การพัฒนาพลังงานทดแทนจากกังหันลมความเร็วลมต่ำสำหรับอาคารและชุมชน
กรณีศึกษาวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา

นายธีระศักดิ์ ชำนาญดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY FROM LOW WIND SPEED TURBINES FOR BUILDING AND COMMUNITY CASE STUDY: HONGTONG TEMPLE CHACHOENGSAO PROVINCE

Mr. Therasak Chamnandee

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Architecture
Department of Architecture
Faculty of Architecture
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาพลังงานทดแทนจากกังหันลมความเร็วลมต่ำสำหรับอาคารและชุมชน กรณีศึกษาวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา
โดย	นายธีระศักดิ์ ชำนาญดี
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต นิตยะ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทิดศักดิ์ เตชะกิจขจร)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุธีวัน โล่ห์สุวรรณ)

ธีระศักดิ์ ชำนาญดี : การพัฒนาพลังงานทดแทนจากกังหันลมความเร็วลมต่ำสำหรับอาคารและชุมชน กรณีศึกษาวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา (THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY FROM LOW WIND SPEED TURBINES FOR BUILDING AND COMMUNITY CASE STUDY: HONGTONG TEMPLE CHACHOENGSAO PROVINCE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์, 91 หน้า.

กังหันลมที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศที่มีความเร็วลมสูง การนำมาใช้ในประเทศไทยที่มีความเร็วลมต่ำจึงไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงเกิดการวิจัยโครงการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเองภายในประเทศ การออกแบบกังหันลมจำเป็นต้องเข้าใจตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของลมในประเทศไทย ตัวแปรของการออกแบบใบพัด ตัวแปรของการออกแบบระบบกำเนิดไฟฟ้ารวมถึงระบบการควบคุมและการเชื่อมต่อไฟฟ้ากับระบบสายส่ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะลมที่เกิดขึ้นในประเทศไทย เพื่อออกแบบกังหันลมที่เหมาะสมกับกระแสลมในประเทศ และเพื่อสร้างกังหันลมทดสอบผลิตไฟฟ้าและต่อเชื่อมกับระบบสายส่ง โดยมีขอบเขตของการวิจัยคือการสร้างกังหันลมที่มีขนาดผลิตไฟฟ้า 18 กิโลวัตต์

ระเบียบวิธีของการวิจัยนี้คือศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะลมในประเทศไทยหาศักยภาพของการนำพลังงานลมที่มีอยู่ในธรรมชาติมาผลิตไฟฟ้า เลือกช่วงของความเร็วลมที่มีเหมาะสมกับการออกแบบกังหันลม นำมากำหนดความเร็วลมที่เริ่มผลิตไฟฟ้า (cut in speed) กำหนดความเร็วสูงสุดที่กังหันผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด นำข้อกำหนดดังกล่าวมาใช้ออกแบบส่วนประกอบของกังหันลม ประกอบด้วยชุดใบพัด ชุดอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ชุดควบคุม และชุดการเชื่อมต่อกับสายส่ง และสร้างกังหันลมทดสอบผลิตพลังงาน ณ.พื้นที่ทดสอบบริเวณวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา เก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมในสถานการณ์จริง

ผลการดำเนินงานวิจัยพบว่า ความเร็วลมในประเทศไทยส่วนใหญ่ที่มีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าอยู่ในช่วงประมาณ 3.00 – 6.50 เมตรต่อวินาที ความเร็วลมในช่วงนี้จะมีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 18 กิโลวัตต์ ผลการออกแบบกังหันลม คือ ลักษณะของชุดใบพัดมีขนาดใหญ่ โดยมีความยาวของใบ 9.81 เมตร เพื่อเพิ่มพื้นที่รับลมทำให้สามารถผลิตพลังงานได้มาก ลักษณะของชุดกำเนิดไฟฟ้าเป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (induction) จำนวน 2 ตัว ตัวแรกขนาด 5 กิโลวัตต์เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าในช่วงแรกที่มีความเร็วลมต่ำและเมื่อมีความเร็วลมมากพอก็จะตัดเข้าสู่การทำงานของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขนาด 15.5 กิโลวัตต์ ทำงานเชื่อมต่อกัน และเมื่อมีความเร็วลมสูงสุดที่ผลิตไฟฟ้าได้ 18 กิโลวัตต์ กังหันลมจะตัดระบบและหมุนหลบลม ผลการสร้างกังหันลมทดสอบพบว่ากังหันลมทดสอบขนาด 3 ใบพัดของงานวิจัยนี้ เป็นกังหันลมที่ผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ (CP) เท่ากับ 0.363

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

5473383125 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS:

THERASAK CHAMNANDEE: THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY FROM LOW WIND SPEED TURBINES FOR BUILDING AND COMMUNITY CASE STUDY: HONGTONG TEMPLE CHACHOENGSAO PROVINCE. ADVISOR: ASSOC. PROF. VORASUN BURANAKARN, 91 pp.

Wind turbines have been developed mainly in countries with high wind speeds but implemented in a low wind speed is inappropriate. Therefore, the low wind speed turbine design and research are needed to be explored and manufactured locally. Designing low wind speed turbine is necessary to understand the nature of the variables involved. Variants of the propeller Variable power generation systems, including systems design, control and electrical connection to the electricity grid.

Research Objectives was to study and analyze the prototype low wind speed turbine appropriate for Thailand wind profile. It needs to be built locally, easy to maintenance, reasonable cost, and can be connected to the electrical grid. It's power is 18 kW.

Methodology of this research is to study and analyze the air in the potential of wind energy that exists in nature to produce electricity. Select the range of wind speed is suitable for wind turbine design. Used to determine wind speed at the start generating electricity (cut in speed) determines the maximum speed of turbine power. Implement the requirements of such a design of wind turbine components. Rotor consists of a series of Power control units and the connection system to the electrical grid. It located on Wat Hong Thong, Chachoengsao province near Thailand gulf.

Results shown that low wind speed turbine has the most potential to produce electricity of 18 kW. in the range of natural wind speed 3.00 to 6.50 meters per second. A large rotor blades with length of 9.81 meters to increase spinning power. The low wind turbine has power generation efficiency (CP) as 0.363.

Chulalongkorn University

Department: Architecture Student's Signature .....

Field of Study: Architecture Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากคณาจารย์ และบุคคลหลาย ๆ ท่าน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวขอบคุณ คือ รองศาสตราจารย์ ดร. วรสัณฑ์ บูรณากาญจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาอันมีค่า ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันมีประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัยฉบับนี้

นอกจากนี้ยังได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร. สุนทร บุญญาธิการ ในการให้คำแนะนำและปูความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับทำวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต นิตยะ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทิดศักดิ์ เตชะกิจขจรและดร.สุธีวัน โล่ห์สุวรรณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ความอนุเคราะห์ ความร่วมมือและการอำนวยความสะดวกด้านสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยที่บริเวณวัดหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางประกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย การอนุเคราะห์ด้านสถานที่จากวัดหงส์ทอง การอำนวยความสะดวกจากองค์การบริหารส่วนตำบลสองคลอง และความร่วมมือจากชุมชนบ้านหงส์ทอง

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ทุนอุดหนุน การวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่รุ่นน้อง วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบุคคลอื่นๆที่ช่วยสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญภาพ ..... ฎ

สารบัญตาราง ..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ลมและพลังงานลม 4

2.2 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม 8

2.3 ชนิดของกังหันลม 9

2.3.1 กังหันลมแนวแกนนอน (horizontal axis wind turbine) 10

2.3.2 กังหันลมแนวแกนตั้ง (vertical axis wind turbine) 11

2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า 12

2.4.1 ใบพัด 12

2.4.2 เพลาแกนหมุน 13

2.4.5 ชุดเกียร์ 13

Chulalongkorn University

หน้า

2.4.6 ชุดห้องเครื่อง 13
2.4.7 ระบบกำเนิดไฟฟ้า 13
2.4.8 ระบบควบคุม 14
2.4.9 ระบบเบรก 16
2.4.10 แกนคอหมุนปรับทิศกังหันลม 16
2.4.11 เครื่องวัดความเร็วลม (Wind speed) และทิศทางลม (Wind Direction) 16
2.4.12 เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน 17
2.4.13 ระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง 17
2.4.14 ห้องควบคุม 19
2.5 เกณฑ์การพิจารณาในการติดตั้งกังหันลม 19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 21
3.1 การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของกระแสลม 21
3.2 การเลือกพื้นที่ติตั้งกังหันลม ต้นแบบ 22
3.3 การออกแบบส่วนประกอบต่างๆของกังหัน 23
3.5 การสรร้างกังหันลมต้นแบบ 24
บทที่ 4 การออกแบบและผลการวิจัย 25
4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของลม 25
4.2 ผลการออกแบบกังหันลม 27
4.2.1 ผลการออกแบบชุดใบพัด 27
4.2.2 การหาประสิทธิภาพของกังหัน 28
4.2.3 การออกแบบขนาดความยาวของใบพัด 28
4.2.4 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม 29

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.2.5 การคำนวณหามุมใบพัดของกังหันลม 30
4.3 การเลือกใช้วัสดุของใบพัด 32
4.4 รูปแบบการออกแบบใบพัดกังหันลม 33
4.4 การทำงานของใบพัดกับการเชื่อมต่อระบบอื่นของกังหันลม 41
4.5 ผลการออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้า 41
4.6 ผลการออกแบบชุดระบบการควบคุม 45
4.7 ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม 45
4.8 ระบบควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สายส่ง 48
4.9 ผลการออกแบบแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม 49
4.10 ผลการออกแบบชุดโครงสร้างเสาและฐานราก 50
4.10.1 ผลการออกแบบชุดเสา 50
4.10.2 ผลการออกแบบฐานราก 54
4.11 ผลการออกแบบระบบความปลอดภัย 56
4.12 ประสิทธิภาพและการทำงานของกังหันลมจากผลการออกแบบ 57
4.13 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนของกังหันลม 61
4.14 ผลการสร้างกังหันลมทดสอบ 69
4.15 ผลการดำเนินการก่อสร้างเสาและฐานราก 69
4.16 ผลการดำเนินการสร้างใบพัดกังหันลม และการติดตั้งใบพัด 71
4.17 ผลการติดตั้งห้องเครื่อง 73
4.18 ผลระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเชื่อมต่อไฟฟ้ากับสายส่ง 74
4.19 ผลการติดตั้งเสาวัดความเร็วลม 75
4.20 ผลการเก็บข้อมูลกังหันลมทดสอบ 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.21 ข้อมูลสภาพแวดล้อมเบื้องต้นบริเวณวัดหงส์ทอง 76

4.22 ผลข้อมูลความเร็วลมของกังหันลมทดสอบ 80

4.23 ผลการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมทดสอบ 81

4.24 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบอื่นในชุมชน 83

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 84

ข้อเสนอแนะ 87

รายการอ้างอิง 89

ภาคผนวก 90

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ (Siegfried, 1998)..... 5

ภาพที่ 2.2 แผนที่แสดงพลังงานลมเฉลี่ย ในประเทศไทย (หน่วย: วัตต์/ตารางเมตร) 6

ภาพที่2.3 การเปลี่ยนพลังงานจลน์จากความเร็วลมเป็นพลังงานไฟฟ้า 8

ภาพที่2.4 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแบบแกนตั้ง 9

ภาพที่2.5 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน 10

ภาพที่2.6 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวตั้ง 11

ภาพที่2.7 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า 12

ภาพที่2.8 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 14

ภาพที่2.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำกับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง 15

ภาพที่2.10 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำกับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า..... 15

ภาพที่2.11 ไดอะแกรมเส้นเดียว (single line diagram) ของระบบการเชื่อมต่อ..... 17

ภาพที่2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อม..... 18

ภาพที่3.1 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ในการวิจัย 22

ภาพที่3.2 แสดงภาพพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า..... 23

ภาพที่3.3 ที่ตั้งกังหันลม 3 ใบพัดที่วัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา และทิศทางลม 24

ภาพที่4.1 ความเร็วลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ที่ความสูง 10 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง 26

ภาพที่4.2 กำลังลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ที่ความสูง 10 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลางพลังงานที่ได้รับจากการคำนวณ..... 26

ภาพที่4.3 มุมต่างๆในการออกแบบ..... 30

ภาพที่4.4 แบบใบพัดกังหันลมแบบ 3 ใบพัด 33

ภาพที่4.5 แบบใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด ผิวทำด้วยเหล็กแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร เคลือบสีกันสนิม 34
ภาพที่4.6 แบบใบพัดความยาว 9.81 เมตร ผิวเหล็กแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร 35
ภาพที่4.7 แบบหน้าแปลนติดใบกังหัน ทั้งแบบ 3 ใบพัด 36
ภาพที่4.8 แบบใบพัดที่ประกอบเข้ากับจุดปรับหมุนใบพัด แบบ 3 ใบพัด 37
ภาพที่4.9 การติดตั้งใบพัดมองจากด้านหน้าแบบ 3 ใบพัด 38
ภาพที่4.10 แบบครอบสวมด้านหน้า HUB ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 39
ภาพที่4.11 ภาพตัดขวาง แกนใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด 39
ภาพที่4.12 ภาพตัดตามยาว แกนใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด 40
ภาพที่4.13 ภาพ Blade mount ของกังหันลม 3 ใบพัด 40
ภาพที่4.14 MOTOR 15.5 KW/20HP, 6 POLES ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 43
ภาพที่4.15 MOTOR 5.5 KW/7.5HP, 6 POLES ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 43
ภาพที่4.16 Brevini Planetary Gearbox MOTOR 20 KW ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 44
ภาพที่4.17 รูปแบบการติดตั้งแกนเพลาและระบบเกียร์ควบคุมใบพัด ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 45
ภาพที่4.18 โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม 47
ภาพที่4.19 หลักการทำงานของระบบควบคุมการปรับทิศทางการรับลม 48
ภาพที่4.20 ชุดขับเคลื่อนแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม (yaw drive) ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 49
ภาพที่4.21 การติดตั้งระบบแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม (yaw drive) ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด 50
ภาพที่4.22 การคำนวณโครงสร้างชุดเสากังหันลม 51
ภาพที่4.23 แบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 18.00 เมตร ของกังหันลม 3 ใบพัด เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานเสาเท่ากับ 1.00 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวเสาเท่ากับ 0.60 เมตร 53

ภาพที่4.24 ผังและรูปตัดฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด..... 55

ภาพที่4.25 การออกแบบการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมบริเวณวัดหงส์ทอง 58

ภาพที่4.26 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่เริ่มผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ความเร็วลม 3.00 เมตรต่อวินาที ที่บริเวณวัดหงส์ทอง..... 59

ภาพที่4.27 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง (actual power) ที่บริเวณวัดหงส์ทอง ของกังหันลมความเร็วลมต่ำ ที่มีประสิทธิภาพ Cp = 0.36 60

ภาพที่4.28 การผูกเหล็กเพื่อหล่อฐานรากขนาด 10 x 10 ตารางเมตร 69

ภาพที่4.29 การก่อสร้างเสากังหันลมคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 18 เมตร 70

ภาพที่4.30 ใบพัดจริงที่ใช้ในงานวิจัย ความยาว 9.81 เมตร..... 71

ภาพที่4.31 การยกและติดตั้งชุดกังหันลมบนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยรถเครน 72

ภาพที่4.32 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Induction generator ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ และ 15 กิโลวัตต์..... 73

ภาพที่4.33 แผงควบคุมระบบไฟฟ้า..... 74

ภาพที่4.34 เสาวัดความเร็วลมแบบทรงกระบอกและเครื่องวัดความเร็วลมแอนนิโมมิเตอร์ 75

ภาพที่4.35 กังหันลม 3 ใบพัดที่วัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ได้ติดตั้งเรียบร้อย 76

ภาพที่4.36 สภาพบริเวณใกล้เคียงกังหันลมด้านทิศใต้..... 77

ภาพที่4.37 แนวต้นไม้บริเวณใกล้เคียงกังหันลมด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือสลับกับพื้นที่นากุ้งของชุมชน..... 78

ภาพที่4.38 การวิเคราะห์สภาพพื้นที่และระยะห่างของสิ่งกีดขวางที่ทำให้เกิดกระแสลมแปรปรวน 78

ภาพที่4.39 ข้อมูลความเร็วลม 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 18 เมษายน 2554 ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 20 เมษายน 2554 และข้อมูลความเร็วลมวันที่ 21 เมษายน 2554 80

ภาพที่4.40 การดูข้อมูลลม และการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมแบบเวลาจริง (real time) ด้วยโปรแกรม Richmass PRO..... 81

ภาพที่4.41 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 18 เมษายน 2554 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 20 เมษายน 2554 และข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 21 เมษายน 2554..... 82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพของความเร็วลมของระดับความสูงต่าง ๆ 6

ตารางที่ 4.1 รายละเอียด Induction Generator (มอเตอร์ 15 kW และ 5.5 kW) ขนาด 6 Poles 42

ตารางที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมในงานวิจัยนี้ผลิตได้ตามความเร็วต่างๆ 57

ตารางที่ 4.3 พลังงานกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากความเร็วลมต่างๆ 59

ตารางที่ 4.4 ประมาณราคาค่าก่อสร้างกังหันลม 3 ใบพัด โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 61

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม 3 ใบพัดที่ความเร็วลมต่ำกว่า 3 เมตร ต่อวินาที 62

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม ที่ความเร็วลมมากกว่า 3 เมตร ต่อวินาที 64

ตารางที่ 4.7 พลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ และรายได้ต่อปีจากราคาขายที่รวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า (adder) 68

ตารางที่ 4.8 การคำนวณความคุ้มทุนจากการผลิตไฟฟ้า 68

ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ และรายได้ต่อปีจากราคาขายไฟฟ้า 85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์พลังงานในประเทศไทยมีการพลังงานไฟฟ้าในปริมาณที่สูงและมีอัตราการใช้เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่แหล่งพลังงานในประเทศกลับมีอยู่อย่างจำกัด สถานการณ์ดังกล่าวผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจและสังคมของประเทศอย่างมาก นอกจากนี้การใช้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากฟอสซิลยังก่อให้เกิดปัญหาปัญหาสิ่งแวดล้อมและสร้างมลพิษ รวมถึงเกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน การพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนในประเทศไทยจึงเป็นหนทางสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคตที่สามารถแก้ปัญหาสถานการณ์พลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

ประเทศไทยมีแหล่งพลังงานทดแทนที่มีอยู่มากมายแต่ยังขาดการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำเอาพลังงานเหล่านั้นมาใช้ประโยชน์อย่างแท้จริง แหล่งพลังงานทดแทนได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และก๊าซชีวภาพ พลังงานเหล่านั้นล้วนเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อจำกัดแตกต่างกัน คือ พลังงานแสงอาทิตย์มีข้อจำกัดของเวลาที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะในช่วงเวลากลางวัน พลังงานจากก๊าซชีวภาพสามารถผลิตพลังงานได้ตลอด 24 ชั่วโมง แต่มีข้อจำกัดด้านวัตถุดิบและการดูแลรักษาที่มีความซับซ้อน สำหรับพลังงานจากลมมีข้อดี คือ เป็นพลังงานสะอาดที่สามารถผลิตพลังงานใช้ได้ตลอดวัน พลังงานจากลมจึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนานำพลังงานลมมาใช้อย่างคุ้มค่า

ปัจจุบันมีโครงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากกระแสลมโดยกังหันลมหลายโครงการ ซึ่งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนใหญ่นั้นนำเข้าจากต่างประเทศทำให้มีต้นทุนสูง และเนื่องจากกังหันลมส่วนใหญ่ในต่างประเทศจะเหมาะสมกับลมที่มีความเร็วลมสูงและมีลักษณะคงที่ จึงทำให้กังหันลมเหล่านั้นไม่เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย ดังนั้นการสร้างกังหันลมในประเทศไทยที่มีความเหมาะสมกับลักษณะและคุณสมบัติของกระแสลมในประเทศจึงเป็นสิ่งที่ต้องศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างเร่งด่วน

โครงการการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเองในประเทศไทย เป็นการออกแบบสร้างกังหันลมความเร็วลมต่ำ มีความจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรที่สำคัญ คือ ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมในประเทศ ช่วงของความเร็วลมในประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวแปรการออกแบบชุดใบพัด ตัวแปรการออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย ระบบควบคุม ระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ระบบโครงสร้าง การบำรุงรักษา ราคากังหันลมที่คุ้มกับการลงทุน และระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการสร้างกังหันลมทดสอบเพื่อทดสอบสมมติฐานในการออกแบบ

1.2 **วัตถุประสงค์**

วัตถุประสงค์ตามที่ได้ดำเนินโครงการนี้ประกอบด้วย

1) ศึกษาลักษณะลมในประเทศไทยที่สามารถใช้ผลิตพลังงานจากกังกันลมได้
2) ศึกษารูปแบบใบพัดและระบบกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมของกังหันลม
3) สร้างกังหันลม เก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ และถึงวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกังหันลม ที่บริเวณวัดหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางประกง จังหวัดฉะเชิงเทรา

1.3 **ขอบเขตของการวิจัย**

ขอบเขตของงานวิจัยตามที่ได้ดำเนินโครงการนี้ประกอบด้วย

1) ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าของกังหันลมขนาดผลิตไฟฟ้า18 กิโลวัตต์ กิโลวัตต์ โดยการ 18 ใบ สำหรับความเร็วลมต่ำ 3 ออกแบบชนิดใบพัด
2) ทำการติดตั้งและเก็บข้อมูลกังหันลม เก็บในพื้นที่ทดสอบบริเวณวัดหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยประกอบด้วย

1) ศึกษาข้อมูลลักษณะลมของประเทศไทยจากเอกสารอ้างอิงและข้อมูลจริงบางส่วนของพื้นที่ติดตั้งกังหันลม
2) ศึกษารูปแบบและออกแบบใบพัดและระบบผลิตไฟฟ้าของกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมของประเทศไทย
3) ออกแบบสร้างกังหันลม ความเร็วลมต่ำที่เหมาะสม ณ พื้นที่ทดสอบ.บริเวณวัดหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ศักยภาพของการนำพลังงานลมของประเทศไทยที่มีความเร็วลมต่ำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น
2) เป็นต้นแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า และระบบควบคุม การส่งกระแสไฟฟ้าเข้าระบบสายส่งไฟฟ้าของกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำของประเทศไทย ที่มีการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้และจุดคุ้มทุน
3) กังหันลมทดสอบที่มีการทดสอบประสิทธิภาพจริงจากการผลิตกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ทดสอบ ขนาด 3 ใบพัดสำหรับผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำที่เหมาะสมกับประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยโครงการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเองภายในประเทศ เป็นการวิจัยกังหันลมความเร็วลมต่ำ ที่ใช้เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพื้นฐานของพลังงานลม ลักษณะทางกายภาพและ ชนิดของกังหันลมแบบต่างๆซึ่งมีความแตกต่างทั้งทางด้านกายภาพ และหลักการออกแบบกังหันลมที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียด ดังนี้

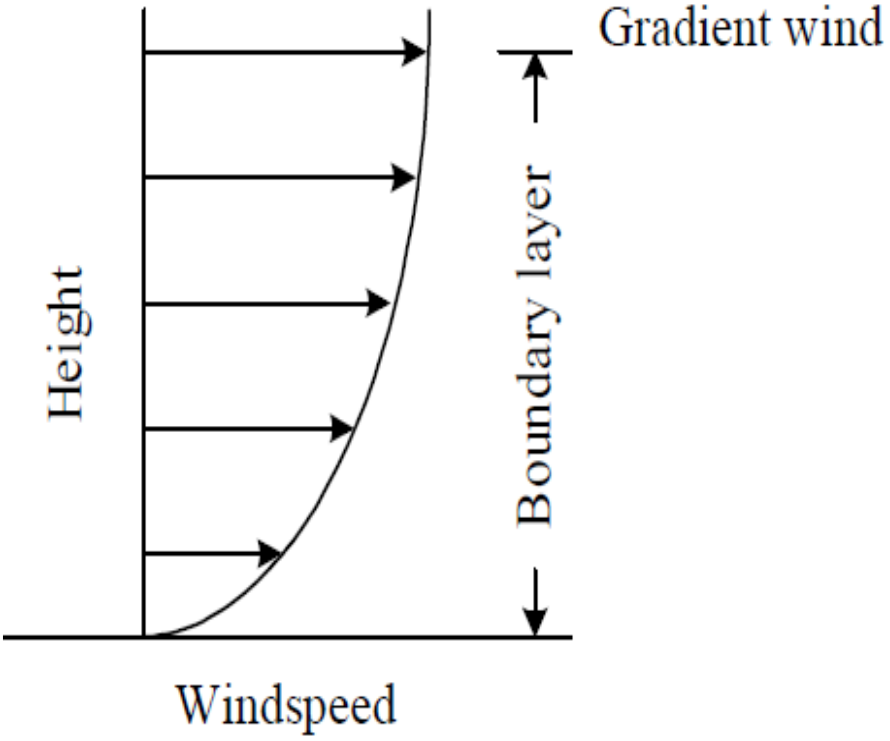
2.1 ลมและพลังงานลม

ลม (wind) เกิดจากการแทนที่ของอากาศจากบริเวณที่มีความกดอากาศสูงไปยังบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำ การเคลื่อนที่ของลมจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความกดอากาศสูง และความกดอากาศต่ำ กล่าวคือ ถ้ามีความแตกต่างกันน้อยลมที่เกิดขึ้นจะเป็นลมเอื่อย และถ้ามีความแตกต่างกันมากจะกลายเป็นพายุ

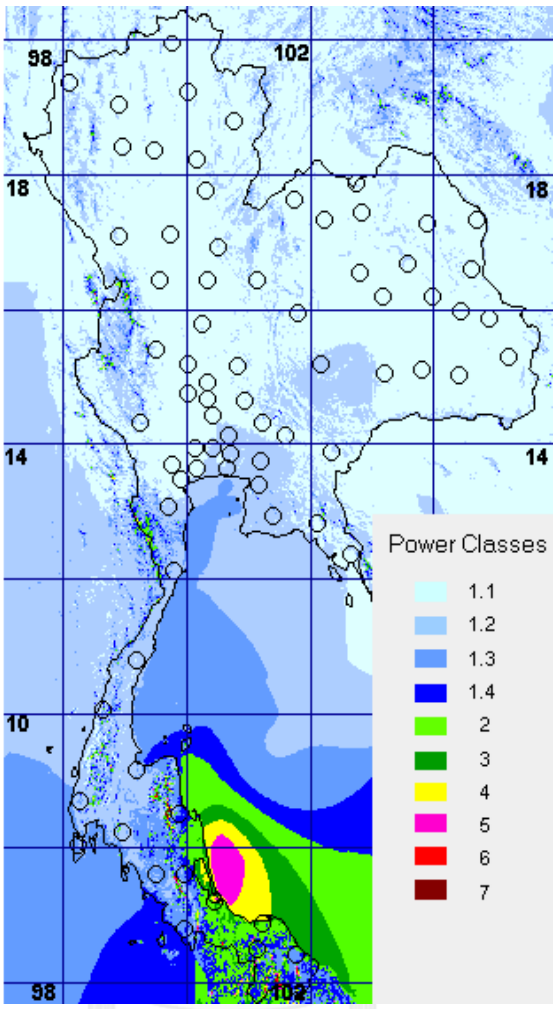
ลมมรสุม หมายถึง ลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางกับการเปลี่ยนฤดูคือฤดูร้อนจะพัดอยู่ในทิศทางหนึ่งและจะพัดเปลี่ยนทิศทางในทางตรงกันข้ามในฤดูหนาว นอกจากนี้ลมยังอาจเกิดขึ้นจากอิทธิพลของภูมิประเทศและ ความเปลี่ยนแปลงของความกดอากาศในพื้นที่นั้นๆ ซึ่งเรียกลมชนิดนี้ว่าลมประจำถิ่น ซึ่งลมประจำถิ่นยังสามารถแบ่งออกเป็น ลมบกและลมทะเล ลมภูเขาและลมหุบเขา กังหันลมจะใช้ประโยชน์จากลมที่อยู่ใกล้ผิวโลก หรือ “ลมผิวพื้น” หมายถึง ลมที่พัดในบริเวณผิวพื้นโลกภายใต้ความสูงประมาณ 1 กิโลเมตรเหนือพื้นดิน เป็นบริเวณที่มีอากาศและมีแรงฝืดเกิดจากการปะทะกับสิ่งกีดขวางร่วมกระทำด้วยในระดับต่ำ แต่ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรขึ้นไปแรงต้านจะลดลงและ ความเร็วลมจะเพิ่มขึ้น ส่วนที่ระดับความสูงใกล้ 1 กิโลเมตรเกือบไม่มีแรงฝืด การที่ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับระดับความสูงและสภาพภูมิประเทศเช่นเดียวกันกับทิศทางของลม

จากการศึกษาพบว่า ประเทศไทยมีกำลังลมเฉลี่ยทั้งปีอยู่ระดับ 3 หรือมีความเร็วลม 6.4 เมตรต่อวินาที ที่ความสูง 50 เมตรที่ภาคใต้บริเวณชายฝั่งทะเลตะวันออก เกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนมีนาคม นอกจากนั้นยังมีแหล่งศักยภาพพลังงานลมอีกส่วนหนึ่งอยู่บริเวณเทือกเขาด่านทิศตะวันตกตั้งแต่ภาคใต้ตอนบนจรดภาคเหนือตอนล่าง เกิดจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม

