint Configuration

ที่มา: วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556

ส่วนประกอบของสกาดา

1. Field Instrumentation

เป็นเครื่องมือหรือเซ็นเซอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรือถูกตรวจสอบ อุปกรณ์นี้จะเปลี่ยน Physical Parameter เช่น Fluid Flow, Velocity, Fluid Level ให้เป็น Electrical Signal เช่น Voltage หรือ Current ซึ่งสามารถอ่านค่าเหล่านี้ได้โดย Remote Station Equipment ผลลัพธ์ที่ได้เป็นได้ทั้ง Analog และ Digital

2. Remote Station

เป็นส่วนที่ทาการรวบรวมข้อมูลจากเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ และส่งไปยังศูนย์กลางระบบ SCADA ซึ่งอาจจะเป็น Remote Terminal Unit (RTU) หรือ Programmable Logic Controller (PLC) ก็ได้ RTU คืออุปกรณ์ใช้ในการตรวจจับสัญญาณจาก Field Sensor แล้วส่งสัญญาณข้อมูลให้ Controller ควบคุมอุปกรณ์ Remote Station แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1) Single Board: input และ output เป็น Fixed Number จะมีราคาถูกแต่ไม่สามารถรองรับการขยายของระบบสมัยใหม่ได้

2) Modular Board: สามารถรองรับการขยาย Remote Station แต่ราคาค่อนข้างแพง

3. Communication Network

เป็นการส่งข้อมูลดิจิตอลระหว่างสถานที่หนึ่งไปยังสถานที่หนึ่งโดยผ่านตัวกลางในการติดต่อสื่อสาร เช่น สายเคเบิล คลื่นวิทยุ

4. Central Monitoring Station (CMS)

เป็นศูนย์กลางของระบบ SCADA โดยรับข้อมูลมาประมวลผลและทำการแสดงกระบวนการบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วย ซอฟต์แวร์ และ ฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์จะต้องทำงานแบบ Multitasking ได้ดังต่อไปนี้

- สื่อสารข้อมูลกับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ
- แสดงค่าที่อ่านได้บนจอภาพ
- เก็บบันทึกข้อมูลระยะยาวบนหน่วยความจำ
- ตรวจสอบสัญญาณเตือนและแสดงสัญญาณเตือน
- คำนวณค่าเก็บบันทึกและการควบคุม
- พิมพ์รายงานผลการปฏิบัติงานบนจอภาพ
- ตอบรับข้อมูลที่ป้อนผ่านแป้นพิมพ์

2.11.1 ลักษณะพิเศษของสกาดา

ลักษณะพิเศษของระบบ SCADA ที่ต่างจากระบบควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์อื่น คือ ระบบ SCADA มีอุปกรณ์ปลายทางที่ถูกควบคุมจะอยู่ ในตำแหน่งที่ห่างไกลจากศูนย์กลางระบบคอมพิวเตอร์ที่มีผู้สั่งการโดยการส่งสัญญาณควบคุมจะถูกส่งผ่านสื่ออื่นเป็นตัวกลาง เช่น คลื่นวิทยุ Microwave หรือระบบสื่อสารดาวเทียม

2.11.2 ฐานข้อมูลของสกาดา

1. Real time Database Servers

เป็นระบบฐานข้อมูลที่ใช้จัดการและเก็บค่าของกระบวนการ ณ เวลาปัจจุบันในขณะใด ๆ ค่า Real time จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพของกระบวนการที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ค่าของกระบวนการจะถูกตรวจจับ (Monitor & Scan) โดย RTU (Remote Termination Unit) จากนั้นข้อมูลค่า Real time จะถูกประมวลนำมาแสดงผลบน MMI (Man-Machine Interface) เพื่อให้โอเปอเรเตอร์ รู้ถึงสภาพของกระบวนการ ณ ขณะนั้น ๆ ค่า Real time ทุก ๆ ค่าจะถูก Update ได้ไม่เกินทุก ๆ 2 วินาที

2. Historical Database Servers

เป็นระบบฐานข้อมูลที่ใช้จัดการและจัดเก็บค่า Historical Data ของกระบวนการเพื่อใช้ในการ Trending Logging, Statistic และ Report ตัวอย่างของฐานข้อมูลชนิดนี้คือ XIS (Extended Information System) ซึ่งถูกสร้างโดยใช้ Sybase Realational Database Management System (RDBMS) ที่เป็นมาตรฐาน

3. มาตรฐาน Protocols ที่ใช้ในสกาดา

ปัจจุบัน มี SCADA มาตรฐาน Protocols มากกว่า 200 โปรโตคอลทั่วโลก ที่ใช้สาหรับการติดต่อระหว่าง Central Computer และ Remote RTUs, PLCs และ Flow Computer Standard มาตรฐาน Protocols ที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ 5 แบบ

1) ASCII (American Standard Code for Information Interchange) เป็นโปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสารของคอมพิวเตอร์ที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและเป็นสากล

2) CAP (Compressed ASCII Protocol) เป็ น RTU Protocol ที่ดีที่สุด เป็นภาษาที่คนสามารถอ่านเข้าใจได้ (Man readable) มีความน่าเชื่อถือ (Reliability) เร็ว (Fast) และมีความปลอดภัยสูง (Secure)

3) Modbus เป็น Point-to-Point PLC Protocol ที่ใช้กันทุกหนทุกแห่ง แต่มีข้อเสียคือเป็นภาษาที่คนไม่สามารถอ่านเข้าใจได้ (Man Unreadable)

4) Modbus X เป็นส่วนที่พัฒนามาจาก Modbus Protocol ที่ทำให้ผู้ใช้ Modbus สามารถอ่านและสามารถสร้างจำนวนบวกและลบได้

5) IEEE 32 bit Single Format Floating Point เป็นมาตรฐานของงานอุตสาหกรรม สาหรับการส่งตัวเลข 23 บิต ด้วยความถูกต้อง โปรโตคอลเหล่านี้ใช้ได้กับ National Instrument's Lookout ที่เป็น Object Oriented Software, DDE, SQL และ WEB

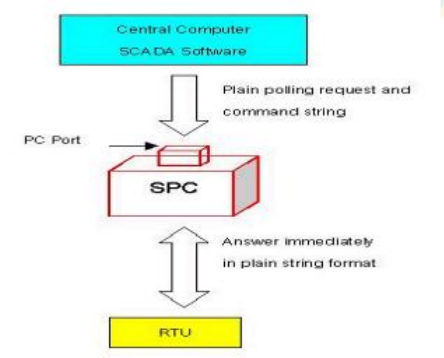
การแปลงข้อมูลในสกาดา

ข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากกระบวนการจะถูกแปลงโดย SCADA Central Station Computer ไปเป็นข้อมูลชนิดตัวเลขและตรรกะ ดังแสดงในภาพที่ 22 ส่วนใน Object Oriented Software รูปแบบของฐานข้อมูลจะถูกเก็บในรูปของ Object โดยข้อมูลในฐานข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้โดย Central Station Computer จาก Remote RTUs, PLCs, Flow Computers เป็นต้น และข้อมูลจะถูกส่งผ่านสัญญาณวิทยุ, สายเคเบิล, Fiber Optic Cable , By Dialing, By Satellite Communication

การแปลงข้อมูล SCADA Protocal

การแปลงระบบให้ SCADA System Protocol สามารถใช้งานกับคอมพิวเตอร์รุ่นใหม่และฐานข้อมูลแบบใหม่ได้ ซึ่งมีหลายแนวทางด้วยกัน

- การแปลง Remote RTU เก่า และ Flow Computer ให้สื่อสารด้วย Standard Protocol วิธีนี้ทำให้ข้อมูลในระบบเดิมยังคงอยู่ครบถ้วน
- การแปลง Remote RTU ใหม่และ Flow Computer ให้สื่อสารด้วย Old Protocol วิธีนี้ไม่นิยมเนื่องจากมีข้อเสียคือ เป็นการใช้เทคโนโลยีเก่า (Step Back Technology)
- การใช้ SPC (SCADA Protocol Converter) เป็น H/W Protocol Converter ระหว่าง RTU, PLC, Flow Computer และ Central Station ซึ่งวิธีนี้ทำให้ระบบเก่า (Old System) สามารถสื่อสารกับซอฟท์แวร์แบบใหม่ (Modern Software) ได้ และ SPC จะติดต่อโดยตรงกับ Central Station โดยไม่มี Delay หรือ Distortion เลย



ภาพที่ 22 การติดต่อโดยใช้ SPC เป็นตัวกลางระหว่าง Central Computer SCADA Software และ RTU

ที่มา: วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร, 2556

คุณสมบัติของซอฟท์แวร์ SCADA

1. Object Oriented Graphics โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ทำงานแบบ Object ทุกๆ ออปเจ๊กหรือกลุ่มของออปเจ๊ก สามารถเคลื่อนย้าย ปรับขนาดหมุน ตัดแปะได้ ทำให้ง่ายต่อการพัฒนา Standard User Interface ระบบติดต่อกับผู้ใช้เป็นลักษณะมาตรฐานของ Window ทำให้ผู้ใช้เรียนรู้ได้ง่าย

2. DDE Software สนับสนุน DDE Software ที่สนับสนุนการใช้งาน DDE ทำให้ซอฟท์แวร์ตัวอื่นในวินโดว์ที่สนับสนุน DDE เช่น Excel, Microsoft Word สามารถนาข้อมูลจากซอฟท์แวร์นั้นไปใช้งานได้

3. Net DDE เป็น DDE สำหรับระบบเน็ตเวิร์กที่พัฒนาโดยบริษัท Wonder Ware ทำให้คอมพิวเตอร์แต่ละจุดบนเน็ตเวิร์กสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ นอกจากนี้ควรจะสนับสนุนการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับระบบปฏิบัติการอื่นๆ เช่น VMS และ UNIX ซอฟท์แวร์บางตัวอาจจะไม่สนับสนุน Net DDE เพราะ Net DDE พัฒนาโดยบริษัท Wonder Ware

4. Wizards เป็น Library ที่เก็บรูปภาพของหน้าปัด หรือรูปร่างของวัตถุที่ใช้บ่อย

5. Real-Time Database สนับสนุนข้อมูลทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่องรวมทั้งข้อมูลจำนวนเต็มและตัวอักษร

6. Real-Time and Historical Trends สามารถดูการเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เทียบกับเวลาได้และสามารถใช้ Cursor อ่านคา ณ จุดที่ต้องการ หรือทำการขยายภาพ ณ บริเวณที่ต้องการได้

7. Alarm Capabilities สนับสนุนสัญญาณเตือนอย่างน้อย 10 ระดับ สัญญาณเตือนที่เกิดขึ้นสามารถแสดงบนหน้าจอในลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสีได้ เก็บข้อมูลลง Disk หรือส่งออกทางเครื่องพิมพ์ได้

8. Security ระบบรักษาความปลอดภัย ควรจะกำหนดระดับของผู้ใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 10 ขั้น พร้อมกับบันทึกการใช้งานของผู้ใช้แต่ละคนว่ามีการใช้งาน เข้า-ออก จากระบบเมื่อไร และระหว่างที่ใช้งานระบบอยู่นั้นได้ทำอะไรบ้าง

9. Client-server ในระบบขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนนั้น ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติจะต้องเป็นระบบเน็ตเวิร์ก การสนับสนุนระบบ Client-server ทำให้สามารถกระจายงานต่างๆ ไปยังคอมพิวเตอร์ แต่ละตัวในเน็ตเวิร์ก โดยอาศัยข้อมูลกลางร่วมกันได้

10. Reporting สนับสนุนการทำรายงานต่างๆ เช่น รายงานประจำวันเกี่ยวกับข้อมูลต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลสาหรับผู้บริหารในการตัดสินใจอีกต่อไป

11. Network สนับสนุนการทำงานบนเน็ตเวิร์กได้หลายชนิด เช่น Ethernet, Token Ring, Arenet, DEC Net เป็นต้น และสลับโปรโตคอลหลายชนิดเช่น TPX, TCP/IP เป็นต้น

12. SPC (Statistic Process Control) ความสามารถส่วนนี้จะเป็นการนำข้อมูลที่บันทึกได้มาวิเคราะห์และส่งผลลัพธ์ในรูปแบบต่างๆ เช่น ฮิสโตแกรม ตาราง กราฟเส้น เป็นต้น ทำให้ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามและวิเคราะห์ระบบโดยรวมได้

13. Redundant Server เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่คอมพิวเตอร์ที่ต่อกับ PLC หรือ MPU (Master Control Unit) อาจเกิดปัญหาได้ ดังนั้นซอฟท์แวร์ทางด้าน SCADA ที่ดีควรจะยอมให้คอมพิวเตอร์ 2 ตัว ต่อกับ MCU เพียงตัวเดียวได้ โดยคอมพิวเตอร์อีกตัวหนึ่งจะเป็นระบบสำรอง เมื่อคอมพิวเตอร์หลักเกิดขัดข้อง คอมพิวเตอร์สำรองจำ ได้เข้าทำงานแทนที่ทันที เพื่อป้องกันมิให้ระบบโดยรวมเสียหาย

14. Development Kits จะทำให้ผู้ใช้พัฒนา Application ของตนเองได้ เช่น สร้าง Object ต่างๆ ขึ้นมาเอง หรือเขียน Driver ขึ้นมาสำหรับอุปกรณ์ที่ทางบริษัทพัฒนาขึ้นมาเอง Program สนับสนุนการใช้โปรแกรมภาษา C หรือ Visual Basic บน Windows เพื่อผู้ใช้สามารถสร้าง Application ของตนเองขึ้นมาได้ และยังสามารถดึงข้อมูลจากโปรแกรม SCADA ไปใช้งานได้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

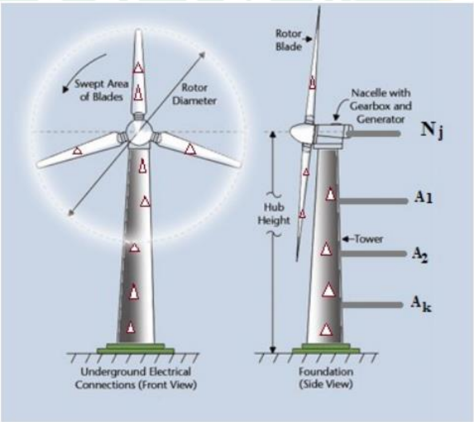
จำลอง มะละเขต และคณะ (2561) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้สถานีพยากรณ์อากาศที่อยู่ข้างหน้าต้นกังหันลมส่งสัญญาณมายังระบบควบคุมกังหันลม ใช้การคำนวณระยะเวลาและทิศทางที่ลมจะมาถึงต้นกังหันลม โดยไม่ต้องตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลมในแบบเดิม สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าของ WTG23 ได้ 57.96 เมกะวัตต์ชั่วโมง

อรรฆพร คงจิต และคณะ (2561) นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมโดยการส่งสัญญาณระหว่างกังหันลมกับกังหันลม (Machine-to-Machine, M2M) ผ่านระบบสกาดา (SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition) ระยะห่างระหว่างกังหันลมขนานกับลมมรสุมเท่ากับ 0.150-6.782 กิโลเมตร สามารถทำให้ระบบการทำงานของกังหันลมลดระยะเวลาตรวจวัดลมก่อนเริ่มการผลิตไฟฟ้าได้ 15 นาที ความเร็วลมเฉลี่ย 7.31 เมตรต่อวินาที ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 1,429.00 กิโลวัตต์ สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ 357.25 กิโลวัตต์ชั่วโมง

P. Koetket et al. (2018) ทำการเปรียบเทียบระยะเวลารอลมของกังหันลมจากการกำหนดทิศรอลม โดยใช้วิธีการทางสถิติกับข้อมูลที่วัดได้จากการทำงานจริงของกังหันลม ในเดือนกันยายนและตุลาคมซึ่งเป็นช่วงเดือนที่ลมมรสุมเกิดการเปลี่ยนทิศ พบว่าการกำหนดทิศรอลมของกังหันลมโดยใช้ค่าแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง สามารถลดเวลาในการหมุนปรับทิศของหน้ากังหันลม เพิ่มเวลาในการ

ผลิตกระแสไฟฟ้าในเดือนกันยายนและตุลาคม 189.50 และ 171.41 นาที ตามลำดับ คิดเป็นกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 351.9 และ 648.6 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ

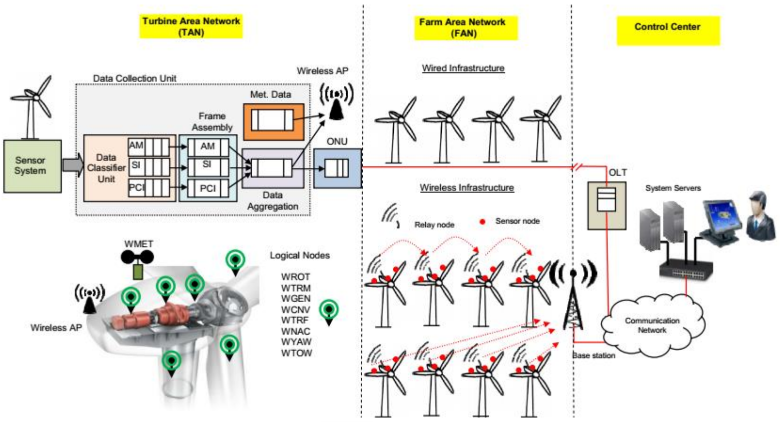
C. Popeanga, N. Cristov and R. Dobrescu (2012) นำเสนอระบบควบคุมเพื่อลดความสูญเสียและการหยุดทำงาน โดยการควบคุมระยะไกลในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในโครงสร้างขนาดใหญ่ของกังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 23 การประเมินการตอบสนองและการแสดงข้อมูลการตรวจสอบจากเซ็นเซอร์ไร้สาย ส่งข้อมูลไปศูนย์ควบคุมนำไปสู่การเสนอรูปแบบของพฤติกรรมกังหันลม การตอบสนองต่อการโหลด ศูนย์ควบคุมสามารถทำการกำหนดขั้นตอนโดยการเขียนวิธีการควบคุมพารามิเตอร์จากระบบให้มีการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 23 ตำแหน่งเซนเซอร์บนกังหันลม

ที่มา: C. Popeanga, N. Cristov and R. Dobrescu, 2012

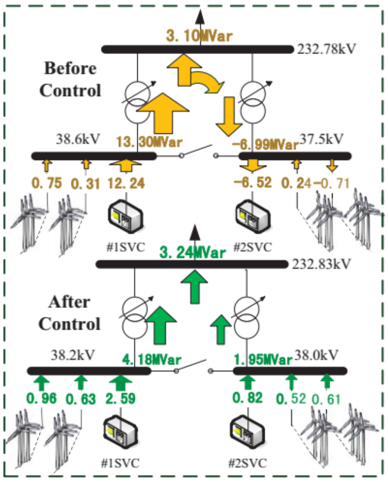
A. Mohamed and K. Young-Chon (2013) บทความนี้นำเสนอระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องกังหันลม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน ระบบสื่อสารระหว่างเครื่องกังหันลมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม 1) การสื่อสารภายในกังหันลม 2) การสื่อสารในกลุ่มกังหันลม 3) การสื่อสารระหว่างศูนย์ควบคุม ซึ่งรวมถึงการสื่อสารข้อมูลกับอุตุนิยมวิทยา พบว่าแต่ละกังหันลมสามารถตัดสินใจดำเนินงานในเวลาจริง เพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าและยืดอายุการใช้งานของกังหันลมได้ ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การสื่อสารแบบ M2M

ที่มา: A. Mohamed and K. Young-Chon, 2013

L. Yifeng et al. (2012) บทความนี้ใช้ระบบเครือข่ายมาควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมทางด้านแรงดันไฟฟ้าของกังหันลมแต่ละตัวให้เหมาะสม เพื่อควบคุมกำลังรีแอคทีฟที่เข้าสู่ระบบสายส่งให้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม

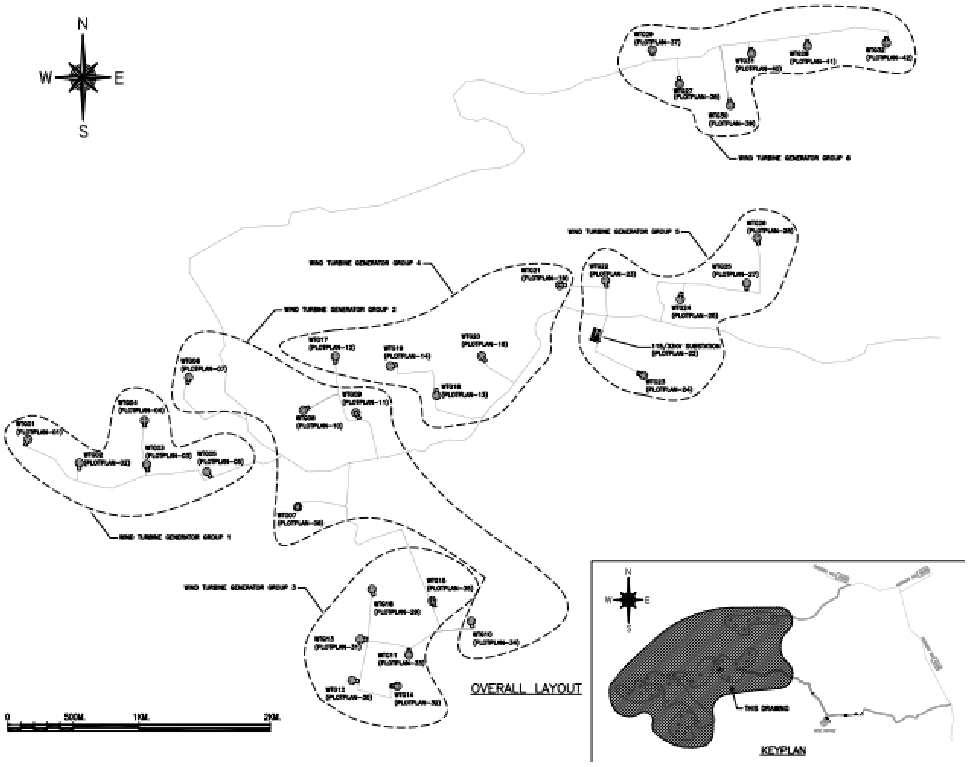
ที่มา: L. Yifeng et al., 2012

Q. Chen et al. (2013) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไร้สายเครือข่ายเซ็นเซอร์ ในการควบคุมรีเลย์ ช่วยแก้ปัญหาการสื่อสารแบบสายส่ง เนื่องจากฟาร์มกังหันลมมีอัตราการเพิ่มขึ้นมาก การกำหนดค่าโหลดรีเลย์จะขึ้นกับตำแหน่งและระยะทางที่ห่างจากสถานี การกำหนดค่าจึงมีอุปสรรคบทความนี้นำเสนอเทคโนโลยีไร้สายเชื่อมต่ออุปกรณ์รีเลย์เพื่อควบคุมระบบ ส่งผลให้ระบบเครือข่ายมีความมั่นคง เนื่องจากการสื่อสารในระบบเครือข่ายมีความแม่นยำ

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันลมด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้านี้ ได้ทำการศึกษาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานลม กังหันลมขนาด 2.5 เมกะวัตต์ จำนวน 32 ต้น ขนาดกำลังการผลิตรวม 80 เมกะวัตต์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. สถานที่ทำวิจัย โครงการชัยภูมิวินด์ฟาร์ม (CHAIYAPHUM WIND FARM PROJECT) ที่ตั้งอำเภอซับใหญ่ จังหวัดชัยภูมิ ขนาดกำลังการผลิตรวม 80 เมกะวัตต์
2. กังหันลมจำนวน 32 ต้น แบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ตามสายส่งไฟฟ้าที่เข้าสู่สถานีไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 26



(ก)

ภาพที่ 26 กลุ่มกังหันลมโครงการชัยภูมิวินด์ฟาร์ม จำนวน 32 ต้น

3. เก็บข้อมูลศักยภาพลม ลักษณะลมที่พัดผ่านโครงการในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น

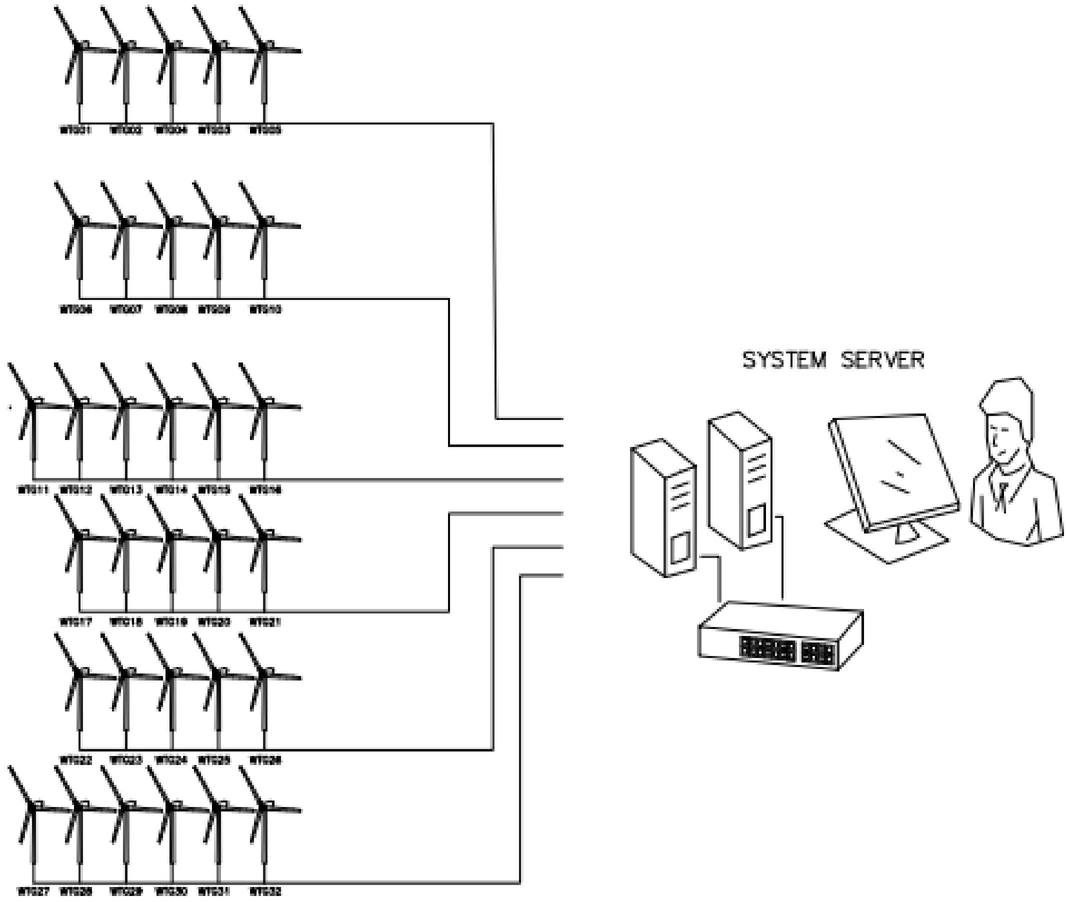
4. เก็บข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น ด้วยอุปกรณ์วัดลมที่ติดตั้งบนกังหันลมผลิตไฟฟ้า

5. วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลศักยภาพลมเปรียบเทียบกับกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้ของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น

6. วางแผนการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ และการส่งสัญญาณแบบอัจฉริยะของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น

7. ประเมินการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ และการส่งสัญญาณแบบอัจฉริยะของกลุ่มกังหันลม 32 ต้น

8. สรุปผลการควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมทั้งทางด้านเทคนิคและทางด้านเศรษฐศาสตร์



ภาพที่ 27 แผนภาพการเชื่อมต่อข้อมูลของกลุ่มกังหันลมเข้าสู่ระบบเซิร์ฟเวอร์

3.1 ขั้นตอนการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 2.5 เมกะวัตต์

กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 2.5 เมกะวัตต์ มีลักษณะการทำงานที่ขึ้นกับความเร็วและความต่อเนื่องของลมที่พัดผ่าน เริ่มจากเมื่อมีลมมาปะทะกังหันลมที่ความเร็วมากกว่าความเร็วเริ่มทำงานของกังหันลม (Cut in speed) มากกว่า 3 เมตรต่อวินาที เป็นเวลาต่อเนื่อง 0.5-10 นาทีขึ้นไป กังหันลมจะเริ่มทำงานเข้าสู่สภาวะการเตรียมความพร้อมของระบบ สู่กระบวนการเริ่มผลิตไฟฟ้า การจ่ายไฟเข้าสู่ระบบส่ายส่ง และเริ่มหยุดกระบวนการผลิตไฟฟ้าเมื่อลมมีกำลังอ่อนลง ขาดความต่อเนื่องของลม และเข้าสู่สถานะหยุดการผลิตไฟฟ้าเมื่อไม่มีลมพัดผ่าน หรือลมมีกำลังน้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทำงานในแต่ละสถานะ ดังต่อไปนี้

การเตรียมความพร้อมของระบบ (สถานะ Standby) อุปกรณ์วัดลมทำการตรวจวัดความเร็วและทิศทางลม ส่งสัญญาณให้กังหันลมปรับใบพัดเป็นมุม 75 องศา เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

เริ่มกระบวนการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Start) กังหันลมปรับทิศทางของ Nacelle ไปตามทิศทางของลมที่มีความเร็วลมมากกว่า 3 เมตรต่อวินาที ขึ้นไป ใช้เวลาประมาณ 0.5-10 นาที

จ่ายไฟเข้าสู่ระบบ (สถานะ Online) กังหันลมผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ

เริ่มหยุดผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stopping) กังหันลมเริ่มหยุดการผลิตไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมน้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที

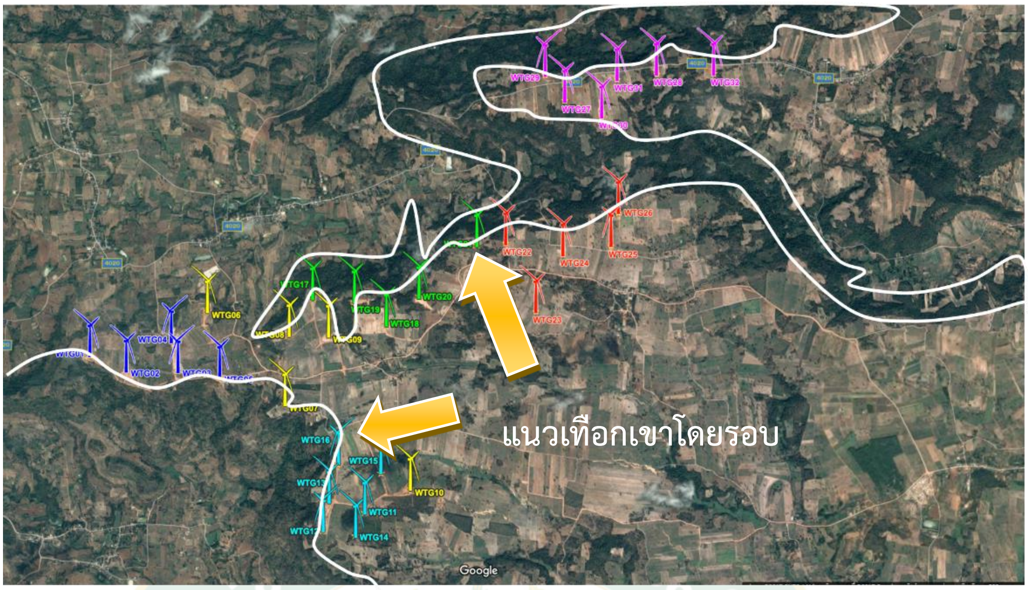
หยุดการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stop) กังหันลมหยุดผลิตไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์วัดลมตรวจวัดลมได้น้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที อย่างต่อเนื่อง และปรับใบพัดเป็นมุม 90 องศา (อรรฆพร คงจิต และคณะ, 2561)