ดังนั้น ทางเลือกที่เหมาะสมของประเทศไทย หากจะส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากลมในการผลิตไฟฟ้า ควรออกแบบกังหันลมให้มีระบบขนาดเล็กระดับกิโลวัตต์จึงจะเหมาะสม



ภาพที่ 2.1 **ลักษณะของความเร็วลมภายใต้ชั้นบรรยากาศ** [1]



ภาพที่ 2.2 **แผนที่แสดงพลังงานลมเฉลี่ย ในประเทศไทย (หน่วย: วัตต์/ตารางเมตร)** [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 **ศักยภาพของความเร็วลมของระดับความสูงต่าง ๆ** [2]

THAILAND WIND POWER CLASSES

Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0	9.4
	W/m^2	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400	1,000
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2	11.0
	W/m^2	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640	1,600
50 m	m/s	0	3.6	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8	11.9
	W/m^2	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800	2.000

ข้อมูลศักยภาพลม (ภาพที่ 1) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของความเร็วลมของระดับความสูงต่าง ๆ (ตาราง ที่ 2.1) แสดงศักยภาพลม ที่ 10 เมตร 30 เมตรและ 50 เมตรแตกต่างกันไป ถ้าต้องการความเร็วลมที่ 6 เมตรต่อวินาที เมื่ออยู่ในพื้นที่ศักยภาพลมระดับชั้น 2 (สีเขียวอ่อน) ต้องอยู่ที่ความสูง 50 เมตร 4 (สีเหลือง) ต้องอยู่ที่ความสูง 10 เมตร และถ้าต้องการความเร็วลมที่ 8 เมตรต่อวินาที เมื่ออยู่ในพื้นที่ศักยภาพลมระดับชั้น 5 (สีชมพู) จะต้องอยู่ที่ความสูง 50 เมตร 6 (สีแดง) จะต้องอยู่ที่ความสูง 30 เมตร

พลังงานลมเฉลี่ย ในประเทศไทย ที่ศักยภาพแตกต่างกัน (ภาพที่ 2) แสดงให้เห็น พลังงานลมเฉลี่ย ในประเทศไทยทั้งหมด

พลังงานลม (wind energy) คือ พลังงานที่เกิดจากลมตามธรรมชาติ เป็นพลังงานตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ หรือความกดดันของบรรยากาศ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเอาพลังงานลมมาใช้ประโยชน์มากขึ้น ตลอดจนมีผู้วิจัยและพัฒนาหาประโยชน์ จากแรงลมธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากพลังงานลมไม่จำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการซื้อหาเช่นเดียวกับพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ในประเทศไทยบางพื้นที่ยังมีปัญหาในการวิจัยพัฒนานำเอาพลังงานลมมาใช้งาน เนื่องจากปริมาณของลมไม่สม่ำเสมอตลอดปี และมีความเร็วลมค่อนข้างต่ำ เมื่อนำมาหากำลังลม (wind power) ก็จะต่ำตาม ไม่คุ้มกับการลงทุนเชิงพานิชย์ แต่ก็ยังคงมีพื้นที่บางพื้นที่สามารถนำเอาพลังงานลมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ เช่น พื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลเป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยในการเปลี่ยนจากพลังงานลมออกมาในรูปอื่นๆ เช่น พลังงานไฟฟ้าหรือกังหันลมผลิตไฟฟ้า พลังงานกลเช่นกังหันลม สูบถ่ายลำเลียงน้ำขึ้นสู่ที่สูง และ กังหันลมบำบัดน้ำเสีย นั่นเอง

กำลังลม (wind power) คือ กำลังงานจลน์ที่ได้จากแรงลม หรือเรียกว่าพลังงานลมตามธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยอาศัยเครื่องมือทางกลมา เปลี่ยนแปลงทำให้เกิดงานลม เราอาจเรียกว่า "กังหันลม" เป็นตัวเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ของกระแสลม เปลี่ยนเป็นพลังงานกล แล้วนำพลังงานที่ได้ ไปเปลี่ยน เป็นพลังงานรูปอื่นอีก เช่น ไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าต่ออีกทีหนึ่ง เราเรียกว่ากังหันลมผลิตไฟฟ้า หรือนำพลังงานกลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ เช่น สูบน้ำ เป็นต้น

การคำนวณหาพลังงานที่ได้จากความเร็วลม กำลังที่ได้รับจากลม(Power) มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt) สามารถคำนวณได้จากสูตร การคำนวณหาพลังงานที่ได้จากความเร็วลม

$$P = \frac{1}{2}\rho * A * \overline{V}^3 \qquad [3]$$

เมื่อ

Power (P) คือ พลังงาน (Watt)

Air density (ρ) คือ ความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.23 กิโลกรัมต่อลูกบาตรเมตรที่ระดับน้ำทะเล (kg/m^3)

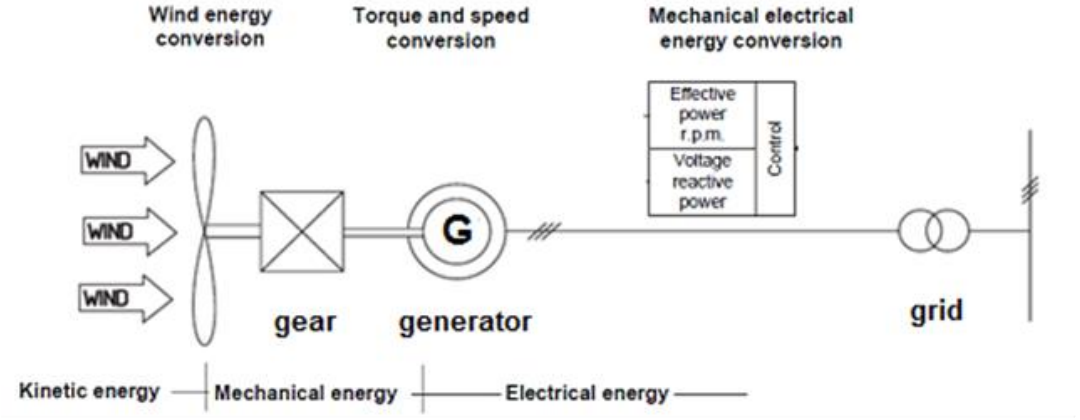
Swept area (A) คือ พื้นที่วงกลมของใบพัด มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

Wind velocity (V) คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

2.2 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ โดยการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานลมมีอยู่โดยทั่วไป และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น

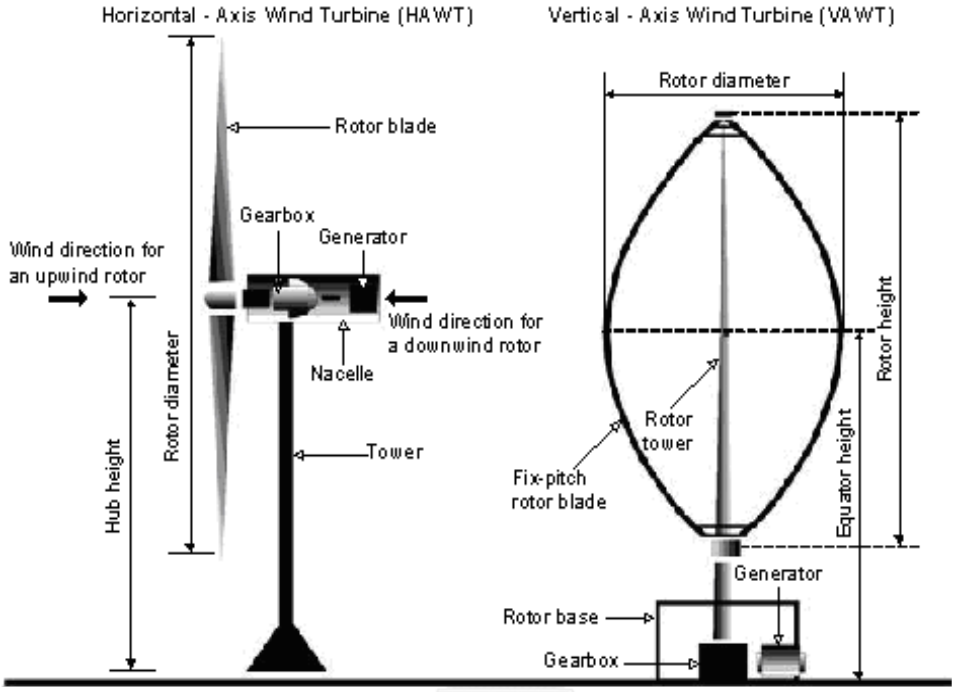
หลักการเปลี่ยนรูปพลังงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้า คือ พลังงานลม เกิดจากการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ความเร็วค่าหนึ่งเป็นพลังงานจลน์ เปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานทางกลด้วยแรงบิดและความเร็วรอบของแกนหมุนกังหัน พลังงานกลจากแกนหมุนของกังหันถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับแกนหมุนของกังหันลม สามารถนำพลังงานจากการหมุนนี้ไปใช้งานได้



ภาพที่2.3 การเปลี่ยนพลังงานจลน์จากความเร็วลมเป็นพลังงานไฟฟ้า [4]

2.3 ชนิดของกังหันลม

กังหันลมผลิตไฟฟ้าสมัยใหม่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กังหันลมแนวแกนนอน (horizontal axis wind turbine) และ กังหันลมแนวแกนตั้ง (vertical axis wind turbine)



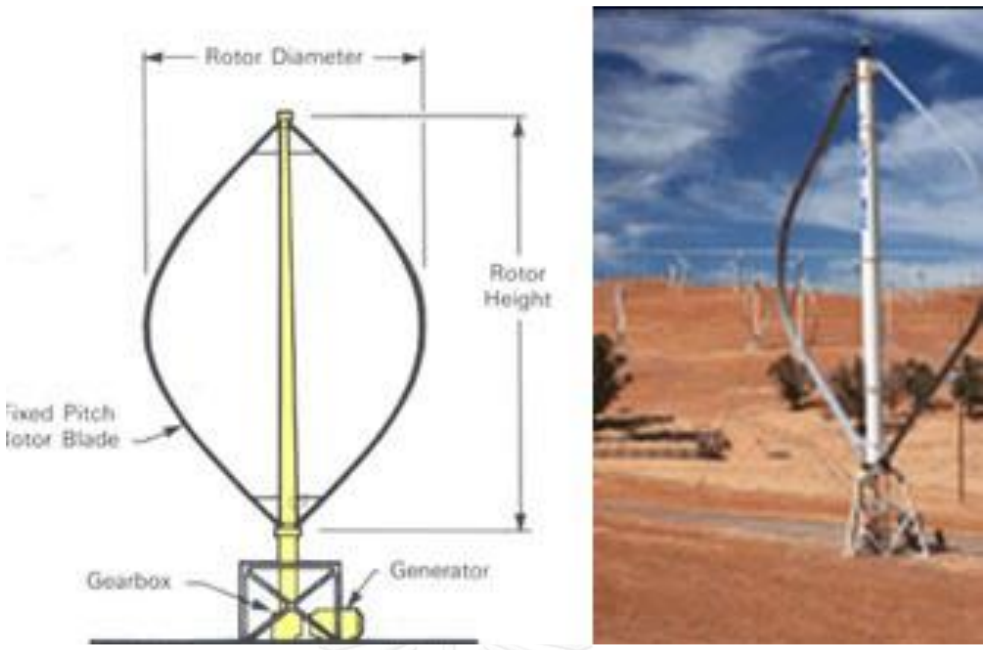
ภาพที่2.4 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอนและแบบแกนตั้ง [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่2.5 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแกนนอน

2.3.1 **กังหันลมแนวแกนนอน** (horizontal axis wind turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนขนานกับทิศทางของลม มีใบพัดเป็นตัวตั้งฉากรับแรงลม อุปกรณ์ควบคุมกังหันให้หันไปตามทิศทางของกระแสลม เรียกว่า Yaw Drive หรือ ถ้าเป็นกังหันลมที่มีขนาดเล็ก ก็จะใช้หางเสือในการบังคับทิศทางตามทิศทางของกระแสลม ได้แก่ กังหันลมวินด์มิลล์ (Windmills) กังหันลมใบเสื่อลำแพน กังหันลมชนิดหลายใบพัดสำหรับสูบน้ำ กังหันลมชนิดหลายใบพัดตั้งแต่ 1-6 ใบ ใบพัดสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าชนิด 3 ใบพัด ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูง



ภาพที่2.6 กังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบแนวตั้ง [6]

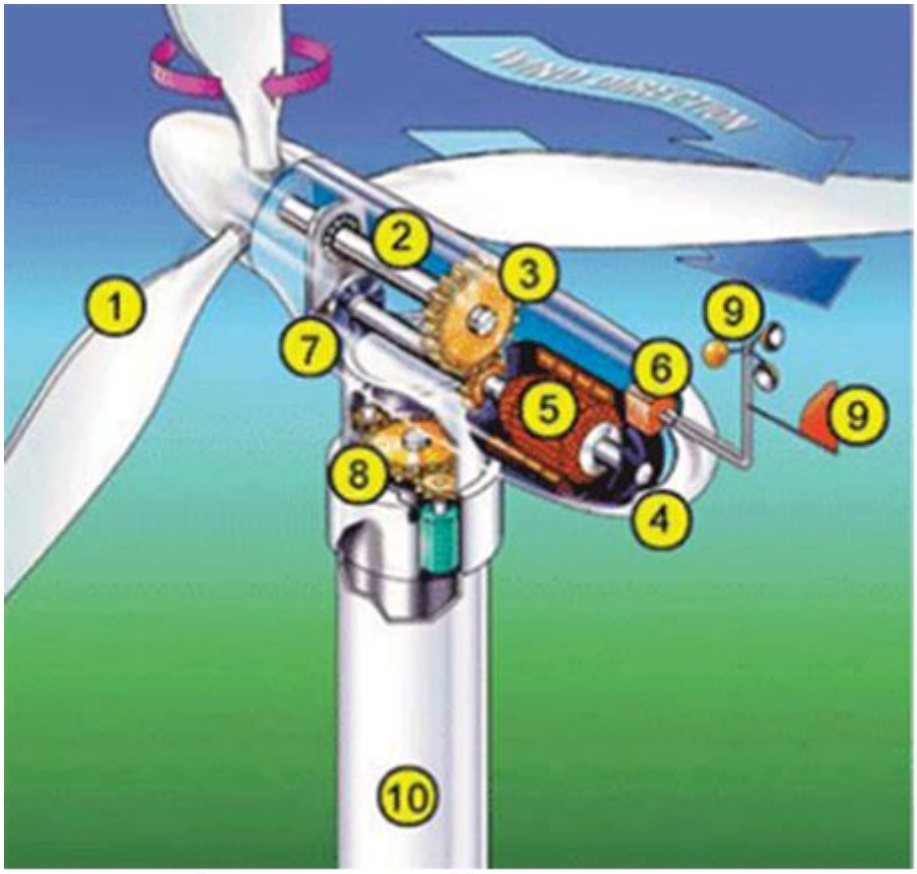
2.3.2 **กังหันลมแนวแกนตั้ง** (vertical axis wind turbine)

เป็นกังหันลมที่มีแกนหมุนและใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมในแนวราบ ซึ่งทำให้สามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทาง การเคลื่อนที่ของลมในแนวราบทำให้สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแบบแกนตั้งมีประสิทธิภาพในการ เปลี่ยนพลังงานลม เป็นพลังกลต่ำ มีข้อจำกัดในการขยายให้มีขนาดใหญ่และการยกชุดใบพัดเพื่อรับแรงลมปัจจุบันมีการใช้งาน กังหันลมแบบนี้น้อยมาก เนื่องจากมีขนาดเล็กระบบความปลอดภัย จึงมีมากกว่ากังหันลมแบบแกนนอน สามารถออกแบบให้ใบตัวเอง เป็นเบรก ควบคุมความเร็วรอบของตัวเองได้ ทำให้ไม่หมุนเร็วเกินไป เวลาลมแรง หรือเกิดพายุได้

กังหันลมส่วนใหญ่ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปจะเป็นแบบแกนนอน ส่วนใหญ่ติดตั้งอยู่บนเสาสูงและมีอุปกรณ์ควบคุม เพื่อให้กังหันลมสามารถหันหน้าเข้าหาลมและรับลมได้ทุกทิศทาง กังหันลมแกนตั้ง คือ สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง ชุดปรับความเร็ว (gear box) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถติดตั้งอยู่ที่ระดับพื้นล่างได้นอกจากนี้ตัวเสาของกังหันลมยังไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับแบบแกนนอน

2.4 ส่วนประกอบของกังหันลมผลิตไฟฟ้า

ส่วนประกอบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้าประกอบด้วยชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้ คือ



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่2.7 ส่วนประกอบของระบบกังหันลมสำหรับผลิตไฟฟ้า [2]

2.4.1 ใบพัด

ใบพัด (blade) เป็นส่วนที่ยึดติดกับแกนหมุน (rotor hub) ทำหน้าที่รับพลังงานจลน์ (kinetic energy) จากการเคลื่อนที่ของลม และหมุนแกนหมุน เพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก ถูกออกแบบโดยใช้หลักการทางพลศาสตร์ของอากาศ เพื่อให้มีน้ำหนักเบาพอเหมาะและเหนียวทนทานรับกับแรงลมได้ดี วัสดุของใบกังหัน มีหลายชนิด เช่น เหล็กแผ่น ไฟเบอร์กลาส ไม้ เป็นต้น

2.4.2 **เพลาแกนหมุน**

เพลาแกนหมุน จะทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลัง ซึ่งรับแรงจากแกนหมุนใบพัด และส่งผ่านระบบกำลัง เพื่อหมุนและปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4.5 **ชุดเกียร์**

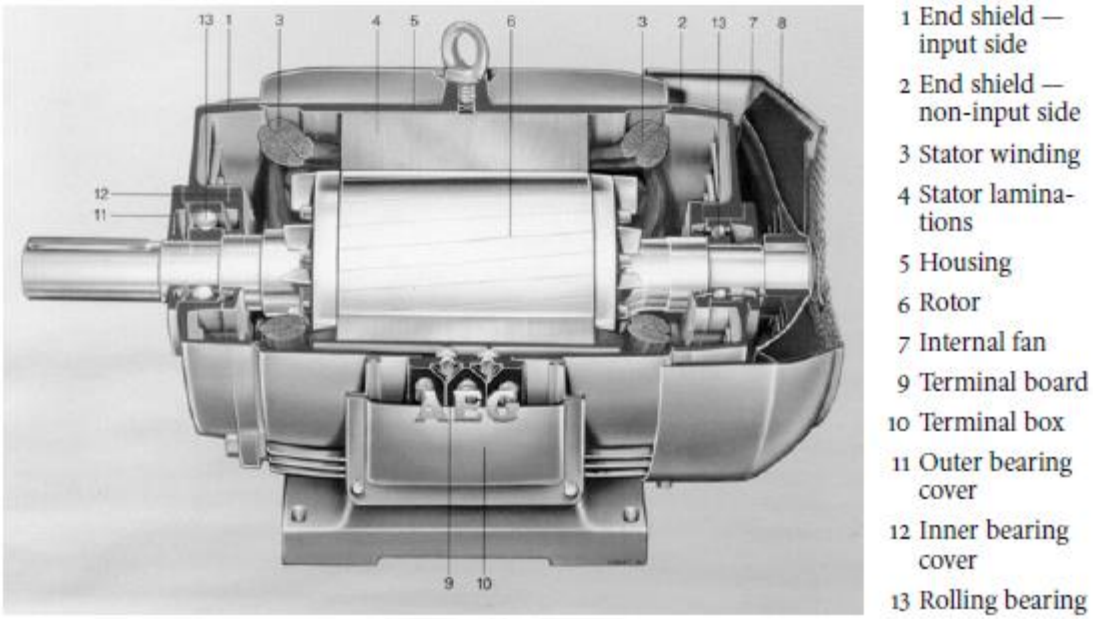
ชุดเกียร์ (gear) คือ ห้องส่งกำลัง และทดกำลัง เพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วรอบให้เหมาะสม ซึ่งเป็นระบบปรับเปลี่ยนและควบคุมความเร็วในการหมุน ระหว่างเพลาแกนหมุนกับเพลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.4.6 **ชุดห้องเครื่อง**

ชุดห้องเครื่อง (nacelle) เป็นองค์ประกอบที่มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญต่อกังหันลม ใช้บรรจุระบบต่างๆ ของกังหันลม ประกอบด้วย ระบบเกียร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เบรก และระบบควบคุม

2.4.7 **ระบบกำเนิดไฟฟ้า**

ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำหน้าที่ แปลงพลังงานกลที่ได้รับเป็นพลังงานไฟฟ้า งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ อินดักชัน เจนเนอร์เรเตอร์ (Induction Generator) ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีโครงสร้างเหมือนอินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) โดยป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ชุดสเตเตอร์ (Stator) ทำให้เกิดฟลักซ์ (Flux) เป็นขั้วแม่เหล็กหมุนตามสภาวะกระแสสลับ ไปเหนี่ยวนำแกนโรเตอร์ (Rotor) จะเกิดการเหนี่ยวนำและเกิดการหมุนของโรเตอร์ เมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ในอัตราความเร็วที่มากกว่าแรงของฟลักซ์ก็จะเกิดการย้อนกลับของกระแส ทำให้เกิดกระแสไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายย้อนกลับเข้าระบบสายส่ง

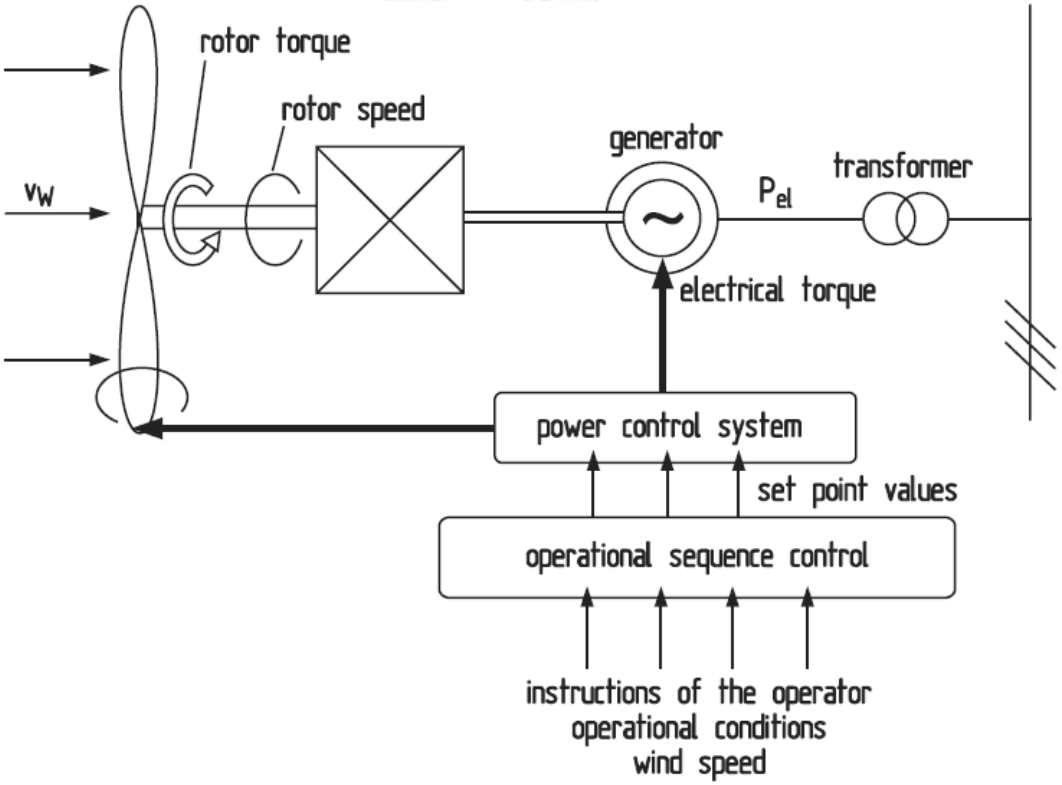


ภาพที่2.8 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ [4]

2.4.8 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมทางไฟฟ้า ซึ่งใช้ระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสั่งการและควบคุม (programmable logic controller; PLC) เป็นตัวควบคุมการทำงาน และจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยการเชื่อมสะพานไฟฟ้า เพื่อทำการผลิตไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ หรือ ปลดการเชื่อมต่อชุดสะพานไฟฟ้าเพื่อยกเลิกการผลิต กระแสไฟฟ้า ระบบควบคุม เป็นระบบควบคุมการทำงานและการจ่ายกระแสไฟฟ้าออกสู่ระบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ระบบควบคุมการการหมุนของใบพัดกังหันลม เพื่อรับลม หรือหลบลมเพื่อทำการเบรก ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ มีรายละเอียดดังนี้

ภาพที่2.9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำกับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าโดยตรง [4]



ภาพที่2.10 ระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำกับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า [4]

2.4.9 ระบบเบรก

ระบบเบรก เป็นระบบกลไกล ทางเครื่องกล เพื่อใช้ควบคุมการหยุดหมุนของใบพัดและเพลาแกนหมุนของกังหัน เมื่อได้รับความเร็วลม เกินความสามารถของกังหัน หรือ ให้หยุดหมุนช่วง การตรวจเช็ค และซ่อมบำรุง

2.4.10 แกนคอหมุนปรับทิศกังหันลม

แกนคอหมุนปรับทิศกังหันลม (yaw drive) ระบบควบคุมจะสั่ง ให้ทำการหมุนห้องเครื่องเพื่อให้ใบพัดรับทิศทางลมโดยระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมให้ปรับหันหน้ากังหัน หันหน้าเข้าหาลมตามทิศทางของตัววัดทิศทางลม

2.4.11 เครื่องวัดความเร็วลม (Wind speed) และทิศทางลม (Wind Direction)

เครื่องวัดความเร็วลม (Wind speed) และทิศทางลม (Wind Direction) ซึ่งเชื่อมต่อสายสัญญาณเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุม เพื่อเป็นตัวชี้ขนาดของความเร็วและทิศทางของลม เพื่อที่คอมพิวเตอร์จะได้ควบคุมการทำงานของใบกังหัน

การประดิษฐ์เครื่องวัดความเร็วลมเริ่มต้นในปี พ.ศ. 1993 Leon Battista Alberti นักประดิษฐ์ชาวอิตาลีได้ประดิษฐ์เครื่องวัดความเร็วลมเครื่องแรกของโลก โดยประกอบขึ้นจากแผ่นจานวางตั้งฉากกับทิศทางลมและเมื่อมีกระแสลมมาปะทะแผ่นจานจะหมุนตามแรงลม หลังจากนั้นเครื่องวัดความเร็วลมประเภทเดียวกันนี้ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาใหม่อีกครั้งโดยนักประดิษฐ์ชาวอังกฤษ Robert Hooke ผู้ซึ่งถูกเข้าใจผิดเสมอว่าเป็นผู้ประดิษฐ์เครื่องวัดความเร็วลมเครื่องแรกของโลก Anemometer เป็นคำศัพท์ที่ได้มาจากภาษากรีซ anemos หมายถึงลม เครื่องวัดความเร็วลมสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือวัดความเร็วลมและวัดความกดอากาศ

ประเภทของเครื่องวัดความเร็วลม

1. แบบถ้วยหมุน (Cup Anemometer) เป็นเครื่องมือวัดความเร็วลมที่มีอายุมากที่สุด โดยใช้ถ้วยวางบนแกนแนวตั้งเมื่อมีลมมาปะทะจะทำให้ถ้วยหมุนรอบแกน ความเร็วของถ้วยที่หมุนคือความเร็วลม
2. แบบกังหันลม (Windmill Anemometer) สามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและทิศทางลม โดยเครื่องมือวัดประเภทนี้จะมีใบพัดวางอยู่ด้านหน้าเมื่อมีลมพัดมาปะทะจะทำให้ใบพัดหมุนความเร็วของใบพัดที่หมุนจะเป็นตัวบ่งบอกความเร็วลม

3. แบบหัวลวดร้อน (Hot Wire Anemometer)
4. แบบ Sonic Anemometer ใช้หลักการรับและส่งคลื่นอัลตราโซนิกส์ระหว่างเซ็นเซอร์ เมื่อมีลมพัดผ่านเซ็นเซอร์ คลื่นอัลตราโซนิกส์จะถูกขัดจังหวะซึ่งการขัดจังหวะนี้จะให้ข้อมูลความเร็วลมที่ถูกต้องและแม่นยำ เครื่องมือประเภทนี้ไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวทำให้มีความทนทานสูงและสามารถวัดความเร็วลมที่ต่ำมากๆ ได้

2.4.12 เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน

เสากังหันลม เป็นตัวแบกรับส่วนที่เป็นตัวเครื่องที่อยู่ข้างบน ทั้งหมดควรมีความสูงอย่างน้อย 2 เท่าของความยาวของใบกังหัน มีใช้งาน 2 แบบ คือ

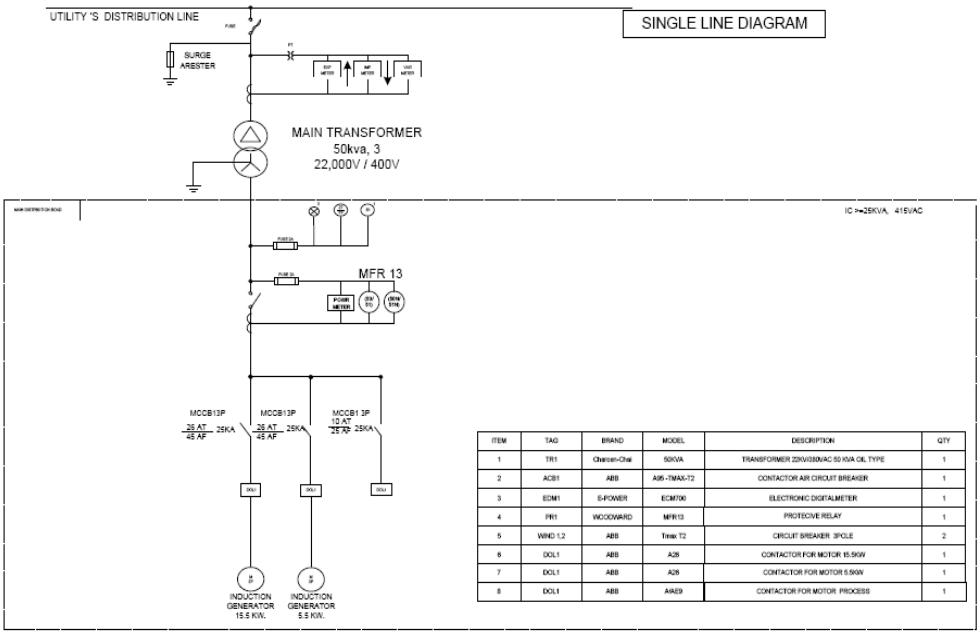
1) แบบเสากลมกลวง (Tubular)

2) เสาโครงถัก (Lattice)

ปัจจุบันนิยมใช้เสาแบบกลมกลวงมากกว่า เพราะเสากลมกลวงมีการออกแบบในเชิงวิศวกรรม เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักและแรงปะทะของลมต่อพื้นที่กวาดใบพัดได้เหมาะสม

2.4.13 ระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง

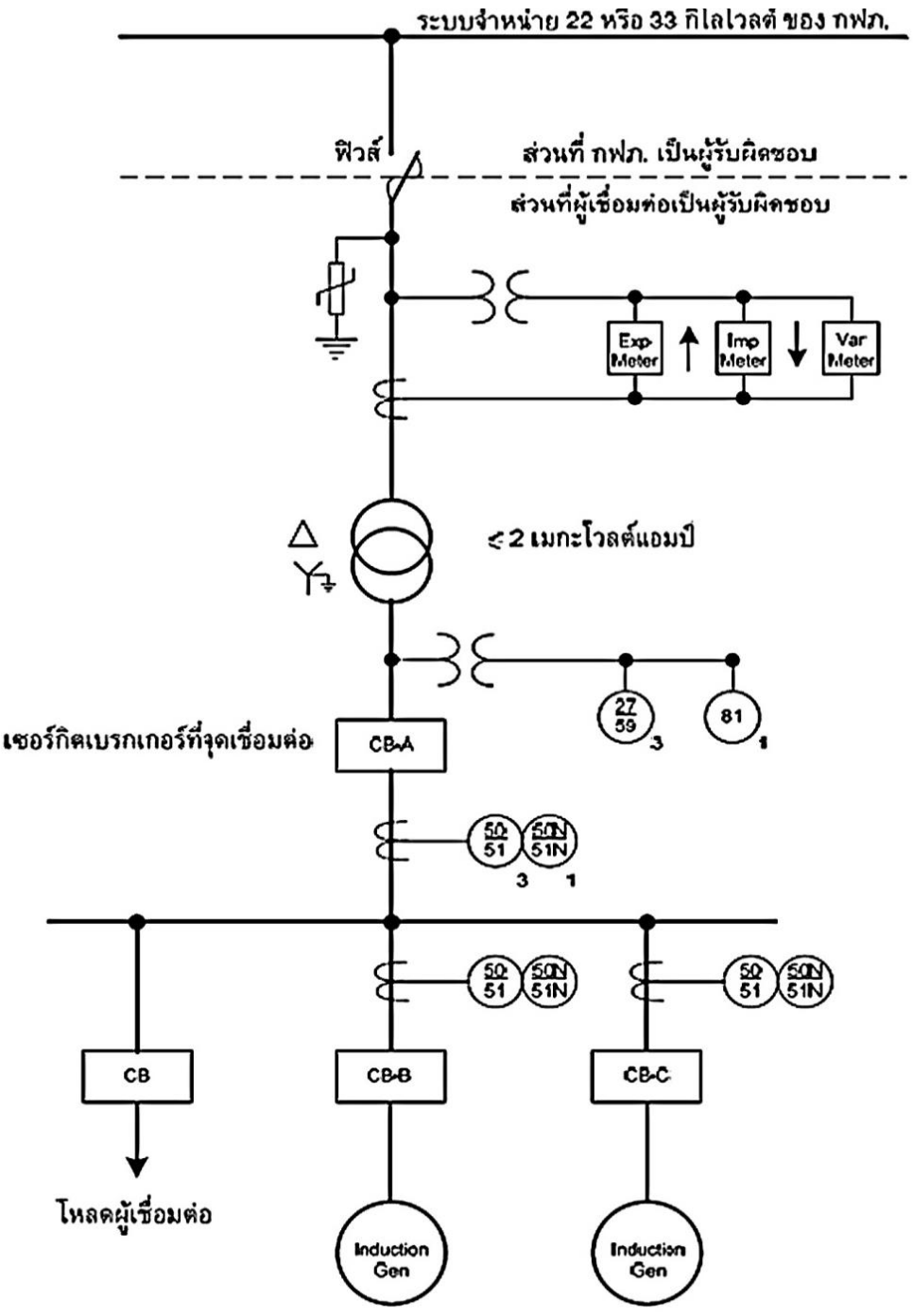
การออกแบบระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ตามรายละเอียดใน Single Line Diagram



ITEM	TAG	BRAND	MODEL	DESCRIPTION	QTY
1	TR1	Chiroen-Chai	50KVA	TRANSFORMER 22KV/380VAC 50 KVA OIL TYPE	1
2	ACB1	ABB	A95 -TMAX-T2	CONTACTOR AIR CIRCUIT BREAKER	1
3	EDM1	E-POWER	EDM700	ELECTRONIC DIGITALMETER	1
4	PR1	WOODWARD	MFR13	PROTECIVE RELAY	1
5	WIND 1,2	ABB	Tmax T2	CIRCUIT BREAKER 3POLE	2
6	DOL1	ABB	A26	CONTACTOR FOR MOTOR 15.5KW	1
7	DOL1	ABB	A26	CONTACTOR FOR MOTOR 5.5KW	1
8	DOL1	ABB	A9A69	CONTACTOR FOR MOTOR PROCESS	1

ภาพที่2.11 ไดอะแกรมเส้นเดียว (single line diagram) ของระบบการเชื่อมต่อ

(grid connection) และระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า



ภาพที่2.12 รูปแบบการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับระบบ กฟภ. 22 หรือ 33 กิโลวัตต์

2.4.14 ห้องควบคุม

เป็นห้องที่สำหรับให้ผู้ควบคุม (Operator Control) ใช้ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของกังหัน และใช้สำหรับ เก็บชุดควบคุม PLC คอมพิวเตอร์ ควบคุม ตลอดจนเก็บชุดเชื่อมต่อสะพานไฟฟ้า

2.5 เกณฑ์การพิจารณาในการติดตั้งกังหันลม

การศึกษาเบื้องต้นถึงผลกระทบในการติดตั้งกังหันลม ที่มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและพื้นที่ข้างเคียง มีเกณฑ์การพิจารณาในการติดตั้งกังหันลม ดังนี้

1. ด้านพื้นที่ ระยะห่างระหว่างกังหันลมนั้นต้องอยู่ห่างกัน 5-10 เท่าของความสูงกังหัน เพื่อกระแสลมจะได้ลดความปั่นป่วนของความเร็วลมที่พัดหลังจากที่ผ่านกังหัน ระยะห่างระหว่างกังหันลมนั้นต้องอยู่ห่างกันกับกังหันลมต้นอื่น
2. ด้านทัศนะวิสัย วิสัย สำหรับผลกระทบทางด้านสายตาหรือการมองเห็นของระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้น กังหันลมขนาดใหญ่จะมีความสูงมากกว่า 50 เมตรขึ้นไปทำให้สามารถมองเห็นได้จากระยะไกล กังหันลมที่ติดตั้งอยู่ตามทุ่งหญ้า สร้างความสวยงาม สร้างจินตนาการ และความคิดต่างๆ
3. ด้านเสียง เสียงของกังหันลมเกิดจากการหมุนของปลายใบพัดตัดกับอากาศ จากการที่ใบพัดหมุนผ่านเสากังหัน เสียงดังของกังหันลมผลิตไฟฟ้าเป็นตัวแปรที่สำคัญประการหนึ่งที่แสดงถึงประสิทธิภาพของกังหันลม ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตกังหันลมจึงพยายามพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อลดผลกระทบจากเสียงของกังหันลม
4. นก มีผลการศึกษาจากหลายแห่งที่ขัดแย้งกัน สำหรับสาเหตุการตายของนกจากการบินชนกังหันลมที่กำลังหมุนอยู่ แต่หากพิจารณาแล้วความถี่ของเหตุการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดขึ้นได้ใกล้เคียงหรือน้อยกว่า การที่นกบินชนรถ หน้าต่างของอาคาร หรือสายไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นอยู่เสมอ ๆ ยกเว้นในบางกรณีจำนวนการตายของนกในพื้นที่ติดตั้งกังหันลมอาจสูง อันเนื่องมาจากมีฝูงนกที่อพยพย้ายถิ่นฐานในบางฤดูกาลผ่านพื้นที่ดังกล่าวในเวลากลางคืน หรือพื้นที่นั้นเป็นแหล่งหาอาหารของนกนักล่าบางชนิด นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญ บางคนพบว่าในบริเวณพื้นที่ติดตั้งกังหันลม กลับมีอัตราการผสมพันธุ์ของเกสรดอกไม้ที่สูงมาก เนื่องจากการปั่นป่วนของกระแสลมในบริเวณนั้น

5. คลื่นสนามแม่เหล็ก สัญญาณโทรทัศน์ คลื่นวิทยุ และเรดาร์ อาจถูกรบกวนได้จากการหมุนของกังหันลม ซึ่งอาจสร้างคลื่นรบกวนสัญญาณเหล่านี้ โดยเฉพาะเรดาร์ ในปัจจุบันยังไม่พบว่ามีรายงานการถูกรบกวนจากกังหันลม
6. ความยั่งยืน ปัจจุบันกระแสในเรื่องความยั่งยืน)sustainable) และเทคโนโลยีที่ปลอดมลพิษ กำลังเป็นที่สนใจ ดังนั้นการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าไม่ก่อให้เกิดมลพิษ สามารถใช้เป็นเทคโนโลยีหนึ่งของการพัฒนาอย่างยั่งยืน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นเองในประเทศ เป็นงานวิจัยที่ต้องเข้าใจตัวแปรที่สำคัญ คือ ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมในประเทศ ช่วงของความเร็วลมในประเทศที่มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า ตัวแปรการออกแบบชุดใบพัด ตัวแปรการออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับความเร็วลมในประเทศไทย ระบบควบคุม ระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ระบบโครงสร้าง การบำรุงรักษา ราคากังหันลมที่คุ้มกับการลงทุน และระบบอื่นๆที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการสร้างกังหันลมทดสอบเพื่อทดสอบสมมุติฐานในการออกแบบ

การออกแบบกังหันลมสำหรับประเทศไทยต้องออกแบบรูปแบบ (Profile) ของการผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีความเร็วลมเข้าระบบ (cut in speed) ต่ำ และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องในกรณีที่มีประแสลมเพียงพอ เหมาะสมกับความเร็วลมที่ต่ำและมีความแปรปรวนสูงของประเทศไทย การวิจัยนี้จึงมีวิธีวิการวิจัยดังนี้

3.1 การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของกระแสลม

การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะลมของประเทศไทย เพื่อประเมินศักยภาพของการนำลมมาผลิตพลังงานไฟฟ้า ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง ในบริเวณมูลนิธิพระดาบส เลขที่ 89 ม.14 ต.บางปลา อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ ใกล้เคียงกับพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลมทดสอบ คือ ข้อมูลลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งอยู่ติดกับพื้นที่ทดสอบ บริเวณวัดหงส์ทอง เก็บข้อมูลความเร็วลมลักษณะลมและสภาพแวดล้อมในบริเวณพื้นที่ทดสอบ บริเวณวัดหงส์ทอง พื้นที่มีสภาพเป็นป่าชายเลน โดยเก็บข้อมูลของความเร็วลมบริเวณดังกล่าว วิธีการเก็บข้อมูลคือ เก็บข้อมูลทิศทางและความเร็วลมในพื้นที่ศึกษา ณ ความสูงที่ 20 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งติดตั้งกังหันลม เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ประกอบด้วย เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) แบบถ้วยทำหน้าที่วัดความเร็วลมและทิศทางลม เชื่อมต่อสายสัญญาณ เข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ ความถี่ในการบันทึก ทุก 1 วินาที เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีการการสอบเทียบ (Calibrate) มาตรฐานของอุปกรณ์ เครื่องมือวัดทั้งหมด ก่อนติดตั้งจริง

นำผลการการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะลม มากำหนดเป็นลักษณะรูปแบบที่เหมาะสมของกังหันลม

ภาพที่3.1 เครื่องวัดความเร็วลมชนิดความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ในการวิจัย

3.2 การเลือกพื้นที่ติดตั้งกังหันลม ต้นแบบ

ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าลม บริเวณวัดหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา เนื่องจากบริเวณ ดังกล่าว เป็นแนวระนาบทิศทางลมเดียวกับทิศทาง มูลนิธิพระดาบส ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลลม นำมาวิเคราะห์คำนวณ ออกแบบกังหันลมต้นแบบ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ภาพที่3.2 แสดงภาพพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า

จากภาพ 3.2 แสดงภาพพื้นที่ในการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้า แนวเส้นกลางเป็นแนวถนนแบ่งพื้นที่ของวัด หงส์ทอง กับพื้นที่เอกชน ด้านบนของรูปภาพ 3.2 เป็นพื้นที่เอกชน ทางผู้วิจัยติดต่อขอเช่าพื้นที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ แต่เจ้าของที่ดินไม่อนุญาต ส่วนด้านล่าง เป็นพื้นที่ ของวัด ผู้วิจัย ได้รับอนุญาต จากทางเจ้าอาวาส วัดหงส์ทอง ให้จัดสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้า ในพื้นที่วัดได้ ผู้วิจัยได้ทำการ ตรวจวัด ทิศทางลม และหาพื้นที่เหมาะสมที่ไม่มี สิ่งกรีดขวางทางลม และพื้นที่เลือก เป็นพื้นที่ๆ ดีที่สุด เป็นที่โล่งแจ้ง ไม่มีอุปกรณ์ ขวางทิศทางลม

3.3 การออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆของกังหัน

ออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมต่ำ และให้ผลิตผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด 18 กิโลวัตต์ ประกอบด้วยการออกแบบรูปแบบใบพัด ระบบผลิตไฟฟ้า และระบบควบคุมของกังหันลมที่เหมาะสมกับความเร็วลมต่ำของประเทศไทย

รูปแบบใบพัด ที่มีศักยภาพในการรับลมได้ดีสามารถแปลงพลังงานจลน์ของลมเป็นแรงบิดและความเร็วที่หมุนรอบแกนได้ดี ต้องกำหนดขนาดของใบพัด รูปร่างของใบพัด และตำแหน่งการติดตั้งใบพัด

ระบบผลิตไฟฟ้า ที่เหมาะสมกับความเร็วลมที่ต่ำคือมีความเร็วลมเข้าระบบ (cut in speed) ต่ำ และสามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงเป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการเชื่อมต่อกับการไฟฟ้า

ระบบควบคุมของกังหันลมที่เหมาะสมกับกังหันลมที่มีความเร็วลมต่ำและมีความแปรปรวนสูง ประกอบด้วยระบบในการควบคุมการหมุนเพื่อรับลมและหลบลมในกรณีที่ลมมีความ

แปรปรวนและกรรโชกแรงมากเกินไป และระบบควบคุมการต่อกับระบบสายส่งไฟฟ้า (Grid connection) โดยการใช้ระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสั่งการและควบคุม (programmable logic controller; PLC) เป็นตัวควบคุมการทำงาน

3.5 การสรร้างกังหันลมต้นแบบ

สร้างกังหันลมทดสอบสำหรับเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยนำผลการออกแบบที่ได้มาประกอบและติดตั้งระบบกังหันลม กังหันลมทดสอบเป็นกังหันลมรูปแบบ 3 ใบพัด โดยออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 18.00 เมตร ฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมเก็บข้อมูลปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ วิเคราะห์ผลร่วมกับชุดวัดความเร็วลม ศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบด้านอื่นๆที่มีต่อประชาชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง ทั้งทางกายภาพ ภูมิทัศน์ และเสียง วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลลักษณะพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพของกังหันลมความเร็วลมต่ำ ประเมินค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาตามอายุการใช้งานของส่วนต่างๆ

ภาพที่3.3 ที่ตั้งกังหันลม 3 ใบพัดที่วัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา และทิศทางลม

จากภาพที่ 3.3 พื้นที่ทดสอบบริเวณวัดหงส์ทอง บ้านหงส์ทอง หมู่ที่ 9 ตำบลสองคลอง อำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่บริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่ราบลุ่มอยู่ติดชายทะเลอ่าวไทย ที่บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง พื้นที่สภาพเป็นป่าชายเลน ถึง 1 ใน 3 ของพื้นที่ทั้งหมด

บทที่ 4
การออกแบบและผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย ผลการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ตั้งกังหันทดสอบ ผลการออกแบบกังหันขนาด 18 กิโลวัตต์ และผลการสร้างกังหันลมทดสอบ

4.1 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของลม

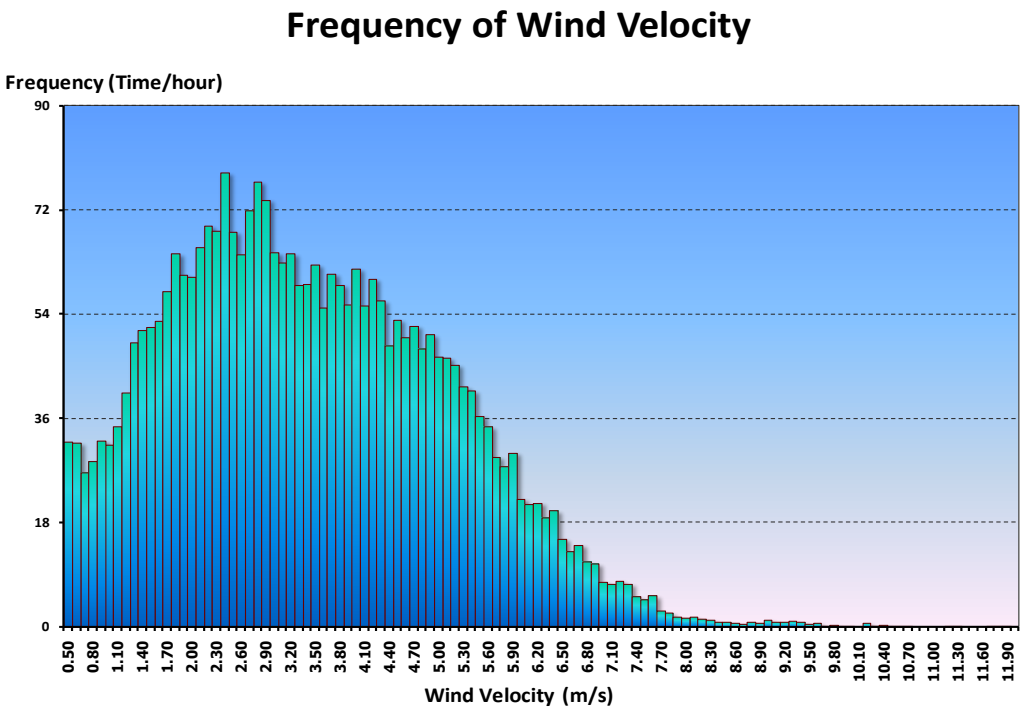
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ความเร็วลมจากบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ที่จะติดตั้งกังหันลมทดสอบ

ข้อมูลลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งอยู่ติดกับพื้นที่ทดสอบบริเวณวัดหงส์ทอง

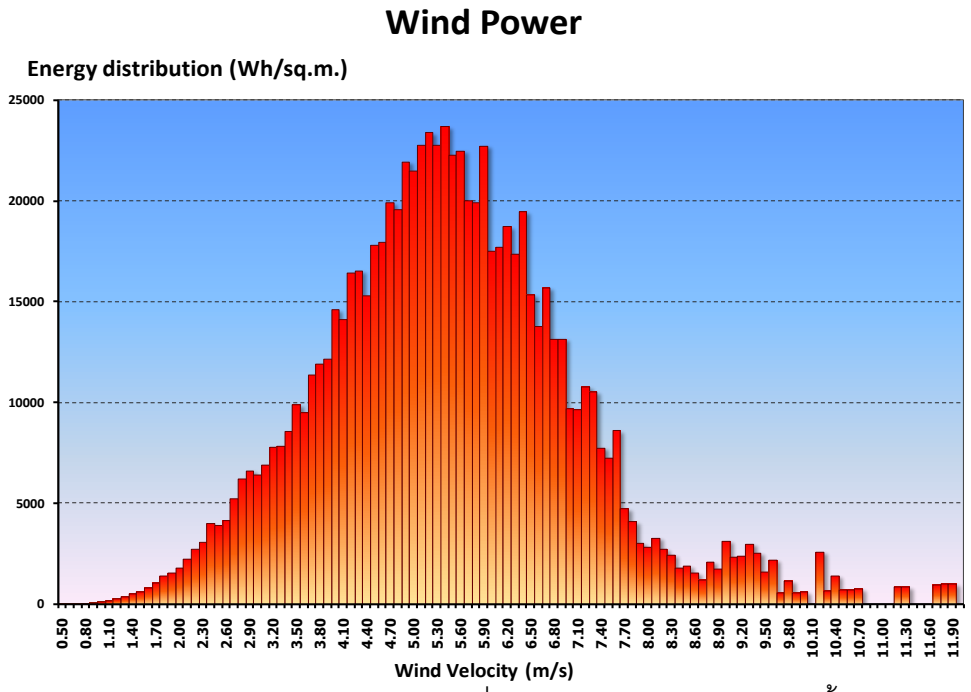
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมที่บริเวณวัดหงส์ทอง พบว่ากระแสลมมีความแปรปรวนสูง มีความเร็วตั้งแต่ 0.50 – 9.50 เมตรต่อวินาที

ผลการศึกษาและวิเคราะห์กำลังลม (wind power) ของกระแสลมที่บริเวณวัดหงส์ทอง พบว่ากระแสลมในช่วง 4.10 – 6.50 เมตรต่อวินาที มีกำลังลมสูงกว่า 15 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ผลการศึกษาและวิเคราะห์ความเร็วลมและกำลังลมพบว่าที่กระแสลมที่มีความเร็วลมต่ำกว่า 2.90 เมตรต่อวินาที จะมีกำลังลมต่ำกว่า 5 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ผลการศึกษาพฤติกรรมความแปรปรวนของกระแสลมกับช่วงเวลาที่เกิดลมพบว่า กระแสลมจะเริ่มคงที่ในเวลาประมาณ 10:00 – 12:00 น. โดยมีความเร็วตั้งแต่ 2.82 – 6.41 เมตรต่อวินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่4.1 ความเร็วลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ที่ความสูง 10 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง



ภาพที่4.2 กำลังลมบริเวณจังหวัดสมุทรปราการ ที่ความสูง 10 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง พลังงานที่ได้รับจากการคำนวณ

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมจากรูปที่ 4.2 พบว่ากังหันลมที่เหมาะสมกระแสลมลักษณะนี้ คือ ในช่วงความเร็วลมต่ำในช่วง 0.00 - 2.50 เมตรต่อวินาที กังหันลมจะยังไม่ทำงานเพราะกระแสลมในช่วงนี้มีกำลังลมต่ำมากไม่สามารถผลิตไฟฟ้า และถ้าเราวิเคราะห์ รูปที่ 4.3 จะเห็นว่า กำลังของลมต่ำมาก ในช่วง 2.50 – 3.00 เมตรต่อวินาที กังหันลมควรเริ่มมีการควบคุมทิศทางเพื่อปรับหน้าใบพัดรับลมเพื่อให้มีการเริ่มหมุนของใบพัด เมื่อความเร็วลมประมาณ 3.00 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่รอบแกนหมุนควรหมุนได้มากกว่า 1,000 รอบต่อนาที จะเป็นช่วงที่กังหันลมควรตัดระบบเริ่มทำงาน (cut in wind speed) ซึ่งเป็นช่วงที่ลมเริ่มมีกำลังพอที่จะนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เมื่อมีความเร็วลมอย่างต่อเนื่องถึง 6.50 เมตรต่อวินาที ควรผลิตไฟฟ้าได้เต็มที่ เนื่องจากจากการศึกษาพบว่าความเร็วลมในช่วงนี้มีความถี่ค่อนข้างสูง เมื่อมีความเร็วลมประมาณ 6.70 เมตรต่อวินาที กังหันลมควรทำงานอยู่บนพิกัดกำลังสูงสุดของตัวมันเองด้วยประสิทธิภาพสูงสุด (maximum) และในกรณีที่มีความเร็วลมสูงเกินไป กังหันลมควรหยุดทำงานทันที เพราะความเร็วลมที่นั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้

4.2 ผลการออกแบบกังหันลม

ผลการออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 18 กิโลวัตต์ ตามลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลม คือเป็นกังหันลมที่มีการตัดระบบเริ่มทำงาน (cut in wind speed) ที่ความเร็วลมประมาณ 3.00 เมตรต่อวินาที มีการผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องที่ 18.56 กิโลวัตต์ที่ความเร็วลมประมาณ 6.50 เมตรต่อวินาที มีการผลิตไฟฟ้าสูงสุด 20.50 กิโลวัตต์ที่ความเร็วลมประมาณ 6.70 เมตรต่อวินาที ประกอบด้วยการออกแบบชุดใบพัด การออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้า การออกแบบชุดระบบการควบคุม การออกแบบชุดโครงสร้างเสาและฐานราก การออกแบบระบบความปลอดภัย ประสิทธิภาพและการทำงานของกังหันลม รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนของกังหันลม

4.2.1 ผลการออกแบบชุดใบพัด

งานวิจัยนี้ออกแบบกังหันลม โดยมี ชุดใบพัด 3 ใบ ใบพัด (blade) เป็นส่วนที่ยึดติดกับแกนหมุน (rotor hub) ทำหน้าที่รับพลังงานจลน์ (kinetic energy) จากการเคลื่อนที่ของลม ใบพัดทำหน้าที่หมุนแกนหมุนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังเพลาแกนหมุนหลัก การออกแบบใบพัดใช้หลักการทางพลศาสตร์ของอากาศ เพื่อให้มีน้ำหนักเบาพอเหมาะและเหนียวทนทานรับกับแรงลมได้ดี มีขนาดเบาและมีความแข็งแรง

4.2.2 การหาประสิทธิภาพของกังหัน

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของกังหันลม (Cp) จากประสิทธิภาพของใบพัดประมาณ 45% ประสิทธิภาพของระบบเกียร์ทดรอบประมาณ 95% หรือการสูญเสียกำลังในเกียร์ทดรอบประมาณ 5% และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 85%

ดังนั้น ค่าประสิทธิภาพของกังหันลม = 0.45 X 0.95 X 0.85 = 0.36

4.2.3 การออกแบบขนาดความยาวของใบพัด

การคำนวณความยาวของใบพัด คำนวณจากค่าความเร็วลมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยจากการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลม กำหนดให้กังหันลมนี้ผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมระหว่าง 3.00 - 6.50 เมตรต่อวินาที ค่าประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับ 0.36 และกำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ของกังหันเท่ากับ 18 กิโลวัตต์

คำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใบพัด (Rotor Diameter, D) จากสมการ

$$D = \sqrt{\frac{P}{\left(Cp * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi}{4} * \bar{V}^3\right)}} \quad \text{.....[3]}$$

เมื่อ

D	คือ	เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด (m)
Cp	คือ	ประสิทธิภาพของกังหันลม
P	คือ	กำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้ (Watt)
V	คือ	ความเร็วลม (m/s)
ρ	คือ	ความหนาแน่นของลม = 1.23 กิโลกรัมต่อลูกบาตรเมตรที่ระดับน้ำทะเล (kg/m^3)