ซึ่งแต่ละสถานะของกังหันลมจะต้องใช้ไฟฟ้าในการควบคุมระบบอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมให้กังหันลมปรับทิศไปยังทิศที่ลมมีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้ากังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันที นอกจากจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าแล้วยังลดการใช้ไฟฟ้าของระบบควบคุมการผลิตได้อีกด้วย

ภาพที่ 28 กังหันลมขนาดกำลังการผลิต 2.5 เมกะวัตต์ และอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลม

3.2 ลักษณะภูมิประเทศติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าชัยภูมิวินด์ฟาร์ม ทำการติดตั้งกังหันลมจำนวน 32 ต้น ลักษณะบริเวณพื้นที่ติดตั้งเป็นเทือกเขาสลับที่ราบ ดังแสดงในภาพที่ 29 เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผานเชิงเขา อากาศจะขยายตัวและอากาศจะถูกบีบอัดที่บริเวณยอดเขา สงผลทำใหความเร็วลมสูงขึ้นกวาบริเวณพื้นที่โดยรอบ หลังจากอากาศเคลื่อนที่ผานสันเขา อากาศจะขยายตัวและเกิดการปนปวน กังหันลมที่ติดตั้งในพื้นที่ลักษณะนี้จะไดรับประโยชนจากความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นไดอยางเต็มที่ นอกจากนี้เมื่อลมเคลื่อนที่ผานอุโมงค์ชองเขาแคบ ๆ อากาศจะถูกบีบอัด สงผลทำใหความเร็วลมเพิ่มขึ้น นำมาใชเปนพลังงานปอนกังหันลมได



ภาพที่ 29 แนวเทือกโดยรอบตำแหน่งติดตั้งกังหันลม

ที่มา: อรรฆพร และคณะ, 2561

3.3 ระยะห่างระหว่างกังหันลม

จากลักษณะภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นที่ราบสลับเทือกเขา ทำให้ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของสถานที่ติดตั้ง ทั้งการก่อสร้างฐาน การขนส่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำให้กังหันลมแต่ละต้นไม่ได้มีระยะห่างที่เท่ากันเป็นระยะ แต่ขึ้นกับบริเวณที่ราบที่ง่ายต่อการติดตั้ง เนื่องจากลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าฯ นี้ เป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ที่พัดสู่ประเทศไทยในแนวระนาบ ต้นกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่อยู่ด้านหน้าเมื่อเทียบแนวตามทิศลมมรสุม จะได้รับลมเป็นต้นแรก ๆ ต้นที่อยู่ถัดมาในแนวระนาบก็จะได้รับลมในเวลาถัดมา การตีกริดตามแนวลมมรสุมสามารถบอกระยะห่างระหว่างต้นกังหันลมแต่ละต้นได้ ในงานวิจัยได้ทำการสร้างเส้นทะแยงบนแผนที่โครงการ ใช้กังหันลม WTG01 เป็นต้นอ้างอิง หาระยะห่างตามแนวลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มุมล่างซ้าย ไปยังมุมขวาบน) ผลของระยะทางที่ได้ แสดงดังภาพที่ 30

WTG 1	150	505	731	794	1204	1093	648	1925	1410	888	448	713	661	1311	1043	2126	2455	2368	2932	3727	3983	3679	4313	4738	5049	5498	6332	5496	5604	6019	6782
	WTG 2	355	581	644	1054	943	498	1775	1260	738	298	563	511	1161	893	1976	2305	2218	2782	3577	3833	3529	4163	4588	4899	5348	6182	5346	5454	5869	6632
		WTG 3	226	289	699	588	-83	1420	679	383	-57	208	156	806	538	1621	1950	1863	2427	3222	3478	3174	3808	4233	4544	4993	5827	4991	5099	5514	6277
			WTG 4	63	473	362	-146	1194	679	383	-283	-18	-70	580	312	1395	1724	1637	2201	2996	3252	2948	3582	4007	4318	4767	5601	4765	4873	5288	6051
				WTG 5	410	299	-556	1131	616	94	-346	-81	-133	517	249	1332	1661	1574	2138	2933	3189	2885	3519	3944	4255	4704	5538	4702	4810	5225	5988
					WTG 6	-111	-445	721	206	-316	-756	-491	-543	107	-161	922	1251	1164	1728	2523	2779	2475	3109	3534	3845	4294	5128	4292	4400	4815	5578
						WTG 7	-445	832	317	-205	-645	-380	-432	218	-50	1033	1362	1275	1839	2634	2890	2586	3220	3645	3956	4405	5239	4403	4511	4926	5689
							WTG 8	1277	762	240	-200	65	13	663	395	1478	1807	1720	2284	3079	3335	3031	3665	4090	4401	4850	5684	4848	4956	5371	6134
								WTG 9	-515	-1037	-1477	-1212	-1264	-614	-882	201	530	443	1007	1802	2058	1754	2388	2813	3124	3573	4407	3571	3679	4094	4857
									WTG 10	-522	-962	-697	-749	-99	-367	716	1045	958	1522	2317	2573	2269	2903	3328	3639	4088	4922	4086	4194	4609	5372
										WTG 11	-440	-175	-227	423	155	1238	1567	1480	2044	2839	3095	2791	3425	3850	4161	4610	5444	4608	4716	5131	5894
											WTG 12	265	213	863	595	1678	2007	1920	2484	3279	3535	3231	3865	4290	4601	5050	5884	5048	5156	5571	6334
												WTG 13	-52.000	598	330	1413	1742	1655	2219	3014	3270	2966	3600	4025	4336	4785	5619	4783	4891	5306	6069
													WTG 14	650	382	1465	1794	1707	2271	3066	3322	3018	3652	4077	4388	4837	5671	4835	4943	5358	6121
														WTG 15	-268	815	1144	1057	1621	2416	2672	2368	3002	3427	3738	4187	5021	4185	4293	4708	5471
															WTG 16	1083	1412	1325	1889	2684	2940	2636	3270	3695	4006	4455	5289	4453	4561	4976	5739
																WTG 17	329	242	806	1601	1857	1553	2187	2612	2923	3372	4206	3370	3478	3893	4656
																	WTG 18	-87	477	1272	1528	1224	1858	2283	2594	3043	3877	3041	3149	3564	4327
																		WTG 19	564	1359	1615	1311	1945	2370	2681	3130	3964	3128	3236	3651	4414
																			WTG 20	795	1051	747	1381	1806	2117	2566	3400	2564	2672	3087	3850
																				WTG 21	256	-48	586	1011	1322	1771	2605	1769	1877	2292	3055
																					WTG 22	-304	330	755	1066	1515	2349	1513	1621	2036	2799
																						WTG 23	634	1059	1370	1819	2653	1817	1925	2340	3103
																							WTG 24	425	736	1185	2019	1183	1291	1706	2469
																								WTG 25	311	760	1594	758	866	1281	2044
																									WTG 26	449	1283	447	555	970	1733
																										WTG 27	834	-2	106	521	1284
																											WTG 28	-866	-758	-343	420
																												WTG 29	108	523	1286
																													WTG 30	415	1178
																														WTG 31	763
																															WTG 32

ภาพที่ 30 ระยะห่างระหว่างกังหันลม

3.4 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามการเชื่อมต่อระบบสายส่งไฟฟ้าและความแตกต่างของความสูงจากระดับน้ำทะเลของกังหันลม

ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้ง 32 ต้น ได้แบ่งกลุ่มกังหันลมตามการเชื่อมต่อของระบบสายส่งไฟฟ้าออกเป็น 6 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย WTG01, WTG02, WTG03, WTG04 และ WTG05

กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วย WTG06, WTG07, WTG08, WTG09 และ WTG10

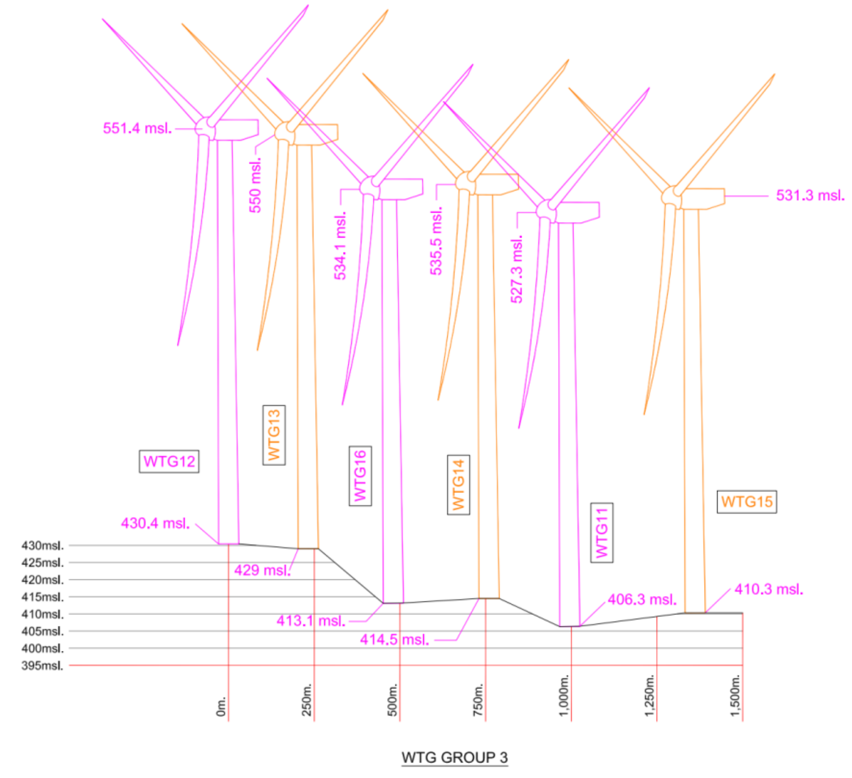
กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วย WTG11, WTG12, WTG13, WTG14, WTG15 และ WTG16

กลุ่มที่ 4 ประกอบด้วย WTG17, WTG18, WTG19, WTG20 และ WTG21

กลุ่มที่ 5 ประกอบด้วย WTG22, WTG23, WTG24, WTG25 และ WTG26

กลุ่มที่ 6 ประกอบด้วย WTG27, WTG28, WTG29, WTG30, WTG31 และ WTG32

กังหันลมในแต่ละกลุ่ม จะมีระดับความสูงจากน้ำทะเล (Sea level) ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 31 เนื่องจากสภาพทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ติดตั้ง กังหันลมจึงจำเป็นต้องติดตั้งบริเวณที่ราบหรือเนินเขาในบางส่วน สลับกันไปขึ้นกับความเหมาะสม ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมแต่ละต้นมีลักษณะไม่เหมือนกัน ซึ่งในการใช้วิธีการส่งสัญญาณจากกังหันลมต้นหนึ่งสู่กังหันลมอีกต้นหนึ่งนั้นต้องจัดกลุ่มกังหันลมให้ลมที่พัดผ่านมีลักษณะเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด โดยการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อแบ่งกลุ่มกังหันลมที่รับลมในลักษณะเดียวกันนั้นจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 31 ตัวอย่างกลุ่มกังหันลมที่ติดตั้งในความสูงระดับน้ำทะเลที่ต่างกัน

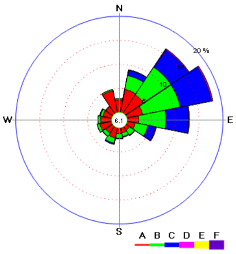
จากความต่างระดับของพื้นที่ติดตั้ง ส่งผลให้ลักษณะลมที่พัดผ่านกังหันลมแต่ละต้นมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการแบ่งกลุ่มกังหันลมใหม่ ตามลักษณะลมที่พัดผ่านกังหันลมแต่ละต้น ความสัมพันธ์นี้ จะส่งผลให้การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 4
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

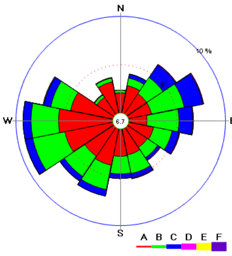
จากการศึกษาลักษณะของลมที่พัดผ่านโครงการ และข้อมูลที่บันทึกจากอุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลมทั้ง 32 ต้น ผลการวิจัยสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันลมด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า สามารถแสดงผลได้ดังต่อไปนี้

4.1 ลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า

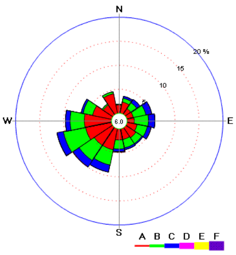
ลมที่พัดผ่านประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุม จะพัดตามฤดูกาลมีทิศทางแน่นอนและสม่ำเสมอ โดยลมมรสุมที่พัดผ่านประกอบด้วย 2 ลมมรสุม ได้แก่ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ จากการศึกษาทิศทางลมของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีวัดลมชัยภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 32 พบว่าในช่วงกลางเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงเริ่มเข้าของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้นั้น ลมที่พัดผ่านจะมีลักษณะแปรปรวน พัดมาจากหลายทิศทาง เมื่อผ่านช่วงนี้ไปลมจะเริ่มนิ่ง พัดมาจากทิศเดียวกันอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับในช่วงกลางเดือนตุลาคมซึ่งเป็นช่วงเริ่มเข้าของลมมรสุมตะวันตกออกเฉียงเหนือ ลมที่พัดผ่านในช่วงเริ่มเปลี่ยนลมมรสุมนั้นจะมีความแปรปรวนเช่นกัน จะเริ่มสงบและพัดจากทิศเดียวกันอย่างชันเจนในช่วงเดือนถัดไป



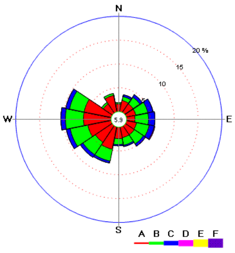
มกราคม



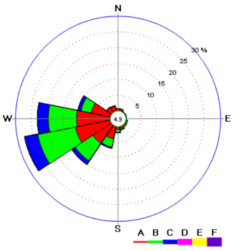
กุมภาพันธ์



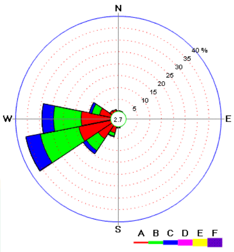
มีนาคม



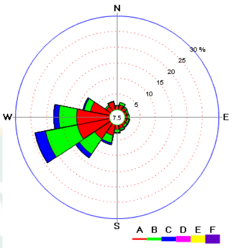
เมษายน



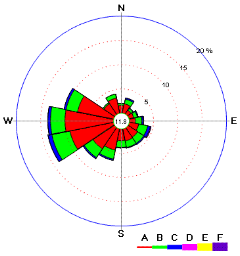
พฤษภาคม



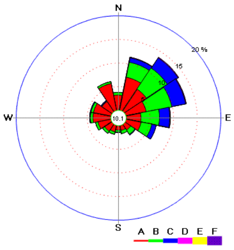
มิถุนายน



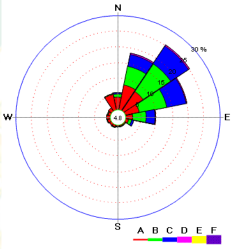
กรกฎาคม



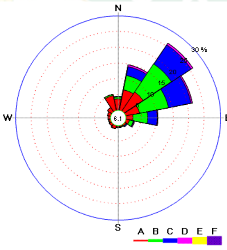
สิงหาคม



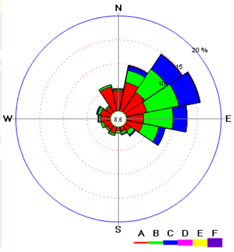
กันยายน



ตุลาคม



พฤศจิกายน



ธันวาคม

ภาพที่ 32 ทิศทางและความเร็วลมที่ตรวจวัดได้โดยสถานีวัดลมจังหวัดชัยภูมิ ปี 2560

ที่มา: Thai Meteorological Department Automatic Weather System, 2018

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้ามักติดตั้งบริเวณพื้นที่ล้อมรอบด้วยภูเขาสลับกับที่ราบ ข้อดีของพื้นที่ภูเขาคือจะสามารถป้องลมให้ลมมีปริมาณมากขึ้น สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง การติดตั้งกังหันลมจะติดตั้งบริเวณพื้นที่ราบและใกล้กับเทือกเขาตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ สาเหตุที่ไม่ติดบนเทือกเขาที่มีความเร็วลมมากกว่านั้นเนื่องจากการขนส่งที่ทำได้ลำบาก อีกทั้งบริเวณภูเขานั้นจะมีลมประจำถิ่น คือ ลมภูเขาและลมหุบเขา โดยลมหุบเขา (Valley breeze) เกิดในช่วงกลางวัน พัดจากลาดเขาขึ้นสู่เบื้องบน และลมภูเขา (Mountain breeze) เกิดในเวลากลางคืน พัดจากภูเขามาตามลาดเขาสู่หุบเขาเบื้องล่าง (iEnergyGuru, 2015) ส่งผลให้ลมในบริเวณนี้แม้จะมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าได้จริงแต่ก็มีความแปรปรวนของลมด้วย

4.2 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามสภาวะภูมิประเทศ

จากการติดตั้งกังหันลมทั้ง 32 ต้น และแบ่งกลุ่มกังหันลมตามการเชื่อมต่อของระบบสายส่งไฟฟ้า เมื่อผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลลม จากอุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลม เก็บข้อมูลกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำนวน 32 ต้น ใน 1 รอบการผลิตในสถานะออนไลน์ วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 ลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าช่วงนี้ เป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดผ่านในแนวระนาบ พบว่าที่เวลา 02.35 น. เป็นการทำงานที่กังหันลมทั้ง 32 ต้น แสดงสถานะออนไลน์พร้อมกันครบทุกต้น ทำการเก็บข้อมูลความเร็วและทิศทางลมตั้งแต่เวลา 02.35-03.11 น. ทุก ๆ 50 วินาที จากการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดที่ลมจะเคลื่อนที่ถึงกังหันลมต้นต่อไป จำนวน 37 ข้อมูลต่อต้น รวม 1,184 ข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 1

Time	WTG01		WTG02		WTG03		WTG04		WTG05	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	6.68	232.10	6.12	214.13	6.61	217.24	4.86	230.53	6.53	225.45
2:36:50	6.15	223.63	7.08	222.29	6.24	220.09	4.47	227.99	6.90	229.64
2:37:50	6.91	244.35	7.25	232.04	6.40	211.82	3.86	215.71	7.12	225.00
2:38:50	6.80	237.45	6.66	224.20	6.20	215.75	3.79	233.40	7.34	228.10
2:39:50	5.75	233.18	7.04	230.79	5.83	209.54	3.94	208.54	7.51	221.46
2:40:50	7.13	236.07	7.45	225.79	6.87	217.03	4.97	224.97	5.38	234.45
2:41:50	7.00	235.82	5.57	227.23	5.47	222.90	6.31	225.21	6.35	226.95
2:42:50	6.76	240.40	7.07	232.69	6.22	213.46	3.84	222.73	6.23	236.38
2:43:50	7.43	231.74	8.02	227.72	5.33	220.94	4.00	200.26	6.22	243.90
2:44:50	6.68	238.36	7.10	221.69	5.94	214.20	4.32	237.72	5.74	237.43
2:45:50	6.75	231.51	6.98	227.64	7.31	216.37	4.40	232.34	5.94	234.34
2:46:50	6.90	250.42	7.22	227.35	6.68	222.16	5.72	226.02	6.59	225.18
2:47:50	6.35	247.56	7.88	228.66	7.38	216.28	5.34	204.75	6.64	204.56
2:48:50	8.06	249.43	6.62	231.30	6.79	233.43	3.59	222.32	6.28	245.54

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Time	WTG01		WTG02		WTG03		WTG04		WTG05	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:49:50	7.65	245.63	6.71	221.23	5.67	219.76	4.01	210.41	6.34	237.13
2:50:50	6.70	231.89	6.15	231.21	6.52	219.68	3.90	225.76	6.79	228.01
2:51:50	6.40	237.23	6.69	222.34	6.23	224.58	4.43	219.96	5.72	223.61
2:52:50	5.80	232.51	6.95	230.23	6.88	226.67	3.50	216.49	6.40	239.79
2:53:50	6.10	242.40	6.37	217.71	6.13	214.08	4.05	229.53	5.79	242.67
2:54:50	6.54	239.36	5.46	213.54	5.34	217.61	4.52	206.49	5.62	234.17
2:55:50	5.80	224.37	5.12	219.66	5.58	216.47	3.48	201.58	6.62	243.14
2:56:50	6.80	257.10	6.38	211.94	5.90	223.37	3.85	218.09	5.88	233.48
2:57:50	5.82	252.39	5.23	221.69	6.18	224.45	3.65	232.41	5.78	229.84
2:58:50	7.12	242.12	5.23	218.59	6.12	223.13	3.57	216.79	5.83	235.99
2:59:50	6.00	242.73	5.29	212.13	6.00	210.51	3.89	235.74	5.55	231.17
3:00:50	6.40	232.67	5.34	216.80	4.99	224.18	3.09	215.23	5.04	237.39
3:01:50	5.73	238.97	5.62	232.50	5.63	221.28	3.01	207.68	5.14	230.10
3:02:50	5.77	234.86	6.93	216.62	6.62	227.76	3.97	216.37	6.09	249.04
3:03:50	7.05	215.97	6.08	211.55	6.75	229.34	3.69	210.91	6.14	236.97
3:04:50	6.41	240.45	6.11	223.43	5.67	222.76	5.55	243.60	5.49	240.96
3:05:50	7.72	219.10	6.19	227.16	5.62	223.06	3.85	239.73	5.37	227.17
3:06:50	6.20	220.11	6.30	220.83	6.54	200.80	3.86	223.70	5.71	207.56
3:07:50	6.45	220.52	5.80	212.74	5.61	211.63	5.32	238.59	5.37	222.23
3:08:50	6.94	239.18	5.78	220.84	6.26	205.62	3.48	212.74	5.92	222.94
3:09:50	6.93	218.86	6.63	206.93	6.31	200.84	4.34	209.53	5.67	230.26
3:10:50	5.65	211.39	5.27	227.97	5.46	195.54	3.74	213.99	5.01	217.51
3:11:50	6.59	210.14	5.50	214.17	5.92	191.41	5.79	211.18	5.97	211.64

ตารางที่ 4 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 2

Time	WTG06		WTG07		WTG08		WTG09		WTG10	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	5.67	181.22	6.33	209.33	5.83	247.21	5.90	220.56	4.86	255.54
2:36:50	4.72	214.25	7.09	205.11	7.06	255.97	7.21	227.27	3.34	242.84
2:37:50	3.76	186.85	6.29	198.67	5.20	245.45	6.55	225.96	4.20	241.78
2:38:50	5.78	191.80	6.26	205.99	7.44	243.93	6.79	221.81	4.01	267.34
2:39:50	4.96	201.95	7.20	205.02	7.49	220.59	7.56	221.63	4.09	264.66
2:40:50	5.00	206.01	7.20	204.76	6.39	219.53	7.09	235.02	5.23	254.81
2:41:50	4.02	197.58	6.96	212.26	6.86	218.75	6.27	226.11	4.26	276.63
2:42:50	4.27	214.00	7.29	200.15	6.04	219.04	7.03	216.76	4.98	258.37
2:43:50	4.93	198.38	7.07	205.49	6.75	232.46	6.13	221.74	5.45	235.14
2:44:50	5.37	208.34	7.97	202.98	6.52	220.82	7.33	226.75	5.98	240.33
2:45:50	4.46	195.65	6.40	201.62	6.67	229.48	6.90	233.48	5.22	259.11
2:46:50	5.02	200.16	7.33	200.64	6.96	232.65	6.84	235.76	4.97	260.00
2:47:50	5.19	204.60	7.70	210.55	4.84	244.37	7.30	222.04	4.35	250.16
2:48:50	4.93	205.32	6.07	198.27	7.14	208.28	5.78	225.06	5.83	261.98
2:49:50	5.32	204.46	6.61	200.35	6.30	236.38	7.29	230.62	4.62	261.29
2:50:50	6.32	205.12	6.66	193.13	4.62	238.62	6.52	209.72	5.86	241.06
2:51:50	5.21	210.94	6.58	211.48	5.39	229.45	6.42	221.25	5.75	262.78
2:52:50	5.51	202.89	6.57	204.05	5.97	224.99	6.03	211.68	3.41	256.48
2:53:50	4.99	208.63	6.27	210.14	3.87	237.14	5.96	227.45	5.27	251.35
2:54:50	4.15	162.91	5.88	206.78	4.41	254.82	5.96	218.16	4.03	249.38
2:55:50	4.82	205.60	5.52	207.51	3.75	241.82	5.65	221.01	3.96	249.55
2:56:50	3.75	209.35	6.41	205.76	3.60	233.37	5.08	218.77	4.75	253.62
2:57:50	5.19	202.46	5.48	201.12	3.99	238.42	6.12	231.59	5.19	245.82
2:58:50	3.86	212.43	5.45	206.29	4.01	238.55	5.72	226.89	6.16	255.31
2:59:50	6.15	219.04	5.25	203.81	4.21	215.37	6.05	229.69	4.58	262.34

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Time	WTG06		WTG07		WTG08		WTG09		WTG10	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
3:00:50	4.23	177.40	5.93	210.47	4.55	238.81	6.38	223.86	5.38	256.10
3:01:50	6.65	208.73	5.82	207.97	3.77	242.52	5.11	222.78	4.35	245.89
3:02:50	6.28	203.33	5.65	205.12	4.22	249.28	6.70	229.22	4.93	261.44
3:03:50	6.49	181.54	5.39	208.36	4.44	245.85	5.02	223.03	3.80	247.56
3:04:50	7.38	173.87	5.11	209.22	4.48	239.89	5.18	232.63	4.81	257.52
3:05:50	4.86	165.19	6.49	211.60	4.24	235.22	6.06	235.92	4.75	244.08
3:06:50	5.98	185.70	6.05	205.17	5.09	247.44	7.31	234.68	4.01	262.95
3:07:50	7.09	166.08	5.52	209.88	5.69	237.04	5.90	226.90	4.22	261.47
3:08:50	5.01	166.39	5.91	206.85	4.40	249.79	6.11	234.62	5.57	269.91
3:09:50	5.25	206.73	5.48	200.27	5.18	245.08	6.17	231.84	5.84	280.66
3:10:50	4.31	161.09	5.87	185.62	4.01	228.53	5.33	227.05	5.25	270.91
3:11:50	4.48	193.76	5.10	187.45	6.36	229.30	5.42	235.92	4.06	231.71

ตารางที่ 5 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 3

Time	WTG11		WTG12		WTG13		WTG14		WTG15		WTG16	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	3.55	213.23	5.90	217.12	6.03	205.38	5.84	244.47	3.36	219.80	5.94	213.19
2:36:50	3.18	183.07	7.13	210.93	6.38	210.92	7.48	243.76	3.49	206.52	5.85	212.39
2:37:50	4.17	198.59	6.57	219.05	6.36	204.12	5.45	242.39	3.74	220.10	6.77	198.64
2:38:50	5.01	213.64	5.62	222.97	7.53	198.95	7.53	214.16	4.79	209.36	5.93	205.33
2:39:50	5.19	181.70	6.62	218.26	7.30	199.35	6.56	223.75	4.37	209.31	6.21	191.75
2:40:50	4.72	181.83	6.76	227.19	6.69	204.38	5.85	245.12	5.26	222.88	5.95	207.62
2:41:50	4.71	238.43	6.60	201.34	6.51	211.25	4.66	228.65	4.57	215.83	6.19	206.77
2:42:50	3.44	232.86	6.80	210.34	6.07	200.75	5.68	220.57	4.10	226.52	6.23	210.35

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Time	WTG11		WTG12		WTG13		WTG14		WTG15		WTG16	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:43:50	5.17	193.29	6.94	217.97	5.96	215.30	6.75	232.46	4.66	190.49	6.03	194.36
2:44:50	6.06	181.80	7.10	233.11	6.68	207.61	6.91	248.23	6.27	211.28	5.47	197.26
2:45:50	3.66	228.68	5.39	213.54	6.80	201.95	6.90	216.27	4.07	200.14	6.55	206.60
2:46:50	5.78	178.66	7.13	219.30	7.24	205.49	7.04	213.48	4.20	210.96	5.81	207.25
2:47:50	4.42	219.71	7.24	222.50	6.47	203.28	5.82	235.51	5.11	189.18	5.76	207.24
2:48:50	4.05	209.65	6.96	214.81	7.10	207.98	7.14	208.28	3.88	185.24	6.76	209.52
2:49:50	4.39	198.49	8.22	214.93	5.82	201.87	6.38	229.49	4.97	167.79	7.02	211.77
2:50:50	3.22	208.53	7.00	217.53	6.75	206.57	5.19	233.08	6.21	190.89	6.19	202.46
2:51:50	6.19	214.08	7.37	209.79	7.16	199.59	4.80	237.56	3.66	218.55	7.18	203.99
2:52:50	4.94	198.57	7.40	225.19	6.32	195.31	5.24	223.91	4.78	217.21	7.23	199.83
2:53:50	3.34	216.67	7.20	209.31	6.59	205.67	5.46	243.15	4.64	208.24	7.30	204.88
2:54:50	4.44	204.68	6.25	222.55	6.13	195.68	5.17	228.12	4.71	223.03	6.16	204.12
2:55:50	3.16	221.00	6.32	211.12	6.42	203.37	3.99	254.48	4.70	193.54	5.33	191.05
2:56:50	3.77	225.22	6.20	228.11	7.02	205.32	3.73	228.62	4.59	185.19	5.66	204.12
2:57:50	3.63	196.79	6.01	220.61	6.16	209.06	4.58	215.25	3.41	202.22	5.94	200.79
2:58:50	3.18	211.26	5.56	226.15	6.38	203.37	4.26	242.29	4.19	204.94	5.94	196.62
2:59:50	3.26	196.51	6.06	225.57	5.98	211.66	3.73	245.67	4.15	221.19	5.54	199.61
3:00:50	3.62	205.09	6.38	223.92	6.86	200.09	5.59	202.69	2.94	222.80	5.23	202.15
3:01:50	3.42	205.63	5.93	220.28	5.97	195.10	4.81	247.82	3.27	192.80	5.84	205.84
3:02:50	2.98	197.29	5.63	229.63	6.34	208.54	3.87	215.20	3.06	208.16	5.82	210.28
3:03:50	3.26	197.30	6.54	221.98	6.43	202.84	4.15	219.69	4.17	203.50	5.99	196.44
3:04:50	4.20	201.85	6.89	213.17	6.41	203.05	4.74	245.33	4.18	213.09	6.06	205.34
3:05:50	2.19	187.54	6.92	226.74	5.89	203.20	3.28	234.77	3.45	211.02	5.49	204.09
3:06:50	3.09	208.66	6.01	223.88	5.58	209.58	4.18	247.96	3.45	215.09	5.56	209.83
3:07:50	3.72	196.39	6.54	208.00	6.06	216.06	5.14	229.73	5.49	229.56	5.94	199.91

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Time	WTG11		WTG12		WTG13		WTG14		WTG15		WTG16	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
3:08:50	2.35	191.57	5.97	222.95	5.41	208.31	4.82	234.97	4.84	212.40	5.56	211.93
3:09:50	4.91	199.86	5.85	227.25	6.16	208.48	4.42	233.66	4.91	187.36	5.54	207.85
3:10:50	2.59	199.95	6.06	228.44	6.00	211.17	4.24	255.59	4.40	178.03	4.70	210.37
3:11:50	3.84	212.43	5.07	215.41	5.45	201.11	5.70	223.37	4.96	174.17	5.25	211.42

ตารางที่ 6 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 4

Time	WTG17		WTG18		WTG19		WTG20		WTG21	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	5.07	183.21	7.82	248.99	7.34	203.55	5.28	215.35	6.41	265.89
2:36:50	6.59	219.51	6.87	242.59	8.05	206.62	7.68	251.53	7.58	251.08
2:37:50	6.04	217.34	6.74	237.35	8.01	202.25	6.49	231.10	7.68	225.35
2:38:50	5.65	199.46	5.48	227.87	7.29	213.05	5.46	244.37	7.23	245.73
2:39:50	6.21	221.89	8.33	238.97	7.70	204.06	6.65	227.81	8.35	263.27
2:40:50	5.82	220.92	8.26	245.88	8.15	211.77	7.61	233.35	7.32	255.23
2:41:50	6.30	203.80	8.25	235.80	7.59	216.06	6.63	239.69	8.91	237.18
2:42:50	5.39	199.38	8.12	232.80	8.32	205.40	7.44	247.35	9.98	272.71
2:43:50	6.67	216.63	7.07	235.20	8.10	204.62	4.58	241.09	9.64	250.84
2:44:50	7.55	216.82	8.53	240.04	7.91	202.90	7.39	247.14	7.88	241.25
2:45:50	6.15	219.59	7.92	234.38	8.60	209.98	7.21	247.86	8.73	252.76
2:46:50	5.96	206.78	6.26	236.60	7.68	205.68	7.70	236.57	8.33	258.11
2:47:50	7.52	212.96	8.69	234.54	7.74	205.15	5.92	226.26	7.68	255.56
2:48:50	7.70	215.70	6.51	225.50	7.97	203.52	5.50	244.78	8.76	257.52
2:49:50	4.92	198.02	6.49	222.32	7.61	204.48	4.56	242.84	7.93	229.33
2:50:50	7.20	211.41	6.53	231.44	7.41	200.09	5.29	214.01	9.21	229.42

ตารางที่ 6 (ต่อ)

Time	WTG17		WTG18		WTG19		WTG20		WTG21	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:51:50	7.12	208.47	6.90	211.98	7.94	214.76	6.25	259.24	8.44	230.75
2:52:50	7.29	207.49	7.08	237.03	7.77	220.15	4.73	241.64	7.34	269.23
2:53:50	6.66	211.74	7.88	217.79	7.98	200.97	4.67	231.18	7.72	258.49
2:54:50	7.04	216.86	5.99	224.68	7.87	210.11	6.38	235.78	9.06	266.35
2:55:50	5.63	227.93	6.09	219.02	6.17	223.52	6.61	236.36	7.17	263.68
2:56:50	5.69	211.08	6.36	217.84	6.34	205.71	7.12	236.71	8.46	272.09
2:57:50	5.85	211.27	6.76	218.56	7.42	212.52	5.29	240.92	7.69	259.73
2:58:50	6.68	206.11	6.56	215.85	6.88	205.74	6.63	244.02	7.45	248.63
2:59:50	6.84	215.01	6.84	217.85	6.93	207.21	6.36	237.14	6.46	262.58
3:00:50	7.11	217.11	6.84	211.07	7.04	211.51	5.19	239.51	7.95	252.55
3:01:50	5.85	205.66	7.58	222.29	6.53	217.50	6.00	250.13	6.34	260.02
3:02:50	5.65	211.23	6.62	219.81	7.09	209.95	5.32	227.32	7.55	247.50
3:03:50	5.59	220.04	6.30	221.31	7.25	211.49	7.18	245.69	6.65	263.88
3:04:50	6.84	209.38	6.35	223.59	5.50	198.32	5.27	238.75	6.56	262.63
3:05:50	6.65	211.95	6.76	213.23	4.25	216.51	6.26	233.99	7.65	250.54
3:06:50	5.89	207.40	6.10	230.85	5.13	225.66	7.51	240.93	7.13	255.60
3:07:50	4.77	190.77	6.39	229.24	6.67	203.12	6.60	234.61	6.60	261.94
3:08:50	5.75	181.50	6.80	226.24	5.51	198.63	6.70	210.55	8.09	255.07
3:09:50	7.54	178.19	6.91	235.36	5.84	197.48	6.84	210.99	7.31	258.99
3:10:50	7.22	186.99	6.77	227.36	5.68	208.23	6.19	222.59	6.73	267.25
3:11:50	6.74	179.26	5.77	224.59	7.38	192.97	5.95	213.31	7.81	238.55

ตารางที่ 7 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 5

Time	WTG22		WTG23		WTG24		WTG25		WTG26	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	6.53	204.42	7.69	251.53	7.37	217.28	6.43	207.74	5.60	210.55
2:36:50	7.18	203.47	7.69	249.30	7.94	216.83	6.81	189.54	5.86	205.88
2:37:50	6.85	203.13	8.09	251.50	8.36	212.62	7.14	207.66	6.58	187.55
2:38:50	5.49	210.24	7.37	249.12	8.24	218.91	8.15	202.69	5.62	220.62
2:39:50	7.43	198.58	8.23	240.53	8.43	219.08	7.67	207.78	6.50	200.84
2:40:50	7.12	207.25	8.23	247.68	8.62	220.89	8.45	217.68	4.22	209.57
2:41:50	8.24	183.80	8.02	244.97	8.03	211.58	8.04	205.63	5.76	203.54
2:42:50	8.18	223.86	8.08	244.86	8.28	202.97	9.46	210.46	5.36	189.09
2:43:50	7.69	179.94	8.29	247.76	8.55	209.90	8.76	204.67	7.21	219.43
2:44:50	8.09	219.70	8.69	254.32	9.34	212.41	9.11	211.85	4.49	180.24
2:45:50	7.27	221.42	8.46	240.87	8.95	219.61	8.25	210.45	7.57	211.78
2:46:50	6.69	214.54	8.27	245.02	9.18	225.86	8.59	210.40	5.28	184.06
2:47:50	7.77	188.57	8.52	245.44	8.73	220.85	8.86	204.96	7.06	217.76
2:48:50	7.13	222.55	8.56	247.78	9.01	226.67	8.42	198.38	5.89	197.34
2:49:50	7.02	216.32	8.38	241.51	8.37	217.00	8.68	202.60	5.75	202.32
2:50:50	7.39	187.01	7.91	244.05	8.87	214.33	7.92	210.05	5.03	190.62
2:51:50	8.76	192.16	8.25	244.19	8.24	215.42	8.45	205.35	6.71	195.71
2:52:50	6.27	214.58	8.24	239.69	8.28	219.69	7.96	196.19	7.69	215.46
2:53:50	6.59	207.99	7.87	244.95	8.50	216.01	8.11	202.22	4.83	194.12
2:54:50	7.89	201.87	8.47	242.13	8.92	214.47	8.50	206.27	8.05	220.39
2:55:50	6.08	203.50	8.10	244.49	8.81	218.41	8.77	213.45	6.04	196.16
2:56:50	5.74	205.10	8.36	233.02	8.35	223.38	8.86	198.59	7.13	192.58
2:57:50	5.91	217.03	8.07	240.11	8.44	218.56	7.95	193.32	6.34	195.24
2:58:50	6.36	203.61	7.87	242.09	8.78	225.82	7.51	209.86	5.30	187.61
2:59:50	7.43	221.18	7.69	248.22	7.97	210.75	7.75	200.44	8.70	210.38

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Time	WTG22		WTG23		WTG24		WTG25		WTG26	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
3:00:50	6.61	206.43	7.96	246.36	7.63	221.95	7.75	206.78	6.76	193.30
3:01:50	6.37	192.00	8.36	248.44	7.49	227.78	7.73	206.21	7.67	192.94
3:02:50	5.89	201.68	7.81	245.33	7.16	218.26	7.03	202.32	6.38	208.91
3:03:50	5.89	228.73	7.40	254.64	7.18	230.40	7.86	202.08	5.93	214.27
3:04:50	6.38	210.93	7.98	252.41	7.04	222.17	7.16	209.32	6.94	188.74
3:05:50	8.21	220.10	7.63	251.55	8.07	221.30	7.16	211.92	7.25	202.60
3:06:50	5.87	215.55	7.30	246.72	7.32	199.63	8.00	206.08	7.77	203.83
3:07:50	6.36	204.33	7.26	253.42	7.53	229.41	7.72	195.82	7.78	207.04
3:08:50	7.11	219.93	7.47	252.70	6.75	211.75	6.83	202.71	6.26	198.65
3:09:50	7.15	213.00	7.20	245.77	8.13	223.68	7.23	220.04	6.48	208.52
3:10:50	6.68	214.38	6.85	244.56	7.00	222.11	7.55	208.06	7.32	228.98
3:11:50	5.96	218.10	6.96	242.08	7.41	207.91	7.40	206.70	6.29	210.18

ตารางที่ 8 ความเร็วและทิศทางลมกังหันลมกลุ่มที่ 6

Time	WTG27		WTG28		WTG29		WTG30		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:35:50	7.69	208.43	4.15	272.88	6.66	242.45	6.00	197.29	7.60	257.27	5.20	270.47
2:36:50	6.48	188.01	5.79	230.32	6.87	236.31	5.92	205.10	7.17	260.24	5.80	256.70
2:37:50	7.80	190.68	5.78	253.92	7.86	243.69	6.80	233.26	7.33	248.94	5.93	242.97
2:38:50	7.13	213.38	3.78	260.51	8.86	261.82	7.50	196.76	6.26	244.04	6.07	268.27
2:39:50	6.14	195.43	4.83	244.00	7.99	232.29	6.84	211.12	8.65	251.63	6.77	261.77
2:40:50	7.03	197.71	4.92	218.52	7.47	245.15	7.06	200.67	7.56	252.21	6.46	243.14
2:41:50	6.71	193.71	5.73	256.77	8.35	251.45	7.13	195.47	7.64	233.63	6.40	262.49
2:42:50	7.82	187.85	5.07	231.75	8.52	234.90	7.79	204.31	6.70	251.06	6.15	248.27

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Time	WTG27		WTG28		WTG29		WTG30		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
2:43:50	8.04	197.53	5.92	268.96	8.25	248.48	7.54	219.69	6.66	245.30	7.29	242.73
2:44:50	9.47	198.38	5.71	264.17	8.39	237.10	8.31	197.13	9.01	250.25	6.53	259.73
2:45:50	8.32	208.93	6.60	261.97	8.06	241.67	8.45	215.75	7.27	253.55	7.14	251.82
2:46:50	8.57	199.07	8.26	264.80	6.94	239.45	6.99	225.24	9.50	250.90	6.91	255.54
2:47:50	7.96	187.24	5.24	242.90	8.60	244.88	7.60	210.48	7.02	267.50	6.99	258.47
2:48:50	7.40	202.59	4.34	263.09	8.04	251.85	6.72	215.39	8.70	252.87	7.83	246.23
2:49:50	8.06	197.35	7.25	256.34	8.40	251.54	8.56	214.13	9.33	251.28	5.91	243.24
2:50:50	8.36	204.89	6.33	258.70	7.57	247.52	7.30	211.87	8.33	251.05	7.43	264.71
2:51:50	7.00	199.93	4.76	219.33	8.47	236.93	8.55	198.88	10.33	253.59	7.31	271.99
2:52:50	7.48	198.76	5.81	250.01	7.71	241.49	7.35	212.58	7.69	242.72	8.42	252.76
2:53:50	8.91	195.96	6.18	272.53	8.35	260.63	9.05	217.19	9.49	251.43	7.96	260.21
2:54:50	7.84	205.46	5.21	255.14	9.31	240.92	6.81	210.49	9.44	252.65	6.08	246.17
2:55:50	8.29	195.14	7.98	252.46	8.39	246.42	6.87	217.69	7.62	248.62	7.12	241.78
2:56:50	8.12	207.34	4.83	251.13	8.79	252.08	7.02	197.27	8.17	246.90	7.19	253.01
2:57:50	9.02	199.91	6.41	235.02	8.17	247.19	7.64	218.80	7.17	245.93	6.39	255.58
2:58:50	7.48	205.12	5.89	267.68	7.40	238.35	6.42	208.38	9.20	253.56	7.60	265.81
2:59:50	8.37	207.06	7.85	257.94	8.82	243.68	7.54	210.21	7.88	252.56	6.69	259.17
3:00:50	8.11	204.44	7.58	274.21	6.72	250.51	4.95	224.85	8.07	259.98	6.21	251.11
3:01:50	7.85	209.00	7.16	250.44	7.82	246.32	7.67	201.52	8.25	240.28	7.30	245.55
3:02:50	8.27	209.58	6.93	266.61	7.37	258.51	8.55	211.42	8.47	260.79	5.85	259.72
3:03:50	8.06	206.10	6.44	260.63	7.18	238.54	7.67	198.75	4.84	270.43	7.02	267.72
3:04:50	9.02	212.44	8.31	251.09	7.79	246.28	8.39	213.20	7.81	253.39	6.90	266.88
3:05:50	7.95	208.87	5.61	234.39	8.53	254.44	6.95	210.02	7.07	255.76	5.01	271.74
3:06:50	8.38	215.56	7.72	266.14	8.30	237.32	6.33	215.67	8.59	248.13	5.18	251.47
3:07:50	7.10	200.58	7.04	257.30	8.37	245.33	6.83	216.88	4.72	255.50	7.09	263.77

ตารางที่ 8 (ต่อ)

Time	WTG27		WTG28		WTG29		WTG30		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
3:08:50	8.11	211.85	6.87	262.47	8.70	249.19	7.31	220.79	6.52	252.00	6.52	261.34
3:09:50	7.81	213.79	7.02	255.37	7.31	249.19	7.18	213.38	6.80	249.39	5.46	259.05
3:10:50	7.67	212.34	7.44	246.65	7.88	241.29	7.57	209.73	6.00	234.52	5.84	254.71
3:11:50	7.06	207.26	6.90	255.65	8.05	250.38	7.46	200.34	5.71	246.15	4.85	255.34

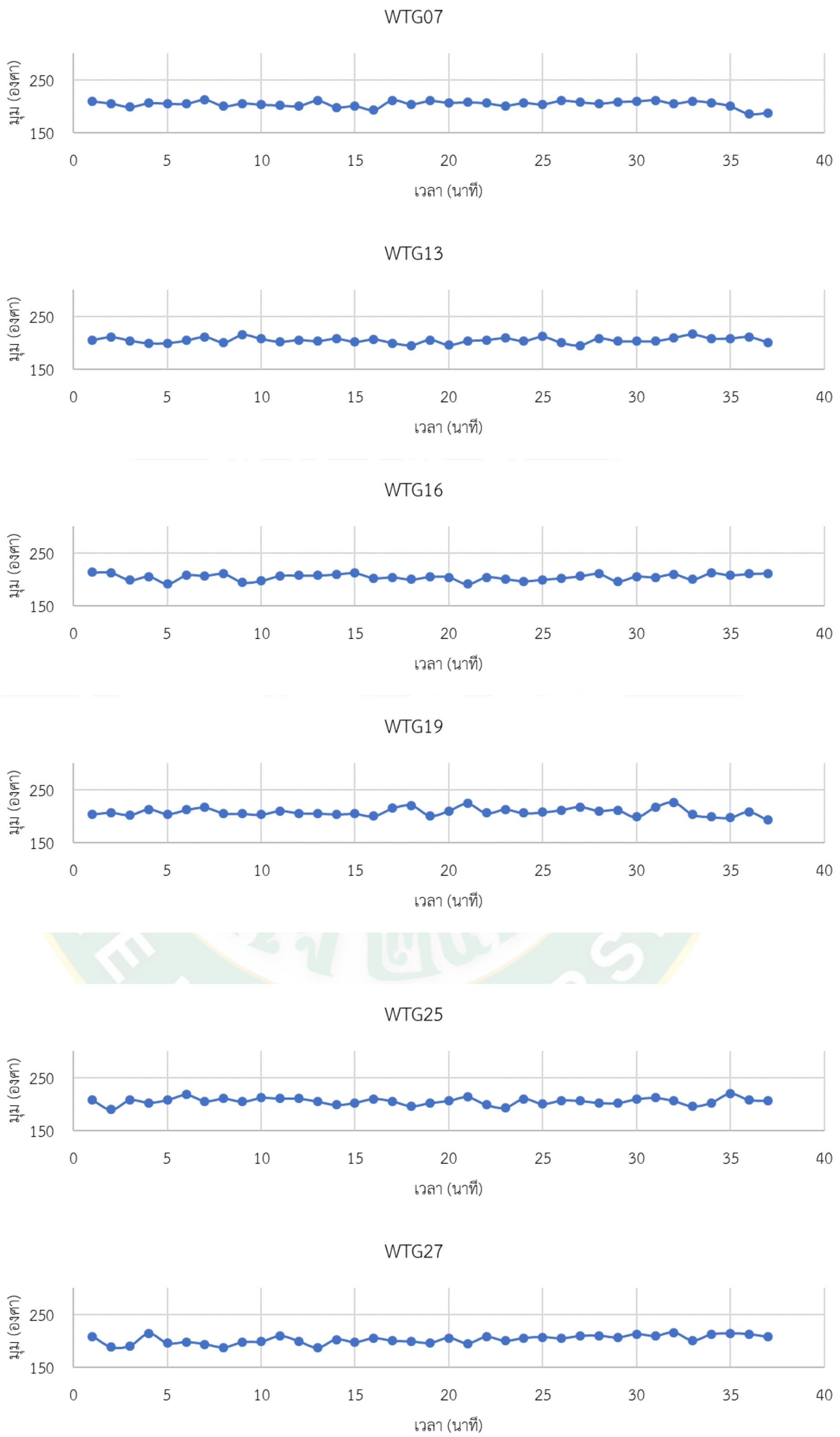
เมื่อนำข้อมูลมุมของทิศทางลมกับเวลาขณะที่กังหันลมทำการผลิตไฟฟ้ามาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ใช้วิธีแบ่งกลุ่มกังหันลมด้วยการดูลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟลมในแต่ละช่วงเวลาของสถานะออนไลน์ พบว่า กังหันลมทั้ง 32 ต้น สามารถแบ่งกลุ่มใหม่ ตามลักษณะลมที่พัดผ่านได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า มีทิศของลมที่พัดสู่กังหันวัดจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมแต่ละต้น มีค่าระหว่าง 202.64-256.53 องศา และ 2) กลุ่มที่ลมมีการเปลี่ยนทิศลมขึ้น-ลง ไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า มีทิศของลมที่พัดสู่กังหันวัดจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมแต่ละต้น มีค่าระหว่าง 195.67-255.35 องศา

จากข้อมูลลมในวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 เป็นช่วงพัดผ่านของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ซึ่งมีทิศระหว่าง 191.25-258.75 องศา สามารถแบ่งเป็นทิศย่อยได้อีก 3 ทิศรอบทิศตะวันตกเฉียงใต้ ได้แก่ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนใต้ (SSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนตะวันตก (WSW) ซึ่งกังหันลมกลุ่มที่มีทิศแน่นอน มีช่วงของทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนใต้ ทิศตะวันตกเฉียงใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนตะวันตก อยู่ในช่วง 202.64-207.87, 217.99-227.99 และ 245.55-256.53 องศา ตามลำดับ ส่วนกังหันลมกลุ่มที่มีทิศไม่แน่นอน มีช่วงของทิศ SSW SW และ WSW อยู่ในช่วง 195.67-210.32, 216.91-235.74 และ 253.83-255.35 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

4.1.1 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า

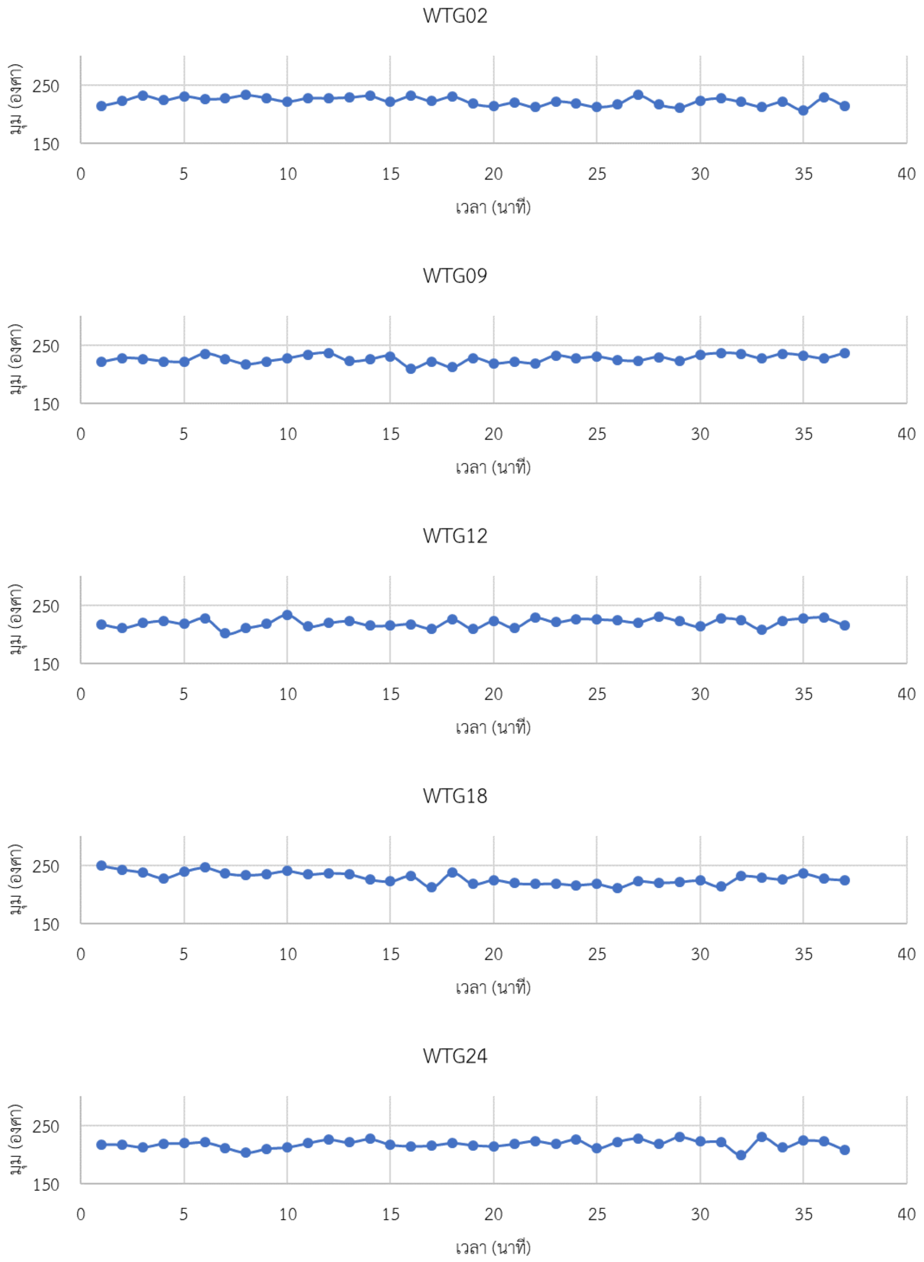
กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ประกอบด้วยกังหันลมจำนวน 15 ต้น สามารถแบ่งตามทิศส่วนใหญ่ที่ลมพัดมาได้อีก 3 กลุ่ม ได้แก่

1) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5.23 องศา จำนวน 6 ต้น ประกอบด้วย WTG07, WTG13, WTG16, WTG19, WTG25 และ WTG27 ดังแสดงในภาพที่ 33



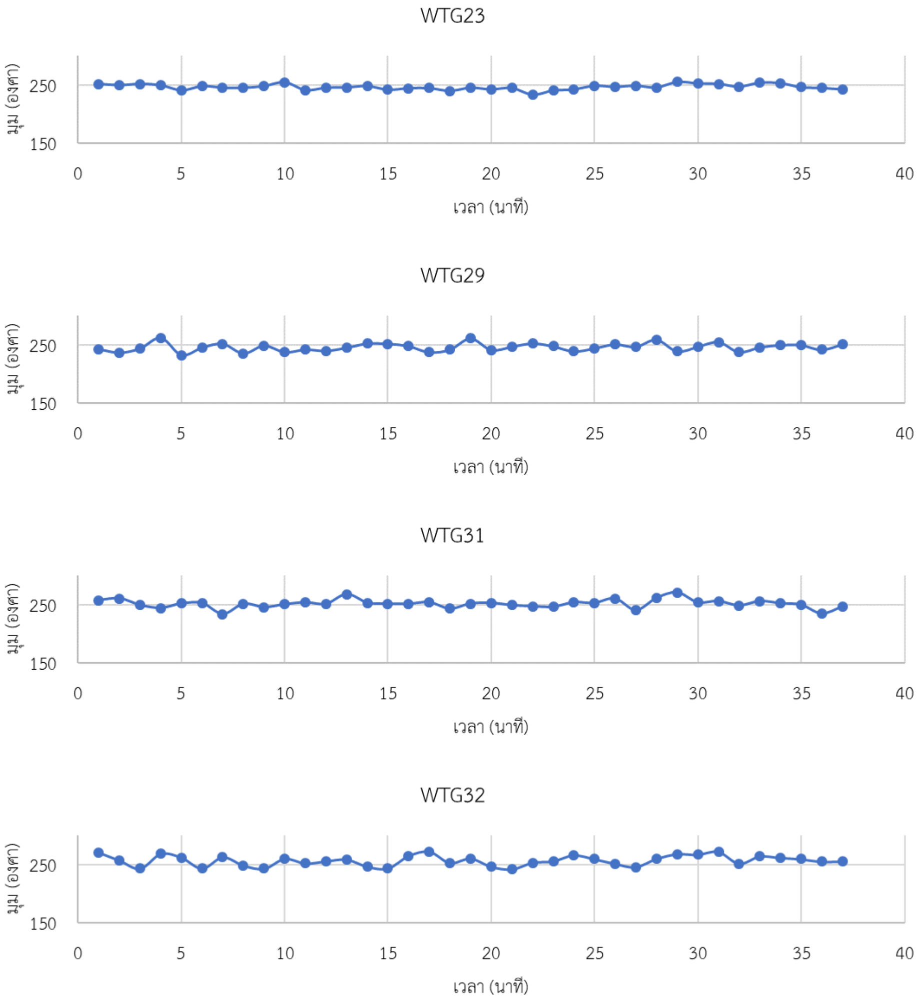
ภาพที่ 33 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา

2) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.00 องศา จำนวน 5 ประกอบด้วย WTG02, WTG09, WTG12, WTG18 และ WTG24 ดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา

3) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.98 องศา จำนวน 4 ต้น ประกอบด้วย WTG23, WTG29, WTG31 และ WTG32 ดังแสดงในภาพที่ 35

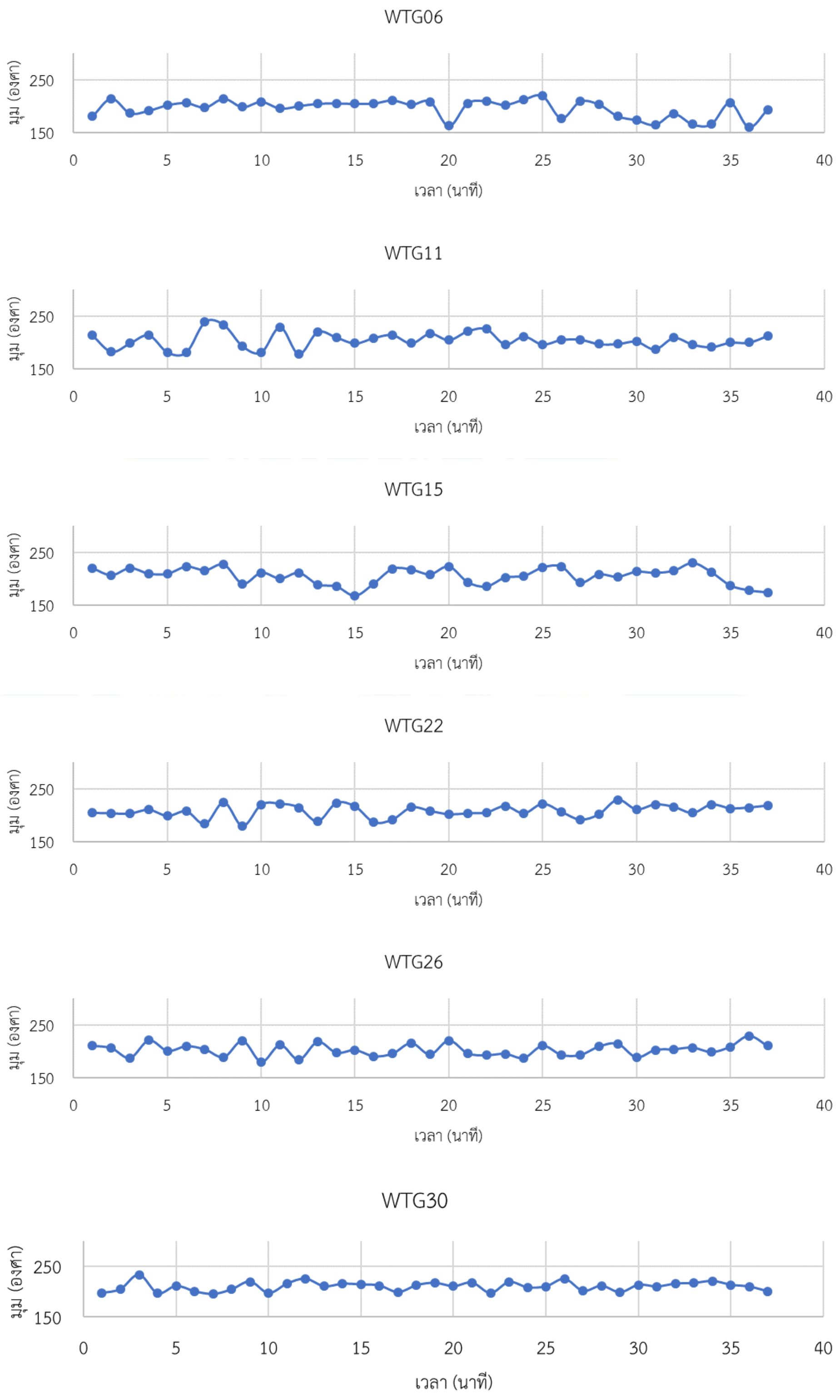


ภาพที่ 35 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน อยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา

4.1.2 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า

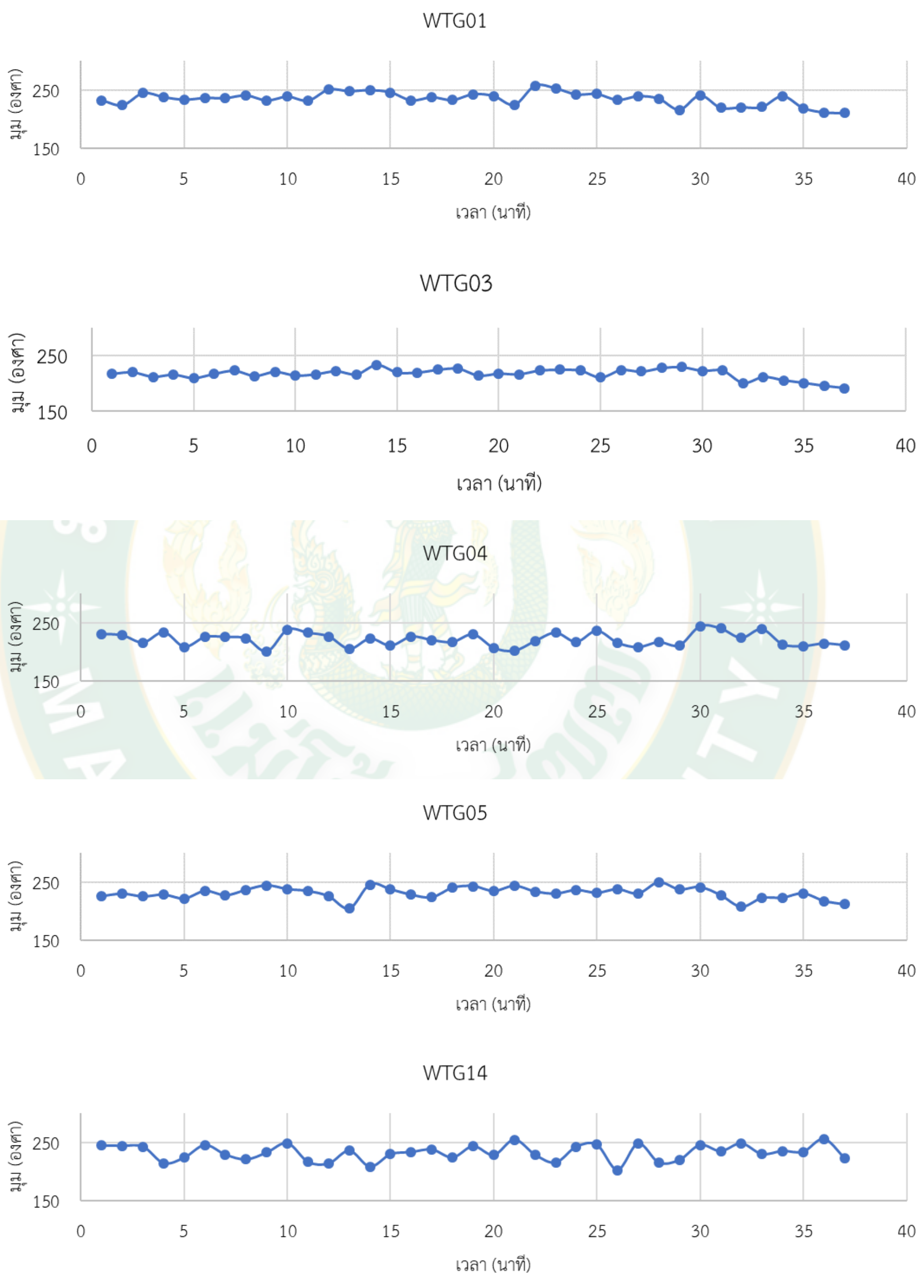
กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ประกอบด้วยกังหันลมจำนวน 17 ต้น สามารถแบ่งตามทิศส่วนใหญ่ที่ลมพัดมาได้อีก 3 กลุ่ม ได้แก่

1) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 14.65 องศา จำนวน 6 ต้น ประกอบด้วย WTG06, WTG11, WTG15, WTG22, WTG26 และ WTG30 ดังแสดงในภาพที่ 36

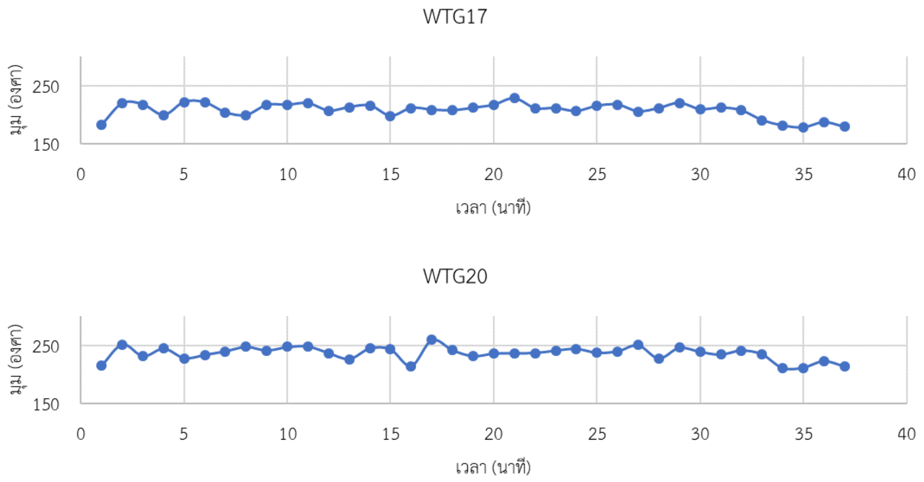


ภาพที่ 36 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา

2) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 18.83 องศา จำนวน 7 ต้น ประกอบด้วย WTG01, WTG03, WTG04, WTG05, WTG14, WTG17 และ WTG20 ดังแสดงในภาพที่ 37

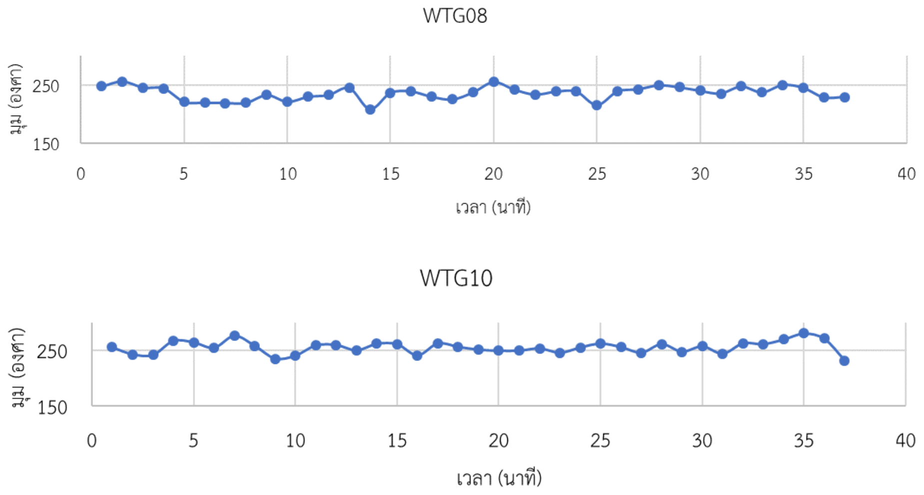


ภาพที่ 37 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา

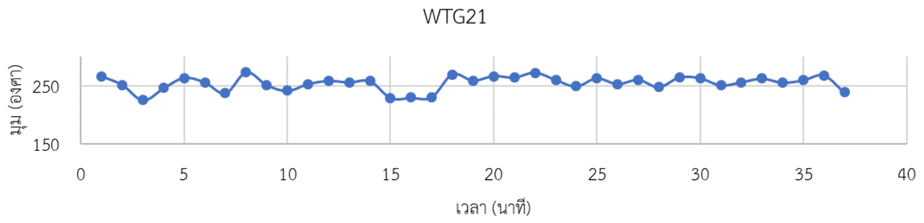


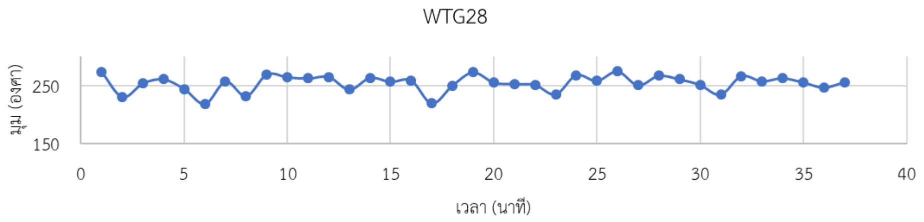
ภาพที่ 37 (ต่อ)

3) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20.38 องศา จำนวน 4 ต้น ประกอบด้วย WTG08, WTG10, WTG21, และ WTG28 ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน อยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา





ภาพที่ 38 (ต่อ)

นำข้อมูลการแบ่งกลุ่มกังหันลมทั้งสองกลุ่มรวมในภาพแผนที่ทางภูมิศาสตร์ที่มีตำแหน่งติดตั้งกังหันลมทั้ง 32 ต้น ในภาพเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 39 โดยกังหันลมที่มีกลุ่มเดียวกัน จะใช้สัญลักษณ์เหมือนกัน คือ

แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 202.64-207.87 องศา

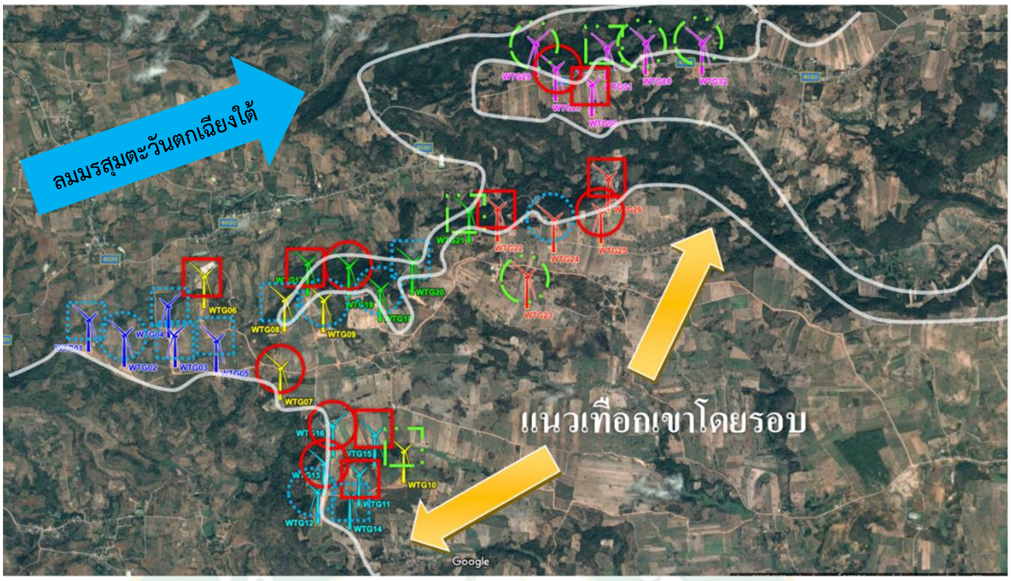
แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 217.99-227.99 องศา

แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 245.55-256.53 องศา

แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 195.67-210.32 องศา

แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 216.91-235.74 องศา

แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 253.83-274.21 องศา



ภาพที่ 39 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามลักษณะของทิศทางลม

จากภาพพบความสัมพันธ์คือ กังหันลมกลุ่มที่มีทิศทางลมแน่นอน เป็นกังหันลมที่ติดตั้งบริเวณพื้นโล่ง ห่างจากเนินเขา ส่วนกังหันลมกลุ่มที่มีทิศทางลมไม่แน่นอน จะติดตั้งบริเวณใกล้กับเนินเขา ทำให้ลมที่พัดสู่กังหันลมมีความแปรปรวน

ผลของการแบ่งกลุ่มกังหันลมจากลักษณะของลมที่พัดผ่านนี้ สามารถนำไปใช้ในการกำหนดรูปแบบของทิศลมจากกังหันลมต้นหนึ่ง เพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังกังหันลมต้นอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อให้ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทิศลม ป้อนสู่กังหันลมเพื่อให้เตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้าในทิศทางที่ลมพัดมาอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4.3 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้การส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาด้วยวิธีหันหน้ากังหันลมให้ตรงกับค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม

ระบบปฏิบัติการโดยทั่วไปของกังหันลมแต่ละต้น ขั้นตอนการทำงานของกังหันลมจะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดลมแล้วค่อยปรับหน้ากังหันลมสู่ทิศทางที่ลมพัดมา ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับหน้าขณะที่ตรวจวัดลมไปด้วยนั้นจะลดระยะเวลาในการลิตไฟฟ้า ซึ่งการลดระยะเวลาการหันหน้าของกังหันลมในงานวิจัยนี้ จะส่งผลให้กังหันลมมีระยะเวลาในการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากวิธีเดิม โดยการให้กังหันลมในกลุ่มหันหน้าไปในทิศทางมุมเฉลี่ยที่ลมพัดผ่าน กังหันลมสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทันที ไม่ต้องเสียเวลาในการรออุปกรณ์ตรวจวัดลมบนกังหันลมเก็บข้อมูลลมและ

ประมวลผลก่อน เมื่อสามารถลดขั้นตอนการทำงานของระบบขั้นตอนนี้ได้ ทำให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้เพิ่มขึ้น

4.3.1 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง

ลมมรสุมในประเทศไทยจะพัดตามฤดูกาลมีทิศทางแน่นอนและสม่ำเสมอ ประกอบด้วย 2 ลมมรสุม ได้แก่ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะพัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งในช่วงของการเปลี่ยนแปลงลมมรสุมนี้ จะทำให้ลมที่พัดผ่านมีทิศทางไม่แน่นอน ส่งผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าด้วยกันหันลม ที่จะใช้เวลาในการตรวจจับความเร็วและทิศของลม เพื่อปรับหน้ากังหันลมเข้าสู่ทิศลมที่มีความเร็วสามารถผลิตไฟฟ้าได้ ทำให้เวลาที่ถูกใช้ไปนี้ไปลดเวลาที่จะสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้ เมื่อใช้วิธีการส่งข้อมูลระหว่างกลุ่มกังหันลม ทำให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงใช้ข้อมูลลมในเดือนพฤษภาคม จากตารางที่ 5-8 ในการวิเคราะห์ผล ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลงต่อรอบการผลิต

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
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	134.78
WTG13	247.31	196.26	51.05	9.00	2.34	55.80
WTG16	195.79	216.92	21.14	11.66	0.53	12.57
WTG19	215.32	207.72	7.60	2.46	0.29	6.82
WTG25	197.42	219.39	21.97	14.13	0.44	10.40
WTG27	223.12	267.15	44.02	61.89	-0.99	-23.71

ตารางที่ 9 (ต่อ)

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
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	16.16
WTG09	204.41	207.30	2.89	15.69	-0.71	-16.45
WTG12	172.61	227.17	54.57	4.18	2.80	64.75
WTG18	211.93	223.47	11.54	0.48	0.61	14.22
WTG24	194.85	269.64	74.79	46.65	1.56	36.17
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	-22.68
WTG29	206.18	255.24	49.06	4.20	2.49	74.21
WTG31	290.25	225.13	65.12	25.91	2.18	64.87
WTG32	284.7	223.29	61.42	27.76	1.87	55.69
		รวมทั้งสิ้น			**18.98**	**483.61**
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	6.34
WTG11	245.24	226.02	19.21	23.03	-0.21	-3.43
WTG15	189.72	230.86	41.14	27.87	0.74	11.93
WTG22	298.15	193.93	104.22	9.06	5.29	85.52
WTG26	187.14	202.78	15.64	0.22	0.86	13.86
WTG30	192.66	235.02	42.36	32.03	0.57	9.28

ตารางที่ 9 (ต่อ)

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
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	-9.90
WTG03	191.38	228.13	36.75	-1.80	2.14	37.81
WTG04	242.60	228.15	14.45	-1.82	0.90	15.96
WTG05	236.70	191.83	44.87	34.50	0.58	10.17
WTG14	177.01	219.28	42.28	7.05	1.96	34.56
WTG17	187.10	213.93	26.84	12.40	0.80	14.16
WTG20	194.32	196.41	2.09	29.92	-1.55	-27.29
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	34.86
WTG10	265.64	216.65	48.99	47.37	0.09	1.69
WTG21	193.06	226.87	33.81	37.15	-0.19	-3.50
WTG28	186.47	220.10	33.63	43.93	-0.57	-10.77
		รวมทั้งสิ้น			**13.09**	**599.44**

ตารางที่ 9 แสดงการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าของแต่ละกลุ่มกังหันลม โดยพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นแต่ละกลุ่มจะไม่เท่ากัน เนื่องจากผลของมุมที่กังหันลมแต่ละต้นหยุดการทำงานก่อนหน้าอยู่คนละมุมกัน ระยะเวลาที่ใช้สำหรับปรับหน้าของกังหันลมแต่ละต้นจึงไม่เท่ากันไปด้วย เมื่อใช้วิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดา โดยข้อมูลที่ส่งคือค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลม พบว่า กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 18.98 นาที คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 483.61 กิโลวัตต์ชั่วโมง และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า

สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 13.09 นาที คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 599.44 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 รอบการทำงาน

ตารางที่ 10 พลังงานไฟฟ้าต่อเดือนที่เพิ่มขึ้นเมื่อคำนวณจากการทำงานจริงของกังหันลม

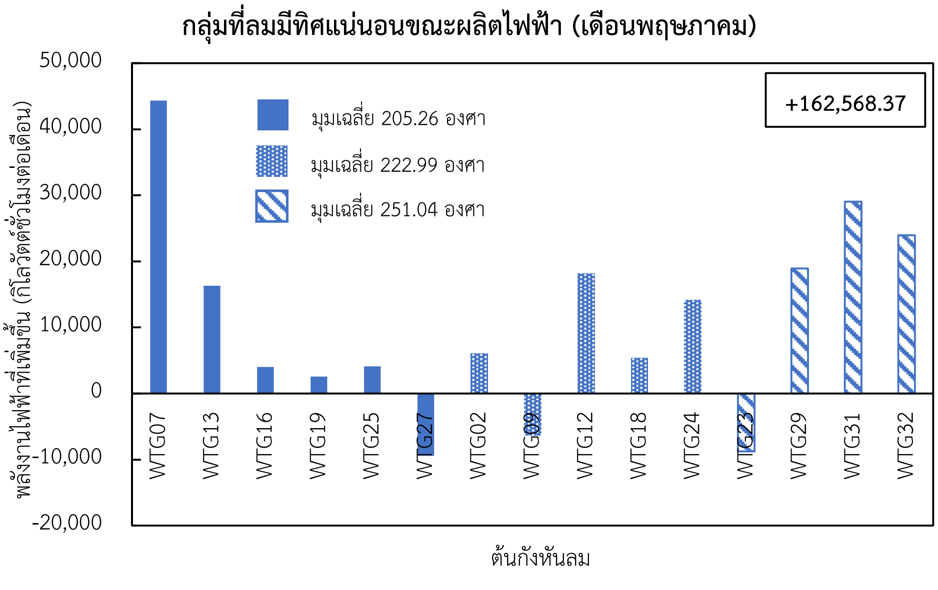
กังหันลมต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อ 1 รอบ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า			
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 205.26 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.94 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,433.29 กิโลวัตต์			
WTG07	134.78	329	44,341.64
WTG13	55.80	292	16,294.02
WTG16	12.57	321	4,034.70
WTG19	6.82	376	2,562.85
WTG25	10.40	397	4,130.64
WTG27	-23.71	398	-9,434.60
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 222.99 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.84 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,388.04 กิโลวัตต์			
WTG02	16.16	375	6,060.63
WTG09	-16.45	386	-6,348.04
WTG12	64.75	281	18,196.05
WTG18	14.22	378	5,375.05
WTG24	36.17	392	14,179.65
ทิศทางลมแน่นอน เฉลี่ย 251.04 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 7.55 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,786.70 กิโลวัตต์			
WTG23	-22.68	386	-8,753.65
WTG29	74.21	255	18,924.21

ตารางที่ 10 (ต่อ)

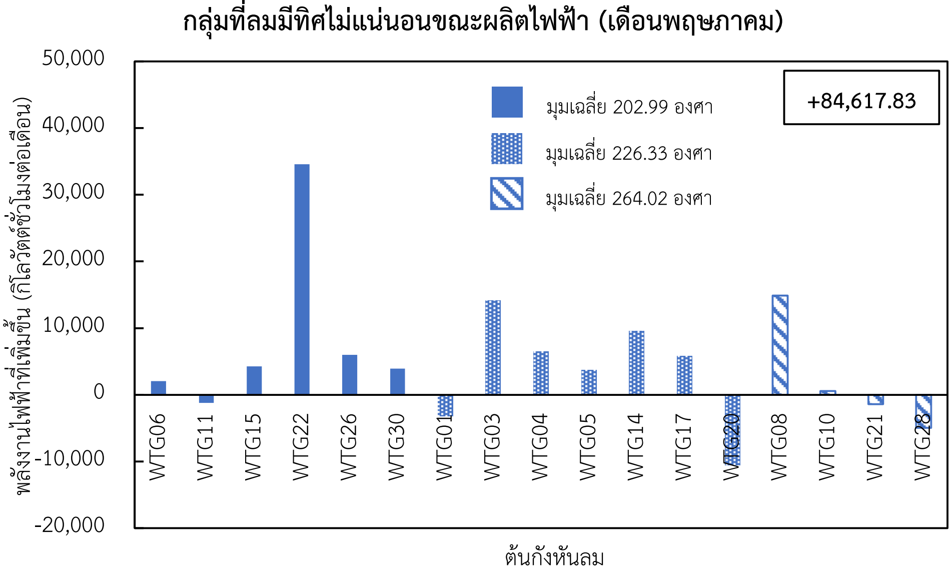
กังหันลมต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อ 1 รอบ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
WTG31	64.87	448	29,060.48
WTG32	55.69	430	23,944.76
รวม	**483.61**	**5,444**	**162,568.37**
กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า			
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 202.99 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.69 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 970.61 กิโลวัตต์			
WTG06	6.34	325	2,061.80
WTG11	-3.43	354	-1,214.99
WTG15	11.93	358	4,269.80
WTG22	85.52	404	34,549.97
WTG26	13.86	432	5,987.89
WTG30	9.28	424	3,935.91
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 226.33 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 5.84 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,059.39 กิโลวัตต์			
WTG01	-9.90	327	-3,236.47
WTG03	37.81	375	14,178.17
WTG04	15.96	406	6,479.56
WTG05	10.17	368	3,743.33
WTG14	34.56	276	9,537.92
WTG17	14.16	409	5,793.25
WTG20	-27.29	387	-10,562.78

ตารางที่ 10 (ต่อ)

กังหันลม ต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นต่อ 1 รอบ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
ทิศทางลมไม่แน่นอน เฉลี่ย 264.02 องศา ความเร็วลมเฉลี่ย 6.03 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 1,130.24 กิโลวัตต์			
WTG08	34.86	427	14,883.68
WTG10	1.69	334	565.20
WTG21	-3.50	397	-1,387.66
WTG28	-10.77	461	-4,966.77
รวม	**599.44**	**6,464**	**84,617.83**



ภาพที่ 40 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน



ภาพที่ 41 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีการเปลี่ยนแปลง กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

เมื่อจำนวนรอบในการหยุดทำงานของกันหันลมแต่ละต้นไม่เท่ากัน ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นในแต่ละต้นไม่เท่ากันด้วย จากตารางที่ 9 และ 10 จะพบว่า ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 ที่ทำการวิจัย กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า มีจำนวนรอบหยุดทำงาน 5,444 รอบ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 162,568.37 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้ามีจำนวนรอบหยุดทำงาน 6,464 รอบ หากใช้วิธีการส่งสัญญาณสกาดาของกลุ่มกังหันลม สามารถเพิ่มปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 84,617.83 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังแสดงในภาพที่ 40-41 รวมทั้งโครงการ เท่ากับ 247,186.20 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน

4.3.2 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน

ข้อมูลที่ใช้สำหรับช่วงลมมรสุมมีความแน่นอนใน ใช้ข้อมูลเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 แสดงในภาคผนวก ก เมื่อใช้วิธีการส่งข้อมูลระหว่างกลุ่มกังหันลม ทำให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมได้เพิ่มขึ้น ดังผลที่แสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า						
มุมเฉลี่ย 205.26 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.69 เมตรต่อวินาที						
มีกำลังผลิตไฟฟ้า 607.80 กิโลวัตต์						
WTG07	291.46	201.63	89.83	3.63	4.79	48.51
WTG13	183.160	195.393	12.233	9.87	0.13	1.33
WTG16	198.60	235.07	36.47	-29.81	3.68	37.30
WTG19	201.79	219.69	17.90	-14.43	1.80	18.19
WTG25	229.55	219.13	10.42	-13.87	1.35	13.67
WTG27	286.14	216.91	69.23	-11.65	4.49	45.52
มุมเฉลี่ย 222.99 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.75 เมตรต่อวินาที						
มีกำลังผลิตไฟฟ้า 648.78 กิโลวัตต์						
WTG02	272.23	194.43	77.80	28.56	2.74	29.58
WTG09	232.80	253.71	20.91	-30.72	2.87	31.02
WTG12	197.84	222.44	24.60	0.55	1.34	14.45
WTG18	180.30	189.45	9.15	33.54	-1.36	-14.65
WTG24	210.09	196.10	13.99	26.89	-0.72	-7.75
มุมเฉลี่ย 251.04 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5.43 เมตรต่อวินาที						
มีกำลังผลิตไฟฟ้า 842.56 กิโลวัตต์						
WTG23	238.58	195.76	42.83	55.29	-0.69	-9.72
WTG29	254.69	255.47	0.78	-4.43	0.29	4.07
WTG31	178.48	216.72	38.24	34.32	0.22	3.06
WTG32	260.70	229.94	30.76	21.10	0.54	7.54
		รวมทั้งสิ้น			**16.67**	**173.60**

ตารางที่ 11 (ต่อ)

กังหันลมต้นที่	มุมที่หยุดก่อนหน้า (องศา)	มุมเริ่มทำงาน (องศา)	ส่วนต่างมุมเดิม (องศา)	ส่วนต่างมุมเฉลี่ย (องศา)	เวลาการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (นาที)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า						
มุมเฉลี่ย 202.99 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.14 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 486.58 กิโลวัตต์						
WTG06	167.73	240.43	72.70	-37.44	6.12	49.62
WTG11	208.55	275.79	67.24	-72.80	7.78	63.10
WTG15	193.04	207.10	14.06	-4.11	1.01	8.19
WTG22	239.52	199.13	40.39	3.86	2.03	16.46
WTG26	219.79	218.23	1.56	-15.24	0.93	7.57
WTG30	228.32	230.87	2.55	-27.88	1.69	13.71
มุมเฉลี่ย 226.33 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 540.36 กิโลวัตต์						
WTG01	173.10	238.11	65.01	-11.78	4.27	38.42
WTG03	236.55	222.87	13.68	3.46	0.57	5.11
WTG04	240.92	220.73	20.19	5.60	0.81	7.30
WTG05	235.62	201.09	34.53	25.24	0.52	4.65
WTG14	189.57	245.83	56.26	-19.50	4.21	37.91
WTG17	237.92	206.75	31.17	19.58	0.64	5.80
WTG20	212.91	212.67	0.24	13.66	-0.75	-6.71
มุมเฉลี่ย 264.02 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 540.36 กิโลวัตต์						
WTG08	224.42	217.92	6.50	46.10	-2.20	-19.81
WTG10	243.08	235.03	8.05	28.99	-1.16	-10.48
WTG21	255.25	156.14	99.11	107.88	-0.49	-4.39
WTG28	168.30	175.50	7.20	88.52	-4.52	-40.69
		รวมทั้งสิ้น			**21.46**	**175.75**

ตารางที่ 11 แสดงการเพิ่มการผลิตไฟฟ้าของแต่ละกลุ่มกังหันลม ด้วยวิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดา พบว่า กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 16.67 นาที คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 173.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า สามารถเพิ่มระยะเวลาการผลิตไฟฟ้าได้ 21.46 นาที คิดเป็นปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 175.75 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อการผลิตไฟฟ้า 1 รอบการทำงาน

ตารางที่ 12 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อคำนวณจากการทำงานจริงของกังหันลม

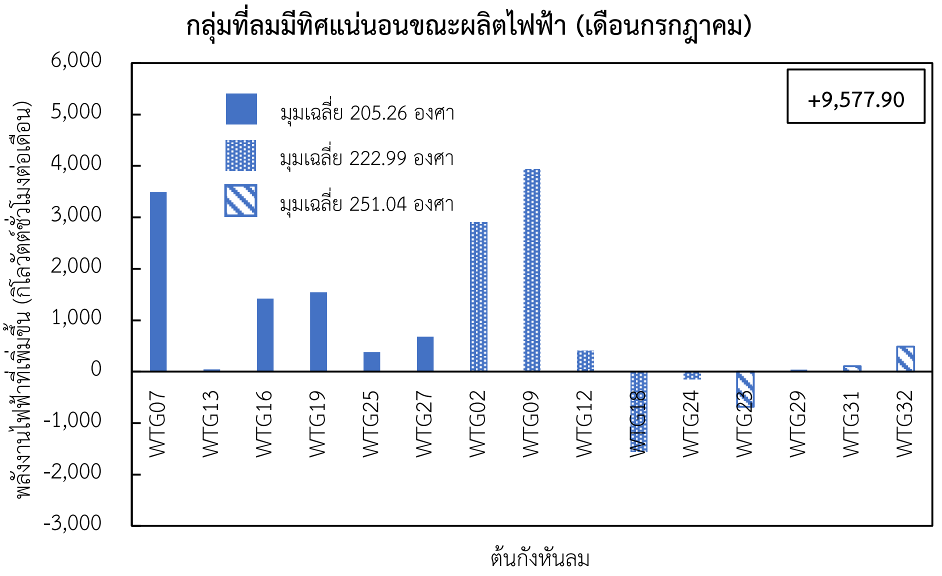
กังหันลมต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า			
มุมเฉลี่ย 205.26 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.69 เมตรต่อวินาที			
มีกำลังผลิตไฟฟ้า 607.80 กิโลวัตต์			
WTG07	48.51	72	3,492.82
WTG13	1.33	35	46.60
WTG16	37.30	38	1,417.43
WTG19	18.19	85	1,546.16
WTG25	13.67	28	382.76
WTG27	45.52	15	682.76
มุมเฉลี่ย 222.99 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.75 เมตรต่อวินาที			
มีกำลังผลิตไฟฟ้า 648.78 กิโลวัตต์			
WTG02	29.58	98	2,898.80
WTG09	31.02	127	3,938.94
WTG12	14.45	28	404.63
WTG18	-14.65	106	-1,553.33
WTG24	-7.75	19	-147.24

ตารางที่ 12 (ต่อ)

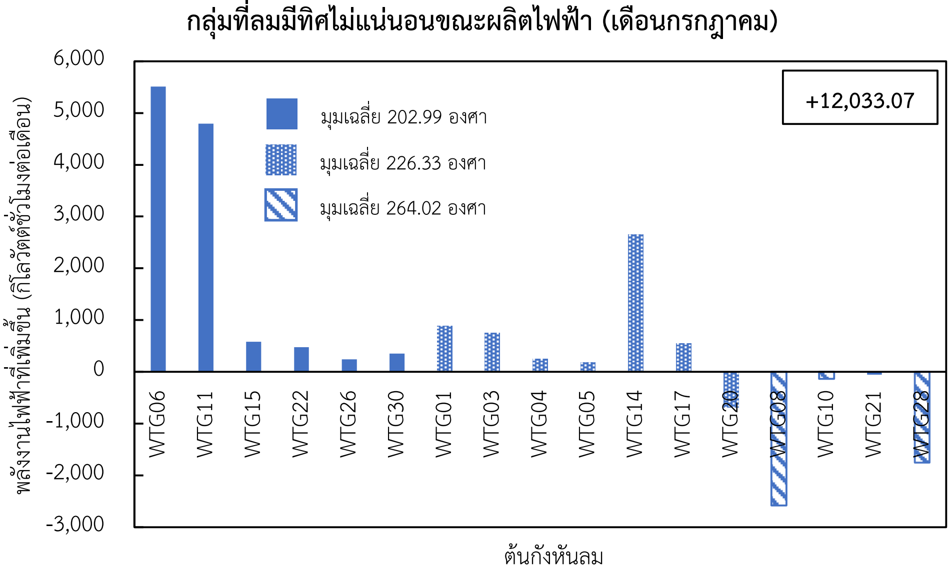
กังหันลมต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
มุมเฉลี่ย 251.04 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 5.43 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 842.56 กิโลวัตต์			
WTG23	-9.72	70	-680.45
WTG29	4.07	10	40.71
WTG31	3.06	36	110.26
WTG32	7.54	65	489.86
รวม	**173.60**	**832**	**9,577.90**
กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า			
มุมเฉลี่ย 202.99 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.14 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 486.58 กิโลวัตต์			
WTG06	49.62	111	5,508.16
WTG11	63.10	76	4,795.36
WTG15	8.19	71	581.35
WTG22	16.46	29	477.29
WTG26	7.57	32	242.21
WTG30	13.71	26	356.48
มุมเฉลี่ย 226.33 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 540.36 กิโลวัตต์			
WTG01	38.42	23	883.56
WTG03	5.11	148	756.78
WTG04	7.30	34	248.20
WTG05	4.65	41	190.57
WTG14	37.91	70	2,653.65