เมื่อแทนค่าจะได้

D = $(18000 / (0.36*(1.23/2)*(3.14/4)*6.5^3)^{1/2}$

= 19.38 เมตร

ดังนั้นรัศมีของใบกังหันลมที่มีความยาว = 9.81 เมตร

4.2.4 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากกังหันลม

การคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดของกังหันลม จากใบพัดมีรัศมียาว 9.81 เมตร มีพื้นที่วงกลมของใบพัดเท่ากับ 302.181 ตารางเมตร ความเร็วลมที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 6.50 เมตรต่อวินาที มีประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับ 0.36

คำนวณหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหัน จากสมาการ

$$P_e = \left(\frac{1}{2}\rho * A * \bar{V}^3\right) C_p \quad \text{.....[3]}$$

เมื่อ

Power (Pe) คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหัน (Watt)

Air density (ρ) คือ ความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.23 กิโลกรัมต่อลูกบาตรเมตรที่ระดับน้ำทะเล (kg/m^3)

Swept area (A) คือ พื้นที่วงกลมของใบพัด มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

Wind velocity (V) คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

Cp คือ ประสิทธิภาพของกังหันลม

เมื่อแทนค่าจะได้

Pe = (½ 1.23 * 302.181 * 6.5^3) * 0.36 Watt

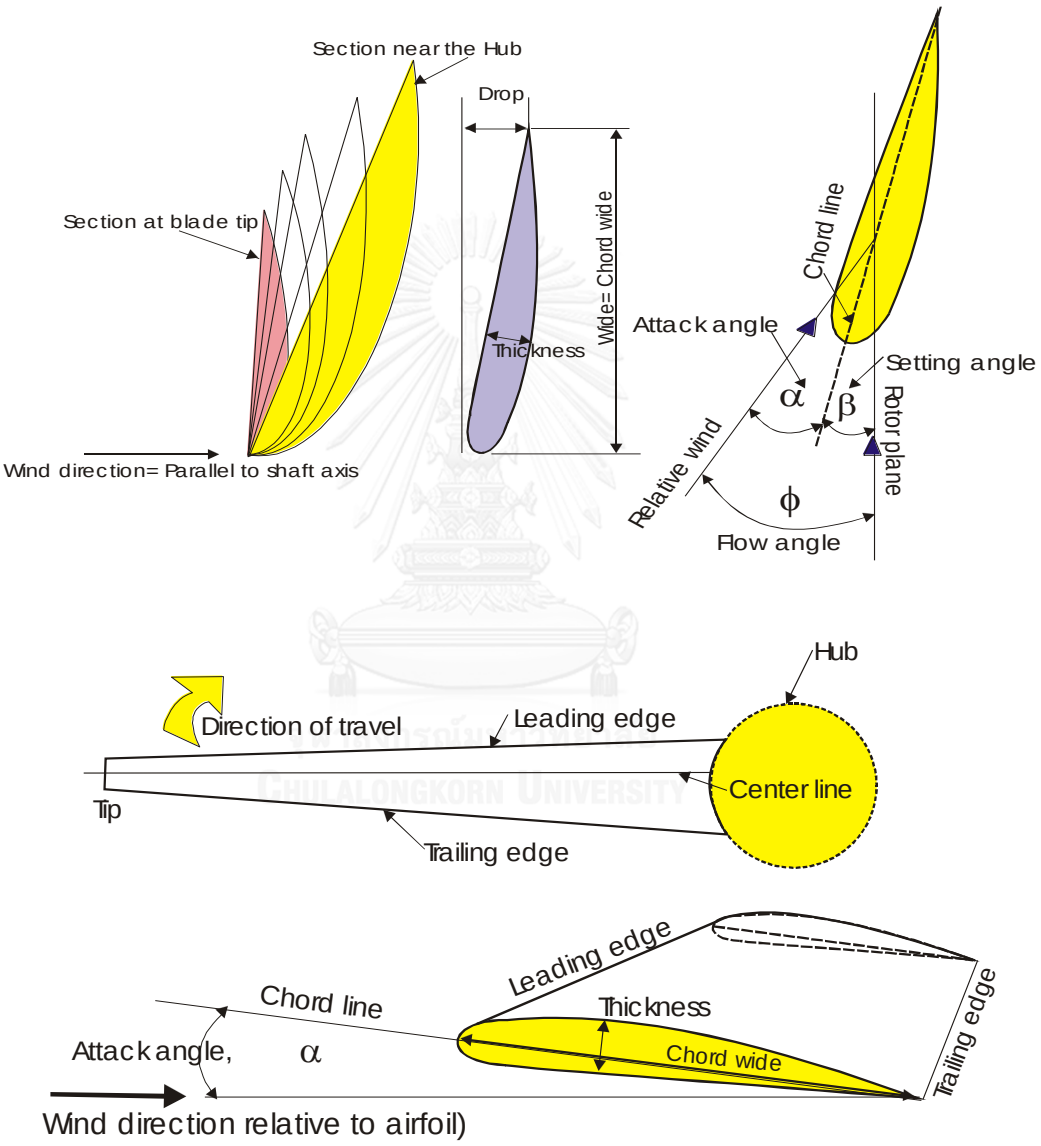
= 18,424 Watt

กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดของกังหันลมที่ความเร็วลม 6.50 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 18.42 กิโลวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.5 การคำนวณหามุมใบพัดของกังหันลม

การคำนวณหามุม (Setting Angle) (β) เมื่อกำหนดมุมปะทะ (α) = 4° และเลือกสัมประสิทธิ์การยกตัวของใบ $(C_l = 0.8)$ รวมทั้ง Tip Speed Ratio (TSR) =6 และลักษณะของมุมต่างๆ



ภาพที่4.3 มุมต่างๆในการออกแบบ [4]

เมื่อกำหนดระยะการตัดของใบกังหันแบ่งเป็น 10 ส่วน จะได้ระยะรัศมีเทียบจากจุดกึ่งกลางฮับ (Hub) ไปยังปลายใบเป็นระยะทาง Rs (m) ที่รัศมีความยาวใบกังหัน 9.81 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 19.38 เมตร พื้นที่ในการรับลม 302.46 ตารางเมตร สามารถคำนวณคำนวณหามุม (Setting Angle) ได้ตามสมการดังนี้

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{D}{3*Rs*Tsr}\right)*57.3-\alpha$$

ดังนั้นสามารถคำนวณหามุม Setting Angle (β) สำหรับที่ระยะรัศมี (Rs) ทั้งนี้ในการออกแบบใบพัดกังหันลม คณะผู้วิจัยใช้หลักการปรับมุมบิดที่ 7 องศา และเพิ่มความเร็วในการหมุนให้ของใบพัดให้เร็วขึ้น โดยศึกษาทฤษฎีเพื่อเปรียบเทียบศักยภาพหรือประสิทธิภาพของระบบใบพัด โดยออกแบบให้ใบพัดมีความยาว 9.69 เมตร และมีกำลังผลิตไฟฟ้าได้ 18 kW

การหาความกว้างของ Chord ระยะ Drop และความหนา

การหาความกว้างของ Chord (Cw) ระยะ Drop (m) และความหนา Thickness (m) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Cw = \left(\frac{1.4*D^2}{Rs*No.Blade*Cl*Tsr^2*\left(\cos\left(\frac{\beta}{57.3}\right)\right)^2}\right)$$

สมการคำนวณหาระยะ Drop

$$Drop = \left(Cw*\sin\left(\frac{\beta}{57.3}\right)\right)$$

สมการคำนวณความหนา Thickness

$$Thickness = 0.15*Cw$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

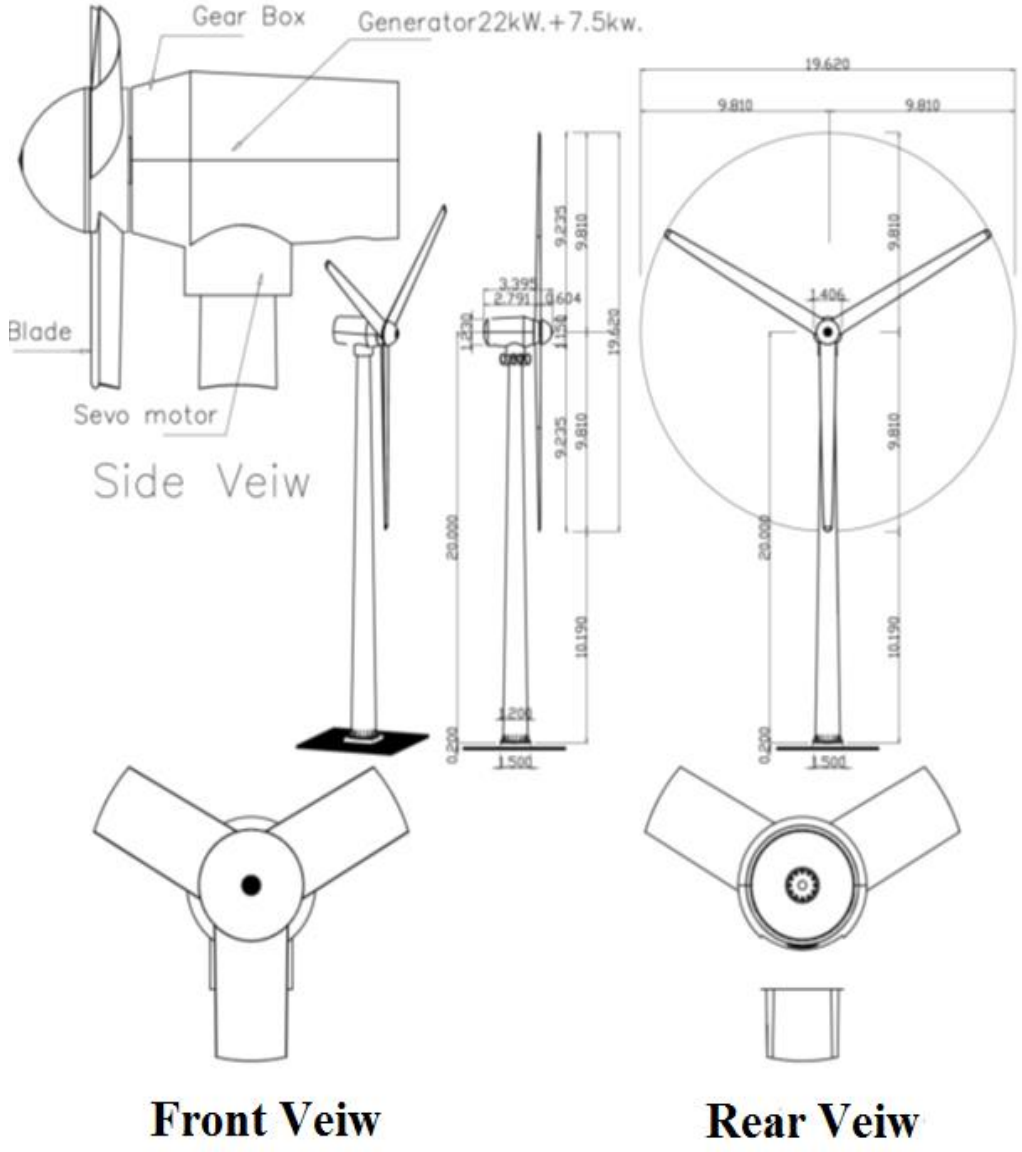
4.3 การเลือกใช้วัสดุของใบพัด

ใบพัดใช้วัสดุทำด้วยเหล็กเนื่องจากมีแรงลมกระทำที่ปลายใบทำให้เกิดแรงกด อาจทำให้ใบพัดกังหันบิดงอหรือกระแทกกับเสากังหันลมด้านหลังเกิดความเสียหาย ดังนั้นในการผลิตใบพัดของโครงการวิจัยระยะนี้จึงใช้เหล็กเคลือบสีกันสนิมเป็นวัสดุก่อสร้างหลักของใบพัดกังหันลม การลดน้ำหนักของใบพัดใช้รูปแบบโครงจัดวางเป็นระยะ ๆ เพื่อใช้ในการรับแรงจากผิวใบและยังช่วยการรับแรงทางด้านข้างเพื่อลดการบิดตัวของผิวใบพัด

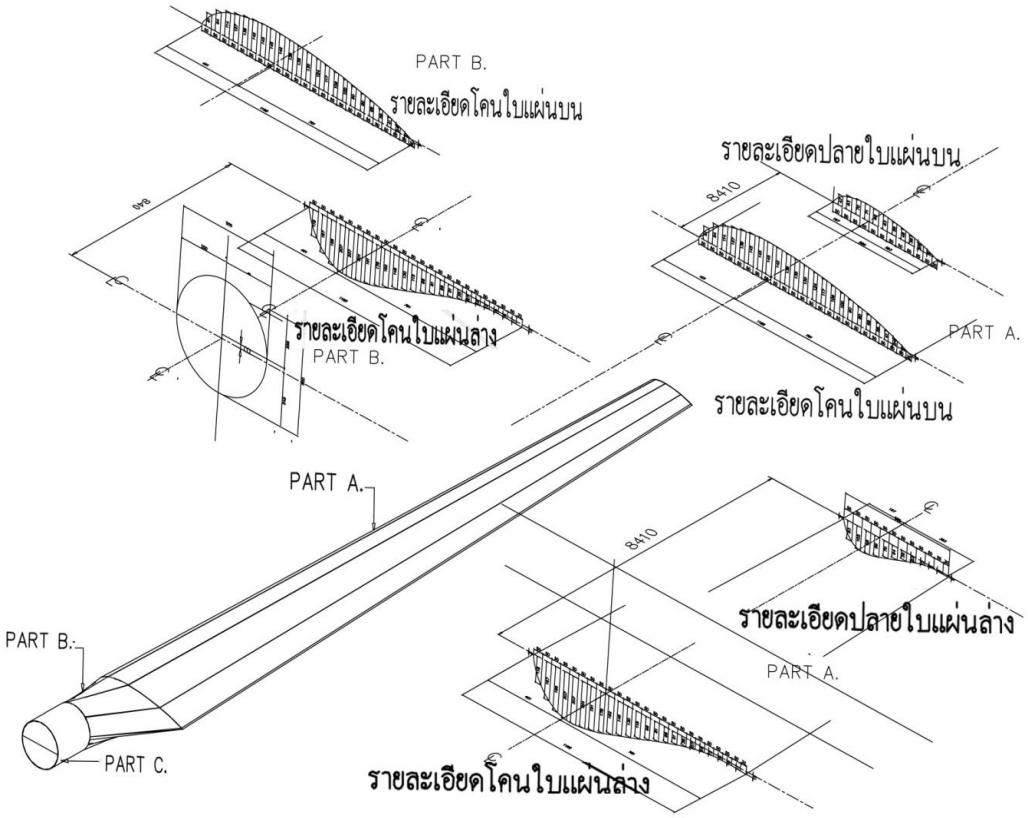
น้ำหนักของใบพัด การออกแบบใบพัดนั้นผู้วิจัยออกแบบใบพัด มีความยาว 9.69 เมตร ผิวเหล็กแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร ด้านหน้าและด้านหลังน้ำหนักผิวเหล็กแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร ของใบพัดประมาณ 300 กิโลกรัมต่อใบพัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 รูปแบบการออกแบบใบพัดกังหันลม

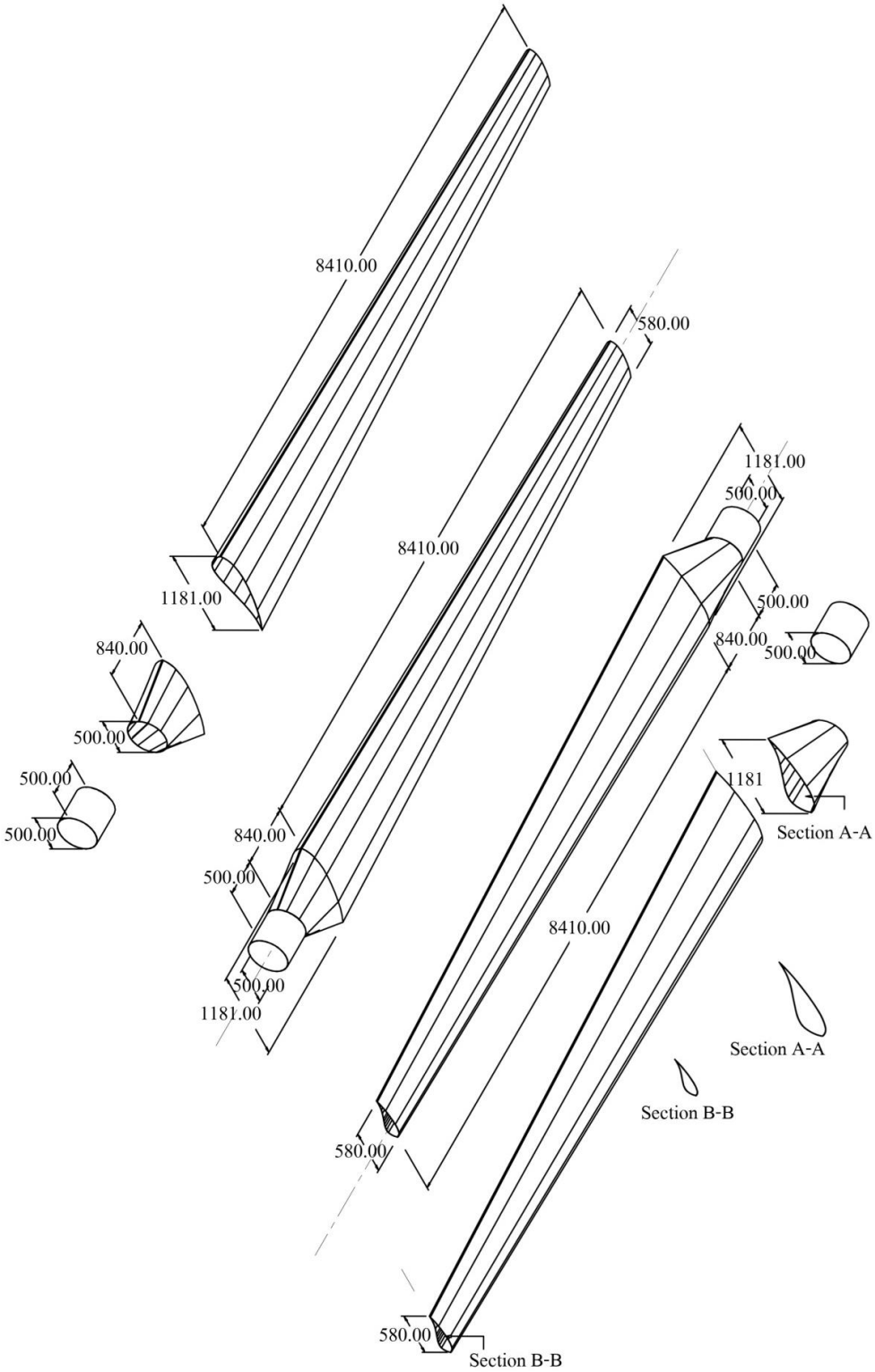


ภาพที่4.4 แบบใบพัดกังหันลมแบบ 3 ใบพัด

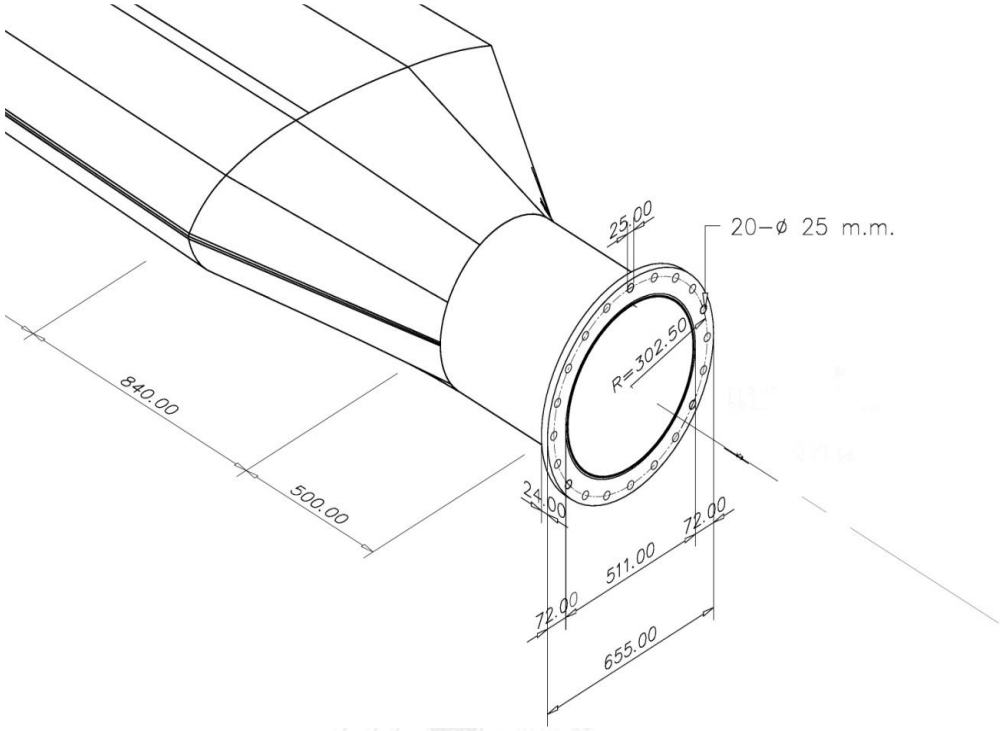


ภาพที่4.5 แบบใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด ผิวทำด้วยเหล็กแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร เคลือบสีกันสนิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่4.6 แบบใบพัดความยาว 9.81 เมตร ผิวเหล็กแผ่นหนา 4 มิลลิเมตร

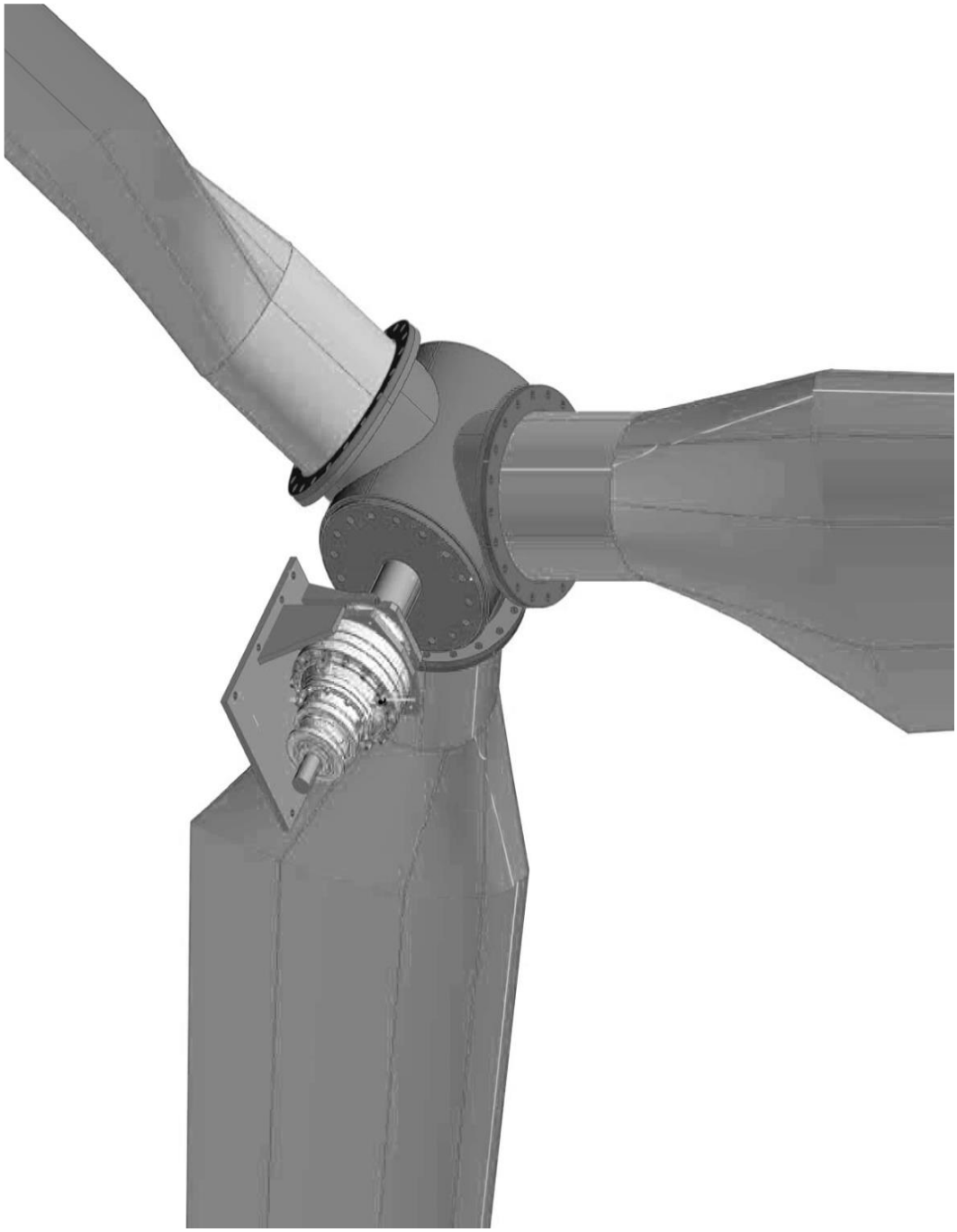


ภาพที่4.7 แบบหน้าแปลนติดใบกังหัน ทั้งแบบ 3 ใบพัด

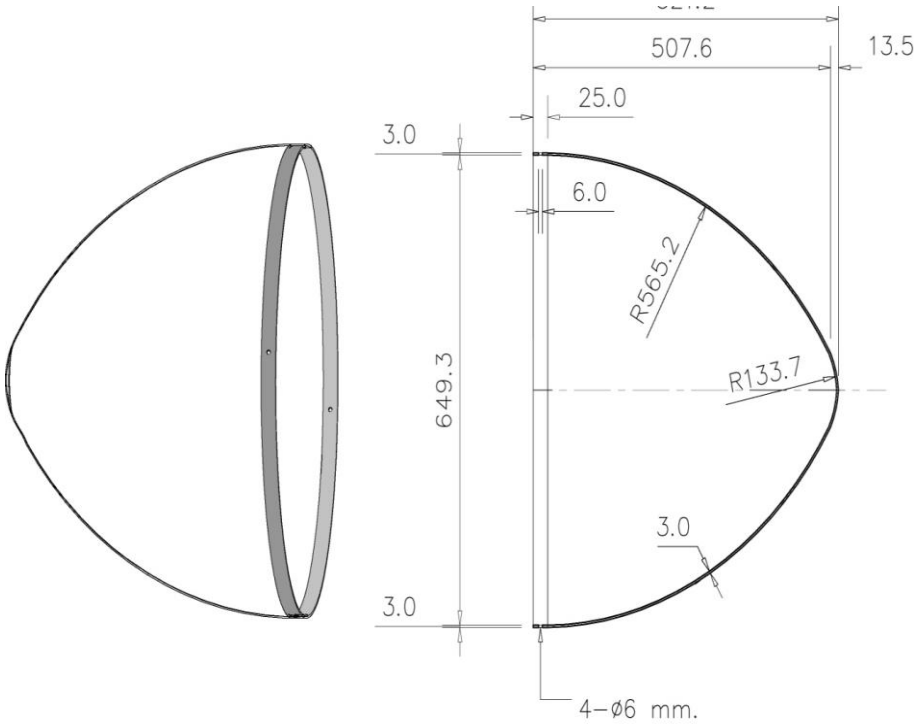
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่4.8 แบบใบพัดที่ประกอบเข้ากับจุดปรับหมุนใบพัด แบบ 3 ใบพัด

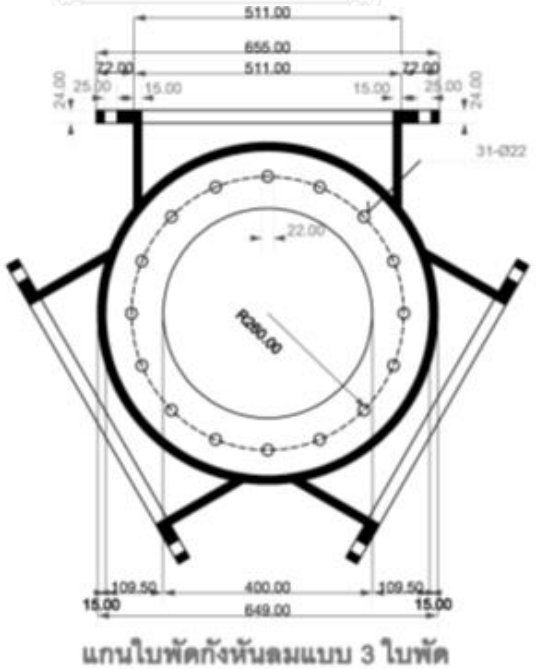
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