ตารางที่ 12 (ต่อ)

กังหันลม ต้นที่	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	จำนวนรอบหยุดทำงาน (ต่อเดือน)	พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน)
WTG17	5.80	94	545.09
WTG20	-6.71	103	-691.59
มุมเฉลี่ย 264.02 องศา ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 4.25 เมตรต่อวินาที มีกำลังผลิตไฟฟ้า 540.36 กิโลวัตต์			
WTG08	-19.81	130	-2,575.72
WTG10	-10.48	13	-136.20
WTG21	-4.39	12	-52.66
WTG28	-40.69	43	-1,749.46
รวม	**175.75**	**1,056**	**12,033.07**



ภาพที่ 42 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน



ภาพที่ 43 พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

ตารางที่ 12 พบว่า ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2560 ที่ทำการวิจัย กังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า มีจำนวนรอบหยุดทำงาน 832 รอบ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 9,577.90 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน และกังหันลมกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้ามีจำนวนรอบหยุดทำงาน 1,056 รอบ หากใช้วิธีการส่งสัญญาณสกาดาของกลุ่มกังหันลม สามารถเพิ่มปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 12,033.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน ดังแสดงในภาพที่ 42-43 รวมทั้งโครงการ เท่ากับ 91.610.97 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน

จากผลการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มพลังงานการผลิตไฟฟ้า ด้วยวิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาโดยใช้ข้อมูลค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมสามารถเพิ่มพลังงานการผลิตไฟฟ้าได้จริงและวิธีการนี้สามารถใช้ได้ทั้งกังหันลมในกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนและกังหันลมในกลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมของกลุ่มกังหันลมด้วยวิธีการส่งผลประมวลสัญญาณระหว่างกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า จังหวัดชัยภูมิ กำลังการผลิต 80 เมกะวัตต์ จำนวน 32 ต้น มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 432.5 เมตร (553.2 เมตร เมื่อรวมความสูงกังหันลม) ติดตั้งตามลักษณะภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ราบสลับเนินเขา จากการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาที่กังหันลมมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ สถานะออนไลน์ ต่อเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำให้สามารถนำข้อมูลของทิศทางและความเร็วลมมาแบ่งกลุ่มกังหันลมได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1) กลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอน ตั้งตั้งบริเวณที่ราบ ไม่มีสิ่งกีดขวางทิศลม

2) กลุ่มที่ทิศทางลมมีความไม่แน่นอน ติดตั้งใกล้บริเวณเทือกเขา ตามแนวยาวของสันเขา ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมเหล่านี้มีความแปรปรวน

ระบบปฏิบัติการโดยทั่วไปของกังหันลม จะใช้เวลาในการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดลม แล้วค่อยปรับหน้ากังหันลมสู่ทิศทางที่ลมพัดมา ระยะเวลาในการตรวจวัดข้อมูลลมนี้จะลดระยะเวลาในการผลิตไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงใช้วิธีเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าด้วยการใช้ค่าเฉลี่ยทิศทางลมของกลุ่มกังหันลมทั้ง 2 กลุ่ม ส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาเพื่อกำหนดมุมของทิศลมในกลุ่มเดียวกัน ให้กังหันลมปรับหน้าเข้าสู่ทิศทางที่กำหนด เตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า แทนวิธีการรับข้อมูลในระบบกังหันลมแบบเดิมที่ใช้การตรวจข้อมูลลมจากอุปกรณ์ตรวจวัดบนกังหันลมแต่ละต้น ซึ่งต้องใช้เวลาในการตรวจข้อมูลลม 0.5-10 นาที เมื่อหน้ากังหันลมอยู่ในจุดที่กำหนด ขณะที่ลมพัดผ่านและมีความเร็วมากกว่า 3 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันท่วงที ระยะเวลาในการตรวจข้อมูลลมที่ลดได้นี้ส่งผลให้กังหันลมมีเวลาผลิตไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของลมมรสุม ทิศทางลมมีความแปรปรวน จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าในช่วงเดือนที่ลมมีความสงบ อย่างไรก็ตามวิธีการส่งข้อมูลผ่านระบบสกาดาในงานวิจัยนี้ถือเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยกังหันลม ผู้ดูแลระบบสามารถใช้วิธีการในแต่ละช่วงเวลาและสถานที่ติดตั้งให้เหมาะกับแต่ละโครงการของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันลมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. กำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของกลุ่มกังหันลมจะขึ้นกับสองปัจจัย ได้แก่ จำนวนรอบการหยุดทำงานของกังหันลมและความเร็วลมในช่วงเวลานั้น หากกังหันลมมีการหยุดทำงานบ่อยครั้งและความเร็วลมมีค่ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวิธีการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมนี้มากขึ้นด้วย จึงไม่สามารถคาดการณ์ปริมาณกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างแน่นอนได้

2. เนื่องจากพลังงานลมเป็นพลังงานที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า แต่สามารถเก็บข้อมูลลมทางสถิติเพื่อใช้คาดคะเนลักษณะลมที่จะเกิดขึ้นในแต่ละรอบของการเก็บข้อมูล ดังนั้นควรทำการวิเคราะห์ข้อมูลรอบปีถัดมาเพิ่มเติม สำหรับเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่แน่นอนส่งผลให้วิธีการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2557). **สารานุกรมพลังงานทดแทน Alternative Energy Encyclopedia.** กรุงเทพมหานคร, บริษัท มีเดีย เอกซ์เพอร์ทีส อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด. 352 หน้า.

กรมอุตุนิยมวิทยา. (ม.ป.ป.). **ลมมรสุม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52 (5 พฤศจิกายน 2559).

กระทรวงพลังงาน. (2558a). **สถานการณ์พลังงาน ปี 2558 และแนวโน้ม ปี 2559**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.chanthaburi.buu.ac.th/~office_building/power/documents/energy2015-forecast2016.pdf (5 พฤศจิกายน 2559).

กระทรวงพลังงาน. (2558b). **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf (5 พฤศจิกายน 2559)

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (ม.ป.ป.). **เทคโนโลยีกังหันลม**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www3.egat.co.th/re/egat_wind/wind_technology.htm (29 พฤศจิกายน 2559).

จำลอง มะละเขต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ, และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2561). **การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า.** ใน การประชุมวิชาการและการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ เชียงใหม่, 694-701.

นิพนธ์ เกตุจ้อย และอชิตพล ศศิธรานุวัฒน์. (2547). เทคโนโลยีพลังงานลม. **วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร.** 12 (2), 57-73.

วันชัย รักษาควร และนัฐวุธ ขันธเนตร. (2556). **การติดตั้งระบบสกาดาของรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสีเขียวส่วนต่อขยาย ตากสิน-เพชรเกษม**. สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย, มหาวิทยาลัยสยาม.

วิภาอร เศรษฐศิรินนท์, วีรเทพ พงศ์ศรีเพียร และวรรณกมล ไชยชนะ. (2550). **การศึกษาความเป็นไปได้ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานลม เพื่อผลิตไฟฟ้าจ่ายขนานเข้าระบบจำหน่ายโดยภาคเอกชน : กรณีศึกษาชายหาด อ. สทิงพระ จังหวัดสงขลา**. สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2559). **ข้อมูลผู้ผลิตไฟฟ้า SPP/VSPP**. [ระบบ

ออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.erc.or.th/ERCSPP/default.aspx?x=&muid=23&prid=41 (5 พฤศจิกายน 2559).

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (ม.ป.ป.). **เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/39181/88ba62f07f0f74e40872da8120e2dcf?Resolve_DOI=10.14457/NU.the.2012.22 (10 พฤศจิกายน 2559).

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559). **นโยบายการรับซื้อไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.eppo.go.th/index.php/th/electricity/plan-buy-renewenergy (24 มกราคม 2563).

สำนักพัฒนาแหล่งน้ำขนาดใหญ่ กรมชลประทาน. (2558). **การชลประทานในประเทศไทย.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://lproject.rid.go.th/site/index.php/en/general-information/130-2015-06-22-02-00-53/218-2015-06-22-08-51-21 (8 ตุลาคม 2562).

สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ. (ม.ป.ป.). **บทที่ 1 การวัดลมพื้นผิว**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.mob.tmd.go.th/data/academic1-3.pdf (10 พฤศจิกายน 2559).

อรรฆพร คงจิต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2561). **การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลม จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิต 80 MW โดยใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA.** ใน งานประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561 กรุงเทพฯ, 63-68.

อรรฆพร คงจิต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ, เสริมสุข บัวเจริญ และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2561). **สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80 MW.** ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 ระยอง, 1,101-1,105.

A. Mohamed and K. Young-Chon. (2013). Machine-to-Machine Communication Infrastructure for Smart Wind Power Farms. **Intelligent Energy Systems (IWIES), IEEE International Workshop.** 137-142.

Baumbach G. (1991). **Luftreinhaltung.** Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.

C. Popeanga, N. Cristov and R. Dobrescu. (2012). **Sm**art monitoring and controlling of wind turbines farms based on wireless sensors networks. **Systems and Computer Science (ICSCS), 1st International Conference.** 1-6.

D. Al Katsaprakakis and D.G. Christakis. (2012). 2.07-Wind Parks Design, Including Representative Case Studies. **Comprehensive Renewable Energy.** 169-223.

Green intreand.com. (ม.ป.ป.). **พลังงานลมกับการลดการเปลี่ยนแปลงอากาศ**. [ระบบออนไลน์].

แหล่งที่มา http://www.greenintrend.com/พลังงานลมมนุษย์ทำอะไรไ/ (6 พฤศจิกายน 2559).

iEnergyGuru. (2558). **พลังงานลม : มารู้จักประเภทของลม และปรากฏการณ์ต่างๆ ของลมกันเถอะ!!!.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา https://ienergyguru.com/2015/07/ประเภทของลม/ (30 พฤษภาคม 2562).

L. Yifeng, G. Qinglai, S. Hongbin, C. Rui, W. Bin and Z. Boming. (2012). Network Model based Coordinated Automatic Voltage Control Strategy for Wind Farm. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies.** 1-5.

P. Koetket, S. Khunkhet, W. Chiracharit, J. Waewsak, T. Chaichana and Y. Auttawaitkul. (2018). Increasing Efficiency in Wind Energy Electricity Generating by Signal Processing from Wind Measuring Equipment on Wind Turbine for the Determination of Wind Direction. **2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT). Chiang Mai, Thailand.** 1-4.

Q. Chen, Y. Hu, Z. Chen, V. Grout, D. Zhang, H. Wang and H. Xing. (2013). Improved Relay Node Placement Algorithm for Wireless Sensor Networks Application in Wind Farm. **Smart Energy Grid Engineering (SEGE), IEEE International Conference.** 1-6.

Thai Meteorological Department Automatic Weather System. (2018). **Wind Rose.** [Online] Available http://www.aws-observation.tmd.go.th/web/aws/aws_wind roses.asp (30 พฤษภาคม 2562).

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยแม่โจ้
MAEJO UNIVERSITY
แม่โจ้ ๘๕ ปี

ภาคผนวก ก

ข้อมูลวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงลมมรสุมมีความแน่นอน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า

1) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5.23 องศา จำนวน 6 ต้น ประกอบด้วย WTG07, WTG13, WTG16, WTG19, WTG25 และ WTG27

ตารางผนวกที่ 1 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 202.64-207.87 องศา

Time	WTG07		WTG13		WTG16		WTG19		WTG25		WTG27	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	4.14	216.17	4.01	218.08	4.07	222.38	5.35	229.25	3.71	231.22	5.18	231.57
21:01	4.39	223.55	4.57	214.35	4.01	229.92	5.65	224.91	3.47	217.87	4.38	221.66
21:02	4.34	208.94	4.26	239.67	4.24	222.71	5.40	228.83	3.74	210.35	5.60	217.67
21:03	4.14	208.08	4.19	222.73	4.38	220.39	5.49	223.89	2.33	231.63	4.89	226.91
21:04	3.78	210.22	4.46	213.45	4.54	230.73	5.76	225.71	3.12	228.81	4.51	221.63
21:05	4.53	216.26	4.50	218.39	4.20	226.20	5.51	224.41	3.53	223.74	5.94	227.95
21:06	3.77	211.97	4.78	211.81	4.47	225.93	6.01	232.03	4.24	228.55	5.36	233.51
21:07	4.02	222.31	4.90	215.41	4.80	220.66	5.85	229.36	3.36	241.46	3.95	210.71
21:08	4.29	219.59	4.58	208.56	4.50	220.90	5.76	225.19	3.19	227.10	4.62	225.54
21:09	4.85	219.31	4.77	233.73	4.24	229.02	6.58	228.34	3.51	226.94	5.14	223.03
21:10	4.34	213.76	4.71	217.48	4.28	229.35	5.27	221.69	2.90	202.43	5.96	240.28
21:11	4.37	218.48	4.56	226.31	4.44	223.19	6.29	212.28	4.60	249.57	6.02	231.61
21:12	4.73	224.63	4.22	215.81	4.76	221.24	5.15	217.77	4.63	239.37	5.32	232.17
21:13	4.44	218.42	4.86	224.22	4.17	222.53	5.46	200.69	4.23	233.35	5.35	224.13
21:14	4.64	221.70	4.90	231.44	4.87	215.38	4.87	209.19	3.42	223.02	5.53	230.46
21:15	4.35	213.85	4.12	219.17	4.31	220.12	5.34	208.60	4.29	221.84	4.71	220.30
21:16	4.53	216.33	3.95	221.60	4.34	228.72	5.05	218.10	4.06	220.52	4.46	223.33
21:17	3.75	216.95	5.03	225.32	4.78	227.64	6.07	207.02	5.13	235.99	4.60	231.02
21:18	5.10	216.54	5.06	213.51	4.46	225.09	5.89	202.47	3.43	239.27	5.28	232.86
21:19	5.16	228.97	4.66	220.04	4.11	224.65	5.70	213.15	3.83	211.44	5.03	228.36
21:20	4.96	223.19	4.53	223.10	3.98	230.60	5.67	198.24	3.70	220.93	4.85	223.51

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Time	WTG07		WTG13		WTG16		WTG19		WTG25		WTG27	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:21	4.70	230.40	4.79	215.44	3.94	216.00	5.95	201.06	3.61	228.28	4.52	220.78
21:22	4.27	210.73	4.20	209.64	5.18	220.27	5.05	214.44	4.23	224.85	5.81	229.86
21:23	4.54	224.48	5.09	225.54	5.22	222.82	6.16	211.49	4.36	224.13	6.12	228.93
21:24	4.06	214.91	4.31	212.72	4.25	227.74	5.73	201.27	4.14	235.78	5.40	232.19
21:25	4.64	226.13	4.61	225.07	4.37	228.21	4.85	205.98	3.61	212.84	5.95	233.96
21:26	4.32	212.97	4.87	211.46	4.32	227.94	5.87	221.38	3.58	227.21	5.06	231.80
21:27	3.68	213.87	5.23	215.09	4.57	225.14	4.96	220.72	3.31	227.53	4.62	233.47
21:28	4.62	216.64	4.57	212.31	4.70	225.70	5.38	219.75	3.95	226.80	5.83	233.06
21:29	4.20	208.51	3.69	225.17	3.55	224.66	6.14	216.30	5.68	243.17	5.78	233.71
21:30	4.18	216.08	4.19	215.32	4.15	232.77	4.60	217.05	2.92	206.88	5.76	233.48
21:31	4.06	219.58	4.06	220.45	4.14	213.77	5.52	219.45	5.06	224.01	5.22	210.01
21:32	4.05	228.07	4.57	221.53	3.89	224.85	5.25	219.17	3.70	230.36	5.63	226.85
21:33	3.92	219.63	4.70	212.75	4.27	218.76	5.72	222.22	3.67	231.32	6.34	220.15
21:34	3.53	226.61	4.07	211.29	4.34	220.65	4.92	221.23	4.37	213.49	5.76	227.22
21:35	3.78	214.39	4.39	214.06	4.16	224.21	5.35	204.17	4.77	231.36	6.21	200.22
21:36	3.43	228.94	4.57	226.89	4.01	222.14	4.81	225.28	4.83	237.98	4.73	205.56
21:37	3.47	232.14	4.25	224.58	4.54	231.43	5.40	209.98	4.93	224.65	5.40	228.53
21:38	4.54	224.40	4.86	220.48	4.59	217.25	6.47	220.23	4.42	237.97	6.41	210.64
21:39	3.52	214.27	4.87	218.15	4.27	229.07	5.72	209.53	5.65	235.42	4.94	216.28
21:40	3.73	209.65	4.02	227.61	4.83	214.69	5.51	224.86	5.27	236.99	4.37	202.51
21:41	4.52	221.30	4.61	216.65	3.91	220.98	6.01	218.54	3.39	218.72	5.59	211.92
21:42	4.16	217.94	4.66	210.97	3.99	223.88	5.17	219.20	5.51	244.04	4.68	225.68
21:43	4.02	212.42	3.14	212.69	3.54	218.94	5.42	221.72	3.33	220.86	4.36	209.19
21:44	4.42	212.52	4.37	230.31	4.47	225.86	5.37	222.00	6.13	233.80	5.17	230.09
21:45	4.07	211.64	5.13	209.43	4.52	224.22	5.38	227.80	3.21	208.63	4.53	214.35
21:46	3.92	216.09	3.86	223.45	4.76	227.76	5.05	222.69	5.91	233.01	5.41	221.54

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

Time	WTG07		WTG13		WTG16		WTG19		WTG25		WTG27	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:47	4.57	224.06	4.32	211.74	4.75	230.07	5.67	221.99	4.76	226.41	5.13	211.81
21:48	4.27	220.14	5.20	226.24	3.94	220.15	5.08	223.17	4.59	219.13	5.45	216.89
21:49	4.25	219.70	4.64	225.20	4.87	226.69	5.70	218.82	5.77	232.68	5.81	215.42
21:50	4.33	221.37	4.55	222.63	4.35	227.04	5.53	223.92	4.89	231.76	6.64	220.36
21:51	4.20	227.51	4.24	209.64	4.57	238.56	5.48	230.80	5.42	229.33	5.37	219.55
21:52	4.00	225.42	4.30	218.38	4.58	214.05	5.13	218.36	4.83	230.33	6.81	208.54
21:53	4.79	228.84	4.43	220.20	4.08	228.05	5.74	229.03	4.34	213.63	5.88	216.95
21:54	4.90	217.56	4.47	217.71	4.37	220.37	5.27	213.22	3.85	210.77	6.41	214.82
21:55	3.91	222.27	3.75	229.68	4.32	223.15	5.29	219.86	4.04	200.51	4.76	212.79
21:56	4.32	221.22	4.16	226.25	4.26	224.97	5.61	226.40	4.23	221.81	4.66	212.75
21:57	4.28	235.03	4.41	236.00	4.58	224.83	5.28	217.71	4.02	222.23	6.53	210.70
21:58	4.86	219.75	4.30	218.83	3.62	225.40	5.59	222.81	4.73	212.72	5.16	211.97
21:59	5.11	222.29	4.31	222.01	3.78	227.84	5.03	234.60	3.54	212.34	5.01	236.68
22:00	4.18	228.97	4.25	224.22	4.61	231.92	5.39	220.31	4.05	209.06	6.31	223.33

2) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.00 องศา จำนวน 5 ประกอบด้วย WTG02, WTG09, WTG12, WTG18 และ WTG24

ตารางผนวกที่ 2 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 217.99-227.99 องศา

Time	WTG02		WTG09		WTG12		WTG18		WTG24	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	4.48	213.73	4.27	218.82	4.16	212.04	4.46	221.03	4.58	231.50
21:01	4.53	213.87	4.14	219.51	4.34	219.53	4.45	221.73	5.18	211.31
21:02	3.69	222.76	4.61	228.40	4.19	209.96	4.12	218.02	4.61	222.88

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Time	WTG02		WTG09		WTG12		WTG18		WTG24	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:03	4.12	215.18	3.86	231.13	4.12	227.45	3.64	227.63	4.96	218.38
21:04	4.45	220.87	4.47	227.30	4.77	220.92	4.53	234.37	5.08	217.78
21:05	3.64	207.07	4.90	227.78	4.64	230.43	3.82	237.92	5.36	221.96
21:06	4.18	218.17	4.28	225.95	4.77	224.55	4.27	226.55	4.30	206.69
21:07	4.72	216.78	4.75	235.14	4.59	212.61	4.87	243.32	5.31	216.23
21:08	4.20	209.81	4.15	228.09	4.90	225.58	4.51	231.46	4.91	214.35
21:09	4.58	219.59	5.30	231.72	5.00	227.25	5.10	238.14	5.78	229.18
21:10	4.92	212.98	5.05	233.12	4.85	221.60	4.23	211.74	4.85	218.25
21:11	5.06	217.99	4.73	227.91	5.71	222.03	4.66	219.28	5.77	222.27
21:12	3.92	223.47	4.88	215.29	4.36	228.22	4.89	215.95	5.46	213.98
21:13	5.03	223.59	4.38	209.87	4.70	229.96	6.16	216.16	5.36	226.05
21:14	4.84	212.47	4.33	200.90	4.57	222.56	5.46	198.94	4.45	219.31
21:15	5.15	199.68	4.75	223.67	5.26	232.55	5.45	228.00	5.36	217.48
21:16	5.05	210.55	3.96	206.53	4.73	222.45	5.46	206.77	4.57	232.96
21:17	4.57	217.81	4.81	216.13	4.57	225.88	4.98	211.99	5.39	222.84
21:18	4.42	208.09	4.94	225.96	4.45	227.33	5.05	216.01	5.33	224.97
21:19	4.58	212.23	4.49	227.58	4.73	223.37	4.07	202.38	5.05	209.51
21:20	4.93	224.70	5.25	204.88	4.85	224.88	4.00	221.10	4.79	225.12
21:21	4.79	217.60	4.47	181.76	4.77	222.65	4.78	186.05	5.13	221.28
21:22	4.40	225.58	4.69	201.68	5.42	215.93	4.97	229.03	5.55	218.77
21:23	5.03	218.80	4.40	203.73	4.67	233.15	5.01	218.17	5.71	216.71
21:24	4.40	202.53	4.90	187.78	4.25	227.88	5.26	210.36	5.17	214.62
21:25	4.92	214.35	4.35	211.13	4.35	234.04	4.85	199.16	5.66	218.56
21:26	5.36	220.34	5.44	205.12	4.25	230.32	5.07	199.14	5.07	222.79
21:27	4.60	217.16	5.10	216.30	4.43	220.80	5.14	227.10	4.54	227.70

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Time	WTG02		WTG09		WTG12		WTG18		WTG24	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:28	4.43	211.35	3.99	215.77	4.77	225.78	5.74	191.91	5.68	213.34
21:29	4.63	220.78	5.01	199.86	3.72	224.85	5.89	201.16	5.29	221.94
21:30	5.12	231.46	3.89	213.28	4.83	223.49	3.58	202.78	5.28	226.75
21:31	4.70	224.22	4.68	195.68	3.87	216.40	5.02	190.88	4.05	214.05
21:32	4.78	226.87	4.40	206.95	3.60	223.03	4.73	214.87	5.47	218.15
21:33	4.65	215.55	4.06	204.51	4.23	228.25	5.36	194.21	5.82	231.96
21:34	5.11	218.36	4.52	194.29	4.08	221.02	3.91	197.62	5.16	214.90
21:35	4.49	218.66	4.85	215.53	4.31	225.98	4.80	196.44	5.26	222.62
21:36	4.88	222.82	4.08	206.56	4.67	237.35	4.42	211.23	5.04	227.51
21:37	5.06	224.82	4.22	198.66	5.10	226.95	5.42	211.19	4.91	223.47
21:38	4.92	226.18	3.90	213.47	4.54	224.48	5.70	195.87	5.20	228.29
21:39	4.36	211.49	4.29	205.97	4.23	226.14	4.36	198.39	5.02	217.96
21:40	4.31	217.53	3.61	215.45	4.75	231.55	5.21	199.33	5.52	229.28
21:41	4.27	225.38	4.35	222.23	4.33	227.90	4.51	200.35	5.51	246.47
21:42	5.09	206.88	4.45	204.17	4.33	224.32	4.87	217.40	5.58	234.29
21:43	4.78	226.36	4.29	206.27	4.52	240.33	4.99	211.89	5.55	219.91
21:44	4.98	204.55	4.78	210.18	4.48	244.99	4.37	210.56	5.52	228.41
21:45	4.61	209.42	3.71	207.72	4.30	203.47	4.80	211.07	5.08	217.69
21:46	4.19	218.42	4.16	214.77	4.37	220.64	5.48	210.43	6.05	214.64
21:47	4.03	215.73	4.82	193.25	5.35	230.50	4.41	186.30	5.93	231.85
21:48	5.12	219.00	4.00	225.25	4.77	227.85	4.04	215.77	6.25	225.16
21:49	4.36	215.44	4.08	208.86	5.33	241.88	4.86	198.69	5.87	231.39
21:50	4.76	214.52	4.52	204.99	4.60	228.43	4.70	208.71	5.59	226.20
21:51	3.95	219.51	3.66	205.05	5.07	223.84	5.06	200.09	5.57	220.59
21:52	4.88	208.04	4.74	204.07	5.17	222.86	4.77	218.69	5.57	218.41

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

Time	WTG02		WTG09		WTG12		WTG18		WTG24	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:53	5.02	215.49	4.43	202.94	4.55	224.24	4.53	225.27	5.84	201.25
21:54	4.63	234.68	4.44	210.30	4.64	220.00	4.62	220.17	4.69	222.29
21:55	5.23	227.40	4.63	210.21	5.22	226.49	4.88	226.61	5.09	238.04
21:56	4.26	215.86	4.80	213.46	3.80	237.85	4.58	215.60	5.48	220.69
21:57	5.58	229.48	4.04	207.77	4.58	226.17	4.49	223.67	5.71	222.03
21:58	4.61	218.94	4.08	192.38	4.58	230.67	4.93	232.29	5.68	230.85
21:59	5.47	222.80	4.65	219.59	4.36	227.24	5.36	224.96	5.40	215.59
22:00	5.17	217.32	4.41	214.27	4.33	233.29	4.49	231.39	5.39	227.07

3) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.98 องศา จำนวน 4 ต้น ประกอบด้วย WTG23, WTG29, WTG31 และ WTG32

ตารางผนวกที่ 3 กลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 245.55-256.53 องศา

Time	WTG23		WTG29		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	4.65	226.70	5.73	209.16	4.98	213.82	6.25	223.13
21:01	4.90	223.12	6.90	214.79	5.98	216.71	5.60	219.07
21:02	4.79	222.31	5.74	196.77	5.97	212.54	5.77	223.76
21:03	5.52	214.01	5.94	212.30	5.97	225.83	5.15	223.38
21:04	4.64	222.79	5.64	215.56	6.15	215.02	4.07	224.40
21:05	3.92	221.68	5.22	216.71	5.38	230.62	5.76	229.64
21:06	4.65	214.53	4.72	224.48	6.54	215.40	6.08	236.02
21:07	4.89	215.87	4.31	212.49	6.24	213.74	5.44	224.18
21:08	4.83	226.89	6.16	223.46	5.61	223.95	6.84	228.73

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Time	WTG23		WTG29		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:09	4.36	215.65	5.21	208.43	6.17	213.87	5.09	215.05
21:10	4.80	229.80	5.71	209.33	6.22	217.88	5.50	224.29
21:11	5.13	213.95	6.75	219.52	4.60	217.97	5.65	228.90
21:12	4.84	240.61	5.41	210.38	5.00	213.43	4.49	237.78
21:13	5.17	231.77	4.93	228.01	5.27	224.53	5.53	212.57
21:14	5.61	218.38	5.37	223.81	5.53	199.20	5.52	227.65
21:15	5.61	226.83	5.70	221.39	5.47	215.91	6.35	222.09
21:16	5.16	219.89	5.37	227.95	5.15	202.53	5.41	233.03
21:17	5.79	228.36	5.92	226.05	5.41	230.13	5.39	229.25
21:18	5.18	226.49	6.05	207.10	6.56	228.10	5.68	232.60
21:19	5.52	223.82	5.81	220.55	5.13	218.62	5.03	216.03
21:20	5.14	219.23	5.87	223.04	5.26	223.95	4.53	220.30
21:21	6.00	225.41	5.76	220.03	5.40	212.49	5.08	224.89
21:22	5.11	228.57	5.71	211.24	4.64	218.65	4.29	222.79
21:23	5.35	226.18	5.43	224.57	5.61	220.19	5.47	225.27
21:24	5.98	211.03	5.55	208.26	5.02	222.64	5.21	232.91
21:25	4.74	229.63	5.89	220.56	5.24	213.27	6.11	227.19
21:26	5.39	225.03	5.38	222.22	5.07	223.06	4.63	228.05
21:27	5.58	227.41	5.82	218.46	5.65	221.28	4.85	242.24
21:28	5.00	220.10	5.95	217.50	5.73	215.92	5.35	231.36
21:29	5.21	227.48	5.19	213.15	5.47	226.04	4.51	233.90
21:30	5.15	232.93	5.12	227.19	4.88	207.12	5.88	221.77
21:31	5.32	224.62	5.45	228.50	5.22	219.05	6.11	227.63
21:32	5.13	232.83	6.06	229.57	5.60	215.12	4.03	244.99
21:33	4.62	208.60	5.40	219.61	5.41	213.09	5.77	222.64
21:34	4.89	229.81	6.12	227.92	5.76	230.21	5.05	219.55