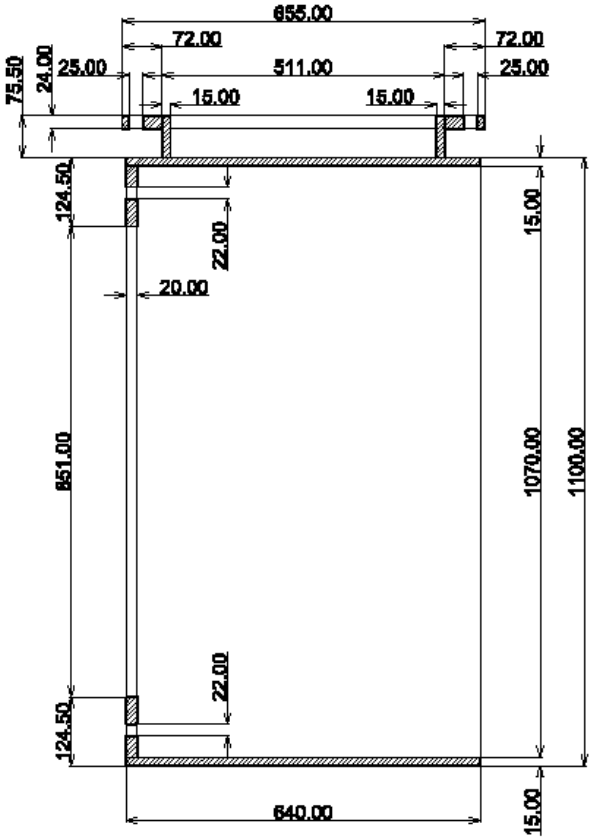
ภาพที่4.9 การติดตั้งใบพัดมองจากด้านหน้าแบบ 3 ใบพัด



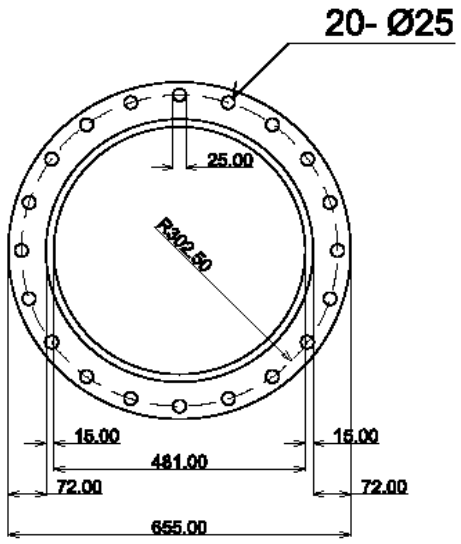
ภาพที่4.10 แบบครอบสวมด้านหน้า HUB ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด



ภาพที่4.11 ภาพตัดขวาง แกนใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด



ภาพที่4.12 ภาพตัดตามยาว แกนใบพัดกังหันลม 3 ใบพัด



ภาพที่4.13 ภาพ Blade mount ของกังหันลม 3 ใบพัด

4.4 การทำงานของใบพัดกับการเชื่อมต่อระบบอื่นของกังหันลม

กังหันลมความเร็วลมต่ำออกแบบให้เริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 3 เมตรต่อวินาที หรือเมื่อใบพัดกังหันลมหมุนด้วยความเร็ว 32.55 รอบต่อนาที ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบประมาณ 1,000 รอบต่อนาที โดยมีอัตราทด 30.72 ต่อ 1 รอบ ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีนี้มอเตอร์จะผลิตกระแสไฟฟ้าและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 18 kW กังหันลมนี้มีค่าประสิทธิภาพกังหันลมเท่ากับ 0.36

การทำงานของใบพัดกังหันลมนี้จะทำงานควบคู่ไปกับระบบเครื่องวัดความเร็วของกังหันลมที่ติดตั้งอยู่บริเวณหัวของกังหัน (nacelle) ทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้ชุดกำเนิดไฟฟ้าให้เริ่มทำงาน (start generator) เมื่อมีความเร็วรอบที่ 1,000 รอบต่อนาที และเมื่อกังหันลมผลิตไฟฟ้าแล้วจะใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

4.5 ผลการออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้า

ชุดกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (induction generator) เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีโครงสร้างเหมือนมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (induction motor) มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูกกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอื่น ดูแลรักษาได้ง่าย สามารถเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าได้โดยตรง และสามารถควบคุมได้ง่าย

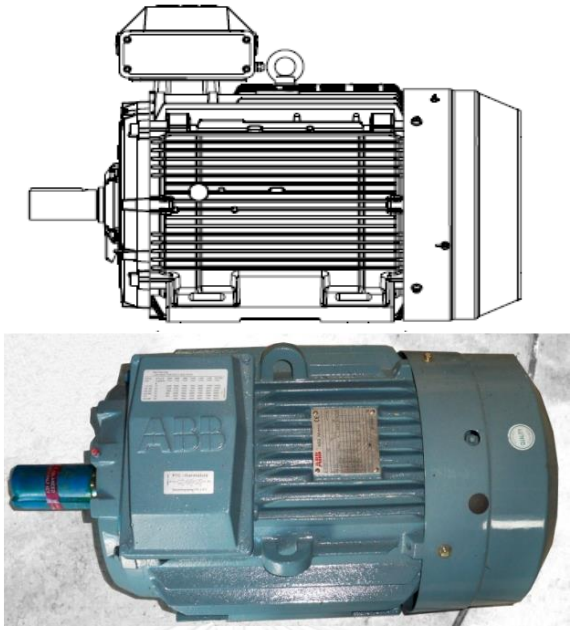
การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ เริ่มด้วยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าที่ชุดสเตเตอร์ (Stator) จะทำให้เกิดเกิดฟลักซ์ (Flux) เป็นขั้วแม่เหล็ก ไปเหนี่ยวนำแกนโรเตอร์ (Rotor) ให้หมุนตามสภาวะกระแสสลับ และเมื่อมีแรงลมจากใบพัดผ่านเกียร์ทดรอบมากระทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ในอัตราความเร็วที่มากกว่าแรงของฟลักซ์ จะทำให้เกิดกระแสไหลย้อนกลับของกระแสออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายย้อนกลับเข้าระบบสายส่ง

ส่วนประกอบของชุดกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ 2 ชุด ประกอบด้วย มอเตอร์ 15 กิโลวัตต์ และ 5.5 กิโลวัตต์ ขนาด 6 โพลส์ (poles) 380 โวลต์ กระแสสลับ มีความเร็วรอบประมาณ 980 รอบต่อนาที ติดตั้งอยู่ในแกนเดียวกันเกียร์ทดที่อัตราทด 1:30.72 หรือ 32.55 รอบกังหันต่อ 1000 รอบของมอเตอร์

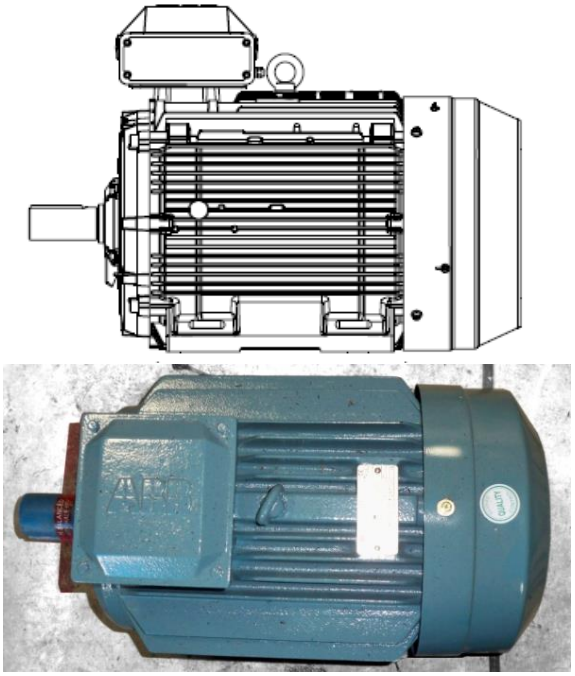
การทำงานของชุดกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลม คือเมื่อใบพัดที่หมุน 32 รอบต่อนาที ชุดเกียร์ทดจะทำให้มอเตอร์กำเนิดไฟฟ้าหมุนที่ความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นความเร็วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า มอเตอร์ทั้ง 2 ชุดจะผลิตไฟฟ้าเข้าสายส่งโดยผลิตไฟฟ้าจากมอเตอร์ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ หรือ 15 กิโลวัตต์ ตามความเหมาะสมของกระแสลม กล่าวคือช่วงเริ่มผลิตกระแสไฟฟ้า (cut in speed) ที่ความเร็วลมประมาณ 3.00 เมตรต่อวินาที มอเตอร์ขนาด 5.5 กิโลวัตต์จะเริ่มทำงานก่อน และเมื่อมีความเร็วลมมากพอ มอเตอร์ขนาด 15 กิโลวัตต์ก็จะเริ่มทำงาน ทำให้กังกันสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 20.5 กิโลวัตต์

ตารางที่ 4.1 รายละเอียด Induction Generator (มอเตอร์ 15 kW และ 5.5 kW) ขนาด 6 Poles

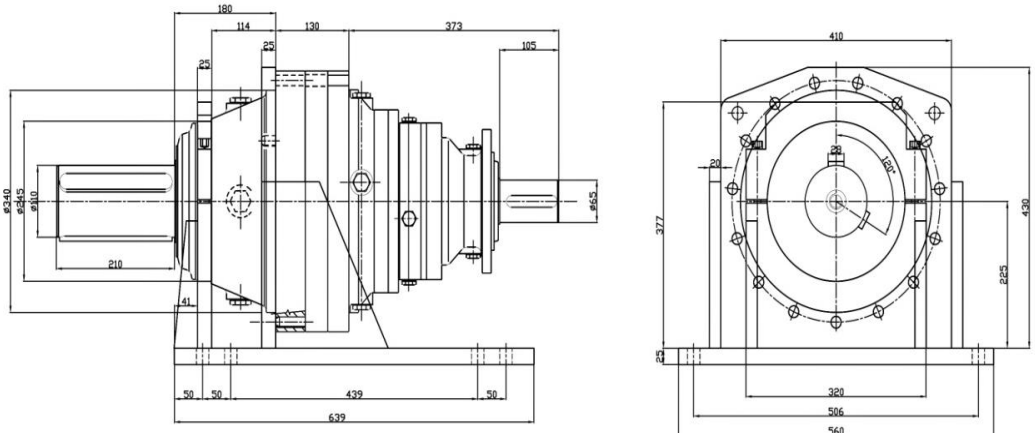
Output kW	Motor type		Product code		Speed r/min	Effi-ciency %	Power factor cos φ	Current I_N A	Current $\frac{I_s}{I_N}$	Torque T_N Nm	Torque $\frac{T_s}{T_N}$	Torque $\frac{T_{max}}{T_N}$
1000 r/min = 6 poles					380 V 50 Hz				Basic design			
0.18	M2QA	71 M6A	3GQA	073 301-••A	905	55.5	0.65	0.76	4.0	1.9	1.8	1.8
0.25	M2QA	71 M6B	3GQA	073 302-••A	885	60.0	0.65	0.97	4.0	2.7	1.8	1.8
0.37	M2QA	80 M6A	3GQA	083 301-••A	930	63.0	0.70	1.27	4.5	3.8	1.9	2.0
0.55	M2QA	80 M6B	3GQA	083 302-••A	925	64.5	0.72	1.8	4.5	5.68	1.8	1.9
0.75	M2QA	90 S6A	3GQA	093 101-••A	920	71.0	0.78	2.06	4.5	7.79	2.1	2.2
1.1	M2QA	90 L6A	3GQA	093 501-••A	920	73.0	0.78	2.94	4.5	11.4	2.2	2.3
1.5	M2QA	100 L6A	3GQA	103 501-••A	930	76.0	0.80	3.75	5.2	15.4	2.1	2.2
2.2	M2QA	112 M6A	3GQA	113 301-••A	935	78.5	0.78	5.46	5.2	22.5	1.9	2.1
3	M2QA	132 S6A	3GQA	133 101-••A	955	82.0	0.81	6.86	6.1	30	2.2	2.4
4	M2QA	132 M6A	3GQA	133 301-••A	955	84.0	0.81	8.93	6.1	40	2.5	2.8
5.5	M2QA	132 M6B	3GQA	133 302-••A	945	85.5	0.82	11.92	6.1	56	2.5	2.8
7.5	M2QA	160 M6A	3GQA	163 301-••A	970	87.5	0.80	16.28	5.6	73	2.1	2.2
11	M2QA	160 L6A	3GQA	163 501-••A	970	88.0	0.81	23.45	5.6	108	2.2	2.3
15	M2QA	180 L6A	3GQA	183 501-••A	980	89.0	0.84	30.49	5.6	146	2.1	2.2
18.5	M2QA	200 L6A	3GQA	203 501-••A	975	90.0	0.84	37.18	5.6	181	2.1	2.2



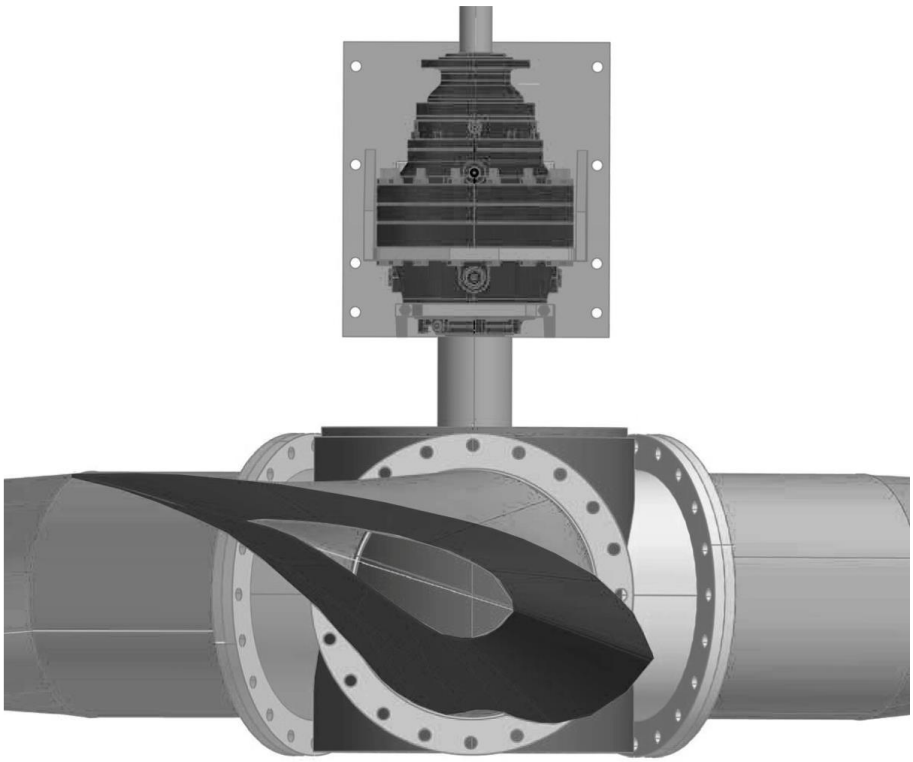
ภาพที่4.14 MOTOR 15.5 KW/20HP, 6 POLES ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด



ภาพที่4.15 MOTOR 5.5 KW/7.5HP, 6 POLES ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด



ภาพที่4.16 Brevini Planetary Gearbox MOTOR 20 KW ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด



ภาพที่4.17 รูปแบบการติดตั้งแกนเพลาและระบบเกียร์ควบคุมใบพัด ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด

4.6 ผลการออกแบบชุดระบบการควบคุม

กังหันลมนี้ออกแบบชุดควบคุมทั้งระบบอัตโนมัติและระบบควบคุมด้วยมือ (manual) แบ่งเป็นการทำงาน 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ควบคุมการทำงานของกังหันลม และส่วนที่ 2 ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สายล่ง

4.7 ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลม

ระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมทำหน้าที่หมุนหน้ากังหันลมรับลม และหมุนหน้ากังหันลมหลบลมในกรณีที่มีความเร็วลมสูงเกินไป โดยมีรายละเอียดการควบคุมการทำงานของกังหันลมดังนี้

ในขณะที่กังหันลมพร้อมใช้งาน หน้าใบพัดกังหันลมจะปรับให้ใบพัดอยู่ในตำแหน่งขนานกับทิศทางลม ในตำแหน่งนี้ใบกังหันจะไม่รับแรงกระทำจากลม และจะรอจนกว่าสัญญาณจากเครื่องวัดความเร็วลม (wind speed meter) จะวัดความเร็วลมได้ 2.50 เมตรต่อวินาที ระบบควบคุมอัตโนมัติหรือระบบควบคุมด้วยมือจะสั่งให้แกนคอหมุนรับทิศทางกังหันลม (yaw drive)

ปรับหน้ารับกังหันลมหมุนไปในตำแหน่งตั้งฉากเข้าหาทิศทางลม ตามสัญญาณจากเครื่องวัดทิศทางลม (wind direction measurement) ระบบควบคุมอัตโนมัติจะสั่งปลดเบรกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ใบพัดเริ่มหมุนตามความเร็วลมที่กระทำที่ตัวใบพัด

ระบบควบคุมตรวจสอบความเร็วของเกียร์ที่แกนรอบแกนมอเตอร์เมื่อมีความเร็วถึง 975 รอบต่อนาทีระบบจะสั่งให้มอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์เริ่มทำงาน (motor 5.5 kW cut in)

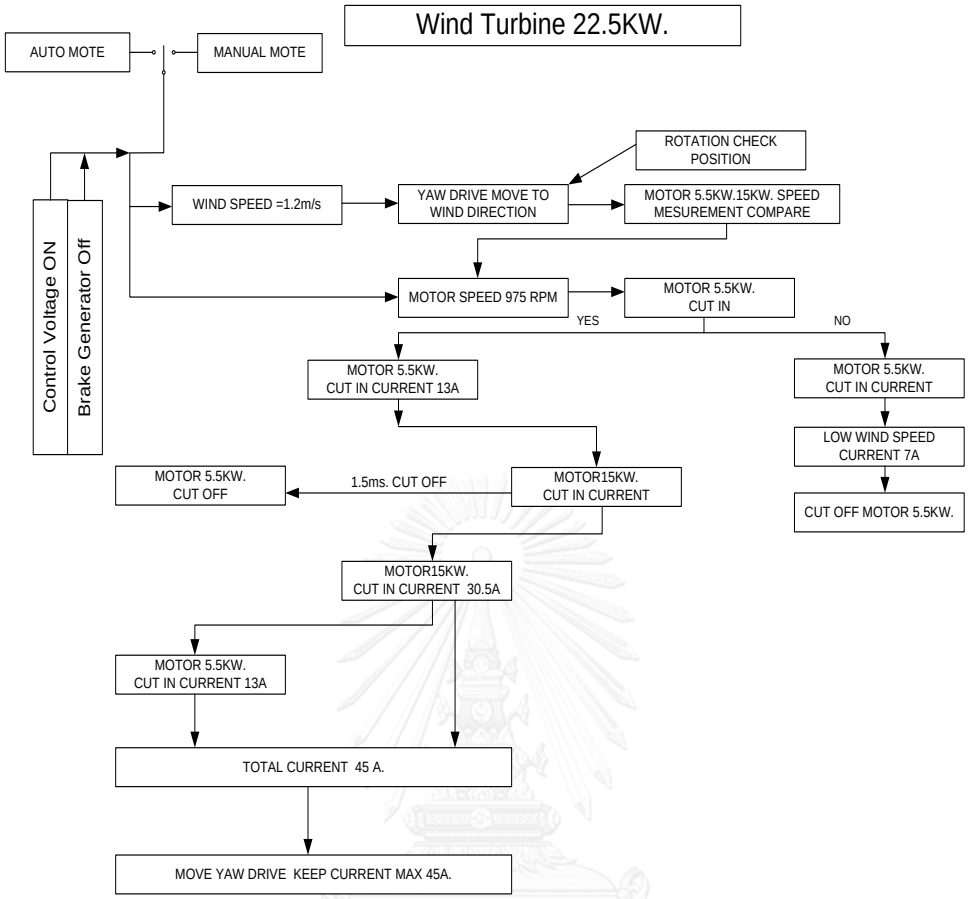
ระบบควบคุมตรวจสอบกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์ ถ้ามีกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 7 แอมแปร์ ระบบจะสั่งตัดออก (cut off) และเริ่มกระบวนการวัดความเร็วของเกียร์ที่แกนรอบแกนมอเตอร์ใหม่ แต่ถ้าตรวจสอบกระแสไฟฟ้าแล้วได้ 13 แอมแปร์ เกินระยะเวลา 2.5 วินาที ระบบควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์ 15 กิโลวัตต์เริ่มทำงาน (motor 15 kW cut in) ถ้ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ผลิตได้ 13 แอมแปร์ เป็นระยะเวลา 1.5 วินาที ระบบจะสั่งให้มอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์หยุดการจ่ายไฟฟ้า

ระบบควบคุมตรวจสอบกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ 15 กิโลวัตต์ ผลิตได้ 30.5 แอมแปร์ ระบบควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์ ทำงานอีกครั้งหนึ่ง เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าเต็มที่ (full load output) ที่กระแส 45 แอมแปร์ และระบบควบคุมตรวจสอบต่อไปว่ากระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่จ่ายออกจะต้องสูงสุดอยู่ที่ 45 แอมแปร์ หากกังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าเกิน 45 แอมแปร์ ระบบควบคุมจะสั่งให้แกนคอหมุนรับทิศทางกังหันลมปรับหน้าใบพัดหลบกระแสลมครั้งละ 5 องศา องศา เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่และไม่เกินพิกัดกระแสที่จ่ายออก แต่ในทางกลับกันถ้ากระแสไฟฟ้าลดลง ระบบควบคุมจะสั่งให้แกนคอหมุนรับทิศทางกังหันลมปรับหน้าใบพัดกลับมายังทิศทางรับลมตามสัญญาณจากเครื่องวัดทิศทางลม

การนับจำนวนจากการหมุนรอบตัวเองด้วย (potentiometer) ทั้งการวนซ้ายและ วนขวา 5 รอบ หลังจากหมุนไปชนตำแหน่ง 5 รอบแล้ว จะหมุนกลับมาที่ตำแหน่งศูนย์ (zero)

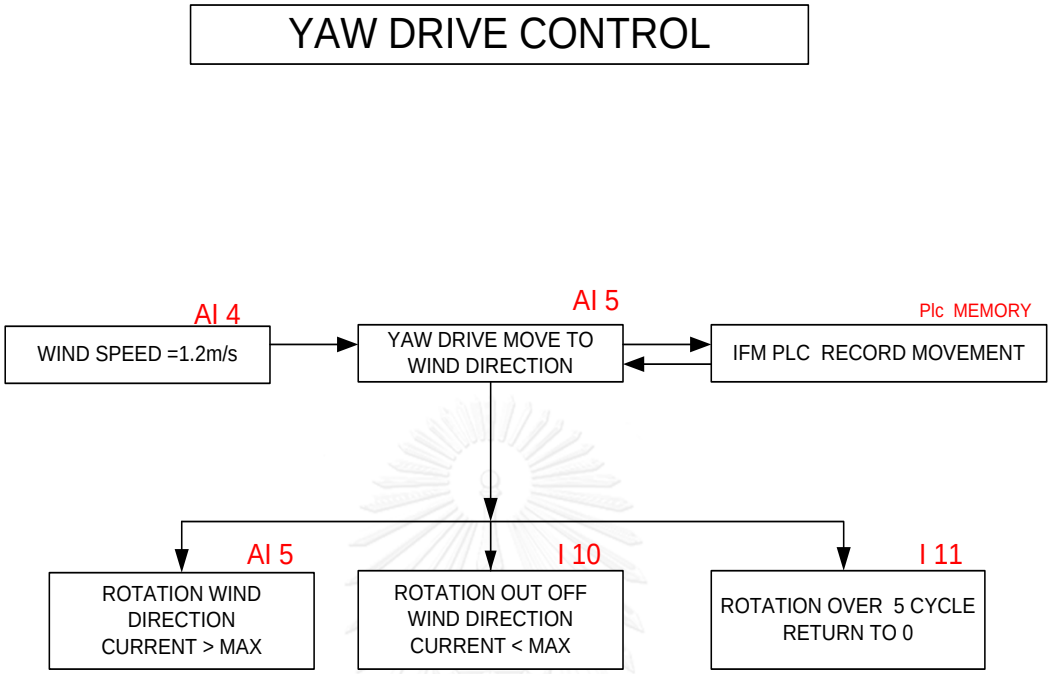
การหยุดทำงานเนื่องจากความผิดปรกติ เมื่อระบบส่งสัญญาณ (Sensor) จากความเร็วของใบพัดเร็วผิดปรกติเกิน 36 รอบต่อนาที ระบบควบคุมจะสั่งให้แกนคอหมุนรับทิศทางกังหันลมหมุนในตำแหน่งตรงข้ามทิศทางลม ระบบจะทำการตรวจสอบ และคำนวณเปรียบเทียบ ความเร็วรอบตลอดแกนเพลา ว่ามีความผิดปรกติเกิดใดขึ้น แล้วแจ้งเตือน (alarm) ที่คอมพิวเตอร์

การหยุดการทำงานเนื่องจากเหตุการณ์จำเป็นต่างๆประกอบด้วย กังหันลมต้องทำการยึดตรึงใบพัดและปิดกระแสไฟฟ้า (off power) ทั้งหมดเมื่อมีการหยุดซ่อมบำรุง ระบบเบรกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจร (grid line fault) และระบบจะทำการตัดระบบออก (cut off) เมื่อเกิดอุณหภูมิสูงเกินไป (over temp)



ภาพที่4.18 โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่4.19 หลักการทำงานของระบบควบคุมการปรับทิศทางการรับลม

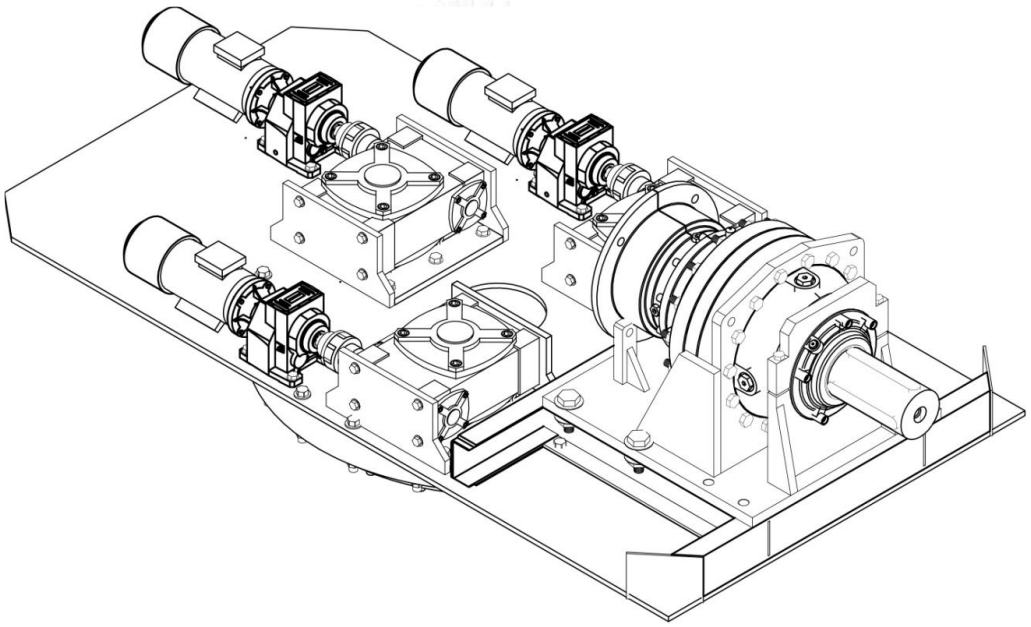
4.8 ระบบควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่สายส่ง

การออกแบบระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง ออกแบบตามแบบไดอะแกรมเส้นเดียว (single line diagram) และออกแบบตาม ระบบความปลอดภัยของการผลิตกระแสไฟฟ้าที่กำหนดให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ โดยมีหลักการทำงานดังนี้

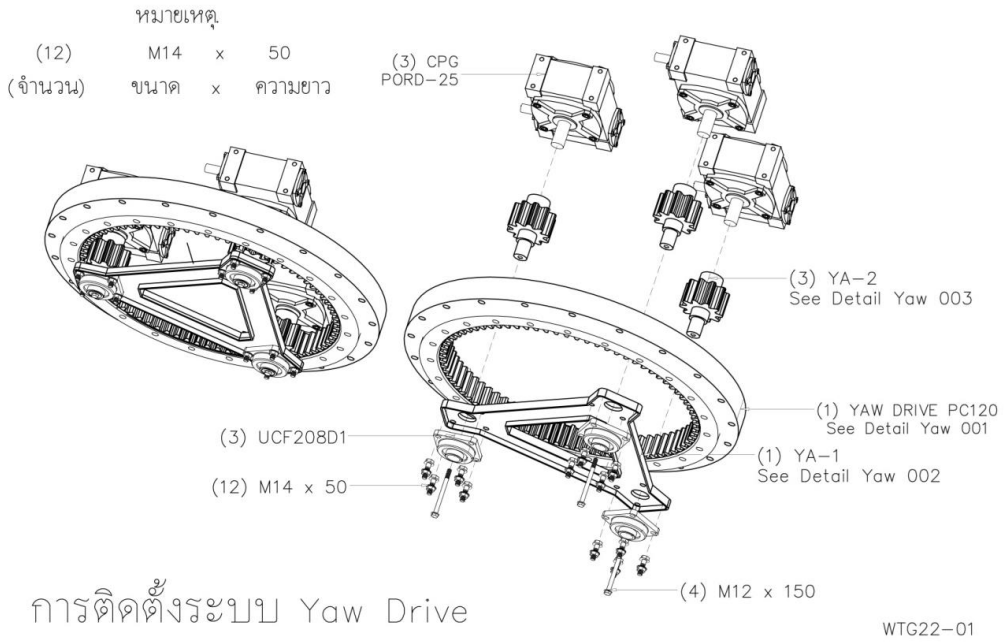
หลังจากจ่ายไฟเข้าหม้อแปลงแล้วรีเลย์ป้องกัน (protective relay) มีการตรวจสอบ ดังนี้ ตรวจสอบ 27/59 แรงดันสูง แรงดันต่ำ สั่ง Open Circuit ACB 1 ระบบป้องกัน 50/51 50N/51N ของกระแสเกินด้านเฟสและกราวด์ สั่ง Open Circuit ACB 1,WIND 1,2 ระบบป้องกัน 81 ความถี่ต่ำและความถี่เกิน โดย สั่ง Open Circuit ACB 1 ถ้ารีเลย์ป้องกัน (protective relay) ตรวจสอบแล้ว ไม่พบความผิดปกติ ระบบจะสามารถเริ่มต้นผลิตไฟฟ้า (start induction generator) ได้ตามปกติ

4.9 ผลการออกแบบแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม

แกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม (yaw drive) เป็นตัวขับเคลื่อนหมุนแกนหมุนใบพัด ประกอบด้วยเกียร์ทดรอบสองตัวต่อพ่วงกัน ที่เกียร์ทดรอบของมอเตอร์ อัตราทด 1 รอบ ต่อ 10 และมี วอล์มเกียร์ ต่ออนุกรมอีกหนึ่งตัว ตัว ที่อัตราทด 1 รอบ ต่อ 10 รอบ รวมเป็นที่อัตราทด 500 รอบ ต่อ 1 รอบ จำนวน 3 ชุด และมอเตอร์ควบคุมการหมุน (yaw motor) ความเร็วรอบอยู่ที่ 1500 รอบต่อนาที ทำหน้าที่บังคับและควบคุมกลไกการขับเคลื่อนหมุน แกนคอหมุนรับทิศทางกังหันลมทำหน้าที่ปรับมุมของกังหันลมให้ใบพัดกังกันลมรับแรงลมตามทิศทางการเคลื่อนที่ของลม และชะลอการหมุนหรือหยุดหมุนของใบพัด ตามระบบควบคุมของกังหันลม



ภาพที่4.20 ชุดขับเคลื่อนแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม (yaw drive) ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด



ภาพที่4.21 การติดตั้งระบบแกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลม (yaw drive) ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด

4.10 ผลการออกแบบชุดโครงสร้างเสาและฐานราก

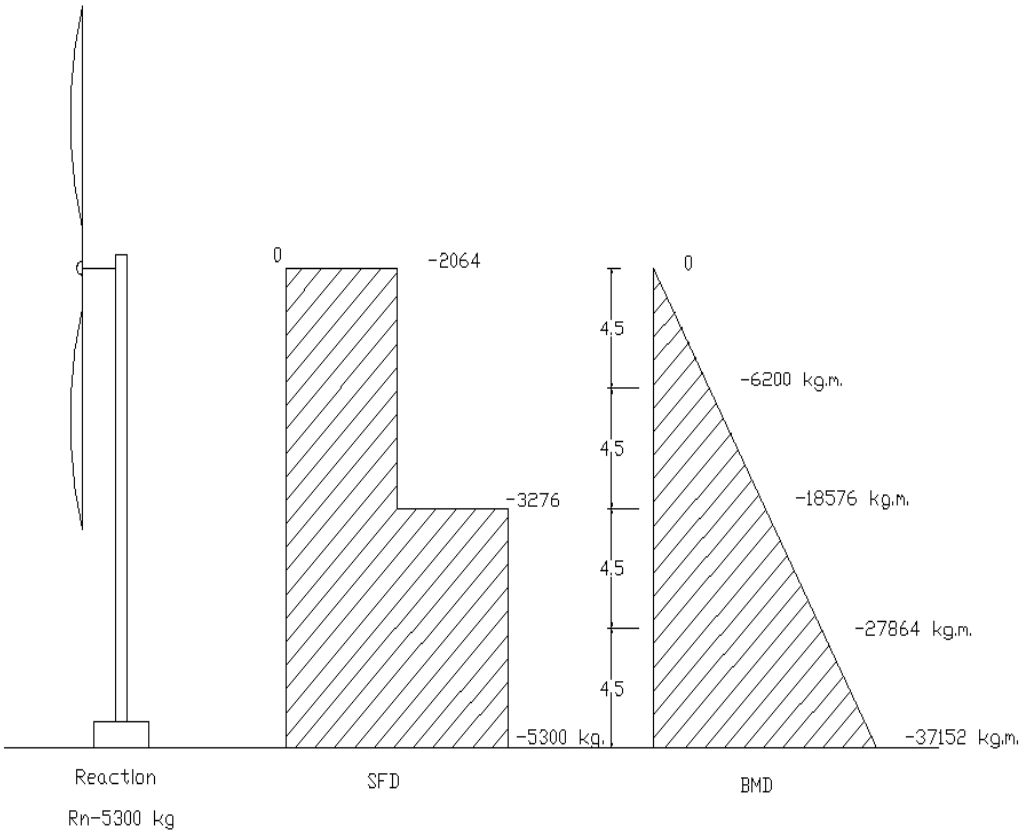
ชุดโครงสร้างเสาและฐานราก ประกอบด้วยชุดเสา (tower) และฐานราก (foundation)

Chulalongkorn University

4.10.1 ผลการออกแบบชุดเสา

ชุดเสา (Tower) ทำหน้าที่รับน้ำหนักส่วนที่เป็นชุดแกนหมุน ใบพัด และตัวห้องเครื่องที่อยู่ข้างบน แรงที่กระทำกับชุดเสา ประกอบด้วย น้ำหนักของกังหัน และแรงปะทะของลมที่มากระทำกับต่อพื้นที่กวาดใบพัดได้ใบพัด ชุดเสากังหันลมในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อดีของระบบนี้คือ ขั้นตอนการก่อสร้างไม่ซับซ้อน ประชาชนทั่วไปสามารถสร้างได้ และราคาไม่สูงราคาของเสาต้นที่ทำการวิจัยนี้ ราคาอยู่ที่ 230,000 บาท แต่จากการสอบราคาจากผู้ผลิต ราคาเสาเหล็ก เคลือบกาวาไนท์ กันสนิม ราคาอยู่ที่ 650,000 บาท ซึ่งจะเห็นว่าราคาถูกกว่ากันมาก

ความสูงของเสาผู้วิจัยได้คำนวณความสูงของเสาเป็น 2 เท่าของความยาวของใบ คือประมาณ 18 เมตร ซึ่งจากการศึกษากังหันลมทั่วไป ความสูงต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของความยาวของใบ แต่เนื่องจากสถานที่ติดตั้งกังหันลม มีอาคารและต้นไม้ สูงประมาณ 8 เมตร บังทิศทางของลม ดังนั้นผู้วิจัยจึง ต้องการตั้งใบกังหันให้สูงกว่า สิ่งกีดขวางทางลม จึงเลือกความสูงที่ 18 เมตร



ภาพที่4.22 การคำนวณโครงสร้างชุดเสากังหันลม

รายการคำนวณโครงสร้างชุดเสาของกังหันลม

1. ที่ระยะ 13.5 – 18.00 m.	Moment	=	37,152	kg*m
	As	=	35.10	cm2
	Use	=	DB 25 mm @ 0.10 m (47.08 cm2)	
	St	=	RB 6 mm @ 0.05 m	
2. ที่ระยะ 9.00 m	Moment	=	18,576	kg*m
	As	=	23.40	cm2
	Use	=	DB. 20 mm @ 0.10 (28.40 cm2)	
3. ที่ระยะ 4.50 m	Moment	=	9,288	kg*m
	As	=	11.70	cm2
	Use	=	DB. 16 mm @ 0.10 (19 cm2)	
เหล็กปลอก (St) ตลอดความยาวเสา		=	RB 6 mm @ 0.05 m	

คิดพื้นที่เสาและการรับแรง

พื้นที่บน	=	2,513	cm2
พื้นที่ล่าง	=	6,597	cm2
ปลายเสารับ Load ได้	=	92,651	kg
โคนเสารับ Load ได้	=	243,235	kg
เสาหนัก	=	19,677	kg

*โคนเสารับ Load ได้จริง (คิดเสายาว)

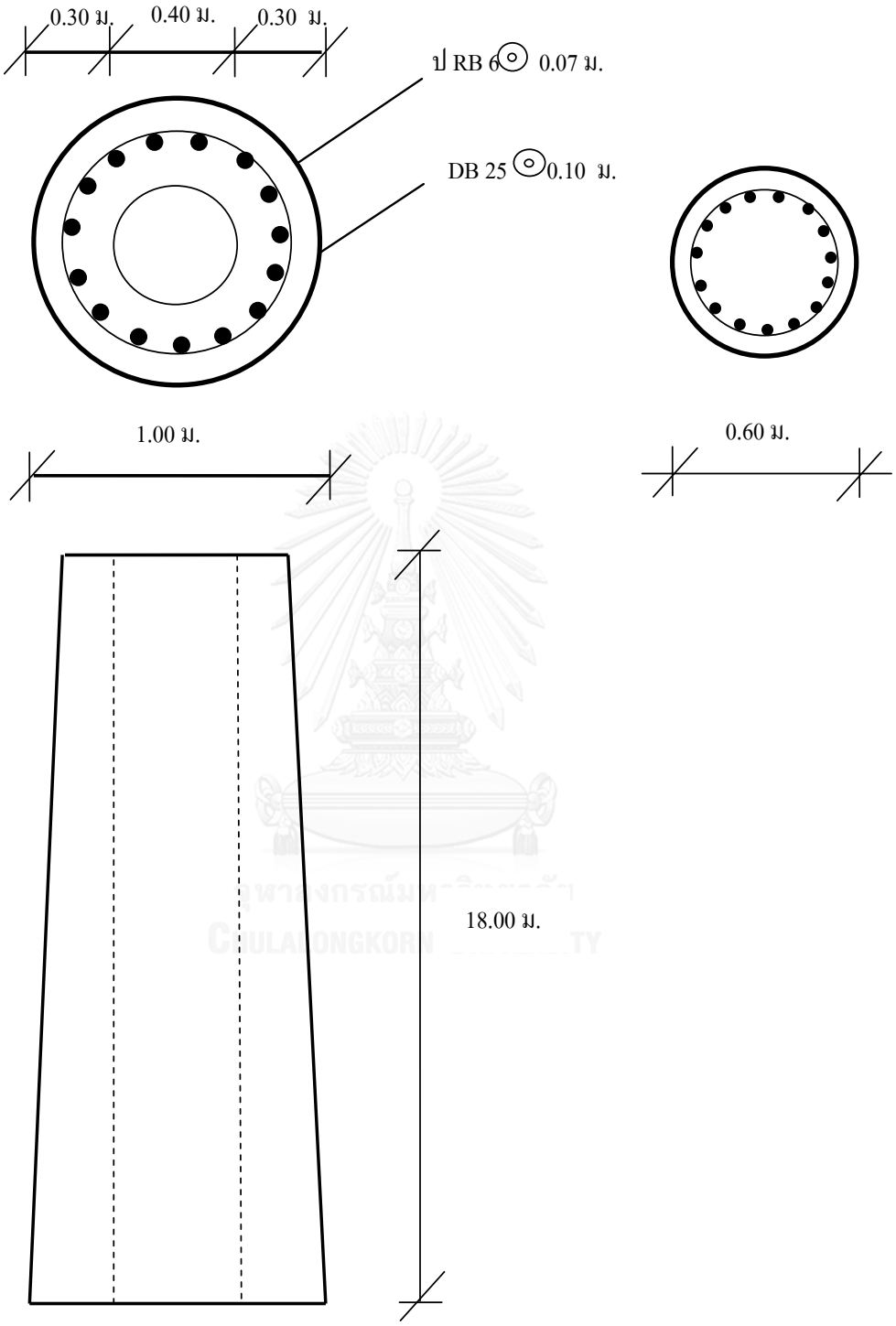
P’	=	184,858	kg

ช่วง 1-2 DB 25 mm @ 0.10 m

ช่วง 3 DB 20 mm @ 0.10 m

ช่วง 4 DB 16 mm @ 0.10 m

(ระยะทาบเหล็ก แต่ละช่วง 1.00 เมตร)



ภาพที่4.23 แบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 18.00 เมตร ของกังหันลม 3 ใบพัด
เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานเสาเท่ากับ 1.00 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวเสาเท่ากับ 0.60 เมตร

4.10.2 ผลการออกแบบฐานราก

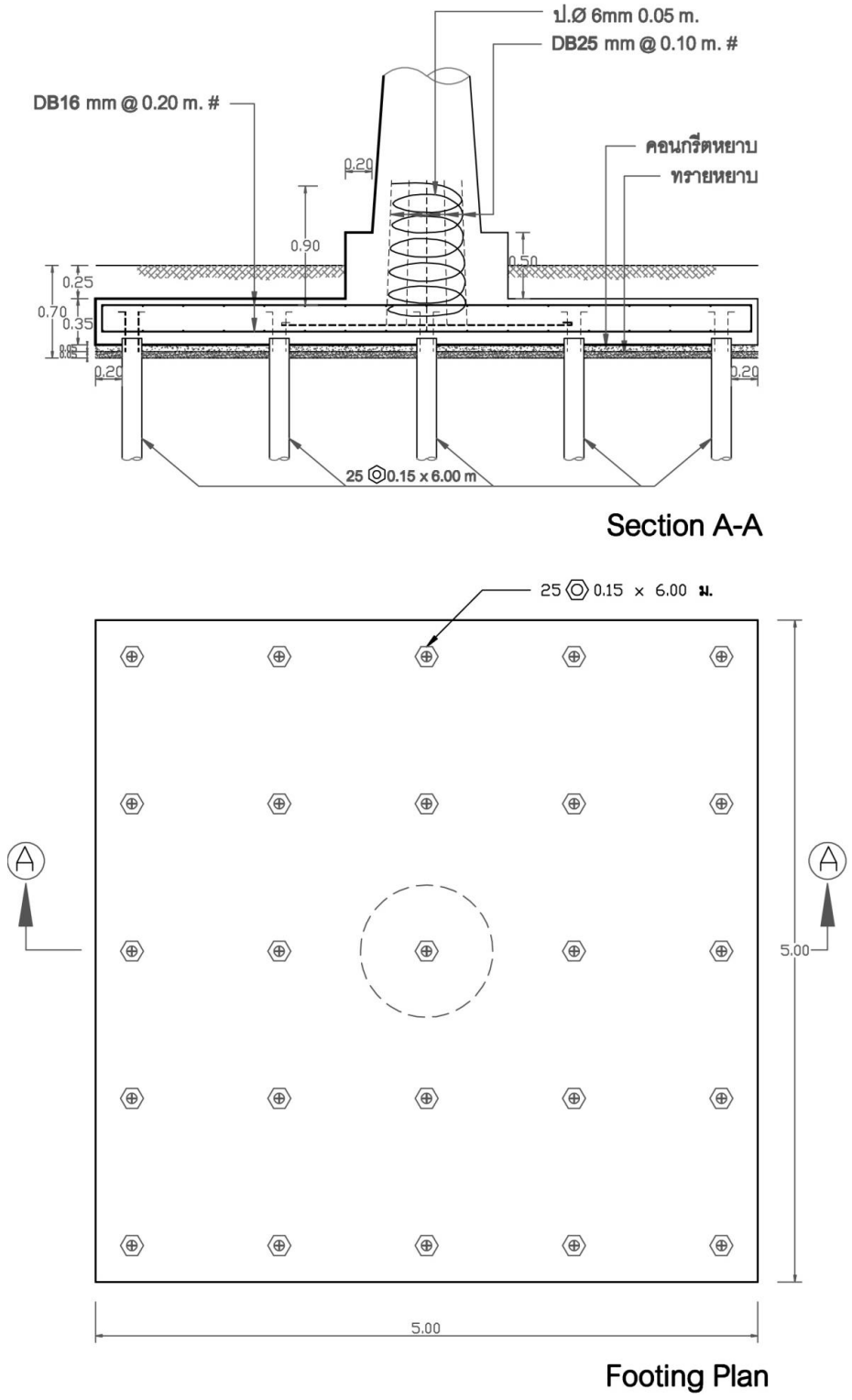
ฐานราก (Foundation) เป็นส่วนที่รับน้ำหนักทั้งหมดของชุดกังหันลม ฐานรากของกังหันลมในงานวิจัยนี้เป็นฐานคอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่บนเสาเข็มที่ได้รับการคำนวณออกแบบ และก่อสร้างตามหลักวิศวกรรม

รายการคำนวณโครงสร้างฐานรากของกังหันลม

น้ำหนักใบพัด	=	1,500	kg
น้ำหนักเครื่อง	=	500	kg
น้ำหนักเสา	=	21,714	kg
น้ำหนักทั้งหมด	=	23,714	kg
Soil of Cap	=	2,000	kg/m2
Area of F	=	23,714	=18.57 m2
	=	4.30	
		5.00 m2 (F1 = 5.00 x5.00 = 25 m2)	
Use	=	5 x 5 = 25 > 18.57 m2	
W	=	1,486 < 2,000 kg/m2	
Moment	=	2,972 kg*m	
d	=	17.80	= 30 cm
V	=	37,016 kg	
b	=	4 [100 + 30]	= 520
v	=	2.37 < 6.89 ksc	
As	=	7.48 cm2	

Use	=	DB 16 mm @ 0.20 m# (10.35 cm2)	
*น้ำหนักทั้งหมดรวม Moment ที่กระทำต่อดิน	≈	+ 43,000	kg
* ความสามารถในการรับน้ำหนักของดิน	≈	- 25,000	kg
ขาดอยู่	≈	+ 18,000	kg
ใช้เสาเข็ม 15 x 6.00 รับน้ำหนักได้ (25 ตัน)	≈	- 25,000	kg
ฐานรากยังสามารถรับนำหนักบรรทุกได้อีก	=	7,000	kg

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่4.24 ผังและรูปตัดฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก ของกังหันลมทั้งแบบ 3 ใบพัด

4.11 ผลการออกแบบระบบความปลอดภัย

ระบบควบคุมที่เชื่อมโยงกับชุดคำสั่งในระบบควบคุมการทำงานของกังหันลมที่ออกแบบให้กังหันสามารถหมุนหลบกระแสลมให้รับกระแสลมน้อยลงในกรณีที่กระแสลมมีความเร็วสูงมากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อตัวกังหันและระบบอื่นๆ แต่กังหันลมยังคงผลิตไฟฟ้าได้คงที่ด้วยตัวเอง

เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนในกังหัน ทำหน้าที่ตรวจวัดความสั่นสะเทือนของกกังหันลมหากกังหันเริ่มมีการสั่นมากกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้เครื่องตรวจสอบการสั่นสะเทือนจะส่งสัญญาณให้เครื่องควบคุมด้วยโปรแกรม (PLC) จะปรับลดความเร็วของกังหันลม จนใบพัดหยุดหมุนและเกิดสัญญาณเตือน (alarm)

ระบบกราวนด์ ผู้ออกแบบได้กำหนดระบบกราวด์ของ PE/TE ออกจากกัน เนื่องจากกราวด์ PE ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น Motor, Switching, Neutral, Earth ส่วน TE นั้นใช้กับระบบ PLC Sensor เครื่องมือวัดต่างๆ ที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.12 ประสิทธิภาพและการทำงานของกังหันลมจากผลการออกแบบ

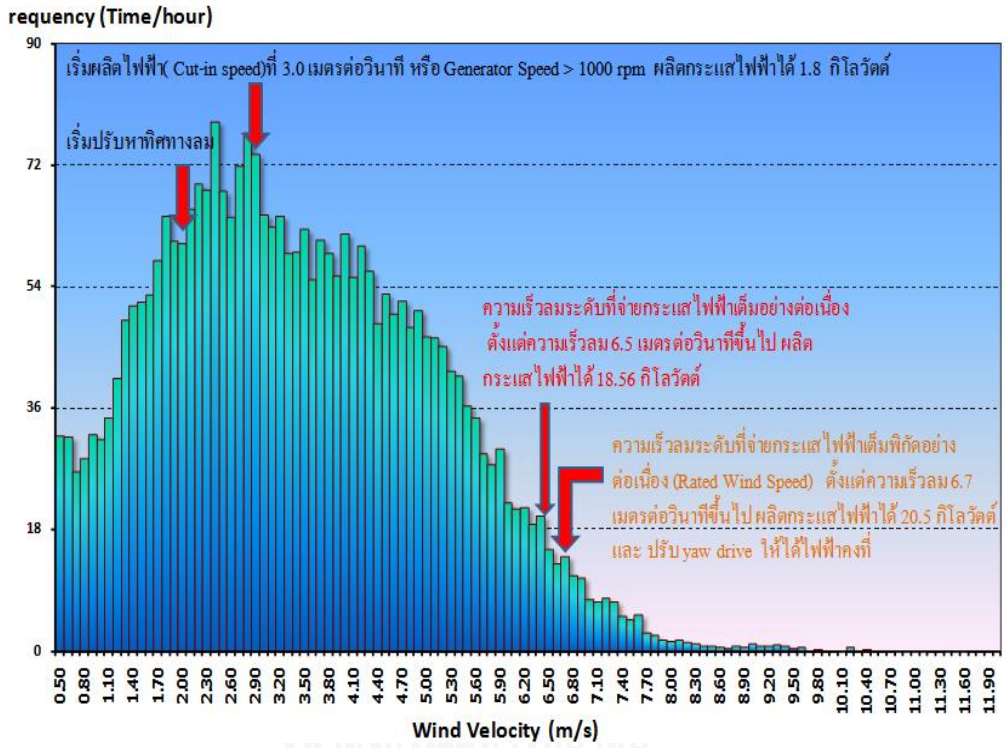
กำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมความเร็วลมต่ำในงานวิจัยนี้ ขนาด 18 กิโลวัตต์ ที่ผลิตไฟฟ้าในช่วงความเร็วลม 3.00-6.50 เมตรต่อวินาที มีความยาวใบพัดเท่ากับ 9.81 เมตร และประสิทธิภาพของกังหันลมเท่ากับ 0.36 สามารถคำนวณออกมาตามช่วงความเร็วลมได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าที่กังหันลมในงานวิจัยนี้ผลิตได้ตามความเร็วต่างๆ

Wind velocity (m/s)	Air density	Swept area	Wind velocity3	Cp	Pe (W)
1	1.23	302.5	1	0.363	68
2	1.23	302.5	8	0.363	541
3	1.23	302.5	27	0.363	1,825
4	1.23	302.5	64	0.363	4,326
5	1.23	302.5	125	0.363	8,449
6	1.23	302.5	216	0.363	14,600
6.5	1.23	302.5	274.6	0.363	18,562
7	1.23	302.5	343	0.363	23,184
8	1.23	302.5	512	0.363	34,607

ผลการวิเคราะห์และประมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมในงานวิจัยนี้ ตามระบบควบคุมที่ได้ออกแบบตามผลการศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมที่บริเวณวัดหงส์ทองที่กำหนดให้ ในช่วงความเร็วลมต่ำในช่วง 0.00 - 2.50 เมตรต่อวินาที กังหันลมยังไม่ผลิตไฟฟ้า แต่ในช่วงความเร็วลม 2.50-3.00 เมตรต่อวินาทีระบบควบคุมจะสั่งให้แกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลมหมุนหน้าใบพัดหากระแสลมซึ่งขณะนั้นใบพัดกังหันลมจะเริ่มหมุน เมื่อมีความเร็วลมประมาณ 3.00 เมตรต่อวินาที ความเร็วที่รอบแกนหมุนควรหมุนได้มากกว่า 1,000 รอบต่อนาที จะเป็นช่วงที่กังหันลมควรตัดระบบเริ่มทำงาน (cut in wind speed) กังหันลมจะเริ่มผลิตไฟฟ้าเมื่อความเร็วลมเท่ากับ 6.5 เมตรต่อวินาที กังกันลมจะผลิตไฟฟ้าได้ 18.56 กิโลวัตต์ และจ่ายกระแสฟ้าเต็มพิกัดอย่างต่อเนื่อง และเมื่อความเร็วลมเท่ากับ 6.7 เมตรต่อวินาที กังกันลมจะผลิต

ไฟฟ้าสูงสุดได้ 20.5 กิโลวัตต์ โดยการทำงานของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว หากมีความเร็วลมสูงกว่านั้น แกนคอหมุนปรับทิศทางกังหันลมจะปรับมุมหลบลมเพื่อรักษาอัตราการผลิตไฟฟ้าให้คงที่ และในกรณีที่มีความเร็วลมสูงมากเกินไป กังหันลมควรหยุดทำงานทันที เพราะความเร็วลมที่นั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกลไกของกังหันลมได้



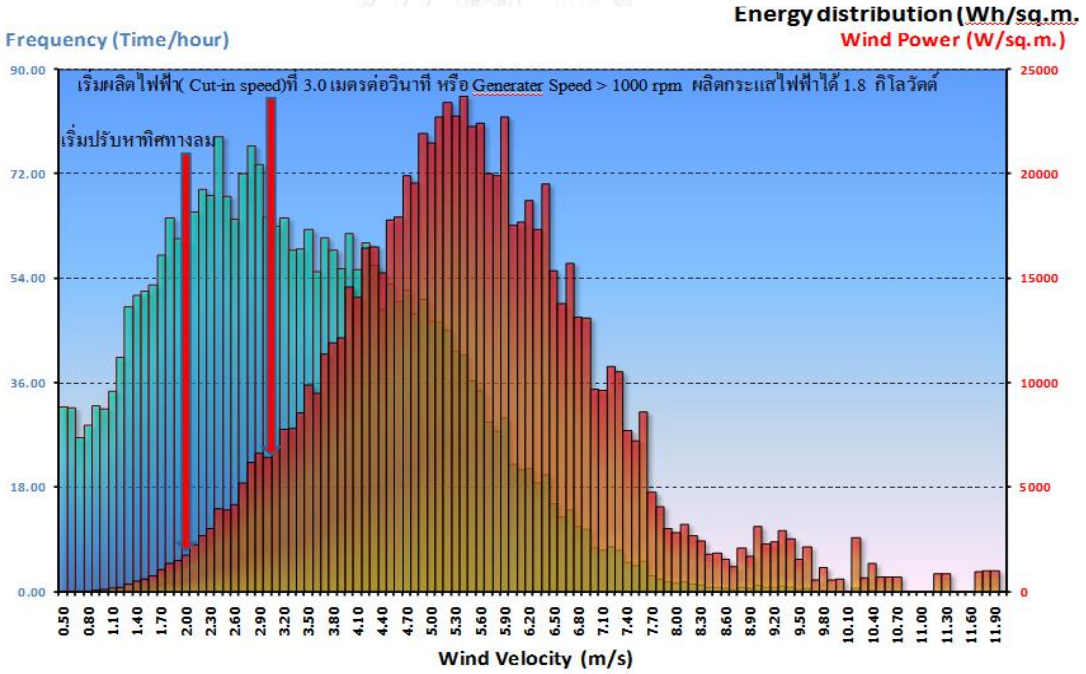
Chulalongkorn University

ภาพที่4.25 การออกแบบการทำงานของกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมบริเวณวัดหงส์ทอง

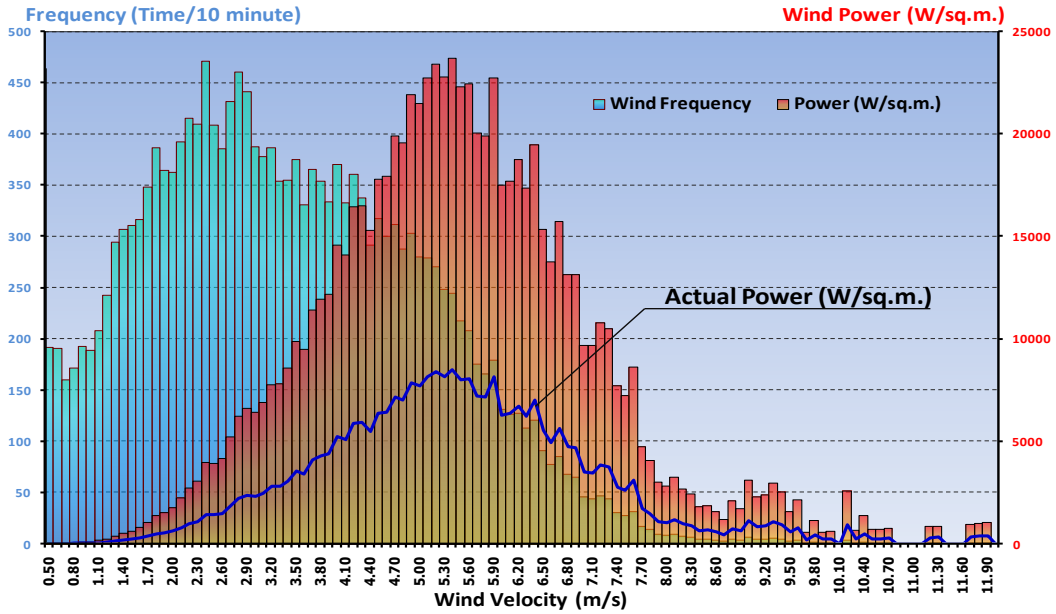
ผลการประเมินกำลังไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมกับกระแสลมที่บริเวณวัดหงส์ทองสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทั้งปีที่เริ่มผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ความเร็วลมประทะในช่วง 3.00-6.50 เมตรต่อวินาที ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 พลังงานกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากความเร็วลมต่างๆ