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

Time	WTG23		WTG29		WTG31		WTG32	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:35	4.21	218.09	5.99	211.38	5.41	215.87	5.12	202.30
21:36	5.71	229.89	6.12	220.79	4.92	205.29	4.57	230.82
21:37	5.65	233.40	5.45	233.61	4.74	212.48	5.78	230.69
21:38	5.45	225.72	5.54	226.12	4.84	206.87	4.50	224.80
21:39	5.75	229.41	5.25	220.16	6.03	212.45	4.16	220.61
21:40	5.04	224.37	5.61	218.54	6.08	227.83	5.88	226.30
21:41	5.57	226.63	5.03	220.91	4.18	219.65	4.69	235.37
21:42	5.24	226.43	5.99	221.04	5.03	217.49	5.40	232.56
21:43	5.64	226.50	5.58	209.13	6.13	207.49	5.64	219.80
21:44	5.83	219.72	5.49	216.46	5.43	217.36	6.45	227.27
21:45	5.58	227.02	5.80	222.14	5.87	228.11	5.48	225.60
21:46	5.52	227.51	5.69	219.25	5.37	230.11	6.17	204.13
21:47	5.04	220.50	5.67	217.58	5.01	223.74	4.29	217.50
21:48	5.20	230.21	5.68	226.66	5.64	236.15	4.91	227.32
21:49	5.44	193.54	5.20	220.11	4.55	219.10	6.39	205.55
21:50	5.82	212.10	5.80	220.90	5.36	222.41	5.07	207.63
21:51	5.27	214.74	5.35	216.59	4.98	213.47	4.44	226.33
21:52	5.19	211.72	5.76	222.63	4.96	218.56	4.78	227.18
21:53	5.56	219.72	6.44	233.27	5.71	216.48	5.06	220.67
21:54	5.12	200.32	6.62	225.31	5.63	220.40	5.36	204.68
21:55	4.63	219.53	6.46	217.77	6.04	210.32	4.90	237.29
21:56	5.12	206.18	6.72	234.88	6.51	221.26	5.33	222.48
21:57	4.92	208.91	6.52	223.21	5.03	204.78	4.93	216.26
21:58	4.91	217.67	6.45	221.40	5.43	217.76	5.30	230.16
21:59	4.91	209.19	6.25	218.15	6.19	219.87	5.69	229.02
22:00	4.70	208.14	5.92	232.16	6.97	226.81	5.78	223.90

กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า

1) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 14.65 องศา จำนวน 6 ต้น ประกอบด้วย WTG06, WTG11, WTG15, WTG22, WTG26 และ WTG30

ตารางผนวกที่ 4 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 195.67-210.32 องศา

Time	WTG06		WTG11		WTG15		WTG22		WTG26		WTG30	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	2.19	232.51	4.49	231.11	3.90	230.28	4.88	222.92	4.57	197.69	4.05	216.87
21:01	1.82	224.14	4.38	218.95	4.02	217.18	6.06	222.67	3.21	231.11	5.05	220.30
21:02	2.21	239.18	5.01	220.33	3.22	200.49	5.42	225.49	3.97	223.70	4.27	216.94
21:03	2.43	235.50	4.59	231.09	3.52	212.49	4.87	226.61	4.83	188.19	5.05	235.15
21:04	3.69	223.98	4.02	228.95	4.54	204.88	5.53	222.94	4.42	206.30	4.21	196.25
21:05	2.67	234.90	4.18	224.12	3.55	209.02	4.86	215.05	3.73	241.04	4.27	222.33
21:06	3.99	230.98	3.41	199.66	4.15	206.93	5.77	233.60	4.21	214.36	5.48	219.07
21:07	3.79	212.41	3.61	240.40	3.01	205.70	4.84	228.34	4.04	221.96	6.06	223.20
21:08	3.18	261.40	2.67	224.63	3.22	214.67	4.91	231.09	4.47	227.60	3.56	212.00
21:09	2.49	191.29	3.58	229.58	3.09	209.44	4.35	222.92	3.78	213.01	5.11	222.52
21:10	3.06	212.16	3.65	248.22	3.10	196.40	5.54	234.24	3.69	230.64	5.64	222.39
21:11	4.02	233.10	4.28	234.42	3.05	203.57	4.18	225.08	2.84	236.41	5.38	225.12
21:12	2.90	233.74	3.42	200.82	3.01	232.12	5.24	226.32	2.75	215.89	4.71	213.96
21:13	3.08	218.78	3.25	250.00	2.80	209.64	4.30	219.00	3.29	240.84	5.44	213.14
21:14	3.95	224.21	2.99	228.88	3.85	190.07	5.30	230.46	3.81	207.88	5.90	224.78
21:15	2.17	226.61	3.99	219.47	3.46	226.62	5.13	231.13	4.61	227.52	4.06	208.46
21:16	2.58	212.66	3.17	242.82	3.67	242.07	5.42	206.11	3.71	213.98	4.09	211.55
21:17	2.36	209.20	3.73	239.38	3.33	208.71	5.92	231.73	4.16	241.94	4.97	213.93
21:18	3.66	222.74	3.59	217.72	3.24	207.33	5.45	242.37	3.58	219.14	5.48	224.03
21:19	3.71	196.55	3.74	229.30	3.41	247.16	6.76	225.34	4.23	201.96	6.45	203.88

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Time	WTG06		WTG11		WTG15		WTG22		WTG26		WTG30	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:20	2.54	242.68	5.12	222.82	3.60	234.13	4.90	231.11	3.21	203.27	4.57	204.10
21:21	3.33	200.95	4.02	221.76	4.70	196.17	4.93	220.28	2.64	241.90	5.70	222.25
21:22	3.44	229.65	2.88	236.05	3.49	220.16	5.65	226.80	4.43	221.50	5.59	203.30
21:23	3.75	214.94	2.89	239.62	5.00	206.26	6.07	231.38	3.08	238.91	5.82	216.00
21:24	3.16	223.87	3.53	243.49	4.17	211.28	5.33	210.88	4.88	218.03	5.84	222.33
21:25	3.08	253.20	3.58	239.43	3.56	201.05	5.41	214.40	3.42	211.65	5.71	214.64
21:26	2.76	229.22	3.69	236.19	3.78	199.17	4.92	232.34	3.06	235.29	5.12	207.42
21:27	3.32	213.89	3.58	211.95	3.58	210.84	4.59	221.30	4.27	231.16	6.53	216.38
21:28	3.27	234.61	3.66	222.74	3.05	213.08	4.64	210.67	5.08	222.41	4.99	210.31
21:29	2.22	201.07	3.44	228.39	2.88	222.21	4.55	234.30	5.22	228.42	5.65	225.36
21:30	3.09	223.67	4.31	220.69	4.36	201.33	5.25	222.23	4.24	226.36	5.28	227.14
21:31	3.00	201.83	2.62	229.82	3.17	212.16	4.76	216.67	2.80	231.29	4.41	205.86
21:32	3.19	205.63	3.48	230.20	3.17	224.79	4.71	223.16	3.51	198.65	5.59	222.14
21:33	2.77	242.28	2.73	218.51	3.81	218.46	4.32	224.14	3.04	220.51	6.54	216.11
21:34	2.31	207.45	3.58	221.38	3.14	242.75	4.93	241.11	2.56	260.25	4.56	204.07
21:35	2.36	210.46	3.54	218.97	3.81	228.67	5.52	228.20	4.10	246.05	5.07	208.35
21:36	2.71	238.62	2.95	234.17	3.49	202.33	4.73	217.54	3.60	222.39	5.31	227.46
21:37	1.98	223.31	3.70	213.32	4.16	217.38	5.76	226.65	3.78	210.62	4.53	217.08
21:38	1.96	259.43	2.86	236.59	2.13	243.52	5.92	208.03	4.45	229.53	5.37	231.63
21:39	2.93	208.65	2.50	191.04	2.31	208.93	4.73	231.90	3.47	217.09	5.23	211.41
21:40	1.63	191.50	3.54	232.05	2.63	196.74	5.90	229.20	3.00	234.48	5.27	229.36
21:41	2.84	202.51	2.93	249.93	2.96	218.78	5.35	222.30	2.54	195.82	4.84	208.75
21:42	2.66	233.56	2.27	240.89	2.68	205.16	5.21	224.76	2.70	233.03	5.74	215.11
21:43	2.41	229.20	3.52	202.97	2.37	229.91	4.76	232.19	2.83	232.29	5.05	206.74
21:44	2.15	233.62	2.13	231.92	1.91	219.63	6.56	224.17	3.10	230.77	4.73	216.39

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

Time	WTG06		WTG11		WTG15		WTG22		WTG26		WTG30	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:45	2.41	213.59	2.61	240.20	2.87	191.26	6.80	231.10	3.42	221.66	5.89	213.10
21:46	2.48	227.18	2.58	249.80	2.52	229.88	6.31	236.48	2.46	212.29	5.68	214.35
21:47	2.46	192.03	3.29	242.51	2.47	215.35	4.69	231.60	2.40	245.29	5.13	217.07
21:48	3.34	226.14	3.01	240.20	3.26	179.75	6.37	231.45	2.37	230.01	4.20	206.49
21:49	2.68	210.91	3.27	243.92	3.07	233.14	6.07	225.77	2.54	203.26	5.21	208.13
21:50	3.01	212.32	3.14	202.61	3.53	222.68	6.39	230.57	3.48	210.68	5.89	214.07
21:51	2.68	224.72	3.62	220.30	3.04	221.30	5.02	228.47	3.61	231.75	5.79	218.94
21:52	3.04	192.63	3.26	214.29	2.48	224.34	7.31	238.10	3.43	224.10	6.03	223.51
21:53	3.16	215.22	3.97	227.47	2.56	207.91	4.45	237.68	4.44	233.10	5.33	207.63
21:54	2.10	217.17	2.73	214.27	3.51	234.05	5.68	228.80	3.30	236.55	5.37	225.90
21:55	2.55	225.71	3.27	223.56	3.43	229.27	5.53	232.13	5.10	187.01	4.84	227.48
21:56	3.11	233.89	3.37	237.74	2.76	184.69	6.45	228.34	3.23	232.38	5.79	219.77
21:57	3.20	257.55	3.20	229.06	3.23	229.21	5.28	228.96	2.71	198.71	6.24	224.63
21:58	3.70	228.03	2.77	224.88	3.26	222.58	6.24	222.47	3.87	212.55	5.63	227.10
21:59	3.19	221.87	2.09	250.97	2.77	219.97	5.31	191.41	3.37	238.36	6.38	214.86
22:00	3.66	215.29	2.37	240.21	2.85	225.12	4.02	184.80	3.30	242.19	5.90	224.03

2) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 18.83 องศา จำนวน 7 ต้น ประกอบด้วย WTG01, WTG03, WTG04, WTG05, WTG14, WTG17 และ WTG20

ตารางผนวกที่ 5 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 216.91-235.74 องศา

Time	WTG01		WTG03		WTG04		WTG05		WTG14		WTG17		WTG20	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	4.49	217.60	4.12	217.20	4.28	208.14	4.30	224.06	4.57	225.94	5.43	207.45	4.37	253.38
21:01	5.06	217.25	4.10	240.14	4.47	215.51	4.66	215.03	4.98	224.66	4.28	233.35	2.89	216.17
21:02	4.52	227.59	3.96	231.26	4.47	213.07	4.38	191.40	4.46	238.79	4.52	202.79	3.61	186.22
21:03	5.15	222.61	4.05	219.50	4.28	217.36	4.31	224.97	4.54	220.36	3.84	220.33	2.56	244.10
21:04	4.93	225.99	4.36	221.21	4.12	208.90	4.24	219.72	4.41	218.92	4.73	205.99	3.72	201.16
21:05	4.43	229.11	4.18	227.25	3.33	240.46	4.62	227.73	4.54	221.96	3.69	224.23	3.29	212.45
21:06	5.52	229.67	4.83	225.24	2.81	229.87	4.07	225.30	4.40	220.51	4.05	216.61	4.29	223.31
21:07	5.33	229.87	4.68	215.96	3.75	221.88	4.01	210.87	4.66	231.81	4.96	206.05	4.60	222.02
21:08	4.99	237.85	4.17	231.88	3.71	201.70	4.56	230.73	4.62	225.53	3.51	208.96	4.34	247.53
21:09	4.55	220.58	4.08	240.34	3.08	224.73	4.20	249.36	4.94	225.62	5.30	226.97	3.01	224.85
21:10	5.26	219.63	4.12	229.08	2.52	239.93	4.22	217.83	4.53	227.19	5.07	226.44	2.82	199.29
21:11	4.72	221.40	4.76	206.61	3.24	224.81	4.08	210.44	5.12	229.13	4.51	236.30	3.59	211.36
21:12	4.90	219.40	4.55	207.61	2.72	217.29	4.38	216.20	4.89	221.01	5.22	227.03	2.55	224.04
21:13	4.64	214.88	3.86	198.92	3.93	220.59	4.99	228.57	4.86	219.76	5.24	230.90	2.16	222.41
21:14	4.86	203.30	5.18	199.84	4.59	200.99	5.04	238.86	4.94	221.11	4.41	220.68	3.61	189.89
21:15	4.36	203.51	5.33	208.69	4.11	229.45	4.61	234.00	5.15	222.67	4.93	214.90	3.41	208.25
21:16	5.08	211.56	5.38	196.83	4.06	225.84	4.43	223.25	5.07	227.43	4.63	218.09	3.17	238.39
21:17	4.74	206.91	5.49	195.27	3.68	229.63	4.43	220.47	5.39	235.79	5.51	242.36	2.37	219.57
21:18	4.50	207.07	4.43	210.77	2.93	235.77	4.05	222.75	5.19	223.98	4.11	215.53	3.32	227.34
21:19	4.45	210.59	4.68	191.20	4.01	206.19	3.74	225.13	5.26	222.32	3.98	236.43	3.85	232.32
21:20	4.45	205.19	5.13	235.24	4.01	212.61	4.64	221.63	4.72	224.34	4.22	227.84	2.84	228.81

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Time	WTG01		WTG03		WTG04		WTG05		WTG14		WTG17		WTG20	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:21	4.68	217.30	5.24	228.55	5.02	217.96	5.81	224.03	4.49	230.77	4.37	211.21	3.29	204.98
21:22	5.03	214.44	4.56	232.36	2.77	226.06	4.78	215.68	5.10	226.66	3.81	214.90	3.16	213.45
21:23	5.33	217.64	4.54	220.21	3.74	226.90	5.29	225.35	4.60	227.96	4.58	224.77	3.44	212.59
21:24	4.73	205.38	4.12	241.30	4.47	205.71	5.43	218.44	4.56	224.65	4.54	225.06	3.38	203.30
21:25	4.99	200.13	4.30	223.40	3.63	221.33	5.04	204.06	4.71	228.33	4.54	209.40	3.16	194.87
21:26	5.42	211.84	3.98	232.58	3.72	214.09	4.45	224.58	4.84	231.38	4.71	223.60	2.83	204.43
21:27	5.09	207.98	4.85	225.49	4.52	226.15	4.93	214.80	4.09	215.84	4.12	225.43	2.85	212.86
21:28	5.06	209.59	4.82	225.63	5.16	219.77	4.86	200.63	4.07	223.98	5.12	219.93	3.21	237.00
21:29	5.00	212.89	4.23	233.76	2.11	219.39	4.67	228.85	4.05	224.27	4.80	241.42	3.58	225.26
21:30	5.07	212.13	4.65	227.44	2.99	229.19	4.26	213.21	4.11	226.26	4.40	226.13	2.75	224.65
21:31	5.67	215.76	4.66	224.89	3.24	247.00	4.14	230.16	4.54	225.13	4.22	219.11	2.96	224.89
21:32	5.60	214.59	4.63	229.10	3.13	241.63	3.98	224.46	4.09	226.92	4.08	229.21	2.70	212.68
21:33	5.55	207.12	4.83	209.58	3.07	230.29	3.93	220.82	4.10	235.25	4.81	237.05	3.00	228.97
21:34	5.70	218.26	4.74	205.57	4.38	222.07	4.49	216.53	3.94	225.82	4.34	219.18	3.32	190.70
21:35	5.21	220.00	3.76	210.21	3.58	222.35	3.97	220.47	4.13	227.71	4.50	226.46	2.44	240.34
21:36	5.08	204.20	3.72	213.54	2.64	267.53	4.18	224.78	3.99	230.18	3.94	224.48	2.38	202.91
21:37	4.45	214.47	4.27	205.60	3.26	222.97	4.46	210.45	3.93	228.32	3.74	209.35	2.81	231.59
21:38	5.51	208.47	4.03	213.39	2.76	230.35	3.41	224.42	4.13	232.76	4.75	231.36	2.82	212.04
21:39	5.09	216.23	4.04	207.52	3.86	227.47	3.97	210.99	4.12	228.91	3.98	227.06	2.88	220.78
21:40	5.89	208.21	4.20	201.08	3.33	228.30	3.50	223.66	4.34	225.85	3.99	227.43	2.89	219.48
21:41	5.67	212.84	4.38	203.87	4.41	222.42	4.61	228.58	4.00	233.68	3.99	222.76	2.41	222.67
21:42	5.30	220.28	4.80	200.12	4.62	213.99	4.37	222.60	3.63	229.45	3.39	215.47	2.54	237.73
21:43	4.64	216.18	4.40	213.36	3.63	203.82	3.98	230.33	3.48	221.32	4.08	225.20	2.97	220.34
21:44	4.53	208.26	4.14	215.82	4.47	230.74	4.80	213.50	4.02	233.63	3.43	219.08	3.28	229.77
21:45	5.13	204.25	4.27	209.48	5.34	226.05	3.86	211.14	4.17	222.89	4.06	201.72	2.86	207.16

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

Time	WTG01		WTG03		WTG04		WTG05		WTG14		WTG17		WTG20	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:46	4.81	213.85	5.00	215.09	4.53	228.53	4.55	221.35	4.73	233.44	3.53	208.72	2.97	203.99
21:47	4.63	208.37	5.14	205.06	4.50	216.34	4.34	226.71	4.58	242.47	3.86	199.07	2.95	225.04
21:48	4.64	206.83	4.18	199.75	5.33	221.55	4.97	223.37	3.98	215.50	3.38	196.21	3.75	195.18
21:49	4.37	211.19	4.37	229.55	4.08	226.75	4.67	219.41	3.99	218.22	3.56	215.91	2.99	238.03
21:50	4.89	200.12	4.39	212.07	4.06	205.58	5.10	237.86	4.24	221.02	4.49	221.35	2.91	207.43
21:51	5.19	213.14	4.77	197.56	4.87	190.50	4.57	223.45	4.64	216.77	3.49	229.74	4.68	181.64
21:52	4.72	203.68	4.92	202.39	5.29	222.27	4.41	212.68	4.96	219.74	3.90	233.75	2.63	242.27
21:53	4.86	215.23	4.32	221.53	4.00	240.09	3.60	231.02	4.21	199.63	3.80	215.67	2.83	245.77
21:54	4.60	214.88	4.05	210.42	2.61	226.04	4.32	217.23	4.95	206.02	4.52	234.40	2.70	209.19
21:55	4.90	210.06	4.66	208.63	4.67	232.01	4.22	224.27	4.93	208.17	4.86	232.78	3.47	221.42
21:56	5.85	216.15	4.10	218.40	2.93	229.89	4.69	198.87	5.16	221.84	4.15	218.32	2.84	228.83
21:57	5.31	211.02	4.25	210.44	3.23	240.73	4.98	211.61	4.52	222.74	4.63	220.00	2.72	236.26
21:58	5.64	216.11	4.72	207.01	3.59	229.84	4.75	225.69	4.91	220.22	4.33	231.46	3.47	239.07
21:59	5.12	214.42	5.57	218.50	2.29	235.75	4.24	242.76	4.13	239.16	5.86	231.60	3.60	235.41
22:00	4.39	213.13	4.68	219.89	2.67	182.13	4.27	237.82	4.75	216.34	3.96	238.99	3.86	208.66

3) กลุ่มที่ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 20.38 องศา จำนวน 4 ต้น ประกอบด้วย WTG08, WTG10, WTG21, และ WTG28

ตารางผนวกที่ 6 กลุ่มที่ลมมีทิศไม่แน่นอน ช่วงของทิศลมอยู่ระหว่าง 253.83-274.21 องศา

Time	WTG08		WTG10		WTG21		WTG28	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:00	4.23	213.59	3.33	232.02	3.68	204.70	4.74	234.16
21:01	4.49	212.47	3.78	218.22	3.87	203.06	5.64	224.24
21:02	4.58	221.05	2.39	220.11	4.98	220.89	3.85	238.53
21:03	5.07	209.51	3.90	224.31	3.46	195.07	5.05	221.87
21:04	5.18	215.99	3.79	217.20	4.37	230.00	4.30	243.27
21:05	4.46	223.22	3.62	219.82	4.56	220.31	3.99	227.32
21:06	5.09	205.82	3.81	224.10	5.73	237.42	6.31	214.98
21:07	4.87	206.59	3.77	224.46	4.60	218.33	4.96	234.95
21:08	4.15	206.55	2.69	228.98	5.09	209.95	5.48	234.18
21:09	4.69	240.82	4.03	219.16	5.03	203.81	4.46	235.94
21:10	4.56	221.85	3.29	211.33	5.73	219.06	5.44	225.55
21:11	3.83	213.07	2.71	238.80	6.40	228.47	4.98	235.80
21:12	3.96	222.95	3.57	208.62	3.87	203.87	5.59	221.83
21:13	3.85	227.49	2.34	201.13	5.05	222.07	4.32	250.05
21:14	4.46	223.07	3.69	222.16	5.21	224.71	5.54	223.72
21:15	5.17	210.36	3.80	210.96	4.20	213.80	5.24	238.91
21:16	5.85	196.47	3.49	226.53	5.96	221.01	4.33	237.34
21:17	5.12	213.07	3.27	227.93	3.91	224.23	3.63	210.25
21:18	5.01	209.06	3.98	238.82	4.66	223.81	4.60	230.90
21:19	4.76	218.83	3.64	243.99	4.06	218.51	5.90	216.53
21:20	3.63	211.47	3.63	226.48	4.52	218.04	4.34	231.95
21:21	5.21	192.60	3.46	242.56	3.17	200.58	5.09	219.18

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Time	WTG08		WTG10		WTG21		WTG28	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:22	4.81	219.26	2.96	230.45	3.57	227.69	4.16	208.41
21:23	4.45	195.39	3.77	228.70	3.52	239.11	5.13	226.09
21:24	5.47	204.87	4.31	206.68	4.05	221.10	3.92	235.00
21:25	5.02	207.06	4.44	214.53	3.97	213.89	5.08	217.48
21:26	4.96	210.97	3.97	204.50	2.77	208.73	4.41	225.55
21:27	4.06	190.67	4.08	237.39	5.39	238.99	4.46	228.00
21:28	5.53	217.31	4.90	195.80	3.40	227.59	3.45	235.99
21:29	5.03	214.60	4.96	211.20	3.48	201.40	3.65	213.98
21:30	4.65	215.90	4.22	198.65	3.53	219.20	5.23	217.37
21:31	4.52	213.68	4.15	222.05	4.20	210.86	5.05	233.67
21:32	3.81	206.37	3.25	216.14	4.50	207.78	4.35	223.45
21:33	4.48	209.22	3.65	224.02	4.77	237.63	3.51	191.59
21:34	4.77	213.75	3.39	226.43	4.48	207.31	4.30	215.69
21:35	4.07	219.74	3.17	226.81	2.93	213.81	3.19	210.64
21:36	3.24	216.78	2.13	221.37	4.98	205.90	3.55	237.46
21:37	4.32	198.49	2.23	240.24	4.60	220.36	4.34	230.06
21:38	4.52	222.55	3.25	214.78	4.12	220.15	4.62	215.80
21:39	3.63	211.89	2.29	219.54	3.74	230.96	3.49	227.76
21:40	5.04	219.20	2.00	239.37	5.26	234.42	3.76	212.74
21:41	4.04	219.41	2.61	222.56	3.82	218.75	4.44	235.83
21:42	4.77	210.47	2.79	239.44	5.88	230.27	5.30	212.27
21:43	4.08	204.99	2.65	227.54	3.70	219.95	3.89	231.65
21:44	4.00	217.95	2.83	238.00	5.04	229.69	4.79	229.38
21:45	3.93	225.34	2.47	220.21	4.51	239.75	4.56	234.78
21:46	4.43	204.24	1.87	206.96	6.27	244.02	3.98	245.81

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

Time	WTG08		WTG10		WTG21		WTG28	
	WS	WD	WS	WD	WS	WD	WS	WD
21:47	5.02	214.91	2.72	241.84	5.15	222.73	5.80	213.99
21:48	5.02	220.10	2.14	213.67	5.69	214.05	5.63	218.52
21:49	4.44	215.60	4.04	202.47	4.85	233.07	4.67	236.09
21:50	4.74	220.57	3.01	194.47	6.54	233.25	4.81	234.12
21:51	4.93	209.45	3.81	232.17	4.84	213.16	3.53	241.30
21:52	4.41	214.88	2.40	205.56	4.21	205.40	4.95	219.77
21:53	4.55	220.36	3.76	188.26	5.10	216.34	4.64	213.38
21:54	4.04	235.88	3.61	221.29	4.45	223.39	3.90	211.16
21:55	4.12	221.45	3.73	205.19	5.37	215.06	4.29	221.17
21:56	3.73	279.10	2.70	211.61	5.36	208.23	4.08	227.33
21:57	4.22	223.88	2.58	229.73	5.49	230.89	3.61	199.44
21:58	2.94	224.36	2.38	219.91	6.95	224.34	4.13	239.09
21:59	4.12	238.93	3.38	213.82	5.77	218.43	5.39	212.08
22:00	3.48	235.99	3.99	230.91	5.70	229.23	3.80	206.37

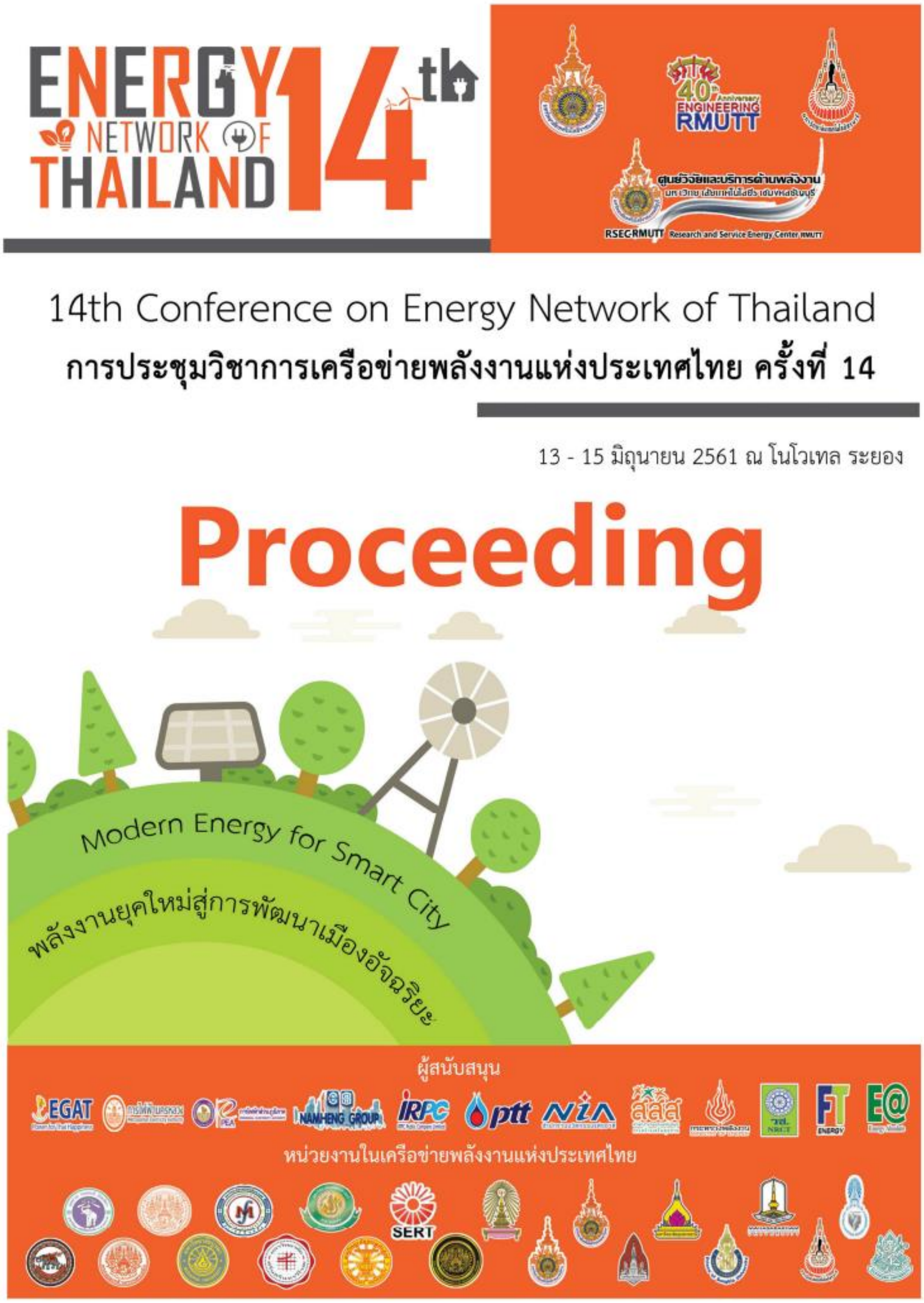
MAEJO UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

อรรฆพร คงจิต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ, เสริมสุข บัวเจริญ และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2561). **สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80 MW.** ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 ระยอง, 1,101-1,105.



การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของมูลโคร่วมกับน้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลาและจากกระบวนการชำแหละเนื้อปลา 980
แนวทางการใช้ประโยชน์พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับการอนุรักษ์พลังงานและสร้างอัตลักษณ์บริเวณแนวชายฝั่งทะเลตำบลปากน้ำ อำเภอละงู จังหวัดสตูล 986
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการดูดซับ 997
การผลิตเอทานอลจากกากต้นปาล์มสาคูพันธุ์ยอดสีแดงด้วยตะกอนหัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสีย 1006
การปรับปรุงประสิทธิภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้วิธีการกลั่นลำดับส่วน 1014
การวิเคราะห์สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบลอยน้ำพิกัด 50 kWp 1022
การพัฒนาแผนที่ลมสเกลปานกลางนอกชายฝั่งทะเลอ่าวไทยและอันดามันของประเทศไทยด้วยการจำลองแบบบรรยากาศ 1027
ไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าในฐานะเชื้อเพลิงเสริมสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล 1033
การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากเศษไม้ไผ่ร่วมกับใบอ้อย 1040
การใช้โครงข่ายการประสาทเทียมเพื่อการคาดการณ์พลังงานระบบไฟฟ้าเพื่อประเมินออกแบบระบบไมโครกริดที่ใช้แหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียนเป็นแหล่งพลังงานหลัก 1048
ปัจจัยการศึกษาระบบอาคารอัตโนมัติบนพื้นฐานการใช้พลังงานทดแทนสำหรับสถานีชาร์จรถไฟฟ้า 1053

SEC-01 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อชุมชน

การออกแบบและพัฒนาระบบให้ปุ๋ยน้ำอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ 1059
การศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนที่สูญเสียจากเตาเผาถ่านด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก 1066
การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานของโซล่าเซลล์และกังหันลมรวม 20 kW สำหรับชุมชนตลาดสด วงศกร พลาซ่า 1071
การออกแบบและติดตั้งระบบเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์เพื่อการจัดการทรัพยากรในชุมชนอัจฉริยะ 1077

SEC-02 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อยานยนต์ไฟฟ้า

การศึกษาสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย 1085
ผลกระทบจากการอัดประจุไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า 1091

SEC-03 ระบบพลังงานอัจฉริยะเพื่อเมืองใหญ่

การกำหนดทิศรอลมของกังหันลมด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อเพิ่มเวลาในการผลิตไฟฟ้า 1097
สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80MW 1101
เปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 8 MW 1106
ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับสถานีพยากรณ์อากาศที่ใช้ประมวลสัญญาณเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม 1112
การเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ที่ติดตั้งแบบระบบคงที่และระบบติดตามดวงอาทิตย์ในประเทศไทย 1117
การศึกษาการวัดแรงกระทำด้านข้างต่อชุดเพลาล้อรถไฟ 1122
การพัฒนาระบบการรู้จำแผ่นป้ายทะเบียนรถยนต์สำหรับการจัดการจราจรในเมืองอัจฉริยะ 1128
การพัฒนาระบบควบคุมแบบไร้สายด้วยสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อสำหรับผู้พิการและผู้สูงอายุในเมืองอัจฉริยะ 1132

สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80MW

Topographic Condition Effecting Monsoon Wind Direction Used for Electricity Generating of an 80 MW Wind Energy Plant

อรรฆพร คงจิต[1*], วีรพล จิรจริต[2], จอมภพ แวววศักดิ์[3], ธเนศ ไชยชนะ[1], เสริมสุข บัวเจริญ[1] และยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล[1]

[1] วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

[2] ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็คทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[3] ศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ

*ผู้ติดต่อ: akaporn@italthaiengineering.com, เบอร์โทรศัพท์, 053333194 เบอร์โทรสาร, 053333194

SEC-03-122

บทคัดย่อ

ศักยภาพพลังงานลมในประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ตะวันออกเฉียงเหนือ มีความเร็วลมต่ำและไม่สม่ำเสมอ การเลือกพื้นที่ในการติดตั้งจึงจำเป็นมาก พื้นที่ที่เหมาะสมต้องมีแนวเขาเพื่อป้องลม ให้ลมมีปริมาณมากขึ้นความเร็วลมเฉลี่ยตลอดทั้งปีมากกว่า 3 m/s เนื่องจากเป็นความเร็วลมขั้นต่ำที่ทำให้กังหันสามารถผลิตไฟฟ้าได้ จึงมักติดตั้งบริเวณที่เป็นร่องเขา แต่ลมมรสุมที่พัดสู่กังหันลมในบริเวณนี้จะได้รับอิทธิพลจากลมภูเขาและลมหุบเขา ลมมีการเปลี่ยนทิศบ่อยกว่าในบริเวณพื้นที่โล่ง งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมของฟาร์มกังหันลมขนาด 80 MW (กำลังการผลิต 2.5 MW จำนวน 32 ต้น) ติดตั้งกระจายตามพื้นที่เชิงเขา สูงจากระดับน้ำทะเล 432.5 msl (553.2 msl เมื่อรวมความสูงกังหันลม) ใช้ผลการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันเพื่อหาความสัมพันธ์ของทิศทาง ความเร็วลมของกังหันแต่ละต้นและจัดกลุ่มกังหัน พบว่าสามารถแบ่งกลุ่มกังหันตามลักษณะภูมิประเทศติดตั้งได้สองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ติดตั้งบนพื้นที่โล่ง ทิศของกังหันจะหันไปตามทิศมรสุมเมื่อผลิตไฟฟ้า และกลุ่มที่ติดตั้งใกล้เนินเขา ทิศของกังหันจะมีความแปรปรวนแต่ยังคงมีแนวโน้มตรงตามทิศลมมรสุม ผลการวิเคราะห์รูปแบบของทิศกังหันจากสัญญาณสามารถส่งข้อมูลลมไปยังกังหันต้นอื่นๆ ในกลุ่มด้วยระบบ SCADA เพื่อส่งข้อมูลให้กับกังหันลมต้นถัดไปเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า การประมวลสัญญาณลมสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในประเทศไทยในอนาคตต่อไป

คำหลัก: กังหันลม, ฟาร์มกังหันลม, ภูมิประเทศ, SCADA

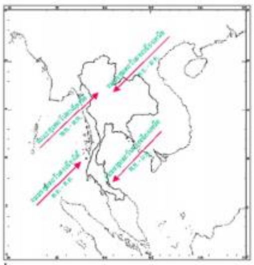
Abstract

Potential of wind energy in Thailand is under the influence of southwestern monsoon and northwestern monsoon wind having low speed and not continuity. Selection of an area for installation Is essential which an appropriate area must be near mountains for wind shield which an average wind speed throughout the year is more than 3 m/s since it is a low level of wind speed which can make the plant generates electricity. Hence, the plants are usually installed in the valley but the monsoon wind blowing to turbines in this area will have an influence from mountain wind and value wind. The wind often changes directions rather than open area. This study presents signal processing from a wind measuring equipment on the turbine of an 80 MW turbine farm (2.5 MW generating power, 32 turbines). The turbines are installed at the foot of a mountain, 432.5 msl above the sea level (553.2 msl, includes the height of the turbine). Results of the signal processing are used for a relationship of direction, wind speed of each turbine, and turbine group arrangement. It is found that turbine groups can be classified into 2 groups based on topographic location area: installation in an open area (Turbine direction is in this same direction with monsoon wind while electricity generating) and installation on the hill (Turbine direction will have variance but still tend to match monsoon direction). Results of an analysis of turbine direction forms from signal can send wind data to other turbines in the group by using SCADA system. This aims to send data to next turbines for readiness preparation electricity generating. The signal processing can be used as a guideline for planning electricity generating from wind energy in Thailand in the future.

Keywords: turbine, wind farm, topography, SCADA

1. บทนำ

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุม ลมมรสุมนี้เป็นลมที่พัดตามฤดูกาล มีทิศทางแน่นอนและพัดสม่ำเสมอตามแต่ละฤดูกาล ซึ่งลมมรสุมในประเทศไทยมี 2 ชนิด คือ 1) ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล เทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น และ 2) ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ มรสุมนี้พัดพาเอามวลอากาศเย็นและแห้งจากแถบประเทศมองโกเลียและจีนเข้ามาปกคลุมประเทศไทย ทำให้ท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป ทิศทางการพัดพาของลมมรสุมในประเทศไทยแสดงดังรูปที่ 1 [1]



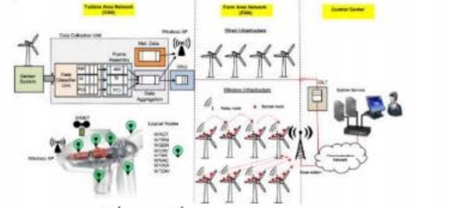
รูปที่ 1 ทิศทางการพัดพาของลมมรสุม [1]

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าจำนวนมาก อยู่ที่จังหวัดชัยภูมิ ลักษณะโดยรวมของพื้นที่ติดตั้งล้อมรอบด้วยภูเขาสลับที่ราบซึ่งเหมาะสมในการป้องลม ส่งผลให้มีกังหันลมที่ติดตั้งทั้งบริเวณใกล้กับเทือกเขาและบริเวณพื้นที่โล่ง บริเวณเทือกเขานี้จะมีลมหุบเขาและลมภูเขาที่พัดตามลาดเขาซึ่งเป็นลมเฉพาะ จึงทำให้ลมบริเวณนี้มีความแปรปรวนและส่งผลต่อลมที่พัดเข้าสู่กังหันลม ด้วยเหตุนี้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกังหันลมจึงเป็นการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากไม่สามารถทราบทิศที่แน่นอนของลมในบริเวณนั้น การทำงานของกังหันลมแต่ละตัวจึงมีความจำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าควบคุมระบบตลอดเวลา ทั้งการหันหน้ากังหันลมไปในทิศทางลม การเตรียมกางใบพัดเพื่อรับลมและหมุนเพื่อปั่นไฟ หรือแม้แต่ระบบควบคุมภายในต่างๆ ในตัวกังหันลม สิ่งเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น เมื่อมีลมพัดผ่าน กังหันลมจะเปลี่ยนทิศหันหน้าเข้าหาทิศของลม แต่เนื่องจากโครงสร้างที่ใหญ่และมีน้ำหนักมาก ทำให้ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งในการหันทิศเข้าหาลม และใช้เวลาในการกางใบ แต่ลมในประเทศไทยนั้นมีความเร็วลมต่ำ ลมไม่ต่อเนื่องในบริเวณเชิงเขา ลมเปลี่ยนทิศทางในแต่ละช่วงเวลาทำให้ลมที่พัดในแต่ละครั้งถือเป็นสิ่งที่มีค่าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าอย่างมาก ในหลายครั้ง ลมที่แรงพอทำให้กังหันลมทำงานได้นั้น ก็พัดผ่านและหมดไปก่อนที่กังหันลมจะผลิตไฟฟ้าได้ เนื่องจากใช้เวลาในการเตรียมการผลิตมากเกินไป ผู้วิจัยจึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านของระบบควบคุมและการส่งสัญญาณระหว่างกลุ่มกังหันลม ดังนี้

C. Popeanga et al. (2012) [2] นำเสนอระบบควบคุมเพื่อลดความสูญเสียและการหยุดทำงาน โดยการควบคุมระยะไกลในระบบเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยติดตั้งเซ็นเซอร์ภายในโครงสร้างขนาดใหญ่ของกังหันลม ดังแสดงในภาพที่ 3 การประเมินการตอบสนองและการแสดงข้อมูลการตรวจสอบจากเซ็นเซอร์ไร้สาย ส่งข้อมูลไปศูนย์ควบคุมนำไปสู่การเสนอรูปแบบของพฤติกรรมกังหันลม การตอบสนองต่อการโหลด ศูนย์ควบคุมสามารถทำการกำหนดขั้นตอนโดยการเขียนวิธีการควบคุมพารามิเตอร์จากระบบให้มีการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2

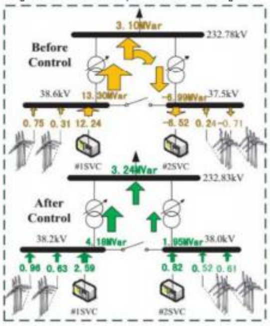
รูปที่ 2 ตำแหน่งเซนเซอร์บนกังหันลม [2]

A. Mohamed and K. Young-Chon (2013) [3] บทความนี้นำเสนอระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องกังหันลม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน ระบบสื่อสารระหว่างเครื่องกังหันลมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม 1) การสื่อสารภายในกังหันลม 2) การสื่อสารในกลุ่มกังหันลม 3) การสื่อสารระหว่างศูนย์ควบคุม ซึ่งรวมถึงการสื่อสารข้อมูลกับอุตุนิยมวิทยา พบว่าแต่ละกังหันลมสามารถตัดสินใจดำเนินงานในเวลาจริง เพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าและยืดอายุการใช้งานของกังหันลมได้ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การสื่อสารแบบ M2M [3]

L. Yifeng et al. (2012) [4] บทความนี้ใช้ระบบเครือข่ายมาควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมทางด้านแรงดันไฟฟ้าของกังหันลมแต่ละตัวให้เหมาะสม เพื่อควบคุมกำลังรีแอคทีฟที่เข้าสู่ระบบสายส่งให้อยู่ในสภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลม [4]

Q. Chen et al. (2013) [5] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไร้สายเครือข่ายเซ็นเซอร์ ในการควบคุมรีเลย์ ช่วยแก้ปัญหาการสื่อสารแบบสายส่ง เนื่องจากฟาร์มกังหันลมมีอัตราการเพิ่มขึ้นมาก การกำหนดค่าโหนดรีเลย์จะขึ้นกับตำแหน่งและระยะทางที่ห่างจากสถานี การกำหนดค่าจึงมีอุปสรรค บทความนี้นำเสนอเทคโนโลยีไร้สายเชื่อมต่ออุปกรณ์รีเลย์เพื่อควบคุมระบบ ส่งผลให้ระบบเครือข่ายมีความมั่นคง เนื่องจากการสื่อสารในระบบเครือข่ายมีความแม่นยำ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมของฟาร์มกังหันลมขนาด 80 MW (กังหันลมขนาด 2.5 MW จำนวน 32 ต้น) โดยใช้ผลของการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมเพื่อหาความสัมพันธ์ของทิศทางและความเร็วลม เพื่อกำหนดรูปแบบของทิศลมที่พัดเข้ากลุ่มกังหันลมและจัดกลุ่มกังหันลม จากนั้นกำหนดแนวทางส่งข้อมูลไปยังกังหันลมต้นอื่นๆ เพื่อควบคุมกลุ่มกังหันลมด้วยระบบ SCADA ในการเตรียมการผลิตไฟฟ้าของกลุ่มกังหันลมเพื่อส่งข้อมูลให้กับกังหันลมต้นถัดไปที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันหันหาทิศ

เพื่อรอลมเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า ส่งผลให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทำงานของกังหันลม

ก่อนการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม อุปกรณ์วัดลมที่ติดตั้งบน Nacelle ของกังหันลม ดังแสดงในรูปที่ 5 จะทำการตรวจวัดทิศทาง ความเร็วและความต่อเนื่องของลม ก่อนส่งสัญญาณให้กับระบบปฏิบัติการของกังหันลมเริ่มกระบวนการผลิตไฟฟ้า ซึ่งระบบปฏิบัติการกังหันลม มีขั้นตอนการเตรียมก่อนการทำงานของระบบ จนถึงขั้นตอนที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบสายส่ง ดังนี้

รูปที่ 5 อุปกรณ์วัดลมบน Nacelle ของกังหันลม

การเตรียมความพร้อมของระบบ (สถานะ Standby) อุปกรณ์วัดลมทำการตรวจวัดความเร็วและทิศทางลม ส่งสัญญาณให้กังหันลมปรับใบพัดเป็นมุม 75 องศา เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า

เริ่มกระบวนการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Start) กังหันลมปรับทิศทางของ Nacelle ไปตามทิศทางของลมที่มีความเร็วลมมากกว่า 3 m/s ขึ้นไป ใช้เวลาประมาณ 0.5-10 นาที

จ่ายไฟเข้าสู่ระบบ (สถานะ Online) กังหันลมผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ

เริ่มหยุดผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stopping) กังหันลมเริ่มหยุดการผลิตไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมน้อยกว่า 3 m/s

หยุดการผลิตไฟฟ้า (สถานะ Stop) กังหันลมหยุดผลิตไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์วัดลมตรวจวัดลมได้น้อยกว่า 3 m/s อย่างต่อเนื่อง และปรับใบพัดเป็นมุม 90 องศา

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า โครงการหนึ่งที่จังหวัดชัยภูมิ ลักษณะโดยรวมของพื้นที่ติดตั้งล้อมรอบด้วยภูเขาสลับที่ราบ จึงมีกังหันลมที่ติดตั้งทั้งบริเวณใกล้กับเทือกเขาและบริเวณพื้นที่โล่ง ดังแสดงในรูปที่ 6 จำนวนกังหันลมผลิตไฟฟ้าในโครงการมีทั้งสิ้น 32 ต้น ตั้งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเล เท่ากับ 432.5 msl (553.2 msl เมื่อรวมความสูงกังหันลม) กำลังการผลิตต้นละ 2.5 MW เก็บข้อมูลในช่วงที่ระบบกังหันลมทำการผลิตไฟฟ้า (Online) พร้อมกันทั้ง 32 ต้น ประกอบด้วย ระยะเวลาที่ผลิตไฟฟ้า ความเร็วลมและทิศทางลม

รูปที่ 6 ภาพมุมสูงโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า

(ก)

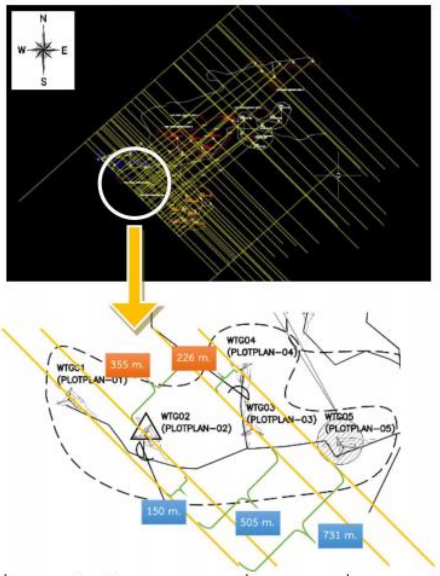
(ข)

รูปที่ 7 (ก) แผนที่ทางภูมิศาสตร์และตำแหน่งติดตั้งกังหันลม และ (ข) แนวเทือกโดยรอบ

รูปที่ 7 (ก) แสดงลักษณะภูมิประเทศโดยรอบโครงการฯ มีเทือกเขาล้อมล้อม ตำแหน่งติดตั้งกังหันลมทั้ง 32 ต้น รูปที่ 7 (ข) บริเวณเส้นสีขาว คือแนวเทือกเขาโดยรอบโครงการ จะเห็นได้ว่าการติดตั้งกังหันลมมีทั้งชิดกับแนวเทือกเขาและบริเวณพื้นที่โล่ง

2. ลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าฯ นี้ เป็นลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ที่พัดสู่ประเทศไทยในแนวระนาบ ต้นกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่อยู่ด้านหน้าเมื่อเทียบแนวตามทิศลมมรสุม จะได้รับลมเป็นต้นแรกๆ ต้นที่อยู่ถัดมาในแนวระนาบก็จะได้รับลมในเวลาถัดมา การตีกริดตามแนวลมมรสุมสามารถบอกระยะห่างระหว่างต้นกังหันลมแต่ละต้นได้ ในงานวิจัยได้ทำการสร้างเส้นทะแยงบนแผนที่โครงการ ดังรูปที่ 8 ใช้กังหันลม WTG01 เป็นต้นอ้างอิง หาระยะห่างตามแนวลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (มุมล่างซ้าย ไปยังมุมขวาบน) ตัวอย่างผลของระยะทางที่ได้จากรูปที่ 9 เช่น WTG01 ห่างจาก WTG02 WTG03 และ WTG04 เป็นระยะทาง 150 505 และ 732 m ตามลำดับ

หรือ WTG02 ห่างจาก WTG03 เป็นระยะทาง 355 m, WTG03 ห่างจาก WTG04 เป็นระยะทาง 226 m เป็นต้น ทำการวัดระยะห่างระหว่างเส้นทะแยกมุมแต่ละเส้นซึ่งเป็นค่าแทนระยะห่างกันหันลมแต่ละต้น จนได้ค่าระยะห่างกังหันลมทั้ง 32 ต้น

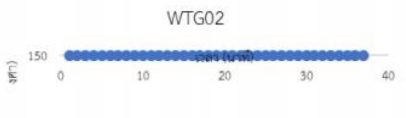


รูปที่ 8 การสร้างเส้นทะแยงบนแผนที่โครงการฯ เพื่อหาระยะห่างระหว่างต้นกังหันตามแนวมรสุม

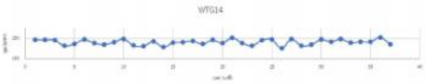
WTG 1	150	505	731	794	1204
	WTG 2	355	581	644	1054
		WTG 3	226	289	699
			WTG 4	63	473
				WTG 5	410
					WTG 6

ตามแนวลมมรสุม

เก็บข้อมูลกังหันลมผลิตไฟฟ้า จำนวน 32 ต้น ใน 1 รอบการผลิตในสถานะออนไลน์ วันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 พบว่าที่เวลา 02.35 น. เป็นการออนไลน์รอบแรกของวัน ที่กังหันลมทั้ง 32 ต้น แสดงสถานะออนไลน์พร้อมกันครบทุกต้น ทำการเก็บข้อมูลความเร็วและทิศทางลมตั้งแต่เวลา 02.35-03.11 น. ทุกๆ 50 วินาที จากการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดที่ลมจะเคลื่อนที่ถึงกังหันลมต้นต่อไป จำนวน 37 ข้อมูลต่อต้น รวม 1,184 ข้อมูล สามารถสร้างกราฟทิศทางลมได้ดังรูปที่ 10



(ก)



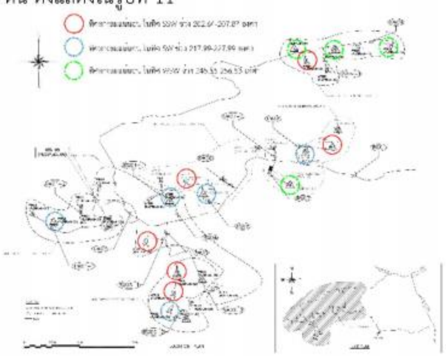
(ข)

รูปที่ 10 ทิศทางลมกังหันลม (ก) WTG02 และ (ข) WTG04 ขณะผลิตไฟฟ้า

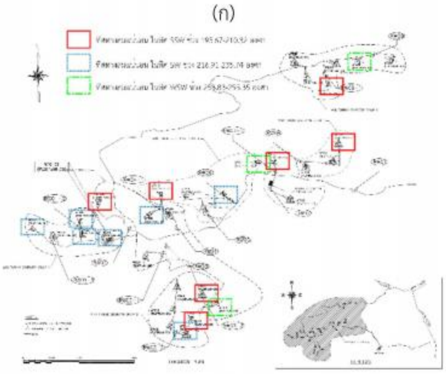
จากรูปที่ 10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมของทิศทางลมกับเวลาขณะที่กังหันลมทำการผลิตไฟฟ้า จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ กังหันลมทั้ง 32 ต้น ทำให้สามารถแบ่งกังหันลมได้เป็น 2 กลุ่มจากลักษณะของเส้นกราฟ รูปที่ 9 (ก) เป็นตัวอย่างกราฟในกลุ่มที่ลมมีทิศแน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ทิศของลมที่พัดสู่กังหัน ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดลม เท่ากับ 202.64-256.53 องศา รูปที่ 9 (ข) เป็นตัวอย่างกราฟในกลุ่มที่ลมมีการเปลี่ยนทิศลมขึ้น-ลงไม่แน่นอนขณะผลิตไฟฟ้า ทิศของลมที่พัดสู่กังหัน ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดลม เท่ากับ 195.67-255.35 องศา ซึ่งยังอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงใต้ (191.25-258.75 องศา) นอกจากนี้ทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SW) ยังมีทิศย่อย ได้แก่ ทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนใต้ (SSW) และทิศตะวันตกเฉียงใต้ค่อนตะวันตก (WSW) ซึ่งกังหันลมกลุ่มที่มีทิศแน่นอน มีช่วงของทิศ SSW SW และ WSW อยู่ในช่วง 202.64-207.87, 217.99-227.99 และ 245.55-256.53 องศา ตามลำดับ และกังหันลมกลุ่มที่มีทิศไม่แน่นอน มีช่วงของทิศ SSW SW และ WSW อยู่ในช่วง 195.67-210.32, 216.91-235.74 และ 253.83-255.35 ตามลำดับ

4. ผลการวิจัย

จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางลมกับเวลาขณะผลิตไฟฟ้าของกันหันลม สามารถแบ่งกลุ่มกังหันออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มที่มีทิศทางลมที่แน่นอนและไม่แน่นอน จึงนำผลของความสัมพันธ์นี้ พล็อตลงในพื้นที่ที่ทำการติดตั้งกังหันลมทั้ง 32 ต้น ดังแสดงในรูปที่ 11



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 กลุ่มกังหันลมที่มีทิศทาง (ก) แน่นอน และ (ข) ไม่แน่นอน

เมื่อ ○ แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 202.64-207.87 องศา

○ แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 217.99-227.99 องศา

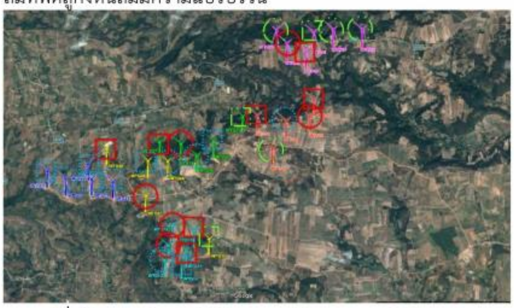
○ แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 245.55-256.53 องศา

□ แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 195.67-210.32 องศา

□ แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 216.91-235.74 องศา

□ แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 253.83-255.35 องศา

เมื่อนำกังหันลมทั้งสองกลุ่มรวมในภาพแผนที่ทางภูมิศาสตร์ที่มีตำแหน่งติดตั้งกังหันลมทั้ง 32 ต้น ในภาพเดียวกัน ดังรูปที่ 12 พบความสัมพันธ์คือกังหันลมกลุ่มที่มีทิศทางลมแน่นอน เป็นกังหันลมที่ติดตั้งบริเวณพื้นโล่ง ห่างจากเนินเขา ส่วนกังหันลมกลุ่มที่มีทิศทางลมไม่แน่นอน จะติดตั้งบริเวณใกล้กับเนินเขา ทำให้ลมที่พัดสู่กังหันลมมีความแปรปรวน



รูปที่ 12 การแบ่งกลุ่มกังหันลมตามลักษณะของทิศทางลม

5. สรุปผล

โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า จังหวัดชัยภูมิ กำลังการผลิต 80 MW จำนวน 32 ต้น มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 432.5 msl (553.2 msl เมื่อรวมความสูงกังหันลม) ติดตั้งตามลักษณะภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ราบสลับเนินเขา จากการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาที่กังหันลมมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ สถานะออนไลน์ ต่อเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำให้สามารถนำข้อมูลของทิศทางและความเร็วลมมาแบ่งกลุ่มกังหันลมได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอนและกลุ่มที่ทิศทางลมมีความไม่แน่นอน ผลของกลุ่มกังหันลมที่มีทิศทางลมไม่แน่นอน เนื่องจากกังหันลมกลุ่มนี้ติดตั้งใกล้บริเวณเทือกเขา ตามแนวยาวของสันเขา ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมเหล่านี้มีความแปรปรวน ทิศทางไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับกังหันลมที่ติดตั้งในบริเวณที่โล่งที่ไม่มีลมอื่นมารบกวนทิศทางของลมมรสุม ทำให้ทิศทางลมพัดเข้ากังหันลมมีความแน่นอน ทั้งนี้ทิศทางลมทั้งหมดที่พัดสู่กังหันลมทั้ง 32 ต้น ยังคงเป็นทิศทางลมที่พัดมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งตรงตามทิศของลมมรสุมที่พัดผ่านประเทศไทย ณ ขณะเก็บข้อมูล คือลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และการประมวลสัญญาณที่ได้รับ สามารถกำหนดรูปแบบของทิศลม เพื่อส่งต่อข้อมูลไปยังกังหันลมต้นอื่นๆ ในระบบเพื่อควบคุมการเตรียมความพร้อมในการผลิตไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

กิติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ และบริษัทอิตัลไทยวิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และข้อมูลในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมอุตุนิยมวิทยา. ม.ป.ป. *ลมมรสุม.* [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=52, เข้าดูเมื่อ 17/04/2561.

[2] C. Popeanga, N. Cristov and R. Dobrescu. (2012). Smart monitoring and controlling of wind turbines farms based on wireless sensors networks. *Systems and Computer Science (ICSCS), 1st International Conference*. Delhi, India.

[3] A. Mohamed and K. Young-Chon. (2013). Machine-to-Machine Communication Infrastructure for Smart Wind Power Farms. *IEEE Int. Workshop Intelligent Energy Systems (IWIES),* Vienna, Austria.

[4] L. Yifeng, G. Qinglai, S. Hongbin, C. Rui, W. Bin and Z. Boming. (2012). Network Model based Coordinated Automatic Voltage Control Strategy for Wind Farm. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, Tianjin, China.

[5] Q. Chen, Y. Hu, Z. Chen, V. Grout, D. Zhang, H. Wang and H. Xing. (2013). Improved Relay Node Placement Algorithm for Wireless Sensor Networks Application in Wind Farm. *IEEE Int. Conf. Smart Energy Grid Engineering (SEGE),* Oshawa, ON, Canada.

[6] P. Koetket, S. Khunkhet, W. Chiracharit, J. Waewsak, T. Chaichana and Y. Auttawaitkul. (2018). Increasing Efficiency in Wind Energy Electricity Generating by Signal Processing from Wind Measuring Equipment on Wind Turbine for the Determination of Wind Direction. *2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, Chiang Mai, Thailand.

อรรฆพร คงจิต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล. (2561). **การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลม จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิต 80 MW โดยใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA.** ใน งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561 กรุงเทพฯ, 63-68.

คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการและนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561

PEACON & INNOVATION 2018

ที่ปรึกษาคณะกรรมการ

- **คุณเสริมสกุล คล้ายแก้ว**
  ผู้ว่าการการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- **คุณสมพงษ์ ปรีเปรม**
  รองผู้ว่าการวางแผนและพัฒนาระบบไฟฟ้า

ประธานคณะกรรมการ

- **คุณสุรศักดิ์ ไตรทาน**
  รองผู้ว่าการทรัพยากรบุคคล

รองประธานคณะกรรมการ

- **คุณศรัณย์พงศ์ อาชว์สุนทร**
  ผู้ช่วยผู้ว่าการวางแผนและพัฒนาระบบไฟฟ้า
- **คุณธนาเศรษฐ์ พงษ์ทรงเสถียร**
  ผู้ช่วยผู้ว่าการสารสนเทศและสื่อสาร
- **ร้อยโทสุพจน์ ใช้บางยาง**
  ผู้ช่วยผู้ว่าการทรัพยากรบุคคล

คณะกรรมการ

- **คุณเกรียงศักดิ์ กิตติประภัสร์**
  ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาและสนับสนุนระบบสารสนเทศ
- **คุณพงศกร ยุทธโกวิท**
  ผู้อำนวยการฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า
- **คุณชาญณรงค์ สอนดิษฐ์**
  ผู้อำนวยการฝ่ายวิจัยและพัฒนาระบบไฟฟ้า
- **คุณกัลยา แตงเกษม**
  ผู้อำนวยการฝ่ายประชาสัมพันธ์
- **คุณศศิวิภา อัมพรสิทธิกูล**
  ผู้อำนวยการฝ่ายงานผู้ว่าการ

คณะกรรมการและเลขานุการ

- **คุณประดิษฐ์ เฟื่องฟู**
  ผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาทรัพยากรบุคคล

คณะกรรมการพิจารณาบทความ

• รศ.ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
• รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
• รศ.ดร. สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
• รศ.ดร. สมพร สิริสำราญนุกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
• ผศ.ดร. คมสันต์ หงส์สมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
• ผศ.ดร. คมสันต์ เพ็ชรรักษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
• ผศ.ดร. นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนเรศวร
• ผศ.ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
• ผศ.ดร. สัญชัย เดชานุภาพฤทธา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
• ผศ.ดร.สมศักดิ์ กิตติปิยกุล	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
• ผศ.ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
• ผศ.ดร. อนวัช แสงสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
• ดร. ชุมพล บุญมี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
• นายปกรณ์ เลิศเสถียรชัย	สถาบันพัฒนาธุรกิจอย่างยั่งยืน
• นางสาวมรกต พรพิบูลย์	สถาบันพัฒนาธุรกิจอย่างยั่งยืน
• นายบุญเลิศ คณาธนสาร	สถาบันพัฒนาธุรกิจอย่างยั่งยืน
• ดร. จักรเพชร มัทราช	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• ดร. จุติณัฏฐ์ ลิมปนันท์วดี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• ดร. เจนจบ วีระพานิชเจริญ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• ดร. สมชาย ทรงศิริ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางกฤดาภรณ์ โสมณวัฒน์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายกฤษณพล ดวงหอม	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายกิตติ เลียงเครือ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายจักรพงษ์ ชโยดมเดชา	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายณัฐวัฒน์ หรรษาภิพัฒน์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายณรงค์ ตันติฉายากร	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายดนตร์ บุนนาค	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางสาวดวงจิต พงษ์สิน	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางดาราวรรณ พรหมกสิกร	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายตฤณ เสาวรา	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายทนงศักดิ์ กิจโรณี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายธงชัย มีนวล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายธิติวุฒิ เกียรติวิศาลศรี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางสาวนาถสุชา เทิมแพงพันธ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นายปริญญา สอนสอาด	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางสาวปิยะพร ช่างสุพรรณ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
• นางสาวพรรณทิพา อินทรัตน์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

คณะกรรมการพิจารณาบทความ

นางสาวภรณี ภูศรี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายภาคภูมิ แก้วแกมทอง	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นางสาวภานิชา บุตรวงษ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายมนต์ชัย ดานุโพธิ์บริบูรณ์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายยุทธพล นิพิธกุล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายวรวิทย์ ว่องธนาการ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายวิทยา เชื้อสิงห์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายวิโรจน์ บัวคลี่	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายศุภณัฐ สถาวร	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายศุภทัต อินทร์ขาว	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายสมเกียรติ วิรุฬห์เวศม์กุล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายสรายุทธ บุรีแก้ว	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายสิทธิพงษ์ มีโส	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นางสิรีรัศมิ์ ดุลยภาพัชร์	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นายเอกดนัย เขียวมา	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
นาย ฮ.ปกาศิต จันทสาโร	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

PEACON & INNOVATION 2018

กำหนดการนำเสนอบทความ (ต่อ)

24 ก.ย. 2561

ห้อง BB402 | บทความด้าน Strengthening

Session Chairman : รศ.ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เวลา	รหัส	ชื่อบทความ
		Session 1
14.00 – 14.20 น.	STR-01	การประเมินคุณภาพประกอบติดตั้ง 115 kV Outdoor Termination ด้วยวิธีวัดค่า Partial Discharge (PD) แบบ Offline On-Site Testing เดียร์ จันทร์ศรี *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*
14.20 – 14.40 น.	STR-02	การหาตำแหน่งและพิกัดความจุที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ชัชวาลย์ สาสันเทียะ, อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร, พิรัสม์ คุณกิตติ, ชญาดา สุระวนิชกุล, รองฤทธิ์ ฉัตรถาวร *มหาวิทยาลัยขอนแก่น*
14.40 – 15.00 น.	STR-03	การเก็บกักพลังงานโดยใช้ขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการสูญเสียในระบบผลิตไฟฟ้าใช้เอง นายจุมพล ไชยบิน, ผศ.เสริมสุข บัวเจริญ, ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล *มหาวิทยาลัยแม่โจ้* นายศุภเสฏฐ์ ตันไชยโรจน์ *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค* ผศ.ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล, ผศ.ดร.วันจักรี่ เล่นวารี *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
15.00 – 15.20 น.	STR-04	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลม จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิต 80 MW โดยใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA นายอรรฆพร คงจิต, ผศ.ดร.ธเนศ ไชยชนะ, ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล *มหาวิทยาลัยแม่โจ้* ผศ.ดร.วีรพล จิรจริต *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี* ผศ.ดร.จอมภพ แววศักดิ์ *มหาวิทยาลัยทักษิณ*
		Session 2
15.30 – 15.50 น.	STR-09	การหาวิธีการทดสอบความเหมาะสมของระยะเวลาในการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ CT-VT ในระบบ 22/33 KV ของ กฟภ. นายรณกร มโนเสงี่ยม, นายชูชีพ แก่นจันทร์, นายพลากรณ์ หงอนไก่ *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*
15.50 – 16.10 น.	STR-10	วิธีการบริหารจัดการสินทรัพย์ในองค์กรเพื่อความเหมาะสม นายปัณณธร รอดกาเนิด, นายศุภเสฏฐ์ ภาสบุตรอนงค์, นายวีรเชษฐ คล้ายทอง, นายธนากร เพ็ญทอง *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*
16.10 – 16.30 น.	STR-11	ลูกค้าผลิตไฟฟ้าใช้เองที่มีผลกระทบต่อรายได้ค่าไฟฟ้าของ กฟภ. นายไพสิฐ ปิ่นโต *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*
16.30 – 16.50 น.	STR-12	การศึกษาผลกระทบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต่อหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติในระบบจำหน่ายระยะทางไกลในพื้นที่ อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน และแนวทางการดำเนินการเพื่อยืดอายุการใช้งานของ หม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติ นายประพันธ์ ถาไชย,นายวราวุธ จิตตพันธ์, นายวรุฒม์ ปีแดง *การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*

PEACON & INNOVATION

งานประชุมวิชาการ และนวัตกรรม กฟภ. ปี 2561
"PEA4.0 : Road to Digital Utility"
24 - 25 กันยายน 2561
ณ ศูนย์ประชุมวายุภักษ์ ศูนย์ราชการเฉลิมพระเกียรติ แจ้งวัฒนะ

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลม จำนวน 32 ต้น กำลังการผลิต 80 MW โดยใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA

นายอรรฆพร คงจิต[1], ผศ.ดร.วีรพล จิรจริต[2], ผศ.ดร.จอมภพ แววศักดิ์[3], ผศ.ดร.ธเนศ ไชยชนะ[4], ดร.ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล[5]
[1]วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ akaporn@italthaiengineering.com
[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี werapon.chi@kmutt.ac.th
[3]ศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ jompob@tsu.ac.th
[4]วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ Tanatecha@hotmial.com
[5]วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ yingrak.mju@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในประเทศไทยคือต้องมีลมต่อเนื่องที่ความเร็วลม 3 m/s ขึ้นไป เพื่อให้กังหันลมเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า (3 m/s Cut in speed) แต่ลมในประเทศไทยโดยเฉลี่ยจัดเป็นลมที่มีความเร็วปานกลาง-ต่ำ คือมีความเร็วลมต่ำกว่า 4 m/s [1] และลมมีความไม่สม่ำเสมอ โครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่ติดตั้งบริเวณเนินเขาซึ่งมีลมแรงกว่าบริเวณพื้นราบ แต่ความสม่ำเสมอของลมยังไม่เพียงพอทั้งในด้านทิศทางและความเร็วต่อระบบการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม การเริ่มระบบผลิตไฟฟ้าของกังหันลมในแต่ละครั้งนั้น มีการใช้ไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ภายในกังหันลมและใช้ระยะเวลามากในการหมุนหน้ากังหันไปยังทิศลม เนื่องจากกังหันลมที่กำลังการผลิตไฟฟ้าขนาด 2.5 MW มีขนาดใหญ่ การผลิตไฟฟ้าเริ่มจากการที่อุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วและทิศทางลมบนกังหันส่งสัญญาณให้กังหันลม เมื่อลมมีความเร็วที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้ากังหันลมจะทำการหมุนไปยังทิศลมและปรับใบพัดเพื่อรับลมในการผลิตไฟฟ้า หลายครั้งกังหันลมไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันกับมวลลมชุดนั้นหรือเสียเวลาหลายนาทีไปกับการหมุนหน้ากังหันไปยังทิศลมเนื่องจากความใหญ่ของกังหันลม งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมโดยการส่งสัญญาณระหว่างกังหันลมกับกังหันลม (Machine-to-Machine, M2M) ผ่านระบบ SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) ของฟาร์มกังหันลม กังหันลมจำนวน 32 ต้น ก่อสร้างกระจายตามภูมิประเทศที่สามารถจัดหาได้และสะดวกต่อการคมนาคมขนส่ง ระยะห่างระหว่างต้นคำนวณจากระยะต่ำสุดถึงมากสุดขนานกับลมมรสุมเท่ากับ 0.150-6.782 กิโลเมตร ใช้กังหันลมกลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอนในช่วง 202.64-207.87 องศา มีช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5.23 องศา มีความแกว่งของลมน้อยเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น จำนวน 6 ต้น เมื่อกังหันลมมีการใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่อง สามารถทำให้ระบบการทำงานของกังหันลมลดระยะเวลาตรวจวัดลมก่อนเริ่มการผลิตไฟฟ้าได้ 15 นาที ความเร็วลมเฉลี่ย 7.31 m/s ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า เท่ากับ 1,429.00 kW สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าได้ 357.25 kWh

คำสำคัญ: กังหันลม ฟาร์มกังหันลม การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่อง SCADA

1. บทนำ

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015) ค่าเป้าหมายพลังงานลมอยู่ที่ 3,002 MW [2] ซึ่งในปี 2561 (ข้อมูลถึงเดือนมีนาคม) ประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทั้งสิ้น เท่ากับ 695.32 MW [3] จากสัดส่วนและเป้าหมายที่รัฐบาลตั้งเป้าไว้ในปี 2579 จะเห็นได้ว่าในด้านพลังงานลมนี้ยังสามารถลงทุนได้

โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind power plant) ใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องผ่านระบบ SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ที่มีการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่เฝ้าดูและควบคุมกระบวนการ [4] M2M หรือ Machine to Machine [5] เทคโนโลยีที่ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถส่งข้อมูลระหว่างกันเองได้ กลไกการทำงานของ M2M นั้นเริ่มจากเครื่องที่มีตัววัด Sensor ตรวจวัดและส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยข้อมูลจะถูกส่งไปยัง

โปรแกรมที่ถูกออกแบบเพื่อรองรับการทำงานของกังหันลมซึ่งทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิบให้เป็นข้อมูลที่มีความหมาย สามารถประมวลผลและออกคำสั่งให้กับระบบปฏิบัติการของกังหันลม สามาถทำงานตัดสินใจด้วยตัวระบบเองได้ การทำงานด้วยกลไกนี้ช่วยลดความยุ่งยาก และต้นทุนในกระบวนการเก็บข้อมูลที่ต้องทำอย่างสม่ำเสมอ และยังทำให้สามารถสร้างระบบที่ตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่างๆได้อย่างทันท่วงที จากงานวิจัยของ A. Mohamed and K. Young-Chon. (2013) [6] นำเสนอระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องกังหันลมในฟาร์มกังหันลม (Smart Wind Power Farms; S-WPFs) โดยทำการทดสอบระบบการสื่อสารของกังหันลม 3 ระบบการสื่อสาร (M2M) ได้แก่ การสื่อสารของระบบต่างๆ ภายในกังหันลม, การสื่อสารในกลุ่มกังหันลมทั่วทั้งฟาร์มกังหันลม และการสื่อสารระหว่างศูนย์ควบคุมรวมถึงการสื่อสารข้อมูลกับอุตุนิยมวิทยา พบว่าขณะปฏิบติงานจริง ระบบสามารถตัดสินใจดำเนินการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าและยืดอายุการใช้งานของกังหันลมได้

สำหรับประเทศไทยปัญหาของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมที่พบคือในการเดินระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมต้องมีลมต่อเนื่องที่ความเร็วลม 3 m/s ขึ้นไป เพื่อให้กังหันลมเข้าสู่ระบบผลิตไฟฟ้า แต่ลมในประเทศไทยโดยเฉลี่ยมีความเร็วลมต่ำกว่า 4 m/s [1] และลมไม่สม่ำเสมอ กังหันลมขนาด 2.5 MW เป็นกังหันลมขนาดใหญ่ เมื่อลมมีความเร็วที่เหมาะสมต่อการผลิตไฟฟ้า กังหันลมจะทำการหมุนไปยังทิศลมและปรับใบพัดเพื่อรับลมในการผลิตไฟฟ้า หลายครั้งกังหันลมไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันกับมวลลมชุดนั้นหรือเสียเวลาหลายนาทีไปกับการหมุนหน้ากังหันไปยังทิศลมเนื่องจากความใหญ่ของกังหันลม จำลอง มะละเขต และคณะ (2561) [7] นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า เพื่อให้สถานีพยากรณ์อากาศที่อยู่ข้างหน้าต้นกังหันลมส่งสัญญาณมายังระบบควบคุมกังหันลมใช้การคำนวณระยะเวลาและทิศทางที่ลมจะมาถึงต้นกังหันลมโดยไม่ต้องตรวจวัดความเร็วลมและทิศทางลมในแบบเดิมสามารถ สามารถเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า WTG23 ได้ 57.96 MWh ส่งผลให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ประหยัดเวลาในการเตรียมระบบของกังหันลมก่อนการผลิตไฟฟ้า ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ทันทีเมื่อลมมาถึง

พรวี เกิดเกตุ และคณะ (2561) [8] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากอุปกรณ์วัดลมบนกังหันลมเทียบกับกำลังการผลิตเพื่อกำหนดทิศรอลม โดยนำข้อมูลทิศลมจากอุปกรณ์วัดลมมาหาค่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และตัดข้อมูลที่ไม่เหมาะสม (Rejection of data) ด้วยวิธี Method of Huge error พบว่าตำแหน่งที่เหมาะสมในการหยุดรอลมของกังหันลม คือ 181° สามารถลดเวลาการหมุนหาทิศลมของกังหันได้ 4.64 นาที คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น 63.48 kW

นอกจากนี้ อรรฆพร คงจิต และคณะ. (2561) [9] ทำการศึกษาโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย กำลังการผลิต 80 MW จำนวน 32 ต้น มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 432.5 msl (553.2 msl เมื่อรวมความสูงกังหันลม) ติดตั้งตามลักษณะภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ราบสลับเนินเขา จากการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลาที่กังหันลมมีกำลังการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ สถานะออนไลน์ ต่อเข้าระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำให้สามารถนำข้อมูลของทิศทางและความเร็วลมมาแบ่งกลุ่มกังหันลมได้เป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่ทิศทางลมมีความไม่แน่นอนและกลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอน ผลของกลุ่มกังหันลมที่มีทิศทางลมไม่แน่นอนเนื่องจากกังหันลมกลุ่มนี้ติดตั้งใกล้บริเวณเทือกเขา ตามแนวยาวของสันเขา ส่งผลให้ลมที่พัดผ่านกังหันลมเหล่านี้มีความแปรปรวน ทิศทางไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับกังหันลมที่ติดตั้งในบริเวณที่โล่งที่ไม่มีลมอื่นมารบกวนทิศทางของลมมรสุม

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของฟาร์มกังหันลมโดยการส่งสัญญาณระหว่างกังหันลมกับกังหันลมผ่านระบบ SCADA ของฟาร์มกังหันลม กังหันลมจำนวน 32 ต้น ก่อสร้างกระจายตามภูมิประเทศที่สามารถจัดหาได้และสะดวกต่อการคมนาคมขนส่ง ระยะห่างระหว่างต้นคำนวณจากระยะต่ำสุดถึงมากสุดขนานกับลมมรสุมเท่ากับ 0.050-4.785 กิโลเมตร เมื่อกังหันลมต้นใดได้รับลมก็จะส่งสัญญาณเข้าระบบ SCADA จึงสามารถส่งสัญญาณระหว่างกังหันลมในกลุ่มเดียวกัน ทำให้กังหันลมต้นถัดไปมีความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้ามากขึ้น สามารถผลิตไฟฟ้าด้วยการลดระยะเวลาตรวจวัดลมและการหมุนหาทิศลมของกังหันลม ทำให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทำงานของกังหันลม

ก่อนการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม อุปกรณ์วัดลมที่ติดตั้งบน Nacelle ของกังหันลมจะทำการตรวจวัดทิศทาง ความเร็วและความต่อเนื่องของลม ก่อนส่งสัญญาญให้กับระบบปฏิบัติการของกังหันลมเริ่มการเตรียมความพร้อมของระบบ (Standby) กังหันลมปรับใบพัดเป็นมุม 75 องศา เตรียมพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า เพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตไฟฟ้า (Start) โดยกังหันลมปรับทิศทางของ Nacelle ไปตาม

ทิศทางของลมที่มีความเร็วลมมากกว่า 3 m/s ขึ้นไป ใช้เวลาประมาณ 0.5-10 นาที เมื่อตรวจพบลมที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เป็นเวลา 3 นาทีอย่างต่อเนื่อง กังหันลมผลิตไฟฟ้าจะทำการจ่ายไฟเข้าสู่ระบบ (Online) เมื่อความเร็วลมน้อยกว่า 3 m/s กังหันลมจะเริ่มหยุดผลิตไฟฟ้า (Stopping) และหยุดการผลิตไฟฟ้า (Stop) เนื่องจากอุปกรณ์วัดลมตรวจวัดลมได้น้อยกว่า 3 m/s อย่างต่อเนื่อง และปรับใบพัดเป็นมุม 90 องศา

2.2 การเคลื่อนที่ของลม

ลม หมายถึง อากาศที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางในแนวราบขนานไปกับผิวโลก [10] เวลาในการเคลื่อนที่ของมวลลมจากกังหันลมต้นหนึ่งไปสู่กังหันลมอีกต้นหนึ่งที่ความเร็วใดๆ หาได้จากสมการที่ 1

$$t = S / V \qquad (1)$$

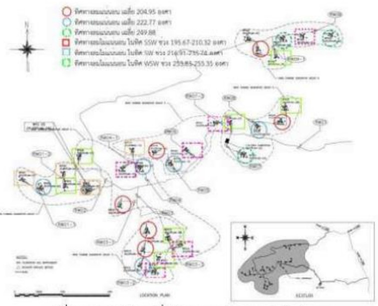
เมื่อ t คือ เวลาที่เคลื่อนที่จริง (s)
S คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่จริง (m)
V คือ อัตราเร็วของการเคลื่อนที่ (m/s)

ผลของระยะเวลาการเคลื่อนที่ของลมที่ได้ สามารถใช้ตรวจสอบความต่อเนื่องของมวลลมได้

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การแบ่งกลุ่มโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80 MW ตามสภาวะภูมิประเทศ

จากงานวิจัยของอรรฆพร และคณะ [9] ทำการศึกษาโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้า จังหวัดชัยภูมิ กำลังการผลิต 80 MW จำนวน 32 แบ่งกลุ่มกังหันลมตามลักษณะของลมที่พัดผ่านกังหันลม ด้วยการตรวจวัดข้อมูลลมจากอุปกรณ์วัดลมที่ติดตั้งบนกังหันลม สามารถแบ่งกังหันลมออกเป็น 2 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 1 คือ



รูปที่ 1 กลุ่มกังหันลมที่มีทิศทางแน่นอนและไม่แน่นอน

เมื่อ ○ (สีแดง) แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 202.64-207.87 องศา
○ (สีฟ้า) แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 217.99-227.99 องศา
○ (สีเขียว เส้นประ) แทน ทิศทางลมแน่นอน อยู่ในช่วง 245.55-256.53 องศา
□ (สีแดง) แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 195.67-210.32 องศา
□ (สีฟ้า เส้นประ) แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 216.91-235.74 องศา
□ (สีเขียว เส้นประ) แทน ทิศทางลมไม่แน่นอน อยู่ในช่วง 253.83-255.35 องศา

1) ทิศทางลมมีความไม่แน่นอน มีจำนวน 17 ต้น
2) ทิศทางลมมีความแน่นอน มีจำนวน 15 ต้น

กังหันลมกลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอน สามารถแบ่งออกเป็นกังหันลมกลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอน อยู่ในช่วง

2.1) 202.64-207.87 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 5.23 องศา จำนวน 6 ต้น

2.2) 217.99-227.99 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.00 องศา จำนวน 5

2.3) 245.55-256.53 องศา ช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงเท่ากับ 10.98 องศา จำนวน 4 ต้น

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างข้อมูลในวันที่ 1 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 ขณะที่มีการผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าจากกังหันลมกลุ่มที่ทิศทางลมมีความแน่นอนจำนวน 15 ต้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย มีช่วงของทิศที่เปลี่ยนแปลงลม 5.23, 10.00 และ 10.98 องศา ตามลำดับ งานวิจัยนี้ใช้ค่าเปลี่ยนแปลงลมอยู่ในช่วง 202.64-207.87 องศา เนื่องจากช่วงของมุมที่เปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยที่สุด มีกังหันลมจำนวน 6 ต้น ได้แก่ WTG07, WTG13, WTG16, WTG19, WTG25 และ WTG27 มีระยะห่างระหว่างกังหันลมแต่ละต้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ระยะห่างนี้วัดในแนวระนาบตามทิศของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทั้งนี้ทิศทางลมทั้งหมดที่พัดสู่กังหันลมทั้งหมดเป็นทิศทางลมที่พัดมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ เป็นลมมวลเดียวกันในช่วงเวลาเดียวกันและมีความต่อเนื่องตลอดช่วงการผลิตไฟฟ้า

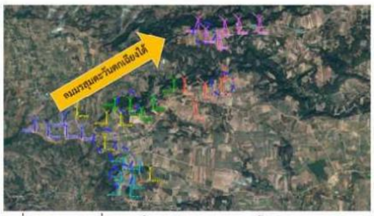
ตารางที่ 1 ระยะห่างระหว่างกังหันลม

ระยะห่างระหว่างกังหันลม (m)					
WTG 7	-380	-50	1,275	3,645	4,405
	WTG 13	330	1,655	4,025	4,785
		WTG 16	1,325	3,695	4,455
			WTG 19	2,370	3,130
				WTG 25	760
					WTG 27

การสื่อสารระหว่างเครื่องจะได้ประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อใช้การสื่อสารจากระยะทางที่ใกล้กว่า จากรูปที่ 2 ลำดับ

ระยะทางกังหันลมกลุ่มตัวอย่างต้นแรกที่รับลมจนถึงกังหันลมต้นสุดท้ายของกลุ่มได้แก่ WTG13, WTG16, WTG07, WTG19, WTG25 และ WTG27 ตามลำดับ

WTG13 มีระยะห่างจาก WTG16 เท่ากับ 330 m
WTG16 มีระยะห่างจาก WTG07 เท่ากับ 50 m
WTG07 มีระยะห่างจาก WTG19 เท่ากับ 1,275 m
WTG19 มีระยะห่างจาก WTG25 เท่ากับ 2,370 m
WTG25 มีระยะห่างจาก WTG27 เท่ากับ 760 m



รูปที่ 2 ทิศทางลมที่พัดผ่านโครงการกังหันลมผลิตไฟฟ้าขณะทำการวิจัย

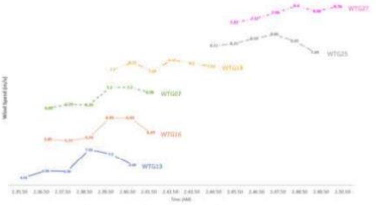
4. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ใช้ค่าความเร็วลมเริ่มต้นที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าและจ่ายไฟเข้าสู่ระบบได้ โดยตารางที่ 2 แสดงความเร็วลมของกังหันลมในช่วงเวลาที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่เวลาต่างๆ และระยะห่างระหว่างกังหันลมแต่ละต้นในกลุ่มที่ทำการวิจัย เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความเร็วลม จะสามารถหาระยะเวลาที่ลมใช้ขณะเดินทางจากกังหันลมต้นหนึ่ง สู่กังหันลมอีกต้นหนึ่งได้

ตารางที่ 2 ความเร็วลมของกังหันลมที่เวลาต่างๆ

WTG	13	16	07	19	25	27
เวลา		0.91	0.14	3.00	5.13	1.39
(นาที)	ความเร็วลม (m/s)					
2.35.50	6.03					
2.36.50	6.38	5.85	6.09			
2.37.50	6.36	5.77	6.29			
2.38.50	7.53	5.93	6.26			
2.39.50	7.30	6.95	7.20	7.70		
2.40.50	6.69	6.95	7.20	8.15		
2.41.50		6.19	6.96	7.59		
2.42.50				8.32		
2.43.50				8.10		
2.44.50				7.91	8.11	
2.45.50					8.25	7.32
2.46.50					8.59	7.57
2.47.50					8.86	7.96
2.48.50					8.42	8.40
2.49.50					7.68	8.06
2.50.50						8.36

เมื่อนำความเร็วลมแรกที่กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้กับระยะห่างระหว่างกันหันลมแต่ละต้น มาหาระยะเวลาที่ลมใช้เดินทางตามสมการที่ 1 พบว่า จากกังหันลม WTG13 ที่เวลา 02:35:50 น. ความเร็วลม 6.03 m/s ระยะห่างจาก WTG16 เป็น 330 m ลมจะใช้เวลาเดินทาง 0.91 นาที หรือประมาณ 1 นาที ดังนั้น 1 นาทีถัดมาจะเป็นเวลา 02:36:50 น. ซึ่งมีความเร็วลม 5.85 m/s และเนื่องจากลมที่พัดมาเป็นลมมวลเดียวกัน ดังนั้นความเร็วลม 5.85 m/s ของ WTG16 จะเป็นความเร็วลมที่ใช้ในการหาระยะเวลาเดินทางของลมสู่ WTG07 และใช้วิธีเดียวกันนี้ในการหาระยะเวลาที่ลมใช้เดินทางจาก WTG07 สู่ WTG19, WTG19 สู่ WTG25 และ WTG25 สู่ WTG27



รูปที่ 3 ความเร็วลมกับเวลาที่ลมมวลเดียวกันเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมแต่ละต้น

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับเวลาที่ลมมวลเดียวกันเคลื่อนที่ผ่านกังหันลมแต่ละต้น จากกังหันลม WTG13 ซึ่งเป็นกังหันลมต้นแรกของกลุ่มที่ได้รับลมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฟฟ้า คือ 6.03 m/s สู่ WTG16 ใช้เวลา 0.91 นาที, กังหันลม WTG16 สู่ WTG07, WTG07 สู่ WTG19, WTG19 สู่ WTG25 และ WTG25 สู่ WTG27 ใช้เวลา 0.91, 0.14, 3.00, 5.14 และ 1.39 นาที ตามลำดับ จะได้ลักษณะของเส้นกราฟความสัมพันธ์เป็นลักษณะเดียวกัน แสดงว่าเป็นลมมวลเดียวกัน

5. วิจารณ์ผลการวิจัย

การใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องในงานวิจัยนี้ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม สามารถลดระยะเวลาในขั้นตอนการตรวจวัดลมก่อนเริ่มการผลิตไฟฟ้าได้ต้นละ 3 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่กังหันลมตรวจวัดลมก่อนการผลิตไฟฟ้า ต่อ 1

รอบการผลิต ในสภาวะการทำงานจริงของกังหันลม มีรอบการผลิตไฟฟ้าหลายรอบต่อเดือน ดังนั้นการใช้การสื่อสารระหว่างเครื่องกับเครื่องจึงสามารถลดระยะเวลาการตรวจวัดลมของอุปกรณ์บนกังหันลม ระยะเวลาตรวจวัดที่ลดไปนี้จะทำให้กังหันลมเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้ทันที ไม่ต้องรอตรวจวัด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกลุ่มกังหันลม ในครั้งนี้ใช้กังหันลม 6 ต้น กังหันลมต้นแรกทำการส่งสัญญาณให้กับกังหันลมต้นต่อๆ ไป ความเร็วลมเฉลี่ย 7.31 m/s ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 1,429.00 kW ใน 1 รอบการผลิตจะได้พลังงานเพิ่มขึ้น 357.25 kWh ถ้าที่ความเร็วคงเดิมใน 1 รอบการผลิตของกังหันลมตลอดโครงการทั้ง 32 ต้น จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ 2,214.95 kWh วิธีการที่นำเสนอนี้ จึงเหมาะสมสำหรับลมในประเทศไทยที่มีความเร็วลมต่ำและมีความไม่สม่ำเสมอของลม

6. สรุปผลการวิจัย

พลังงานลมเป็นพลังงานสะอาดจากธรรมชาติ พัดผ่านกังหันลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้า กังหันลมที่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้ามากจะมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การเคลื่อนไหวไม่สามารถดำเนินการได้ทันที มีความจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า ในปกติทิศของลมจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด ดังนั้นก่อนการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมในแต่ละครั้งต้องมีการเตรียมความพร้อมของระบบก่อนเสมอ งานวิจัยนี้แสดงถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมจำนวน 32 ต้น ในโครงการ โดยใช้วิธีการที่กังหันลมต้นหน้าส่งข้อมูลลมให้กังหันลมต้นต่อไป (M2M) เพื่อให้ระบบปฏิบัติการของกังหันลมเตรียมความพร้อมสำหรับการผลิตไฟฟ้า ผ่านระบบ SCADA

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์กับงานที่ควบคุมอุปกรณ์ขนาดใหญ่ ที่ต้องใช้เวลาเตรียมความพร้อมในการทำงาน โดยใช้การควบคุมจากสัญญาณที่ส่งจากอุปกรณ์ข้างเคียง เพื่อลดเวลาในการเตรียมความพร้อมของระบบสามารถดำเนินการขับเคลื่อนอุปกรณ์ได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์บริการวิชาการที่ 7 จังหวัดเชียงใหม่ และบริษัท อิตัลไทย วิศวกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และข้อมูลในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย-TRECA, “พลังงานลม,” ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.reca.or.th/library-wind-power.aspx. (สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2561).

[2] กระทรวงพลังงาน, “แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan : AEDP2015),” 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=43412. (สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2561).

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, “สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน (Percentage of Alternative Energy Consumption),” 2561. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.dede.go.th/download/state_61/Energy%20Consumption_Mar_2561.pdf (สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2561).

[4] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, “ระบบสกาดา,” 2561. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบสกาดา. (สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2561).

[5] บริษัท ดี.ที.ซี. เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด, “M2M machine to machine เทคโนโลยีใหม่ที่จะมาเปลี่ยนอนาคตอันใกล้นี้,” 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.dtc.co.th/ความรู้โลจิสติกส์/m2m-เทคโนโลยีใหม่ที่จะมาเปลี่ยนอนาคตอันใกล้นี้ (สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2561).

[6] A. Mohamed and K. Young-Chon., “Machine-to-Machine Communication Infrastructure for Smart Wind Power Farms,” in *IEEE Int. Workshop Intelligent Energy Systems (IWIES)*, pp. 137-142, 2013 Vienna, Austria.

[7] จำลอง มะละเขต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ, และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล, “การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมด้วยการประมวลสัญญาณจากสถานีพยากรณ์อากาศรอบกังหันลมเพื่อควบคุมการผลิตไฟฟ้า,” ใน *การประชุมวิชาการและการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ*, 2561, หน้า 694-701.

[8] P. Koetket, S. Khunkhet, W. Chiracharit, J. Waewsak, T. Chaichana, and Y. Auttawaitkul., “Increasing Efficiency in Wind Energy Electricity Generating by Signal Processing from Wind Measuring Equipment on Wind Turbine for the

Determination of Wind Direction," in *International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, 2018, Chiang Mai, Thailand, pp. 1-4.

[9] อรรฆพร คงจิต, วีรพล จิรจริต, จอมภพ แววศักดิ์, ธเนศ ไชยชนะ, เสริมสุข บัวเจริญ และ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุล, "สภาวะภูมิประเทศส่งผลต่อทิศลมมรสุมที่ผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานลมขนาดกำลังการผลิต 80 MW," ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14*, 2561, หน้า 1,101-1,105.

[10] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, "การเกิดลม," ม.ป.ป. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://tairgle.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=17:wind&catid=8&Itemid=159&lang=en (สืบค้นเมื่อ 13 กรกฎาคม 2561).

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายอรรฆพร คงจิต

เกิดเมื่อ 21 เมษายน 2523

ประวัติการศึกษา 2549 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ประวัติการทำงาน พ.ศ 2560 – ปัจจุบัน

- ผู้จัดการโครงการก่อสร้าง บริษัทอิตัลไทยวิศวกรรม
- โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- โครงการก่อสร้างสถานีไฟฟ้า115 kV Good year Substation

พ.ศ 2554 – 2559

ผู้จัดการสนามโครงการก่อสร้าง บริษัทอิตัลไทยวิศวกรรม

- โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลำปรายมาศ 5 MW
- โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานลมชัยภูมิวินด์ฟาร์ม 80 MW
- โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานลมเทพนา 10 MW

พ.ศ 2551 – 2554

วิศวกรไฟฟ้า

- โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมพระนครเหนือ 1 700 MW
- โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลพบุรี 55 MW

พ.ศ 2546 – 2550

ผู้ช่วยวิศวกร