ช่วงความเร็วลม (m/s)	ค่าเฉลี่ยความเร็วลม (m/s)	จำนวนชั่วโมงต่อปี	กำลังลม (W) เมื่อ A=1 m2.	พลังงานลม (kWhr)	พลังงานไฟฟ้า (kWhr) Cp=0.36
<3	1.73	4,179	3.18	5.57	2.00
3-<4	3.49	1,600	26.07	17.48	6.29
4-<5	4.48	1,403	55.24	32.48	11.69
5-<6	5.44	972	99.12	40.38	14.54
6-<7	6.42	426	162.87	29.08	10.47
7-<10	7.71	173	282.37	20.42	7.35
>10	10.77	7	768.05	2.13	0.77
		8,760		147.54	53.11



ภาพที่4.26 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของกังหันลมที่เริ่มผลิตไฟฟ้าตั้งแต่ความเร็วลม 3.00 เมตรต่อวินาที ที่บริเวณวัดหงส์ทอง



ภาพที่4.27 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง (actual power) ที่บริเวณวัดหงส์ทอง ของกังหันลมความเร็วลมต่ำ ที่มีประสิทธิภาพ Cp = 0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.13 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มทุนของกังหันลม

รายละเอียดราคาและอุปกรณ์การก่อสร้างกังหันลม

ตารางที่ 4.4 ประมาณราคาค่าก่อสร้างกังหันลม 3 ใบพัด โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ประมาณราคาค่าก่อสร้างกังหันลม 3 ใบพัด โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (บาท)				
ลำดับ	รายการ	ราคาวัสดุ	ค่าแรงงาน	รวมราคา
1	ชุดเกียร์ (Gear set)	160,000	30,000	190,000
2	Ring gear	8,000	2,000	10,000
3	Drive shaft 3 sets	1,500	500	2,000
4	Main shaft	5,000	500	5,500
5	Main frame	10,000	5,000	15,000
6	Yaw drive motor & Warm gear	5,000	5000	10,000
7	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Set) ขนาด 15 กิโลวัตต์	38,000	6,000	44,000
8	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Set) ขนาด 5.5 กิโลวัตต์	28,000	4,000	32,000
9	แผงระบบควบคุมไฟฟ้า (Main tribution Board)	165,000	65,000	230,000
10	ชุด PLC	35,000	5,000	40,000
11	Bus duct	15,000	6,000	21,000
12	สายไฟฟ้า (Cable & Wire)	175,000	15,000	190,000
13	ท่อเดินสายไฟ (Raceway)	30,000	8,000	38,000
14	ระบบสายสื่อสารข้อมูลคอมพิวเตอร์	20,000	10,000	30,000
15	ระบบป้องกันฟ้าผ่าและระบบต่อลงดิน	60,000	18,000	78,000

(ต่อ)

16	ใบพัดเหล็ก 3 ใบพัด	100,000	50,000	150,000
17	เสาและฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก	150,000	80,000	230,000
	รวม	1,005,500	310,000	1,315,500
	ค่าดำเนินการ 15%			197,325
	ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%			92,085
	รวมราคาค่าก่อสร้าง			1,604,910
(หนึ่งล้านหกแสนสี่พันเก้าร้อยสิบบาท)				

ต้นทุนในการสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้า 3 ใบพัด 1 ต้น คิดเป็นเงินทั้งสิ้น หนึ่งล้านหกแสนสี่พันเก้าร้อยสิบบาท

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม 3 ใบพัดที่ความเร็วลมต่ำกว่า 3 เมตร ต่อวินาที

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
0.5	702	6156.8
0.6	172	2606.7
0.7	68	1636.5
0.8	114	4095.3
0.9	110	5626.3
1	46	3227.5
1.1	93	8685
1.2	92	11154.2
1.3	56	8632.3

(ต่อ)

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
1.4	89	17134.9
1.5	35	8288
1.6	69	19829.7
1.7	35	12064.8
1.8	82	33553.5
1.9	93	44755.9
2	40	22452.1
2.1	92	59779.5
2.2	89	66491.2
2.3	31	26463.8
2.4	80	77594.3
2.5	55	60296.1
2.6	103	127017.5
2.7	46	63526.6
2.8	95	146320.1
2.9	142	242990.2
ไฟฟ้าที่ผลิตได้วัตต์		1080378.5
คิดเป็นเงิน (ที่หน่วยละ 7.10 บาท)		7670.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.5 การคำนวณการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะเห็นว่า ช่วงความเร็วลมต่ำ ต่ำกว่าความเร็วลม 3 เมตร ต่อวินาที มีจำนวน 2,629 ชั่วโมง แต่แรงลม หรือ Wind Power ต่ำมาก จึงทำให้ค่ากระแสไฟฟ้า ที่ผลิตได้จำนวนน้อยมาก คือ 1080.379 กิโลวัตต์ หรือถ้าคิดเป็นค่าไฟฟ้า ได้ ประมาณ 7670.70 บาท ต่อปี

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าการผลิตไฟฟ้าของกังหันลม ที่ความเร็วลมมากกว่า 3 เมตร ต่อวินาที

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
3	62	117,452
3.1	142	296,811
3.2	127	291,985
3.3	82	206,758
3.4	149	410,894
3.5	83	249,683
3.6	167	546,676
3.7	76	270,100
3.8	172	662,195
3.9	161	670,079
4	99	444,551
4.1	193	933,287
4.2	183	951,273
4.3	89	496,480
4.4	195	1,165,464
4.5	93	594,603

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ต่อ)

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
4.6	200	1,365,872
4.7	121	881,425
4.8	187	1,451,014
4.9	205	1,692,188
5	104	912,115
5.1	175	1,628,752
5.2	175	1,726,452
5.3	89	929,660
5.4	155	1,712,456
5.5	81	945,539
5.6	179	2,205,583
5.7	98	1,273,377
5.8	200	2,737,918
5.9	144	2,075,033
6	77	1,166,946
6.1	164	2,611,799
6.2	123	2,056,774
6.3	77	1,350,886
6.4	116	2,133,557
6.5	69	1,329,522

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

(ต่อ)

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
6.6	121	2,440,751
6.7	45	949,606
6.8	97	2,139,956
6.9	92	2,120,516
7	53	1,275,488
7.1	95	2,385,641
7.2	79	2,068,859
7.3	32	873,424
7.4	68	1,933,350
7.5	46	1,361,595
7.6	59	1,770,000
7.7	30	900,000
7.8	59	1,770,000
7.9	43	1,290,000
8	20	600,000
8.1	39	1,170,000
8.2	40	1,200,000
8.3	23	690,000
8.4	29	870,000
8.5	15	450,000

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(ต่อ)

ความเร็วลม	จำนวนความถี่(ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้
8.6	29	870,000
8.7	11	330,000
8.8	21	630,000
8.9	12	360,000
9	8	240,000
9.1	21	630,000
9.2	11	330,000
9.3	6	180,000
9.4	16	480,000
9.5	5	150,000
9.6	14	420,000
9.7	1	30,000
9.8	10	300,000
9.9	9	270,000
10	5	150,000
ไฟฟ้าที่ผลิตได้วัตต์		63,149.19
คิดเป็นเงิน (ที่หน่วยละ 7.10 บาท)		448,359
ไฟฟ้าที่ผลิตได้วัตต์		74,124

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.6 การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกังหันลมนี้ คำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากความเร็วลมตั้งแต่ 3.00 – 10.00 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีจำนวนชั่วโมงที่ผลิตได้ถึง 6,076 ชั่วโมงต่อปี คำนวณเป็นพลังงานไฟฟ้ารวมเท่ากับ 63,149,193 วัตต์ คำนวณราคาขายรวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้าที่ 7.10 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง จะมีรายได้ต่อปีเท่ากับ 448,359 บาทต่อปี และเมื่อคำนวณความคุ้มทุนเบื้องต้นของกังหันลมขนาด 3 ใบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีต้นทุน 1,604,910 บาท พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3 ปี 7 เดือน 2 วัน (ไม่คิดมูลค่าของเงินในอนาคต) หากติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ในปริมาณมาก จะสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ต่ำลง จะทำให้ระยะเวลาคืนทุน สามารถลดต่ำกว่า 3 ปี 18 วัน

ตารางที่ 4.7 พลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ และรายได้ต่อปีจากราคาขายที่รวมส่วนเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า (adder)

ช่วงความเร็วลม (m/s)	จำนวนชั่วโมงต่อปี	พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	ราคาขายไฟฟ้า (บาท/kWh)	รายได้ (บาท/ปี)
น้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที	2,629	1080.379	7.10	7,670.69
ระหว่าง 3-10 เมตรต่อวินาที	6,076	63,149.193	7.10	448,359
มากกว่า 10 เมตรต่อวินาที	60	553.31	7.10	3,929

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ **4.8 การคำนวณความคุ้มทุนจากการผลิตไฟฟ้า**

พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	ราคาขายไฟฟ้า (บาท/kWh)	รายได้ (บาท/ปี)	ต้นทุนกังหันลม (บาท)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
63,149.193	7.10	448,359	1,604,910	3ปี 7เดือน 2 วัน

4.14 ผลการสร้างกังหันลมทดสอบ

ผลการสร้างกังหันทดสอบผลิตไฟฟ้าขนาด 18 กิโลวัตต์ขนาด 3 ใบพัด ที่มีประสิทธิภาพ (CP) เท่ากับ 0.363 ณ.พื้นที่ทดสอบบริเวณวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อทดสอบสมมติฐานการออกแบบกังหันลมประกอบด้วยผลการก่อสร้างกังหันลมทดสอบและผลการเก็บข้อมูลกังหันลมทดสอบ

4.15 ผลการดำเนินการก่อสร้างเสาและฐานราก

ผลการก่อสร้างฐานราก ผู้วิจัยได้ดำเนินการสำรวจและก่อสร้างฐานรากบริเวณลานจอดรถของวัดหงส์ทองในตำแหน่งที่ห่างจากอาคารที่กีดขวางทิศทางลมที่ระดับความสูง 10 เมตรขึ้นไป โดยดำเนินการ ตอกเสาเข็ม หล่อฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสากังหันลมคอนกรีตเสริมเหล็กตามแบบ

ภาพที่4.28 การผูกเหล็กเพื่อหล่อฐานรากขนาด 10 x 10 ตารางเมตร

ภาพที่4.29 การก่อสร้างเสากังหันลมคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 18 เมตร

4.16 ผลการดำเนินการสร้างใบพัดกังหันลม และการติดตั้งใบพัด

ดำเนินการสร้างชุดใบพัดยาว 9.81 เมตร เป็นใบพัดเหล็กเคลือบสีกันไอทะเล (marine painted) และนำใบพัดทั้ง 3 ใบมาประกอบที่สถานที่ทดสอบ และยกใบพัดทั้ง 3 ใบที่ยึดติดด้วยฮับ (hub) ขึ้นไปติดตั้งที่ส่วนหัวของเสา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่4.30 ใบพัดจริงที่ใช้ในงานวิจัย ความยาว 9.81 เมตร

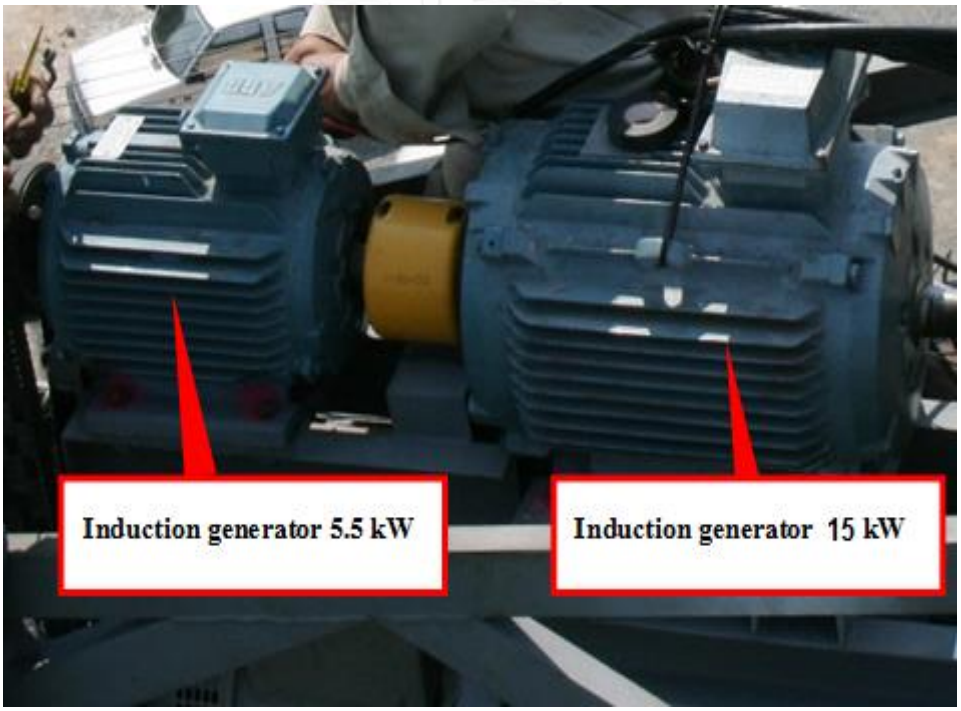
ภาพที่4.31 การยกและติดตั้งชุดกังหันลมบนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยรถเครน

4.17 ผลการติดตั้งห้องเครื่อง

ห้องเครื่องของกังหันลมประกอบด้วย

ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators) 2 ตัว คือ มอเตอร์กำเนินไฟฟ้าขนาด 5.5 กิโลวัตต์ และขนาด 15 กิโลวัตต์ เกียร์ทดรอบเท่ากับ 1:30.72หรือ 32.55 รอบกังหันต่อ 1000 รอบมอเตอร์กำเนินไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนแกนหมุนปรับทิศทางกังหัน (yaw drive)

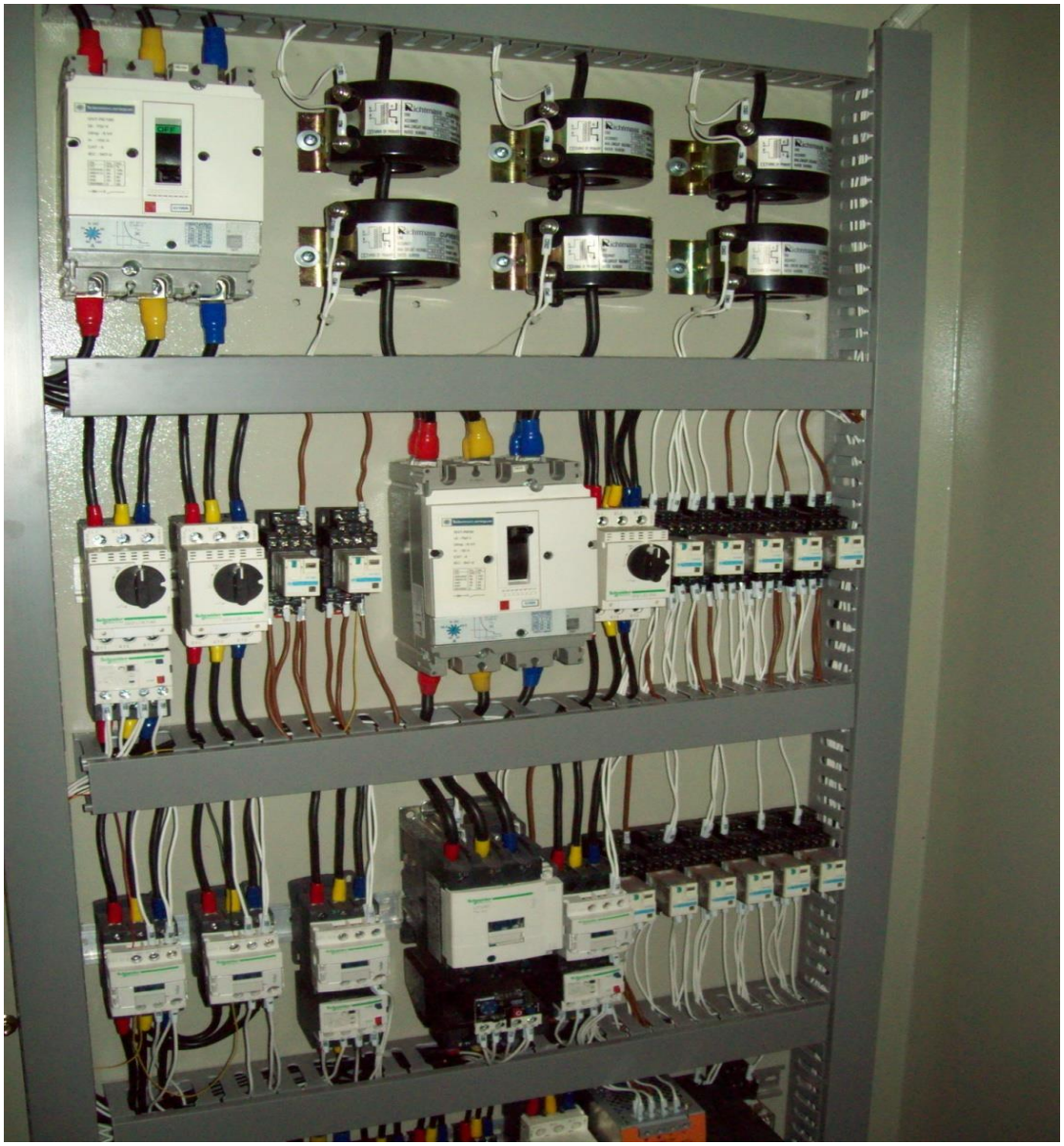
การยกชุดกังหันลมขึ้นติดตั้งบนยอดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จะต้องตั้งนั่งร้านและใช้รถเครนขนาด 30 ตันยกอุปกรณ์ทั้งหมด โดยยกชุดชุดขับเคลื่อนใบพัด (Yaw drive) ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators) ขึ้นติดตั้งก่อน และหมุนให้ด้านหน้าอยู่ในแนวขนานทิศทางลม เพื่อป้องกันแรงปะทะด้านหน้าใบพัดขณะยกใบพัดขึ้นติดตั้ง



ภาพที่4.32 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Induction generator ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ และ 15 กิโลวัตต์

4.18 ผลระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการเชื่อมต่อไฟฟ้ากับสายส่ง

ผู้วิจัยได้ติดตั้งแผงควบคุมระบบไฟฟ้าตามการออกแบบ ภายในแผงควบคุมระบบไฟฟ้าประกอบด้วยเครื่องแปลงสัญญาณความเร็วลมจากเครื่องแอนนิโมมิเตอร์เป็นระบบดิจิตอล บันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ทุก 1 วินาที ตลอด 24 ชั่วโมง และเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าบนชุดกังหันลม ควบคุมการทำงานทั้งระบบด้วยโปรแกรม PLC บนแผงควบคุม

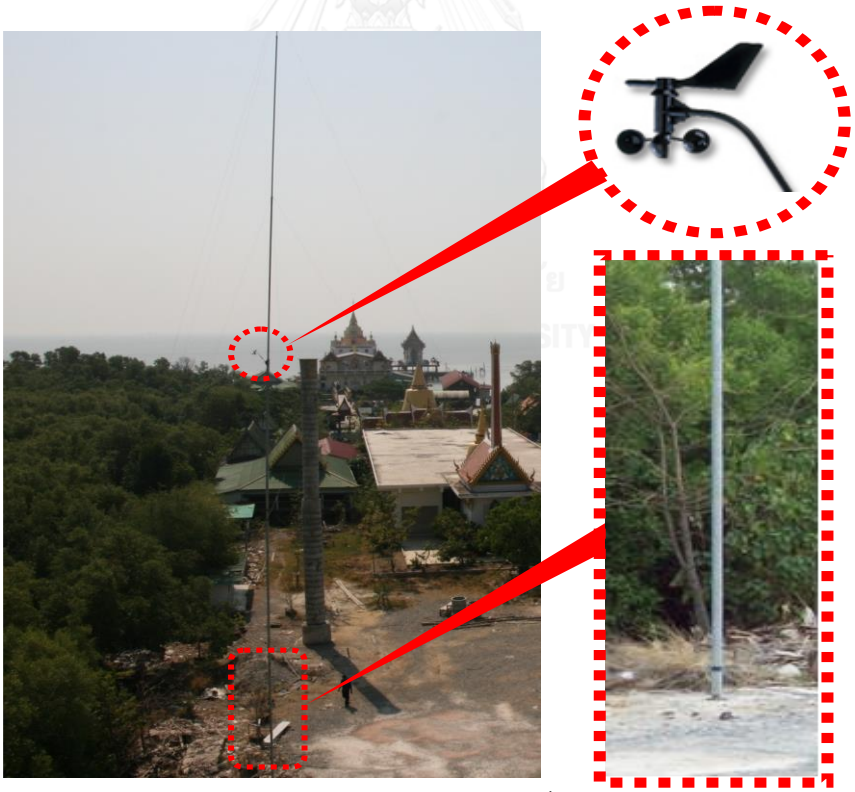


ภาพที่4.33 แผงควบคุมระบบไฟฟ้า

เมื่อทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าของตัวกังหันลมสมบูรณ์แล้ว ผู้วิจัยได้เชื่อมต่อเข้ากับสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบ จากการทดลองเบื้องต้น พบว่ากังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้าได้ตามสมมติฐานการคำนวณ แต่ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังไม่มีความต่อเนื่อง เนื่องจากพฤติกรรมของลมที่มีความแปรปรวนสูงและความเร็วลมเฉลี่ยต่ำกว่า Cut-in speed 3 เมตรต่อวินาที

4.19 ผลการติดตั้งเสาวัดความเร็วลม

ผู้วิจัยได้ติดตั้งเสาวัดความเร็วลมแบบทรงกระบอกสูง 50 เมตร ห่างจากกังหันลมประมาณ 30 เมตร ในด้านเหนือลม ติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลมแอนนิโมมิเตอร์แยกออกมาจากเครื่องวัดความเร็วลมบนตัวกังหันเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวัดและติดตั้งในแนว 45 องศากับทิศทางการพัดของลม เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ถูกรบกวนจากเสาน้อยที่สุด ติดตั้งที่ความสูง 20 เมตรซึ่งเป็นระดับเดียวกันกับศูนย์กลางกังหันลม เดินสายสัญญาณ Analog ลงตามแนวเสาเข้าตู้ควบคุมระบบแปลงเป็นสัญญาณ Digital เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ รวมทั้งติดตั้งสายล่อฟ้าบนยอดเสา



ภาพที่4.34 เสาวัดความเร็วลมแบบทรงกระบอกและเครื่องวัดความเร็วลมแอนนิโมมิเตอร์

ภาพที่4.35 กังหันลม 3 ใบพัดที่วัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ได้ติดตั้งเรียบร้อย

4.20 ผลการเก็บข้อมูลกังหันลมทดสอบ

ผลการดำเนินงานวิจัยเก็บข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลและปรับปรุงการออกแบบกังหันลม ในช่วงตุลาคม 2553-มิถุนายน 2554 ประกอบด้วย ข้อมูลสภาพแวดล้อม ข้อมูลความเร็วลม การผลิตไฟฟ้าของกังหันลม และผลกระทบอื่นกับชุมชน

4.21 ข้อมูลสภาพแวดล้อมเบื้องต้นบริเวณวัดหงส์ทอง

ข้อมูลสภาพแวดล้อมเบื้องต้นบริเวณวัดหงส์ทอง จังหวัดฉะเชิงเทรา พื้นที่บริเวณดังกล่าวมีลักษณะพื้นที่เป็นพื้นที่ราบลุ่มอยู่ติดชายทะเลอ่าวไทย ที่บริเวณปากแม่น้ำบางปะกง พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าชายเลน ถึง 1 ใน 3 ของพื้นที่ทั้งหมด ที่เหลือประกอบด้วยพื้นที่ชุมชนและนากุ้ง ดินบริเวณนี้เกิดจากการทับถมของดินตะกอนน้ำทะเลและน้ำกร่อยลักษณะส่วนใหญ่ลักษณะของดินมีการระบายน้ำเลวถึงเลวมาก ระดับของพื้นดินเป็นบริเวณที่ต่ำน้ำทะเลท่วมถึงตลอดเวลา

กระแสลมที่พัดมาจากทะเลเมื่อผ่านพื้นที่ผิวพื้นดิน ต้นไม้และอาคารทำให้กระแสลมมีความเร็วลดลงพร้อมกับมีความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้น

ภาพที่4.36 สภาพบริเวณใกล้เคียงกังหันลมด้านทิศใต้

ภาพที่4.37 แนวต้นไม้บริเวณใกล้เคียงกังหันลมด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือสลับกับพื้นที่นากุ้งของชุมชน

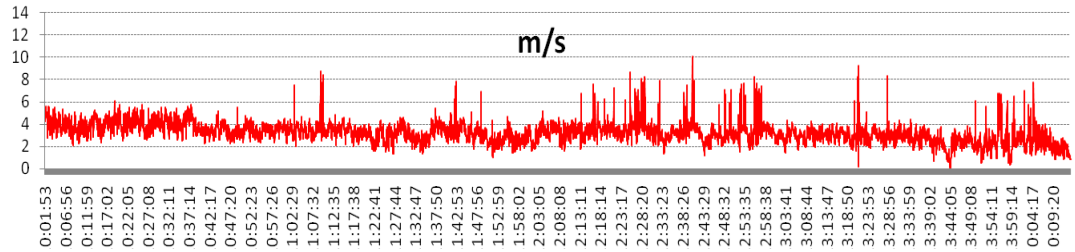
ภาพที่4.38 การวิเคราะห์สภาพพื้นที่และระยะห่างของสิ่งกีดขวางที่ทำให้เกิดกระแสลมแปรปรวน

ผลการวิเคราะห์ลักษณะลมในพื้นที่วิจัยพบว่ามีความแปรปรวนสูง ซึ่งความแปรปรวนนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปทรงของสิ่งกีดขวางของอาคารและสิ่งกีดขวางทางธรรมชาติ ถึงแม้จะติดตั้งกังหันลมให้อยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางด้านเหนือลม แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ที่ติดตั้งกังหันลมมีแนวต้นไม้ด้านใต้ลมที่อยู่ห่างจากตัวกังหันเพียง 10 เมตร ส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของลมอยู่มาก และส่งผลให้เกิดการหน่วงความเร็วลมที่พัดมาจากทะเลให้ลดน้อยลงอีกด้วย

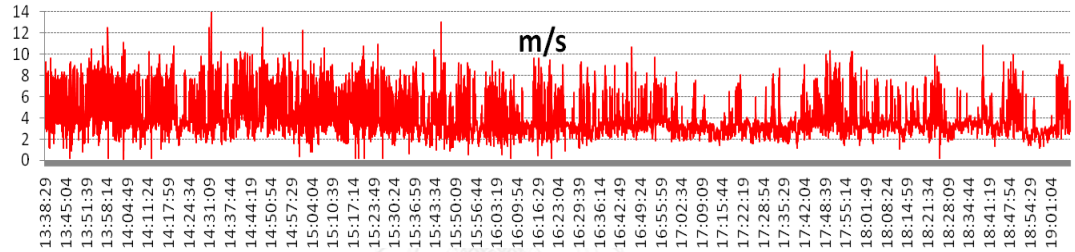
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.22 ผลข้อมูลความเร็วลมของกังหันลมทดสอบ

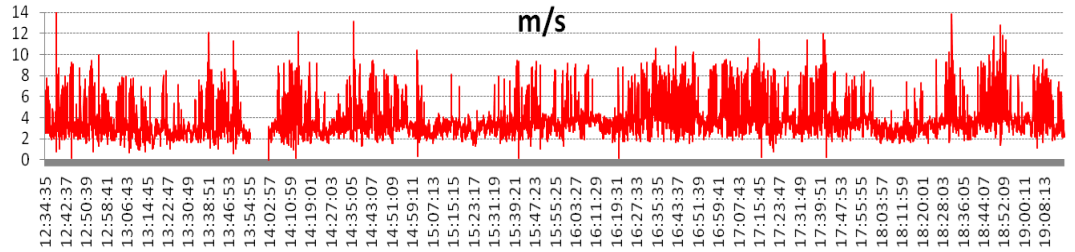
ข้อมูลและลักษณะของลมในพื้นที่วิจัย โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ Data logger เก็บข้อมูลปริมาณลม จากเครื่องวัดลม (anemometer) และประมวลผล ทุก 1 วินาที



ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 18 เมษายน 2554



ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 20 เมษายน 2554



ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 21 เมษายน 2554

ภาพที่4.39 ข้อมูลความเร็วลม 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 18 เมษายน 2554 ข้อมูลความเร็วลมวันที่ 20 เมษายน 2554 และข้อมูลความเร็วลมวันที่ 21 เมษายน 2554

จากภาพที่ 39 แสดงพฤติกรรมของลม 3 ลักษณะ ที่แตกต่างกันของชุดข้อมูล 3 วัน

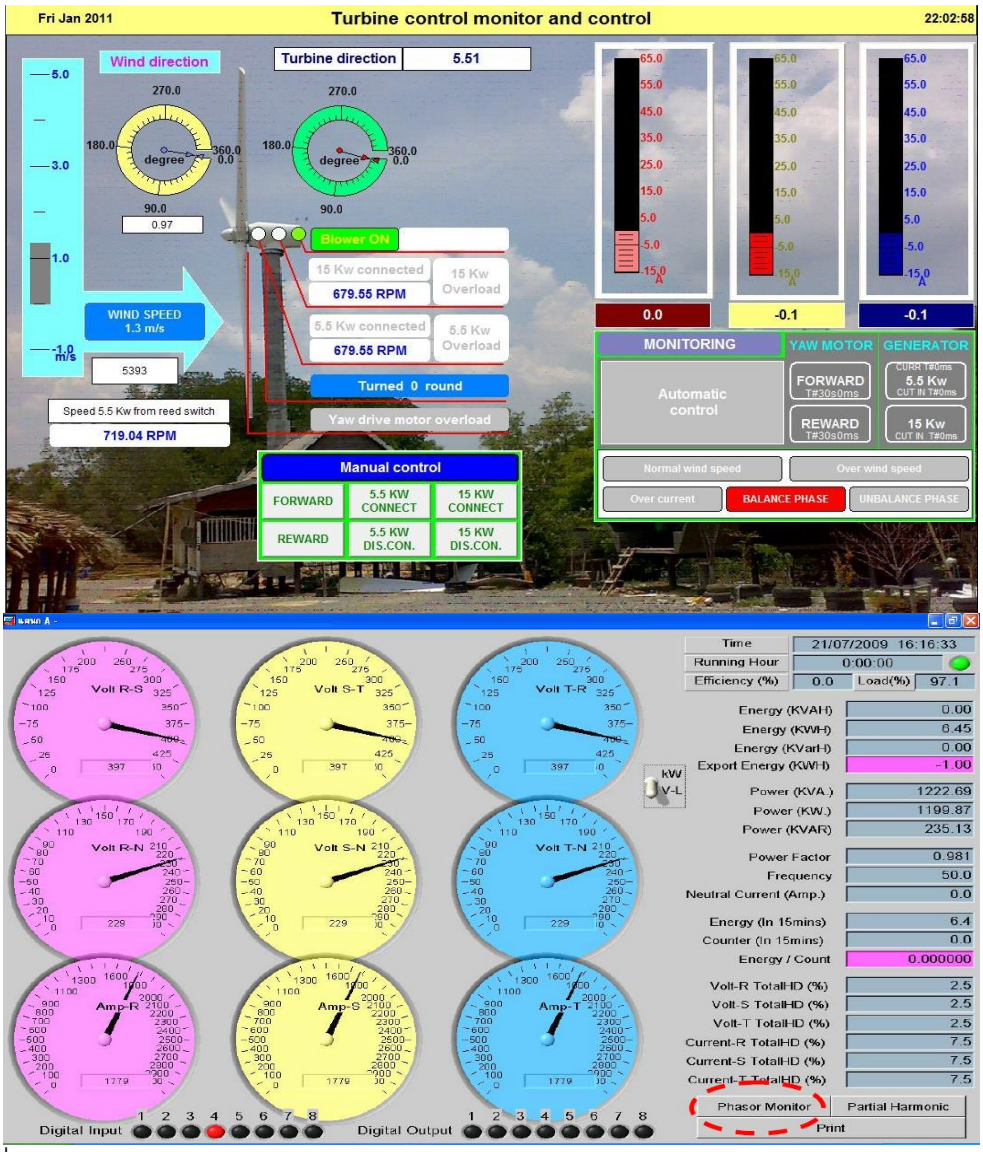
1) ชุดข้อมูลความเร็วลมวันที่ 18 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 0.00 – 4.00 น. เป็นช่วงเวลาที่มีกระแสลมอ่อนมาก

2) ชุดข้อมูลความเร็วลมวันที่ 20 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 13.30 – 19.00 น. เป็นช่วงเวลาและวันที่กระแสลมเหมาะแก่การผลิตไฟฟ้า

3) ชุดข้อมูลความเร็วลมวันที่ 21 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 12.30 – 19.00 น. เป็นวันที่กระแสลมมีความแปรปรวนสูงมาก

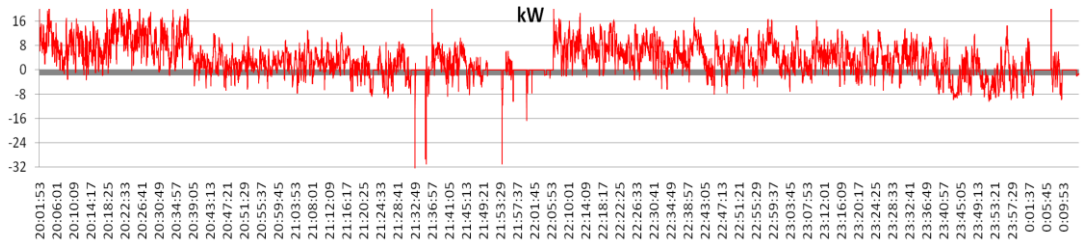
4.23 ผลการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมทดสอบ

ข้อมูลกระแสไฟฟ้าของกังหันลมทดสอบ เก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Richmass PRO สำหรับเก็บข้อมูลและแสดงผลแบบเวลาจริง (real time) ได้ทั้งแบบ Digital และแบบ Analog ในความละเอียดทุก 1 วินาที

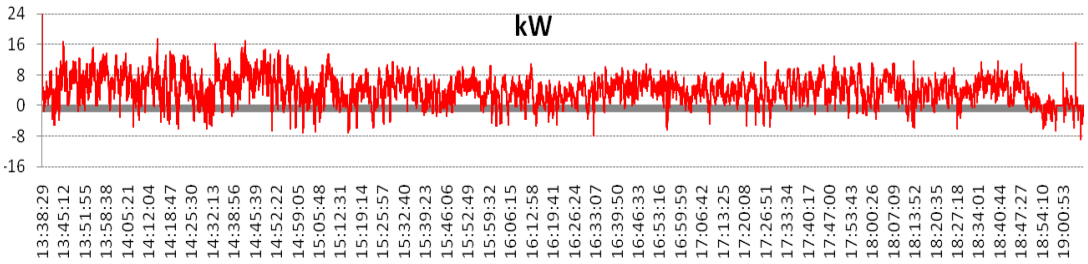


ภาพที่4.40 การดูข้อมูลลม และการผลิตไฟฟ้าของกังหันลมแบบเวลาจริง (real time) ด้วยโปรแกรม Richmass PRO

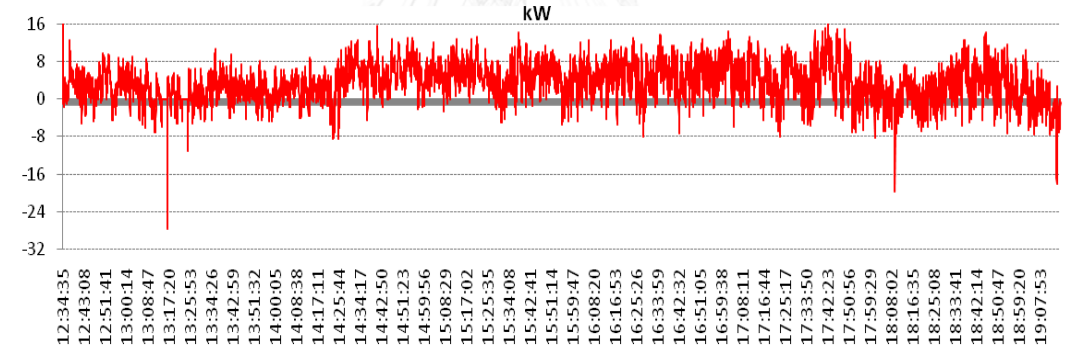
ผลการเก็บและการวิเคราะห์ข้อมูลของการผลิตไฟฟ้า



ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 18 เมษายน 2554



ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 20 เมษายน 2554



ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 21 เมษายน 2554

ภาพที่4.41 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า 3 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 18 เมษายน 2554 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 20 เมษายน 2554 และข้อมูลการผลิตไฟฟ้า วันที่ 21 เมษายน 2554

จากภาพที่ 4.49 แสดงแสดงปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ 3 ลักษณะ ที่แตกต่างกันของชุดข้อมูล 3 วัน

1) ชุดข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 18 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 0.00 – 4.00 น. เป็นช่วงเวลาที่มีกระแสลมอ่อนมาก ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อย

2) ชุดข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 20 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 13.30 – 19.00 น. เป็นช่วงเวลาและวันที่กระแสลมดีสม่ำเสมอ ผลิตไฟฟ้าได้ดีและค่อนข้างต่อเนื่อง

3) ชุดข้อมูลการผลิตไฟฟ้าวันที่ 21 เมษายน 2554 ช่วงเวลาประมาณ 12.30 – 19.00 น. เป็นวันที่กระแสลมมีความแปรปรวนสูงมาก การผลิตไฟฟ้าได้ดี แต่มีการตัดต่อระบบถี่มาก อาจเกิดปัญหาต่อระบบเครื่องกลได้ในระยะยา

การวิเคราะห์ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากชุดข้อมูลที่เก็บได้ ผู้วิจัยได้เลือกเอาช่วงที่กระแสลมที่ค่อนข้างต่อเนื่องในวันที่ 20 เมษายน 2554 มาทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพื่อพิสูจน์สมมติฐานการคำนวณ โดยคิดค่าเฉลี่ยเป็นช่วงเวลาตั้งแต่ค่าเฉลี่ยทุก 10 วินาที จนถึงค่าเฉลี่ยทุก 5 นาที พบว่าผลวิเคราะห์ที่มีการกระจายตัวข้อมูลสูงมากที่ค่าเฉลี่ยในเวลาสั้นเนื่องจากความแปรปรวนของกระแสลมสูง และกระจายตัวข้อมูลน้อยที่สุดคือค่าเฉลี่ยทุก 4 นาที จากความแปรปรวนของกระแสลมที่เปลี่ยนแปลงถี่ในระดับวินาที และลักษณะการทำงานของระบบเครื่องกลที่มีการหน่วงเวลาประมาณ 2 วินาที ทำให้ข้อมูลที่ได้มีการกระจายตัวมาก จากการวิเคราะห์ในเชิงสถิตินี้ จึงเป็นสิ่งที่ช่วยให้เกิดการพัฒนาการวิจัยกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้าที่กระแสลมต่ำกว่า 3 เมตรต่อวินาที

4.24 ผลการวิเคราะห์ผลกระทบอื่นในชุมชน

การวิเคราะห์ผลกระทบด้านอื่นๆ ด้านความดังของเสียงในเบื้องต้นใช้การสังเกตการณ์โดยตรงจากงานวิจัย การสอบถามจากผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ติดตั้งกังหันลม ประกอบกับการใช้เครื่องมือวัดความดังเสียง (Sound level meter) พบว่ามีเสียงรบกวนจากการหมุนของใบพัดกังหันลมเพียงเล็กน้อยในช่วงแรก และผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขเสียงรบกวนให้น้อยลงในภายหลัง เรื่องการบังเงาของแสงบริเวณพื้นที่รอบกังหันพบว่ามีผลน้อยมากเนื่องจากที่ตั้งกังหันทดสอบอยู่ในบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าชายเลนและนากุ้ง จะมีพื้นที่บ้านเรือนเพียงเล็กน้อย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นงานวิจัยที่ดำเนินไปได้ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เป็นเป็นงานวิจัยที่เริ่มต้นการพัฒนาสร้างกังหันลมความเร็วต่ำที่เหมาะสมกับพฤติกรรมและลักษณะของกระแสลมในประเทศ

เมื่อศึกษาช่วงของความเร็วลมที่มีความถี่มากพอและมีกำลังมากพอพบว่าความเร็วในช่วงประมาณ 3.00 เมตร ต่อวินาที ถึง 6.50 เมตร ต่อวินาที เป็นช่วงที่มีศักยภาพในการผลิตพลังงานของประเทศไทย ดังนั้นการออกแบบกังหันลมในประเทศควรพิจารณาความเร็วลมในช่วงนี้ ผู้วิจัย จึงออกแบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ให้อยู่ในช่วงความเร็วลม ในช่วงประมาณ 3.00 เมตร ต่อวินาที ถึง 6.50 เมตร ต่อวินาที คือ เริ่มผลิตกระแสไฟฟ้า (Cut in Speed) 3.00 เมตร ต่อวินาที และช่วงการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Rated Current หรือ Full Load) ที่ความเร็วลม 6.50 เมตร ต่อวินาที

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความเร็วลมกับกำลังลมพบว่า ในช่วงความเร็วลมต่ำมากซึ่งมีความถี่ที่เกิดขึ้นมากถึง 2629 ชั่วโมง ใน 1 ปี แต่เมื่อแปลงกำลังลมมาเป็นพลังงานไฟฟ้า จะได้ 1080.379 วัตต์ ซึ่งถ้าคิดเป็นเงินแล้ว จะเท่ากับ 7670.69 บาท ถ้าเราออกแบบให้กังหันลมสามารถผลิตไฟฟ้า ตั้งแต่ ความเร็วลม เริ่มต้น ที่ 0.5 เมตร ต่อวินาที จนถึง 3.0 เมตร ต่อวินาที จะต้องออกแบบใบพัดให้ใบมาก และ ต้องลดความต้านทาน ของชุดหมุนให้ต่ำที่สุด หรือเท่ากับศูนย์ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นทำไม่ได้ ในการออกแบบของงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยก็เลือกวัสดุ อุปกรณ์ ให้ค่าความต้านทานต่ำที่สุดอยู่แล้ว และ ถ้าน้ำหนักใบพัดมีน้ำหนักเบามาก จะทำให้ยากต่อการควบคุม เพราะ พฤติกรรม ลมในบ้าน มาเป็นช่วงๆ สั้นๆ ดังนั้นการออกแบบจำเป็นต้องอาศัย น้ำหนักของใบช่วยในเรื่องของแรงเฉื่อย ไม่ให้ค่าทางไฟฟ้าขึ้นลงเร็วตามแรงลม ดังนั้นการ ที่ผู้วิจัย ยอมไม่เก็บลมที่ต่ำกว่า 3.0 เมตร ต่อวินาที ยอมไม่เก็บเงิน จำนวน 7670.69 บาท เพราะถ้าเราจะเก็บให้หมดเท่ากับเราจะต้องลงทุนเพิ่มขึ้นที่สูงมาก

ค่ากำลังไฟฟ้าที่ ผลิตได้จากกังหันลม ผลิตกระแสไฟฟ้าความเร็วต่ำ ของผู้วิจัย จะเริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมตั้งแต่ 3.0 เมตร ต่อ วินาที และ ผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 18,000 วัตต์ ที่ความเร็วลม 6.5 เมตร ต่อ วินาที และชุดควบคุม อัตโนมัติ จะควบคุม การผลิตกระแสไฟฟ้าให้อยู่ที่ 18,000 วัตต์ จนความเร็วลมสูงถึง 10.0 เมตร ต่อ วินาที ซึ่งใน 1 ปี จะสามารถ ผลิตไฟฟ้าได้ทั้งหมด 63,149,193 วัตต์ ถ้าคิดเป็นเงิน ก็จะได้ ทั้งสิ้น 448,359 บาท ต่อ 1 ปี

หลังจากความเร็วลม มากกว่า 10.0 เมตร ต่อ วินาที กังหันลม จะปรับให้ใบกังหันลมขนานกับ Wind Direction เพื่อทำการหลบลม ให้หยุดการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัย เพราะ ความเร็ว มากกว่า 10.0 เมตร ต่อ วินาที เป็นความเร็วลมที่แรงมาก และ ผู้วิจัยได้เขียนโปรแกรม (Program) เพื่อป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้า ใน 1 ปี มีความเร็วลมที่มากกว่า 10.0 เมตร ต่อ วินาที เท่ากับ 60 ชั่วโมง ถ้านำมาผลิตไฟฟ้า จะได้ 553,310 วัตต์ ถ้าคิดเป็นค่าผลิตกระแสไฟฟ้าจะได้ 3329 บาท

ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้ และรายได้ต่อปีจากราคาขายไฟฟ้า

ช่วงความเร็วลม (m/s)	จำนวนชั่วโมงต่อปี	พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	รายได้ (บาท/ปี)
น้อยกว่า 3 เมตรต่อวินาที	2,629	1080.379	7,670.69
ระหว่าง 3-10 เมตรต่อวินาที	6,076	63,149.193	448,359
มากกว่า 10 เมตรต่อวินาที	60	553.31	3,929

การออกแบบกังกันลมในประเทศ ประกอบด้วยการออกแบบใบพัด การออกแบบระบบกำเนิดไฟฟ้า การออกแบบระบบควบคุม การออกแบบโครงสร้างเสาและฐานราก การออกแบบระบบความปลอดภัย ซึ่งทุกระบบต้องทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมกับลักษณะและพฤติกรรมของกระแสลมในประเทศ

การออกแบบใบพัดสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วต่ำ จึงจำเป็นต้องเพิ่ม พื้นที่ในการฝาดของใบกังหันลม (Swept area) ทำให้ต้องมีความยาวของใบมากขึ้นเพื่อเพิ่มพื้นที่รับลมปะทะมากที่สุด มีการออกแบบระบบกำเนินไฟฟ้าใช้การผสมผสานกันของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ 2 ตัวคือ มอเตอร์ 5.5 กิโลวัตต์ทำงานร่วมกับมอเตอร์ 15 กิโลวัตต์ โดยออกแบบให้เริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม (cut in speed) ที่ 3.00 เมตรต่อวินาที มีการออกแบบเครื่องควบคุด้วยโปรแกรม (PLC) ที่ใช้ในการตัดต่อการทำงานของกังหันลม มีการโครงสร้างเสาและฐานรากให้เหมาะสมกับสถานที่ มีการออกแบบระบบความปลอดภัยทั้งในการควบคุมการทำงานของกังหัน และความปลอดภัยจากข้อผิดพลาดต่างๆ

การผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลมผลิตไฟฟ้า สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตามสมมุติฐานการทำงานของชุดกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลม ใบพัดที่หมุน 32 รอบต่อนาที ชุดเกียร์ทดจะทำให้มอเตอร์กำเนิดไฟฟ้าหมุนที่ความเร็วประมาณ 1,000 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นความเร็วที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้า มอเตอร์ทั้ง 2 ชุดจะผลิตไฟฟ้าเข้าสายส่งโดยผลิตไฟฟ้าจากมอเตอร์ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ หรือ 15 กิโลวัตต์ ตามความเหมาะสมของกระแสลม กล่าวคือช่วงเริ่มผลิตกระแสไฟฟ้า (cut in speed) ที่ความเร็วลมประมาณ 3.00 เมตรต่อวินาที มอเตอร์ขนาด 5.5 กิโลวัตต์จะเริ่มทำงานก่อน และเมื่อมีความเร็วลมมากพอ มอเตอร์ขนาด 15 กิโลวัตต์ ก็จะเริ่มทำงาน ทำให้กังกันสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 18 กิโลวัตต์ แต่ผู้วิจัยได้ทดลองให้กังหันลมผลิตไฟฟ้าตาม ค่าของกระแสสูงสุดของตัว มอเตอร์ ให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ 22.5 กิโลวัตต์ และได้ทดลองให้สามารถ ผลิตกระแสไฟฟ้า ที่ 115 % ของค่ากระแสสูงสุดของตัว มอเตอร์ ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดที่ 25.75 กิโลวัตต์ และ สามารถทำงานได้ปกติ ความร้อนที่ขดลวดก็ปกติ ไม่มี Alarm high temperature (ผู้วิจัยได้ติดตั้ง temperature sensor type temperature switch Calibration ที่ 120 C) แสดงให้เห็นว่า กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าต้นนี้ สามารถ ผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ที่ 25.75 กิโลวัตต์ โดยที่สภาวะทางไฟฟ้าสามารถทำงานได้ปกติ

เครื่องกำเนิด กระแสไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ออกแบบ และทดลองให้ ชุดกำเนิดไฟฟ้า เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ (induction motor) มอเตอร์ 15 กิโลวัตต์ และ 5.5 กิโลวัตต์ ขนาด 6 โพลส์ (poles) 380 โวลต์ กระแสสลับ มีความเร็วรอบประมาณ 980 รอบต่อนาที ติดตั้งอยู่ในแกนเดียวกันเกียร์ทดที่อัตราทด 1:30.72 หรือ 32.55 รอบกังหันต่อ 1000 รอบของมอเตอร์ เนื่องจากเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่มีโครงสร้างเหมือนมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (induction motor) มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก ดูแลรักษาได้ง่าย สามารถเชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องมีชุด ซิงโครไนซ์ เข้ากับระบบของการไฟฟ้า จากผลการวิจัย จะเห็นว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้จริง สามารถ ผลิตไฟฟ้าได้ สูงสุด ที่ 25.75 กิโลวัตต์ โดยที่สภาวะทางไฟฟ้าของมอเตอร์ สามารถทำงานได้ปกติ

ระบบส่งถ่ายกำลังระบบส่งถ่ายกำลัง (Gear box) ผู้วิจัยได้เลือกระบบส่งถ่ายกำลังเป็น Brevini Planetary Gearbox เนื่องจากเหตุผลดังนี้ คือ

1. มีน้ำหนักเบากว่า Gearbox ธรรมดา 60 %
2. มีขนาดที่เล็กกว่า มีประสิทธิภาพสูงถึง 95 % แต่ Gearbox ธรรมดาอยู่ที่ 50 %
3. ทนแรงบิดได้สูงมาก
4. ติดตั้งง่ายใช้พื้นที่น้อย

เนื่องจากบนหัวเสาชุดผลิตไฟฟ้ามีพื้นที่น้อยในการติดตั้ง และต้องการให้มีน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูง ต้องทนแรงบิดได้สูงมาก เพราะพื้นที่ของการกวาดของใบมีขนาดมากกว่า 300 ตารางเมตร จากผล การทดลอง ระบบส่งถ่ายกำลัง ชุด Gearbox ทำงานได้ดี สามารถรับแรงบิดของกังหันลมได้ และใช้งานตามอัตราทด ที่ 32 รอบ ต่อ 1000 รอบ

ระบบปรับหมุน ใช้ Warm Gear อัตราทด 1 รอบต่อ 10รอบ และ นำมาต่อพ่วงกับชุดมอเตอร์เกียร์ อัตราทด 1 รอบต่อ 50 รอบ จึงเป็น มอเตอร์หมุน 500 รอบ ทำให้ Warm Gear หมุน 1 รอบ จากการทดลอง ผู้วิจัยใช้ ชุดมอเตอร์ Warm Gear ทั้งหมด 3 ชุด ติดตั้งห่างกันทำมุม 120 องศา มอเตอร์ 1 ชุด ต่อกลับเฟส กันอยู่ ซึ่งจากการทดลอง ใช้งานจริง เราสามารถใช้ Warm Gear ทดแทน Brevini Planetary Gearbox ซึ่งชุด Warm Gear ราคาถูกกว่า กันถึง 10 เท่า และ ยังหาได้ซื้อง่าย มีขายทั่วไป แต่ถ้าเป็น Brevini Planetary Gearbox ต้องนำเข้า ใช้เวลาในการสั่ง ประมาณ 4 เดือน

ชุด Ring Gear ผู้วิจัยใช้ ชุดเฟืองเอวของรถแม็คโคร ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย

ระบบควบคุม จากการวิจัย เราสามารถใช้ การควบคุมแบบอัตโนมัติ (Auto) และแบบควบคุมเอง (Manual)

ระบบ อัตโนมัติ (Auto) ระบบคอมพิวเตอร์ จะเป็นตัวประมวลผล และทำเองทั้งหมด ตั้งแต่วัดความเร็วลม ปรับกังหันลมผลิตไฟฟ้า เข้าหาทิศทางแนวลม ทำการเลือกตัวเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า ว่าตัวไหนเหมาะสม ตลอดจนเลือกผลิตกระแส หรือหยุดจ่ายไฟฟ้า

ระบบ ควบคุมเอง (Manual) เราสามารถ ควบคุมการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าจากห้องควบคุม ได้โดยไม่มี Interlock ใดๆ ทั้งสิ้น

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ถึงแม้จะดำเนินไปได้ส่วนใหญ่ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เป็นเป็นงานวิจัยที่เริ่มต้นการพัฒนาสร้างกังหันลมความเร็วต่ำที่เหมาะสมกับพฤติกรรมและลักษณะของกระแสลมในประเทศ ในงานวิจัยจึงมีข้อเสนอแนะ ข้อควรพิจารณา และสิ่งที่ควรปรับปรุง ดังนี้

การสร้างกังหันลมที่เหมาะสมกับสถานที่ใดถ้าต้องการประสิทธิผลสูงสุด มีความจำเป็นต้องศึกษาความเร็วลม ณ สถานที่นั้นๆ อย่างละเอียดรวมถึงการศึกษาถึงตัวแปรที่มีความแปรปรวนที่สูงมากในประเทศไทย

การออกแบบกังหันลมที่เหมาะสมกับประเทศไทยตามพฤติกรมและลักษณะของกระแสลม พบว่าจะแบ่งลมออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่มีความเร็วต่ำมากและมีกำลังน้อยแต่มีความถี่ที่เกิดขึ้นมาก ความเร็วลมในช่วงนี้จึงยากที่จะนำมาใช้ ข้อควรปรับปรุงของการออกแบบในช่วงความเร็วลมนี้เพื่อหาทางเก็บเกี่ยวลมที่มีปริมาณมากเกิดขึ้นเกือบตลอดเวลาทุกวันควรมีการออกแบบชุดกำเนิดไฟฟ้าแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) ร่วมด้วย ช่วงที่สองเป็นช่วงของลมที่กำลังมากพอที่จะผลิตไฟฟ้าและมีความถี่มากพอ ช่วงความเร็วนี้กังหันลมในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้เก็บเกี่ยวพลังงานลมในช่วงนี้ได้ดี และช่วงที่สามคือช่วงที่ลมมีความเร็วลมสูงมากเกินไปจนอาจทำให้เกิดความเสียหายที่กังหันลม การออกแบบกังหันลมต่อไปต้องพิจารณาตัวแปรของความแปรปรวนของลมกรรโชกเพิ่มขึ้น การออกแบบแบบนี้จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสู่สายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ในปริมาณมากขึ้นและมีความต่อเนื่องมากขึ้น

นอกจากนี้ในการออกแบบกังหันลมควรทำให้เป็นระบบที่ง่ายลดความซับซ้อน ที่ทำได้เองโดยคนไทย เหมือนกับร้านซ่อมจักรยาน ซ่อมรถจักรยานยนต์ หากโดยทำได้เช่นนั้นแล้วจะเป็นประโยชน์สูงสุดต่อประเทศชาติ ที่คนไทยสามารถทำเองใช้เองได้

การสร้างกังหันลมทดสอบจากการวิจัยนี้ได้ผลจริง มีประโยชน์จริง ใช้ได้จริง แต่มีความจำเป็นต้องศึกษา การวิจัยต่อไปควรจะมีการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยนี้ ซึ่งควรจะทำเป็นระยะยาว และทำหลายที่ โดยเสนอแนะว่า ประโยชน์จากลม ไม่ควรจะเป็นเรื่องของไฟฟ้าอย่างเดียว แต่ควรจะหาประโยชน์จากพลังงานลมในการปั้มน้ำขึ้นสูงเก็บไว้ในรูปแบบพลังงานศักย์ ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย หรือหาทางแปรสภาพพลังงานไปเป็นความเย็น และไปเป็นการทำประโยชน์อย่างอื่นที่ไม่ต้องเก็บไว้ในรูปแบบของแบตเตอร์รี่ หรือไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

รายการอ้างอิง

1. Siegfried Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. 1998.
2. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. *http://www.egat.co.th* 2012; Available from: http://www.egat.co.th
3. ความรู้เกี่ยวกับ Wind turbine. *http://www.thaiwindturbine.com,*. 2012.
4. Erich Hau, *Wind Turbines, Fundamentals, Technology, Application, Economics, 2nd edition*. 2006.
5. กระทรวงพลังงาน. *http://www.dede.go.th*. 2010 [cited 2012 24 Aug]; Available from: http://www.dede.go.th.
6. พลังงานลม. *http://www.pumpvr.com,*. 2010.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ : ธีระศักดิ์ ชำนาญดี

Mr. Therasak Chamnamdee

ข้อมูลส่วนบุคล

อายุ : 45 ปี

วัน/เดือน/ปี เกิด : 10 / เมษายน / 2513

สัญชาติ : ไทย

เชื้อชาติ : ไทย

ประวัติทางการศึกษา

2549 : บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง

สาขาการจัดการ

2547 : วิทยาศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

โปรแกรมวิชา : เทคโนโลยีอุตสาหกรรม แขนงเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม

ประวัติการทำงาน

2553 - ปัจจุบัน : ที่ปรึกษา บริษัท เดชา เดชาไบโอกรีน จำกัด

โรงงานผลิตไฟฟ้าชีวมวล ขนาด 7.5 เมกะวัตต์

2552 - 2554 : ที่ปรึกษา บริษัท เบต้า เอ็นจิเนียริ่งจำกัด

โรงงานผลิตไฟฟ้าจากกังหันลม

2550 - ปัจจุบัน : กรรมการบริหาร บริษัท เครฟเวอร์ ไบร์ท จำกัด

2546 – 2549 : วิศวกร บริษัท พี ซี แอล โฮลดิ้ง จำกัด

2543 – 2546 : ผู้จัดการแผนก เครื่องมือวัด บริษัท โอจิเปเปอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University